



Innovative Abluftreinigung in der Tierhaltung

Schriftenreihe, Heft 2/2017



Machbarkeitsstudie zur Prüfung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen der industriellen Abluftreinigung und innovativer Abluftreinigungsverfahren zur Minderung von Bioaerosol- und Geruchsemissionen aus der Geflügelhaltung

Doris Grahn, Torsten Puritz, Falk Rebbe, Anja Köhler

1	Einleitung und methodische Vorgehensweise	10
1.1	Einleitung.....	10
1.2	Methodische Vorgehensweise.....	10
1.3	Begriffsdefinition	11
2	Normative Anforderungen an die Abluftreinigung	11
2.1	Vorgaben zum Schutz und zur Vorsorge schädlicher Umwelteinwirkungen	12
2.1.1	Vorgaben zum Schutzanspruch (Immissionsschutz)	12
2.1.2	Vorgaben zur Vorsorge (Emissionsminderung)	13
2.2	Anforderungen an die Abluftreinigung	14
3	Geflügelhaltung	15
3.1	Verfahren der Geflügelhaltung	15
3.2	Lüftung von Geflügelställen	17
3.2.1	Zu- und Abluftführung.....	17
3.2.2	Luftführung Stallraum	17
3.2.3	Einflussfaktoren und Regelgrößen der Stalllüftung	18
4	Rohgasanalyse	19
4.1	Qualitative Analyse der Emissionen aus Geflügelhaltungsanlagen.....	19
4.1.1	Bioaerosole	19
4.1.1.1	Definition	19
4.1.1.2	Charakteristika der Bioaerosole	20
4.1.1.3	Zielwerte für die Emissionsminderung.....	23
4.1.1.4	Summen- und Leitparameter für Bioaerosole	24
4.1.2	Gerüche.....	25
4.1.2.1	Definition und Charakteristika.....	25
4.1.2.2	Zielwerte für die Emissionsminderung.....	25
4.1.3	Weitere Bestandteile im Rohgas	25
4.1.3.1	Ammoniak	25
4.1.3.2	Staub.....	26
4.1.3.3	Spurengase	26
4.2	Quantitative Analyse der Emissionen aus Geflügelhaltungsanlagen.....	26
4.2.1	Staub/Bioaerosole	26
4.2.2	Geruch.....	28
4.2.3	Ammoniak	29
4.3	Analyse der spezifischen Anlagen- und Betriebsparameter in Geflügelställen.....	29
4.3.1	Volumenstrom	29
4.3.2	Relative Luftfeuchtigkeit	30
4.3.3	Temperatur.....	31
4.4	Zusammenfassung der Abluftbedingungen für die Auswahl der Abluftreinigungstechnik.....	31
5	Abluftreinigungsverfahren	33
5.1	Methodik zur Bewertung.....	33
5.2	Kenngrößen für die Auswahl von Abluftreinigungsverfahren.....	33
5.3	Übersicht Abluftreinigungsverfahren	34
5.3.1	Physikalische Verfahren	36
5.3.2	Biologische Verfahren	36
5.3.3	Thermische Verfahren.....	37
5.3.4	Chemische Verfahren.....	37
5.3.5	Innovative Verfahren	37
5.3.6	Kombination von Abluftreinigungsverfahren.....	38
5.4	Kosten der Abluftreinigung	38

5.5	Bewertung der Abluftreinigungsverfahren	39
6	Verfügbare Systeme der Abluftreinigung	42
6.1	Abluftreinigung in der Geflügelhaltung.....	42
6.1.1	DLG-zertifizierte Abluftreinigungssysteme.....	42
6.1.2	Reinigungsleistung	44
6.1.3	Kenngößen Abluftbehandlung.....	45
6.1.4	Verfügbare Anlagen ohne DLG-Zertifizierung	45
6.2	Forschungsstand Abluftreinigungsverfahren in der Geflügelhaltung	46
6.3	Weitere Verfahren aus Anlagen mit vergleichbarem Emissionspotenzial.....	47
6.3.1	Abluftreinigung in der Tierhaltung.....	47
6.3.2	Anlagen Abfallverwertung.....	50
6.3.2.1	Rohgasanalyse und Reduktionsziel	50
6.3.2.2	Abluftreinigungsanlagen	50
6.3.3	Anlagen der Lebensmittelindustrie	52
6.3.3.1	Rohgasanalyse und Reduktionsziel	52
6.3.3.2	Abluftreinigungsanlagen	52
6.4	Bewertung DLG-zertifizierter und bestehender Abluftreinigungskonzepte	53
6.4.1	Abscheidung partikelförmiger Verunreinigungen	53
6.4.2	Abscheidung von Gerüchen	54
6.4.3	Abscheidung von Ammoniak	55
7	Mögliche Verfahren und Eignung für die Geflügelhaltung	55
7.1	Verfahren zur Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen/Bioaerosolen.....	56
7.1.1	Nassarbeitende Abscheider	57
7.1.1.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	57
7.1.1.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	58
7.1.1.3	Venturiwäscher.....	59
7.1.1.4	Verfahrensschwächen	62
7.1.1.5	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung	62
7.1.2	Filternde Abscheider.....	62
7.1.2.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	62
7.1.2.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	63
7.1.2.3	Verfahrensschwächen	64
7.1.2.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung	64
7.2	Verfahren zur Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen	64
7.2.1	Physikalische und chemische Absorption.....	64
7.2.1.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	64
7.2.1.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	67
7.2.1.3	Verfahrensschwächen	67
7.2.1.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung	67
7.2.2	Biowäscher.....	67
7.2.2.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	67
7.2.2.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	68
7.2.2.3	Verfahrensschwächen	68
7.2.2.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung	68
7.3	Verfahren zur Abscheidung von Gerüchen.....	69
7.3.1	Adsorptionsfilteranlagen	69
7.3.1.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	69
7.3.1.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	69
7.3.1.3	Verfahrensschwächen	70
7.3.1.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung	70
7.3.2	Biofilter	70
7.3.2.1	Erläuterung Verfahrensprinzip	70

7.3.2.2	Anwendung und Abscheideleistung.....	70
7.3.2.3	Verfahrensschwächen	71
7.3.2.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung.....	71
7.3.2.5	Optimierung von Biofiltern	71
7.3.3	Oxidation im „kalten“ Plasma.....	72
7.3.3.1	Erläuterung Verfahrensprinzip.....	72
7.3.3.2	Bewertung der Einsatzmöglichkeit des Verfahrens	73
7.3.3.3	Stand der Forschung.....	74
7.3.3.4	Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung.....	74
8	Optimierte Abluftreinigung für die Geflügelhaltung.....	75
8.1	Optimale Gestaltung von Abluftreinigungsanlagen für Geflügelhaltungsanlagen	75
8.1.1	Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen	75
8.1.2	Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von Ammoniak	75
8.1.3	Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von Gerüchen	75
8.1.4	Kombination von Verfahren der Abluftreinigung	76
8.2	Auslegung eines 3-stufigen Abluftreinigungskonzeptes	76
8.2.1	Stufe 1: Auslegung für die Abscheidung von partikelförmigen Abluftinhaltsstoffen	76
8.2.2	Stufe 2: Auslegung für die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen	78
8.2.3	Stufe 3: Auslegung für die Abscheidung von Gerüchen	78
8.2.4	Betriebskosten.....	78
8.3	Lösungsansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit	79
9	Zusammenfassung und Ausblick	80
9.1	Zusammenfassung	80
9.2	Forschungsbedarf	82
9.3	Ausblick.....	83
10	Literatur.....	84
	Anhang: Explosionsschutz bei der Abscheidung partikelförmiger Emissionen	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteil der Haltungsformen der Legehennenplätze in Deutschland und Sachsen (STLA 2016, Destatis 2015).....	16
Abbildung 2:	Zu- und Abluftsysteme und Luftführung von Zwangslüftungen der Geflügelhaltung	18
Abbildung 3:	Anteile Partikelgrößen im Rohgas für Hähnchenmast und Legehennen (Bodenhaltung), Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2009–2016)	22
Abbildung 4:	Anteile Partikelgrößen im Reingas für Hähnchenmast und Legehennen (Bodenhaltung), Datengrundlage: Prüfdaten DLG	23
Abbildung 5:	Darstellung der Staubkonzentration in Abhängigkeit vom Volumenstrom, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2009–2016).....	27
Abbildung 6:	Staubkonzentration und Partikelverteilung, Datengrundlagen: Prüfdaten (DLG 2009–2016).....	28
Abbildung 7:	Schwankungsbreite Volumenstrom in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Lebendmasse (Datengrundlage DIN 18910 und Prüfdaten DLG 2009-2016)	30
Abbildung 8:	Rohgasbedingungen Geflügelhaltung, Basis Prüfdaten DLG (2009–2016)	31
Abbildung 9:	Investitions- und Betriebskosten verschiedener Abluftreinigungsverfahren in Relation zum Median über die Gesamtanlagen in %	39
Abbildung 10:	Abscheideleistung DLG-geprüfter Abluftreinigungsanlagen für Geflügelhaltung (Datengrundlage: Prüfdaten DLG 2009–2016)	45
Abbildung 11:	Rohgas- und Reingaskonzentration Geruch für ARA in der Schweinehaltung, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2006–2016).....	49
Abbildung 12:	Abscheidegrad ARA Geruch in der Schweinehaltung, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2006–2016).....	49
Abbildung 13:	Darstellung des Einsatzes von Entstaubungsanlagen – Abscheidegrad in Abhängigkeit der Korngröße (FRITZ et al. 1990).....	57
Abbildung 14:	Wirkprinzip Nassabscheidung (Filtracon GmbH 2015).....	58
Abbildung 15:	Prinzipieller Aufbau eines Venturiwäschers (UBA 2003).....	59
Abbildung 16:	Nassabscheider vom Typ StWV und StZV, Fabrikat Handte Umwelttechnik GmbH, Tuttlingen (HANDTE 2006).....	60
Abbildung 17:	Arbeitsweise REITHER-Venturiwäscher (REITHER 2012)	61
Abbildung 18:	Arbeitsweise BAYER-REITHER-Rohrspalt-Venturiwäscher (REITHER 2012)	61
Abbildung 19:	Wirkprinzip Oberflächenfiltration, Tiefenfiltration, Precoating (HANDTE 2010).....	63
Abbildung 20:	Prinzipiskizze Sprühturmwäscher (eigene Darstellung)	65
Abbildung 21:	Schematischer Aufbau eines NTP-Plattenreaktors (KOSCH 2005; Präsentation BTU 2005)	73
Abbildung 22:	Zieldreieck umweltgerechte Tierhaltung.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht typischer Haltungsformen zwangsbelüfteter Ställe für Geflügel (VDI 4255 Blatt 3)	16
Tabelle 2: Einflussfaktoren und Anforderungen an Lüftungsanlagen in Winter und Sommer nach DIN 18910-1 (Entwurf 2016 und DLG 2003)	18
Tabelle 3: Einteilung der spezifischen Staubeigenschaften in Abhängigkeit der Partikelgröße (PM) (TA Luft, ROSENTHAL 2007)	21
Tabelle 4: Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen der Partikelgrößenverteilung von Stäuben/Bioaerosolen der Tierhaltung im Rohgas	22
Tabelle 5: Darstellung der Explosionsfähigkeit von staubförmigen Luftverunreinigungen in Geflügelställen (Staub-Ex 2016)	26
Tabelle 6: Rohgaszusammensetzung und Betriebsparameter und Folgen für die Auswahl der Abluftreinigungsverfahren	32
Tabelle 7: Übersicht der Abluftreinigungsverfahren zur Abscheidung tierspezifischer Parameter (VDI 4255 Blatt 1 Tabelle 2 [ergänzt])	35
Tabelle 8: Bewertung der physikalischen Abluftreinigungsverfahren in Bezug auf die zu reinigenden Stoffe und die Anwendungsgrenzen für die Geflügelhaltung	40
Tabelle 9: Bewertung der biologischen, thermischen und chemischen Abluftreinigungsverfahren in Bezug auf die zu reinigenden Stoffe und die Anwendungsgrenzen für die Geflügelhaltung	41
Tabelle 10: DLG-geprüfte Abluftreinigungssysteme (DLG 2009-2016)	43
Tabelle 11: Reinigungsleistung der DLG-geprüften Anlagen (DLG 2009–2016)	44
Tabelle 12: Forschungsanlagen Geflügelhaltung, Zwischenstand der Ergebnisse (HAHNE 2015, 2016)	47
Tabelle 13: Stand der Technik und Wirksamkeit der Abluftreinigungsanlagen der Tierhaltung (BAT 2015)	48
Tabelle 14: Stand der Technik der Abluftreinigung für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (UBA 2006, ergänzt)	51
Tabelle 15: Stand der Technik für Anlagen der Lebensmittelindustrie (UBA 2005, ergänzt)	52
Tabelle 16: Zusammenfassung möglicher Forschungsschwerpunkte für den gezielten Einsatz von Abluftreinigungsverfahren zur Minderung von Bioaerosolen und Gerüchen	82
Tabelle 17: Einteilung von Staubexplosionsklassen in Abhängigkeit des K_{st} -Wertes (HVBG 1997)	91
Tabelle 18: Brenn- und Explosionskenngrößen (Staub-Ex 2016)	92

Abkürzungsverzeichnis

ADS	Adsorption
AEL	Assoziierte Emissionswerte, rechtsverbindliche Werte
AGW	Arbeitsplatzgrenzwerte
ARA	Abluftreinigungsanlage
b.v.	Besloten Vennootschap
BF	Biofilter
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwert
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BVT	Beste Verfügbare Technik
BW	Biowäscher (Absorber)
CW	Chemische Wäsche (Absorber)
DBD	Dielectric Barrier Discharge, dielektrische Barriereentladung
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
EB	eingesetzt als Endbehandlung mit Vorabscheider
EC	Electronical Commutation
EF	Elektrofilter
FU	Frequenzumrichter
GF	Gewebefilter
GIRL	Geruchsimmissionsrichtlinie
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HCl	Salzsäure
HEAF	Hochleistungsfilter
HEAP	Absolutfilter
HEPA	High Efficiency Particulate Air
HF	Fluorwasserstoffsäure
IED	Industrial Emissions Directive (Industrieemissionsrichtlinie)
k. A.	keine Angabe
KNV	Katalytische Nachverbrennung
KRdL	Kommission zur Reinhaltung der Luft
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KW	Kohlenwasserstoffe
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MBA	Mechanisch biologische Abfallbehandlung
MKA	Massenkraftabscheider
MRSA	methicillinresistenter Staphylococcus aureus (Keim)
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfat
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
NF	Nebelabscheider
NH ₃	Ammoniak
NSA	Nassabscheider (physikalische Wäscher)

NTP	nicht thermisches Plasma
OW	Oxidierende Wäsche
PP	Kunststoff
RBW	Rieselbettreaktor
RTO/RNV	Regenerative thermische Oxidation
SKOV	Zellulosefüllkörper
SO ₂	Schwefeldioxid
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TNV	Thermische Nachverbrennung
TP	Tierplätze, hier immer für Mastplatz verwendet
TRBA	Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe
VOC	Flüchtige organische Verbindung (volatile organic compound)

1 Einleitung und methodische Vorgehensweise

1.1 Einleitung

Die Luft von Ställen zur Geflügelhaltung enthält eine Vielzahl von Verunreinigungen wie Gase, Stäube und Bioaerosole. Mit der Abluft (Emissionen) gelangen diese Stoffe in die Umgebung, wo sie mögliche Belästigungen, gesundheitliche Belastungen und die Übertragung von Infektionserregern auslösen können. Die freigesetzten Emissionen und damit verbundenen Wirkungen können neben der Vermeidung der Entstehung grundsätzlich durch den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen gemindert werden. Der Einbau von Abluftreinigungsanlagen ist für die Geflügelhaltung und für größere Geflügelanlagen bisher jedoch nicht generell vorgeschrieben. In Deutschland werden mehr als 201 Abluftreinigungsanlagen in der Geflügelhaltung betrieben (Stand: Ende 2013). Dabei handelt es sich um ein- und mehrstufige Verfahren, die zur Minderung von Ammoniak, Staub- und Geruchsemissionen eingesetzt werden.

Aufgrund der haltungstechnischen Besonderheiten in der Geflügelhaltung liegen für diese Tierart bisher jedoch nur fünf Prüfberichte für Abluftreinigungsanlagen der Hähnchenmast und ein Prüfbericht für die Legehennenhaltung zur Zertifizierung der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft e. V. (DLG) vor. Drei weitere Verfahren für die Legehennenhaltung und eines für die Hähnchenmast befinden sich in der Prüfung. Diese Prüfung konkretisiert die Anforderungen der VDI-Richtlinien 3477 und 3478, die den allgemeinen Stand der Technik dokumentieren und die Einschätzung der Eignung bestimmter Abluftreinigungstechniken erlauben. Die bisher geprüften und derzeit am Markt eingesetzten Abluftreinigungssysteme für die Geflügelhaltung sind insbesondere für die Reduzierung von Gerüchen und Bioaerosolen nicht ausgereift. Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der vorliegenden Studie, den Wissensstand der gegenwärtig betriebenen Abluftreinigungssysteme in der Geflügelhaltung darzustellen und Lösungsansätze für den Einsatz verbesserter Systeme aufzuzeigen. Dabei sind die mögliche Optimierung bestehender Systeme und der Einsatz neuer Systeme zur Abluftreinigung zu bewerten.

Die große Herausforderung besteht in der Tatsache, dass in Tierhaltungsanlagen die Abluftreinigungs- und die Lüftungstechnik nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Die wesentlichen technologischen Unterschiede bei der Auslegung von Lüftungs- und Abluftreinigungsanlagen müssen hier berücksichtigt und miteinander kombiniert werden. Zusätzlich ist ein entscheidender Grundsatz der Abluftreinigungs- und Entstaubungstechnik, die Erfassung von Emissionen direkt an ihrer Entstehungsquelle, für Tierhaltungsanlagen nicht anwendbar, weil ein Großteil der Stallfläche letztendlich als Emissionsquelle betrachtet werden muss. Der Einsatz von geeigneten Erfassungselementen, um den Absaugvolumenstrom und die Anlagengröße zu optimieren und damit eine Verdünnung durch Falschluff weitestgehend zu vermeiden, ist daher nicht möglich.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Daraus ergibt sich folgende methodische Vorgehensweise für die Bearbeitung:

Teil 1: Anforderungen an die Abluftreinigung in der Geflügelhaltung

- Darstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Anforderungen des Immissionsschutzes (Schutz und Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen) (Kap. 2)
- Verfahren der Geflügelhaltung und Lüftung von Geflügelställen (Kap. 3)
- Analyse der Abluft der Geflügelställe (Kap. 4)
 - Quantitative und qualitative Analyse der Emissionen der Geflügelhaltung
 - Analyse der Rohgasbedingungen und Betriebsparameter

Teil 2: Abluftreinigungsverfahren und -anlagen

- Allgemeine Übersicht der Abluftreinigungsverfahren (ARA) (Kap. 5)
- Verfügbare Abluftreinigungsanlagen (Kap. 6)
 - Stand der Technik ARA der Geflügelhaltung
 - Stand der Forschung ARA der Geflügelhaltung
 - Anlagen mit vergleichbarem Emissionspotenzial (Tierhaltung, Abfallbehandlung, Lebensmittelindustrie)
 - Bewertung genutzter Abluftreinigungstechnologien
- Beschreibung möglicher Abluftreinigungsverfahren und Bewertung der Eignung für die Geflügelhaltung (Kap. 7)
- Auslegung einer optimierten Abluftreinigungsanlage für eine Geflügelhaltung und Darstellung von Lösungsansätzen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit (Kap. 8)
- Zusammenfassung und Ausblick (Kap. 9)

1.3 Begriffsdefinition

In der vorliegenden Studie werden folgende Begriffe verwendet:

■ Bioaerosole

Als Bioaerosole werden generell nur partikelgebundene Bioaerosole bezeichnet, d. h. luftgetragene Partikel biologischer Herkunft (s. auch Definition im Kap. 4.1.1.1).

■ Rohgas/Reingas

Mit Rohgas oder Abluft wird der beladene Luftvolumenstrom vor der Abluftreinigung und mit Reingas oder gereinigter Abluft der Volumenstrom nach der Abluftreinigung bezeichnet.

■ Abluft

Mit Geruchs- und Schadstoffen verunreinigter Gasstrom oder Abluftstrom der Geflügelhaltung, der in die freie Atmosphäre geleitet wird. Es wird generell von Abluft, nicht von Abgas gesprochen.

■ Geflügelhaltung

Es wird generell von der Geflügelhaltung gesprochen und dabei z. T. zwischen Masthähnchenhaltung und Legehennenhaltung differenziert. Andere Geflügelhaltungsformen werden nicht betrachtet.

2 Normative Anforderungen an die Abluftreinigung

Zur Herleitung der Notwendigkeit des Einsatzes von Abluftreinigungsanlagen und der erforderlichen Reinigungsleistung dieser Anlagen sind die Schutzansprüche und daraus resultierende Emissionsbegrenzungen und die ohnehin einzuhaltenen normativen Anforderungen an die Emissionsminderung im Sinne der Vorsorge entscheidend. Zusätzlich werden bereits konkrete Anforderungen zum Einsatz von Abluftreinigungsanlagen für bestimmte Produktionseinrichtungen der Tierhaltung und normative Anforderungen an die Reinigungsleistung vorgegeben, welche zu beachten sind.

Diese normativen Vorgaben werden nachfolgend zusammengefasst.

2.1 Vorgaben zum Schutz und zur Vorsorge schädlicher Umwelteinwirkungen

Konkrete Anforderungen zum Schutz und zur Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen werden im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bzw. den nachrangigen Verwaltungsvorschriften, insbesondere der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) und der Geruchsimmisionsrichtlinie (GIRL) geregelt. Zusätzlich regeln auf Länderebene Verwaltungsvorschriften und Erlasse immissionsschutzrechtliche Aspekte wie den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen (s. Kap. 2.2).

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) verpflichtet nach § 5 Abs. 1 Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen diese so zu errichten und zu betreiben, dass u. a. schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können. Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind nach § 22 BImSchG so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen nach dem Stand der Technik vermieden bzw. nicht vermeidbare Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

Für genehmigungspflichtige Anlagen wird die TA Luft als verbindliches Regelwerk für die im Genehmigungsverfahren beteiligten Behörden der Länder angewandt. Dabei konkretisiert die TA Luft einerseits

- Vorgaben zum Schutzanspruch vor schädlichen Umwelteinwirkungen (Immissionsschutz) und andererseits
- Anforderungen zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen (Emissionsminderung), u. a.
 - Bauliche und betriebliche Anforderungen zur Emissionsminderung (Nr. 5.4 der TA Luft),
 - Mindestanforderungen zur Emissionsbegrenzung (Nr. 5.2 der TA Luft).

Schutzansprüche sind mit den Bedingungen des jeweiligen Standortes verknüpft. Aus ihnen lassen sich keine generellen Vorgaben für die notwendige Abluftreinigung ableiten. Emissionsbegrenzungen und Emissionsminderungsmaßnahmen zur Vorsorge richten sich nach dem Stand der Technik und gelten generell für jeden Standort. Insofern stellen sie Mindestanforderungen an die Auslegung und den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen. Die Einhaltung der Vorgaben zur Vorsorge führen nicht zwangsläufig zur Einhaltung der Schutzansprüche. Im Genehmigungsverfahren für Geflügelhaltungsanlagen hängen Anforderungen an notwendige Abluftreinigungen daher im Regelfall von den konkreten Standortbedingungen ab.

Soweit die Nummern 5.2 oder 5.4 der TA Luft keine oder unvollständige Regelungen zur Begrenzung der Emissionen enthalten, sind bei der Ermittlung des Standes der Technik im Einzelfall BVT-Merkblätter oder Richtlinien oder Normen des VDI/DIN-Handbuches zur Reinhaltung der Luft als Erkenntnisquelle heranzuziehen (Nr. 5.1.1 TA Luft).

2.1.1 Vorgaben zum Schutzanspruch (Immissionsschutz)

Schutzansprüche werden für den Ort der Einwirkung definiert und sind somit von der Menge des emittierten Stoffes, dem Abstand von der Emissionsquelle und den Ausbreitungsbedingungen abhängig.

Zur Begrenzung der Belastungen aus der Geflügelhaltung resultierender Immissionen werden Schutzansprüche für Feinstaub, Staubdeposition, Ammoniak, Stickstoffdeposition und Gerüche definiert. Hieraus resultieren einzuhaltende Mindestabstände der Stallanlagen. Für Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), Kohlendioxid und Bioaerosole existieren keine konkreten rechtlichen Vorgaben zum Schutzanspruch.

Bioaerosole

Für Bioaerosole sind Wirkungsschwellen bisher unbekannt. Das Risiko für konkrete Gesundheitsgefahren ist nicht quantifizierbar, sodass die immissionsschutzrechtliche Schutzpflicht als Instrument der Gefahrenabwehr bisher nicht greift. Immissionswerte zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, die über die Vorsorgeanforderung des Minimierungsgebotes hinausgehen, und somit konkrete Reduzierungsziele können nicht abgeleitet werden (s. im Einzelnen Kap. 4.1.1.3). Die gesetzlichen Vorgaben zur Begrenzung mikrobieller Emissionen sind daher bislang eher allgemein formuliert.

Zur anlagenbezogenen umweltmedizinischen Bewertung wurde 2015 die VDI 4250 Blatt 1 veröffentlicht, relevante Messparameter werden im Entwurf der VDI 4250 Blatt 3 benannt. Mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen zur Gewährleistung eines Schutzanspruches werden derzeit über einen Vergleich der Anlagenzusatzbelastung mit einem sogenannten „Aufmerksamkeitswert“ (VDI 4250 Blatt 3) oder, soweit kein Aufmerksamkeitswert vorliegt, mit der natürlichen großräumigen Hintergrundbelastung bewertet.

Jede über den „Aufmerksamkeitswert“ oder die Hintergrundbelastung hinausgehende anlagenbedingte Zusatzbelastung wird als „hygienisch unerwünscht“ eingestuft. Jede Person ist vor einer solchen zusätzlichen Exposition zu schützen (VDI 4250 Blatt 1). Das hat zur Folge, dass der Einsatz geeigneter emissionsmindernder Maßnahmen zu prüfen und gegebenenfalls einzufordern ist.

Für die Bewertung im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren wurde hierzu eine mehrstufige Bewertungsmethode entwickelt und im LAI-Leitfaden (2014) festgeschrieben. Nach vorliegendem Entwurf zur Novellierung der TA Luft (Entwurf TA Luft 2015) wird die Bewertung von Bioaerosolen im Rahmen von immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen verbindlich. Hierzu ist ein gesonderter Anhang 10 in der neuen TA Luft vorgesehen, der die Vorgaben des LAI-Leitfadens übernimmt.

Der Kenntnisstand zur gesundheitlichen Wirkung mikrobieller Luftverunreinigungen auf den Menschen ist in der VDI 4250 Bl. 1 zusammengefasst. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bisher vorliegende Erkenntnisse zu Bioaerosolspektrum und Expositionshöhe sowie -zeiten und dessen Gesundheitsgefährdungen nicht genügend belegt sind, um eine Immissionsbewertung ableiten zu können. Daher dient die genannte Vorgehensweise sowie jede technische und organisatorische Maßnahme der Verbesserung der Prävention.

Geruch

Der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Gerüche wird in der Geruchsmissionsrichtlinie (GIRL) geregelt. Die GIRL legt das Beurteilungsverfahren und die Erheblichkeitsgrenzen für Geruchsbelästigungen zur Erfüllung der Schutzansprüche fest. Zur Bewertung wird in der GIRL als Kenngröße der Geruchsstoffimmission die Geruchshäufigkeit in Prozent der Jahresstunden vorgegeben. Mit der Novellierung der TA Luft wird die GIRL in die TA Luft integriert werden.

Gerüche aus Geflügelanlagen wirken aufgrund ihrer Geruchsqualität deutlich belästigender als Gerüche der Rinder- oder Schweinehaltung. Zur Bewertung wurden entsprechende Gewichtungsfaktoren differenziert nach der Geruchsqualität für die Ermittlung der Kenngröße der Geruchsstoffimmission eingeführt. Die Höhe der zulässigen Geruchsstoffimmissionen richtet sich nach dem jeweiligen Schutzanspruch der betroffenen Nutzung (s. Nr. 3.1 der GIRL 2008).

2.1.2 Vorgaben zur Vorsorge (Emissionsminderung)

Vorsorgeanforderungen werden in Abhängigkeit von der Art der Anlage und für einzelne Stoffparameter definiert.

Bauliche und Betriebliche Anforderungen

Für Geflügelanlagen werden in der Nr. 5.4.7.1 der TA Luft bauliche und betriebliche Anforderungen benannt, die der guten fachlichen Praxis entsprechen.

Weitere mögliche Emissionsminderungsmaßnahmen sind in folgenden VDI-Richtlinien aufgeführt:

- VDI 3894 Blatt 1 Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Haltungsverfahren und Emissionen Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde
- VDI 4255 Blatt 1 Bioaerosole und biologische Agenzien; Emissionsquellen und -minderungsmaßnahmen, Übersicht
- VDI 4255 Blatt 2 Bioaerosole und biologische Agenzien; Emissionsquellen und -minderungsmaßnahmen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Übersicht.

Es werden konkrete Anforderungen für das Management, die Fütterung, das Stallklima, die Entmistung und die Mistlagerung für die Geflügelhaltung vorgegeben.

Anforderungen an den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen

Derzeit gibt es keine bundeseinheitlichen Vorgaben zur Abluftreinigung oder Vorgaben, die unter bestimmten Bedingungen die Anwendung einer Abluftreinigungsanlage für die Geflügelhaltung fordern.

Mit dem Erlass des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV 2013), des Landes Schleswig-Holstein (MELUR 2014), des Landes Thüringen (TMUEN 2016 Entwurf) und den Erlässen in Niedersachsen (Niedersachsen 2013 und 2015) ist der Einsatz von Abluftreinigungsanlagen für große Anlagen der Geflügelhaltung (gem. Nr. 7.1 c) Spalten 1 und 2 der 4. BImSchV) im Einzelfall zu prüfen. Bei Neubau von Ställen der Spalte 1 ist prinzipiell sicherzustellen, dass eine Abluftreinigungseinrichtung nachträglich eingebaut werden kann. In Sachsen werden 84 Anlagen der Geflügelhaltung der Spalte 1 betrieben (Stand November 2014 (STLA 2016)).

Zukünftig wird mit der Novellierung der TA Luft (Entwurf TA Luft 2015) die Anwendung der BVT-Merkblätter über ergänzende sektorale Verwaltungsvorschriften, die die Bundesregierung nach § 48 BImSchG mit Zustimmung des Bundesrates erlässt, geregelt. Im Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken der Nutztierhaltung (BAT 2015, vorläufige BVT Schlussfolgerung) sind Abluftreinigungsanlagen als beste verfügbare Technik für zwangsbelüftete Ställe benannt.

Emissionsbegrenzungen

Emissionsbegrenzungen in der gefassten Abluft werden gem. Nr. 5.2 TA Luft für aus der Nutztierhaltung resultierende Stoffe Gesamtstaub und Ammoniak vorgegeben. Für Gesamtstaub liegt die einzuhaltende Emissionsgrenze nach Nr. 5.2.1 TA Luft bei einem Massenstrom von 200 g/h oder einer Emissionskonzentration von 20 mg/m³. Für Ammoniak liegt die Emissionsgrenze nach Nr. 5.2.4 TA Luft bei 150 g/h oder 30 mg/m³. Des Weiteren sollen für Anlagen zum Halten oder zur Aufzucht von Nutztieren Möglichkeiten geprüft werden, wie die Emissionen an Keimen und Endotoxinen durch dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen vermindert werden können (Nr. 5.4.7.1 TA Luft). Weitere Vorgaben zur Emissionsbegrenzung existieren nicht.

Zur Sicherstellung der Vorsorge der Emissionsbegrenzung für Bioaerosole sind im Einzelfall Prüfungen durch Sachverständige nach Nr. 4.8 der TA Luft zu erstellen (s. im Einzelnen Kap. 2.1.1). Die Entscheidung zur Emissionsbegrenzung durch den Einsatz einer Abluftreinigungsanlage ist im Ergebnis dieser Prüfung im Einzelfall zu treffen.

Die BVT-Schlussfolgerungen enthalten ebenso keine AEL (Assoziierte Emissionswerte, rechtsverbindliche Werte) für Gerüche, Bioaerosole und Staub. Für Ammoniak werden für Legehennen und Masthähnchen Emissionsfaktoren in kg NH₃/(TP*a) nach Haltungsverfahren und Techniken angegeben (BAT 2015).

2.2 Anforderungen an die Abluftreinigung

Bundeseinheitliche gesetzliche Vorgaben zur Reinigungsleistung von Abluftbehandlungsanlagen existieren nicht.

Konkrete Vorgaben zu Mindestanforderungen an die Reinigungsleistung der Anlagen werden im Erlass von Niedersachsen (MUEK 2015) und im Prüfrahen für die DLG-Zertifizierung (DLG 2015, s. hierzu Kap. 6.1) benannt. Konkret werden folgende Anforderungen gestellt, die insbesondere für Bioaerosole und Gerüche mit den verfügbaren Anlagen derzeit nicht erreicht werden (vgl. Kap. 6.1.2):

- Abscheidung von Staub von 70 % oder mehr (jeweils für Gesamtstaub, PM10 und PM2,5)
- Abscheidung von Ammoniak von 70 % oder mehr einschließlich einer Stickstoffentfrachtung von 70 %
- Geruchsminimierung auf weniger als 300 GE/m³ ohne Rohgasgeruch im Reingas
- Optional für Bioaerosole: Gesamtbakterienzahl, mesophile Pilze und Leitkeim (variabel) von 70 % oder mehr

Zum Nachweis ist künftig ein elektronisches Betriebstagebuch zu führen. Weiterhin werden konkrete Vorgaben zur Nachweisführung und zu den Messanforderungen in den genannten Schriften gemacht.

3 Geflügelhaltung

3.1 Verfahren der Geflügelhaltung

In der Geflügelhaltung unterscheidet man je nach Produktionsrichtung, Tierart, Produktionsziel (Aufzucht, Mast, Eierzeugung) und Haltungsform verschiedene Haltungsverfahren. Eine Gesamtübersicht praxisüblicher Verfahren und Varianten enthält die VDI-Richtlinie 3894 Blatt 1, der Nationale Bewertungsrahmen (KTBL 2006) bzw. die BVT-Schlussfolgerungen (BAT 2015). Haltungsverfahren setzen sich aus den unterschiedlichen Modulen

- Lüftung (Zwangs- oder freie Lüftung),
- Entmistung (Kotband, Einstreu etc. inkl. Häufigkeit),
- Bodenbefestigung (z. B. Einstreu) und
- Fütterung (Geflügel immer Trockenfütterung mit automatischem Verteilsystem)

zusammen, die jeweils Einfluss auf die aus dem Stallbetrieb resultierenden Emissionen (Art und Umfang) haben.

Mögliche Ausführungen dieser Module und Emissionsanteile bzw. Emissionswirkungen werden in der VDI-Richtlinie 3894 Blatt 1 Tabelle 18 und den BVT-Schlussfolgerungen Tabellen 4-51 (Kleingruppenhaltung in Käfigen), Tabelle 4-55 (Tiefstreuverfahren für Legehennen), Tabelle 4-56 (Volierenhaltung für Legehennen) und Tabelle 4-64 (Masthähnchen) gelistet (BAT 2015). Den verschiedenen Modulen der Haltungsverfahren werden hierzu erreichbare Emissionen, angegeben als Emissionsfaktoren, zugeordnet. Dabei werden für die Komponenten Ammoniak, PM10 und Geruch Emissionsfaktoren angegeben.

Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich in Anlehnung an die Einordnung nach 4. BImSchV für große Anlagen mit mehr als 40.000 Tierplätzen i. V. m. der VDI-Richtlinie 4255 Blatt 3 auf die Legehennenhaltung und die Hähnchenmast. Es erfolgt keine separate Betrachtung von Puten (auch Truthühner genannt), Enten (Pekingenten), Strauße und Aufzuchtanlagen. Mit Stand 2015 sind bundesweit 84,1 % der Anlagen der Legehennenhaltung Betriebe mit weniger als 30.000 Tierplätzen für ca. 9,5 % der insgesamt gehaltenen Tiere. Mehr als 40.000 Tiere, was ca. 78,5 % der gesamten Tiere der Legehennen entspricht, werden in ca. 10,9 % der Anlagen gehalten (ECKHOF 2016).

Tabelle 1 gibt eine Übersicht typischer Haltungsformen. Sie sind als unterschiedliche Haltungsverfahren konzipierbar. Für die Legehennenhaltung sind vier Haltungsformen in Deutschland zugelassen (Bodenhaltung, Kleingruppenhaltung, Freilandhaltung und ökologische Erzeugung) und es werden 18 Haltungsverfahren unterschieden. Europaweit sind seit 2012 nur noch ausgestaltete Käfige und Bodenhaltungssysteme für die Legehennenhaltung (Voliere) zugelassen.

Die Mast von Hähnchen erfolgt fast ausschließlich in Bodenhaltung auf Einstreu. Für die Hähnchenmast unterscheidet man vier verschiedene Haltungsverfahren.

Tabelle 1: Übersicht typischer Haltungsformen zwangsbelüfteter Ställe für Geflügel (VDI 4255 Blatt 3)

Tierart	Haltungsform	Beschreibung
Legehennen	Bodenhaltung	9 Tiere/m ² ; Stallfläche ist mit Sitzstangen und Legenestern ausgestattet, bis zu 6.000 Hennen ohne Trennung, 1/3 der Fläche Einstreu, 2/3 für Aufnahme Kot, eine Ebene, mit und ohne Kaltscharrraum/Auslauf, Innenscharrraum, Kotgrube
	Bodenhaltung mit Volieren	18 Tiere/m ² in kleinen Gruppen; entspricht Bodenhaltung auf mehreren Ebenen, automatisierte Fütterungsanlage, Voliereninneres verfügt über Sitzstangen, Nester, innen liegender Scharrraum, Kotband
	Kleingruppen (Käfighaltung ausgestaltet)	Gruppen von ca. 65 Tieren, 12 Tiere/m ² , Einstreubereich, Nest und Sitzstangen, Kotband, Scharrmatten
	Freilandhaltung	4 m ² pro Tier für Auslauf verfügbar mit Bewuchs
	Ökologische Erzeugung	4 m ² pro Tier für Auslauf verfügbar mit Bewuchs, 6 Tiere/m ² im Stall, max. 3.000 Tiere/Stall, Höchstgrenze der Behandlungshäufigkeit mit konventionellen Medikamenten, Vorgaben zur Herkunft des Futters
Masthähnchen	Bodenhaltung ohne Funktionsbereiche	Weichholzspäne oder Strohhäcksel, gesamte Fläche eingestreut, maschinelle Entmistung mit und ohne Auslauf
	Bodenhaltung mit Funktionsbereichen	mit Kaltscharrraum bzw. Außenklimabereich, gesamte Fläche eingestreut

Die Verteilung der genutzten Haltungsformen der Legehennenhaltung bundesweit und in Sachsen ist Abbildung 1 zu entnehmen. Überwiegend wird die Bodenhaltung mit und ohne Voliere eingesetzt.

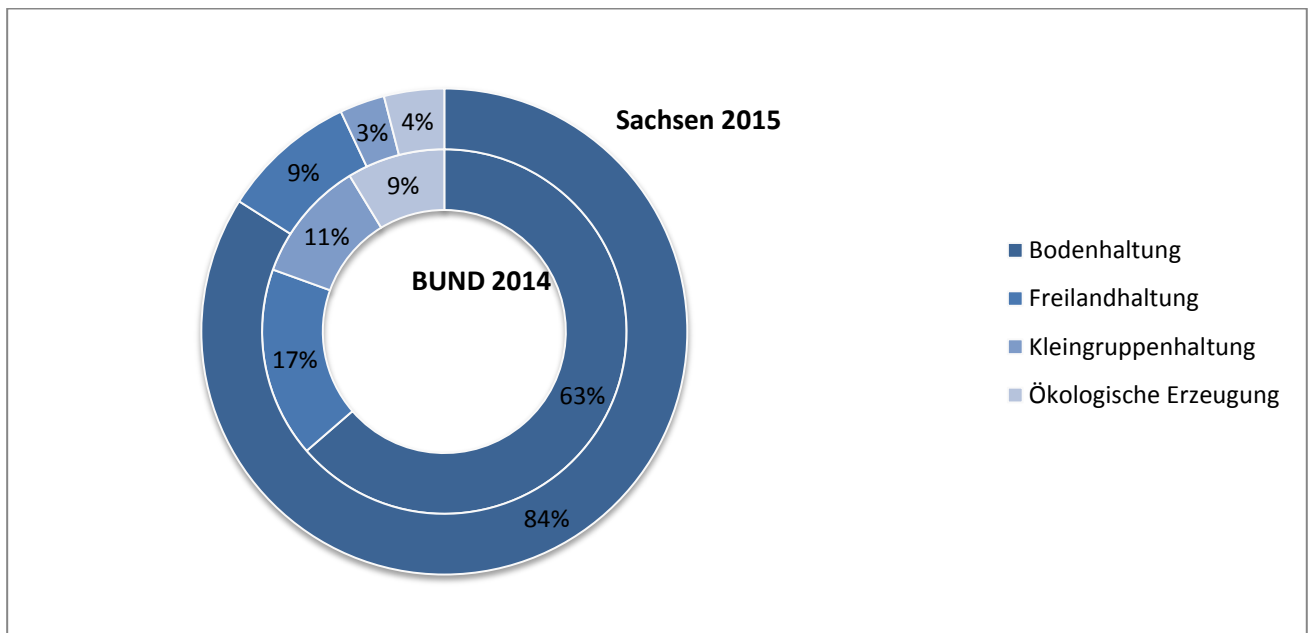


Abbildung 1: Anteil der Haltungsformen der Legehennenplätze in Deutschland und Sachsen (STLA 2016, Destatis 2015)

3.2 Lüftung von Geflügelställen

Abluftreinigungsverfahren lassen sich grundsätzlich nur bei Ställen mit Zwangslüftung einsetzen, weil die Abluft gefasst und über die Reinigungsanlage geleitet werden muss. In der Geflügelhaltung werden bei zwangsbelüfteten Ställen im Regelfall Unterdrucklüftungen eingesetzt. Grundsätzlich lassen sich Lüftungsverfahren nach der Zu- und Ablufführung und der Art der Luftführung im Stallraum unterscheiden.

3.2.1 Zu-und Ablufführung

Bei der Gestaltung der Zu- und Ablufführung der Zwangslüftung wird zwischen Strahllüftung und Verdrängungslüftung unterschieden. Bei der Strahllüftung wird die Zuluftführung über Düsen, Wand- oder Kanalelemente bzw. regelbare Lüftungsklappen zugeführt. Bei der Verdrängungslüftung strömt die Zuluft großflächig in den Stallraum, z. B. über Luftkanäle. Im Regelfall liegt eine Kombination beider Luftzuführungen vor. Die Art der Zu- und Ablufführung hat großen Einfluss auf die Raumströmung, die Luftgeschwindigkeit und damit der Freisetzung von Emissionen.

3.2.2 Luftführung Stallraum

Nach der Art der Luftführung im Stall lassen sich folgende Lüftungsarten unterscheiden (vgl. Abbildung 2):

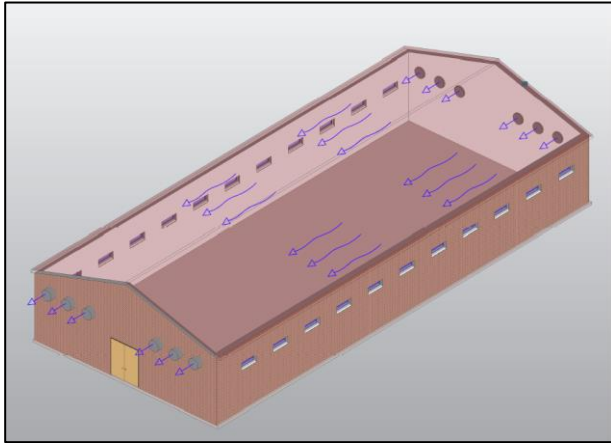
- Firstlüftung
- Querlüftung
- Längslüftung
- Tunnellüftung

Weiterhin ist eine Kombination dieser Lüftungsarten möglich.

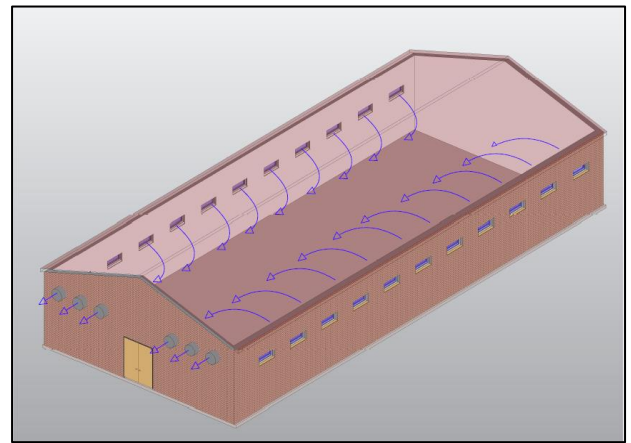
Bei der Firstlüftung wird die Abluft senkrecht über Abluftschächte über Dach an die Atmosphäre abgegeben. Die Zuluft wird über die Traufseite zugeführt. Für die Querlüftung wird die Zuluft über die eine Seitenfront des Stalles über regelbare Zuluftklappen angesaugt und die Abluft über die andere Seitenfront herausgeführt. Bei der Längslüftung werden die Ventilatoren zur Absaugung nicht an der Seitenfront, sondern am Giebel des Stalles installiert. Die Zuführung der Frischluft erfolgt über beide Seitenfronten. Als Tunnellüftung bezeichnet man ein Lüftungssystem, bei dem Zuluft über den Giebel zugeführt und die Abluft zur anderen Giebelseite abgesaugt wird. Hierbei werden höhere Luftgeschwindigkeiten im Vergleich zur Firstlüftung benötigt.

Für die Installation von bisher verfügbaren Abluftreinigungssystemen eignet sich aufgrund der Ablufführung über den Giebel die Längs- und die Tunnellüftung. Der Einbau von Kühlsystemen zur Zuluftkühlung ist bei der Tunnellüftung aufgrund der Zuluftführung über den Giebel einfacher realisierbar. Die Luftführung im Stallraum hat großen Einfluss auf die notwendige Luftrate, die Luftgeschwindigkeit und damit die Emissionen.

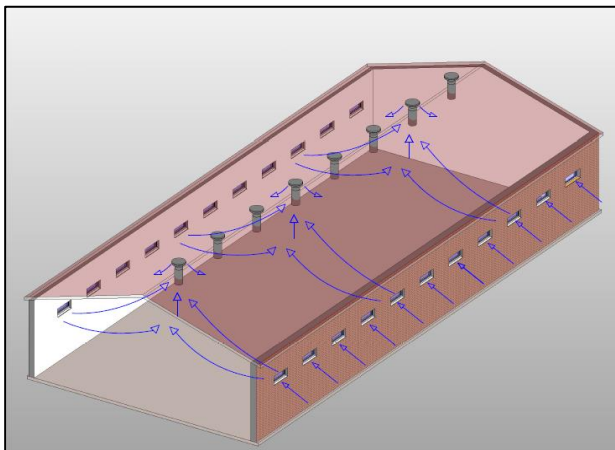
Abhängig von Einbauten, die Strömungswiderstände darstellen, bilden sich Sekundärströme oder Kurzschlüsse der Luftströme.



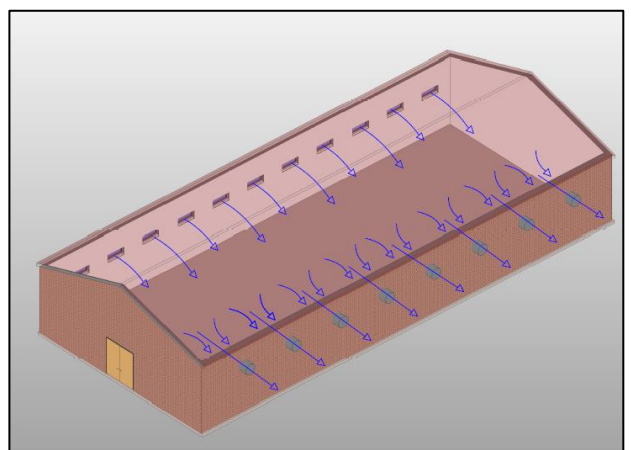
Tunnellüftung



Längslüftung



Firstlüftung



Querlüftung

Abbildung 2: Zu- und Abluftsysteme und Luftführung von Zwangslüftungen der Geflügelhaltung

3.2.3 Einflussfaktoren und Regelgrößen der Stalllüftung

Einflussfaktoren und Anforderungen für die Auslegung der Lüftungsanlage werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Einflussfaktoren und Anforderungen an Lüftungsanlagen in Winter und Sommer nach DIN 18910-1 (Entwurf 2016 und DLG 2003)

Stallklima	Winter	Sommer
Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmeverluste durch raumumschließende Teile – Produktion von Wärme, Wasserdampf und Kohlendioxid durch die Tiere – entweichende Schadgase (H₂S, NH₃) und Wasserverdunstung aus Flüssigmist 	<ul style="list-style-type: none"> – Erwärmung der raumschließenden Bauteile und Wärmeabgabe ans Stallinnere – Wasserverdunstung von feuchten Oberflächen – Wärmeverluste durch den Stallboden
Anforderungen an Lüftungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> – niedrige Luftvolumenströme – Abführung des Wasserdampfes und der Schadgase – Minimierung der Wärmeverluste durch Lüftung 	<ul style="list-style-type: none"> – hohe Luftvolumenströme – Abführung überschüssiger Wärme – Minimierung der Temperaturdifferenz zwischen Stall und Außenluft (3 K)
Ansatz für Auslegung	<ul style="list-style-type: none"> – minimaler Tierbesatz – Vorgabe Stalltemperatur – Bausubstanz 	<ul style="list-style-type: none"> – maximaler Tierbesatz – festgelegter Rechenwert für die Stalltemperatur – Gebäudekühlung – Bausubstanz

Regelgrößen im Betrieb sind

- Solltemperatur sowie
- Luftrate/Tierplatz.

Empfehlungen für Luftraten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und der Haltungsform gibt die DIN 18910. Die DIN wurde aktuell überarbeitet und liegt im Entwurf seit dem 01.04.2016 vor. Grundsätzliche hier zu berücksichtigende Änderungen der DIN 18910 ergeben sich durch die Aktualisierung nicht. Neu ist u. a., dass die Möglichkeit der Kühlung des Zuluftstromes oder der Ställe bei der Auslegung mit berücksichtigt werden kann, wobei die Luftrate bei Kühlung immer > 50 % der Luftrate ohne Kühlung betragen muss. Es entfällt die regionale Differenzierung für die Bemessung der Sommerluftrate. Zukünftig wird einheitlich von einer erforderlichen Temperaturdifferenz von 3 K ausgegangen.

Bei Einsatz einer Abluftreinigung muss die Lüftungsanlage auf diese abgestimmt, d. h. sie muss ausreichend dimensioniert sein, um den zusätzlichen Druckverlust bei Einhaltung der Vorgaben für die Luftgeschwindigkeit und dem Mindestvolumenstrom zu überwinden.

4 Rohgasanalyse

Die nachfolgende qualitative und quantitative Analyse der Rohgasbestandteile und Analyse der spezifischen Anlagen- und Betriebsbedingungen ist eine grundsätzliche Voraussetzung für die verfahrenstechnische Technologieauswahl und für die Dimensionierung der Abluftreinigungsanlage sowie der Peripherieanlagentechnik wie Ventilatoren oder Rohrleitungen.

Die weiteren Ausführungen beruhen auf bereits veröffentlichten Ergebnissen von Emissionsmessungen und Auswertungen an unterschiedlichen Geflügelställen und Haltungsverfahren. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden keine eigenen Messungen und Analysen durchgeführt.

4.1 Qualitative Analyse der Emissionen aus Geflügelhaltungsanlagen

In der Geflügelhaltung wird eine Vielzahl luftverunreinigender Stoffe freigesetzt. Gegenstand der Studie sind Bioaerosole und Gerüche. In Bezug auf die Umweltwirkung und immissionsschutzrechtliche Vorsorge sind weiterhin die Emissionen von Ammoniak und Staub (Partikel) relevant. Soweit erforderlich und sinnvoll, wird daher zusätzlich auf diese Komponenten Bezug genommen.

4.1.1 Bioaerosole

4.1.1.1 Definition

Allgemein sind Aerosole ein Gemisch aus festen und/oder flüssigen Schwebeteilchen in der Umgebungsluft. In seltenen Fällen dienen auch andere Gase als Träger. Das Verhalten eines Aerosols hängt immer von den Teilchen und dem Trägergas ab. Die Schwebeteilchen heißen Aerosolpartikel oder Aerosolteilchen. Ein Aerosol ist ein dynamisches System und unterliegt ständigen Änderungen durch Kondensation von Dämpfen an bereits vorhandenen Partikeln, Verdampfen flüssiger Bestandteile der Partikel, Koagulation kleiner Teilchen zu großen oder Abscheidung von Teilchen an umgebenden Gegenständen.

Als Bioaerosole werden alle im Luftraum befindlichen Ansammlungen von Partikeln bezeichnet, denen Pilze (Sporen, Konidien, Hyphenbruchstücke), Bakterien, Viren und/oder Pollen sowie deren Zellwandbestandteile und Stoffwechselprodukte (z. B. Endotoxine, Mykotoxine) anhaften bzw. diese beinhalten oder bilden (VDI 4251 Blatt 3).

Mögliche Inhaltsstoffe der Bioaerosole sind

- organische Stäube wie Antibiotika-Rückstände und Endotoxine. Endotoxine sind Bestandteile der äußeren Zellmembran von Gram-negativen Bakterien. Sie werden in der Regel von abgetöteten oder lysierten Bakterien abgegeben. Chemisch entsprechen die Endotoxine Lipopolysacchariden (LPS); diese haben bei allen Gram-negativen Bakterien denselben Aufbau. LPS sind amphipathische Moleküle. Der hydrophobe Teil, das Lipid A, enthält fünf bis sieben gesättigte Fettsäuren, die an ein Glucosamin-Dimer gebunden sind. Der hydrophile Kopf des LPS-Moleküls besteht aus einem Oligosaccharid, der zentralen Core-Region und dem O-Antigen, einem Polymer aus sich wiederholenden Einheiten von jeweils drei bis sechs Zuckerresten.
- anorganische Stäube
- gasförmige Verunreinigungen wie Ammoniak, Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid, Osmogene und Spurengase
- Mikroorganismen wie Pilze, Bakterien, Viren
- flüssige Schwebeteilchen in Form von Kondensationsprodukten oder Dämpfen

Bioaerosole sind natürliche Bestandteile der Luft, werden jedoch auch aus einer Vielzahl von anthropogenen Quellen wie Tierhaltungsanlagen, Kompostierungsanlagen, Anlagen zur Abfallbehandlung oder Anlagen der Nahrungs- und Genussmittelindustrie emittiert (HOPPENHEIDT 2002). Bei Bioaerosolen handelt es sich um Luftverunreinigungen im Sinne von § 3 Abs. 4 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG).

Die Art der emittierten Bioaerosole, der zeitliche Verlauf und die Höhe hängen vom Typ der Anlage und speziell bei Tierhaltungsanlagen von der Tierart und den Haltungsverfahren ab (s. hierzu Kap. 3.1). Bioaerosole in der Tierhaltung sind überwiegend an Staubpartikel gebunden, sodass alle Maßnahmen zur primären und sekundären Minderung von Stäuben auch für Bioaerosole gelten. Ebenso ist ein analoges Emissionsverhalten zwischen Staub- und Bioaerosolemissionen anzunehmen. Man geht in der Fachwelt davon aus, dass Systeme, die ihre Wirksamkeit in Bezug auf eine Partikel- bzw. Staubabscheidung bewiesen haben, auch geeignet sind, Bioaerosole abzuscheiden (MUEK 2015).

4.1.1.2 Charakteristika der Bioaerosole

Bioaerosole sind polydispers, d. h. sie umfassen verschiedene Partikelgrößen. Die Eigenschaften von Bioaerosolen bestimmen die Entstehung, die Ausbreitung und die Art einer möglichen Abscheidung in Abluftreinigungsanlagen. Für die Bewertung der Abscheidung von Bioaerosolen bzw. Stäuben können u. a. folgende Kenngrößen herangezogen werden:

- Aerodynamische Eigenschaften zur Kennzeichnung der Transporteigenschaften und Beschreibung der Größe eines unregelmäßig geformten Partikels
 - Partikeldurchmesser
 - Depositions- und Sedimentationsverhalten
- Korngrößenverteilung der Partikel der Emissionen
- Tenazität/Reaktionsverhalten
- Anzahlkonzentration/Massenkonzentration

Grundsätzlich unterscheidet sich das Bioaerosolspektrum oder Bakterienspektrum in der Luft bei verschiedenen Haltungsverfahren. Im vorliegenden Bericht wird das Spektrum vorkommender Bioaerosole aus der Tierhaltung nicht weiter betrachtet. Hierzu liegt bereits eine Vielzahl von Veröffentlichungen vor (u. a. CLAUß 2015, VDI 4255, KTBL 2015), die aber noch sehr lückenhaft sind und daher fortgeschrieben werden.

Für die Geflügelhaltung sind in Bezug auf die genannten Kenngrößen folgende Eigenschaften maßgeblich:

Aerodynamische Eigenschaften

Der aerodynamische Durchmesser, der die Depositions- und Sedimentationseigenschaften und auch das Reaktions- und Agglomerationsverhalten bestimmt, ist die funktionsbestimmende Größe für Ablagerung und Transport von Stäuben.

Staubkonzentrationen werden durch ihr spezifisches Depositions- und Sedimentationsverhalten in Abhängigkeit ihres Transports durch die Luftgeschwindigkeiten im Stall bzw. in den Zuluft- und Abluftleitungen/Rohgasleitungen beeinflusst. Ebenso hängt die spätere Ausbreitungssituation im Umfeld von Stallanlagen von den Depositions- und Sedimentationseigenschaften ab. Hinzu kommen vielfältige Reaktions- und Auswaschungsprozesse in der freien Atmosphäre.

Neben Dichte und Form ist somit die Partikelgröße für den Transport und die gesundheitliche Wirkung (u. a. lungengängig) entscheidend.

In Abhängigkeit ihrer spezifischen Korngröße werden Stäube in die in Tabelle 3 aufgeführten Kategorien eingeteilt. Die Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Partikelgröße zu. Die gesundheitliche Wirkung nimmt mit abnehmender Partikelgröße zu.

**Tabelle 3: Einteilung der spezifischen Staubeigenschaften in Abhängigkeit der Partikelgröße (PM)
(TA Luft, ROSENTHAL 2007)**

Bezeichnung/Staubfraktion	Partikeldurchmesser	Eigenschaft
Grobstaub	> 50 µm	schnell sedimentierende Grobstäube
Mittelstaub	> 10 µm ≤ 50 µm	langsam sedimentierende Grobstäube
Feinstaub	≤ 10 µm	inhalierbare/einatembare Stäube
Lungengängige Stäube	≤ 2,5 µm	z. T. auch Feinstaub genannt
Ultrafeine Stäube	< 100 nm	Nanopartikel

Korngrößenverteilung/Partikelgrößenverteilung

Die Größenverteilung von Mikroorganismen tragenden Partikeln ist im Bereich von 0,65 bis max. 12 µm aerodynamischer Durchmesser für viele Umweltbereiche und Mikroorganismengruppen gut untersucht (z. B. ADELL et al. 2011; CLAUB 2015b). Die letztgenannte Veröffentlichung gibt einen aktuellen Überblick über den Wissensstand zur Partikelgrößenverteilung von luftgetragenen Mikroorganismen mit der Auswertung von mehr als 190 Publikationen. Für die Geflügelhaltung liegen Daten vor, die 10 % < 2,1 µm, 70 % von 2,1 bis 7 µm und 20 % > 7 µm ausweisen (CLAUB 2016).

Derzeit laufen Forschungsprojekte, die die Partikelverteilung der Bioaerosole in der Schweinehaltung (Thünen-Institut) und der Geflügelhaltung (LANUV) analysieren. Erste Ergebnisse zeigen, dass Bioaerosole aufgrund ihrer Agglomerations-eigenschaften häufig im Gegensatz zu bisherigen Annahmen als größere Partikel auftreten und analoge Verteilungen der erfassten Stäube aufweisen (CLAUB 2016). Dabei bilden die belebten Bestandteile mit den unbelebten Bestandteilen überwiegend Cluster.

Eine Zusammenstellung von vorliegenden Ergebnissen der Partikelgrößenverteilung von Stäuben im Rohgas von Tierhaltungsanlagen ist Tabelle 4 zu entnehmen. Die Partikelverteilung im Stall unterscheidet sich nach der Haltungsform und den Haltungsverfahren. Für die Bodenhaltung werden beispielsweise 50 bis 60 % und für die Kleingruppenhaltung 40 % PM10-Anteil am Gesamtstaub angegeben (VDI 3894 Blatt 1).

Tabelle 4: Ergebnisse ausgewählter Untersuchungen der Partikelgrößenverteilung von Stäuben/Bioaerosolen der Tierhaltung im Rohgas

	Partikelgröße			Quelle
	PM10 in %	PM2,5 in % v. PM10	> PM10	
Hähnchenmast	40	k. A.	60	HINZ (2005)
Hähnchenmast	47	14	53	GÄRTNER (2011)
Legehennen	50	12,5	k.A.	LfU (2011)
Legehennen (Kleingruppe > 15.000 TP)	66	15	19	LfULG (2014)
Geflügelfarm	60	34	40	SKÓRA (2016)
Geflügel nach Haltungsform	40-60	k.A.	40-60	VDI 3894 Blatt 1
Schwein	50	25	50	(CLAUß 2016) hier Verteilung Bioaerosol

Abbildung 3 zeigt die Partikelverteilung im Rohgas für Masthähnchen und Legehennenhaltung auf der Grundlage der Prüfdaten des DLG (DLG 2009–2016).

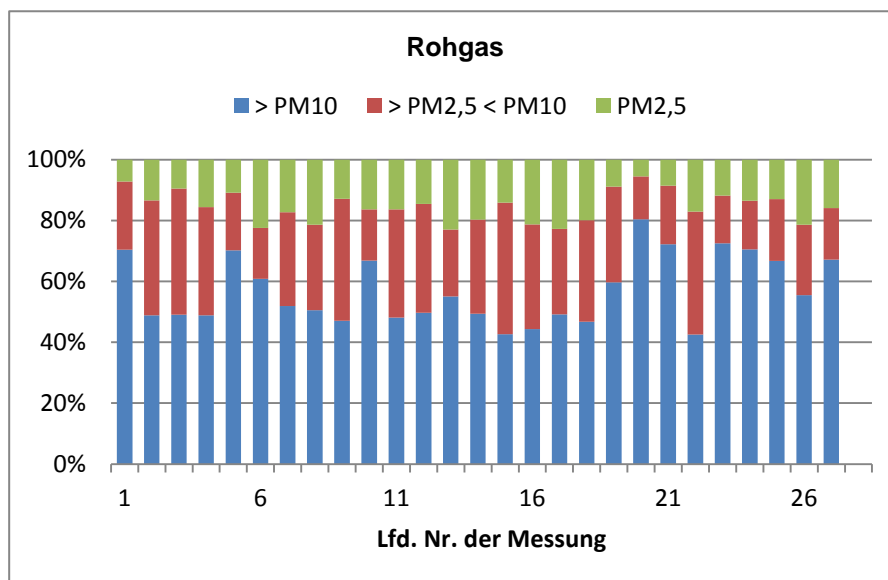


Abbildung 3: Anteile Partikelgrößen im Rohgas für Hähnchenmast und Legehennen (Bodenhaltung), Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2009–2016)

Bei Einsatz einer Abluftreinigungsanlage verändert sich im Regelfall die Korngrößenverteilung. Überwiegend werden größere Partikel abgeschieden. Zusätzlich kann es aufgrund der Reinigungssysteme zur Erzeugung von kleineren Partikeln (u. a. Aerosole, Schimmelpilze) kommen.

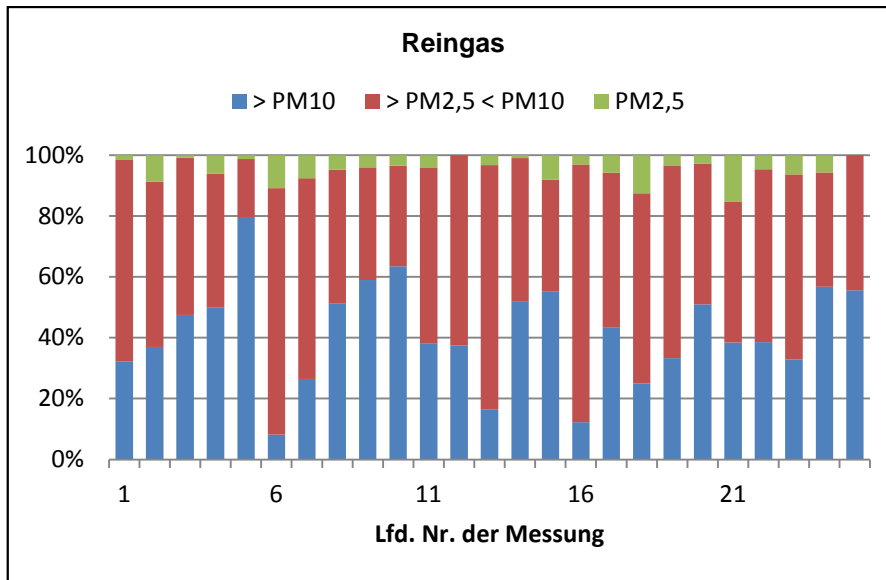


Abbildung 4: Anteile Partikelgrößen im Reingas für Hähnchenmast und Legehennen (Bodenhaltung), Datengrundlage: Prüfdaten DLG

Tenazität/Reaktionsverhalten

Die Tenazität kennzeichnet die Fähigkeit von Mikroorganismen, eine bestimmte Zeit zu überleben oder im Umkehrschluss die Sterberate von Mikroorganismen.

Zur Ableitung eines Zieles für die Emissionsminderung (vgl. folgendes Kapitel) ist die Berücksichtigung der Eigenschaft der Bioaerosole, zu reagieren und ihre Überlebensfähigkeit entscheidend. Die Tenazität und das Reaktionsverhalten von Bioaerosolen sind für verschiedene Mikroorganismen sehr unterschiedlich und hängen von folgenden Faktoren ab (CLAUß 2016):

- Lufttemperatur
- Globalstrahlung/UV-Strahlung
- Ozon
- freie Radikale
- Ozon-Olefin-Reaktionsprodukte
- Partikelgröße
- synergetische Effekte zwischen diesen Größen

Hierzu liegen lückenhafte Erkenntnisse vor, die auf eine Reduktion von Bioaerosolen von bis zu 90 % hinweisen. Keine der Studien fand jedoch bisher unter realen Außenluftbedingungen statt (CLAUß 2016). Die Tenazität wird daher bei der Bewertung der Wirkung der Bioaerosole (Schutz- und Vorsorgeanspruch) in der gegenwärtigen Praxis nicht berücksichtigt.

Anzahl-/Massenkonzentration

Zur Bewertung von partikelbezogenen Luftverunreinigungen kann die Anzahl- und die Massenkonzentration herangezogen werden. Gesundheitseffekte hängen i. d. R. stärker von der Anzahl- als von der Massenkonzentration ab, was an der größeren Toxizität und Lungengängigkeit der kleineren Partikel liegt. Angaben zur Massenkonzentration sind der Abbildung 5 zu entnehmen.

4.1.1.3 Zielwerte für die Emissionsminderung

Neben den Kenntnislücken der Eigenschaften von emittierten Bioaerosolen sind auch Wirkungsschwellen bisher unbekannt. Das Risiko für konkrete Gesundheitsgefahren ist bisher nicht quantifizierbar.

Die gesetzlichen Vorgaben zur Begrenzung mikrobieller Emissionen und Immissionen sind bislang nur allgemein formuliert und umstritten (s. Kap. 2). Davon ausgehend, dass keine Dosis-Wirkungs-Beziehungen bzw. Wirkschwellen vorliegen und auch nicht in absehbarer Zeit vorliegen werden, kann auch kein begründbarer Zielwert für die Emissionsminderung (z. B. in Form einer prozentualen Abreinigung, max. Emissionskonzentration) oder ein zu erreichender Immissionswert festgelegt werden (KTBL 2015).

Im Gegensatz dazu hat der Arbeitsschutz bereits erste Normierungsaktivitäten vorgenommen. Die hierfür erstellten Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) geben den Stand der Anforderungen bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen wieder. Dabei erfolgt die Einstufung in Risikogruppen 1 bis 4, entsprechend der Legaleinstufungen nach Anhang III der EU-Richtlinie über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit (Richtlinie 2000/54/EG). Untersuchungen des Bioaerosolspektrums der Legehennenhaltung (CLAUß 2015) zeigen, dass 80 % der Staphylokokkenspezies der Risikogruppe¹ 1 zugeordnet werden, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen (Einstufung nach TRBA 466). Die verbleibenden 20 % sind der Risikogruppe 2 zuzuordnen.

Auswertungen von Studien wie AABEL (NLG 2004), NiLS (LMU 2005) und Gabi (LGL 2014) zeigen jedoch, dass Schwellenwerte zu existieren scheinen, ab denen ein gesundheitlicher Effekt auftritt. Diese gesundheitliche Wirkung hängt jedoch von weiteren Faktoren ab, wie

- dem Bioaerosolspektrum (pathogene Spezies, Toxine, sensibilisierende Substanzen) - geringe Unterschiede zwischen einzelnen Haltungsformen erkennbar,
- der Konzentration (z. B. infektiöse Dosis), große Unterschiede zwischen Haltungsformen, bis zu eine Zehnerpotenz,
- der Exposition der Anwohner (Häufigkeit und Dauer) ähnliche Aufenthaltsdauern, abhängig von der Tierplatzplatzzahl,
- der Konstitution der Betroffenen (Gesundheitsstatus) individuell, zufällig (CLAUß 2014).

Die im DLG-Prüfverfahren einzuhaltenden Mindestanforderungen zur Abluftreinigung in der Geflügelhaltung liegen bei 70 % Reinigungsleistung für die Gesamtzellzahl (Bakterien), mesophile Pilze und, sofern notwendig, tierartspezifische Leitkeime (s. auch Kap. 2.2). Eine Begründung wird hierfür nicht gegeben.

4.1.1.4 Summen- und Leitparameter für Bioaerosole

Zur Messung und Bewertung der Stallemissionen und Immissionen für Bioaerosole werden in der Praxis Summenparameter und Leitparameter herangezogen. Dabei werden die bisher vorliegenden Kenntnisse zur Exposition in der Geflügelhaltung zur identifizierbaren Wirkung und zur Messbarkeit der Parameter berücksichtigt. Für die Funktionsprüfung von Abluftreinigungsanlagen durch Nachweismessungen ist die Ableitung von messbaren Parametern ebenso erforderlich.

Die VDI 4255 Blatt 2 listet Parameter zur Untersuchung von Emissionen aus der Nutztierhaltung. Es werden folgende Parameter benannt:

- Obligatorisch: Gesamtbakterienzahl 37 °C/Gesamtpilzzahl 25 °C (mesophile Schimmelpilze)
- Fakultativ: Thermophile Schimmelpilze 45 °C, Thermophile Aktinomyzeten 50 °C, Gramnegative Bakterien 37 °C, Grampositive Bakterien 37 °C (Staphylococcus aureus, Chlamydophila psittaci), Viren, Endotoxine, Aflatoxine, Ochratoxin und andere spezielle Toxine.

Der LAI-Leitfaden (LAI 2014) legt neben den Summenparametern Gesamtzellzahl, Gesamtbakterienzahl, Gesamtpilzzahl Leitparameter (Staphylococcus Aureus, Staphylokokken, Enterokokken und Enterobacteriaceen) fest, die zur Bewertung von Immissionen aus der Tierhaltung herangezogen werden können.

¹ Risikogruppe 1 bis 4 mit steigendem Infektionsrisiko für den gesunden Beschäftigten nach Anhang 1 zu § 3 der BioStoffV. Risikogruppe 1: „Biostoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit hervorrufen.“; Risikogruppe 2: „Biostoffe, die eine Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine Gefahr für Beschäftigte darstellen könnten; eine Verbreitung in der Bevölkerung ist unwahrscheinlich; eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise möglich.“

4.1.2 Gerüche

4.1.2.1 Definition und Charakteristika

Gerüche sind Empfindungen, die von einer Vielzahl flüchtiger Substanzen und Verbindungen ausgelöst werden und sich im Ergebnis eines Riechvorgangs einstellen. Gerüche sind daher chemisch und physikalisch nicht eindeutig bestimmbar. Als Geruchsstoffe werden alle natürlichen und synthetischen Stoffe benannt, die olfaktorisch wahrgenommen einen Geruch entwickeln - somit alle Substanzen, die den menschlichen Geruchssinn so stimulieren, dass ein Geruch wahrgenommen wird (DIN EN 13725 [2003]). Sie weisen folgende Eigenschaften auf:

- fett- und wasserlöslich
- niedriges Molekulargewicht
- mindestens zweiatomig

Dabei unterscheidet man

- organische Geruchsstoffe (z. B. aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe, sauerstoffhaltige, stickstoffhaltige und schwefelhaltige) und
- anorganische Geruchsstoffe (sehr flüchtige Wasserstoffverbindungen).

Geruchsstoffe aus der Geflügelhaltung sind überwiegend organischer Herkunft und durch eine stark schwankende Beladungskonzentration und Zusammensetzung gekennzeichnet. Bei den aus Tierhaltungsanlagen emittierten Geruchsstoffemissionen handelt es sich um ein komplexes Gemisch von über 150 verschiedenen Komponenten in unterschiedlichen Konzentrationen (VDI 3894 Blatt 1). Nach bisher vorliegenden Erfahrungen ist von einer schlechten Wasserlöslichkeit der Geruchsstoffe auszugehen (HAHNE 2014). Angaben zum konkreten geruchsverursachenden Stoffspektrum der Geflügelhaltung sind nicht bekannt.

Grundsätzlich können sich einzelne Geruchsstoffe gegenseitig beeinflussen oder überlagern und hierdurch die Geruchswirkung aufheben oder verstärken. Ebenso wie Bioaerosole können Geruchsstoffe sich verändern, wenn sie mit Luft oder Licht in Kontakt kommen.

4.1.2.2 Zielwerte für die Emissionsminderung

Zielwerte für die Emissionsminderung können neben den Anforderungen an die Abluftreinigungsanlagen (s. Kap. 2.2 mit GE/m³) aus den Schutzansprüchen (s. Kap. 2.1.1) abgeleitet werden. Dabei hängt die Geruchswahrnehmung und damit auch die Qualität und Intensität von der Konzentration der Geruchsstoffe, der Temperatur, der Luftfeuchte und der Geruchsempfindung des Menschen ab. Konzentrationen, die eine merkliche Geruchsempfindung auslösen, können jedoch nur für Einzelstoffe, nicht für Stoffgemische oder Geruchsstoffe angegeben werden (sogenannte Geruchsschwelle). Zusätzlich erschwerend für die Festlegung von Minderungszielen ist, dass die Zunahme der Geruchsintensität nicht linear von der Konzentration abhängig ist. Bei niedrigeren Konzentrationen genügt eine geringere Zunahme, um beispielsweise eine Verdopplung der Intensität zu bewirken. Das Riechorgan gewöhnt sich an einen Geruch (Adaption). Bei hohen Konzentrationen setzt die Gewöhnung schneller ein. Bei nachlassendem Geruch geht die Adaption zurück. Zusätzlich spielt für die Belästigungswirkung die Geruchsqualität (hedonische Wirkung), die über eine neunstufige Skala von „angenehm“ bis „unangenehm“ eingestuft wird, eine entscheidende Bedeutung (GIRL 2008).

4.1.3 Weitere Bestandteile im Rohgas

4.1.3.1 Ammoniak

Ammoniak bildet sich in Tierhaltungsanlagen durch den biologischen Abbau von Harnstoff oder Eiweiß der ausgeschiedenen Fäkalien. Dieser Vorgang wird entscheidend von der Temperatur, der Feuchtigkeit und den aeroben Bedingungen beeinflusst. Die Ammoniakkonzentration im Rohgas ist abhängig vom Dampfdruck, der wiederum vom Umgebungsdruck und der Temperatur abhängig ist. Weil die Druckverhältnisse in Ställen weitgehend als konstant betrachtet werden können, erreichen insbesondere in den Sommermonaten die Ammoniakkonzentrationen ihre Höchstwerte. Ammoniakemissionen variieren stark zwischen den Haltungsverfahren (KTBL 2006).

4.1.3.2 Staub

Zur Parallelität von Staubkonzentrationen und Bakterienkonzentrationen, die bereits nachgewiesen wurden (SCHUCK 2014), vgl. Kap. 4.1.1. Demnach werden die Staubkonzentrationen mit ihren spezifischen Eigenschaften wie Dichte, Korngrößenverteilung, Agglomerationsverhalten in Verbindung ihres spezifischen Sedimentationsverhaltens in Abhängigkeit ihres Transportes durch die Luftgeschwindigkeiten im Stall bzw. in den Zuluft- und Abluftleitungen/Rohgasleitungen beeinflusst.

Die Staubbestandteile sind von den spezifischen Rahmenbedingungen der Emissionsquellen geprägt, wie sie z. B. durch Einstreu (bestehend aus Stroh, Holzhobel- oder Sägespäne, Holzpellets), Futter oder die Tiere durch Kot, Federn etc. verursacht werden. Generell ist für die Auswahl und Auslegung von Abluftreinigungsanlagen zu berücksichtigen, dass diese organischen Stäube in Abhängigkeit ihrer Rohgaskonzentrationen explosionsfähig sind und größtenteils in die Staubexplosionsklasse St 1 eingeordnet werden. Die Einstufung in Staubexplosionsklassen ist abhängig von Staubexplosionsfähigkeit, d. h. wenn sich in einem Staub/Luft-Gemisch nach dem Entzünden eine Flamme ausbreitet, die im geschlossenen Behälter mit Temperatur- und Drucksteigerung verbunden ist. Die Staubexplosionsklasse 1 ist die niedrigste Stufe. Für den Einzelfall ist die Explosionsgefahr zu klären und es sind entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen.

Tabelle 5: Darstellung der Explosionsfähigkeit von staubförmigen Luftverunreinigungen in Geflügelställen (Staub-Ex 2016)

Stoffname	Explosionsfähigkeit
Futtermittel	St 1
Fettkonzentrat (Futtermittelvormischung)	St 1
Holzspäne	St 1
Krafftutterpellets	St 1
Stroh	St 1

4.1.3.3 Spurengase

In der Abluft sind weitere Spurengase wie Lachgas, Kohlenstoffdioxid, Schwefelwasserstoff, Methan enthalten. Der Einfluss der Spurengase im Rohgas und mögliche Abreinigungseffekte werden entsprechend der Aufgabenstellung nachfolgend nicht weiter betrachtet. Erhöhte Emissionen dieser Spurengase werden nicht nachgewiesen (KTBL 2006).

4.2 Quantitative Analyse der Emissionen aus Geflügelhaltungsanlagen

Kenngrößen der quantitativen Analyse für die verfahrenstechnische Technologieauswahl und für die Dimensionierung der Abluftreinigungsanlage sind

- die Höhe der Emissionen (Massenkonzentration, Fracht, Rohgasbeladung und Emissionsfaktoren),
- die Schwankungsbreite (Tages- und Jahreslastgang).

4.2.1 Staub/Bioaerosole

Zur Höhe der Emissionen von Stäuben und partikelgebundenen Bioaerosolen liegt eine Vielzahl von Messungen und Ergebnisberichten mit unterschiedlichen Zielsetzungen (z. B. Vergleich Lüftungssysteme, Haltungssysteme) vor. Zur Quantifizierung von Bioaerosolen sind jedoch die vorliegenden Messergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Messmethoden und Erfassung von Einzelwerten (im Regelfall keine kontinuierliche Messung) sowie erfassten Parameter nicht direkt vergleichbar (s. VDI 4255 Blatt 2 und 3; CLAUB 2016; LfULG 2015; LfULG 2016). So liegen die in der VDI 4255 Blatt 2 angegebenen Emissionsfaktoren für ausgewählte Parameter weit unter den in der VDI 4255 Blatt 3 abgeleiteten Emissionsfak-

toeren. Diese Unterschiede sind auf die Art der Erfassung zurückzuführen. Die VDI 4255 Blatt 2 baut allein auf der kultivierbaren Anzahl der Bakterien auf. Die VDI 4255 Blatt 3 berücksichtigt alle vorkommenden Bakterien.

Für die quantitative Bewertung des Emissionspotenzials für Bioaerosole reicht die vorliegende Datenbasis somit nicht aus. Auf die Angabe von Größenordnungen des Bioaerosolspektrums im Rohgas wird daher verzichtet und auf die genannten VDI-Richtlinien und Messungen verwiesen. Die aus der Vielzahl der Messungen im Stall und im Rohgas sich ergebenden Kernaussagen werden nachfolgend zusammengefasst:

Höhe der Staubemissionen

- Die Staubkonzentrationen für Gesamtstaub liegen nach Auswertung entsprechender Messungen für die Hähnchenmast im Bereich zwischen 1 bis 16 mg/m³ (im Mittel bei 5,2 mg/m³). Für die PM10 Fraktion werden 0,5 bis 6,5 mg/m³ (im Mittel 2,7 mg/m³) und für die PM2,5-Fraktion 0,1 bis 2,4 mg/m³ (im Mittel 0,9 mg/m³) für Masthähnchen angegeben (DLG 2009-2016). Vereinzelt werden Messdaten bis 23 mg/m³ für Gesamtstaub erfasst. Messdaten der Legehennenhaltung weisen Konzentrationen im analogen Bereich aus (LfULG 2014).
- Die Konzentration im Stall und im Abluftstrom weichen deutlich voneinander ab. So ermittelt MÜLLER (2004) bei der Messung von Maximalwerten nur ca. 50 % der Stallinnenraumkonzentration (Tierbereich) im Rohgas. Aufgrund der Sedimentationseigenschaft der Staubpartikel im Abluftstrom ist die in der Stallluft gemessene Staubkonzentration nicht für die Ermittlung der Staubemissionen nutzbar (SCHMITT et al. 2004). Analog sind auch die Konzentration von Bioaerosolen und auch das Bioaerosolspektrum im Stall nicht auf die Rohgaszusammensetzung zu übertragen.
- Messungen auf Basis der DLG-Prüfdaten werden in Abbildung 5 und Abbildung 6 zusammengefasst.

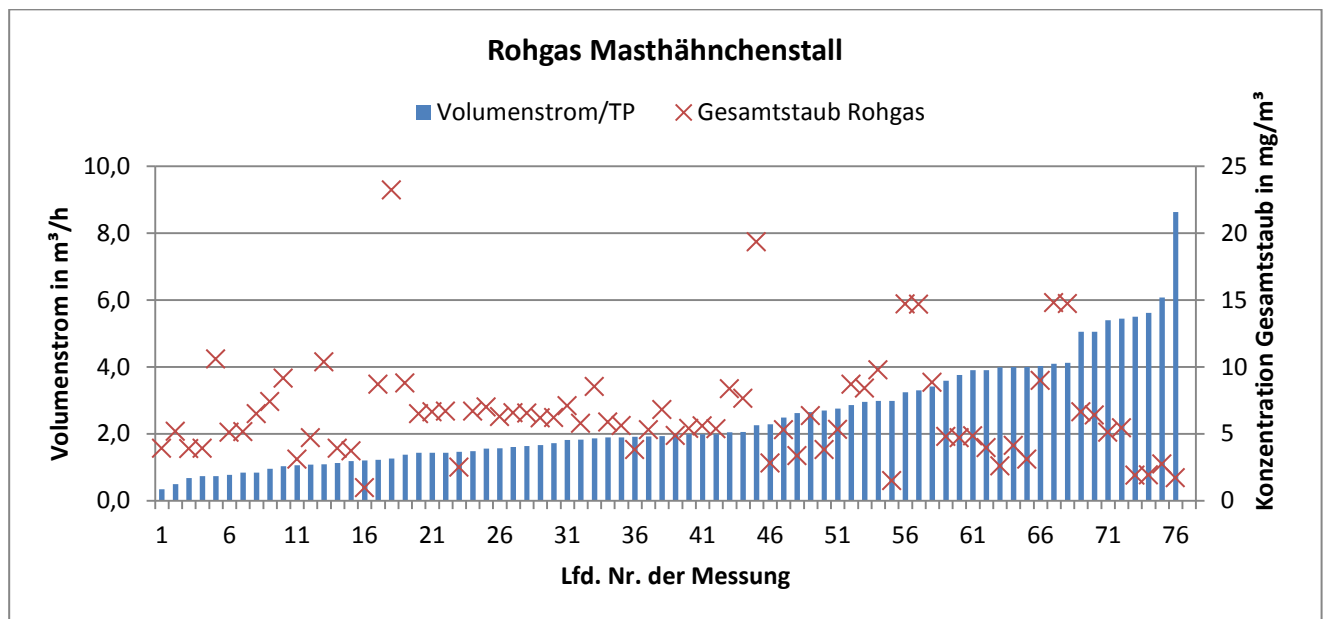


Abbildung 5: Darstellung der Staubkonzentration in Abhängigkeit vom Volumenstrom, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2009–2016)

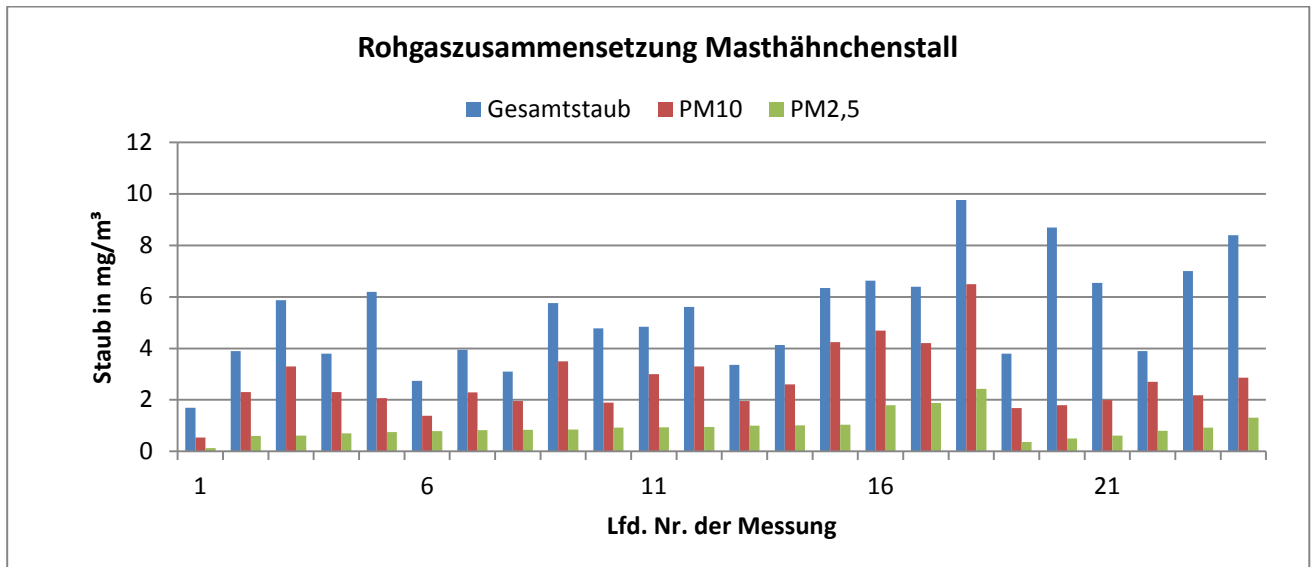


Abbildung 6: Staubkonzentration und Partikelverteilung, Datengrundlagen: Prüfdaten (DLG 2009–2016)

Höhe der Bioaerosolemissionen

- Verfügbare Messdaten werden in der VDI 4255 Blatt 3 zusammengefasst und als Emissionsfaktoren angegeben.
- Die Messungen zeigen u. a., dass Gehalte an Gesamtbakterien und Staphylokokken sowie Enterokokken in der Bodenhaltung und der Volierenhaltung höher ausfallen im Vergleich zur Freiland- und Kleingruppenhaltung. Bei den Enterokokken zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen Systemen mit Kotgrube und regelmäßiger Kotbandentleerung.
- Für luftgetragene Schimmelpilze sind keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit der Haltungs- und Produktionsform und auch im Vergleich mit der Hintergrundbelastung nachweisbar (u. a. SPRINGORUM et al. 2015).
- Messungen (u. a. SPRINGORUM et al. 2015; LfULG 2014) zeigen eine Abhängigkeit der Menge an Bioaerosolen von den Produktions- und Haltungsformen.

Schwankungsbreite der Staub- und Bioaerosolemissionen

- Die Staubemissionen nehmen mit der Mast bzw. dem Tiergewicht zu (typischer Mastgang) (DLG 2009-2016).
- Es wird ein typischer Jahresgang für Gesamtstaub mit niedrigeren Konzentrationen, aber höheren Frachten im Sommer und höheren Konzentrationen, aber niedrigeren Frachten im Winter nachgewiesen (ohne Berücksichtigung Partikelverteilung) (DLG 2009-2016). Insgesamt ist die Schwankungsbreite gering (s. o.).
- Durch die Tieraktivität tritt ein typischer Tagesgang für Gesamtstaub und PM10-Emissionsfrachten auf (ca. Faktor 3, VDI 4255 Bl. 2; LfULG 2011). Es kann angenommen werden, dass Bioaerosole einen analogen Tageslastgang aufweisen.
- Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit schlechteren Sedimentation größerer Partikel bereits im Stall oder Abluftschacht im Sommer ändert sich die Partikelverteilung im Rohgas über das Jahr. Der Anteil der PM10-Fraktion ist im Sommer leicht erhöht bei niedrigeren Konzentrationen im Rohgas (DLG 2009-2016).

4.2.2 Geruch

Für die Geflügelhaltung werden Geruchsstoffkonzentrationen von 280 GE/Bm³ bis 1.600 GE/Bm³ mit Frachten von 4,5 bis 28 MGE/h angegeben (HAHNE 2015). Die Geruchsstoffkonzentrationen und -frachten zeigen keinen deutlichen Jahresgang. Unterschiede der Geruchsstoffkonzentrationen und -frachten treten in Abhängigkeit vom Haltungsverfahren, der Haltungsform und der Tierarten auf (s. hierzu im Einzelnen BAT 2015 und Emissionsfaktoren Sachsen [LfULG 2008]).

4.2.3 Ammoniak

Nach Auswertung unterschiedlicher Quellen liegen die gemessenen Konzentrationswerte für Ammoniak in Geflügelställen im Bereich von 0,3 ppm bis maximal ca. 50 ppm. Im mittleren Konzentrationsbereich liegt die NH_3 -Konzentration in Legehennenställen zwischen 5 ppm bis 11 ppm. Diese Werte entsprechen einer NH_3 -Rohgasbelastung von 3,5 bis 7,8 mg/m^3 (HAHNE 2011).

4.3 Analyse der spezifischen Anlagen- und Betriebsparameter in Geflügelställen

Für die Auswahl von Abluftbehandlungsverfahren ist neben der qualitativen und quantitativen Analyse der Rohgaszusammensetzung die Betrachtung der verfahrenstechnischen Kenngrößen

- Volumenstrom,
- Luftfeuchte und
- Temperatur

erforderlich.

Weitere anlagentechnische Kenngrößen wie Mindesttransportgeschwindigkeit, Druckverlust und Verweilzeit der Abluft sind für die Auswahl eines geeigneten Abluftreinigungsverfahrens nicht entscheidend, sodass nachfolgend nicht weiter darauf eingegangen wird. Diese Kenngrößen sind vom jeweiligen Anlagenbauer so auszulegen, dass die Einhaltung vorgegebener Reingaswerte erreicht wird. So kann schon die Verwendung spezieller Füllkörper anstelle herkömmlicher z. B. die Verweilzeit in einem Absorptionswäscher entscheidend beeinflussen. Auch die Festlegung von Mindesttransportgeschwindigkeiten hängt vom Sedimentationsverhalten der transportierten Feststoffe in den Rohgasleitungen ab und wirkt sich entscheidend auf den Druckverlust aus. In Abhängigkeit der spezifischen Eigenschaften der Stäube wie der Explosionsfähigkeit und Brennbarkeit sind aus sicherheitstechnischen Gründen Staubablagerungen im gesamten Leitungssystem des Rohgases zu vermeiden.

Ebenso ist der Differenzdruck, der sich bei filternden Abscheidern durch die Durchströmung des Filtergewebes und des sich darauf bildenden Filterkuchens aufbaut, differenziert vom Anlagenbauer zu bewerten. Hier gilt der Grundsatz: Staub filtert Staub. Der Filterkuchen auf der Filter-Gewebeoberfläche wirkt sich entscheidend auf die Reingaswerte des filternden Abscheiders aus.

4.3.1 Volumenstrom

Gemäß den Berechnungs- und Planungsgrundlagen der DIN 18910-1 (2004) für geschlossene, wärme geschützte und zwangsbelüftete Ställe, wird der Volumenstrom für die Stallbelüftung über die Anzahl der Tiere und über deren Lebendmasse ermittelt. Ein wesentliches Merkmal bei Geflügelställen sind die extremen Schwankungen der Volumenströme in Abhängigkeit folgender Faktoren:

- Winter- und Sommerbetriebsfahrweise der Lüftungsanlage
- Lebendmasse der Tiere
- Außentemperatur
- Anzahl der Tiere im Stall
- Mindest-Luftgeschwindigkeit im Stall, $w = 0,2 \text{ m/s}$ bis $0,6 \text{ m/s}$

Beispielsweise muss die Abluftreinigung für eine Schwankungsbreite des Abluftvolumenstroms von 5.000 m^3/h (Einstallung Küken im Winter) bis 300.000 m^3/h (Endgewicht Mastdurchgang im Sommer) für einen Hähnchenmaststall mit 40.000 Tierplätzen ausgelegt werden. Die Schwankungsbreite ist Abbildung 7 zu entnehmen. Messdaten weisen Schwankungen mit einem Faktor von 44 über das Jahr und im Tagesverlauf bis zu einem Faktor von 8 auf. Diese extremen Tages-

schwankungen treten hauptsächlich in den Sommermonaten, bedingt durch die hohen Temperaturschwankungen der angesaugten Umgebungsluft, auf (HAHNE 2011).

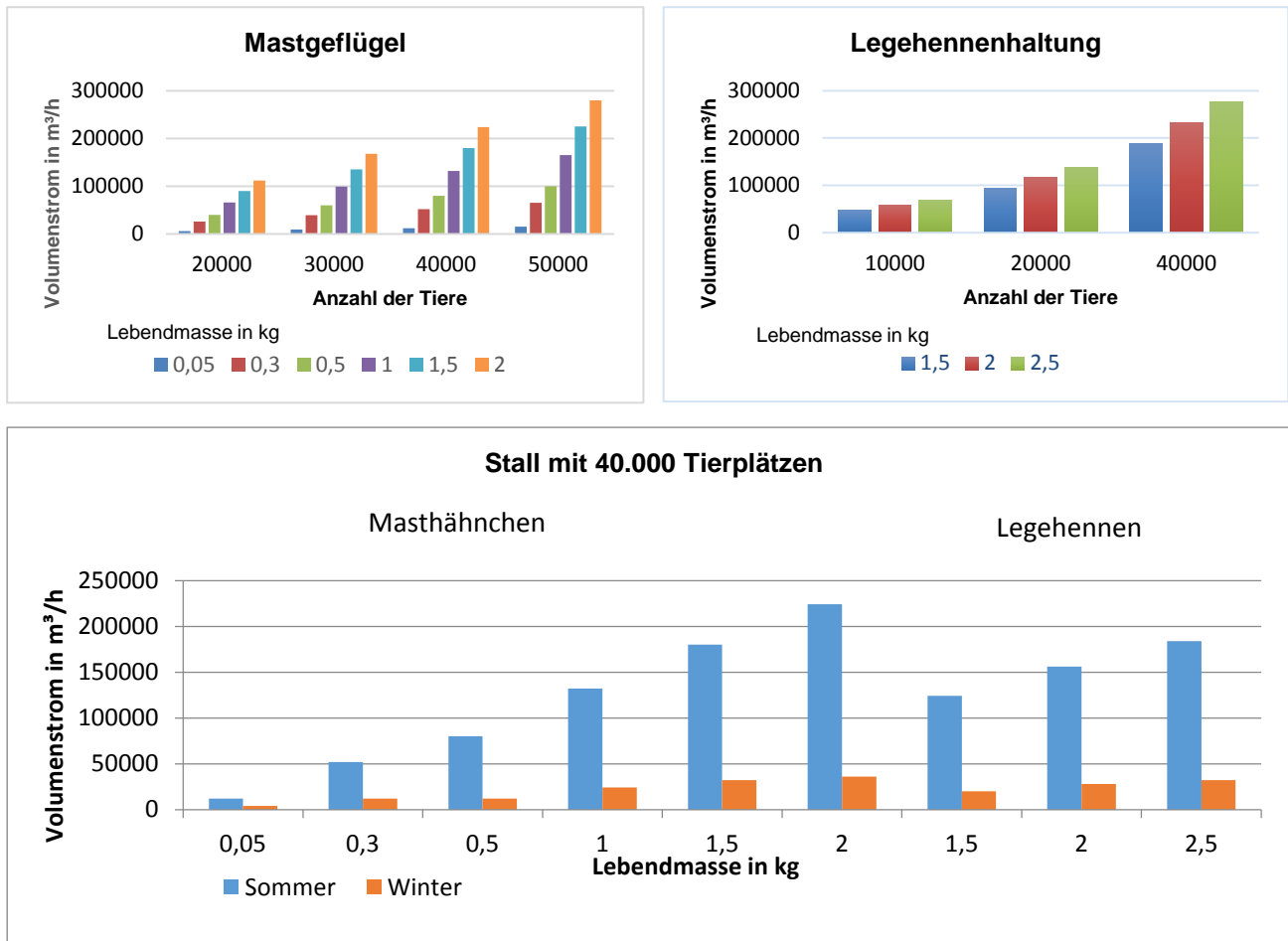


Abbildung 7: Schwankungsbreite Volumenstrom in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Lebendmasse (Datengrundlage DIN 18910 und Prüfdaten DLG 2009-2016)

4.3.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit ist u. a. abhängig von der physiologischen Stoffwechsellleistung der Tiere, der Außenluft-, Stall- und Mischtemperatur und für Abluftreinigungsanlagen ein wichtiger Parameter.

Die Eigenschaften von Stäuben oder eines Staubkuchens können sich stark durch Feuchtigkeitseintrag verändern. Ein feuchter Filterkuchen auf der Filteroberfläche beeinträchtigt extrem seine Abreinigungseigenschaften. Eine Erhöhung des Filterwiderstandes und eine Reduzierung des Volumenstromes wären die Folgen. Irreversible Ablagerungen von feuchten Stäuben im Filtergewebe können im Extremfall zum kompletten Funktionsausfall des filternden Abscheiders führen.

Die DIN 18910-1 strebt in ihren Berechnungsgrundlagen für das Stallklima eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 80 % an. Diese Werte decken sich mit Langzeitmessungen des von Thünen-Instituts Braunschweig, die im Bereich von 35 bis 76 % lagen (HAHNE 2011).

Die DLG-Prüfberichte geben 46 bis 85 % relative Luftfeuchte im Rohgas für die Haltung von Masthähnchen an. Messungen des LfULG für die Legehennenhaltung zeigen, dass die höchste mittlere Feuchte erwartungsgemäß im Winterhalbjahr erreicht wird. Es werden Maximalwerte von 93,2 % in der Stallluft nachgewiesen (LfULG 2011). Generell sind nur geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Jahreszeit und Außenluftfeuchte feststellbar. Hiermit zeigt sich die Abhängigkeit der Luftfeuchte von der Luftrate und weniger von der Außenlufttemperatur.

Ein Kondensatausfall im Abluftkanalsystem oder an der Abluftanlage, bedingt durch die Länge der Abluftleitung und Temperaturdifferenzen, kann durch technische Maßnahmen wie eine Isolierung des Kanalsystems oder eine Reduzierung der Verweilzeit vermieden werden. Nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse fällt kein Kondensat im Abluftreinigungssystem aus.

4.3.3 Temperatur

Die Stalltemperatur ist abhängig von unterschiedlichen Faktoren, auf die hier nicht vertiefend eingegangen werden soll. Wie schon beschrieben, beeinflusst die Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit. Unter Berücksichtigung von Temperaturbereichen auf dem Niveau der Außenlufttemperatur und der sich daraus ergebenden Mischtemperatur durch das Stallklima bewegen sich die Rohgastemperaturen in einem Bereich, der keinen wesentlichen Einfluss auf die verfahrenstechnische Anlagenauswahl hat.

Für Abluftreinigungsanlagen ist das Temperaturniveau im Bereich von $T = 12$ bis 34 °C in Tierhaltungsanlagen kein entscheidendes Auslegungskriterium.

Die Betriebsparameter werden auf Basis der DLG-Prüfdaten für fünf Hähnchenmastanlagen und eine Legehennenhaltung in Abbildung 8 zusammengefasst.

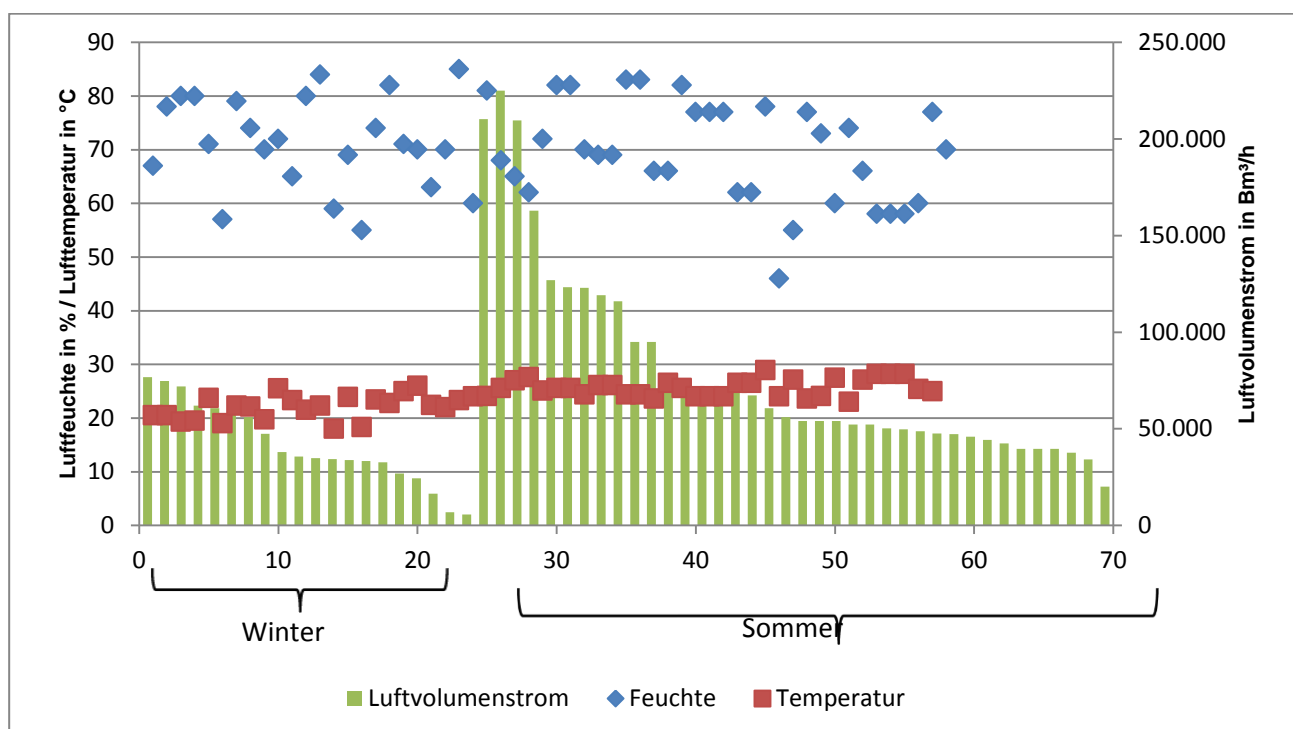


Abbildung 8: Rohgasbedingungen Geflügelhaltung, Basis Prüfdaten DLG (2009–2016)

4.4 Zusammenfassung der Abluftbedingungen für die Auswahl der Abluftreinigungstechnik

Entsprechend der Ausführung kann der Rohgasstrom aus der Geflügelhaltung zur Auswahl der nachsorgenden Abluftreinigungstechnik wie folgt charakterisiert werden:

- hohe Belastungen mit Staub und Feinstaub (Verstopfungsgefahr und Problem für nachfolgende Reinigungsstufen) im Vergleich mit anderen Tierhaltungsanlagen, jedoch Emissionskonzentrationen im Regelfall unterhalb von 20 mg/m^3 nach Anforderungen für die Emissionsbegrenzung nach Nr. 5.2.1 TA Luft

- hohe Belastungen mit Bioaerosolen, die nach derzeitigem Kenntnisstand in einem Gemisch von Partikeln vorkommen (Bestandteile von Futtermitteln und Einstreu, Fäkalien sowie Haut- und Feder- oder Haarpartikeln) im Vergleich mit anderen Tierhaltungsverfahren; im Vergleich mit industriellen Anwendungen sind die Staubgehalte eher gering
- Belastungen durch hohe Geruchsstoffkonzentration und -frachten (schwer wasserlösliche Stoffe) im Vergleich mit anderen Tierhaltungsverfahren
- sehr niedrige Frachten mit flüchtigen anorganischen leicht wasserlöslichen Verbindungen (Ammoniak)
- Emissionen mit niedriger Temperatur (im Regelfall zwischen 12 bis 34° C) und hohen Volumenströmen (max. Luftrate 300.000 m³/h)
- starke Schwankungen im Volumenstrom und in der Fracht (Tages- und Jahresschwankungen in Abhängigkeit der Veränderung des Außenklimas, Tierbesatz und Tiergewicht nach Lüftungsregeln DIN 18910 und Haltungsform sowie Halteverfahren und Stallmanagement)
- eine hohe Luftfeuchte kann nicht ausgeschlossen werden (Schwankungen von 46 bis 93 %)

Im Vergleich mit anderen Tierhaltungsanlagen ist die Geflügelhaltung generell durch hohe Luftvolumenströme und Staubfrachten sowie durch stark schwankende, aber insgesamt niedrige Ammoniakemissionen gekennzeichnet. Die verfahrenstechnischen Kenngrößen und Rohgasbestandteile als Grundlage für eine Technologieauswahl werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Rohgaszusammensetzung und Betriebsparameter und Folgen für die Auswahl der Abluftreinigungsverfahren

Parameter	Qualitativ	Quantitativ	Reduktionsziel/Auslegungshinweis
Staub	geringe Konzentration, keine großen Schwankungen im Rohgas	1 bis 16 mg/m³ ca. 60 % > PM10 ca. 40 % PM10, davon ca. 10 % PM2,5	bereits ohne ARA eingehalten, Verstopfungsgefahr für ARA
Bio-aerosol	große Unsicherheiten Bioaerosolspektrum und Partikelgröße sowie Partikelverteilung	Gesamtbakterienzahl/Staphylokokken erhöht Keime, Endotoxine geringer	kein Reduktionsziel ableitbar zur generellen Vorsorge gezielte Reduzierung von kleineren Partikeln (Gesundheitsgefährdung)
Geruch	schwer wasserlösliche Vielzahl von org. Stoffen	Rohgas mit 280 bis 1600 GE/m³	Reduktionsziel ergibt sich aus dem Schutzanspruch nach GIRL (2008)
Temperatur	Einstellung in Abhängigkeit vom Tierwohl und Außentemperatur	12 bis 34 °C	kein Einfluss auf die Auswahl Abluftreinigungsverfahren
Volumenstrom	große Volumenströme stark schwankend (Tagesgang, Jahresgang)	Schwankungen von 8-fach über Tag/Nacht 44-fach über Jahr max. Luftrate im Sommer ca. 300.000 m³/h	große Schwankungen generell für biologische Abluftreinigung schwierig Auslegung der Anlagen für max. Sommerluftrate erforderlich
Feuchte	schwankend, Höchstwerte im Winter	46 bis 85 % max. 93,2 %	Gefahr Funktionsausfall filternder Abscheider durch feuchten Filterkuchen, bei Gefahr Kondensatausfall im Abluftkanal

Zusammenfassend ergeben sich unter Berücksichtigung der o. g. Rand- und Betriebsbedingungen für die Auswahl eines Abluftreinigungsverfahrens folgende Aufgaben:

- Beseitigung von Feststoffen/Partikeln oder Bioaerosolen vor einer nachgeschalteten Abluftbehandlung, wenn diese für hohe Staubkonzentrationen nicht geeignet ist

- Beseitigung der Ammoniakfrachten
- weitere Behandlung als Endreinigung (z. B. Aerosolabscheider/Geruchsfilter/Feinstaubabscheider zur Beseitigung von Gerüchen und Bioaerosolen oder Techniken zum Inaktivieren von Keimen/Bioaerosolen), um das geforderte Emissionsziel zu erreichen

5 Abluftreinigungsverfahren

5.1 Methodik zur Bewertung

Vor dem Einbau einer Abluftbehandlungsanlage sollte konsequent geprüft werden, ob eine Reduktion an der Quelle oder eine optimierte Standortwahl bereits zu einer Verminderung von Konfliktsituationen führt. Die entscheidenden Kriterien für die Auswahl und Bemessung von Abluftbehandlungsverfahren sind

- die qualitative Analyse des Rohgases (Zusammensetzung/Rohgasbeladung, Verunreinigungen s. Kap. 4.1),
- die quantitative Analyse des Rohgases (Konzentration, Maximalwerte, Schwankungsbreite s. Kap. 4.2),
- die Analyse der Anlagen- und Betriebsparameter (Abluftvolumenstrom, Feuchte, Temperatur s. Kap. 4.3),
- die zulässige emittierte Konzentration (Zielwert bzw. rechtliche Anforderungen s. Kap. 2 und 4.1) und
- der Stand der Technik (Wirtschaftlichkeit in Verbindung mit erreichbarem Höchstmaß der Umweltleistung und Funktionssicherheit (s. auch Kap. 5.2).

Daraus ergibt sich folgende Vorgehensweise:

- Zunächst werden alle prinzipiell möglichen Verfahren der Abluftreinigung gelistet und im Hinblick auf die Anwendungsgrenzen (s. Kap. 5.3) und die Wirtschaftlichkeit (s. Kap. 5.4) bewertet (s. Kap. 0).
- Anschließend werden bereits am Markt verfügbare Verfahren für die Geflügelhaltung (s. Kap. 6.1) und Anlagen mit vergleichbarem Emissionspotenzial (s. Kap. 6.3) sowie der Forschungsstand in der Geflügelhaltung (s. Kap. 6.2) aufgeführt.
- Auf Basis dieser Analyse kann abgeleitet werden, welche Verfahren prinzipiell aufgrund der Anwendungsgrenzen unter Bezugnahme auf die o. g. Kriterien und wirtschaftlichen Randbedingungen als grundsätzlich geeignet für die Geflügelhaltung einzustufen sind. Diese Verfahren werden im Hinblick auf ihre Stärken und Schwächen ausführlich betrachtet, um so Hinweise für den möglichen Anlageneinsatz geben zu können. Hierbei wird entsprechend der Aufgabenstellung der Fokus auf die Abscheidung von Bioaerosolen (partikelförmigen Verunreinigungen) und Gerüchen gelegt (s. Kap. 7).

5.2 Kenngrößen für die Auswahl von Abluftreinigungsverfahren

Bei der Bewertung der Einsatzfähigkeit im Sinne des Standes der Technik nach § 3 Abs. 6 BImSchG² sind folgende Kriterien anzuwenden:

- Anlagenverfügbarkeit
- Ressourcenverbrauch

² Stand der Technik ist demnach der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt.

- Investkosten (Kosten-Nutzen-Analyse)
- vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt wurden

Für die Bewertung des Standes der Technik von Abluftreinigungsverfahren in der Tierhaltung wurde der DLG-Prüfrahmen entwickelt (vgl. Kap. 6.1). Der Prüfrahmen wertet folgende Kriterien aus:

- Einsatzbedingungen (s. hierzu auch Beeinflussungsfaktoren)
- Anlagen- und Betriebskosten (Energieverbrauch, Hilfsmittel, Wartung etc.; s. hierzu auch Pkt. 5.2)
- Umweltsicherheit (Betriebsstoffe, Entsorgung, Auswirkung bei Störung)
- Flächenbedarf, Funktionssicherheit, Eignung zur Abscheidung weiterer Emissionen (Ammoniak und Gesamtstaub)

Grundsätzlich ist die zweckdienliche Auswahl und Auslegung einer Behandlungsanlage immer einzelfallbezogen anhand der konkreten Randbedingungen (u. a. Lüftung, Flächenbedarf, Zielwerte aus dem Schutzanspruch) vorzunehmen. Eine Auswahl geeigneter Abluftreinigungsverfahren kann somit, soweit Daten verfügbar sind, in Abhängigkeit von folgenden Kenngrößen erfolgen:

- Eignung für zu reinigenden Schadstoff (Geruch, Bioaerosol, Ammoniak)
- Anwendungsgrenzen (Volumenstrom, Druck, Temperatur)
- Stand der Technik in der Tierhaltung (Verfügbarkeit, Kosten (Invest/Betrieb))

5.3 Übersicht Abluftreinigungsverfahren

In Tabelle 7 werden die Abluftreinigungsverfahren („End-of-pipe“-Technologien) nach dem Stand der Technik gelistet und nachfolgend kurz erläutert. Zusätzlich werden Verfahren aufgeführt, für die praktische Erfahrungen bisher nicht ausreichend vorliegen. Die Verfahren, die nach den o. g. Kenngrößen für die Geflügelhaltung als geeignet erscheinen, werden ebenfalls kurz charakterisiert, um die Einordnung in den Gesamtkontext zu zeigen. Im Kap. 7 werden die Vor- und Nachteile ausführlich dargestellt.

Aus technischer Sicht lassen sich die Verfahren nach

- der Art und dem Prinzip der Abluftreinigung zum Erreichen des gewünschten Zieles,
- der Abscheidetechnik (Prozess zur Umsetzung der gewählten Ziele) und
- der Eignung zur Abreinigung bestimmter Parameter

unterscheiden.

Der Stand der Technik, die grundsätzliche Technologie, Anwendungsbeispiele bzw. Reinigungsleistung der einzelnen Abluftreinigungsverfahren, sind den in Tabelle 7 dargestellten VDI-Richtlinien zu entnehmen.

Tabelle 7: Übersicht der Abluftreinigungsverfahren zur Abscheidung tierspezifischer Parameter (VDI 4255 Blatt 1 Tabelle 2 [ergänzt])

Verfahren	Abscheidetechnik	Eignung Parameter	Verfahrensprinzip	Beispiele Anlagenarten	VDI-Richtlinie
Physikalische Verfahren	Adsorber	gasförmige Verunreinigung, insbesondere Kohlenwasserstoffe/ Gerüche	Anlagerung an der inneren Oberfläche poröser Adsorbentien	Festbett-, Bewegtbett-, Rotor-, Wirbelbett- und Flugstrom-Adsorber	3674
	Physikalische Wäsche (Adsorption)	Partikel	Auswaschen Abluftstoffe, auch Nasswäscher, Wasserwäscher	Sprühwäscher, Strahlwäscher, Wirbelwäscher, Venturiwäscher oder Rotationswäscher; Füllkörperkolonnen/-wäscher	3679 Bl. 1
	Filter	Partikel	durchlässige poröse Schicht hält Partikel zurück	Gewebefilter, Keramikfilter, Katalytischer Filter, HEAP, HEAF, Nebelabscheider	3677 Blatt 1 und 2
	Massenkraftabscheider	Partikel	Ausnutzung Schwerkraft, Trägheitskraft oder Fliehkraft, sodass Partikel mit strömenden Gas nicht mehr mitgetragen	Schwerkraftabscheider, Trägheits-/Umlenkabscheider, Fliehkraftabscheider (Zyklon)	3676
	Elektrofilter	Partikel	Abscheidung fester, flüssiger Partikel unter Wirkung von Elektrofeldern	trockenarbeitende und nassarbeitende Elektrofilter, Sonderkonstruktionen	3678
Biologische Verfahren	Biofilter	Gerüche, Kohlenwasserstoffe	Filtern und biol. Abbau bei Durchströmen org. Material mit Biofilm	Flächenbiofilter, Containerbiofilter, Etagenfilter	3477
	Biowäscher	Gerüche, gasförmige org./anorg. Schadstoffe	Absorption/Adsorption und Abbau Schadstoffe durch Mikroorganismen	Kreuz, Gegen- oder Gleichstrom	3478 Bl. 1
Thermische Verfahren	Thermische Nachverbrennung (TNV)	Gerüche, gasförmige org. Schadstoffe, (Partikel)	Verbrennung von organischen Schadstoffen und Überführung in Wasser und Kohlendioxid	verschiedene Arten der Brenner, Brennkammer und Wärmetauscher	2442
	Katalytische Nachverbrennung (KNV)	Gerüche, gasförmige org. Schadstoffe, (Partikel)	Verbrennung von Schadstoffen an einem geeigneten Katalysator	verschiedene Arten der Brenner, Brennkammer und Wärmetauscher sowie Geometrien und Materialien des Katalysators	3476
Chemisch- (physikalische) Verfahren	Chemische Wäsche (Adsorption)	gasförmige org./anorg. Schadstoffe	Aufnahme Gas von einer Flüssigkeit (Wasser, chemische Zusätze)	Sprühdüsenwäscher, Wirbelstromnassabscheider, Venturiwäscher, Fallfilm-Filter	3675
	Oxidierende Wäsche	gasförmige Kohlenwasserstoffe, Gerüche	Reaktion durch Zugabe von Oxidationsmittel und Adsorption	Sprühwäscher, Venturiwäscher	3679 Bl.4
Innovative Verfahren	Nichtthermische Oxidation (NTP) Kaltplasmaverfahren	gasförmige Kohlenwasserstoffe, Gerüche	Ionisation des Gases durch Anlegen eines elektrischen Feldes (Barriere-, Koronaentladung, UV-Strahlung)	Erhöhung Reaktionsfähigkeit von Gasmolekülen, Herbeiführen partieller oder vollständiger Oxidation	2441
	UV-Strahlung/ Photoionisation	Gerüche, gasförmige org./anorg. Schadstoffe, Deaktivierung von Mikroorganismen	Ionisation des Gases durch Bestrahlung, Spaltung eines Moleküls, ausgelöst durch die Bestrahlung mit UV-Licht	Absorptionsmaximum des Schadstoffs muss dem Emissionsspektrum des UV-Strahlers entsprechen	-
	Adsorber/ Desorber	gasförmige Kohlenwasserstoffe, Gerüche	zur Aufkonzentration, Glättung der Belastung, höherer kleinerer Volumenstrom muss anschließend behandelt werden	Molekularsieb/Adsorptionsrad/ Aktivkohle	-
	Biomembranverfahren	Leicht flüchtige oder schwer wasserlösliche Schadstoffe	Überführung Schadstoffe in Flüssigkeit und Abbau über Mikroorganismen	Schlauchreaktoren/ Plattenreaktoren	-
	Bio-elektrische Gasentladung	Gerüche, Staub VOC	Chemische Reaktion in Koronaentladung	„BEGA“ Nass-Elektroabscheider mit poröser Niederschlagsselektrode	-

5.3.1 Physikalische Verfahren

Die Abluftreinigungsverfahren, die auf physikalischen Techniken beruhen, werden nachfolgend kurz beschrieben.

Adsorption

Werden anorganische und/oder organische gasförmige Schadstoffe an porösen Feststoffen, die eine große innere Oberfläche besitzen (Adsorbentien), angereichert, so handelt es sich um eine Adsorption. Die Abscheidung von Molekülen aus der Abluft beruht hierbei auf der Siebwirkung oder auf Anziehungskräften der obersten Molekülschicht der Adsorbentien.

Physikalische Wäscher (Absorption)

Bei der Nassabscheidung oder Absorption erfolgt ein Masseübergang zwischen einem löslichen Gas und einem Lösemittel. Beispielsweise werden Partikel mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht oder in ihr gebunden und aus dem Gasstrom entfernt. Als Waschflüssigkeit kommt bei der physikalischen Absorption Wasser zum Einsatz.

Massenkraftabscheider

Bei der Massenkraftabscheidung werden die Staubpartikel durch Schwerkraft, Trägheitskraft oder Fliehkraft in Zonen des Abscheiders transportiert, wo sie verbleiben, weil sie durch das strömende Gas nicht mehr entfernt werden können. Massenkraftabscheider nehmen bei wachsenden Partikeldurchmessern mit deren dritter Potenz zu. Massenkraftabscheider wie Zyklon, Demister oder Schwerkraft-Gegenstromabscheider kommen überwiegend als Vorabscheider zum Einsatz.

Filter

Filternde Abscheider halten wie ein Sieb (durchlässige poröse Schicht = Filtermittel) Feststoffe aus dem Rohgasstrom zurück. Sie werden als Schlauchfilter oder Flächenfilter gebaut, die als Saug- oder Druckfilter betrieben werden. Bei der Abluftfilterung werden grundsätzlich die Tiefenfiltration und die Oberflächenfiltration unterschieden.

Als besondere Gewebefilter werden der Absolutfilter (HEAP) und der HochleistungsfILTER (HEAF) eingesetzt. Bei Absolutfiltern durchströmt das Filtermaterial Papier mit hoher Packungsdichte (Papier oder Glasfasermatten). Er ist für die Abreinigung von sehr kleinen Partikeln zwischen PM_{0,12} und PM_{0,3} geeignet. Bei hohen Staubfrachten sind Vorfilter notwendig. HochleistungsfILTER werden im Regelfall für die Entfernung von Aerosolen eingesetzt und bestehen aus einem Bettfilter, in dem sich die Aerosole zu Tröpfchen vereinen.

Nebelabscheider sind gestrickte Filter und für die Entfernung spezieller Teilchengrößen geeignet. Im Regelfall werden diese zur Abscheidung von nebligen Schadstoffen (Aerosolen) genutzt. Bei Reinigung können auch Partikel abgeschieden werden. Für feste Partikel sind sie jedoch eher ungeeignet aufgrund des Verstopfens des Filtermaterials.

Elektrofilter

Bei Elektrofiltern werden elektrisch geladene Staubteilchen in einem elektrischen Feld von einer entgegengesetzt geladenen Elektrode angezogen und gebunden (Niederschlagselektrode). Die angelagerten Teilchen können durch Abklopfeinrichtungen oder durch einen Flüssigkeitsfilm abtransportiert werden. Elektrofilter weisen eine gute Abscheideleistung für Partikelgrößen > 1 µm auf. Sie werden im Regelfall bis Teilchengrößen von PM_{2,5} und kleiner, bei hoher Ablufttemperatur, großen Abluftvolumenströmen eingesetzt.

5.3.2 Biologische Verfahren

Unter biologischen Verfahren werden Verfahren eingeordnet, die auf der Fähigkeit von Mikroorganismen basieren, bestimmte organische und anorganische gasförmige Verbindungen biochemisch zu oxidieren.

Biofilter

Verfahrensprinzip des Biofilters ist die Durchleitung des Abluftstroms durch eine Schüttung aus organischem Material wie Holzhackschnitzel, an deren Oberfläche sich bei ausreichender Materialfeuchtigkeit ein Biofilm aus Mikroorganismen ausbildet. Wasserlösliche Komponenten des Abluftstroms werden im oberflächlichen Feuchtigkeitsfilm des Filtermaterials absorbiert und durch die ansässigen Mikroorganismen oxidiert und abgebaut. Um den für die Funktion des Biofilters erforderlichen Feuchtigkeitsgehalt aufrechtzuerhalten, ist in Abhängigkeit der Feuchtegehalte im Rohgas und der Umgebungsbedingungen eine Wasserzufuhr in das Filtermaterial erforderlich.

Biowäscher (Absorption)

Der Biowäscher ist die Kombination eines physikalischen Wäschers und einer Belebungseinheit. Dabei werden die Schadstoffe physikalisch aus dem Wasser ausgewaschen und anschließend in der wässrigen Phase biologisch abgebaut. Die Mikroorganismen werden beim Biowäscher in der Waschflüssigkeit suspendiert. Das regenerierte Washwasser wird im Kreislauf gefahren.

Rieselbettreaktoren

Wäscher, in denen das Waschmedium über Strömungseinbauten verregnet wird, werden als Rieselbettreaktoren bezeichnet.

5.3.3 Thermische Verfahren

Thermische Verfahren zur Abluftreinigung beruhen auf der Oxidation von organischen Schadstoffen zu Wasser und Kohlendioxid. Die Verbrennung ist als Reinigungsverfahren für alle organischen Schadstoffe geeignet. Problematisch ist die Entstehung toxischer Stoffe durch die Oxidation von anorganischen Bestandteilen in der Abluft.

Thermische Nachverbrennung

Bei der thermischen Nachverbrennung oxidieren Kohlenwasserstoffe bei Temperaturen zwischen 750 und 1.000°C. Der Einsatz von Heizmitteln wird bei der Reinigung von Abluft mit geringem Brennstoffgehalt notwendig.

Katalytische Nachverbrennung (KNV)

Das Prinzip der katalytischen Nachverbrennung beruht auf einer Verbrennung von Schadstoffen an einem geeigneten Katalysator. Damit kann die für die Oxidation erforderliche hohe Temperatur reduziert werden.

Beide Verfahren können mit rekuperativer oder regenerativer Abluftvorwärmung ausgeführt werden. Bei der rekuperativen Nachverbrennung wird das Rohgas über einen Wärmetauscher durch das heiße Reingas vorgewärmt. Bei der regenerativen Nachverbrennung wird die Wärmeenergie des Reingases in einer Wärmespeichermasse, die sich direkt in der Oxidationszone befindet, gespeichert und dem Oxidationsprozess zur Verfügung gestellt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb sollte die Restwärme des Reingases genutzt werden.

5.3.4 Chemische Verfahren

Chemische Gaswäsche (Absorption)

Beim chemischen Wäscher werden abhängig von der Art der abzuscheidenden Stoffe im Gegensatz zum physikalischen Wäscher alkalische oder saure Lösungen für die Absorption eingesetzt.

Oxidierende Gaswäsche

Eine Sonderform der Gaswäsche ist die oxidierende Gaswäsche. Bei der oxidierenden Gaswäsche werden die zu entfernenden Abgasbestandteile durch die Zugabe von Oxidationsmitteln in ihrer chemischen Zusammensetzung geändert und in leicht abscheidbare Verbindungen oder weniger schädliche Verbindungen umgewandelt. Anwendungsmöglichkeiten bestehen bei reaktionsträgen organischen Stoffen.

5.3.5 Innovative Verfahren

Kaltplasmaverfahren (stark oxidative Verfahren)

Beim nichtthermischen Plasma (NTP) werden Gasmoleküle durch die Elektronenaufnahme oder -abgabe ionisiert. Die eingekoppelte kinetische Energie wird hauptsächlich auf die Elektronen übertragen. Diese freien Elektronen können dann durch Stöße mit weiteren Elektronen zur Ionisierung/Radikalisierung der Stoßpartner führen, während die Gastemperatur sich auf dem Niveau der Umgebungstemperatur bewegt. Die Energie der Elektronen wird dazu benutzt, um reaktive Stoffe (Kohlenwasserstoffverbindungen) zu synthetisieren.

Luftionisationsanlagen (schwach oxidative Verfahren)

Unter den üblichen schwach oxidativen Verfahren befinden sich die Ionisierung und die UV-Verfahren. Diese beruhen auf dem Prinzip, dass mitunter die Adsorption eines einzelnen Sauerstoff- oder Hydroxyl-Radikals die Geruchseigenschaften

eines Stoffs signifikant reduzieren kann. Die Wirkung schwach oxidativer Verfahren ist sehr stoffgruppenspezifisch und kann durch Anwesenheit bestimmter schädlicher Gase stark beeinträchtigt werden (z. B. Bildung von Aminen in Anwesenheit von Ammoniak) (UBA 2006).

Adsorption/Desorption

Die Adsorption nutzt die Eigenschaft bestimmter Stoffe (z. B. Aktivkohle, Zeolith), Schadstoffe an ihrer Oberfläche anzulagern, die später wieder ausgetrieben werden können (Desorption). Dabei ist der entstehende Desorptionsstrom höher konzentriert (bis zum Faktor 20) bei entsprechend kleinerem Volumen. Erste Versuche für die Adsorption/Desorption von Bioaerosolen sind aus der Abluftreinigung der Kompostierung bekannt (STEGEMANN et al. 2004). Der konzentrierte Abluftstrom muss anschließend einer Behandlung unterzogen werden. Das Verfahren wird in diesem Sinn als Vorschaltstufe eingesetzt, um die zu behandelnde Abluftmenge zu reduzieren.

Biomembranverfahren

Beim Biomembranverfahren wird eine Silikonkautschukmembran verwendet. Die Abluftinhaltsstoffe werden in der Membran von der Gasphase in die Wasserphase überführt und dort den Mikroorganismen zugänglich gemacht. Dieses Verfahren ermöglicht auch, schwer wasserlösliche oder leicht flüchtige Stoffe mit Mikroorganismen in Kontakt zu bringen (FISCHER 1990). Das Verfahren ist bisher nicht großtechnisch im Einsatz.

Bio-elektrische Gasentladung

Die bio-elektrische Gasentladung besteht aus einem Elektroabscheider und Bio-Rieselbettreaktor. Einen Prototyp dieser Anlage hat die BTU Cottbus entwickelt und im industriellen Einsatz erprobt. Es erfolgt eine Vermischung durch den elektrischen Wind und ein chemischer Abbau von Gerüchen über Ozon (MICH et al. 2008).

5.3.6 Kombination von Abluftreinigungsverfahren

Die in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Verfahren sind generell nicht geeignet, die verschiedenen Luftschadstoffe im Rohgas von Geflügelställen wie Ammoniak, Staub/Bioaerosole und Gerüche gezielt abzuscheiden. Daher sind bei der weiteren Betrachtung die Kombinationsmöglichkeiten dieser Verfahren zu berücksichtigen. Unabhängig davon zeigen die vorliegenden Erfahrungen, dass bei Einsatz einzelner Verfahren eine Minderung aller genannten Komponenten erreicht wird.

5.4 Kosten der Abluftreinigung

Kostenschätzungen für die Abluftreinigung in Abhängigkeit der anzuwendenden Verfahren sind nicht zielführend, weil

■ Investkosten

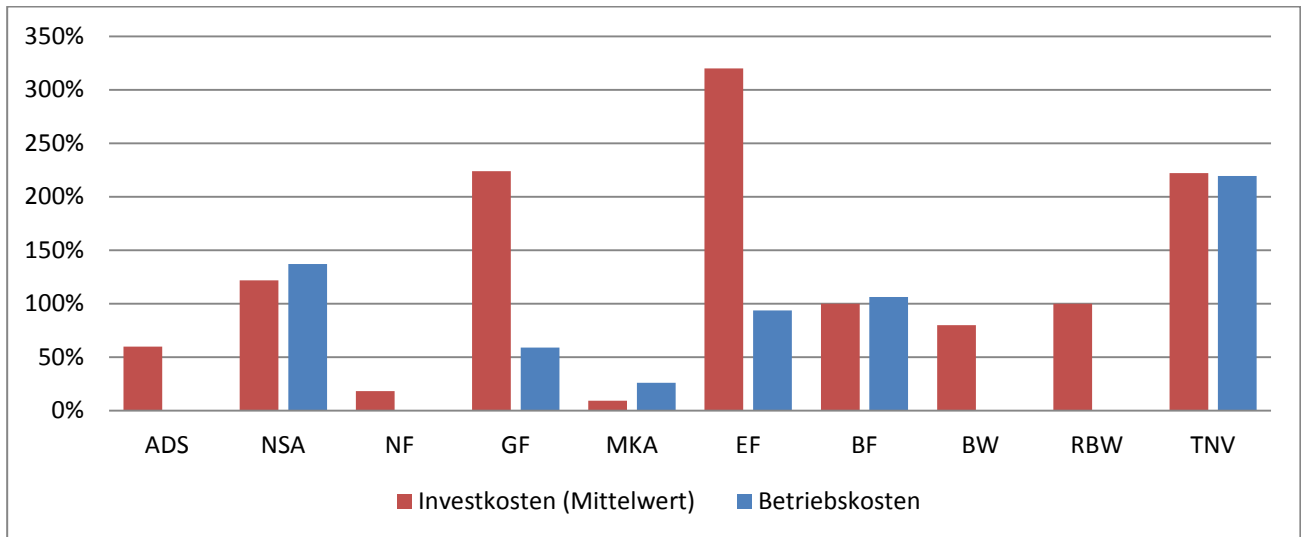
- von der Ablufführung (abhängig vom Stallbau mit zu überwindendem Druckverlust und Lüftungsverfahren mit Anordnung der Abluftreinigung etc.),
- vom Emissionsminderungsziel (abhängig vom Standort der Anlage) sowie

■ Betriebskosten

■ von unterschiedlichen Schadstoffbelastungen und Volumenströmen (abhängig von Haltungsform und -verfahren) abhängen.

In Abbildung 9 erfolgt daher nur eine qualitative Bewertung möglicher Investitions- und Betriebskosten der in Kap. 7 benannten Abluftreinigungsverfahren unter Berücksichtigung der Kostenschätzungen in SABO (2003), UBA (2003 und 2006) und eigenen Erfahrungen, soweit Daten verfügbar waren. Für die Adsorption, Nebelabscheider, Biowäscher und Rieselbettreaktoren liegen keine vergleichbaren Angaben zu den Betriebskosten vor.

Angaben zu Investitions- und Betriebskosten bestehender Abluftreinigungsanlagen für die Schweinhaltung enthält die KTBL-Schrift 451 (Preisstand 2006) und die KTBL-Datensammlung 2010/11 (Preisstand 2009/2010). Eine weitere Veröffentlichung ist geplant (ECKHOF 2016).



ADS... Adsorption

GF... Gewebefilter

BF... Biofilter

NSA... Nassabscheider

MKA... Massenkraftabscheider

BW... Biowäscher (Absorber)

(physikalische Wäscher)

EF...Elektrofilter

RBW... Rieselbettreaktor

TNV... Thermische Nachverbrennung

NF... Nebelabscheider

Abbildung 9: Investitions- und Betriebskosten verschiedener Abluftreinigungsverfahren in Relation zum Median über die Gesamtanlagen in %

Die Unterschiede der Gesamtkosten zwischen physikalischen und biologischen Verfahren sind mit Ausnahme des Elektrofilters verhältnismäßig gering. Höhere Kosten werden für die thermischen Verfahren ausgewiesen. Konkrete Kosten und damit eine ökonomisch sinnvolle Lösung hängen stark von den Marktpreisen und konkreten Randbedingungen des Einsatzfalles ab.

5.5 Bewertung der Abluftreinigungsverfahren

Tabelle 8 und Tabelle 9 ist die Bewertung der genannten Abluftreinigungsanlagen mit Betriebserfahrungen im Hinblick auf die herausgearbeiteten Kriterien zu entnehmen. Kombinationsmöglichkeiten der benannten Verfahren bleiben dabei zunächst unberücksichtigt. Prinzipiell besitzen alle in Kap. 5.3 beschriebenen Abluftreinigungsverfahren das Potenzial, einzelne aus der Geflügelhaltung resultierende Stoffe (Ammoniak, Bioaerosole/Partikel oder Gerüche) zu entfernen bzw. zu eliminieren. Basis der Bewertung sind Angaben aus der Literatur (u. a. UBA 2003; UBA Wien 1999), von Anlagenherstellern (u. a. Dutchmann, Rimu) und eigene Erfahrungen.

Tabelle 8: Bewertung der physikalischen Abluftreinigungsverfahren in Bezug auf die zu reinigenden Stoffe und die Anwendungsgrenzen für die Geflügelhaltung

Bewertungskriterium	Physikalische Verfahren							
	ADS	NSA	Filter				MKA	EF
			NF	GF	HEAP	HEAF		
<i>Eignung für zu reinigenden Schadstoff</i>								
Geruch	++	+	-	-	-	-	-	-
Ammoniak	++	+	+	-	-	-	-	0
Staub/Bioaerosole (<u>feucht</u>)	-	+ (EB)	+	+	0	0	++	++
<i>Anwendungsgrenzen Rohgas (Geflügelhaltung)</i>								
Volumenstrom > 100.000 Nm³/h	+	++	+	++	-	-	0	++
hohe Schadstoffkonzentration	0	+	++	++	0	0	+	0
geringe Schadstoffkonzentration	+	+	+	+	-	+	+	++
schwankende Schadstoffkonzentration	+	++	+	++	+	+	++	++
wechselnde Abluftverhältnisse	0	++	+	++	+	+	++	++
Resistenz gegen Störanfälligkeit (Abluftverunreinigung)	0	+	0	++	+	+	++	0
Temperatur < 40 °C	++	++	++	++	++	++	++	++

ADS... Adsorption
 NSA... Nassabscheider
 (physikalische Wäscher)

GF... Gewebefilter
 NF... Nebelabscheider
 HEAP... Absolutfilter

HEAF... Hochleistungsfilter
 MKA... Massenkraftabscheider
 EF... Elektrofilter

- ++ sehr gut geeignet bzw. hoch
- + geeignet bzw. mittel
- 0 bedingt geeignet/keine Erfahrung
- ausgeschlossen
- (EB) eingesetzt als Endbehandlung mit Vorabscheider

Tabelle 9: Bewertung der biologischen, thermischen und chemischen Abluftreinigungsverfahren in Bezug auf die zu reinigenden Stoffe und die Anwendungsgrenzen für die Geflügelhaltung

Bewertungskriterium	Biologische Verfahren			Thermische Verfahren		Chemische Verfahren	
	BF	BW	RBW	TNV	KNV	CW	OW
<i>Eignung für zu reinigenden Schadstoff</i>							
Geruch	++	+	+	++	++	0	+
Ammoniak	+	++	++	-	-	++	++
Staub/ Bioaerosole (<u>feucht</u>)	-	0	-	0	0	0	0
<i>Anwendungsgrenzen Rohgas (Geflügelhaltung)</i>							
Volumenstrom > 100.000 Nm³/h	++	+	+	-	-	++	++
hohe Schadstoffkonzentration	0	++	+	++	+	++	+
geringe Schadstoffkonzentration	+	+	+	0	++	0	0
schwankende Schadstoffkonzentration	0	++	++	+	0	++	++
wechselnde Abluftverhältnisse	0	0	0	0	-	++	++
Resistenz gegen Störanfälligkeit (Abluftverunreinigung)	0	+	0	++	+	+	+
Temperatur < 40 °C	++	++	++	++	++	++	++

BF... Biofilter TNV... Thermische Nachverbrennung CW... Chemische Wäsche (Absorber)
 BW... Biowäscher (Absorber) KNV... Katalytische Nachverbrennung OW... Oxidierende Wäsche
 RBW... Rieselbettreaktor

++ sehr gut geeignet bzw. hoch
 + geeignet bzw. mittel
 0 bedingt geeignet/keine Erfahrung
 - ausgeschlossen

* Anhaltswerte, Abweichungen nach oben und unten möglich

Aus der vorgenommenen Bewertung ist zu entnehmen, dass folgende Verfahren aus der weiteren Betrachtung für den hier zu bewertenden Anwendungsfall ausgeschlossen werden können (Kennzeichnung „-“ für Kriterien der Anwendungsgrenzen):

- HEAF... Hochleistungsfilter
- HEAP... Absolutfilter
- KNV... Katalytische Nachverbrennung
- TNV... Thermische Nachverbrennung

Ein HEAP- oder HEAF-Filterssystem wäre für den Einsatz im Bereich der Tier- bzw. Geflügelhaltung aufgrund der spezifischen Betriebsparameter überfordert und würde in einer relativ kurzen Zeit verstopfen. Diese Filteranlagen sind für sehr feine und trockene Stäube zum Erreichen extrem niedriger Reingaswerte konzipiert. Diese Anlagen werden häufig im Umluftbetrieb gefahren und in der Pharmazie eingesetzt.

Bei thermischen Verfahren steigt der kostenintensive Einsatz von Brennstoffen bei großen Volumenströmen und gleichzeitig geringer Belastung brennbarer Schadstoffe. Zusätzlich werden Sekundäremissionen durch die Verbrennung generiert. Ein Einsatz wäre bei vorgeschalteter Aufkonzentration und damit Verkleinerung des Volumenstromes denkbar. Möglichkeiten zur Volumenreduzierung (z. B. Aufkonzentration, Abluftrückführung) für organische Stoffe/Gerüche sind prinzipiell möglich, für Partikel/Bioaerosole derzeit jedoch für keine Anwendung im technischen Maßstab bekannt.

Für diesen Einsatzfall sind biologische Verfahren grundsätzlich geeignet, sodass diese Verfahren weiter betrachtet werden. Die Leistungsfähigkeit wird jedoch durch stark wechselnde Volumenströme beeinträchtigt. Auch hier wäre ein möglicher Ansatz, die Aufkonzentration oder Zuluftkonditionierung durch Kühlung bei Sommerluftrate, um die Leistungsfähigkeit sicherzustellen.

Erhebliche Zweifel bestehen an der Leistungsfähigkeit der Verfahren der Aufkonzentration (Biomembran und Adsorption/Desorption) und Bio-elektrische Gasentladung sowie der Anwendbarkeit für den hier zu betrachtenden Fall. Diese Verfahren werden daher nicht weiter verfolgt.

6 Verfügbare Systeme der Abluftreinigung

6.1 Abluftreinigung in der Geflügelhaltung

6.1.1 DLG-zertifizierte Abluftreinigungssysteme

Aufbauend auf dem Cloppenburgener Leitfaden HAHNE (2002) wurde der erste DLG-Qualitätstest für Abluftreinigungsanlagen in der Landwirtschaft entwickelt und seitdem weiter fortgeschrieben. Mit Stand Februar 2015 liegt der 1. Prüfrahmen vor, der 2016 durch einen neuen Prüfrahmen überarbeitet werden soll. Mit dem neuen Prüfrahmen soll der Schwerpunkt der DLG-Prüfung auf den Nachweis der Funktionsfähigkeit im Betriebszustand gelegt werden. Im Ergebnis löst die DLG-Gesamtprüfung das DLG-Signum ab. Neu ist auch die nunmehr begrenzte Gültigkeit des Nachweises der DLG-Gesamtprüfung. Vorgesehen sind fünf Jahre.

Der Prüfrahmen legt Qualitätskriterien für die Emissionsminderung von Geruch, Staub, Ammoniak und optional für Bioaerosole fest. Für zwangsbelüftete Schweineställe wurde bereits ein hoher Entwicklungsstand in der Abluftreinigung erreicht, der durch die Vorgaben der Prüfrahmen und ergänzend der Filtererlässe (MUEK 2015), (MKULNV 2013) klar definiert wird (vgl. Kap. 2.2).

Für die Geflügelhaltung existieren bisher nur sechs anerkannte Abluftreinigungsanlagen, davon fünf für die Hähnchenmast und eine für die Legehennenhaltung (vgl. Tabelle 10). Drei weitere Verfahren sind in der Prüfung (ECKHOF 2016). Erste Anlagen wurden Anfang 2010 anerkannt. Ein Stand der Technik kann damit noch nicht definiert werden. Für die Haltung von Puten, Enten oder Aufzuchtanlagen liegen keine anerkannten Abluftreinigungsanlagen vor. Alle geprüften Anlagen verfügen über keine Anerkennung zur Abscheidung der Bioaerosole und Gerüche. Der Funktionsnachweis zur Reduzierung von Ammoniak und Staub wird sicher erfüllt.

Tabelle 10: DLG-geprüfte Abluftreinigungssysteme (DLG 2009-2016)

DLG-Nr.	Bezeichnung	Hersteller	Anzahl Stufen	Reinigungsverfahren
5952	Chemowäscher MagixX-B	Big Dutchmann International GmbH	1	Stufe 1: Chemischer Wäscher im Kreuzstromverfahren für die Hähnchenkurzmast, bestehend aus mehreren Modulen (bis zu 6) zur Abscheidung von Gesamtstaub und Ammoniak, saures Waschwasser mit pH-Wert = 3 bis 3,3; diskontinuierliche Bedüsung der Filterwände
6212	Chemowäscher mit Tropfenabscheider EMMI	Schulz Systemtechnik GmbH	2	Physikalisch-Chemische Abluftreinigung für Hähnchenschwermast Stufe 1a: Rohrbündelgleichrichter zur Abscheidung von Ammoniak und Staub (Schwefelsäure pH = 3,5) Stufe 1b: Tropfenabscheider zur Abscheidung von Aerosolen (Minderung Verfrachtung von Säure und stickstoffhaltigem Wasser) Stufe 2: Füllkörper aus strukturierter Packung (Wasserberieselung pH = 6,8) zur Geruchsminderung Besonderheit: drei Reinigungsbereiche zur Anpassung an Volumenstrom (40 %/ 30 %/30 %)
6254	Chemowäscher mit Tropfenabscheider	Anisol GmbH	1	Stufe 1: chemischer Abluftwäscher für die Hähnchenschwermast zur Abscheidung von Staub und Ammoniak, mit permanenter Berieselung, Prallblech und nachgeschalteter Tropfenabscheidung, pH ≤ 3,5
6260	Chemowäscher mit Tropfenabscheider INNO + Polo-M	Inno + B. V.	1	Stufe 1: chemischer Abluftwäscher für die Hähnchenschwermast zur Abscheidung von Staub und Ammoniak, nachgeschaltete Tropfenabscheidung, pH ≤ 3,3
6271	Chemowäscher mit Tropfenabscheider	I.U.S. GmbH	1	Stufe 1: chemischer Abluftwäscher für die Hähnchenschwermast zur Abscheidung von Staub und Ammoniak, mit permanenter Berieselung pH ≤ 4, nachgeschaltete Tropfenabscheidung, Wasserreinigung
6344	Chemowäscher mit Tropfenabscheider	Inno + B. V.	1	Stufe 1: Chemische Wäsche mit Tropfenabscheider, Vorsprühen Rohgas

Alle Abluftreinigungsanlagen mit rein chemischer Wäsche arbeiten mit Packungen und Einsatz von Säure zur Ammoniakabscheidung, hierbei wird im Regelfall Schwefelsäure eingesetzt. Bei fünf der sechs Abluftreinigungsanlagen handelt es sich um einen einstufigen Chemowäscher mit Tropfenabscheider. Aufgrund der erhöhten Luftaustrittsgeschwindigkeiten sind Tropfenabscheider zwingend, damit ein Austragen der Waschflüssigkeit in die Umgebung verhindert wird.

Die Anlage für die Kurzmast (5952) wird ohne Tropfenabscheider betrieben. Die Abluftreinigung EMMI (6212) wurde mit einer zweiten Reinigungsstufe (Wasserwäsche zur Staubabscheidung) ausgestattet. Die Art der Anlagen unterscheiden sich im Aufbau, der Durchströmung der Filterwände/Füllkörper und des Prinzips der Luftführung (Saugprinzip/Druckprinzip; vertikal/horizontal durchströmt).

Zur Vorabscheidung der in der Geflügelhaltung problematischen Stäube werden unterschiedliche Systeme eingesetzt, die von der reinen Vorbefeuchtung über Vorfilter (Lochfolie als Prallfolie) bis zu Prallblechen reichen. Im Regelfall ist ohne Einsatz eines Vorabscheiders eine häufigere Abschlämmung der Filterwände erforderlich, um ein Verstopfen durch Staub und Federn in kürzester Zeit zu verhindern.

Weitere Besonderheiten sind die Abluftreinigung über Reinigungsbereiche (6212) und der Einsatz einer Wickelfolie zur Verringerung der durchströmten Filterfläche (6257) zur Regulierung der schwankenden Abluftströme. Die Anlage 62112 ist mit drei Reinigungsbereichen ausgestattet, die abhängig von der Höhe des aktuellen Abluftstroms stufenweise zugeschaltet werden.

Eine Abluftreinigung (6271) wurde mit Einsatz eines Abluftwärmetauschers im Winterbetrieb getestet.

6.1.2 Reinigungsleistung

Eine Einschätzung der Abluftreinigungsleistung auf Basis der DLG-Prüfberichte ist Tabelle 11 zu entnehmen. Soweit Reinigungsleistungen für Einzelkomponenten im DLG-Prüfbericht nicht nachgewiesen sind, werden die Anlagen als nicht geeignet eingestuft. Die bisher vorliegenden rechtlichen Anforderungen (vgl. Kap. 2.1) werden bei Eignung (+) erfüllt. Der Messumfang zum DLG-Eignungstest umfasst dabei

- für Masthähnchen zwei Durchgänge im Sommer und zwei im Winter,
- für Legehennen bei voller Belegung zwei Monate im Sommer und zwei im Winter.

Tabelle 11: Reinigungsleistung der DLG-geprüften Anlagen (DLG 2009–2016)

DLG-Nr.	Abluftreinigungsverfahren	Reinigungsleistung			
		Ammoniak	Staub		
			Gesamtstaub	PM10	PM2,5
5952	1-stufige Chemowäsche	++	++	++	k.A.
6212	2-stufige physikal.-chem. Abluftwäscher mit Tropfenabscheider	++	+	+	++
6254	1-stufige Chemowäsche mit Tropfenabscheider, Prallblech	+	+	+	++
6260	1-stufige Chemowäsche mit Tropfenabscheider	++	+	+	++
6271	1-stufige Chemowäsche mit Tropfenabscheider, Wasserreinigung	++	+	+	++
6344	Chemowäsche mit Tropfenabscheider	+	+	+	++

+ geeignet; ++ sehr gut geeignet; - nicht geeignet nach VDI 3894 Blatt 1

Keine der zertifizierten Anlagen konnte die Anforderungen an die Abluftreinigung für Gerüche mit 300 GE/m³ im Reingas und der Forderung, dass kein Rohgasgeruch im Reingas mehr wahrnehmbar ist, erfüllen. Die Anlage 6260 (1-stufige Chemowäsche) hat auch mit der ClO₂-Dosiertechnik diese Anforderungen nicht erreicht. Messdaten wurden nicht veröffentlicht. Die 2-stufige Abluftwäsche (6212) führt zu einer deutlichen Minderung der Geruchsemissionen, jedoch werden auch hier die Anforderungen an eine DLG-Zertifizierung nicht erreicht. Im Sommer wurde eine Minderung von 61 % auf 575 GE/m³ und im Winter von 22 % auf 1.241 GE/m³ gemessen. Ein Rohgasgeruch war noch wahrnehmbar.

Das Rückhalteverhalten von Bioaerosolen wurde im Rahmen der DLG-Prüfung nicht bewertet. Für eine einstufige Chemowäsche liegen Messdaten des LUFA Nord-West vor, die in der Tendenz Minderungen für Bakterien von einer Zehnerpotenz und eine Erhöhung der Keimbelastung ausweisen, die vergleichbar mit den in der VDI 4255 Blatt 2 veröffentlichten Daten nach dem Einsatz von Abluftreinigungsanlagen sind (HAHNE 2014).

Die Abscheideleistung für Staubemissionen auf Basis der DLG-Prüfdaten kann Abbildung 10 entnommen werden. Die chemische Wäsche ist keine Abluftreinigungstechnik, die auf die Staubabscheidung ausgerichtet ist (vgl. Einordnung in Tabelle 11). Dennoch werden im Mittel 80 % Reinigungsleistung erzielt (vgl. nachfolgende Auswertung).

Die Abscheideleistung für Gesamtstaub schwankt zwischen 62 und 98 %. Eine Zunahme der Abscheideleistung mit der Rohgaskonzentration ist nicht nachweisbar. Es wird ein konstantes Abscheideverhalten erreicht. Grundsätzlich zeigen die DLG-geprüften Anlagen eine bessere Abscheideleistung für Partikelgrößen < 2,5 µm als für die Partikelfractionen PM10 und Gesamtstaub.

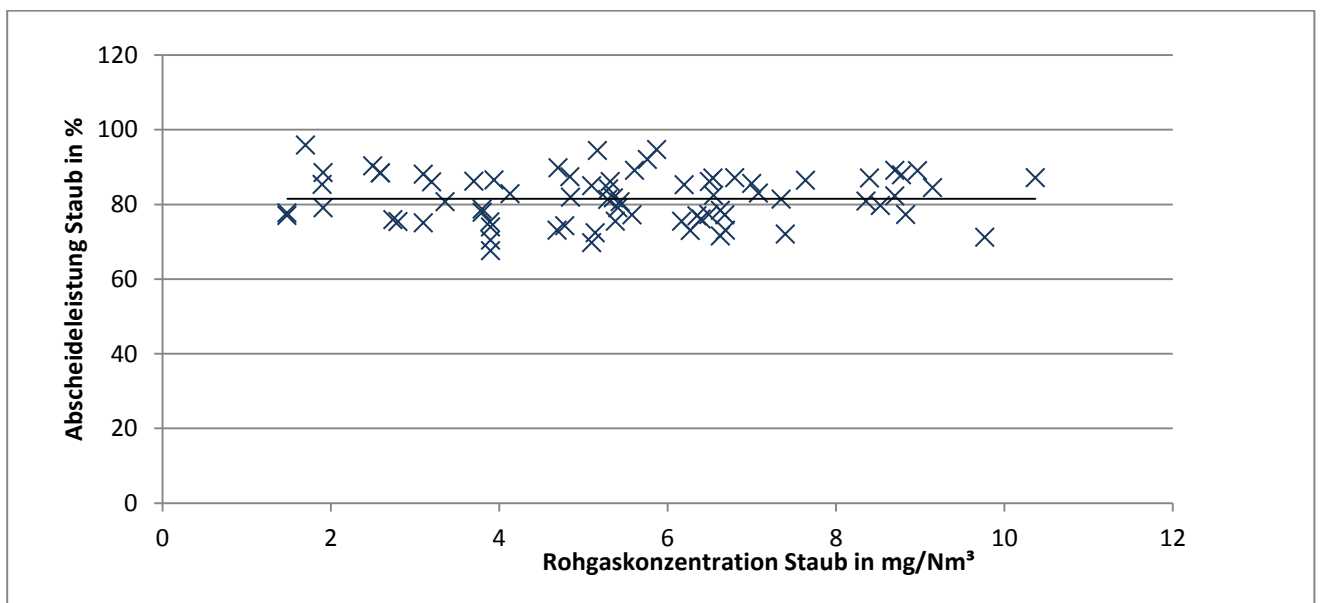
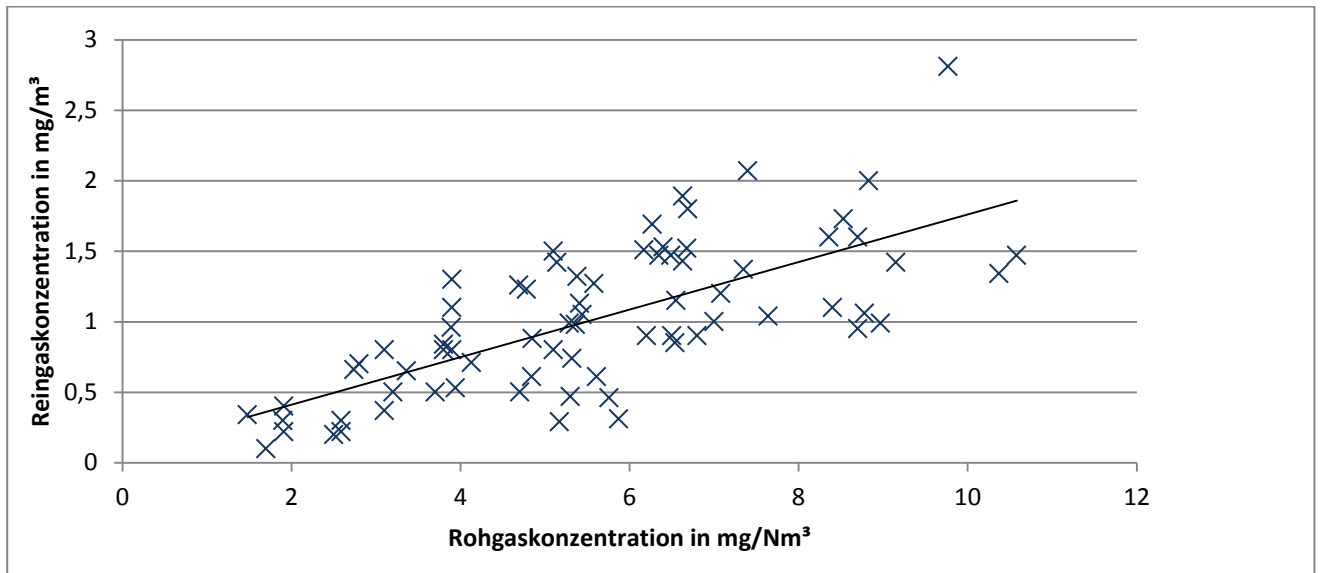


Abbildung 10: Abscheideleistung DLG-geprüfter Abluftreinigungsanlagen für Geflügelhaltung (Datengrundlage: Prüfdaten DLG 2009–2016)

6.1.3 Kenngrößen Abluftbehandlung

Die Verweilzeit in den Abluftwäschern wird mit 0,1 bis 0,79 s bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,15 m/s (Winter) bis 0,98 m/s im Sommer angegeben. Für die Tropfenabscheider bewegt sich die Verweilzeit zwischen 0,1 und 0,4 s. Für gut wasserlösliche Stoffe wie Ammoniak ist mit diesen kurzen Verweilzeiten eine gute Rückhalteeffizienz erreichbar, wenn eine möglichst große Konzentrationsdifferenz zwischen Gas- und Flüssigphase eingestellt wird. Dieser Effekt wird durch die sofortige chemische Bindung des Ammoniaks zu Ammoniumsulfat ermöglicht.

Die Filterflächenbelastung schwankt zwischen 525 m³/(m²·h) im Winter und 4.600 m³/(m²·h) im Sommer bei unterschiedlichen Anlagen.

6.1.4 Verfügbare Anlagen ohne DLG-Zertifizierung

Neben den zertifizierten Anlagen zur Abluftreinigung werden am Markt von verschiedenen Anlagenherstellern weitere Systeme angeboten. Die in der Praxis größtenteils bisher eingesetzten Anlagen (201 Anlagen bis 2013; ECKHOF [2016]) verfügen über kein DLG-Prüfzertifikat, sodass über die Wirksamkeit in Abhängigkeit von der richtigen Dimensionierung keine gesicherten Aussagen vorliegen. Vergleichbare Nachweise über die erreichbare Reinigungsleistung für diese Anla-

gen sind ebenfalls nicht verfügbar. Diese Anlagen sind auf die Abscheidung von groben Stäuben/Federn, Ammoniak und Gerüchen ausgerichtet.

Für die Staubabscheidung handelt es sich dabei um einfache Konstruktionen zur Vorabscheidung von Grobstäuben nach dem Fliehkraftprinzip. Die Ammoniakabscheidung wird über chemische Wäscher und die Geruchsminderung über Biofilter realisiert.

Die Fa. Dutchman bietet einen speziell für die Geflügelhaltung entwickelten Staubfilter „Stuffnix“ an. Messdaten wurden bei der 12. KTBL-Tagung veröffentlicht. Der Filter besteht aus einer zweischichtigen Filterwand. Die durchströmende Luft wird dabei an den Filterwänden massiven Richtungsänderungen ausgesetzt, sodass Staubpartikel durch die Fliehkraft abgeschieden werden. Messergebnisse weisen Abscheideraten bis zu 58 % für die PM10-Fraktion und bis zu 37 % für PM2,5-Fraktion der Stäube aus (STROHMAIER et al. 2015). Somit eignet sich die Anlage bisher nur zur Vorabscheidung in einer kombinierten Abluftreinigungsanlage zur Minderung der Verstopfungsgefahr der nachfolgenden Reinigungsstufen.

Die Fa. Hartmann bietet einen Biofilter an, der zur Abscheidung der Komponenten Staub, Ammoniak, Geruch und Keime eingesetzt werden kann. Nachweismessungen (TÜV 2008) liegen bisher nur für den Einsatz in der Schweinehaltung vor.

6.2 Forschungsstand Abluftreinigungsverfahren in der Geflügelhaltung

Der derzeitige Kenntnisstand möglicher Abluftreinigungsverfahren und erreichbarer Reinigungsleistung für die Tierhaltung wird im BVT-Merkblatt (BAT 2015, vgl. Kap. 6.3.1) und für Bioaerosole in der VDI 4255 Blatt 1 zusammengefasst.

Vom von Thünen-Institut wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Anlagen- und Anlagenkombinationen für die Reinigung der Abluft aus der Geflügelhaltung im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens getestet.

Ziel der Arbeiten mit verschiedenen Versuchsanlagen (Auswahl vgl. Tabelle 12) war und ist, Anlagen mit einem verbesserten Geruchsstoffabbau sowie einer effektiven Staubvorabscheidung zur Verhinderung der Verstopfungsgefahr nachfolgender Reinigungsstufen und zur Ammoniakabscheidung zu entwickeln. Dabei sollen praxisnahe Lösungen zu wirtschaftliche vertretbaren Kosten gefunden werden. Ausgewählte vorläufige Ergebnisse des noch bis 2017 laufenden Forschungsprojektes werden nachfolgend aufgeführt.

Eine Trockenentstaubung mit 2-stufiger chemischer/Wasserwäsche und 2-stufiger chemischer Wäsche (Versuchsanlagen 1.1 und 1.2) führen zu DLG-konformen Reinigungsleistungen für Staub und Ammoniak. Weiterhin untersuchte HAHNE u. a. an zwei Versuchsanlagen (2.1 und 2.2) die Partikelabscheidung im Messbereich von 0,25 bis 10 µm. Für beide Anlagen war eine Abscheidung nachweisbar. Das Rohgas wies eine Temperatur von 21 bis 30 °C und eine mittlere Luftfeuchte von 51,5 % auf. Die Anlage wurde bei einem Volumenstrom von 479 bis 12.296 m³/h betrieben, was einer Schwankungsbreite mit einem Faktor von 25 entspricht. Im Ergebnis der Versuche wurde festgestellt, dass der Einsatz von Hackschnitzeln zur Partikel- und Ammoniakabscheidung bei Filterflächenbelastungen > 1.300 m³/(m²*h) in der Hühnerhaltung nicht geeignet erscheint. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass sich die Abscheidung der Partikelanzahl mit steigender Filterflächenbelastung erhöhte. Gegenwärtig laufen Versuche zum Einsatz von Elektrofiltern. Eine Vorzugsvariante für die Erprobung und Umsetzung in der Praxis lässt sich aus den bisherigen Ergebnissen nicht ableiten.

Tabelle 12: Forschungsanlagen Geflügelhaltung, Zwischenstand der Ergebnisse (HAHNE 2015, 2016)

Anlage	Reinigungsstufen	Anmerkung
Versuchsanlage 1.1	Stufe 1: Staubfilter (Flies mit Absaugung) Stufe 2: Chemische Wäsche (pH < 5) Stufe 3: Wasserwäsche (pH unregelt)	Erreichbare Staubabscheidung: 70 Erreichbare Ammoniakabscheidung: 72–78 % nach Stufe 1 und Stufe 2
Versuchsanlage 1.2	Stufe 1 und 2: analog A1 Stufe 3: Chemische Wäsche (pH < 5)	DLG-konforme Reinigungsleistungen für Staub und Ammoniak werden erreicht (70 %)
Versuchsanlage 2.1	Stufe 1: HHS-Filter trocken Stufe 2: HHS-Filter befeuchtet (Vorbedüsung) Stufe 3: Chemische Wäsche (pH < 5)	geringe Abscheidung der Partikelanzahl bei steigender Partikelgröße
Versuchsanlage 2.2	analog Versuchsanlage B1 Stufe 2: intermittierende Bedüsung	Anstieg Partikelanzahl während Bedüsung für kleinere Partikel, geringe Unterschiede mit und ohne Bedüsung für größere Partikel
Versuchsanlage 3	Rieselbett mit Additiv: geregelte Dosierung von Chlordioxid	keine Verbesserung der Geruchsabscheidung durch Zusatz von Additiven

Weitere Erkenntnisse aus einer Vielzahl von wissenschaftlichen Studien zur Bioaerosolminderung in der Tierhaltung wurden im Rahmen dieser Studie nicht ausgewertet. Hier werden z. T. Lösungen wie die elektrostatische Partikel-Ionisation (ZHANG 2013; LfULG 2003), das Versprühen von ionisiertem saurem Wasser (ZHENG 2014), der Einsatz von Biofiltern (u. a. TYMCZYNA et al. 2007; LNV 2005-2011) unter nicht vergleichbaren Bedingungen und mit nicht befriedigendem Ergebnissen diskutiert. Eine Auswertung war für die vorliegenden Studien daher nicht zielführend.

6.3 Weitere Verfahren aus Anlagen mit vergleichbarem Emissionspotenzial

Neben den Anlagen für die Geflügelhaltung sind weitere Anlagen/Anlagenkombinationen in die Betrachtung mit einzubeziehen, die für eine ähnliche Rohgaszusammensetzung bzw. ein ähnliches Abscheideziel eingesetzt werden. Dabei beschränkte man sich auf folgende Bereiche mit ähnlichem Emissionspotenzial:

- Anlagen der Tierhaltung
- Anlagen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung
- Anlagen der Nahrungs- und Genussmittelindustrie

6.3.1 Abluftreinigung in der Tierhaltung

In der Tierhaltung werden bisher chemische, physikalische und/oder biologische Verfahren bzw. Kombination dieser Verfahren angewendet bzw. als Stand der Technik festgeschrieben (BAT 2015). Thermische Verfahren werden aufgrund der sehr hohen Investitions- und Betriebskosten nicht genutzt.

In den letzten Jahren hat sich die Anzahl der DLG-geprüften Anlagen verdreifacht. Grundsätzlich gibt es zurzeit drei verfahrenstechnisch unterschiedliche Abluftreinigungssysteme für zwangsentlüftete Ställe, die auf die Sommerlufrate ausgelegt werden:

- Wäscher (chemisch, biologisch und biologisch-chemische)
- Rieselbettreaktoren VDI-Richtlinie 3478 Blatt 2
- Biofilter VDI-Richtlinie 3477
- Kombination dieser Verfahren in mehrstufigen Anlagen (2- oder 3-stufig)

Für einen einheitlichen europaweitern Prüfrahmen wurde das Vera-Test Protocol for Air Cleaning Technologies (VERA 2010) entwickelt, das im Wesentlichen dem DLG Prüfrahmen entspricht (vgl. Kap. 6.1).

Eine Zusammenfassung des Standes der Technik in der Tierhaltung nach den vorliegenden BVT-Schlussfolgerungen (BAT 2015) und der erreichbaren Reinigungsleistung ist Tabelle 13 und der Tabelle 4-129 der BVT-Schlussfolgerungen zu entnehmen.

Tabelle 13: Stand der Technik und Wirksamkeit der Abluftreinigungsanlagen der Tierhaltung (BAT 2015)

Abluftreinigungsverfahren	Emissionsminderung in %				
	NH ₃	PM-Gesamt	PM10	PM2,5	Geruch
<i>Einstufige Abluftreinigung</i>					
Wasserwäscher	nicht geeignet	k. A.	30	k. A.	nicht geeignet
Biowäscher	70-90	70-95	k. A.	k. A.	45-76
Nasssäurewäscher	70-90	k. A.	40	k. A.	35
Biofilter	70-89	80-100	k. A.	63	84-97
Trockene Filter	nicht geeignet	k. A.	58-70	37-45	nicht geeignet
Tropfenabscheider	nicht geeignet	k. A.	19-22	19-22	nicht geeignet
<i>Mehrstufige Abluftreinigung</i>					
Zweistufig (z. B. Biowäscher + Säurewäscher)	70-96	85-98	80	k. A.	70
Dreistufig (z. B. Wasserwäscher + Säurewäscher + Biofilter)	64-84	94,8-97,8	80	k. A.	64-87,9

Für die Schweinehaltung existieren viele Verfahren von vielen Herstellern. Insgesamt 14 verfügen über eine DLG-Zertifizierung. Überwiegend werden Rieselbettfilter (65 %) und mehrstufige Anlagen (30 %) eingesetzt. Biofilter kommen in 15 % und Chemowäscher in 4 % der Fälle zum Einsatz (HAHNE 2014). In allen eingesetzten Abluftreinigungsverfahren werden Ammoniak und Gerüche über große, feucht gehaltene Austauschflächen von der Gasphase in die Wasserphase überführt. Bei mehrstufigen Anlagen kann die Rückhaltung der einzelnen Komponenten gezielt erfolgen. Sie bieten daher auch eine größere Sicherheit, die Abscheideleistung im Betrieb dauerhaft zu erreichen (DLG 2016). Verfahren zur Aufkonzentration der Abluft werden bisher nicht eingesetzt.

Rückhaltung von Stäuben

In der Schweinehaltung mit geringeren Staubfrachten (0,5–3 mg/m³) werden grobe Stäube häufig bereits im Lüftungskanal bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten sedimentiert. Verbleiben Stäube in der Abluft und werden in die Abluftreinigungsanlage eingetragen, so wird zum Erreichen einer ausreichenden Strömungsgeschwindigkeit für die Abscheidung (s. Kap. 7.1.1) eine Vorbedüsung notwendig. Es wird vermutet, dass Stäube im Wäscher aufquellen, was die Wasserlöslichkeit und biologische Abbaubarkeit und somit die Abscheidung erhöht (DLG 2016).

Rückhaltung von Bioaerosolen

Über das Rückhalteverhalten von Bioaerosolen ist bisher nur wenig bekannt. Eine wirksame Rückhaltung von Bioaerosolen wird in Auswertung von Messdaten vermutet. Für den Parameter Gesamtkeime wurde im Mittel 88 % Abscheiderate ermittelt, für MRSA lag die mittlere Abscheiderate bei 89 % für 3-stufige Anlagen. Für 1-stufige Rieselbettfilter werden Abscheideraten von 85 % für Gesamtkeime und 87 % für Streptokokken veröffentlicht (HAHNE 2014). Für partikelgebundene Bioaerosole gilt auch hier, dass eine Staubabscheidung mit einer Rückhaltung von Bioaerosolen verbunden ist. Keine der DLG-zertifizierten Anlage verfügt über eine Zertifizierung der Minderung von Bioaerosolen.

Rückhaltung von Gerüchen

In der Schweinehaltung kommen zur Geruchsreduzierung überwiegend Biofilter und Biowäscher zum Einsatz. Die mit den verfügbaren Anlagen erzielbaren Reinigungsleistungen sowie Roh- und Reingaskonzentrationen sind den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen. Viele mehrstufige Anlagen integrieren einen Biofilter zur Geruchsabscheidung als letzte Reinigungsstufe. Aufgrund der vorangegangenen Wäsche können nach Aussage der Hersteller die Biofilter hier ohne Staubabscheidung mit geringeren Schichtdicken von 60 cm (SKOV, Dr. Siemers/IUS) betrieben werden. Als Schüttungsmaterial werden Holzhackschnitzel (Hagola), gerissenes Wurzelholz (Dr. Siemers/IUS) und Zellulosefüllkörper (SKOV) eingesetzt. Zur Vorabscheidung von Stäuben wird häufig ein Filtersystem in Sandwichbauweise mit grobkörnigem Filtermaterial am Lufteintritt aufgebaut (LfULG 2014b). Aufgrund der schwer wasserlöslichen Geruchsstoffe liegt die Verweilzeit bei 5–10 s in der Gesamtanlage (DLG 2016).

Eine generelle Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf die Geflügelhaltung ist aufgrund der genannten (vgl. Kap. 4.1.2) Ursachen von Gerüchen/Geruchsentstehungen von vornherein im Gegensatz zu anderen Schadstoffen nicht gegeben. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

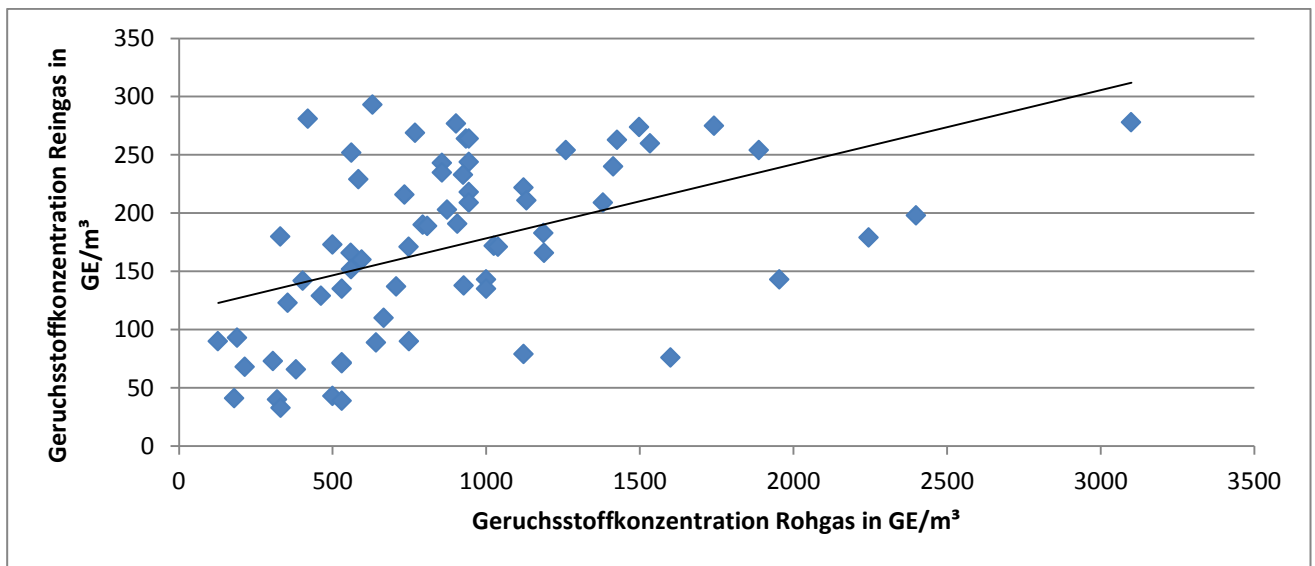


Abbildung 11: Rohgas- und Reingaskonzentration Geruch für ARA in der Schweinehaltung, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2006–2016)

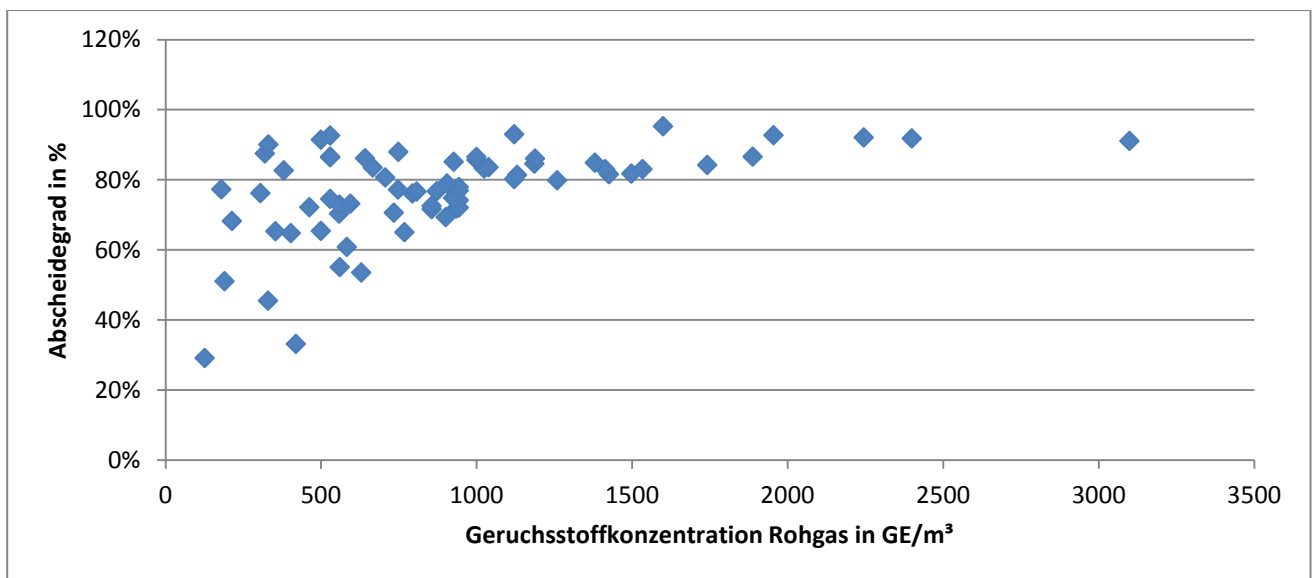


Abbildung 12: Abscheidegrad ARA Geruch in der Schweinehaltung, Datengrundlage: Prüfdaten (DLG 2006–2016)

Rückhaltung von Ammoniak

Die Rückhaltung von Ammoniak (2 bis 20 ppm im Rohgas) in den genannten Anlagen beruht auf der guten Wasserlöslichkeit. Dabei werden die Rückhalteeffizienzen durch ein hohes Konzentrationsgefälle und große Austauschflächen verbessert. Hierzu wird die Konzentration in der Waschflüssigkeit möglichst gering gehalten. Daher ist eine ausreichende Abschlämmung sicherzustellen. Durch Säurezugabe wird das Ammoniak chemisch gebunden oder in Biowäschern/Rieselbettfiltern biologisch abgebaut. (DLG 2016)

6.3.2 Anlagen Abfallverwertung

6.3.2.1 Rohgasanalyse und Reduktionsziel

Für biologisch-mechanische Abfallbehandlungsanlagen sind folgende Stoffe emissionsrelevant:

- organische Stoffe (Summenparameter Gesamt-C, wegen der Vielzahl möglicher Einzelstoffe) mit Rohgaskonzentrationen von ca. 45–160 mg/m³
- Staub und Staubinhaltsstoffe mit Rohgaskonzentrationen von 10 mg/m³, speziell Schwermetalle
- Gerüche mit Rohgaskonzentrationen von 1.000–12.000 GE/m³, vereinzelt höher
- Bioaerosole (Eigenschaften für die Abluftreinigung vergleichbar zur Tierhaltung)

Von untergeordneter Bedeutung sind die Emissionen von anorganischen Komponenten (SO₂, HCL, HF). Aufgrund der im Regelfall (Ausnahme z. B. Tag-/Nachtbetrieb) kontinuierlichen Absaugung treten keine Schwankungen des Volumensstroms und nur geringe Schwankungen in der Rohgasbeladung auf. Eine Analyse der Geruchsstoffe der Geflügelhaltung liegt nicht vor, sodass ein Vergleich mit den Emissionen aus der Abfallbehandlung nicht möglich ist. Im Vergleich zur Geflügelhaltung werden bei Abfallbehandlung wesentlich höhere Geruchsstoffkonzentrationen emittiert. Insgesamt treten höhere Schadstoffkonzentrationen in der Abluft auf.

Anforderungen an die Emissionsminderungen ergeben sich aus der 30. BImSchV. Hier werden u. a. Emissionsbegrenzungen, die eine Abluftreinigung erfordern, für Gerüche (500 GE/m³), Stäube (10 mg/m³) und organische Stoffe angegeben, als Gesamt-C (20 mg/m³) festgelegt. Vergleichbare Vorgaben für Bioaerosole existieren nicht. Hier zielen die Anforderungen auf eine Vorsorge, die durch Abstandsregelung nach Nr. 5.4.8.5 TA Luft (500 bzw. 300 m), durch geschlossene Bauweise und durch Erfassung und Reinigung der Abluft realisiert werden.

6.3.2.2 Abluftreinigungsanlagen

In der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung werden zur Abluftreinigung ein- oder mehrstufiger Anlagen folgende Verfahren eingesetzt:

- biologische Reinigung (Biofilter, Biowäscher, Tropfkörper)
- thermische-regenerative Verfahren (RTO/RNV)

Die obere Anwendungsgrenze der Verfahren in Bezug auf das Abluftvolumen ist kostenabhängig. Die nachfolgend genannten Verfahren werden in Abhängigkeit der Schadstoffbeladung auch für größere Volumenströme (bis zu ca. 180.000 m³/h) eingesetzt. Letztendlich müssen im Einzelfall durch den Anlagenbauer in Abhängigkeit von der Rohgaszusammensetzung die anlagentechnischen Größen festgelegt und das Verfahren gewählt werden.

Häufig werden mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen als Vorstufe einer thermischen Abfallverwertungsanlage betrieben, sodass die Abluft als Verbrennungsluft genutzt wird und damit keiner gesonderten Reinigung bedarf. Als Stand der Technik werden für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung nachfolgend benannte Anlagen im BVT-Merkblatt angegeben (UBA 2006).

Tabelle 14: Stand der Technik der Abluftreinigung für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (UBA 2006, ergänzt)

Anlage	Anwendbarkeit/Reduktionsziel	Anwendungsbereiche
Adsorption	Die Adsorption an Aktivkohle wird zur Minderung von VOC, Geruch und von flüchtigen Emissionen eingesetzt, kein Einsatz bei staubhaltigem Rohgas, Volumenströme < 50.000 Nm ³ /h	lokale Absaugstellen, Rohluftkonditionierung (z. B. Entstaubung) erforderlich
Tropfkörper, Biowäscher, Biofilter	Reduziert Gerüche und VOC-Emissionen aus natürlichen Verbindungen und aus der Synthese anorganischer, Verbindungen (z. B. H ₂ S und NH ₃), aromatischer und aliphatischer Verbindungen, Volumenströme bis 180.000 Nm ³ /h, Biofilterflächenbelastung (ca. 50 -150 m ³ /(m ² *h))	Abluftbehandlung Rotte
Chemische Gaswäsche	Entfernung von Einzelbestandteilen (z. B. Ammoniak)	Abluftbehandlung MBA in Kombination mit saurer Gaswäsche und TNV
Schwach-oxidative Verfahren (Ionisierung, UV-Verfahren)	Neutralisation Gerüche	keine Betriebserfahrungen für die MBA
Verbrennung	Reduzierung VOC, KW mit Zugabe von Brennstoffen (hoher Energieverbrauch) und Wärmerückgewinnung für kleine Volumenströme ca. 1.500 Nm ³ /h	als Endreinigung in MBA
Katalytische Verbrennung (KNV)	Reduzierung VOC, KW mit Zugabe von Brennstoffen und Wärmerückgewinnung, Reinigungsgrade von über 99 %	aufgrund der Störstoffe problematisch, Betriebserfahrungen für die MBA
Regenerative Thermische Oxidation (RTO)	Reduzierung VOC, KW mit Zugabe von Brennstoffen und Wärmerückgewinnung	Verbreitete Anwendung in MBA
Nichtthermisches Plasma (NTP)	Zersetzung org. gebundener Kohlenstoff	keine Betriebserfahrungen für die MBA (Ergebnisse Versuchsanlage liegen vor [VDI 4255 Blatt 2])

Als alternative Technik wird das Verfahren des nichtthermischen Plasmas genannt. Erste Erfahrungen in der Abfallbehandlung liegen im Ergebnis eines DBU-Forschungsvorhabens für eine geschlossene Kompostierungsanlage vor (KRA-NERT 2005). Es wurde die Verfahrenskombination von Biofilter mit Plasmaanlage untersucht. Ergebnisse von Bioaerosolmessungen dieser Verfahrenskombination werden in der VDI 4255 Blatt 2 ausgewertet. Die Reduzierung von Bioaerosolen und damit die grundsätzliche Eignung des Verfahrens konnte nachgewiesen werden. Eine generelle Desinfektionswirkung durch die NTP-Anlagen wurde nicht erreicht. Weiterhin verändert sich die Bioaerosolzusammensetzung bei Einsatz dieser Technik.

Mit den eingesetzten Abluftreinigungsverfahren (Biofilter und thermische Nachverbrennung) werden die vorgegebenen Grenzwerte erreicht. Die thermisch-regenerative Abluftreinigung (RTO) ermöglicht Rückhalteeffizienzen für Bioaerosole zwischen 95 und 100 % (KUMMER 2003). Die Rohgasbeladungen können je nach Betrieb der MBA (Rotteverfahren und -verlauf, Luftmanagement) erheblich schwanken. Ebenso treten innerhalb einer Anlage erhebliche Schwankungen der Rohgasbeladung auf.

6.3.3 Anlagen der Lebensmittelindustrie

6.3.3.1 Rohgasanalyse und Reduktionsziel

Aufgrund der Vielzahl an Produktionsverfahren mit Emissionen in der Lebensmittelindustrie ist die Bandbreite der freigesetzten Abluftkomponenten sehr groß. Nachfolgend wird daher nur auf die Verfahren zur Abreinigung von Stäuben/Bioaerosolen und Gerüchen mit vergleichbaren Betriebs- und Rohgasbedingungen der Geflügelhaltung eingegangen. Anforderungen zur Emissionsminderung ergeben sich für Einzelanlagen (z. B. Räucheranlagen) aus der TA Luft. Konkrete Reduzierungsziele für Bioaerosole und Gerüche sind nicht bekannt.

6.3.3.2 Abluftreinigungsanlagen

Prinzipiell kommen physikalische, chemische, thermische und biologische Verfahren zur Reduzierung der Emissionen in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz. Eine Übersicht über den Stand der Technik gibt Tabelle 15.

Tabelle 15: Stand der Technik für Anlagen der Lebensmittelindustrie (UBA 2005, ergänzt)

Anlage/Verfahren	Anwendbarkeit/Reduktionsziel	Anwendungsbereiche
Adsorption	für kleinere Volumenströme < 10.000 m³/h zur Reduzierung von Gerüchen/VOC geminderte Effizienz bei >75 % Luftfeuchtigkeit	Raumlüftung/Prozessgase Anlagen zur Rückgewinnung
Biofilter/Biowäscher	Temperaturen < 40 °C zur Reduzierung von Gerüchen/VOC; 90-99 % Geruchsemissionsreduktion bei effektiver Verweilzeit: 20-40 Sekunden Biofilter bei hoher Luftfeuchtigkeit	Fischsektor, Kaffeeverarbeitung, Kläranlagen Reinigung Raum- und Prozessluft z. B. Trocknen von Bierhefe, Ölmühlen, Röstabgase (Kakaoherstellung), Kühlluft Tierfutterproduktion
Schwach-oxidative Verfahren (Ionisierung, UV-Verfahren)	Reduzierung Gerüche	bei fetthaltigen Geruchsträgern (Frittierabluft, Fischstäbchen-, Käse-, Schinkenproduktion)
Verbrennung /Katalytische Verbrennung (KTV)	Beseitigung Gerüche, giftige Gase bei 200–400 °C über Selbstentzündungstemperatur des zu beseitigenden Stoffes Volumenströme <10.000 Nm³/h	Gar-/Räucheröfen Kaffeesektor, Räucherkammern
Nichtthermisches Plasma (NTP)	Beste Betriebsbedingung Volumenströme 20.000-25.000 Nm³/h, VOC-Konzentration <500 mg/Nm³, Staub < 25 mg/m³ ab 80 °C starker Leistungsabfall, Luftfeuchtigkeit bis 100 % Geruchsemissionsreduktion 75-96 %	bei Emissionen von Extrudern, Kühlgeräten, Hammermühlen und Trocknern Behandlung von übel riechenden Abgasen bei Umgebungsdruck und -temperatur Tierfutterindustrie, Fischmehlherstellung, Ölextraktion, Erbsentrocknung, Proteine, Abfallsortieranlagen (Extruder, Trockner, Kühlgeräte, Hammermühlen)

Minderung von Gerüchen

Zur Minderung von Gerüchen werden im Wesentlichen folgende Anlagen/Anlagensysteme eingesetzt:

- Absorber
- Biofilter
- NTP-Anlage überwiegend bei der Herstellung von Fischmehl/Fischfutter

Minderung von Staub/Bioaerosolen

Zur Minderung von Stäuben werden überwiegend filternde Abscheider eingesetzt. Schlauchfilter werden in fast allen Branchen der Lebensmittelproduktion verwendet.

Bei hohen Staubkonzentrationen, klebrigen/brennbaren Stäuben und soweit eine Abscheidung kleiner Partikel nicht erforderlich ist, werden Massenkraftabscheider verwendet. Elektrofilter kommen bei hohen Temperaturen, für sehr kleine Partikelgrößen, niedrige Staubkonzentrationen und große Abluftmengen zum Einsatz.

Angaben zur Reinigungsleistung und von Investitions- und Betriebskosten sind stark einzelfallbezogen, daher nicht generalisierbar und für die Nutzung in der Geflügelhaltung nicht übertragbar.

6.4 Bewertung DLG-zertifizierter und bestehender Abluftreinigungskonzepte

In der Geflügelhaltung sind Abluftreinigungsanlagen bisher nicht Stand der Technik.

Während sich im industriellen Bereich hoch komplexe Reinigungssysteme entwickelt haben, werden in der Tierhaltung einfachere Systeme installiert. Die methodische Übernahme verfahrenstechnischer Konzeptentwicklungen für Abluftreinigungsanlagen außerhalb des Anwendungsgebietes der Tierhaltungsanlagen bietet sich aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen nicht an.

Aus den Darstellungen im Kap. 6 können für die im Kap. 4.4 abgeleiteten Aufgaben der einzusetzenden Abluftreinigungsanlage folgende Erkenntnisse formuliert werden:

6.4.1 Abscheidung partikelförmiger Verunreinigungen

Die Abscheidung von Stäuben ist aufgrund der Einhaltung der Emissionsbegrenzungen der TA Luft kein Ziel für den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen und stellt eher einen Nebeneffekt dar, der auf die Abscheidung von Ammoniak zielenden Techniken dar. Der Handlungsbedarf zur Abscheidung von Stäuben ergibt sich vielmehr aus dem Minimierungsgebot der Bioaerosolemissionen.

Die Technologie für die kombinierte Staub- und Gasabscheidung besteht bei der Tierhaltung aus einem einfachen Horizontalwäscher. Die verwendete Anlagentechnologie und technische Daten wie Anströmgeschwindigkeiten und Druckverlust lassen Abscheidegrade im Bereich von > 70 % nicht unbedingt erwarten und relativieren sich unter Berücksichtigung der Fraktionsabscheidegrade und der Rohgasbeladung. Der Trägheitseinfluss ist bei Nasswäschern der dominierende Transportmechanismus, was durch die mit fallender Partikelgröße stark abnehmende Fraktionsabscheidegradkurve zum Ausdruck kommt (vgl. Abbildung 13).

In der klassischen Entstaubungstechnik mit Rohgasbeladungen von 100 mg/Bm³ bis mehreren Gramm je Betriebskubikmeter (Bm³) können diese Anlagenkonzepte nicht eingesetzt werden, weil bei einem Abscheidegrad von ca. 70 bis 80 % die geforderten Reingaswerte gemäß der TA Luft nicht eingehalten werden können. Zusätzlich würden die Anlagen in kürzester Zeit verstopfen, weil sich in den Packungen Schlamm ablagert.

Letztendlich spiegelt die DLG-zertifizierte Abluftreinigungstechnik für Stäube nicht den Stand der Entstaubungstechnik wider, weil Feinstaubfraktionen < 2,5 µm und anhaftende Bakterien nur ungenügend abgeschieden werden können.

Für die Abscheidung von Feinstäuben und Aerosolen im Bereich < 2,5 µm sind DLG-zertifizierte Horizontalwäscherkonstruktionen physikalisch betrachtet nur bedingt geeignet. Für die Abscheidung von ungebundenen Bakterien und Viren ist die Technologie nicht geeignet und zwar aus folgenden Gründen:

- Die physikalischen Grundlagen für die Abscheidung von Feinstäuben im Bereich von < 2,5 bis 10 µm und darunter setzen den Einsatz von Energie voraus, um die Relativbewegungen der Partikel für deren Abscheidung entscheidend zu

beeinflussen. Der gemessene Gesamtanlagendruckverlust der Horizontalwäscherkonstruktionen im Bereich von 100 Pa ist in diesem Zusammenhang vernachlässigbar.

- Aufgrund der sehr geringen Rohgaskonzentrationen für staubförmige Partikel von ca. 1 bis 16 mg/m³ und eines Abscheidegrades des Horizontalwäschers im Bereich 70 bis 80 % relativiert sich diese Argumentation, denn genau genommen besteht derzeit kein Staubproblem gemäß den Forderungen der TA Luft.
- Es ist jedoch zu beachten, dass sich mit der angestrebten anlagentechnischen Optimierung der Erfassung und Abscheidung von Bioaerosolen (verbunden mit Verhinderung der Sedimentation im Lüftungssystem) gleichzeitig auch die Rohgaskonzentrationen von staubförmigen Abluftinhaltsstoffen erhöhen können. Schon bei einer Rohgaskonzentration von $C_{Roh} = 35 \text{ mg/Bm}^3$ kann die Horizontalwäschertechnologie nur noch Reingaswerte von $C_{Rein} = 10,5 \text{ mg/Bm}^3$ garantieren und liegt damit über einem geforderten Reingaswert unter Berücksichtigung des realisierbaren Standes der Entstaubungstechnik mit 10 mg/m³.
- Die nachgewiesene Abscheidung für PM_{2,5}-Staub (Prüfdaten DLG) kann auf Effekte der Agglomeration oder der Quellung wasserunlöslicher Partikel in den Wäschern zurückgeführt werden. Ebenso kann aufgrund des hohen Gehaltes von Stickstoff und Phosphor von bis zu 14 % im Staub (vgl. Kap. 4.1.3.2) die Reinigungsleistung beeinflusst werden.
- Für die Abscheidung von staubförmigen Partikeln mit Nasswäschern muss Energie aufgewendet werden, um die Relativbewegung der Partikel zu den Wassertropfen gezielt zu beeinflussen. Der Energieverlust innerhalb eines Nasswäscherkonzeptes wird durch den Anlagendruckverlust im Bereich von mindestens 500 bis < 4.000 Pa abgebildet. Der Gesamtanlagendruckverlust der von der DLG zertifizierten Abluftreinigungsanlagen liegt im Vergleich dazu im Bereich von max. 100 Pa (s. Kap. 7.1) (DLG 2009–2016).

Aus folgenden Gründen:

- Die physikalischen Grundlagen für die Abscheidung von Feinstäuben im Bereich von < 2,5 bis 10 µm und darunter setzen den Einsatz von Energie voraus, um die Relativbewegungen der Partikel für deren Abscheidung entscheidend zu beeinflussen. Der gemessene Gesamt-Anlagendruckverlust der Horizontalwäscherkonstruktionen im Bereich von 100 Pa ist absolut vernachlässigbar.
- Aufgrund der sehr geringen Rohgaskonzentrationen für staubförmige Partikel von ca. 1 bis 16 mg/m³ und eines Abscheidegrades des Horizontalwäschers im Bereich 70 bis 80 % relativiert sich diese Argumentation, denn genau genommen besteht derzeit kein Staubproblem gemäß den Forderungen der TA Luft.
- Es ist jedoch zu beachten, dass sich mit der angestrebten anlagentechnischen Optimierung der Erfassung und Abscheidung von Bioaerosolen (verbunden mit Verhinderung der Sedimentation im Lüftungssystem) gleichzeitig auch die Rohgaskonzentrationen von staubförmigen Abluftinhaltsstoffen erhöhen. Schon bei einer Rohgaskonzentration von $C_{Roh} = 35 \text{ mg/Bm}^3$ kann die Horizontalwäschertechnologie nur noch Reingaswerte von $C_{Rein} = 10,5 \text{ mg/Bm}^3$ garantieren und liegt damit über einem geforderten Reingaswert unter Berücksichtigung des Standes der Technik.
- Die nachgewiesenen Abscheidungen für PM_{2,5}-Staub (Prüfdaten DLG) kann auf Effekte der Agglomeration oder der Quellung wasserunlöslicher Partikel in den Wäschern zurückgeführt werden. Ebenso kann aufgrund des hohen Gehaltes von Stickstoff und Phosphor von bis zu 14 % im Staub (vgl. Kap. 4.1.3.2) die Reinigungsleistung beeinflusst werden.
- Für die Abscheidung von staubförmigen Partikeln mit Nasswäschern muss Energie aufgewendet werden, um die Relativbewegung der Partikel zu den Wassertropfen gezielt zu beeinflussen. Der Energieverlust innerhalb eines Nasswäscherkonzeptes wird durch den Anlagendruckverlust im Bereich von mindestens 500 bis < 4.000 Pa abgebildet. Der Gesamt-Anlagendruckverlust der von der DLG zertifizierten Abluftreinigungsanlagen liegt im Vergleich dazu im Bereich von max. 100 Pa (s. Kap. 7.1) (DLG 2009–2016).

6.4.2 Abscheidung von Gerüchen

Abluftreinigungstechnologien für die Abscheidung von Gerüchen aus der Geflügelhaltung stehen derzeit nicht zur Verfügung. Die eingesetzten chemischen Wäscher führen zu einer Reduzierung der Geruchsemissionen. Die nach DLG geforderten Reingaswerte und Abscheideleistungen für Gerüche können mit den bisher eingesetzten Anlagen jedoch nicht erreicht werden.

Aus Erfahrungen bei der Schweinehaltung und auch der Behandlung der Abluft der mechanisch biologischen Abfallbehandlung erscheint der Einsatz von Biofiltern mit entsprechender Optimierung für schwankende Volumenströme und vorgeschalteter Staubreinigung geeignet.

6.4.3 Abscheidung von Ammoniak

Die eingesetzten und von der DLG zertifizierten Abluftreinigungsanlagen für Geflügelställe sind aus der Sicht der Abluftreinigungstechnik klassische Horizontalwäscher mit bedühten Packungen, die zur Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen in geringen Konzentrationen verwendet werden. Die anscheinend standardisierten Anlagenausrüstungen mit einer pH-wertabhängigen und automatisierten Säuredosierung und Abschlämmung stellen den Stand der Technik dar. Die Abscheidegrade im Bereich 90 bis 95 % bestätigen die Eignung dieser Horizontalwäschertechnik (DLG 2009–2016).

Abscheidung von Flüssigkeitstropfen und Flüssigkeitsaerosolen

In der letzten Abscheidestufe der Horizontalwäscher werden Tropfenabscheider in Form von Packungen verbaut. Die Aerosol- und Tropfenabscheidung von Packungen ist sicherlich möglich, jedoch nicht effektiv. Durch eine Abstandsvergrößerung zwischen der Waschstufe und der Tropfenabscheiderstufe und einer damit verbundenen relativ hohen Verweilzeit kann ein Teil der größeren Tropfen aufgrund seiner Trägheit zusätzlich sedimentieren.

Effektiv lassen sich Flüssigkeitsaerosole oder Tropfen an Faserpackungen und durch Schwerkraftumlenkungen an lamellenförmigen Konstruktionen abscheiden. Dabei sind jedoch zusätzliche Druckverluste bzw. Mindestanströmgeschwindigkeiten von bis zu 2,0 m/s zu beachten.

Die Bildung von Bioaerosolen bzw. die Veränderung des emittierten Bioaerosolspektrums in der ARA kann nach allgemeinem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Umfangreiche Ergebnisse liefert u. a. das Verbundprojekt BioAbluftR zur Prüfung und Bewertung der biologischen Sicherheit von Abluftreinigungsanlagen für die Schweinemast. Erfasst wurden Luftinhaltsstoffe (Gase, Gerüche, Partikel, Bioaerosole) im Roh- und Reingas an einer dreistufigen Abluftreinigungsanlage (biologisch-physikalische Abluftwäsche, chemische Abluftwäsche und Biofilter) und an einer einstufigen Abluftreinigungsanlage (Rieselbettreaktor) an jeweils einem Mastschweinegestall. Die Messdauer betrug ein Jahr. Der Rieselbettreaktor zeigte starke Schwankungen und vereinzelt Erhöhungen bestimmter Keime. Für die dreistufigen Anlagen konnten kontinuierliche Abscheideleistungen der erfassten Keimspezies erreicht werden. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Sekundäremissionen im Regelfall nicht auftreten, zur Vermeidung die Kenntnis der beeinflussenden Stellgrößen der Anlagensteuerung auf das Emissionsverhalten jedoch zwingend erforderlich ist. Mit den Verfahren wurden Reinigungsleistungen von > 80 % der gemessenen Bioaerosole nachgewiesen (BioAbluftR 2009).

7 Mögliche Verfahren und Eignung für die Geflügelhaltung

Die im Kap. 5 und 6 abgeleiteten prinzipiellen Möglichkeiten der Abluftreinigung für die Geflügelhaltung werden nachfolgend anhand des jeweiligen vordergründigen Reduktionszieles beschrieben und bewertet:

- Verfahren zur Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen/Bioaerosolen
- Verfahren zur Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen
- Verfahren zur Abscheidung von Gerüchen

Die in der Geflügelhaltung eingesetzten Abluftreinigungsverfahren sind bisher nicht auf eine gezielte Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen (Staubabscheidung) ausgerichtet. Daher werden die Verfahren der klassischen Entstaubungstechnik nachfolgend ausführlich beschrieben. Dabei wird systematisch geprüft, ob die Systeme für die Rohgas- und Betriebsparameter der Geflügelhaltung geeignet erscheinen.

Im Gegensatz dazu sind die in der Tierhaltung eingesetzten Abluftreinigungsverfahren zur Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen sehr gut geeignet, sodass hier die optimierte Fahrweise dieser Systeme im Vordergrund der nachfolgenden Ausführungen steht.

Die Geruchsreduzierung wird nur als Nebeneffekt bei der gezielten Reinigung von Ammoniak erreicht. Eine deutliche und DLG-konforme Geruchsreduzierung kann mit der vorhandenen Technik bisher nicht sicher realisiert werden. Daher werden Verfahren, die über den Stand der Technik hinausgehen bzw. für die nur lückenhafte Praxiserfahrungen vorliegen, und gängige Verfahren, bei denen durch eine weitere Optimierung eine Geruchsreduzierung erzielt werden könnte, betrachtet.

7.1 Verfahren zur Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen/Bioaerosolen

Entsprechend der Einsatzbedingungen der Staubabscheider eignen sich für die in der Geflügelhaltung freigesetzten Abluftströme grundsätzlich folgende Abscheideverfahren (s. a. UBA 2003):

- Nassarbeitende Abscheider (Nassentstauber)
- Filternde Abscheider

Abscheider, die nach dem Fliehkraftprinzip (z. B. Zyklon/Zentrifugalkraftabscheider) arbeiten, werden überwiegend zur Abscheidung gröberer Stäube eingesetzt (vgl. Abbildung 13). Alternative Abscheideverfahren wie Elektrofilter sind für diesen speziellen Einsatzfall ebenso nicht geeignet. Insbesondere der Abscheidegrad von Elektrofiltern ist stark abhängig von der Verschmutzung der Niederschlagselektroden. Aufwendige Wartungs- und Reinigungsarbeiten durch ausgebildetes Fachpersonal in kurzen Intervallen können dieses generelle Problem reduzieren, erhöhen jedoch nicht unerheblich die Betriebs- und Wartungskosten. Zusätzlich ist zu beachten, dass explosionsfähige und brennbare Stäube abgeschieden werden müssen (s. hierzu auch Kap. 8.2.1). Spannungsüberschläge im Elektrofilter durch die vorhandene Luftfeuchtigkeit im Rohgas führen zu einem Eintrag von Zündquellen in das Filtersystem.

Abscheidegrad physikalischer Verfahren

Der Fraktionsabscheidegrad der Verfahren zur Staubabscheidung in Abhängigkeit von der Partikelgröße ist Abbildung 13 zu entnehmen.

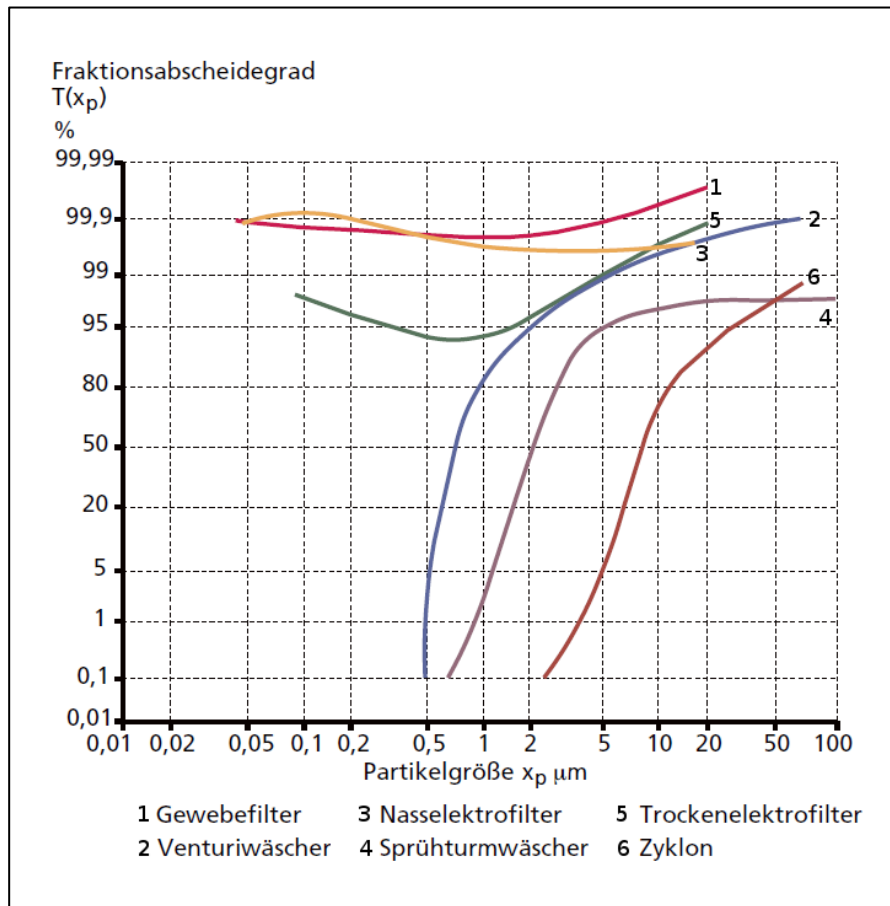


Abbildung 13: Darstellung des Einsatzes von Entstaubungsanlagen – Abscheidegrad in Abhängigkeit der Korngröße (FRITZ et al. 1990)

7.1.1 Nassarbeitende Abscheider

7.1.1.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Alle Nassabscheider arbeiten nach einem bewährten physikalischen Wirkprinzip: Die im Gasstrom dispergierten Partikel werden mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht, um sie darin zu binden. Dazu muss eine möglichst große Phasengrenzfläche zwischen Gas (Luft) und der Flüssigkeit erzeugt werden. Durch die Massenträgheit bewegen sich die Partikel zur Flüssigkeitsoberfläche hin und werden dort eingebunden oder angelagert.

Bei sehr feinen Teilchen wird die Abscheidung zusätzlich durch Diffusionseffekte begünstigt. Diese können durch Wirbelbildung im Strömungsschatten, durch turbulente Querbewegung des Gases oder durch die Brownsche Bewegung der Staubteilchen hervorgerufen werden. Auch die Kondensation von im Gas mitgeführten Dämpfen kann die Staubabscheidung verbessern. Die an der Oberfläche der Partikel auskondensierte Flüssigkeitsmenge vergrößert deren Massen, was sich günstig auf die Abtrennung auswirkt. Außerdem wird die Agglomerationsfähigkeit der Partikel erhöht.

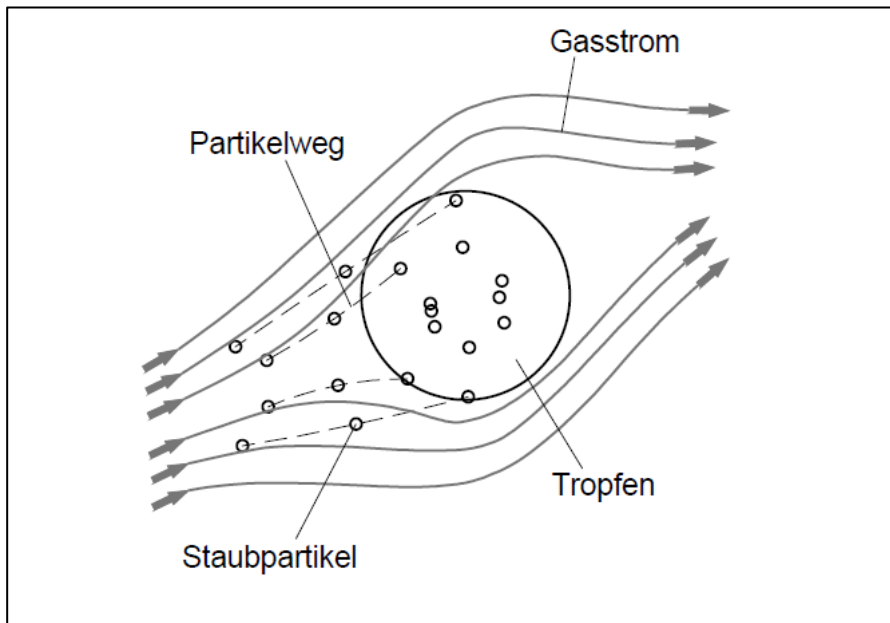


Abbildung 14: Wirkprinzip Nassabscheidung (Filtracon GmbH 2015)

7.1.1.2 Anwendung und Abscheideleistung

Der Einsatz von nassarbeitenden Abscheidern rechtfertigt sich vor allem bei klebrigen oder leicht entzündlichen Stäuben und wenn neben der Staubentfernung auch eine Schadgasabsorption oder Gaskühlung beabsichtigt ist. Wegen der vergleichsweise hohen Betriebskosten werden Nassabscheider bevorzugt zur Reinigung kleiner Gasvolumenströme ($V \leq 30.000$ bis $60.000 \text{ Bm}^3/\text{h}$) eingesetzt.

Der Abscheidegrad und die Anwendung ist u. a. abhängig von

- der Staubzusammensetzung (Kornfraktion),
- der Benetzbarkeit des Staubes,
- dem Gas-Wasser-Verhältnis,
- der herrschenden Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Waschflüssigkeit und
- dem Feststoffgehalt der Waschflüssigkeit.

Nach der VDI 3679 werden Nassabscheider in Niederdrucknassabscheider mit einem Druckverlust von bis zu 1.500 Pa , Mitteldrucknassabscheider mit einem Druckverlust zwischen 1.500 und 4.000 Pa und Hochdrucknassabscheider mit einem Druckverlust zwischen 4.000 bis 15.000 Pa unterschieden.

Recht gut bewährt hat sich eine Einteilung der Nasswäscher nach strömungstechnischen Merkmalen, weil diese auch unmittelbar mit der Abscheideleistung in Zusammenhang zu bringen sind. Ganz allgemein können nassarbeitende Abscheider danach in fünf Grundtypen der Bauart unterteilt werden (VDI 3679 Blatt 1):

- Venturiwäscher
- Füllkörperkolonnen/Füllkörperwäscher
- Strahlwäscher
- Wirbelwäscher, Rotationswäscher
- Waschturm

Im Zusammenhang mit der Abscheidung von staubförmigen Verunreinigungen und Bioaerosolen in der Abluft von Geflügelställen erscheinen Venturiwäscher am geeignetsten und werden daher aufgrund ihrer verfahrenstechnischen Relevanz

nachfolgend weiter betrachtet. Füllkörperkolonnen werden in der Praxis zur Reduzierung von gasförmigen Verunreinigungen in der Abluft eingesetzt. Der Einsatz für die Abscheidung von Stäuben wird vermieden, weil anfallende Schlämme in den Packungen die Funktionssicherheit der Füllkörperwäscher negativ beeinflussen. Wirbelwäscher werden eher für Volumenströme bis 100.000 m³/h eingesetzt. Rotationswäscher und Waschtürme sind nur begrenzt zur Staubabscheidung geeignet, insbesondere wenn hohe Abscheidegrade für Feinstäube erforderlich sind.

7.1.1.3 Venturiwäscher

Der Venturiwäscher ist der am häufigsten eingesetzte Hochleistungswäscher, von dem es zahlreiche Ausführungsformen gibt. Typisch ist das Venturirohr, in dessen engstem Querschnitt, der Kehle, die Waschflüssigkeit über axiale Eindüsung oder Quereinspritzungen mit nur geringem Druck eingegeben wird. Infolge der hohen Scherwirkung der Gasströme – die Geschwindigkeiten in der Kehle liegen zwischen 50 und 150 m/s – werden die Flüssigkeitsteilchen in feinste Tröpfchen zerrissen. Im anschließenden Diffusor wird ein Teil der kinetischen Energie wieder in Druckenergie zurückgewandelt. Die hohe Gasbeschleunigung in der Kehle und die dadurch verursachte hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Staubteilchen und Tröpfchen sind der Grund für das sehr gute Abscheidevermögen des Venturiwäschers. Je nach Abscheideleistung liegt der Druckverlust zwischen 3.000 und 20.000 Pa. Er hängt von der Gasgeschwindigkeit und von der eingeübten Wassermenge ab. Wegen der Kopplung von Abscheideleistung und Strömungsgeschwindigkeit reagiert ein Venturiwäscher, ähnlich wie ein Wirbelwäscher, sehr stark auf Lastschwankungen – eine Ausnahme stellt hier der Venturiwäscher System Reither bzw. Bayer-Reither dar. Technisch begegnet man diesem Problem durch Veränderung des Querschnitts der Venturikehle oder durch Ansaugen von Falschluff (KERN 1990).

Abbildung 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Venturiwäschers.

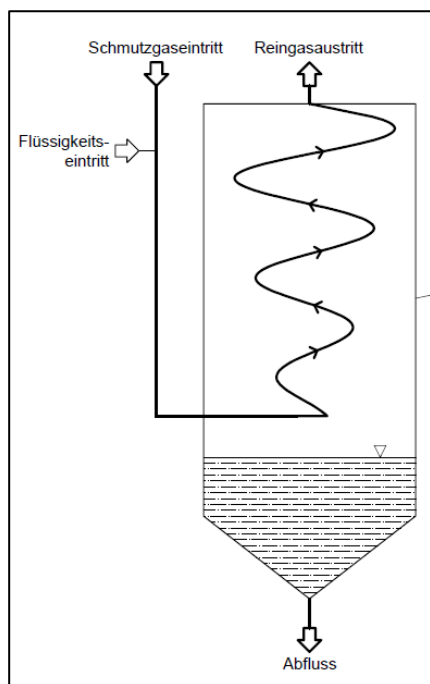


Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau eines Venturiwäschers (UBA 2003)

Bauarten von Venturiwäschern

System Handte

Die Baureihe STZV ist ein Venturiabscheider. Er besteht aus Vorsatzventuri mit nachgeschaltetem Zentrifugal-Wasserabscheider. Die Venturikehle ist im Saugstutzen eingebaut. Die Kehle kann durch ein Schiebeblech verstellt werden. Die Bedüsung des Venturis kann über eine Pumpe oder durch einen Tauchheber erfolgen. Wichtig bei der Bedüsung ist, dass der Kehlenquerschnitt mit Waschflüssigkeit voll ausgefüllt wird. Ebenfalls sollte die Eindüsung der Waschflüssigkeit möglichst im rechten Winkel zur Strömungsrichtung des Gases erfolgen. Bei Gasgeschwindigkeiten von über 50 m/s ist es von Vorteil, die Bedüsung über einen Ringspaltventuri vorzunehmen. Durch die kleinere Schlitzbreite bei gleicher Fläche wird die Kehle gleichmäßiger beaufschlagt. Durch den längeren Weg des Gasstromes zum Zentrifugalabscheider in Verbin-

dung mit der Querschnittserweiterung von der Leitung reduzieren sich die Eintrittsgeschwindigkeit und somit auch der Widerstand des Wasserabscheiders. Der Wasserabscheider wird tangential von unten eingeströmt. Der Wirbelkern wird dabei durch eine Abdeckhaube abgedeckt, um ein Hochziehen des Wassers zu verhindern.

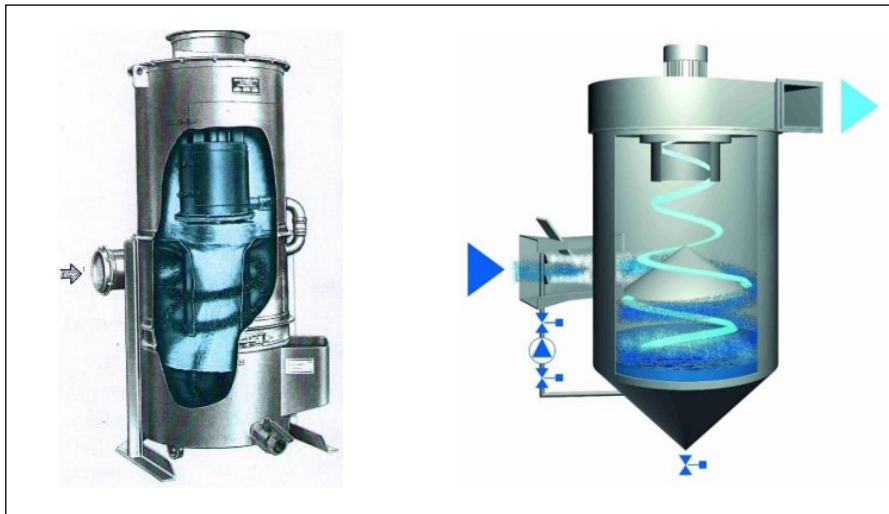


Abbildung 16: Nassabscheider vom Typ StWV und StZV, Fabrikat Handte Umwelttechnik GmbH, Tuttlingen (HANDTE 2006)

Der Abscheidegrad des Venturiwäschers ist zusätzlich zu den generell für Nassabscheider genannten Größen abhängig von:

- dem Gas-Wasser-Verhältnis: Das Verhältnis sollte 0,5–2 kg Wasser/kg Gas sein. Je höher das Verhältnis, umso dichter ist die Tropfenwolke, desto besser ist der Abscheidegrad.
- der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Gas: Die Relativgeschwindigkeit sollte möglichst groß sein.

Bei diesen Wäschern liegt die Relativgeschwindigkeit bei 30 bis 50 m/s. Dabei ist die Tropfengröße im Mittel 40–200 µm, im Venturi mit Gasgeschwindigkeiten von ≈100 m/s liegt die Tropfengröße bei 20–150 µm.

System REITHER und BAYER-REITHER

Stäube im Nanometerbereich in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung kann das spezielle patentierte Nasswäschersystem vom Typ BAYER-REITHER nachweislich unter Einhaltung der geforderten Reingaswerte nach TA Luft abscheiden. Dabei wird die Abscheidung von Feinstäuben im Nanometerbereich durch eine Agglomerationsstufe ermöglicht, die mittels Druckluft und speziellen Wasserdüsen feinste Aerosole in den Rohgasstrom verteilen. Diese feinen Wasseraerosole benetzen die Feinstäube.

Der Rohrspalt-Venturiwäscher System REITHER ist ein Hochleistungs-Nassabscheider, geeignet zur Abscheidung von Partikeln bis in den Nanobereich. Der Vorteil des Systems liegt in der hohen Abscheideleistung, der Flexibilität bezüglich Lastschwankungen, der einfachen und dadurch kostengünstigen Konstruktion sowie der wartungsarmen Betriebsweise.

Der Aufbau des Rohrspalt-Venturiwäschers System REITHER ist in Abbildung 17 dargestellt. Nach dem Eintritt in das Wäschergehäuse (1) durchströmt das zu reinigende Gas eine Verengung, die gebildet wird aus zwei querliegenden Rohren (2) und einem auf einer Hubstange befestigtem Verdrängerkörper (3). Der sich dabei ergebende Doppelspalt (4) kann durch manuelle oder automatische Verstellung des Verdrängers stufenlos verändert werden. Durch diese Anpassung der Spaltbreite – auch bei laufendem Betrieb – ist eine hohe Flexibilität bei auftretenden Lastschwankungen gewährleistet. Die Aufgabe der Waschflüssigkeit erfolgt über eine Druckdüse (5). Bedingt durch die beiden rechteckigen Venturikehlen ist eine gleichmäßige Tropfenverteilung im Spalt gewährleistet.

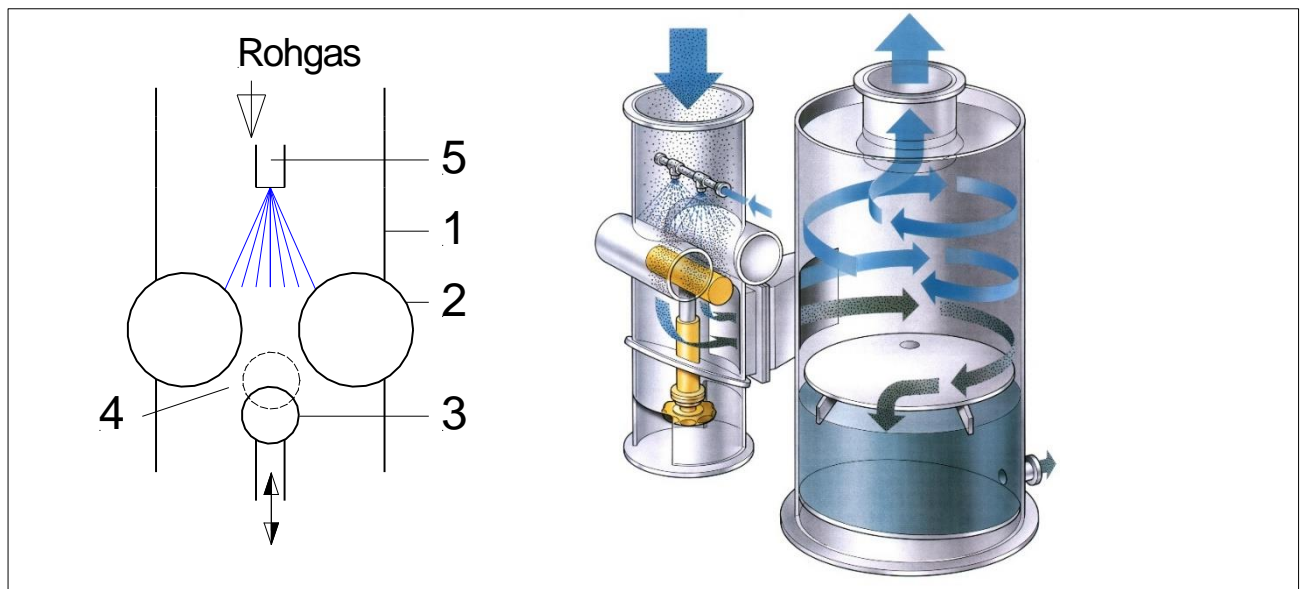


Abbildung 17: Arbeitsweise REITHER-Venturiwäscher (REITHER 2012)

Feinstäube und Aerosole im Bereich von unter $0,1 \mu\text{m}$ können wirtschaftlich und effektiv, auch bei Volumenstromschwankungen, abgeschieden werden. Ebenso ist eine gleichzeitige Abscheidung gasförmiger Schadstoffe möglich. Der Venturiwäscher System BAYER-REITHER besteht im Wesentlichen aus drei Teilen:

- einem Rohrspalt-Venturiwäscher mit Hybriddüse
- einem Zyklon-Tropfenabscheider
- einem Waschflüssigkeitssumpf

Der Rohrspalt-Venturiwäscher System BAYER-REITHER erzielt die Abscheideleistung eines Hochdruck-Venturi bei einem gegen Null tendierenden Druckverlust.

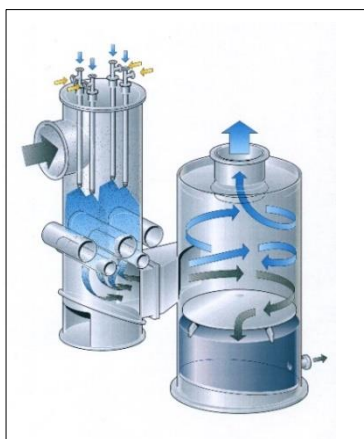


Abbildung 18: Arbeitsweise BAYER-REITHER-Rohrspalt-Venturiwäscher (REITHER 2012)

Die Abluft wird in dem Rohrspaltventuri in einer vorgeschalteten Sättigungsstufe bis auf 100 % Luftfeuchte mit Wasser angereichert. Anschließend werden die im Rohgas enthaltenen Partikel und Aerosole von einer fein zerstäubten, mit hohem Druck eingedüsten Waschflüssigkeit gewaschen. Diese Feinerstäubung der Waschflüssigkeit erfolgt durch die von der Firma BAYER entwickelte Hybriddüse. In ihr wird die Waschflüssigkeit durch Druckluft sehr fein zerstäubt, wobei durch eingebaute Resonanzkammern eine Pulsation des Tropfenauswurfs erzeugt wird. Mittels der Pulsation wird ein Sprühkegel mit groben und sehr feinen Tropfen im Größenverhältnis von bis zu 1 : 1.000 erzeugt. Dieses große Tropfenspektrum erreicht wiederum ein sehr breites Partikel- und Aerosolspektrum. Verstärkt durch die anschließend in der Venturikehle

erzwungene hohe Durchströmgeschwindigkeit sowie durch Kollision und Anziehungskräfte der Waschflüssigkeit mit den Partikeln und Aerosolen kommt es zu einer schnellen Vergrößerung der Teile. Diese können leicht mit einem nachgeschalteten Fliehkraftabscheider (z. B. Zyklonabscheider) aus der Abluft abgeschieden werden. Ein großer Vorteil des Systems ist, dass der Volumenstrom verändert werden kann, ohne dass sich der Abscheidegrad verändern würde. Eine Verstellung der Venturikehle ist nicht erforderlich.

Der Unterbau des Zyklons dient direkt als Waschflüssigkeitsvorlage, an der eine Kreislaufpumpe angeschlossen ist. Das sich dort auf der Waschflüssigkeit ansammelnde Öl wird mittels einer Skimmereinrichtung abgetrennt. Die Waschflüssigkeitsvorlage wird niveauüberwacht. Wasserverdunstungsverluste werden automatisch nachgespeist und die Pumpe vor einem Trockenlaufen geschützt.

Sowohl die im Kreislauf umgepumpte Waschflüssigkeit als auch die zugegebene Druckluft werden mit entsprechenden Druck- und Durchflussmessungen überwacht (REITHER 2012).

7.1.1.4 Verfahrensschwächen

Nachteilig sind vor allem der im Vergleich zu den filternden Abscheidern relativ hohe Handlings- und Wartungsaufwand, die Schlamm Entsorgung und die Entsorgung bzw. Aufbereitung des Abwassers.

Prinzipiell ist der Einsatz eines filternden Abscheiders zu favorisieren, sofern dieser eine echte verfahrenstechnische Alternative zum Einsatz eines Nassabscheiders darstellt. Eine Ausnahme für diesen Grundsatz stellt die Abscheidung von explosiven partikelförmigen Verunreinigungen dar. Hier können die Investitionskosten und die Betriebs- bzw. Anlagensicherheit ausschlaggebend für den Einsatz eines Nasswäschers sein.

7.1.1.5 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Nasswäscher sind aufgrund ihres schlechten Abscheidegrades für Staubpartikel im Bereich $\leq 0,5 \mu\text{m}$ mit Ausnahme der vorgestellten Venturiwäscher für diesen Anwendungsbereich nicht geeignet (s. Abbildung 13). Zusätzlich besteht die Problematik in der Abscheidung von NH_3 im Waschwasser, weil die Staubabscheidung vor die Gaswäsche platziert werden muss. Theoretisch ist es durchaus möglich, mit einem Nasswäscher die Ammoniakfracht im Rohgas auf Reingaswerte gemäß der TA Luft zu reduzieren. Technisch macht dieses Verfahren jedoch keinen Sinn, weil die Abwassermengen mehrere m^3/h betragen können und das Prozesswasser innerbetrieblich nicht verwertet werden kann. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das NH_3 ab einen bestimmten Dampfdruck wieder aus dem Waschwasser ausstriipt. Weiterhin ist ein sehr aufwendiges Handling hinsichtlich der notwendigen Reinigungszyklen und der Schlamm Entsorgung zu berücksichtigen.

Hinsichtlich des Staubabscheidegrades in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung kann der Venturiwäscher, speziell das patentierte Nasswäschersystem vom Typ BAYER-REITHER, nachweislich Stäube im Nanometerbereich abscheiden.

Prinzipiell eignet sich der Venturiwäscher auch zur Reinigung von Ammoniak bei Zugabe von Schwefelsäure. Aufgrund der hohen Betriebskosten und des anfallenden Waschwassers ist der Einsatz zur kombinierten Abscheidung von Staub und Ammoniak jedoch nicht zu empfehlen.

7.1.2 Filternde Abscheider

Den Stand der Technik für die Abscheidung von Stäuben stellen die filternden Abscheider dar. Filternde Abscheider können hohe Abscheidegrade erzielen und somit niedrige Reinluftkonzentrationen auch für kleine Korngrößen von $5 \mu\text{m}$ erreichen.

7.1.2.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Das Filtermedium besteht entweder aus Faserschichten oder aus körnigen Schichten (Schütttschichtfilter). Für die Abluft der Geflügelhaltung bieten sich die häufiger anzutreffenden Faserschichtfilter an, die sich in die beiden großen Gruppen Speicherfilter und Abreinigungsfilter unterteilen.

Bei Speicherfiltern erfolgt die Partikelabscheidung im Innern der Faserschicht nach dem Prinzip der Tiefenfiltration. Die Filterelemente werden nach Sättigung mit Staub durch neue ersetzt. Haupteinsatzgebiet ist deshalb der Bereich niedriger

Staubgehalte wie sie in der Klima- und Belüftungstechnik zum Einsatz kommen. Je nach Anforderung werden die Speicherfilter in Grobfilter und Schwebstofffilter unterteilt (KERN 1990).

Abreinigungsfilter finden in der Abluftreinigung vorwiegend bei hohen Rohgasstaubbelastungen (bis zu 200 g/m³) Verwendung. Die Staubabscheidung erfolgt im Gegensatz zu dem Speicherfiltern nach einer kurzen Tiefenfiltrationsphase überwiegend an der Oberfläche des Filtermediums. Die entstehende Staubschicht unterstützt erheblich den Filtrationsvorgang; sie muss jedoch wegen des zunehmenden Druckverlustes periodisch oder differenzdruckgesteuert durch einen Abreinigungsvorgang, meist in Form eines Druckluftstoßes, entfernt werden.

In Abhängigkeit der geometrischen Gestaltung des Filtermediums werden Abreinigungsfilter hauptsächlich in Schlauch-, Taschen- und Patronenfilter eingeteilt.

Precoating

Zur Verbesserung der Abscheideleistung kann eine Beschichtung der Filterelemente erfolgen. Precoating ist ein Begriff aus dem englischen Sprachgebrauch und bedeutet, dass die Filterelemente im Voraus beschichtet werden. Verwendet wird ein Filterhilfsmittel in Pulverform, das folgende Eigenschaften hat (HANDTE 2010):

- Bildung einer Schutzschicht zur Schonung des Filtermaterials z. B. bei klebrigen Stäuben, Kleinstmengen von Dämpfen oder Aerosolen, Funken
- Bildung einer Filterhilfsschicht zur Erhöhung des Abscheidegrades bei
 - sehr feinen Staubpartikeln,
 - sehr niedrigem Prozessstaubanfall
- Verbesserung des Abreinigungsverhaltens bei niedrigem stabilem Differenzdruck
- Reduzierung der Brandgefahr

Die Wirkprinzipien der genannten Filter sind Abbildung 19 zu entnehmen.

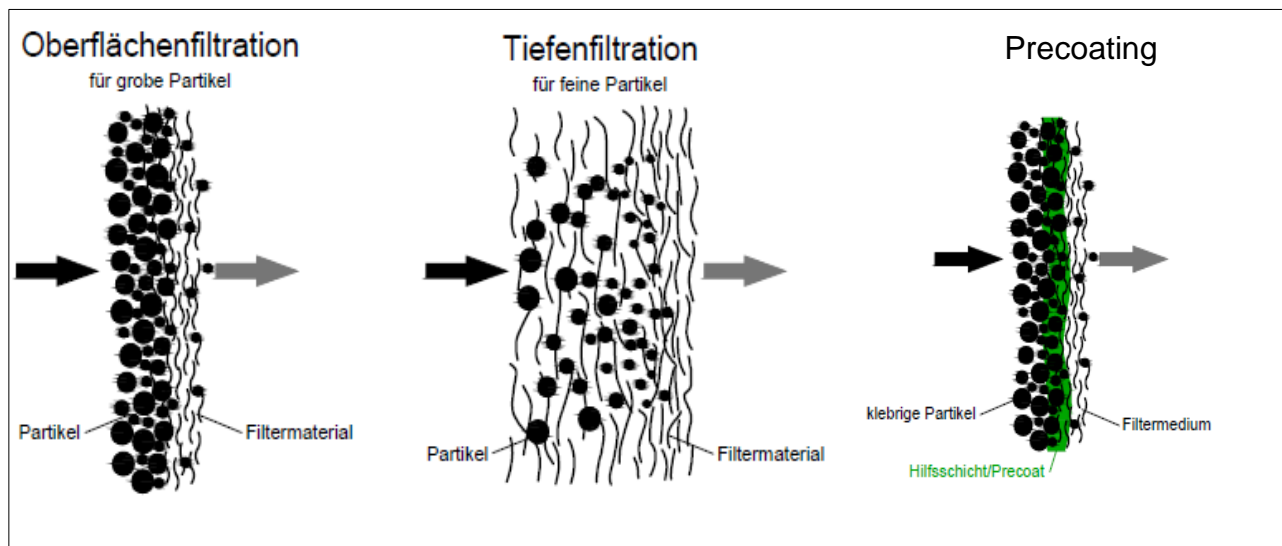


Abbildung 19: Wirkprinzip Oberflächenfiltration, Tiefenfiltration, Precoating (HANDTE 2010)

7.1.2.2 Anwendung und Abscheideleistung

Für die Abscheidung von trockenen, nicht klebrigen Stäuben sollte der Einsatz eines filternden Abscheiders jederzeit favorisiert werden. Hochleistungfiltermedien für unterschiedliche Einsatzgebiete garantieren sehr niedrige Reingaswerte. Die Auswahl einer geeigneten Entstaubungsanlage hängt entscheidend von den folgenden anwendungstechnischen Parametern ab (KERN 1990; HIMENVIRO 2016):

■ Rohgas

- Temperatur
- Feuchte
- Volumenstrom
- Druck am Eintritt

■ Partikel

- Korngrößenverteilung
- Rohgasbelastung

■ Filtermedium

- Dichte des Filterkuchens
- Agglomerationsfähigkeit des Filterkuchens
- Ablösevermögen des Filterkuchens

Die spezifische Filterflächenbelastung ist bestimmend für den Abscheidegrad des Filters. Diese sollte in der Regel zwischen $0,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ und $2,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ liegen, kann aber im Einzelfall auch höher ausfallen.

7.1.2.3 Verfahrensschwächen

Die Abscheidung von klebrigen oder extrem leichtbrennbaren Stäuben beeinflusst die betriebssichere Fahrweise eines Trockenfiltersystems. Weiterhin sollte die Ablufttemperatur immer über dem Taupunkt liegen, sodass das Filtergewebe nicht blockiert wird. Bei der Abreinigung des Filters können explosionsfähige Staubkonzentrationen entstehen und hohe elektrostatische Aufladungen auftreten. Somit sind die Anforderungen an den Explosionsschutz bei der Auslegung zu berücksichtigen (s. hier auch Kap. 8.2.1)

7.1.2.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Die Rohgaszusammensetzung in der Geflügelhaltung bietet prinzipiell eine gute Möglichkeit für den Einsatz von Gewebefiltern. Bei Einsatz in der Geflügelhaltung ist jedoch zu prüfen, ob eine Vorabscheidung gröberer Staubpartikel und Federn, die bei hoher Luftgeschwindigkeit nicht bereits im Lüftungsschacht sedimentieren, erfolgen muss (u. a. durch Zyklone möglich).

7.2 Verfahren zur Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen

Die bisher eingesetzten und DLG-zertifizierten chemischen Wäscher für gasförmige Verunreinigungen können als Stand der Technik eingestuft werden. Durch die Kenntnis des Verfahrens kann ein optimaler Betrieb erreicht werden. Die Biowäsche ist durch die gute Wasserlöslichkeit von Ammoniak prinzipiell ebenfalls für diesen Einsatzfall geeignet. Bisher wurden Biowäscher jedoch aufgrund der Größenordnung des Abluftvolumenstroms der Geflügelhaltung nicht eingesetzt, könnten aber parallel zu einer Geruchsreduzierung beitragen. Für beide Verfahren werden daher die grundsätzlichen Daten nachfolgend zusammengefasst.

7.2.1 Physikalische und chemische Absorption

7.2.1.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Die Absorption ist ein Trennverfahren, bei dem ein oder mehrere gas- bzw. dampfförmige Stoffe von einer Flüssigkeit aufgenommen werden. Die Gasaufnahme kann rein physikalisch oder chemisch erfolgen. Im ersten Fall handelt es sich um eine physikalische Gaswäsche und physikalisch wirkenden Waschmitteln. Im zweiten Fall geht das zu absorbierende Gas eine lockere chemische Bindung mit dem Waschmittel ein. Für die Berechnung von Absorptionsprozessen zur Abluft-

reinigung ist die Kenntnis der Gleichgewichtsdaten von Mehrstoff- und Mehrphasensystemen, speziell der Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten, als Funktion von Temperatur, Druck und Zusammensetzung erforderlich. Ammoniak weist eine sehr gute Wasserlöslichkeit auf.

Weil der Stoffübergang von der Abluft auf das Waschmedium ein dynamischer Prozess ist, ist die Effektivität der Schadstoffabtrennung maßgeblich von der Kontaktzeit und der Kontaktfläche zwischen beiden Strömen abhängig. Zur Verbesserung des Stoffübergangs wird das Waschmedium häufig über einem Festbett aus Füllkörpern oder Padwänden verregnet. Hierdurch wird die Abflussgeschwindigkeit des Waschmediums reduziert und die Kontaktfläche erhöht, sodass eine deutlich höhere Schadstoffaufnahme des Waschmediums erreicht wird. Klassische Füllkörperpackungen haben sich bei der Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen, wie sie in diesem speziellen Einsatzfall vorkommen, bewährt (KERN 1990).

Gängige Bauarten sind

- Rieseltankreaktoren und
- Sprühurmwäscher.

Sprühurmwäscher bestehen aus einem vertikalen Zylinder, in dem das Waschmedium über einen Düsenstock in die aufwärtsströmende Abluft eingedüst wird. Rieseltankreaktoren verfügen über Füllkörperpackungen, die einen verbesserten Stoffübergang ermöglichen.

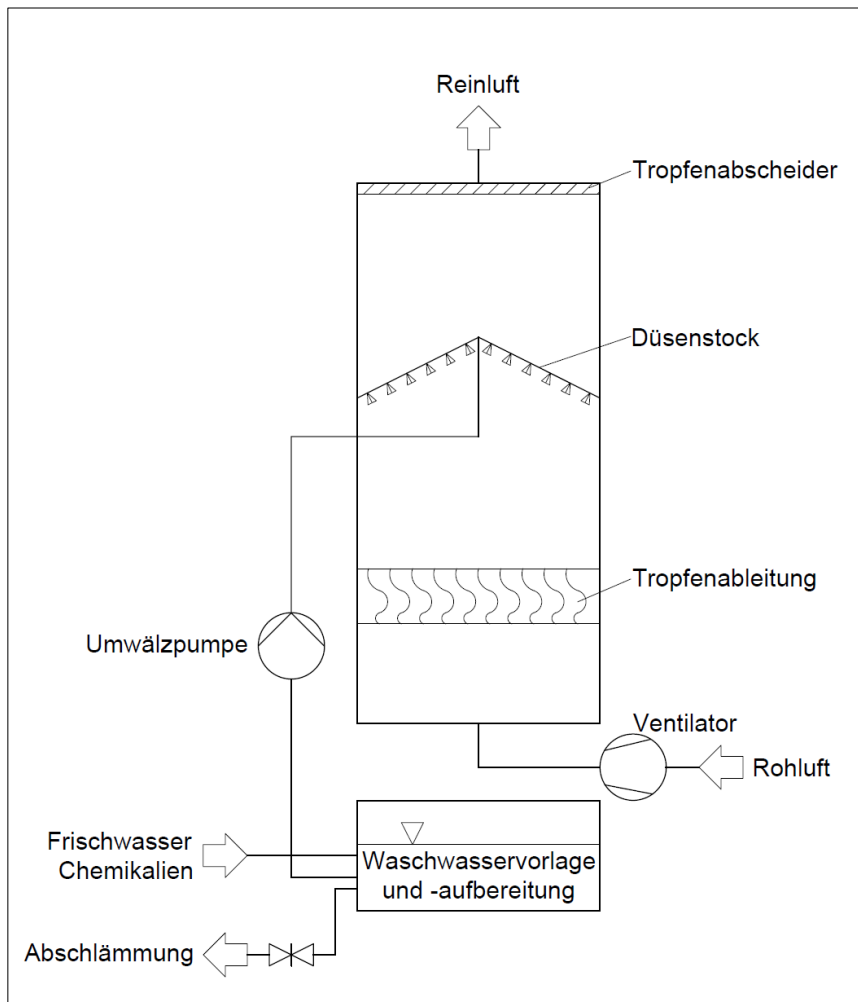


Abbildung 20: Prinzipskizze Sprühurmwäscher (eigene Darstellung)

Eingesetzte Waschflüssigkeiten für die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen

Als Waschflüssigkeiten werden üblicherweise Wasser oder chemisch wirkende Waschmittel aus wässrigen Lösungen verschiedener, überwiegend anorganischer Stoffe, die mit den zu absorbierenden Gaskomponenten reagieren, verwendet. Bei wässrigen Lösungen von Säuren, Laugen oder Salzen werden die gelösten Moleküle zu positiven oder negativen Ionen dissoziiert und somit elektrisch leitend. Bei niedrigen, teilweise auch bei mittleren Konzentrationen zerfallen alle Salze in Ionen. In diesem Fall ist die Leitungsfähigkeitsmessung ein Maß des Salzgehaltes bzw. der Ionenkonzentration.

Physikalische Absorption

Physikalische Absorption bedeutet Lösen der gasförmigen Schadstoffe in einer Absorptionsflüssigkeit ohne Umsetzung der absorbierten Schadstoffe, d. h. sie gehen nur in Lösung z. T. bis zur Sättigung bzw. Gleichgewicht zwischen Abluft und Flüssigkeit, in Abhängigkeit des Dampfdruckes bzw. Partialdruckes. Als Waschflüssigkeit für physikalische Absorption können auch organische Flüssigkeiten eingesetzt werden, wie Silikonöle, Hochsieder und Alkohole. Dies gilt aber nur für geschlossene Systeme, wobei dann die adsorbierten Schadstoffe in einer 2. Stufe wieder von Waschflüssigkeiten getrennt werden.

Chemische Absorption

Die volle Wirksamkeit der NH_3 -Gaswäsche setzt einen sauren pH-Bereich voraus. Dementsprechend muss durch Zugabe von Säure dieser Bereich eingehalten werden. Durch den Stoffaustausch von NH_3 mit H_2SO_4 zu $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ steigt die Salzkonzentration in der Waschlösung ständig an. Im Schnitt werden die Anlagen mit einer Salzkonzentration von 200 g/Liter bzw. ca. 300 g/Liter Ammoniumsulfat gefahren.

Die mit Ammoniak beladene Abluft wird in einem Füllkörperwäscher mit verdünnter Schwefelsäure gewaschen. In einer Neutralisationsreaktion bildet sich dabei Ammoniumsulfat. Die zu reinigende Abluft wird im Gegenstrom zum Waschmedium durch den Absorber geführt. Der Stoffaustausch erfolgt in einer Füllkörperzone.

Die Füllkörper bestehen aus Kunststoff (PP) und haben eine große Oberfläche bei geringem Druckverlust. Bevor die gereinigte Abluft den Gaswäscher verlässt, wird sie von mitgeführten Flüssigkeitströpfchen durch Passieren einer Tropfenabscheiderzone befreit. Die Waschlösung wird entgegen der Gasströmungsrichtung über ein Verteilersystem unterhalb der Tropfenabscheiderzone eingebracht und durchströmt den Gaswäscher nach unten. Das Unterteil des Gaswäschers ist als Waschflüssigkeitsvorlage ausgebildet. Der Waschflüssigkeitskreislauf wird von einer Kunststoff-Tauchpumpe aufrecht erhalten.

Der Wasserverlust durch Verdunstung wird über eine niveaugesteuerte Wassernachspeisung ausgeglichen. Das Betriebswasser für die Gaswaschanlage sollte keine höhere Härte als max. 10° deutsche Härte aufweisen, weil sonst die Gefahr des Ausfallens von Calciumsulfat (Gips) besteht. Gegebenenfalls ist enthärtetes oder teilenthärtetes Wasser zu verwenden. Es wird empfohlen, den Füllkörperwäscher und die dazugehörigen Behälter, die wassergefährdende Stoffe enthalten, in einer Schutzwanne aufzustellen.

Automatische Säurezudosierung

Wie bereits ausgeführt, ist es erforderlich, dem Gaswäscher Säure zuzuführen. Als Waschflüssigkeit sollte Schwefelsäure mit einer Konzentration von bis zu 50 % eingesetzt werden. Höhere Konzentrationen können aus Materialbeständigkeitsgründen und aufgrund der bei der Verdünnung entstehenden hohen Wärmemenge nicht verwendet werden.

Die Zugabe der Schwefelsäure erfolgt automatisch über eine Dosierpumpe in Abhängigkeit vom pH-Wert und von der gewünschten Salzkonzentration in der Waschlösung. Die verbrauchte Waschflüssigkeit wird mittels eines Motorventils in den Abwasser – IBC – Behälter abgeleitet. Sowohl die Chemikalienzudosierung als auch das Ableiten der verbrauchten Waschflüssigkeit erfolgt vollautomatisch bei kontinuierlichem Betrieb.

Automatisches Ableiten der aufkonzentrierten Waschlösung

Die Salzkonzentration wird über die Durchflussmessung erfasst. Über die Massenbilanz der chemischen Reaktion wird auf die Menge an gebildeten Salzen zurückgerechnet. Somit ist die Salzkonzentration proportional zum Zählerstand. Sobald die Waschflüssigkeit die gewünschte Salzkonzentration erreicht hat, wird ein Teil der Waschflüssigkeit automatisch aus

dem Waschprozess in den bereitstehenden Container abgeleitet. Dies geschieht während des Betriebs ohne Laufzeitunterbrechung.

7.2.1.2 Anwendung und Abscheideleistung

Für die Abscheidung von gasförmigen Schadstoffen wird bevorzugt die chemische Absorption und für die Rückgewinnung von Chemikalien die physikalische Absorption eingesetzt. Eine physikalische Absorption ist in der Praxis nur dann sinnvoll, wenn das Waschwasser in einem Produktions- oder Stoffkreislauf wiederverwendet werden kann. Ist dies durch die betrieblichen Rahmenbedingungen nicht möglich, stellt die physikalische Absorption letztendlich nur eine Verlagerung des eigentlichen Abluftproblems in die Waschflüssigkeitsphase dar (KERN 1990).

Das unterschiedliche Absorptionsverhalten einzelner, gleichzeitig in einer Abluft vorhandener Schadstoffe ermöglicht oft, durch geeignete Wahl der Waschflüssigkeiten die einzelnen Komponenten selektiv auszuwaschen. Dies geschieht in mehrstufigen Anlagen.

Die Absorption verbessert sich durch

- größere Kontaktfläche,
- größere Flüssigkeit/Gas-Verhältnisse,
- höhere Konzentrationsunterschiede und
- niedrigere Temperatur im Abluftstrom.

Daraus ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Abscheideleistung durch eine Kühlung der Zuluft und damit Verringerung der erforderlichen Sommerlufrate und Erhöhung der Konzentration in der Abluft. Eigene Berechnungen zeigen, dass bei einer Zuluftkonditionierung etwa 30 % des Volumenstroms eingespart werden können.

7.2.1.3 Verfahrensschwächen

Der Einsatz von Füllkörperkolonnen für die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen in Verbindung mit partikelförmigen Bestandteilen in der Abluft ist prinzipiell zu vermeiden. Die Füllkörperpackungen können mit der Zeit verstopfen und der Druckverlust über der Füllkörperpackung steigt an. Damit reduziert sich auch die Wirksamkeit der eigentlichen Funktion der Füllkörperpackung. Durch den Anstieg des Druckverlustes im Gesamtsystem kann sich, in Abhängigkeit der Auslegung der Ventilatoren hinsichtlich ihrer Gesamtpressung, der Volumenstrom vermindern. Eine ungenügende Erfassung der Emissionsquellen und Transportablagerungen im Rohrleitungssystem wären die Folge. Zusätzlich werden die Bedüsungspumpen und die Sprühdüsen mit Feststoffen in der Waschflüssigkeit belastet, die zum Ausfall des Bedüsungssystems führen können. Soweit sich partikelförmige Verunreinigungen im Rohgas befinden, sollte somit eine Vorfiltration vor dem Wäscher zum Einsatz kommen.

Der Nachteil der physikalischen Absorption besteht in ihrem Umkehrvorgang der Desorption. Durch Zunahme der Temperatur bzw. bei einer Verringerung des Druckes stripfen die absorbierten Gase wieder aus der Waschflüssigkeit aus. In Abhängigkeit des thermischen Gleichgewichtes zwischen der Gasphase und der Flüssigkeitsphase können die Rohgaswerte der ausgestrippten Gase um das Vielfache der ursprünglichen Rohgaskonzentrationen liegen.

7.2.1.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Klassische vertikal aufgebaute Füllkörperwäscher bzw. Füllkörperkolonnen sollten aufgrund der höheren Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu den von der DLG zertifizierten Horizontal-Wäscherbauformen nur dann zum Einsatz kommen, wenn diese die Abscheidegrade für Ammoniak nicht einhalten könnten. Der pH-Wert des Waschwassers sollte bei 3 bis 3,3 liegen.

7.2.2 Biowäscher

7.2.2.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Bei der Biowäsche wird die Abluft durch die Kombination der Nassgaswäsche und dem biologischen Abbau der Waschflüssigkeit in einem Bioreaktor gereinigt. Dabei wird ein Belebtschlamm- oder Trägerschlammsystem genutzt, das im Re-

aktor als Kreislauf geführt wird und die Absorption und den biologischen Abbau dabei örtlich voneinander getrennt stattfinden lässt. Die prinzipielle Verfahrensweise und die Bautypen unterscheiden sich von der physikalischen und chemischen Absorption nicht (s. o.).

7.2.2.2 Anwendung und Abscheideleistung

Bei der Biowäsche werden geringe Konzentrationen (< 1 bis 2 g C/m^3) von biologisch gut abbaubaren und in Wasser leicht löslichen Komponenten wie Ammoniak, Amine, Kohlenwasserstoffe, Schwefelwasserstoff, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Ester und Geruchsstoffe entfernt. Des Weiteren müssen absorbierte Bestandteile unter aeroben Bedingungen biologisch abbaubar sein.

Das Verfahren verläuft bei einem atmosphärischen Druck und einer Umgebungstemperatur von 15 bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$, wobei das Optimum bei 30 bis $35 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Die Konzentration der Mikroorganismen in der Waschflüssigkeit sollte $>15 \text{ g/l}$ Trockenstoff und der Gasstrom sollte zwischen 1.000 und $3.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pro m^2 Säulenoberfläche betragen, damit Konzentrationen an Ammoniak in der Abluft von 50 – 200 mg/Nm^3 und Geruchsstoffkonzentration bis 20.000 GE/m^3 absorbiert werden können (UBA 2003).

Durch Zugabe von hochsiedenden Ölen kann die Aufnahmefähigkeit der Waschflüssigkeit für schlecht wasserlösliche Stoffe um das Zwei- bis Vierfache gesteigert werden. Der zu erreichende Wirkungsgrad des Verfahrens liegt dabei für Ammoniak bei 80 bis 95% und für Gerüche bei 70 bis 80% . Der Biowäscher eignet sich auch als Vorstufe zum Biofilter, weil dieser die Schadstofffracht und Palette vor dem Biofilter minimiert und die erforderliche Filterfläche verkleinert werden kann.

7.2.2.3 Verfahrensschwächen

Zum Erreichen der vollen Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen im Biowäscher ist eine längere Adaptionszeit erforderlich. Weiterhin werden für das Aufrechterhalten der vollen Leistung verschiedene Überwachungssysteme benötigt. Dazu gehören unter anderem die chemische Analyse, die zur Kontrolle der Salzkonzentration im Absorptionsmittel nötig ist. Durch Verdunstung der Waschflüssigkeit bei hohen Temperaturen und der Zugabe von Nährstoffen bzw. der Neutralisation der Flüssigkeit steigt der Salzgehalt im System und es kann zur Inhibierung der biologischen Prozesse kommen. Um dies zu verhindern, sollte neben der Kontrolle die Zugabe von Frischwasser und die Entfernung des Absorptionsmaterials erfolgen.

Stabile Abbauraten werden bei einer Salzkonzentration mit der Leitfähigkeit von bis zu $5.000 \text{ } \mu\text{S/cm}$ erreicht. Zusätzlich muss eine pH-Wert-Überwachung erfolgen, weil Stickstoffverbindungen in der Abluft zu einer Ansäuerung führen.

Eine Blockade des Kreislaufwassers kann durch Bildung von Biomasse hervorgerufen werden.

Das Verfahren eignet sich nur bedingt für schlecht wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe sowie stark schwankende Abluftzusammensetzungen und Temperaturen. Eine längere Betriebspause und auch der Teillastbetrieb beeinträchtigen die Leistung des Verfahrens, weil die Leistung der Mikroben dadurch nachlässt. Eine permanente Nährstoffzuführung und Belüftung müssen gewährleistet werden.

7.2.2.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Aufgrund der sehr stark schwankenden Abluftzusammensetzung und der Volumenströme (Jahresgang, Wochengang bei Entmistung, Tagesgang, mastzyklusabhängige Schwankungen) eignet sich der Einsatz von Biowäschern nur bedingt. Im Vergleich zu chemischen Wäschern, die eine gesicherte Abscheidung gewährleisten, sind sie in der Lage, zusätzlich Gerüche abzuscheiden.

Als verfahrenstechnische Lösung für die schwankenden Volumenströme bietet sich der Chargenbetrieb von einzelnen Wäscherstufen mit unterschiedlicher Austauschfläche und der externen Substratzufuhr zur Erhaltung der Aktivität der Mikroorganismen an. Hierzu wären vorab unter repräsentativen Praxisbedingungen mit ausreichender Adaptionszeit halbertechnische Voruntersuchungen erforderlich. Eine weitere Möglichkeit besteht, wie bereits erwähnt, in der Kühlung der Zuluft und damit Verringerung der großen Volumenströme im Sommer.

7.3 Verfahren zur Abscheidung von Gerüchen

Abluftreinigungsverfahren, die auf die Minimierung von Gerüchen abzielen und nicht generell für die Geflügelhaltung ausgeschlossen werden können, sind:

- Adsorptionsfilter
- Biofilter
- Oxidation im „kalten Plasma“ (NTP-Technik)

Diese Verfahren werden nachfolgend kurz erläutert. Neben der Geruchsreduzierung im kalten Plasma ist hier der zusätzliche Effekt der Keimabtötung mit zu beleuchten.

7.3.1 Adsorptionsfilteranlagen

7.3.1.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Für die Auslegung von Adsorptionsanlagen sind genaue Kenntnisse vom Gleichgewicht und der Kinetik bei der Adsorption von Interesse. Das Gleichgewicht bei der Adsorption wird durch die Adsorptionsisotherme beschrieben. Sie gibt die adsorbierte Menge an Gas in Abhängigkeit des Gleichgewichtspartialdruckes dieses Gases in der umgebenden Gasphase bei konstanter Temperatur wieder. Die Adsorptionsisothermen werden experimentell ermittelt. Die Adsorption findet in der Technik im Temperaturbereich von 20 bis 50 °C statt. Bei höheren Temperaturbereichen stellt sich aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskurve eine niedrigere Beladung zur adsorbierenden Komponente auf dem Adsorbens ein. Die Adsorption von Gasen und Dämpfen gleicht vielfach den Kondensationsvorgängen dieser Stoffe. Sie ist im Wesentlichen physikalischer Natur. Angenähert gilt die Regel, dass das Adsorbiervermögen mit höherem Siedepunkt ansteigt. Für die technische Durchführung von Adsorptionsprozessen hat neben den Sorptionsisothermen der zeitliche Ablauf der Adsorption, die Kinetik, besondere Bedeutung. Die zu adsorbierende Komponente wandert aus der umgebenden Gasphase durch einen Grenzfilm an die äußere Oberfläche des Adsorbens. Von dort verteilt sie sich auf der inneren Oberfläche des Adsorbens, d. h., sie wird in den Poren und Hohlräumen des Adsorbens angelagert.

Adsorptionsmittel sind Feststoffe, die in der Gasreinigung aufgrund der Größe ihrer inneren Oberfläche und ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit eine Konzentration von Stoffen aus der umgebenden Gasphase ermöglichen. In vielen Bereichen der Abluftreinigung wird Aktivkohle in unterschiedlichen Qualitäten eingesetzt. Der Bedarf an Adsorptionsmittel wird durch die Beladepazität des Adsorbens, d. h. durch das Aufnahmevermögen des Adsorbens, für die zu adsorbierende Komponente bestimmt.

Die Regenerierung von Aktivkohle erfolgt über Temperaturwechselverfahren, Druckwechselverfahren oder über eine Extraktion mit Lösungsmitteln. Um Adsorptionsapparate dimensionieren zu können, muss im Wesentlichen das wirksame Volumen der Adsorbensmasse bekannt sein.

7.3.1.2 Anwendung und Abscheideleistung

Die Adsorption wird unter anderem zur Beseitigung flüchtiger organischer Stoffe und Gerüche, auch mit toxischer Wirkung, und zur Rückgewinnung genutzt. Sie findet Einsatz zur Absaugung von Bodendämpfen und lokalen Absaugungen, wie Sammel- und Probenahmestellen. Nicht geeignet ist das Verfahren bei zu hoher Schadstoffkonzentration sowie bei kleinen Molekülen und Staub (UBA 2006).

Die breiteste Anwendung haben kohlenstoffhaltige Adsorbentien bei der Entfernung von Lösemitteldämpfen aus Abluftströmen gefunden. Bei der Anlagengestaltung ist die Bildung von Hotspots in der Aktivkohlefilterschüttung zu beachten. Beim Hotspot handelt es sich im Prinzip um eine lokale Erwärmung der Aktivkohle, bedingt durch die Exothermie des Adsorptionsprozesses oder der Aktivierung des adsorbierten Moleküls (Herabsetzung des Flammpunktes). Um eine kontinuierliche Abführung der entstehenden Wärmelast in einem Adsorptionsfilter zu gewährleisten, ist eine gute Durchströmung notwendig. Diese Forderung wirkt sich direkt auf die praktisch verwendeten Schütthöhen und Verweilzeiten aus. Damit sind durchaus konstruktive Grenzen bei der Dimensionierung von Aktivkohlefilteranlagen verbunden.

7.3.1.3 Verfahrensschwächen

Entscheidend für den Einsatz eines Adsorptionsfilters ist die relative Feuchte der Abluft. Wasser setzt die Poren des Adsorbens temporär zu. Die Feuchtigkeit im Adsorbens wirkt sich negativ auf den Adsorptionsprozess und damit auf die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen in der Abluft aus.

7.3.1.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Die Filtration mit Aktivkohle (Adsorption) eignet sich prinzipiell mit geruchsoptimierter Imprägnierung der Aktivkohle zur Minderung von Gerüchen. Somit wäre sie theoretisch für die Abscheidung von Gerüchen eine Option. Praktisch gesehen ist jedoch eine Adsorptionsanlage für einen Volumenstrom von über 50.000 m³/h zu groß, um betriebssicher gefahren werden zu können. Es müssen Anströmgeschwindigkeiten von $w = 0,2-0,4$ m/s berücksichtigt werden. Neben den sehr hohen Investitionskosten kommen noch zusätzlich sehr hohe Betriebskosten durch den Austausch der beladenen Aktivkohle hinzu.

Die Modulbauweise wäre eine Alternative, die jedoch mit höheren Investitionskosten verbunden ist. Aufgrund der Hotspot-Bildung sollten alle Aktivkohlefilteranlagen prinzipiell mit entsprechend geeigneten Branderkennungs- und Löschanlagen ausgerüstet werden. Zusätzlich sind die hohen Luftfeuchten der Stallabluf aus der Geflügelhaltung für diese Technologie ein Problem (s. o.).

7.3.2 Biofilter

7.3.2.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Der Abbau von Gerüchen basiert bei der Biofiltertechnologie auf der Ausbildung eines sogenannten Biofilmes (Feuchtheitsfilm des Biofiltermaterials), der sich auf der Biomasse befindet. Die Schadstoffe werden im Biofilm absorbiert und anschließend durch Mikroorganismen umgesetzt (abgebaut). Vereinfacht dargestellt, siedeln sich Mikroorganismen in diesem Biofilm an und wandeln die organischen Verbindungen zu Kohlenstoff und Sauerstoff um. Beide Bestandteile reagieren mit der Luft zu Wasser und Kohlendioxid. Angaben zur erforderlichen Rohluftkonditionierung, Überwachung, Wartung und Dimensionierung sind in der VDI 3477 zusammengestellt. Die Reinigungsleistung hängt vom Überströmen der Oberfläche des Biofiltermaterials, der Kontaktzeit, den Diffusionsvorgängen an der Oberfläche des Biofiltermaterials und dem biologischen Abbau ab.

Man unterscheidet Flächen-, Etagen- und Containerbiofilter sowie Sonderbauweisen wie Etagen- und Turmbiofilter. Ein Containerfilter ist dabei ein Flächenbiofilter in einem Behälter mit definierter Abluftöffnung. Bei Etagenbiofiltern werden mehrere Biofilter (offene oder geschlossene) übereinander angeordnet. Bei hintereinander geschalteten Biofiltern kann sich eine Schichtung verschiedener Mikroorganismen in den verschiedenen Filtern ausbilden.

7.3.2.2 Anwendung und Abscheideleistung

Biofilter werden hauptsächlich zur Eliminierung von Geruchsstoffen eingesetzt. Zusätzlich kann eine Abscheidung von Staubpartikeln erfolgen. Die Vielfalt von Biofiltern und damit Abweichungen im Betrieb (Zusetzen, Füllhöhe, Abmaße, Feuchte etc.) lassen keine generellen Aussagen zur Abscheideleistung, speziell auch von Bioaerosolen und Gerüchen, zu. Prinzipiell konnte eine Minderung mikrobiologischer Komponenten nachgewiesen werden (u. a. KUMMER 2003). Bisherige Untersuchungen zur generellen Reinigungsleistung für breite Schadstoffspektren in der Rohluft geben keine einheitlichen Ergebnisse (s. a. Verfahrensschwächen).

Biofilter werden erfolgreich in der Nahrungs- und Genussmittelproduktion, der Verwertung von Reststoffen/Abfällen, der Abfallentsorgung und chemischen Industrie zur Abscheidung von organischen Verbindungen und anorganischen Verbindungen (Ammoniak und Schwefelwasserstoff) sowie Geruch eingesetzt. Eine Übersicht der Eignung für Stoffe und Stoffgruppen enthält Tabelle 2 der VDI 3477 mit dem Hinweis, dass abhängig von der Zusammensetzung im Rohgas Abweichungen der Eignung auftreten können.

7.3.2.3 Verfahrensschwächen

Für eine betriebssichere Fahrweise von Biofiltern ist der richtige Einsatz erforderlich. Dieser kann schwer abgesichert werden, weil

- eine gleichmäßige Durchströmung des Biofilters in der Praxis oft nicht gegeben ist,
- die Reinfluft nach Flächenbiofiltern aufgrund der flächige Emissionsquelle keine repräsentative Probennahme zulässt (Überwachungsproblem),
- der Filter wenig Möglichkeiten bietet, steuernde oder unterstützende Maßnahmen vorzunehmen,
- eine Rohluftkonditionierung (Temperatur, Feuchte) und regelmäßige Wartung des Filtermaterials zwingend erforderlich, aber schwer zu überwachen ist.

Abhängig von der Bauausführung der Biofilter ergeben sich weitere Nachteile:

- Biofilter
 - Funktionstüchtigkeit ist witterungsabhängig (Regen, hohe Außentemperaturen beeinträchtigen das Filtermaterial und somit die Abscheideleistung)
- Containerbiofilter
 - erschwerte Kontrolle der Filteroberfläche (Verdichtungs- und Trockenzonen), weil visuell nicht möglich bzw. Beprobung Filtermaterial schwierig
 - hoher Arbeitsaufwand beim Filtermaterialwechsel
- Etagenbiofilter
 - hoher Druckverlust

Vorteile des Biofilters sind die vergleichsweise einfache Technik mit eher geringen Investitions- und Betriebskosten.

7.3.2.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Aus folgenden Gründen erscheint die Biofiltertechnologie ungeeignet für die Geflügelhaltung:

- optimale Betriebsbedingungen für Biofilter
 - konstante Abluftströme
 - konstante Abluftinhaltsstoffe mit konstanten Rohgaskonzentrationen
- z. T. schlechte Wasserlöslichkeit der Abluftinhaltsstoffe

Aufgrund folgender Vorteile sollte der Einsatz nicht generell ausgeschlossen werden:

- kostengünstige, robuste Bauweise
- optimale Temperaturbedingungen

Folgende Randbedingungen werden für den Betrieb genannt: pH-Regelung auf 6, Wassergehalt im Filter zw. 60 bis 70 %, leitfähigkeitsgesteuerte Abschlammung bis max. 25 mS/cm und regelmäßiger Wechsel der Hackschnitzelaufgabe (unterliegt Versauerung, ca. aller sechs Monate) (HAHNE 2016). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Ammoniak im Biofilter zur Bildung von klimaschädlichen Distickstoffmonoxiden (N_2O) beiträgt bzw. den Kohlenstoffabbau hemmt (UBA Wien 1999). Üblicherweise werden Biofilter mit Flächenbelastungen von 50 bis 150 $m^3/(m^2 \cdot h)$ gefahren (UBA 2006).

7.3.2.5 Optimierung von Biofiltern

Optimierungspotenziale für Biofilter sind für den Einzelfall zu untersuchen. Prinzipiell ist die erzielbare Reinigungsleistung des Biofilters abhängig von seiner Konstruktion, dem genutzten Filtermaterial (höher bei Rindenmulch im Vergleich zu Nadelholz-Hackschnitzel) und der Mikroorganismendichte (steigend mit höherer innerer Materialoberfläche [Körnigkeit] und bei organischem Material).

Für die maximale Leistungsfähigkeit des Mikroorganismus gelten folgende Faktoren (VDI 3477):

- ausgeglichenes Nährstoffangebot (Kohlenstoff, Schwefel, Stickstoff, Phosphat und Spurenelemente), C : N : P-Stoffverhältnis 100 : 5 : 1
- Temperatur 5 bis 40 °C optimal, bei erhöhter Temperatur zunächst höhere Leistung, > 40 °C denaturieren Enzyme → verminderte Leistung der enzymkatalysierten Reaktion
- pH-Wert neutral bis schwach sauer
- Leitfähigkeit (Salzgehalt) 50 bis 300 µS/cm
- Feuchtigkeit des Filters > 95 %
- ausreichende Sauerstoffzufuhr

Diese Milieubedingungen sind konstant zu halten und wenn nötig, durch bspw. Temperierung und Befeuchtung zu ermöglichen. Weil Stäube und Fette in der Abluft zu Verklebungen und Verstopfungen des Filters führen und auch Schadstoffe zu einer Inhibierung der Arbeit der Mikroorganismen führen können, sind vorgeschaltete Reinigungsstufen (z. B. Wäscher) einzusetzen.

Folgende weitere Möglichkeiten sollten für den Einsatz in der Geflügelhaltung geprüft werden:

- Einsatz von Pilzen (Fungi-Filter) insbesondere für saures Milieu (FRANKE 2011)
- Vor-/Nachbehandlung mit dem NTP-Verfahren durch UV-Bestrahlung (KRANERT 2005)

7.3.3 Oxidation im „kalten“ Plasma

7.3.3.1 Erläuterung Verfahrensprinzip

Ein alternatives Verfahren zur Abluftreinigung ist die Oxidation von organischen Luftschadstoffen im nichtthermischen Plasma (NTP) bei Umgebungstemperatur. Durch ein starkes elektrisches Feld werden dabei Ionen und Radikale erzeugt, die eine Totaloxidation der organischen Stoffe bewirken können. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass für das Starten der gewünschten Oxidationsreaktionen nur wenig Energie benötigt wird. Elektrische Energie wird selektiv auf freie Elektronen in der Abluft übertragen, während die Gasmoleküle nahezu „kalt“ bleiben. Der Gasstrom muss nicht auf Anspringtemperatur geheizt werden, wie dies bei herkömmlichen Oxidationsverfahren der Fall ist.

Bei genauerer Betrachtung stellt ein physikalisches Plasma ein mehr oder weniger ionisiertes Gas dar. Das heißt, es besteht neben den elektrisch neutralen Gasteilchen auch aus einer großen Anzahl von geladenen Partikeln wie Elektronen sowie positiv und negativ geladenen Ionen.

Wodurch ist nun ein „kaltes Plasma“ charakterisiert? Kalt bedeutet an dieser Stelle, dass die Ausbildung des Plasmas bei Umgebungstemperatur erfolgt. Als Energiequelle dient ein sehr starkes elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden, durch das das Gas hindurchgeleitet wird. Dabei wird nur auf die (wenigen) elektrisch geladenen Teilchen im Gas (Elektronen, Ionen) auf direktem Wege Energie übertragen. Sie werden beschleunigt und kollidieren mit neutralen Gasmolekülen, wobei durch den Zusammenprall neue Ladungsträger gebildet werden können. Als Folge dieser Prozesse entsteht ein „kaltes“ Plasma. Die Temperatur der Elektronen variiert in der Regel zwischen mehreren 1.000 und 10.000 Kelvin, während die mittlere Temperatur des Gases bei etwa 300 Kelvin Umgebungstemperatur bleibt. Man spricht deshalb auch von einem nichtthermischen Plasma (NTP).

Die notwendige Energie kann über innere Energie (Erwärmung), elektromagnetische Strahlung (Gamma-, UV-, Mikrowellenstrahlung) oder elektrische Leistung (Gasentladung) zugeführt werden. Bei der Abgasbehandlung werden die Kaltplasmen überwiegend durch die Barrierenentladung (DBD) erzeugt, d. h. durch Entladung an dielektrisch getrennten planaren oder zylindrischen Platten. Die Koronaentladung (Gitter) wird bei elektrostatischen Abscheidern (Elektrofiltern) eingesetzt. Die Plasmaerzeugung kann direkt oder indirekt (Injektionsverfahren = Behandlung Luft mit Plasma und dann Zumischung zum Abgas) erfolgen. Die ablaufenden Prozesse bei der Abluftbehandlung sind sehr komplex und werden in der VDI 2441 beschrieben.

Die mögliche Anordnung eines NTP-Reaktors ist Abbildung 21 zu entnehmen.

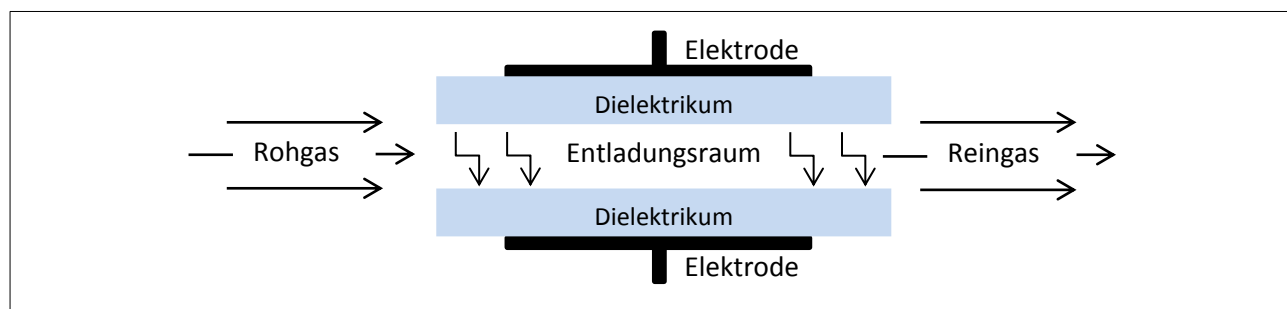


Abbildung 21: Schematischer Aufbau eines NTP-Plattenreaktors (Kosch 2005; Präsentation BTU 2005)

7.3.3.2 Bewertung der Einsatzmöglichkeit des Verfahrens

Grundlegende Untersuchungen zum Einsatz der NTP-Technik werden in der VDI-Richtlinie VDI 2441, erschienen im Mai 2016, zusammengefasst. Diese verweist inhaltlich auf Auslegungs- und Konstruktionshinweise und führt Praxisbeispiele auf. Bei der Sichtung der Dokumentationsunterlagen ergibt sich der Eindruck, dass die Technologie mit der Verwendung von UV-Strahlungsquellen im Mittelpunkt der Ausarbeitung steht.

Erkenntnisse und Erfahrungen mit Gasphasenplasmen z. B. mit ferroelektrischen Schüttungen bzw. von Katalysatoren wurden nicht tiefer untersucht bzw. beruhen überwiegend auf Literaturrecherchen. Gerade in diesem Technologiebereich gibt es eine Vielzahl von Erkenntnissen zur Reduzierung von Gerüchen und Bioaerosolen mit einem vergleichsmäßig praktikablen Technikaufwand. Erfahrungen bei der Anwendung des NTP zeigen, dass durch reine Gasphasenprozesse eine Abluftreinigung im technischen Maßstab wenig aussichtsreich erscheint. Deshalb wurde das reine Gasphasenplasma durch den Einsatz von ferroelektrischen Schüttungen bzw. von Katalysatoren weiterentwickelt.

Es liegen eigene praktische Erfahrungen bei der Kombination des NTP mit Katalysatoren vor. Diese zeigen, dass eine Aufheizung des Katalysators (in diesem Fall eines Niedertemperatur-Katalysators) auf ca. 200 °C notwendig ist, um nennenswerte Abbauraten der Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen zu erzielen. Mit dem Einsatz von Wärmeenergie sind die angedachten ursprünglichen Vorteile hinsichtlich des Energieeinsatzes gegenüber thermokatalytischen Verfahren jedoch nicht mehr gegeben und es stellt letztendlich ein thermokatalytisches Kombinationsverfahren dar. Praktische Erfahrungswerte und eine Analyse des technologischen Gesamtkonzeptes zeigen auf, dass eine Kombination des NTP-Verfahrens mit geeigneten Tieftemperatur-Katalysatoren (Anspringtemperatur $T = \text{ca.} \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}$) ein erfolgversprechendes Konzept für die Abluftreinigung darstellen könnte. Weil jedoch hier die NTP-Anlagenbauer auf geeignete Tieftemperatur-Katalysatoren angewiesen sind, ist vor allem ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Katalysatortechnik vorhanden.

Zweifel an der technologischen Umsetzbarkeit der VDI-Richtlinie 2441 „Prozessgas- und Abreinigungsverfahren durch Kaltplasmaverfahren“ für die Reinigung organisch belasteter Abluftströme sind durchaus berechtigt. Allein die Abluftführung durch das elektrische Feld kann, wie Erfahrungen mit ähnlichen Verfahren wie Elektroabscheider belegen, zu Spannungsüberschlägen, bedingt durch eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit, Wasserdampf- oder Aerosolkonzentration, führen. Zusätzlich wird die Ausbildung des elektrischen Feldes durch die Verschmutzung der Elektroden deutlich beeinflusst. Eine Alternativlösung zur Vermeidung dieser Probleme könnte die Mischung des belasteten Abluftstromes mit einem unbelasteten NTP-Bypass-Strom darstellen (Injektionsverfahren). Dabei wird zur Vermeidung von Spannungsüberschlägen ein Teil-Luftstrom mit einer kontinuierlich niedrigen relativen Feuchte über die NTP-Anlage gefahren und anschließend mit dem Hauptvolumenstrom des belasteten Abgases gemischt. Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass dennoch ein relevanter Abbau von Gerüchen stattfinden kann.

Beschränkend sind der hohe Energieaufwand, hohe Investitionskosten und das Entstehen von chemischen Nebenprodukten in der Plasmaphase.

7.3.3.3 Stand der Forschung

Die grundsätzliche Eignung von Kaltplasmaverfahren zur Sterilisation/mikrobioziden Wirkung zur Keimreduktion wurde bereits 2001 erfolgreich nachgewiesen (PIASTiC 2016). Weitere erfolgreiche Anwendungen im großtechnischen Maßstab des Kaltplasmaverfahrens sind für die Reduktion von VOC-Emissionen und Gerüchen bekannt (s. im Einzelnen Tabelle 3 der VDI 2441). Dabei handelt es sich um Anlagen, die die Barriereentladung im Injektionsverfahren und die Fotooxidation im Direktverfahren als Prinzip nutzen. Der Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben PIASTiC „Abluftbehandlung durch eine Verfahrenskombination aus nichtthermischen Plasma, Mineraladsorber und Wäscherstufe zur partiellen Oxidation von Abluftschadstoffen und einem nachgeschalteten Biowäscher zur Eliminierung der partiell oxidierten Komponenten“ fasst den gegenwärtigen Forschungsstand und die Schlussfolgerungen der Vielzahl der vorliegenden Veröffentlichungen des möglichen Einsatzes der NTP-Technik zur Abluftbehandlung übersichtlich zusammen. Die Ergebnisse der genannten Studie weisen nach, dass die Verfahrenskombination aus NTP, Mineralbettadsorber, kleiner Aktivkohlefilter zur Ozoneliminierung und einem Biowäscher zur Reinigung von VOC-Emissionen grundsätzlich geeignet ist, jedoch weiterhin Optimierungsbedarf besteht. (PIASTiC 2016)

Die Sichtung der Veröffentlichungen zeigt, dass eine größere Anzahl an Forschungsgruppen überwiegend im asiatischen Raum sich mit den Möglichkeiten der Kaltplasmatechnologie für die Behandlung von Abluft auseinandersetzt. Zum Schwerpunkt Abluftbehandlung liegen im Wesentlichen Untersuchungen zum Einsatz von Katalysatoren und alternierende Adsorptions-/Desorptionsverfahren mit Kaltplasmaregeneration vor. Es werden unterschiedliche Versuchsanordnungen, Katalysatoren (Schüttgut, Edelmetall, fotokatalytische etc.), Entladungstechniken (DBD, Corona, gepulste Corona etc.) und Abluftströme betrachtet. Dabei werden mit aromatischen Kohlenwasserstoffen, flüchtigen org. Stoffen, Schwefelverbindungen, org. Stickstoffverbindungen und Ammoniak beladene Abluftströme und Dieselabgase untersucht. Schwerpunkte der Forschung in Deutschland liegen beim Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e. V. (Einfluss NTP auf die Oberfläche von Aktivkohle als katalytisch aktivem Adsorber, Effizienz einer Behandlung von Naphthalin durch NTP + Glasbällen-Aktivkohle-Mix als Katalysator bzw. DBD-Schicht, Behandlung von VOC-haltiger Abluft, Behandlung Dieselabgase) und der Universität Stuttgart (Kombination NTP und Biowäscher zur Reinigung von Geruchsemissionen, Eignung NTP-Technik zur Behandlung Abluft aus Klärschlamm-trocknung, Projektpartner PIASTiC 2016).

Zur Prüfung der Einsatzfähigkeit der NTP-Technik in der Tierhaltung sind aufbauend auf einer Auswertung der Vielzahl der Forschungsergebnisse und Prüfung der Übertragbarkeit konkrete praktische Versuche erforderlich.

Letztendlich sind weiterhin, auf der Grundlage praktischer Erfahrungswerte, berechtigte Zweifel an einer breiten Anwendungsmöglichkeit der NTP-Technik in Kombination mit ferroelektrischen Schüttungen bzw. Katalysatoren gegeben (HOLZER et al. 2000). Die Kombination der Emissionsminderung von Geruchsstoffen, anorganischen und organischen Schadstoffen sowie die Abtötung von Keimen wurden bisher nicht weiter betrachtet.

7.3.3.4 Einsatzmöglichkeiten in der Geflügelhaltung

Im Rahmen einer Dissertation (NIESWANDT 2006) wurde die Wirksamkeit plasmaphysikalischer Verfahren für die Reinigung der Abluft aus der Nutztierhaltung erstmalig untersucht. Hierzu wurden umfassende Messungen und Analysen zur Bestimmung der Wirkung auf die Keimreduzierung durch verschiedene Systeme plasmaphysikalischer Verfahren mit Reaktoren unterschiedlicher Leistungen im Labor- und Technikummaßstab durchgeführt. Die grundsätzliche Eignung des Systems zur Keimabtötung wurde vorab in Modellsystemen nachgewiesen.

Weitere Untersuchungen des Einsatzes der NTP-Technik für die Abluft der Geflügelhaltung sind nicht bekannt. Im Ergebnis der Auswertung vorliegender Forschungsergebnisse (NIESWANDT 2006; PIASTiC 2016) ist der Einsatz der NTP-Technik zur Reinigung von Gerüchen in der Abluft von Stallanlagen grundsätzlich geeignet. Bisher vorliegende Modelle und Untersuchungen an Prototypen und Versuchsanlagen zeigen die grundsätzliche Möglichkeit für einen Einsatz zur Keimabtötung auf, jedoch liegen keine Erfahrungen in der Praxis und für Anlagen der Tierhaltung vor.

Ebenso können die Ergebnisse auf die großen Volumenströme aus Stallanlagen nicht ohne weitere Prüfung übertragen werden. Für die Geruchsminderung der Emissionen aus der Lebensmittelindustrie werden Energieverbräuche von 0,1 bis 0,86 kWh/1.000 m³ bei Einsatz der NTP-Technik angegeben (PIASTiC 2016), was aufgrund der großen Volumenströme in der Geflügelhaltung zu nicht unerheblichen Kosten führt.

8 Optimierte Abluftreinigung für die Geflügelhaltung

8.1 Optimale Gestaltung von Abluftreinigungsanlagen für Geflügelhaltungsanlagen

8.1.1 Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen

Ein Trockenfiltersystem stellt im Vergleich zum Nasswäschersystem generell für die meisten entstaubungstechnischen Prozesse die ökonomische und technologisch optimale Lösung dar. Entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand sind keine klebrigen oder extrem leichtbrennbaren Stäube vorhanden, die eine betriebssichere Fahrweise eines Trockenfiltersystems mit Druckimpulsabreinigung entscheidend negativ beeinflussen würden.

Filternde Abscheider in Form von Taschen- oder Schlauchfilteranlagen können staubförmige Partikel im Bereich ≥ 1 bis $0,5 \mu\text{m}$ sicher abscheiden. Für die Abscheidung von noch kleineren Partikeln wie Viren oder Bakterien im Bereich $< 1 \mu\text{m}$ stellen Schwebstofffilter-Einheiten, die den Filterklassen E12/H13/H14 entsprechen, den Stand der Technik dar. Die Technologie der Schwebstofffilter wird in Reinräumen der Halbleiterindustrie oder in Krankenhäusern z. B. für die Zuluftfiltration von Operationssälen eingesetzt. Für den Einsatz von filternden Abscheidern müssen zusätzlich bestehende Lüftungskonzepte und Ventilatorleistungen angepasst werden.

Nach dem Stand der Erkenntnis ist derzeit davon auszugehen, dass kein Kondensat den Filterkuchen an den Filterelementen negativ beeinflussen könnte. Es sind jedoch Differenzdrücke im Bereich von 500 bis 2.000 Pa zu berücksichtigen. Die Kosten für filternde Abscheider ohne Peripherieanlagen liegen mit den hier relevanten Volumenströmen im Bereich von 100.000 bis 300.000 m^3/h bei 2,0 bis 4,0 €/m³. Hinzu kommen Kosten für eine zusätzliche Filtrationsstufe mit Schwebstofffiltern. Eine 100%ige oder teilweise Umluftfahrweise (Rückführung des Reingases nach der Abluftfiltration) ist hier nicht möglich, weil sich gasförmige Schadstoffe noch in der Umluft (Reingas) befinden. Zum einen wird durch ein dem filternden Abscheider nachgeschalteter Absorptionswäscher feuchte und mit sauren Aerosolen bzw. Feinröpfchen verunreinigte Luft zurückgeführt, zum anderen werden Partikel wie Viren und Bakterien zumindest nicht 100%ig abgeschieden.

8.1.2 Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von Ammoniak

Für die Abscheidung von Ammoniak mit den vorhandenen Rohgaskonzentrationen sind die zertifizierten Horizontalwäscher geeignet und entsprechen mit der automatisierten und pH-Wert-geregelten Dosier- und Abschlammtechnik dem Stand der Technik.

8.1.3 Abluftreinigungsanlagen für die Abscheidung von Gerüchen

Auf dem Markt werden derzeit sehr unterschiedliche Systeme für die Reduzierung von Gerüchen eingesetzt. Die klassische anlagentechnische Lösung stellt der Biofilter dar mit den schon beschriebenen Nachteilen hinsichtlich konstanter Betriebsparameter und Betriebsbedingungen für die Rohgasbeladung, den Volumenstrom, den Feuchtigkeitsgehalt der Abluft und optimale Temperaturbedingungen.

Die Adsorption über Aktivkohle wäre theoretisch für die Abscheidung von Gerüchen eine Option. Praktisch gesehen ist jedoch eine Adsorptionsanlage mit einem Volumenstrom von über $V = 30.000\text{--}50.000 \text{ m}^3/\text{h}$ zu groß, um betriebssicher gefahren werden zu können. Es müssen Anströmgeschwindigkeiten von $w = 0,2\text{--}0,4 \text{ m/s}$ berücksichtigt werden. Neben den sehr hohen Investitionskosten kommen noch zusätzlich sehr hohe Betriebskosten durch den Austausch der beladenen Aktivkohle hinzu.

Alternative Technologien wie schwach oder hoch oxidative Verfahren (NTP-Technik, Ozonanlagen oder UV-Röhren) können nachweislich ebenfalls Gerüche in der Abluft reduzieren. Hinzu kommt die nachweisliche Keimabtötung der plasmaphysikalischen Verfahren. Oftmals basieren der Einsatz und die Anlagenauslegungen auf der Grundlage von Erfahrungswerten und von Versuchseinsätzen. Praktische Erfahrungen zeigen, dass diese Systeme wirkungsvoll bei einfachen Koh-

len-Wasserstoff-Verbindungen und sehr niedrigen Konzentrationen arbeiten. Die Vielzahl an Forschungsergebnissen zeigt die Möglichkeit eines Einsatzes auf, allerdings liegen bisher keine Ergebnisse in der praktischen Anwendung, die sich auf die Geflügelhaltung übertragen lassen, vor. Verbesserte Ergebnisse können durch die Kombination mit anderen Reinigungssystemen erreicht werden (adsorptive, katalytische, absorptive, biologische).

8.1.4 Kombination von Verfahren der Abluftreinigung

Aufgrund der Rohgaszusammensetzung der Abluft aus der Geflügelhaltung ist es im Anwendungsfall erforderlich, die Anlage mehrstufig auszulegen. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass sich mehrstufige Anlagen (s. auch Aussagen im Kap. 4.4) mit folgenden Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen zur Abluftreinigung bei der Geflügelhaltung anbieten:

- Stufe 1: Trockenfiltersystem für Staub (Vorfilter für Grobstaub oder Feinfilter in Abhängigkeit vom Reinigungsziel)
- Stufe 2: Saure Wäscher mit Tropfenabscheider oder Biowäscher (Rieselbettfilter) mit Tropfenabscheider
- Stufe 3: Biofilter oder Plasma- und Oxidationsverfahren zur Abreinigung von Gerüchen bei Berücksichtigung einer weiteren Optimierung und Erforschung der Anwendbarkeit

Für alle benannten Verfahrenskombinationen liegen keine ausreichenden Erfahrungen in der Praxis vor. Der Einsatz von Staubfiltern ist in der Industrie eine standardisierte Abscheidetechnik. Saure Wäscher mit Tropfenabscheider werden als einstufige Anlage bereits in der Geflügelhaltung eingesetzt. Für den Einsatz von Biofiltern und Biowäschern ist der stark schwankende Volumenstrom in der Geflügelhaltung ein Problem. Eine Zuluftkonditionierung des Volumenstroms oder Aufkonzentration im Volumenstrom (s. Kap. 8.3) könnte Abhilfe schaffen. Hierzu legen jedoch ebenfalls keine praktischen Erfahrungen vor. Vielversprechend sind die Ansätze zum Einsatz der NTP-Technik, die jedoch für den hier zu betrachtenden Anwendungsfall vor einem Einsatz weiter untersucht werden müssen.

Grundsätzlich ist auch der Einsatz einstufiger Systeme denkbar, wenn keine zielgerichtete Abscheidung einzelner Komponenten erforderlich ist, sondern eine grundsätzliche Minderung von Abluftinhaltsstoffen erreicht werden soll. Für die gemäß Aufgabenstellung zu bewertende Abscheidung von Bioaerosolen und Gerüchen nach dem Stand der Technik wird im Kap. 8.2 eine mehrstufige Anlage ausgelegt.

8.2 Auslegung eines 3-stufigen Abluftreinigungskonzeptes

Jahrelange praktische Erfahrungswerte bei der Auslegung und technologischen Gestaltung von Entstaubungsanlagen unter Berücksichtigung komplexer Betriebsbedingungen wie in diesem Einsatzfall bilden die Grundlage, um praxisrelevante und betriebssichere Konzepte zu entwickeln. Insbesondere bei Abluftreinigungsprojekten, wo noch keine oder nur sehr wenige praktische Erfahrungswerte vorhanden sind, ist die Abschätzung der Verhältnismäßigkeit der verwendeten Technik in Bezug auf die Absicherung kritischer Betriebszustände sowie die Einhaltung der Vorgaben und Regeln des betrieblichen Arbeits-, Brand- und Explosionsschutzes entscheidend. Die damit verbundene Finanzierung und Finanzierbarkeit solcher Anlagenkonzepte stellt mitunter ein Problem dar. Zur Prüfung dieser Problematik wird nachfolgend ein grundlegendes verfahrenstechnisches Konzept für die Abluftreinigung in der Geflügelhaltung ausgelegt. Anschließend werden die für dieses Konzept anfallenden Investitions- und Betriebskosten abgeschätzt.

Die Auslegung erfolgt für eine max. Sommerlufrate von $300.000 \text{ m}^3/\text{h}$, was einer Stallgröße von ca. 44.000 Legehennen bzw. 38.000 Mastgeflügel entspricht.

8.2.1 Stufe 1: Auslegung für die Abscheidung von partikelförmigen Abluftinhaltsstoffen

Bauformen von Trockenfiltersystemen

Im Vergleich zu den Trockenfilterbauformen wie Spülluftfilter, Taschenfilter, Patronenfilter oder Plattenfilter ist die Bauform der Schlauchfilter prädestiniert für diesen Einsatzfall. Insbesondere für Anwendungsfälle mit keinen bzw. wenigen anlagentechnischen Erfahrungswerten sollte aufgrund seiner Robustheit und seiner Betriebssicherheit auf den klassischen Schlauchfilter zurückgegriffen werden.

Vorbeugender Explosionsschutz oder konstruktiver Explosionsschutz

Die Klärung dieses Sachverhaltes ist in Bezug auf die Investitionskosten sehr wichtig und hängt entscheidend von der Analyse der Brenn- und Explosionskenngrößen der vorhandenen Stäube ab.

Explosionsfähigkeit/Staubexplosionsklasse

Generell sind Stäube wie Futtermittel, Einstreu in Form von Stroh und Holzspänen explosionsfähig und werden der Staubexplosionsfähigkeit St 1 zugeordnet. Insbesondere bei dem Einsatz von Trockenfilteranlagen kann während des Abreinigungsvorganges eine explosionsfähige Atmosphäre im Filtergehäuse entstehen. Ist dann noch eine Zündquelle durch z. B. Magnetventile vorhanden, kann dies zu einer Explosion führen. Ausführungen zur Explosionsfähigkeit und der erforderlichen Schutzmaßnahmen sind im Anhang erläutert.

Filterkonstruktion

Für Filterkonstruktionen mit konstruktivem Explosionsschutz nach der BGR 104 und VDI 2263 muss das Filtergehäuse dem Explosionsdruck standhalten. Damit sind deutlich höhere Investitionskosten im Vergleich zum vorbeugenden Explosionsschutz verbunden.

■ Die Auswahl des Schlauchfiltermaterials, Konfektionierungsform und Filterflächenbelastung

Das Filtermaterial muss für die vorhandenen Betriebsbedingungen geeignet sein. Ein Polyesternadelfilz mit einem Flächengewicht von 550 g/m², einer wasserabweisenden, vollbadigen Fluor-Carbon-Harz-Beschichtung und eingearbeitetem Edelstahlgarn für die Ableitung von statischen Aufladungen gewährleistet eine entsprechend den technologischen Anforderungen des vorbeugenden Explosionsschutzes betriebssichere Fahrweise der Schlauchfilteranlage.

Mit einem Schlauchdurchmesser von 160 mm und einer Schlauchlänge von 4 bis max. 6 m wird eine effektive Abreinigung des Filterkuchens mittels eines Druckimpulses sichergestellt. Die Filterflächenbelastung sollte einen Wert von 60 bis 80 m³/(m²h) nicht überschreiten. In Abhängigkeit der Betriebserfahrungen kann dieser Wert nach oben korrigiert werden.

Sollten dennoch Probleme mit der Abreinigung des Filterkuchens auftreten, kann der Einsatz eines zusätzlichen Precoatings der Filterschläuche mit einem Filterhilfsmittel das Abreinigungsverhalten entscheidend verbessern.

■ Das Schlauchfilterkonzept unter Berücksichtigung der stark wechselnden Volumenströme im Sommer- und Winterbetrieb

Die Gestaltung des Entstaubungskonzeptes unter Berücksichtigung der extremen Volumenstromschwankungen in Abhängigkeit der Betriebsfaktoren stellt mit Abstand die größte technische Herausforderung in Bezug auf die Investitions-, Betriebs- sowie der Wartungs- und Instandhaltungskosten dar.

In Abhängigkeit der geforderten Mindestströmungsgeschwindigkeit in der Tierhaltungsanlage von $w = 0,2\text{--}0,6$ m/s und den damit verbundenen bautechnischen Grundabmessungen ist eine Begrenzung des unteren Volumenstromes im Bereich $V = \text{ca. } 50.000$ Bm³/h (Betriebskubikmeter je Stunde) sinnvoll. Bei einem durchschnittlich angenommenen max. Volumenstrom von ca. $V = 300.000$ Bm³/h ist die Aufteilung der Schlauchfilteranlage in 12 Module mit einem Volumenstrom von jeweils $V = 25.000$ Bm³/h zu empfehlen. Das hätte vor allem den Vorteil, dass eine „off-line-Abreinigung“ der Filtermodule jederzeit möglich ist. Bei der „off-line-Abreinigung“ wird das Filtermodul nicht mit Abluft beaufschlagt. Dadurch wird die Sedimentation auch von sehr feinen Partikeln abgesichert, die eine sehr geringe Sedimentationsgeschwindigkeit aufweisen. Weil zum jetzigen Zeitpunkt keine Erfahrungswerte hinsichtlich der Konsistenz des sich an der Schlauchfilteroberfläche bildenden Filterkuchens vorhanden sind, sollte dieser Fakt nicht unberücksichtigt bleiben.

Zusätzlich sollten die 12 Filtermodule in vier separate Entstaubungseinheiten mit jeweils drei Filtermodulen aufgeteilt werden. Jede der vier Entstaubungseinheiten verfügt über einen separaten Ventilator mit $V = 75.000$ Bm³/h und ca. 2.500 bis 4.000 Pa Gesamtspannung. Eine Entstaubungseinheit sollte mit einem Ventilator mit Frequenzumrichter ausgerüstet sein, um einen Volumenstrom unter $V = 75.000$ Bm³/h in Abhängigkeit des Ventilatorenkennlinienverlaufes einzustellen.

Eine Anlagengestaltung mit einem oder zwei Ventilatoren mit Frequenzumrichter ist aufgrund des Kennlinienverlaufes in Abhängigkeit des Volumenstromes und der Gesamtspannung energetisch und auslegungstechnisch nicht realistisch. Nachteilig wirkt sich jedoch ein erhöhter Investitionsbedarf allein für die Ventilatoren von ca. 40–50 % aus. Der Leistungsbedarf der Ventilatoren wird mit ca. $P = 260$ kW/h bei voller Laufleistung abgeschätzt.

■ Die Gestaltung des Rohrleitungskonzeptes für die Erfassung und den Transport der Emissionen

Die konzeptionelle Gestaltung des Rohrleitungskonzeptes für die Abluftfassung bedarf unter Beachtung der Erfassungs- und Transportgeschwindigkeiten und des Explosions- und Brandschutzes einer gesonderten Untersuchung und wird hier nicht weiter betrachtet.

■ Geschätzte Investitionskosten

Investitionskosten werden für das Entstaubungskonzept mit einem Volumenstrom von ca. $V = 300.000 \text{ Bm}^3/\text{h}$ auf ca. 1.800.000 € bis 2.400.000 € in Abhängigkeit des final definierten Lieferumfanges, der vorhandenen Anlagenbedingungen und konkreten Bausituation geschätzt.

8.2.2 Stufe 2: Auslegung für die Abscheidung von gasförmigen Verunreinigungen

Für die Abscheidung der gasförmigen Ammoniakverunreinigungen in der Abluft stellen die von DLG zertifizierten Horizontalwäscher mit automatischer pH-Mess- und Regeltechnik, automatischer Abschlammung und automatischer Füllstandskontrolle ein in der Praxis bewährtes Anlagenkonzept dar (vgl. Kap. 6.4).

8.2.3 Stufe 3: Auslegung für die Abscheidung von Gerüchen

Hinsichtlich des Einsatzes praktikabler, betriebssicherer Verfahren für die Abscheidung von Gerüchen zeigen sich technologische Grenzen auf. Entsprechend den bisherigen Ausführungen ist der Einsatz eines Biofilters oder eines Biowäschers unter den gegebenen Betriebsbedingungen nicht optimal bzw. nicht sinnvoll. Insbesondere die sehr starken Volumenschwankungen sowohl in Abhängigkeit des Jahres als auch der Tageszeiten wirken sich negativ auf die Mikroorganismen des Biofilters und damit auf die Funktionalität der Biofilter/Biowäscher aus. Nahezu alle Geruchsstoffe sind schlechter wasserlöslich als Ammoniak und darüber hinaus noch in nur geringer Konzentration in der Abluft enthalten. Aufgrund der schlechteren Wasserlöslichkeit stellt die Abscheidung von Geruchsstoffen ein größeres Problem dar als die Abscheidung von Ammoniak.

Alternativ gibt es derzeit umfangreiche Versuche an wissenschaftlichen Einrichtungen über den Einsatz von nicht-thermischen Plasmen. Dabei wird unbelastete Falschluff angesaugt und über eine nichtthermische Plasmastufe gefahren. Anschließend wird dieser mit Ionen und Radikalen angereicherte Luftstrom mit der Abluft vermischt. Experimentell wurde dabei eine Reduzierung von Gerüchen nachgewiesen. Diese Bypassfahrweise der NTP-Anlage könnte das Problem der Spannungsüberschläge bedingt durch eine relativ hohe Luftfeuchtigkeit im Rohgas reduzieren. Für die finale Beurteilung der Eignung dieser Technologie fehlen derzeit noch umfangreiche praktische Erfahrungswerte durch Langzeitversuche.

8.2.4 Betriebskosten

Betriebskosten fallen durch den Energieverbrauch der Ventilatoren, den Druckluftverbrauch für die Reinigung der Filtermedien (z. B. Puls-Jet-Abreinigung), den Austausch der Filtermedien sowie den Schwefelsäureverbrauch, die Wartung und die Reparatur an. Für das vorgestellte Anlagenkonzept ist von Betriebskosten von ca. 80.000 €/a auszugehen. Die Ansätze werden nachfolgend erläutert.

Energiebedarf Ventilatoren

Der max. Leistungsbedarf eines Ventilators mit einer Gesamtleistung von $V = 300.000 \text{ Bm}^3/\text{h}$ und einer Gesamtpressung von ca. $\Delta p = 4.000 \text{ Pa}$ beträgt ca. $P = 260 \text{ kW}$. Bei einer durchschnittlichen Auslastung von ca. 60 % und 340 Betriebstagen im Jahr betragen die Energiekosten ca. 64.000 €/a bei einem Strompreis von 5,0 Cent/kWh.

Druckluftverbrauch

Die Ermittlung des Druckluftverbrauches in Abhängigkeit des Differenzdruckes über dem Filterkuchen, der Rohgasbelastung und der spezifischen Staubeigenschaften wie Dichte und Sedimentationsverhalten ist eigentlich nur empirisch zu analysieren. Um dennoch eine belastbare Berechnungsgrundlage zu bestimmen, kann folgende Formel verwendet werden:

$$Q = \frac{130 \text{ Liter} \times AV}{PZ \times 60}$$

Q	Druckluftverbrauch in l/h
AV	Anzahl der Ventile
PZ	Pausenzeit in min

Bei einer Entstaubungsanlage mit $V = 75.000 \text{ m}^3/\text{h}$ betragen die Kosten für Druckluft mit aktuellen Energiepreisen (2016) ca. 3.500 €/a. Bei vier Entstaubungseinheiten mit einer max. Volumenstromleistung von $V = 300.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer durchschnittlichen Auslastung von 60 % im Jahr betragen die Druckluftkosten ca. 8.400 €/a bei einem Strompreis von 5,0 Cent/kWh.

Austausch der Filtermedien bei filternden Abscheidern

Ein weiterer mittelfristiger Kostenfaktor stellt der Austausch der Filtermedien dar, der in einem Zeitraum von drei bis fünf Jahren, je nach Betriebsbedingungen, erfolgen könnte. Am Beispiel des dargestellten Filterkonzeptes mit vier Filteranlagen mit je 1.100 m^2 betragen die Materialkosten der Schlauchfilter, in Abhängigkeit der verwendeten Qualität, zwischen 25.000 € bis 47.000 € zzgl. Personalkosten für die Montage.

Weitere Betriebskosten

Weiterhin sind folgende Kosten zu berücksichtigen:

- Schwefelsäureverbrauch und Altsäureanfall für Horizontalwäscher zur Abscheidung von Ammoniak
- Personalkosten durch Wartungs- und Reparaturarbeiten im laufenden Betrieb

8.3 Lösungsansätze zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit einer Abluftreinigungsanlage ist abhängig vom Reduzierungsziel (Anforderungen an die Rückhalteeffizienzen) und den Einsatzbedingungen der gewählten Technologie. Insofern ist die Auswahl des Verfahrens und der Verfahrensstufen und deren passgenaue Auslegung entscheidend. Dabei werden grundsätzlich folgende Ansprüche an Reinigungsanlagen gestellt:

- optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis
- zuverlässiges Erreichen der Reinigungsleistung (u. a. durch Einbeziehung von Messdaten in die Anlagensteuerung)
- effizientes Verfahren

In der Praxis ist insbesondere die Realisierung von Abluftreinigungsanlagen durch Lüftungsfirmen mitunter geprägt von zum Teil sehr großen Mängeln bei der Dimensionierung der Anlagen und bei der konstruktiven Gestaltung der Emissionserfassungselemente bzw. bei der Ausführung des Rohrleitungsprojektes. Hier sind entsprechende Vorgaben auch für den zukünftigen Betrieb notwendig.

Eine Optimierung anhand der o. g. Faktoren kann für die Geflügelhaltung erreicht werden durch:

- Vermeidung/Reduzierung des Emissionsaufkommens
- Verringerung des Abluftstroms
 - durch Konditionierung des Zuluftstroms (Kühlung)
 - Ausnutzung von Aufkonzentrationspotenzialen (Nebeneffekt: nachgeschaltete Techniken funktionieren bei der Behandlung eines mit Schadstoffen hoch konzentrierten Abluftstroms besser)
 - Reinigung von Teilströmen (Sommer mit hohem Volumenstrom, geringer Konzentration/Ruhephase mit geringer Konzentration)
 - Aufteilung der Abluft in Reinigungsbereiche
 - Festlegung von Einschaltzeiten der Abluftreinigung in Abhängigkeit von Emissionszeitreihen (keine Abluftreinigung in der Ruhephase, Bioaerosole 10-Potenz unterhalb der Aktivphase am Tag [CLAUß 2016])
- Senkung Kosten-Nutzen-Verhältnis
 - Nutzung von Synergieeffekten/Abwärmennutzung (KTBL [2015]; KROMMWEH & BÜSCHER)

- Einsatz effizienter Aggregate, Reduzierung Druckverlust (Luftführung)
- effizienter Betrieb (s. auch LfULG 2015b; DLG 2016)

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat erstmalig die am Markt verfügbaren Abluftreinigungsanlagen für die Geflügelhaltung unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Abluftreinigungstechnik in der Industrie bewertet und Möglichkeiten für die Reduzierung von Gerüchen und Bioaerosolen vertiefend betrachtet. Dabei wurden alle nach dem Stand der Technik für die vorhandenen Betriebs- und Anlagenparameter und deren Fahrweise in den Geflügelhaltungsanlagen einsetzbaren sowie innovative Abluftreinigungsverfahren in die Betrachtung einbezogen.

Zur Reduktion von Emissionen aus Tierhaltungsanlagen werden bereits verschiedene biologische Abluftreinigungsverfahren eingesetzt. Über das Rückhalteverhalten von Bioaerosolen ist jedoch bisher nur wenig bekannt. Die verfügbare Technik der Abluftreinigung in der Geflügelhaltung entspricht für die Reduzierung von Stäuben/partikelgebundenen Bioaerosolen und Gerüchen nicht dem Stand der Technik und erscheint noch weit entfernt davon. Während sich im industriellen Bereich hoch komplexe Reinigungssysteme entwickelt haben, werden in der Tierhaltung einfachere Systeme installiert.

Es konnte nachgewiesen werden, dass eine gezielte Abluftreinigung für Bioaerosole/Staub über einen vorgeschalteten trockenen Staubfilter zwar realisierbar wäre, aber zu erheblichen Kosten führen würde, die derzeit nicht verhältnismäßig erscheinen. Die Geruchsreduzierung auf 300 GE/m³ kann mit den verfügbaren Anlagen nicht erreicht werden. Hier besteht Forschungsbedarf

- zum Einsatz von innovativen Techniken (Einsatz NTP-Technik) und/oder
- zur Vergleichmäßigung des Abluftstroms als notwendige Voraussetzung für den Einsatz von Biofiltern und zur
- Optimierung des Einsatzes von Biofiltern (s. Kap. 7.3.2.5).

Unter diesem Gesichtspunkt und den nicht umfänglich zufriedenstellend arbeitenden Abluftreinigungsanlagen sind Weiterentwicklungen notwendig und auf ihre breite Einsatzmöglichkeit zu prüfen. Anzuführen sind hier Biofilter mit Steuer- und Regelungstechnik ebenso wie der Einsatz kombinierter, nichtthermischer Plasmaverfahren mit Biofiltern. Aufgrund des entscheidenden Einflusses der Feuchte des Biofiltermaterials auf dessen Funktionalität beim Geruchsabbau ist auch für diesen Parameter eine kontinuierliche Überwachung zu entwickeln. Zusätzlich bereitet die generelle Vergleichbarkeit von Messergebnissen für Bioaerosole verschiedener Autoren und Institutionen Probleme, weil viele unterschiedliche Sammelmethoden zur Bestimmung der Bioaerosole verwendet wurden.

Insgesamt können im Ergebnis der Untersuchungen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Reduktionsziel Bioaerosole

- Es gibt derzeit keine Vorgaben zur Begrenzung der Fracht und der Konzentration für Bioaerosole. Für Stäube werden die Grenzwerte bereits ohne Einsatz einer Abluftreinigungsanlage erreicht.
- Umweltwirkungen von Bioaerosolen werden bisher noch kontrovers diskutiert. Angaben über wichtige physikalische und biologische Parameter von Bioaerosolen aus der Geflügelhaltung sind nicht bzw. unzureichend bekannt wie Korngrößenverteilung partikelgebundener Bioaerosole, Tagesgang, Absterberate (Tenazität) und Bioaerosolspektrum.
- Das Bioaerosolspektrum wird bisher in der Praxis für die Bewertung der Wirkung von Bioaerosolen nicht berücksichtigt. Nicht eindeutig geklärt ist der Zusammenhang zwischen Bioaerosolspektrum und Partikelgröße, d. h. die toxische Wirkung in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Ebenso ist keine Dosis-Wirkungs-Beziehung bekannt

- Zusammenfassend ist festzustellen, dass für eine sachgerechte verfahrenstechnische Bewertung von Abluftreinigungsverfahren die vorliegenden Unterlagen und Erkenntnisse nicht ausreichen. Offen ist, ab welcher Minderung von einer entscheidenden Verbesserung gesprochen werden kann bzw. wann von einer erheblichen Entlastung auszugehen ist. Eine vollständige Abscheidung von mikrobiellen Komponenten wird durch den gegenwärtigen Stand der Abluftreinigungstechnik nicht erreicht. Ob mit dem Einsatz einer ARA auch eine Entlastung für die menschliche Gesundheit erzielt wird, konnte bisher nicht nachgewiesen werden.
- Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass alle Maßnahmen zur Emissionsminderung und Abluftreinigung auch zu einer Minderung der Emissionen an partikelgebundenen Bioaerosolen führen. Demnach sollte, soweit Emissionsminderungsmaßnahmen und die Einhaltung von Abständen nicht greifen, im Sinne der Vorsorge der Einsatz einer Abluftreinigungsanlage („End of Pipe“-Technologie) trotz lückenhaftem Kenntnisstand favorisiert werden.
- Eine Risikobewertung und die Festlegung möglicherweise erforderlicher Maßnahmen bezüglich der Minderung von Bioaerosolemissionen aus Tierhaltungsanlagen kann derzeit nur auf der Basis der Umstände des konkreten Einzelfalls (ggf. über Sachverständigengutachten in Anlehnung an Nr. 4.8 TA Luft) erfolgen. Eine generelle Vorgabe ist nicht ableitbar.

Lösungsansatz 1: Technologie zur Staubabscheidung verfügbar, jedoch unverhältnismäßig hohe Kosten bei Abscheiderate > 90 %

Lösungsansatz 2: Inaktivierung der Bioaerosole (Ionisierung, Plasmaanlagen) – weiterer Forschungsbedarf

Reduktionsziel Gerüche

- Für Gerüche werden zum Schutz vor Belästigungen Ziele in Form von Geruchsstundenhäufigkeiten in Abhängigkeit von der Nutzung in der Geruchsimmissionsrichtlinie definiert. Hieraus lassen sich in Abhängigkeit vom Standort zulässige Geruchsströme für den Betrieb einer Geflügelhaltungsanlage ableiten. Eine generelle Vorgabe ergibt sich aus der DLG-Forderung mit 300 GE/m³.
- Reduzierung über verfügbare Anlagen technologisch begrenzt (Wäscher/Biofilter), weiterer Untersuchungsbedarf (Probleme sind schwankende Volumenströme, geringe Konzentrationen für biologische Verfahren, geringe Verweilzeiten aufgrund Wasserlöslichkeit)

Lösungsansatz 1: Einsatz NTP-Verfahren mit Bypassfahrweise zur Reduzierung von Spannungsüberschlägen (praktische Erfahrungswerte fehlen) und die Kombination des NTP-Verfahrens mit geeigneten Tieftemperatur-Katalysatoren (Anspringtemperatur T = ca. ≤ 200 °C)
– weiterer Forschungsbedarf

Lösungsansatz 2: Einsatz Biofilter mit optimierter Beschickung (kleinere Anlage, zeitweise hohe Belastung, ggf. mit Bypass) – weiterer Forschungsbedarf

Sonstiges

- Aufgrund des großen Einflusses der Haltungsverfahren und der einzelnen Haltungsformen auf die Emissionssituation in der Geflügelhaltung ist die Festlegung von Eignungsbereichen der Abluftreinigungssysteme zwingend erforderlich.
- Prüfkriterien für die Bioaerosolabscheidung innerhalb des DLG-Prüfrahmens zur Bewertung der Wirksamkeit von Abluftreinigungsanlagen sollten praktikabel für einzelne Leitparameter in Abhängigkeit von der Tierart und in Verbindung mit dem Messsystem festgelegt werden.

9.2 Forschungsbedarf

Zur Bewertung von Bioaerosolen aus der Abluft und zur Abluftreinigung der Geflügelhaltung bestehen noch wesentliche Kenntnislücken, die in Tabelle 16 zusammengefasst werden.

Tabelle 16: Zusammenfassung möglicher Forschungsschwerpunkte für den gezielten Einsatz von Abluftreinigungsverfahren zur Minderung von Bioaerosolen und Gerüchen

Schwerpunkt	Einzelthema	Ziel und Zweck der Forschung
Abscheidung und Wirkung von Bioaerosolen	Bioaerosolspektrum	Nachweis gesundheitlicher Wirkung, weil abhängig von pathogenen Spezies/Veränderung durch Einsatz Abluftreinigung
	Partikelverteilung Bioaerosole	Schlussfolgerung für Abluftreinigungsverfahren und gesundheitliche Wirkung Berücksichtigung Sedimentations- und Ausbreitungsverhalten
	Einsatz NTP-Verfahren mit Katalysator/Schüttungen und Kombination anderer Verfahren	Eignung verschiedener Entladungstechniken für die Geflügelanlagen, Prüfung der Übertragbarkeit Ergebnisse Studie PLASTiC und vergleichbarer Forschungsprojekte auf die Abluft aus der Geflügelhaltung (PLASTiC 2016) mit Zielrichtung der Inaktivierung von Bioaerosolen unter Berücksichtigung des Bioaerosolspektrums und der Steuerbarkeit des Prozesses
Abscheidung von Stäuben	Eignung Gewebefilter	Berücksichtigung Ergebnisse Partikelverteilung Bioaerosole Filterstufe, Einsatz als Vorstufe zur Verbesserung Funktionssicherheit der Nasstufe (Verstopfungsgefahr) Einbeziehung Reduzierung Abluftstrom und Ermittlung Kosten-Nutzen-Verhältnis
Abscheidung von Gerüchen	Optimierung Biofilter	Möglichkeiten zur Aufkonzentration durch Minderung des Volumenstroms bei Zuluftkühlung/Wechseladsorber sollten untersucht werden „kleine“ Biofilter mit höherer Beladung und in diesen Zeiten geringere Abscheideleistung Kombination mit NTP-Verfahren zur Vor- oder Nachbehandlung
	Eignung alternativer Verfahren	Einsatz NTP-Technik mit Katalysator und Bypass (s. o.)/UV-Fotooxidation jeweils i. V. m. Aufkonzentration

Unter Berücksichtigung der o. g. Vielzahl der noch zu untersetzenden Themenstellungen erscheint es ratsam, einen Schwerpunkt für die Fortführung der gewonnenen Erkenntnisse zu setzen. Nach Auffassung der Autoren sollte dieser Schwerpunkt bei der weiteren Prüfung der Einsatzmöglichkeiten der NTP-Technik für die Abluft der Geflügelställe liegen, weil hier eine gleichzeitige Reduzierung von Gerüchen und Inaktivieren von Bioaerosolen möglich erscheint. Für weitere Untersuchungen wird daher die Umsetzung folgender weiterer Arbeitsschritte empfohlen:

- Analyse der Forschungsergebnisse zum Einsatz der NTP-Technik (Auswertung konkreter Randbedingungen der Versuche, genutzte Entladetechnik, Kombination mit Verfahren, eingesetzte Energie, Anlagenaufbau [Schüttungen, Katalysatoren], Rohgaszusammensetzungen) und Ergebnisse und Prüfung der Übertragbarkeit auf die Geflügelhaltung mit den Zielen der Geruchsreduzierung und der Keimabtötung
- Prüfung des Einsatzes von Verfahrenskombinationen mit der NTP-Technik mit DBD-Entladung und Katalysator und Kombination mit Biofilter durch Aufbau von Versuchsanlagen für die Abluft der Geflügelhaltung.

9.3 Ausblick

Die Ausführungen der Studie machen deutlich, dass Differenzen zwischen dem Interesse des Umweltschutzes/Immissionsschutzes und der artgerechten Tierhaltung/dem Tierschutz (Käfighaltung führte zu geringen Emissionen im Vergleich zur Volieren- oder Bodenhaltung sowie Freilandhaltung) bestehen. Die aus Tierschutzgründen geforderten Offenstallsysteme ohne Zwangsentlüftung mit geringeren Emissionen ermöglichen keine Abluftreinigung und stehen damit der Entwicklung zur Emissionsminderung entgegen. Zusätzlich sind Grundlagen für eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht hinreichend bekannt.

Aus dieser Problematik, der art- und umweltgerechten Tierhaltung mit dem Erfordernis, Regelungen für die Emissionsminderung und den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen zu schaffen, ergeben sich drei Ziele, die parallel zu berücksichtigen sind (POLTE & ECKHOFF 2016):

- Soziale Verträglichkeit (Tierwohl, Tierschutz, Ansprüche/Erwartungshaltung Verbraucher, Gesundheit am Arbeitsplatz)
- Umwelt- und Klimaverträglichkeit (Klimaschutz, Umweltschutz, Umweltvorsorge)
- Ökonomische Verträglichkeit (Kosten Abluftreinigung, Kosten Betrieb, Verkaufspreise Absatzmärkte, Preiskampf Einzelhandel)

Bei Verfolgung und Umsetzung dieses Zieldreiecks (vgl. Abbildung 22) sind Zielkonflikte unvermeidbar. Es bedarf daher einer Abwägung und eines interdisziplinären Denkens für eine gleichberechtigte Berücksichtigung. Die Herausforderung besteht somit neben der Schaffung einer verfügbaren Technik für die Abluftreinigung von Geflügelställen, die genannten Ziele bestmöglich zu vereinen.

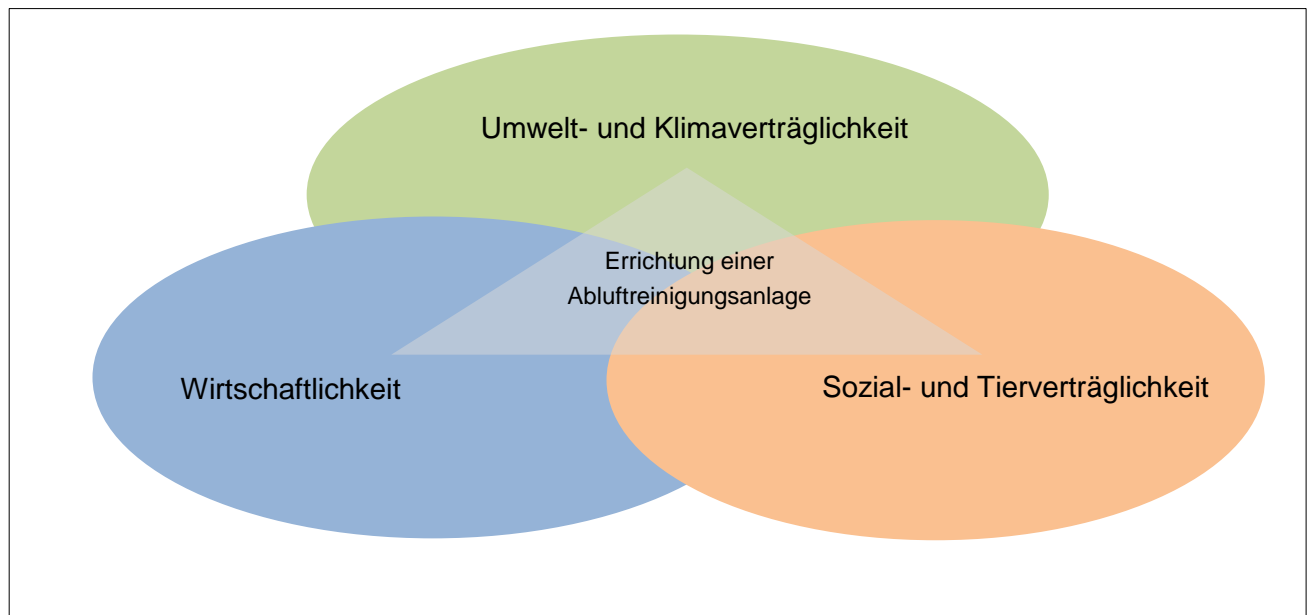


Abbildung 22: Zieldreieck umweltgerechte Tierhaltung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass aufgrund der lückenhaften Kenntnisse der Wirkungen und Wirkungsketten von Bioaerosolen generelle Vorgaben für den Einsatz von Abluftreinigungen zur Reduzierung von Bioaerosolen unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und ökobilanziellen Verhältnisse nach dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz nicht gerechtfertigt erscheinen.

Hinsichtlich der Reduzierung von Geruchsemissionen ist im Ergebnis der Herstelleranfragen gegenwärtig keine Abluftreinigungsanlage verfügbar, die die geforderten Abluftreinigungsziele (300 GE/m³ und kein Rohgasgeruch) erreichen. Hier sollten die Anforderungen in Abhängigkeit vom Einzelfall und der jeweiligen belästigenden Wirkung der Anlage definiert werden.

10 Literatur

- ADELL, E., MOSET, V., ZHAO, Y., CERISUELO, A., CAMBRA-LÓPEZ, M. (2011): Concentración, distribución espacial y por tamaño de bacterias aerobias mesófilas en el aire de granjas de broilers. ITEA 107(2):77-93
- AEL Heft 8 (1993): Stalllüftungsanlagen Planung, Berechnung, Installation, Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendungen in der Landwirtschaft e. V.
- BAT (2016): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs, JOINT RESEARCH CENTRE, Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau, Final Draft, August 2015
- BAT (August 2015): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs, Final Draft, August 2015
- BGR 104 (2007): Explosionsschutz-Regeln, Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung, Berufsgenossenschaftliche Regel für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Januar 2007
- BioAbluftR (2009): Testing and evaluation of biological safety of approved gas purification equipment (BioAbluftR) in farm animals, TÜV Nord Umweltschutz GmbH & Co. KG, Wolynski, Stefan
- BRUNNER, K. (2008): Reduktion von Ammoniakverlusten in der Legehennenhaltung „Weniger Ammoniak in der Luft“, Karl Brunner, KBO GmbH, SGZ 11/2008
- CLAUß, A. (2014): Mikrobiologische Belastungen in alternativen Legehennenhaltungen aus Sicht des Arbeits- und Umweltschutzes, Luftgetragene Bakterien, Disputationsvortrag an der Universität Witten/Herdecke, 17.12.2014
- CLAUß, M. (2015a): Ein automatischer Bioaerosolsammler für die kontinuierliche Probenahme von luftgetragenen Mikroorganismen, Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, S. 133-136, April 2015
- CLAUß, M. (2015b): Particle size distribution of airborne microorganisms in the environment – a review, Landbauforschung, Appl. Agricultural Forestry Res., 2015
- CLAUß, M. (2016): Expertengespräch am 27.04.2016 im von Thünen-Institut in Braunschweig
- CLAUß, M., GEBUREK, F., HEBBINGHAUS, H. (2016): Was wäre, wenn ...? Immissionsprognosen für Bioaerosole fernab der derzeitigen Konvention, Vortrag 12. Informationsveranstaltung „Umweltverträgliche Landwirtschaft“, Berlin 12. und 13.05.2016
- CLAUß, M., SCHULZ, J., STRATMANN-SELKE, J., DECIUS, M., HARTUNG, J. (2013): Abscheidung von „Livestock-associated“ Methicillin-resistenten Staphylococcus aureus (LA-MRSA) aus der Abluft zweier Mastschweineställe mit einem Rieseltbettfilter und einer dreistufigen Abluftreinigungsanlage., Berlin 126(3/4):137-142
- DAMMANN, B., STEGMANN, R. (1998): Grundlagen zur Planung und Auslegung von Biowäschern und Biofiltern. In: Entsorgungspraxis 7 – 8/98, S. 41 – 46
- Destatis (2015): Fachserie 3. Reihe 4.2.3, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Geflügel 2015, Statistisches Bundesamt 01.06.2015
- DIN 18910-1 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, Beuth Verlag, 2004
- DIN 18910-1 (2016): Entwurf: Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, Ersatz für DIN 18910: Mai 2016
- DIN EN 13725 (2003): Luftbeschaffenheit - Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie, Deutsche Fassung EN 13725, Juli 2003
- DLG (2007-2012): Prüfberichte 5699, 5702, 5879, 5880, 5944, 5954, 5955, 5957, 6050, 6051, 6098, 2007-2012, <http://www.dlg.org/gebaeude.html#Abluft>, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Abfrage 09/2013
- DLG (2009-2016): Prüfberichte 5952, 6212, 6254, 6260, 6271, 6344, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Abfrage Mai 2016

- DLG (2015): DLG-Prüfrahmen Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Februar 2015
- DLG (2016): Hinweise zum Betrieb von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung, DLG-Merkblatt 403, Stand Januar 2016
- DOBSLAW, D., ORTLINGHAUS, O., DOBSLAW, C. (2015): Geruchsstoffreduktion durch eine Verfahrenskombination aus Nieder-temperaturplasma, Mineraladsorber und Biorieselbettreaktor. In: VDI (ed.): 2015. VDI-Berichte 2252 Gerüche in der Umwelt 2015, Düsseldorf, VDI-Verlag. 209-215
- ECKHOF, W. (2014): Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung der Emissionsminderung des Abluftreinigungssystems MagixX-L der Firma Big Dutchman International GmbH für die Broilerelertierhaltung und Legehennenhaltung, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Wilfried Eckhof, Berichtsnummer 355/2/1-2014-GS-0, 16.10.2014
- ECKHOF, W. (2016): 12. Informationsveranstaltung „Umweltverträgliche Landwirtschaft“, Tagungsunterlagen, Berlin 12. und 13.05.2016
- Entwurf TA Luft (2015): Vorschläge zur Anpassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Dokument Nr.1.1/ 2015-05-29, Stand: 29.05.2015 und Dokument Nr.2.1/ 2015-06-18 Stand: 18.06.2015
- FILTRACON (2015): Camfil Handte APC (2015), Filtracon GmbH, <http://www.filtracon.com/filtraconR/nassabscheider-von-camfil-handte-apc/>
- FISCHER, K. et al. (1990): Technische Akademie Esslingen, Biologische Abluftreinigung – Anwendungsbeispiele, Möglichkeiten und Grenzen für Biofilter und Biowäscher
- FRANKE, W. (2011): Biofilter als Bestandteil kombinierter Abluftbehandlungsverfahren in der Abwasserwirtschaft, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel, Band 32, Kassel 2011
- FRITZ, W., KERN, H. (1990): „Reinigung von Abgasen“, 2. Auflage, 1990, ISBN 3-8023-0244-3, Vogel Buchverlag
- GÄRTNER, A., GESSNER, A. (2011): Ermittlung der Gesamtstaubemissionen und der Feinstaubanteile PM10 und PM2,5 aus Hähnchenmastanlagen. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 71 (2011), Nr. 9, S. 357 – 361
- GIRL (2008): Geruchsimmissions-Richtlinie Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft zur Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen - Sachsen - vom 24. Oktober 2008
- HAHNE, J. (2002): Leitfaden des Landkreises Cloppenburg zur Feststellung der Eignung von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung zur Anwendung in der Genehmigungspraxis und bei der Überwachung, Dr. rer. nat. J. Hahne, Prof. Dr. – Ing. St. Schirz, Dipl. –Ing. W. Schumacher, Stand 14.06.2002
- HAHNE, J. (2010): Mehrstufige Abluftreinigung für die Geflügelhaltung. Landtechnik 65(5):334-337
- HAHNE, J. (2011): Entwicklung der Abluftreinigung in der Tierhaltung in Deutschland, Landtechnik 66 (2011), no. 4, pp. 289-293
- HAHNE, J. (2014): Vortrag, Stand der Abluftreinigung und Zertifizierung
- HAHNE, J. (2015): Vortrag „Stand von Wissenschaft und Technik der Abluftreinigung für die Tierhaltung“ Umweltverträgliche Landwirtschaft“, Mai 2015
- HAHNE, J. (2016): Vortrag „Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Abluftreinigung für die Nutztierhaltung“, 12. Informationsveranstaltung „Umweltverträgliche Landwirtschaft“, Mai 2016
- HAHNE, J. (2006): Abluftreinigungsverfahren - welche Technik für welchen Einsatz? Landtechnik 61(4):231
- HAHNE, J. (2011): Entwicklung und Bewertung von Verfahren zur Reinigung von Abluft aus Geflügelhaltungen. In: 10. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2011 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Darmstadt: KTBL, S. 164-170
- HAHNE, J. (2013): Verlauf und Umfang von Spurengasemissionen aus der Geflügelhaltung als Grundlage zur Ableitung von Vermeidungs- und Verminderungsstrategien. In: 11. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 24.-26. September in Vechta. Darmstadt: KTBL, S. 312-317
- HAHNE, J. & ECKHOF, W. (2014): Entwicklungsstand von Abluftreinigungseinrichtungen: Filter für gute Stallluft?, DGS Mag. 66(5):46-49
- HANDTE, J. (2010): Handte Umwelttechnik GmbH, Tuttlingen, Power Point Präsentation „Abscheidung von Kühlschmierstoffen aus Werkzeugmaschinen“.

- HANDTE, S. (2006): Arbeitsblatt „Beschreibung der Arbeitsweise der Nassabscheider der Typen: StWV,, StW, StZV“, Handte Umwelttechnik GmbH, Tuttlingen, 10.11.2006
- Handte Umwelttechnik GmbH (2010): MF-Filter mit Precoatierung, Prospektmaterial, Tuttlingen.
- HARTUNG, J., HABIG, C., CLAUß, M. (2014): Minderungsmaßnahmen für Bioaerosol-Emissionen aus Nutztierställen. Umweltmed. Hygiene Arbeitsmed. 19(4): 326
- HIMENVIRO (2016): Das große Intensiv-Filter Lexikon der Entstaubung, Intensiv-Filter Himenviro GmbH, http://www.intensiv-filter.com/fileadmin/user_upload/downloads/Lexikon_der_Entstaubung_Intensiv-Filter.pdf, Abfragestand Mai 2016
- HINZ, T. (2005): Messung luftgetragener Partikel in und aus der Geflügelhaltung, Landtechnik 60 (2005), Heft 2, S. 100 – 101
- HOLZER, F., ROLAND, U., KOPINKE, F.-D. (2000): Oxidation von organischen Luftschadstoffen im „kalten“ Plasma, https://www.ufz.de/export/data/2/84263_179_185.pdf
- HOPPENHEIDT, K. (2002): Bioaerosole als Bestandteile von Feinstäuben, Tagungsband, Fachtagung „Wirkung und Erfassung von Fein- und Ultrafeinstäuben“, 14.2.2002 München, S 157-178
- HVBG (1997): Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben, BIA-Report 12/97, HVBG Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaft, Dezember 1997
- KRANERT, M., REISER, M. (2005): Neue Techniken zur Abgasreinigung in der Abfallwirtschaft durch nichtthermische Plasmatechnologie: Verfahrenskombination aus Biofilter und NTP-Technologie: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 17988, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
- KrdL (2014): Bioaerosole in der Landwirtschaft – Bedeutung für Mensch und Umwelt, VDI-Expertenforum 30.09./01.10.2014 Berlin, KrdL – Schriftenreihe 48
- KTB (2006): Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen, Verfahren-Leistungen-Kosten, KTBL-Schrift 451, Darmstädter Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
- KTBL (2006): Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren, KTBL-Schrift 446, Darmstadt. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
- KTBL (2015): 12. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, KTBL Tagungsband, KTBL September 2015
- KUMMER, V. (2003): Bioaerosolemissionen bei der biologischen Abfallbehandlung und mögliche Minderungsmaßnahmen. In: Verein zur Förderung des Instituts WAR (Hrsg.): 67. Darmstädter Seminar – Abfalltechnik – Emissionen aus der Abfallbehandlung: Energie – Emissionen – Messtechnik
- LAI (2014): Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Bioaerosol-Immissionen, Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, 31.01.2014
- LfU (2011): Intensivtierhaltung: Umweltrelevante Emissionen und Immissionen (Feinstaub – PM₁₀, PM_{2,5}, NH₃, N₂O, CH₄, NMVOC, Keime, Pilze, Endotoxine), Endbericht zum Forschungsvorhaben, Bayerisches Landesamt für Umwelt, März 2011
- LfULG (2003): Keim- und Luftschadstoffemissionen einer Sauenzuchtanlage, Messbericht August 2003
- LfULG (2007): Emissionsminderung in der Legehennenhaltung, Vergleich verschiedener Alternativer Aufstallungs-, Lüftungs- und Managementsysteme hinsichtlich ihrer Emissionen (Schadgase, Staub, Geruch), J. Lippmann Heft 8/2007
- LfULG (2008): Emissionsfaktoren in der Landwirtschaft, Stand 02.12.2008
- LfULG (2011): Kenndaten zur Legehennenhaltung, Natura 60 und High Rise 3; Schriftenreihe, Heft 2/2011; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14997>
- LfULG (2011): Stickstoffdynamik im Umfeld einer Legehennenhaltung; Schriftenreihe, Heft 27/2011; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15036>
- LfULG (2011a): Ablufführung in der Legehennenhaltung, Schriftenreihe, Heft 18/2011; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14948>
- LfULG (2014): Emissionen aus Haltungssystemen für Legehennen; Schriftenreihe, Heft 14/2014; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/21813>

- LfULG (2014a): Erlass vom 30.05.2014 zur Anwendung des LAI-Leitfadens in Sachsen
- LfULG (2014b): Energieeffizienz in der Abluftreinigung (Schweinehaltung); Schriftenreihe, Heft 19/2014; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22353>
- LfULG (2015): Hintergrundkonzentration für Bioaerosole; Schriftenreihe, Heft 4/2016; <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25866>
- LfULG (2016): Bioaerosole aus Tierhaltungsanlagen Projektabschlussbericht, Entwurf November 2015
- LGL (2014): Ableitung von gesundheitsbezogenen Beurteilungswerten für Bioaerosole, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Vortrag 01.10.2014
- LGL (2014): GaBi = Gesundheitsbasierte Ableitungswerte Bioaerosole, Projektleitung Gerstner, D., Walser, S., Brenner, B., Herr, C., Bayern
- LMU (2005): NiLS-Studie, Atemwegsgesundheit und Allergiestatus bei jungen Erwachsenen in ländlichen Regionen Niedersachsens - Niedersächsische Lungenstudie – Abschlussbericht, Radon et al. 13.01.2005
- LNV (2005-2011): Maßnahmen zur Verminderung von Feinstaubemission aus der Geflügelhaltung: Indikative Evaluation von Biofilterung als potentielle Feinstaubreduzierungstechnik, Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Lebensmittelqualität, Übersetzung: Ogink und Aarnink, 2008
- MELUR (2014): Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Tierhaltungsanlagen und an Anlagen zur Lagerung von Gülle, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume vom 26.06.2014, gültig ab 15.07.2014
- MKULNV (2013): Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Tierhaltungsanlagen, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Erlass vom 19.2.2013
- MUEK (2015): Durchführung immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren; Abluftreinigungsanlagen in Schweinehaltungsanlagen und Anlagen für Mastgeflügel sowie Bioaerosolproblematik in Schweine- und Geflügelhaltungsanlagen, Erlass vom 02.05.2013, Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz Niedersachsen, Fassung vom 23.09.2015
- MÜLLER H.-J. (2004): Gasemissionen aus Geflügelhaltungen, Landtechnik 59: 222 – 223
- NIESWANDT, H. (2006): Wirkungsgrad eines plasmaphysikalischen Verfahrens zur Minderung luftgetragener Keime in der Stallluft
- NLG (2004): AABEL-Studie: „Atemwegserkrankungen und Allergien bei Einschulungskindern in einer ländlichen Region“ Teilprojekt B des Untersuchungsprogramms „Gesundheitliche Bewertung von Bioaerosolen aus der Intensivtierhaltung“, Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Michael Hoopmann, Dr. Oliver Hehl, Dr. Friederike Neisel, Dezember 2004
- NMUEK (2013): Durchführung immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren; hier: Abluftreinigungsanlagen in Schweinehaltungsanlagen und Anlagen für Mastgeflügel sowie Bioaerosolproblematik in Schweine- und Geflügelhaltungsanlagen, Erlass des Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz vom 22.03.2013
- NMUEK (2015): Durchführung immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren; Abluftreinigungsanlagen in Schweinehaltungsanlagen und Anlagen für Mastgeflügel sowie Bioaerosolproblematik für Schweine- und Geflügelhaltungsanlagen gem. RdErl. d. MU, d. MS u. d. ML vom 23.09.2015
- PIASTiC (2016): Abluftbehandlung durch eine Verfahrenskombination aus nichtthermischen Plasma, Mineraladsorber und Wäscherstufe, Untersuchungen zur Machbarkeit und Effizienz einer Verfahrenskombination aus nicht-thermischen Plasma und Mineraladsorber zur partiellen Oxidation von Abluftschadstoffen und einem nachgeschalteten Biowäscher zur Eliminierung der partiell oxidierten Komponenten, „PIASTiC“ Schlussbericht zu Nr. 8.2. des Forschungsvorhabens, 2016
- REITHER K. (2012): Reither-Venturiwäscher GmbH, Prospektmaterial, Arbeitsweise Venturiwäscher, <http://www.reither-venturi.com/>
- Richtlinie 2000/54/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit (Siebte Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) vom 18.09.2000

- ROSENTHAL, E., SCHNEIDER, T., BÜSCHLER, W., DIEKMANN, B. (2007): Landtechnik 2/2007 „Sedimentation von tierartspezifischen Stäuben im Stallinnenraum“
- RP Chemnitz (2006): Genehmigungsbescheid zum Antrag auf Errichtung und Betrieb einer Schweinezucht- und Schweinemastanlage sowie von zwei Güllelagerbehältern durch Umbau und Modernisierung der ehemaligen Milchviehanlage Stangengrün, Regierungspräsidium Chemnitz 13.02.2006
- SABO, F. (2003): Verfahrenstechnische Übersicht und Zusammenhang zwischen Ökonomie und Ökologie, VDI-Berichte Nr. 1777, Düsseldorf 2003
- SALEH, M. (2006): Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, „Untersuchungen zur Luftqualität in verschiedenen Systemen der Geflügelhaltung mit besonderer Berücksichtigung von Staub und Luftkeimen, PhD-These Zur Erlangung der Grades eines Doctor of Philosophie, Hannover 2006
- Schleswig-Holstein (2014): Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Tierhaltungsanlagen und an Anlagen zur Lagerung von Gülle - Schleswig-Holstein - 26. Juni 2014 (Amtsbl. Schl.-H. Nr. 29 vom 14.07.2014 S. 523) Gl.-Nr.: 7820.25
- SCHMITT, G., WALLENFANG, O., BÜSCHNER, W., DIEKMANN, B. (2004): Partikelkonzentration in der Stallabluft. Landtechnik 29, 334-335
- SCHNEIDER, F., EICHELSER, R., NESER, S. (2006): Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 15/2006
- SCHUCK, T. (2014): Bioaerosol- und Staub-Immissions-Messungen an einer Geflügelmastanlage: Messplanung, Luftreinhaltung, Immissionsschutz Heft 4/14
- SKÓRA, J., MATUSIAK, K., WOJEWÓDZKI, P., NOWAK, A., SULYOK, M., LIGOCKA, A., OKRASA, M., HERMANN, J., GUTAROWSKA, B. (2016): Evaluation of Microbiological and Chemical Contaminants in Poultry Farms Public Health 2016, Heft 13, 192 ff.
- SPRINGORUM, A., CLAUß, M., RIEGER, A., HINZ, T., HARTUNG, J. (2015): Mikrobielle Belastung der Luft in verschiedenen alternativen Haltungsformen für Legehennen
- Staub-Ex (2016): GESTIS-Staub-Ex-Datenbank, IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, <http://staubex.ifa.dguv.de/exploergebnis.aspx?lang=d>, 2015
- STEGEMANN, R., HENSEL, A. (2004): Biologische Abluftreinigung bei der Kompostierung, ERICH SCHMIDT VERLAG Berlin 2004
- STLA (2016): Erfassung und Daten des Statistischen Landesamtes des Freistaates Sachsen, Statistik <https://www.statistik.sachsen.de/>, Abfragestand April 2016
- STLA (2016): Statistischer Bericht CII 2 – m 01/16, Schlachtungen und Geflügelhaltung im Freistaat Sachsen, Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen, Januar 2016
- STROHMAIER, C., MAACK, G., KOSCH, R., KÜNNEN, S., MOSTAFA, E., BÜSCHER, W. (2015): Emissionsminderung aus Geflügelställen durch kombinierte Abluftreinigung
- Tagungsband zur 12. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2015 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 8.-10. September 2015 in Freising
- TA Luft (2002): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft, 24. Juli 2002
- TierSchNutztV (2006): Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung, Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung vom 22.08.2006, zuletzt geändert am 01.10.2009
- TMUEN (2016): Kabinettsbeschluss Filtererlass Thüringen, Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz 21.06.2016
- TRBA 466: Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe, Einstufung von Prokaryonten (Bacteria und Archaea) in Risikogruppen, Stand August 2015
- TÜV (2008): Bericht über die Zertifizierung der Biofilteranlage der Firma Hartmann, TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH, 18.08.2008

- TYMCZYNA, L., CHMIELOWIEC-KORZENIOWSKA, A., DRABIK, A. (2007): The Effectiveness of Various Biofiltration Substrates in Removing Bacteria, Endotoxins, and Dust from Ventilation System Exhaust from a Chicken Hatchery, Department of Animal Hygiene and Environment, Faculty of Biology and Animal Breeding, Institut für Tierhygiene und Umwelt, Fakultät für Biologie und Tierzucht, University of Agriculture in Lublin, 20-950 Lublin, Poland University of Agriculture in Lublin, 20-950 Lublin, Polen, Poultry Science 86:2095–2100, 2007
- UBA (2003): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), BVT-Merkblatt zu Abwasser- und Abgasbehandlung/-management in der chemischen Industrie, Februar 2003
- UBA (2005): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Nahrungsmittel-, Getränke- und Milchindustrie, Dezember 2005
- UBA (2006): Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für Abfallbehandlungsanlagen mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung, August 2006
- UBA Wien (1999): Abluftreinigung bei der mechanischen-biologischen Abluftbehandlung (MBA), Wien November 1999
- Umweltbundesamt (2010): Texte 37/02, Nationales Programm zur Einhaltung von Emissionshöchstwerten für bestimmte Luftschadstoffe nach der Richtlinie 2001/81EG (NEC-RL)
- VDG Merkblatt (1983): Planung und Betrieb von Entstaubungsanlagen in Gießereien http://www.bdguss.de/fileadmin/content_bdguss/Der_BDG/Richtlinien/G_601.pdf
- VDI 4253 Blatt 2 (2008): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft; Verfahren zum quantitativen kulturellen Nachweis von Bakterien in der Luft; Verfahren nach Abscheidung in Flüssigkeiten (Measurement of airborne microorganisms and viruses in ambient air; Culture based method for the quantitative determination of bacteria in air; Method after separation in liquids). Beuth Verlag, Berlin., August 2008
- VDI 4257 Blatt 1 (2013): Bioaerosole und biologische Agenzien – Messen von Emissionen – Planung und Durchführung von Emissionsmessungen, Mai 2013
- VDI 4257 Blatt 2 (2011): Bioaerosole und biologische Agenzien – Messen von Emissionen – Probenahme von Bioaerosolen und Abscheidung in Flüssigkeiten, September 2011
- VDI-Richtlinie 2263 (2014): Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen - Explosionsunterdrückung und Kombination von konstruktiven Schutzmaßnahmen an Elevatoren, Dezember 2014
- VDI-Richtlinie 2441 (2016): Prozessgas- und Abgasreinigung durch Kaltplasmaverfahren - Barriere-, Koronaentladung, UV-Strahlung, Mai 2016
- VDI-Richtlinie 3442 (1977): Statistische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Drehmaschinen, März 1977
- VDI-Richtlinie 3472 (1986): Emissionsminderung - Hühner^d, ersetzt durch VDI-Richtlinie 3894 Bl. 1 und Bl. 2
- VDI-Richtlinie 3476 (1990): Katalytische Verfahren der Abgasreinigung, verfahrensspezifische Hinweise für Planung, Bau und Betrieb von Anlagen, Juni 1990
- VDI-Richtlinie 3477 (2016): Biologische Abluftreinigung – Biofilter, März 2016
- VDI-Richtlinie 3478 Blatt 1 (2011): Elektrofilter - Prozessgas- und Abgasreinigung, Abscheidung fester und/oder flüssiger Partikel aus Prozess- oder Abgasen mit Hilfe von Elektrofiltern, September 2011
- VDI-Richtlinie 3478 Blatt 2 (2010): Elektrofilter - Prozessluft- und Raumluftreinigung, Elektrofilter nach dem zweistufigen Penney-Prinzip, Dezember 2010
- VDI-Richtlinie 3478 Blatt 2: Biologische Abgasreinigung – Biorieselbettreaktoren, April 2008
- VDI-Richtlinie 3674 (2013): Abgasreinigung durch Adsorption - Prozessgas- und Abgasreinigung, Grundlagen der physikalischen und chemischen Adsorption zur Emissionsminderung in der Gasphase, technisch eingesetzten Adsorbentien, April 2013
- VDI-Richtlinie 3675 (1981): Abgasreinigung durch Absorption, Mai 1981
- VDI-Richtlinie 3676 (2011): Massenkraftabscheider, Stand der Technik der Anlagen zur Abscheidung von Partikeln bzw. Staub durch Massenkraft, September 2011
- VDI-Richtlinie 3677 Blatt 1 (2010): Filternde Abscheider – Oberflächenfilter, Abtrennung fester Partikeln aus Gasen mit filternden Abscheidern (Oberflächenfilter) zur Emissionsminderung, zur Prozessgasreinigung und zur Wertstoffgewinnung, November 2010

- VDI-Richtlinie 3677 Blatt 2 (2004): Filternde Abscheider - Tiefenfilter aus Fasern, Abscheidung von partikelförmigen Verunreinigungen der Zu-, Ab- und Umluft von Lüftungs- und Klimaanlage sowie zur Reinigung von Prozessluft, Februar 2004
- VDI-Richtlinie 3678 (1980): Elektrische Abscheider, März 1980
- VDI-Richtlinie 3679 Blatt 1 (2014): Nassabscheider - Grundlagen, Abgasreinigung von partikelförmigen Stoffen, Juli 2014
- VDI-Richtlinie 3679 Blatt 4 (2014): Nassabscheider - Abgasreinigung durch oxidierende Gaswäsche, Verfahren der oxidierenden Gaswäsche zur Minderung von gas- oder aerosolförmigen luftfremden Stoffen sowie von Geruchsstoffen im Abgas von technischen Prozessen, Oktober 2014
- VDI-Richtlinie 3894 Blatt 1 (2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Haltungsverfahren und Emissionen; Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde, September 2011
- VDI-Richtlinie 4250 Blatt 1 (2014): Bioaerosole und biologische Agenzien Umweltmedizinische Bewertung von Bioaerosol-Immissionen Wirkungen mikrobieller Luftverunreinigungen auf den Menschen, August 2014
- VDI-Richtlinie 4250 Blatt 2 (2014): Bioaerosole und biologische Agenzien Umweltmedizinische Bewertung von Bioaerosol-Immissionen Risikobeurteilung von legionellenhaltigen Aerosolen, November 2015
- VDI-Richtlinie 4250 Blatt 3 (2014): Entwurf, Bioaerosole und biologische Agenzien, anlagenbezogene, umweltmedizinisch relevante Messparameter und grundlegende Beurteilungswerte, November 2014
- VDI-Richtlinie 4251 Blatt 3 (2015): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft, Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen, August 2015
- VDI-Richtlinie 4255 Blatt 1 (2005): Bioaerosole und biologische Agenzien; Emissionsquellen und -minderungsmaßnahmen - Übersicht, Oktober 2005
- VDI-Richtlinie 4255 Blatt 2 (2009): Bioaerosole und biologische Agenzien - Emissionsquellen und -minderungsmaßnahmen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Übersicht, Dezember 2009
- VDI-Richtlinie 4255 Blatt 3 (2014): Entwurf, Bioaerosole und biologische Agenzien Emissionsfaktoren für Geflügelhaltung, August 2014
- VERA (2010): Test Protocol for Air Cleaning Technologies-Version 1, 17.09.2010
- VSS-Umwelttechnik GmbH (2013): Angebotstext für Absorptionswäscher, Troisdorf, 2013
- ZHANG, Q., NGAN, C., LA, A. (2013): A Bio-Aerosol Transmission Test System for Assessment of Electrostatic Particle Ionization (EPI) in Improving Barn Air Quality, Paper No. CSBE132-52, The Canadian Society for Bioengineering, SBE/SCGAB 2013 Annual Conference University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan 7-10, July 2013
- ZHENG, W., ZHAO, Y., XIN, H., GATES, E.S., ZHANG, Y., SOUPIR, M. L. (2014): Agricultural and Biosystems Engineering Publications, Airborne Particulate Matter and Culturable Bacteria Reduction from Spraying Slightly Acidic Electrolyzed Water in an Experimental Aviary Laying-Hen Housing Chamber, http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/480, 2014

Anhang: Explosionsschutz bei der Abscheidung partikelförmiger Emissionen

Explosionsfähigkeit/Staubexplosionsklasse

Generell sind Stäube wie Futtermittel, Einstreu in Form von Stroh und Holzspänen explosionsfähig und werden der Staubexplosionsfähigkeit St 1 zugeordnet. Insbesondere beim Einsatz von Trockenfilteranlagen kann während des Abreinigungsverganges eine explosionsfähige Atmosphäre im Filtergehäuse entstehen. Ist dann noch eine Zündquelle durch z. B. Magnetventile vorhanden, kann dies zu einer Explosion führen.

Staubexplosionsfähigkeit ist dann gegeben, wenn sich in einem Staub-/Luft-Gemisch nach dem Entzünden eine Flamme ausbreitet, die im geschlossenen Behälter mit Temperatur- und Drucksteigerung verbunden ist. Aufgrund ihrer K_{St} -Werte werden die Stäube in Klassen eingeteilt:

Tabelle 17: Einteilung von Staubexplosionsklassen in Abhängigkeit des K_{St} -Wertes (HVBG 1997)

Staubexplosionsklasse	K_{St} -Wert in bar/(m*s)
St 1	> 0 bis 200
St 2	> 200 bis 300
St 3	> 300

Bestimmungsverfahren Staubexplosionsfähigkeit

Die Staubexplosionsfähigkeit wird vorzugsweise in den geschlossenen Apparaturen nach den beschriebenen Verfahren ermittelt. Während im 1 m³-Behälter die gleiche Zündquelle eingesetzt wird wie zum Bestimmen der Kenngrößen p_{max} und K_{St} (EZ = 10 kJ), beträgt die Zündenergie für das Bestimmen der Staubexplosionsfähigkeit in der 20 l-Apparatur nur 1 kJ bis 2 kJ.

Kommt es bei dem beschriebenen Verfahren zu keinem Druckaufbau ($D_p < 0,5$ bar über dem verfahrensbedingten Ausgangsdruck), so gilt der Staub in der untersuchten Form (Zusammensetzung, Korngröße, Feuchte) als nicht staubexplosionsfähig. Tritt bei dem beschriebenen Verfahren ein Druckwert von $> 0,5$ bar über dem verfahrensbedingten Ausgangsdruck auf, so gilt der Staub als im Gemisch mit Luft explosionsfähig.

Die modifizierte Hartmann-Apparatur lässt in gewissem Umfang eine Aussage zur Explosionsfähigkeit und zur Staubexplosionsklasse zu. Sie besteht aus einem vertikal angeordneten Glasrohr mit einem Volumen von ca. 1,2 l. Das Rohr ist am oberen Ende mit einem Klappdeckel verschlossen. Der zu prüfende Staub wird auf den Boden der Apparatur aufgebracht und mittels eines über einen Zerstäuberpilz gelenkten definierten Luftstoßes aus einem vorgeschalteten Druckluftvorrat ($V = 50$ ml, $p = 8$ bar) verteilt. Die eingebrachte Staubmenge wird in jeder der drei Versuchsreihen über einen weiten Bereich verändert. Als Zündquelle dient eine Dauerfunkenstrecke, die im Falle des Nichtentzündens für drei weitere Versuchsreihen durch eine stärkere Zündquelle (Glühwendel) ersetzt wird.

Je nach Reaktion des Staub-/Luft-Gemisches wird der Deckel unterschiedlich weit aufgeklappt und der Öffnungswinkel über induktive Geber in drei Stufen digital angezeigt.

Die Bewertung der maximal auftretenden Reaktionen wird nach folgendem Schema vorgenommen (Staub-Ex 2016):

- Anzeige „0“ (ohne selbstständige Flammenausbreitung) bedeutet lediglich, dass unter diesen Versuchsbedingungen kein Entzünden erfolgt. Ein Einstufen des Staubes als nicht staubexplosionsfähig ist hiermit jedoch nicht gerechtfertigt. Weitergehende Untersuchungen in geschlossenen Apparaturen sind erforderlich.

- Anzeige „1“ sagt aus, dass der Staub im Gemisch mit Luft explosionsfähig ist und gestattet ein Einstufen in die Staubexplosionsklasse St 1. Eine selbstständige Flammenausbreitung – auch ohne Auslenken des Klappdeckels – ist hier der Anzeige „1“ gleichgestellt.
- Anzeige „2“ sagt ebenfalls aus, dass Staubexplosionsfähigkeit vorliegt, lässt aber kein Einstufen in eine Staubexplosionsklasse zu. Weitergehende Untersuchungen in geschlossenen Apparaturen sind erforderlich.

Mindestzündenergie

Unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte kleinste in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei Entladung ausreicht, das zündwilligste Gemisch eines explosionsfähigen Staub-/Luft-Gemisches zu entzünden.

Bestimmungsverfahren Mindestzündenergie

Die Mindestzündenergie kann unter Einsatz einer entsprechenden Kondensator-Entladungseinrichtung sowohl in der modifizierten Hartmann-Apparatur als auch in der 20 l-Kugel oder im 1 m³-Behälter bestimmt werden.

Grundsätzlich werden die Ergebnisse als Wertepaar in logarithmischer Abstufung angegeben. Dabei bezeichnet der kleinere Wert die Energie, bei der nach dem festgelegten Verfahren keine Reaktionen mehr beobachtet wurden. Der höhere Wert nennt die niedrigste eingesetzte Energie, bei der es noch zu einem Entzünden gekommen ist. Abweichend vom Standard-Verfahren kann die Mindestzündenergie auch ohne Induktivität im Entladekreis und bei sehr hohen Energiewerten auch unter Einsatz chemischer Zünder bestimmt werden (Staub-Ex 2016).

Brenn- und Explosionskenngrößen der vorhandenen Stäube

Die Analyse wichtiger Brenn- und Explosionsdaten ergab die Ergebnisse in Tabelle 18. Mögliche Abweichungen der angenommenen eingesetzten Stoffe bzw. Materialien bedürfen einer gesonderten Untersuchung. Die hier abgebildeten Werte wurden dem BIA-Report Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben 12/97 entnommen.

Tabelle 18: Brenn- und Explosionskenngrößen (Staub-Ex 2016)

Produktgruppe	Mindestzündenergie	Explosionsfähigkeit	Brennbarkeit
Stoffbezeichnung	in mJ		BZ
Futtermittel, Staubablagerung	10/100	St 1	2
Futtermittel	>100	St 1	2 / 4
Hähnchenmastfutter		St 1	1 / 2
Kraftfutterpellets		St 1	2 / 2
Maiskeimschrot	> 10	St 1	5 / 3
Weizenfutter		St 1	2
Weizen	> 10	St 1	4 / 4
Gerste	> 100	St 1	2 / 4

In Auswertung der geprüften Staubarten können Trockenfilterkonstruktionen mit vorbeugendem Explosionsschutz zur Vermeidung von Zündquellen und der Bildung von explosionsfähigen Atmosphären eingesetzt werden. Voraussetzung dafür ist die Einhaltung folgender Einsatzbedingungen:

- Vermeidungsmaßnahmen zum Eintrag von Zündquellen in die Filteranlage
- keine Selbstentzündung der Stäube
- die Mindestzündenergie der Stäube muss > 10 mJ sein
- keine hybriden Gemische (explosionsfähiges Gemisch aus Stäuben und Gasen)

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Doris Grahn, Torsten Puritz, Falk Rebbe, Anja Köhler
GICON - Großmann Ingenieur Consult GmbH
Tiergartenstr. 48, 01219 Dresden
Telefon: +49 351 47878-52
Telefax: +49 351 47878-78
E-Mail: d.grahn@gicon.de

Redaktion:

Michael Lohberger
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Anlagenbezogener
Immissionsschutz, Lärm
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5216
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: michael.lohberger@smul.sachsen.de

Titel:

Krzysztof Slusarczyk/shutterstock

Redaktionsschluss:

18.12.2016

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.