

# Energieeffizienz in der Abluft- reinigung (Schweinehaltung)

Schriftenreihe, Heft 19/2014



# Maßnahmen und Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz bei Schweinehaltungs- anlagen mit Abluftreinigung

Anja Köhler, Doris Grahn, Falk Rebbe, Jan Berthold, Manuel Vollmer

<b>1</b>	<b>Einleitung und Methodische Vorgehensweise .....</b>	<b>8</b>
1.1	Einleitung.....	8
1.2	Methodische Vorgehensweise.....	8
<b>2</b>	<b>Rechtliche Vorgaben zu Stalllüftung und Abluftreinigung .....</b>	<b>9</b>
2.1	Anforderungen des Tierschutzes.....	9
2.2	Anforderungen des Emissions- und Immissionsschutzes.....	10
2.2.1	Mindestanforderungen zur Begrenzung der Emissionen.....	10
2.2.2	Mindestanforderungen Immissionsschutz .....	11
2.3	Anforderungen an Lüftungsanlagen .....	11
2.4	Anforderungen an Abluftreinigungsanlagen .....	12
<b>3</b>	<b>Energieeinsatz in der Schweinehaltung .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Lüftung von Schweineställen .....</b>	<b>14</b>
4.1	Zwangslüftungsverfahren .....	14
4.2	Regelung.....	15
4.3	Energieeinsatz.....	16
<b>5</b>	<b>Abluftreinigungsanlagen für Schweinehaltungsanlagen.....</b>	<b>17</b>
5.1	Verfahren zur Abluftreinigung und energetische Einflussgrößen.....	17
5.1.1	Biofilter .....	17
5.1.1.1	Verfahrensbeschreibung .....	17
5.1.1.2	Systemaufbau .....	18
5.1.1.3	Energetische Einflussgrößen.....	18
5.1.2	Wäscher .....	19
5.1.2.1	Verfahrensbeschreibung .....	19
5.1.2.2	Systemaufbau .....	20
5.1.2.3	Energetische Einflussgrößen.....	21
5.1.3	Mehrstufige Abluftreinigungsanlagen .....	22
5.2	Verfügbare Systeme zur Abluftreinigung .....	23
5.3	Energieeffizienz der eingesetzten Aggregate .....	25
5.3.1	Verfügbare Aggregate .....	25
5.3.1.1	Ventilatoren .....	26
5.3.1.2	Pumpen.....	29
5.3.1.3	Elektrische Antriebe (Elektromotoren).....	31
5.3.1.4	Ökodesign-Richtlinie.....	34
<b>6</b>	<b>Methodische Vorgehensweise der Energieeffizienzbewertung .....</b>	<b>35</b>
6.1	Methodische Vorgehensweise.....	35
6.2	Festlegung der Referenzbedingungen .....	35
6.3	Energieverbrauch Referenzanlagen .....	36
6.3.1	Berechnungsgrundlagen .....	36
6.3.2	Ergebnisse der Referenzanlagen .....	39
<b>7</b>	<b>Vergleich der verfügbaren zertifizierten Systeme zur Abluftreinigung hinsichtlich des Energieeinsatzes</b>	<b>39</b>
7.1	Berechnungsgrundlagen .....	39
7.1.1	Berechnung zusätzlicher Leistung des Ventilators .....	40
7.1.2	Berechnung Leistungsaufnahme Pumpen.....	41
7.1.3	Verwendete Daten.....	41
7.2	Systemvergleich .....	42
7.2.1	Zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators .....	42
7.2.2	Leistungsaufnahme der Pumpen.....	45
7.2.3	Leistungsaufnahme gesamt .....	47
7.2.4	Abschätzung des Jahresenergieverbrauchs in kWh/(TP*a) .....	48

7.2.5	Zusammenfassung und Vergleich mit Angaben in den DLG-Prüfberichten.....	50
<b>8</b>	<b>Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz.....</b>	<b>52</b>
8.1	Konstruktive Maßnahmen.....	53
8.1.1	Einfluss Luftführung und Druckverlust.....	53
8.1.2	Vergrößerung der Anströmfläche und Reduzierung der Filtertiefe der Abluftreinigungsanlage.....	54
8.2	Einsatz effizienter Aggregate.....	55
8.2.1	Einsatz effizienterer Ventilatoren.....	55
8.2.2	Einsatz effizienterer Pumpen und Antriebsmotoren in der Abluftreinigungsanlage.....	56
8.3	Beeinflussung des Betriebsverhaltens.....	56
8.3.1	Volumenstromregelung.....	56
8.3.2	Abkühlen der Zuluft im Sommer.....	56
8.3.3	Reduzierung der Waschwassermenge in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms.....	58
8.3.4	Optimierung der Reinigung.....	59
8.3.5	Reinigung von Teilströmen.....	61
8.3.6	Abwärmennutzung.....	63
8.4	Zusammenfassung und Bewertung.....	63
<b>9</b>	<b>Anlagen in Sachsen.....</b>	<b>66</b>
9.1	Praxisbeispiel 1 – Schweineaufzucht.....	66
9.1.1	Kurzbeschreibung Anlagenbetrieb.....	66
9.1.2	Verfahren der Zwangsentlüftung und Abluftreinigung.....	67
9.1.3	Betriebserfahrungen.....	69
9.1.4	Energetische Bewertung.....	69
9.1.5	Ermittlung energetischer Schwachstellen und Ableitung Verbesserungspotenziale.....	70
9.2	Praxisbeispiel 2 – Schweinezucht- und Mastanlage.....	71
9.2.1	Kurzbeschreibung Anlagenbetrieb.....	71
9.2.2	Betriebserfahrungen.....	74
9.2.3	Energetische Bewertung.....	74
9.2.4	Ermittlung energetischer Schwachstellen und Ableitung Verbesserungspotenziale.....	76
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>78</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>80</b>
	<b>Anhang 1: Maßgebliche Daten Abluftreinigungssystem aus DLG-Berichten.....</b>	<b>82</b>
	<b>Anhang 2: Herstellerangaben zu DLG-Abluftreinigungssystemen.....</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang 3: Systemvergleich – Eingangsgrößen.....</b>	<b>90</b>
	<b>Anhang 4: Systemvergleich – Berechnungsergebnisse zusätzliche Leistungsaufnahme Ventilator und Pumpe.....</b>	<b>92</b>
	<b>Anhang 5: Abschätzung Stromverbrauch Abluftreinigungsanlagen (Einzelkomponenten) und Vergleich mit DLG-Prüfberichten.....</b>	<b>94</b>
	<b>Anhang 6: Jahresgang Temperaturverlauf Station Chemnitz.....</b>	<b>95</b>
	<b>Anhang 7: Energieverbrauch Luftführung.....</b>	<b>96</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zu- und Abluftsysteme von Zwangslüftungen der Schweinhaltung .....	15
Abbildung 2:	Prinzipskizze vertikal durchströmter Biofilter .....	18
Abbildung 3:	Prinzipskizze Sprühturmwäscher .....	21
Abbildung 4:	Kennlinie für zwei verschiedene Ventilatoren (h ... Auslegungspunkt mit höchstem Wirkungsgrad) .....	27
Abbildung 5:	Ventilator- und Anlagenkennlinien und Betriebspunkte einer Anlage .....	29
Abbildung 6:	Jahresgang Volumenstrom in % von der Sommerlufrate .....	37
Abbildung 7:	Mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme Ventilatoren – Vergleich Referenzanlagen ..	43
Abbildung 8:	Vergleich mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators bei Sommer- und Winterlufrate (Referenzanlage 1) .....	43
Abbildung 9:	Vergleich mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators bei Winterlufrate (Referenzanlage 1) .....	44
Abbildung 10:	Bereich zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators in Abhängigkeit von der Verschmutzung (Referenzanlage 1) .....	45
Abbildung 11:	Tierplatzspezifische Berieselungsmengen Referenzanlage 1 .....	46
Abbildung 12:	Tierplatzspezifische Leistungsaufnahme Referenzanlage 1 .....	46
Abbildung 13:	Tierplatzbezogene Leistungsaufnahme ARA gesamt bei max. Sommerlufrate (Referenzanlage 1) .....	47
Abbildung 14:	Tierplatzbezogene Leistungsaufnahme ARA gesamt bei max. Winterlufrate (Referenzanlage 1) .....	47
Abbildung 15:	Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Ammoniak ..	49
Abbildung 16:	Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Staub .....	49
Abbildung 17:	Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Geruch .....	50
Abbildung 18:	Längsschnitt Jungsauenstall mit Darstellung der Ablufführung .....	68
Abbildung 19:	Lastganganalyse Jahresgang ungeordnet (links) und geordnet (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtstandort 1 .....	69
Abbildung 20:	Lastganganalyse Wochenlastgang (links) und Tagesgang (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 1 .....	70
Abbildung 21:	Zuluftführung (links: Stall 4; rechts: Stall 2) .....	72
Abbildung 22:	Längsschnitt und Draufsicht Stall 4 (Ferkelstall) mit Darstellung der Ablufführung .....	72
Abbildung 23:	Lastganganalyse Jahresgang ungeordnet (links) und geordnet (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 2 .....	75
Abbildung 24:	Lastganganalyse Wochenlastgang (links) und Tagesgang (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 2 .....	75
Abbildung 25:	Summe des Energieverbrauchs von Pumpen und Steuerung der Abluftreinigung Stall 2 (links) und Stall 4 (rechts) .....	76
Abbildung 26:	Jahresgang Außenlufttemperatur Station Chemnitz .....	95
Abbildung 27:	Modell zur Luftführung .....	96
Abbildung 28:	Darstellung Luftumlenkung (Kniekanal) .....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gaskonzentration im Aufenthaltsbereich von Schweinen gem. § 26 Abs. 3 TierSchNutztV .....	10
Tabelle 2:	Einflussfaktoren und Anforderungen an Lüftungsanlagen in Winter und Sommer nach DLG (2003) .....	12
Tabelle 3:	Große Anlagen zur Schweinehaltung gem. Anhang I der 4. BImSchV in Sachsen .....	13
Tabelle 4:	Literaturstudie Energiebedarf Schweinehaltung .....	13
Tabelle 5:	DLG-geprüfte Abluftreinigungssysteme (DLG 2007–2012) .....	23
Tabelle 6:	Reinigungsleistung der DLG-geprüften Anlagen (DLG 2007–2012).....	25
Tabelle 7:	Referenzbedingungen Stallanlage für Mastschweine und Eckwerte nach DIN 18910 .....	36
Tabelle 8:	Druckverluste der Referenzanlagen .....	38
Tabelle 9:	Referenzbedingungen Abluftreinigungsanlage .....	38
Tabelle 10:	Jahresenergiebedarf der Referenzanlagen für ein Stallgebäude.....	39
Tabelle 11:	Zusammenfassung Stromverbrauch Abluftreinigungsanlagen und Vergleich mit Angaben der DLG- Prüfberichte .....	51
Tabelle 12:	Vereinfachter Ansatz für spezifische Abschätzung der Einspareffekte .....	53
Tabelle 13:	Senkung des Jahresenergiebedarfs durch verminderte Druckverluste .....	53
Tabelle 14:	Einsparpotenziale durch Vergrößerung der Filterfläche und Reduzierung der Filtertiefe .....	55
Tabelle 15:	Senkung des Jahresenergiebedarfs durch effizientere Ventilatoren.....	55
Tabelle 16:	Einsparpotenziale durch effizientere Pumpen und Antriebe .....	56
Tabelle 17:	Einsparpotenziale bei Zuluftkühlung.....	58
Tabelle 18:	Einsparung bei Reduzierung Waschwassermenge .....	59
Tabelle 19:	Einsparpotenziale durch optimierte Reinigung .....	61
Tabelle 20:	Einsparpotenziale bei Reinigung von Teilabluftvolumenströmen.....	62
Tabelle 21:	Zusammenfassung möglicher Maßnahmen und Abschätzung Einsparpotenziale Referenzanlage 1 .....	64
Tabelle 22:	Zusammenfassung möglicher Maßnahmen und Abschätzung Einsparpotenziale Referenzanlage 2 .....	65
Tabelle 23:	Kenndaten der eingesetzten Abluftreinigung Standort 1.....	68
Tabelle 24:	Energieverbrauch Lüftung- und Abluftreinigungsanlagen .....	70
Tabelle 25:	Maßnahmen Energieeinsparung Abluftreinigung Standort 1 .....	71
Tabelle 26:	Kenndaten der eingesetzten Abluftreinigung Standort 2.....	74
Tabelle 27:	Energieverbrauch Lüftung- und Abluftreinigungsanlagen.....	76
Tabelle 28:	Maßnahmen Energieeinsparung Abluftreinigung Standort 2 .....	77
Tabelle 29:	Eingangsgrößen Berechnung Leistungsaufnahme Ventilator.....	90
Tabelle 30:	Eingangsdaten Berechnung Pumpenverbrauch .....	91
Tabelle 31:	Leistungsberechnung Ventilator Ergebnisse in Watt/Tierplatz.....	92
Tabelle 32:	Leistungsberechnung Pumpe Ergebnisse pro Tierplatz .....	93
Tabelle 33:	Daten Energieverbrauch DLG-Prüfberichte, Berechnungsgrundlagen und Abweichungen zu vorliegenden Rechnungen .....	94
Tabelle 34:	Druckverlust über Abluftkanal.....	96
Tabelle 35:	Druckverlust über Umlenkung (Kniekanal) .....	97
Tabelle 36:	Druckverlust über Umlenkung – Literaturwerte: AEL-Heft 8 (1993).....	97

## Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abluftreinigungsanlage
BHKW	Blockheizkraftwert
b.v.	Besloten Vennootschap
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
EC	Electronical Commutation
FU	Frequenzumrichter
k. A.	keine Angabe
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
MP	Mastplatz
TP	Tierplätze, hier immer für Mastplatz verwendet

# 1 Einleitung und Methodische Vorgehensweise

## 1.1 Einleitung

Abluftreinigungsanlagen werden in Tierhaltungsanlagen mit Zwangsbelüftung zur Verminderung oder Vermeidung von Belästigungen durch Stäube, Ammoniak und Gerüche eingesetzt. Damit kommen sie vorrangig nur für den Einsatz in der Schweine- und Geflügelhaltung in Betracht, während sie für die Rinderhaltung – bei der i. d. R. offene Ställe eingesetzt werden – ungeeignet sind.

In der Praxis werden Abluftreinigungsanlagen realisiert, wenn die Abstände der Stallanlagen zur nächsten Wohnbebauung oder zu empfindlichen Ökosystemen nicht ausreichend sind, um erhebliche schädliche Umweltauswirkungen auszuschließen.

Laut einer Umfrage unter Anlagenherstellern wurden in den Jahren 1997 bis 2010 in Deutschland 1.014 Abluftreinigungsanlagen errichtet, wobei 762 Anlagen auf die Schweine-, 170 Anlagen auf die Geflügelhaltung sowie 82 Anlagen auf sonstige Bereiche entfielen (HAHNE 2011). Der Schwerpunkt des Einsatzes liegt somit bei der Schweinehaltung und dabei in den Regionen mit hohem Viehbesatz. In Sachsen wurden bisher in drei Betrieben im Bereich der Schweinehaltung Anlagen zur Abluftreinigung installiert.

Seit mehreren Jahren wird die Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen kontrovers diskutiert. Der Einsatz von Abluftreinigungsanlagen ist bisher nicht generell vorgeschrieben und gilt bisher allgemein nicht als Stand der Technik bzw. beste verfügbare Technik wie er in der TA Luft (2002) und den BVT-Merkblättern (BREF) dokumentiert ist (u. a. HAHNE 2011; UBA 2003). Aus der aktuellen Entwurfsfassung der Überarbeitung des Merkblattes (European IPPC Bureau 2011) geht auch nicht hervor, ob Abluftreinigungsanlagen als beste verfügbare Technik aufgenommen werden.

Seit Anfang des Jahres 2013 können jedoch mit der Einführung der so genannten „Filter-Erlasse“ in Nordrhein-Westfalen und in Niedersachsen (MKULNV 2013; Niedersachsen 2013) Abluftreinigungsanlagen bei großen Anlagen zur Haltung von Schweinen als Stand der Technik gelten. In der Begründung heißt es, dass sie „seit Jahren erfolgreich betrieben“ werden und die Investitions- und Betriebskosten „wirtschaftlich vertretbar und verhältnismäßig“ sind (MKULNV 2013).

Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Filtersystemen und -kombinationen für die unterschiedlichen Anwendungen (Staub-, Geruchs- und/oder Ammoniakminderung) verfügbar. Für alle Systeme ist der Energieverbrauch entscheidend für die Wirtschaftlichkeit. Die Verbrauchskosten für die eingesetzten Energieträger können je nach Verfahren, Anlagengröße und Ablufführung jedoch erheblichen Schwankungen unterliegen.

## 1.2 Methodische Vorgehensweise

Aufgrund des Strukturwandels in der Schweinehaltung mit wachsenden Betriebseinheiten und der gleichzeitigen Verschärfung der Immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an Tierhaltungsanlagen wird die Errichtung von Abluftreinigungsanlagen als eine Maßnahme des Immissionsschutzes in der Genehmigungspraxis stärker gefordert. Die Errichtung und der Betrieb von Abluftreinigungsanlagen sind jedoch mit erhöhten Kosten verbunden. Zur Erhöhung der Akzeptanz und Optimierung des Anlagenbetriebes von Abluftreinigungsanlagen sind im Rahmen der vorliegenden Studie derzeit am Markt verfügbare Abluftreinigungsanlagen in Verbindung mit den Lüftungssystemen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz vergleichend zu betrachten, um darauf aufbauend Vorgaben für einen effizienten Betrieb und konkrete Empfehlungen für die in Sachsen eingesetzten Abluftreinigungsanlagen abzuleiten. Die Studie soll mit einer ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen abschließen.



Daraus ergibt sich folgende methodische Vorgehensweise für die Bearbeitung:

### Teil 1: Theoretische Grundlagen

1. Darstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Anforderungen des Immissionsschutzes (Schutz und Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen) und die gesetzlichen Anforderungen an das Stallklima (Sicherung der Luftqualität im Tierbereich) (Kap. 2)
2. Überblick über die Literaturwerte zum Energieeinsatz in der Schweinehaltung (Kap. 3)
3. Beschreibung gängiger Zwangslüftungssysteme in der Schweinehaltung und Ableitung der Einflussgrößen des Energieeinsatzes (Kap. 4)
4. Beschreibung der Verfahren zur Abluftreinigung und der am Markt verfügbaren Abluftreinigungssysteme für Schweinehaltungsanlagen und Ableitung der Einflussgrößen des Energieeinsatzes. Hierbei werden nur von der DLG zertifizierte Anlagen berücksichtigt, welche die Voraussetzungen für eine wirksame Abluftreinigung und einen ordnungsgemäßen Betrieb erfüllen (Kap. 5)

### Teil 2: Ermittlung Energieeinsatz und Abschätzung Einsparpotenziale

5. Erläuterung der Methodik für die Berechnungen zum Energieeinsatz und zu Energieeffizienzbewertungen (Kap. 6)
6. Vergleich und Bewertung der DLG-zertifizierten Systeme der Abluftreinigung in Bezug auf den notwendigen Energieeinsatz (Kap. 7)
7. Energieeffizienzbewertung und Ableitung von Maßnahmen für einen effizienteren Betrieb von Abluftreinigungsanlagen. Für die monetäre Darstellung von Einspareffekten in Bezug auf anfallende Investitionskosten werden zwei Referenzanlagen definiert (Kap. 8)
8. Anwendung der Erkenntnisse auf die Abluftreinigungsanlagen an den Standorten 1 und 2 und Ableitung möglicher Verbesserungspotenziale (Kap. 9)

Im Rahmen der vorliegenden Studie war keine messtechnische Erfassung von Energieverbräuchen, Änderung des Filterwiderstandes aufgrund von Verschmutzungen, Lastgängen etc. vorgesehen. Es wird dringend empfohlen, die theoretischen Daten anhand des praktischen Betriebes zu verifizieren und die gewonnenen Erkenntnisse weiter zu vertiefen.

## 2 Rechtliche Vorgaben zu Stalllüftung und Abluftreinigung

Anforderungen an die Lüftung von Schweineställen ergeben sich einerseits aufgrund des Tierschutzes und andererseits aufgrund immissionsschutzrechtlicher Vorgaben. Bedeutende Stellgröße ist hierbei der Zusammenhang zwischen Stallklimagegestaltung, Lüftungssystemen und Emissionsminderungsmaßnahmen. Konkrete Anforderungen an Abluftreinigungen ergeben sich aus den immissionsschutzrechtlichen Vorgaben.

### 2.1 Anforderungen des Tierschutzes

Der Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere ist deutschlandweit in der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzTV) geregelt. Die TierSchNutzTV gilt allgemein für das Halten von Nutztieren zu Erwerbszwecken.

Mit Bezug auf stallklimatische Anforderungen heißt es: Ställe müssen erforderlichenfalls ausreichend wärmedämmend und so ausgestattet sein, dass Zirkulation, Staubgehalt, Temperatur, relative Feuchte und Gaskonzentration der Luft in einem Bereich gehalten werden, der für die Tiere unschädlich ist (§ 3 Abs. 3 Nr. 2 TierSchNutzTV). In Ställen, in denen die Lüftung von einer elektrisch betriebenen Anlage abhängig ist, müssen eine Ersatzvorrichtung, die bei Ausfall der

Anlage einen ausreichenden Luftaustausch gewährleistet, und eine Alarmanlage zur Meldung eines solchen Ausfalles vorhanden sein (§ 3 Abs. 6 TierSchNutzTV).

Für die hier zu betrachtende Schweinehaltung ergeben sich daraus konkrete Mindestanforderungen an die Gaskonzentration, welche über die Stalllüftung zu realisieren sind. Die in Tabelle 1 aufgeführten Gaskonzentrationen dürfen dauerhaft nicht überschritten werden. In § 27 der TierSchNutzTV werden Mindestlufttemperaturen in Abhängigkeit vom Halungsverfahren festgelegt.

**Tabelle 1: Gaskonzentration im Aufenthaltsbereich von Schweinen gem. § 26 Abs. 3 TierSchNutzTV**

Gas	Konzentration in ppm
Ammoniak	20
Kohlendioxid	3.000
Schwefelwasserstoff	5

## 2.2 Anforderungen des Emissions- und Immissionsschutzes

Die konkreten 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 Schutz vor erheblichen Geruchsbelästigungen und den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen (Kap. 2.3).

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

- Mindestanforderungen zur Emissionsminderung an die Anlage und den Anlagenbetrieb und andererseits
- Vorgaben zum Vorsorge- und Schutzanspruch (Immissionsschutz).

### 2.2.1 Mindestanforderungen zur Begrenzung der Emissionen

Für die Schweinehaltung können nach TA Luft folgende Anforderungen an die Stalllüftung abgeleitet werden:

- Bei zwangsbelüfteten Ställen ist die DIN 18910 zu beachten. Die Art und Weise der Ablufführung ist im Einzelfall an den Bedingungen des Standortes auszurichten (Nr. 5.4.7.1 d TA Luft).
- Bei Unterflurabsaugung soll die Stallluft mit niedriger Geschwindigkeit (maximal 3 m/s) direkt unter dem Spaltenboden abgesaugt werden (Nr. 5.4.7.1 g TA Luft).
- Emissionsbegrenzungen in der gefassten Abluft gem. Nr. 5.2 TA Luft für Gesamtstaub, Schwefelwasserstoff und Ammoniak

Die **DIN 18910** beschäftigt sich mit dem Wärmeschutz geschlossener Ställe, mit Wärmedämmung und Lüftung. Im Teil 1 werden Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, wie sie für die hier zu bewer-

tende Schweinehaltung zur Anwendung kommen, erläutert: Die Norm enthält auf der Basis der Wasserdampf-, Kohlenstoffdioxid- und Wärmestrombilanz Festlegungen zur Berechnung des Luftmassenstroms im Winter und Sommer und der Wärmedämmung der Bauteile des Stalles. Sie gibt Empfehlungen zu Temperaturen und Luftraten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und der Haltungsform. Des Weiteren sollen für Anlagen zum Halten oder zur Aufzucht von Nutztieren Möglichkeiten, die Emissionen an Keimen und Endotoxinen durch dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen zu vermindern, geprüft werden (Nr. 5.4.7.1 TA Luft).

Soweit die Nummern 5.2 oder 5.4 der TA Luft keine oder keine vollständigen 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 „Reinhaltung der Luft“ als Erkenntnisquelle heranzuziehen. Im Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken der Intensivhaltung von Schweinen (UBA 2003) sind Abluftreinigungsanlagen nicht als beste verfügbare Technik benannt.

Bezüglich möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen sind insbesondere folgende **VDI-Richtlinien** relevant:

- 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

### 2.2.2 Mindestanforderungen Immissionsschutz

Die Vorsorge- und Schutzansprüche der Nachbarschaft werden für genehmigungspflichtige Anlagen über

- die Mindestabstände zur Vorsorge gegen erhebliche Geruchsbelastungen nach Nr. 5.4.7.1 TA Luft,
- die Mindestabstände zum Schutz von stickstoffempfindlichen Pflanzen und Ökosystemen nach Anhang 1 Abbildung 4 TA Luft und
- Emissionsbegrenzungen nach Nr. 5.2 TA Luft (vgl. Kap. 2.2.1)

geregelt.

Für nicht genehmigungspflichtige Anlagen können Mindestabstände über die Vorgaben der Richtlinie VDI 3894 Blatt 1 (2011) ermittelt werden. Die Richtlinie ist eine Neufassung der Richtlinien VDI 3471 und VDI 3472. Sie berücksichtigt auch die Richtlinienentwürfe VDI 3473 Blatt 1 und VDI 3474 sowie den „Nationalen Bewertungsrahmen zur Beschreibung des Standes der Technik bei Tierhaltungsverfahren“.

Im Regelfall werden die Abstandsregelungen, d. h. die Prüfung der Einhaltung der Mindestabstände, angewendet. Weiterhin werden Schutzansprüche in der TA Luft und der GIRL über Immissionswerte für Stickoxide, Stäube und Gerüche konkretisiert. Zum Nachweis der Einhaltung sind Ausbreitungsberechnungen unter Berücksichtigung von quell- und standortspezifischen Bedingungen erforderlich.

## 2.3 Anforderungen an Lüftungsanlagen

Aus den vorgestellten Vorgaben ergeben sich folgende Anforderungen an Lüftungsanlagen:

- Tierschutz
  - Einhaltung Mindesttemperatur nach § 27 der TierSchNutztV
  - Einhaltung Luftschadstoff-Grenzwerte im Tierbereich nach § 26 Abs. 3 TierSchNutztV
  - Dimensionierung Sommerluftrate, sodass der Temperaturunterschied zwischen Stall und Außenklima < 2 K bzw. 3 K beträgt nach DIN 18910

- Immissionsschutz (Verbesserung der Verteilung der nicht vermeidbaren Emissionen)
  - Freie Ableitung (Ableitung senkrecht nach oben über dem höchsten Dachpunkt)
  - große Abluftgeschwindigkeit (8–12 m/s)

Die Anforderungen und Aufgaben der Lüftungsanlage aufgrund des Tierschutzes unterscheiden sich bezüglich des Stallklimas in der Sommer- und Wintersituation erheblich (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Einflussfaktoren und Anforderungen an Lüftungsanlagen in Winter und Sommer nach DLG (2003)**

Stallklima	Winter	Sommer
Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Wärmeverluste durch raumschließende Teile</li> <li>○ Produktion von Wärme, Wasserdampf und Kohlendioxid durch die Tiere</li> <li>○ entweichende Schadgase (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) und Wasserverdunstung aus Flüssigmist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Erwärmung der raumschließenden Bauteile und Wärmeabgabe ans Stallinnere</li> <li>○ Wasserverdunstung von feuchten Oberflächen</li> <li>○ Wärmeverluste durch den Stallboden</li> </ul>
Anforderungen an Lüftungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ niedrige Luftvolumenströme</li> <li>○ Abführung des Wasserdampfes und der Schadgase</li> <li>○ Minimierung der Wärmeverluste durch Lüftung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ hohe Luftvolumenströme</li> <li>○ Abführung überschüssiger Wärme</li> <li>○ Minimierung der Temperaturdifferenz zwischen Stall und Außenluft (2 K bzw. 3 K)</li> </ul>

## 2.4 Anforderungen an Abluftreinigungsanlagen

Aus Gründen der Verhältnismäßigkeit werden Abluftreinigungsanlagen i. d. R. nur dann eingesetzt, wenn alle prozessintegrierten Maßnahmen zur Minderung der Emissionen bzw. zur Minderung der Immissionsbelastung (z. B. durch Verbesserung der Ableitbedingungen) ausgeschöpft sind und der Schutz der Umwelt vor schädlichen Einwirkungen nicht auf andere Art und Weise sichergestellt werden kann. Sie kommen zur Reduzierung der Staub-, Ammoniak- und Geruchsemissionen und zur Erfüllung von Auflagen in immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren zum Einsatz.

Seit Anfang des Jahres 2013 wurden mit der Einführung der so genannten „**Filter-Erlasse**“ Abluftreinigungsanlagen für Neu- und Änderungsgenehmigungen in Nordrhein-Westfalen und in Niedersachsen verpflichtend vorgeschrieben (MKULNV 2013; Niedersachsen 2013). Die Länderregelungen greifen damit über die derzeitigen Regelungen der TA Luft hinaus. Konkret sind die

- Abscheidung von Staub von mehr als 70 %,
- Abscheidung von Ammoniak von mehr als 70 %,
- Geruchskonzentration am Reingasaustritt von  $\leq 300 \text{ GE/m}^3$  und dass kein Rohgasgeruch wahrnehmbar ist vorgegeben.

Im Genehmigungsverfahren ist die ausreichende Wirksamkeit durch Vorlage eines Sachverständigengutachtens oder einer entsprechenden Zertifizierung nachzuweisen (MKULNV 2013). Hinsichtlich einer Zertifizierung kann derzeit auf die DLG-Prüfungen zurückgegriffen werden. Im Betrieb ist die Einhaltung dieser Anforderungen durch erstmalige und wiederkehrende Messungen (vgl. Nr. 5.3.2.1 TA Luft) nachzuweisen. Grundsätzlich ist ein elektronisches Betriebstagebuch zu führen.

Mit dem Erlass des Landes Nordrhein-Westfalen und dem Erlass in Niedersachsen werden die Abluftreinigungsanlagen für große Anlagen zur Schweinehaltung (gem. Nr. 7.1.7.1, 7.1.8.1 und 7.1.9.1 Anhang I der 4. BImSchV [vgl. Tabelle 3]) in den Stand der Technik zur Reduzierung von Staub-, Ammoniak- und Geruchsemissionen erhoben. Der Einbau einer Abluftreinigungsanlage ist weiterhin nachträglich für Anlagen zur Schweinehaltung (gem. Nr. 7.1.7, 7.1.8 und 7.1.9 An-

hang I der 4. BImSchV) anzuordnen, wenn die Anlage schädliche Umwelteinwirkungen hervorruft. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Anzahl der Anlagen im Freistaat Sachsen, die unter die o. g. Regelung fallen würden.

**Tabelle 3: Große Anlagen zur Schweinehaltung gem. Anhang I der 4. BImSchV in Sachsen**

Nr. gem. Anhang I der 4. BImSchV	Kapazität der Stallanlage	Anzahl der Anlagen in Sachsen, Statistik Sachsen 2010
7.1.7.1	Mastschweine (Schweine von 30 Kilogramm oder mehr Lebendgewicht) mit 2.000 oder mehr Mastschweineplätzen	49
7.1.8.1	Sauen einschließlich dazugehöriger Ferkelaufzuchtplätze (Ferkel bis weniger als 30 Kilogramm Lebendgewicht) mit 750 oder mehr Sauenplätzen	28
7.1.9.1	Ferkel für die getrennte Aufzucht (Ferkel von 10 Kilogramm bis weniger als 30 Kilogramm Lebendgewicht) mit 6.000 oder mehr Ferkelplätzen	5

### 3 Energieeinsatz in der Schweinehaltung

Der Einsatz von Energie in der Nutztierhaltung wird bestimmt durch die Bereitstellung von Wärme und die notwendige elektrische Energie für die Stallbelüftung, Beleuchtung und Fütterung (Motoren) einschl. Vorketten. Energieeffizienzbeurteilungen führen in Abhängigkeit von den Systemgrenzen zu unterschiedlichen Ergebnissen. In der vorliegenden Studie wird die Systemgrenze eindeutig auf die Lüftung und Abluftreinigung der Abluft begrenzt. Einen Überblick über vorliegende Angaben zum Stromverbrauch in der Schweinehaltung in der Literatur gibt Tabelle 4.

**Tabelle 4: Literaturstudie Energiebedarf Schweinehaltung**

	Einheit	Stromverbrauch	Quelle
Sauenstall			
Lüftung (ohne Abluftreinigung)	kWh/(TP*a)	50– 5	KTBL (2008)
Lüftung mit Abluftreinigung	kWh/(TP*a)	28,6–96,6	DLG (2007–2012)
davon Pumpen	kWh/(TP*a)	15–76	DLG (2007–2012)
Mehrverbrauch Abluftreinigung	kWh/(TP*a)	25	KTBL (2006)
Beleuchtung	kWh/(TP*a)	28–33	KTBL (2008)
Fütterung/Reinigung	kWh/(TP*a)	5–7	KTBL (2008)
Ferkelaufzucht	kWh/(Ferkel*a)	1–4	KTBL (2008)
Schweinemast	kWh/(Mastschwein*a)	20–40	KTBL (2008)

Die Auswertung der veröffentlichten Daten zu Energieverbräuchen in der Schweinezucht zeigen, dass Lüftungs- und Abluftreinigungsanlage einen wesentlichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Stallanlagen haben. Weiterhin ist festzustellen, dass die Literaturwerte eine große Streubreite für den Energiebedarf aufweisen.

# 4 Lüftung von Schweineställen

Lüftungsanlagen in der Tierhaltung werden zum Erzeugen einer guten Luftqualität und zum Einhalten angemessener Temperaturen eingesetzt. Beide Parameter haben einen großen Einfluss auf das Wohlbefinden und damit auf die Leistung der Tiere.

Die Dimensionierung von Zwangslüftungsanlagen orientiert sich an der DIN18910 (2004). Die DIN legt Mindestluftstraten und Temperaturen in Abhängigkeit von der Tierart und -masse sowie der Klimazone fest. Im Groben wird zwischen dem Sommer- und dem Winterbetrieb unterschieden. Im Sommer liegt das Hauptaugenmerk darauf, die Temperatur im Stall auf einem erträglichen Niveau zu halten. Im Winter dagegen sind die Lasten wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Ammoniak abzuführen, ohne dass die Temperaturen im Stall zu niedrig werden oder die Tiere Zugerscheinungen ausgesetzt sind. Bedeutende Stellgröße ist hierbei der Zusammenhang zwischen Stallklimagestaltung und Tiergesundheit (vgl. Kap. 2.1).

Auf Basis von umfangreichen Messungen in Stallanlagen der sächsischen Schweinehaltung wurde ein Ratgeber entwickelt, welcher die wesentlichen Stellgrößen der Stallklimaführung und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Lüftungsanlagen aufzeigt (SLK 2008). Für eine detaillierte Erläuterung von Lüftungssystemen und stallklimatischen Anforderungen wird auf diesen Ratgeber und die für diesen Themenbereich erschienene DLG-Unterlage (DLG 2003) verwiesen. Nachfolgend werden gängige Zwangsentlüftungsverfahren kurz vorgestellt und anschließend die den Energieverbrauch bestimmenden Parameter (energetischen Einflussgrößen) herausgearbeitet.

## 4.1 Zwangslüftungsverfahren

Ein Zwangslüftungssystem kann grundsätzlich als

- Überdrucklüftung (Lüfter fördert Außenluft),
- Unterdrucklüftung (Lüfter fördert Abluft),
- Gleichdrucklüftung (Lüfter fördert Zu- und Abluft)

ausgeführt werden.

Im Regelfall wird die **Unterdrucklüftung** eingesetzt. Im Vergleich zur Überdruck- und Gleichdrucklüftung fallen für die Unterdrucklüftung geringere Investitions- und Betriebskosten an.

Die Art der Zuluft- und Ablufführung hat dabei großen Einfluss auf die Raumströmung. Hierfür stehen verschiedene Systeme zur Verfügung bzw. werden auch eigene Konstruktionen errichtet. Die Zuordnung der einzelnen praxisüblichen Zwangslüftungssysteme der Schweinehaltung zeigt Abbildung 1.

Der ausreichende Luftaustausch wird durch Strahl Lüftung oder Verdrängungslüftung erreicht. Um eine reine Verdrängungslüftung handelt es sich bei der Porendeckenlüftung und reine Strahl Lüftung wird über das identisch benannte System realisiert. Bei allen anderen aufgeführten Systemen liegt eine Kombination beider Luftzuführungen vor.

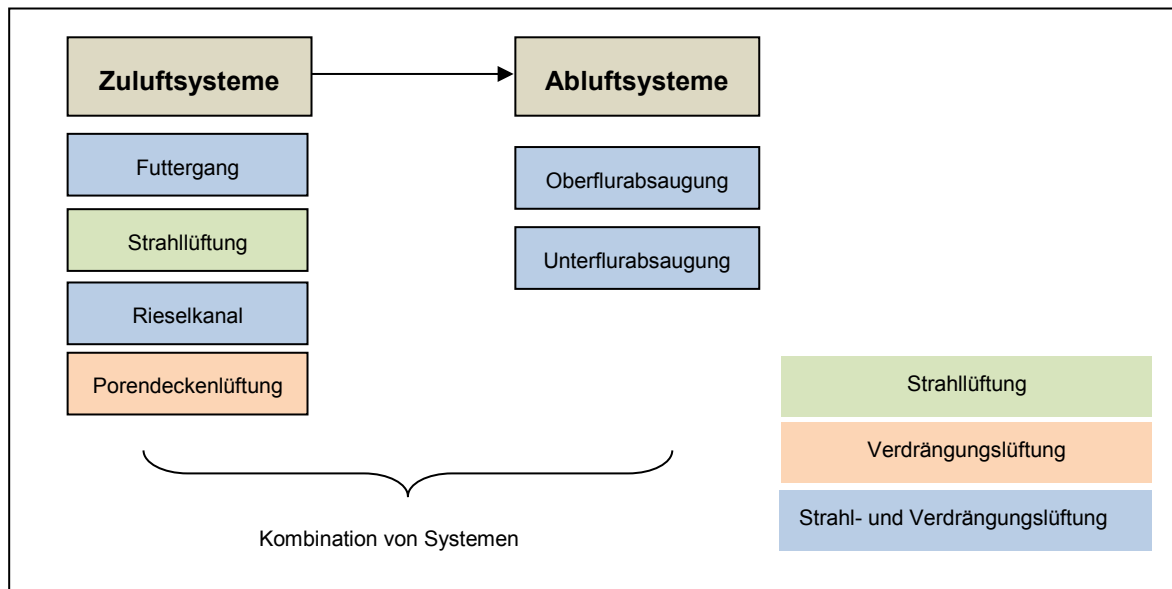


Abbildung 1: Zu- und Abluftsysteme von Zwangslüftungen der Schweinhaltung

## 4.2 Regelung

Die Anforderungen an die Lüftungsanlagen (vgl. Kap. 2.3) erfordern eine Technik zur Regelung des Luftvolumenstroms und der Temperatur.

In der gegenwärtigen Praxis wird der Luftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperatur im Stall und über manuelle Einstellung der Tiermasse geregelt. Entsprechend variiert die Lüfrate im Jahresverlauf erheblich. Die Sommerlüfrate kann somit das Acht- bis Zehnfache, teilweise sogar bis zum 20-fachen der Mindestlüfrate im Winter betragen.

Folgende grundsätzliche Regelungen des Luftvolumenstromes kommen einzeln oder in Kombination zum Einsatz:

- Steuerung durch Zu- und Abschalten von Ventilatoren (Gruppenschaltung)
- Drosselregelung, d. h. Verringerung Abluftquerschnitt (Stellklappen, Sperrschieber) i. V. m. Messventilatoren
- Drehzahlregelung (s. nachfolgend genannte Regelgeräte)

Mit geringer Bedeutung in der Praxis ist noch die Regelung über Schaufelverstellung/Drallregelung zu nennen.

Folgende Geräte werden zur Drehzahlregelung des Antriebsmotors des Ventilators (s. dazu Kap. 5.3.1.3) eingesetzt:

- Stufentransformator (Spannungssteuerung)
- Phasenanschnittsteuerung (Spannungssteuerung)
- Frequenzumrichter (Frequenzsteuerung)
- EC-Technik (Electronical Commutation)

Eine gleichzeitige Optimierung der klimatischen Bedingungen im Stallbereich und eines energieeffizienten Lüftungsbetriebes kann über den Einsatz von Klimacomputern in Kombination mit den genannten Regelgeräten erreicht werden. Diese sind in der Lage, über Klimakurven verschiedene Lüftungsparameter (z. B. Temperatur, Notwendigkeit Heizen, min. und max. Lüfrate, Regelbereiche) aufeinander abzustimmen. Die Klimakurve wird entsprechend der Tieranzahl, dem Alter und Gewicht der Tiere sowie der Genetik eingestellt. Regelbereiche der Temperatur zur Einstellung der Lüfrate richten sich nach dem Alter und der Empfindlichkeit der Tiere. Durch die Vorgabe einer Klimakurve und auch kurzfristigen Anpassung bei sich ändernden Bedingungen bzw. Nachjustierung können notwendige Lüfraten realisiert werden,

welche zu Energieeinsparungen führen. Eine weitere Verbesserung soll zukünftig durch die Anpassung der min./max. Luftrate in Abhängigkeit von Luftqualitätsmessungen durch z. B. CO<sub>2</sub>-Sensoren erzielt werden.

Vorgaben zur Bewertung der einzustellenden oder eingestellten Parameter der Regelung sind dem Ratgeber zur Stallklimatisierung (SLK 2008) zu entnehmen.

## 4.3 Energieeinsatz

Der Energieverbrauch von Lüftungsanlagen bestimmt sich aus der notwendigerweise zu fördernden Luftmenge und den zu überwindenden Widerständen im Lüftungskanal vom Stallbereich bis zum Ventilator und der daran anschließenden Luftreinigungseinheit.

Aus lüftungstechnischer Sicht gibt es mehrere Stellgrößen:

- **Luftgeschwindigkeit:** Die Luftgeschwindigkeit im Lüftungskanal geht in die Widerstandsberechnung quadratisch ein. Mit einer Verdopplung der Geschwindigkeit wird eine vierfache Leistung zur Luftförderung benötigt.
- **Luftführung:** Die Luftführung sollte möglichst geradlinig erfolgen. Ist eine Richtungsänderung dennoch erforderlich, sollte diese nicht rechtwinklig, sondern zumindest in drei 30°-Abstufungen ausgeführt werden. Dadurch kann der Energiebedarf zur Luftförderung erheblich reduziert werden. Auf eine strömungstechnisch günstige Gestaltung der Zu- und Ablufführung ist zu achten (vgl. SLK 2008)
- **Ventilator:** Das Auslegen der Ventilatoren erfolgt immer auf den speziellen Einsatzfall. Neben der eigentlichen Kennlinie ist auch der Wirkungsgrad zu berücksichtigen. Dieser nimmt im Allgemeinen erheblich ab, wenn der Ventilator weit unterhalb seines Auslegungsfalls betrieben wird. Bei den großen zu fördernden Luftmengen werden meist mehrere Ventilatoren parallel betrieben. Hier kann es günstig sein, einzelne Ventilatoren im Winterfall abzuschalten und den oder die restlichen mit einem besseren Wirkungsgrad zu betreiben. Es sollten auch Ventilatoren zum Einsatz kommen, bei denen die Drehzahl geregelt und damit die Förderleistung angepasst werden kann.
- **Steuerung:** Wird nur ein Stallbereich durch die Lüftungsanlage abgesaugt, kann die erforderliche Luftmenge direkt mit einem regelbaren Ventilator eingestellt werden. Werden mehrere Stallbereiche durch die Lüftungsanlage abgesaugt, kann jeder Stallbereich durch eine Volumenstromregelung für sich geregelt werden. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die Drosselung und damit der Druckverlust über die Volumenstromregelung und damit einhergehend der Energieverbrauch möglichst niedrig ausfallen.

Aus den vorgenannten Punkten heraus kann die Beurteilung der Lüftungsanlagen erfolgen.



# 5 Abluftreinigungsanlagen für Schweinehaltungsanlagen

## 5.1 Verfahren zur Abluftreinigung und energetische Einflussgrößen

Verfahren zur Abluftreinigung werden in der Schweinehaltung zur Begrenzung von Staub-, Ammoniak- und Geruchsemissionen eingesetzt. Für 12 Abluftreinigungslagen, davon 11 für Schweineställe, liegen Prüfberichte über die Zertifizierung der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft e. V. (DLG 2007–2012) vor (s. dazu auch Kap. 5.2).

Geeignete und verbreitete Verfahren für eine zuverlässige Abtrennung von Abluftverunreinigungen sind Gaswäsche und Biofilter. Diese Verfahren werden nachfolgend vorgestellt. Für eine detaillierte Erläuterung verfahrenstechnischer Zusammenhänge und technischer Umsetzungsmöglichkeiten wird auf die entsprechende Fachliteratur (u. a. KTBL 2006; HAHNE et. al 2007, 2011) verwiesen.

### 5.1.1 Biofilter

Einen Überblick über die Reinigungsleistung, die Grundlagen und die Bewertungskriterien für die Auswahl und den Einsatz von Biofiltern gibt die VDI-Richtlinie 3477. Bezüglich weiterführender Informationen wird daher auf diese Richtlinie verwiesen.

#### 5.1.1.1 Verfahrensbeschreibung

Biofilter werden hauptsächlich zur Eliminierung von Geruchsstoffen eingesetzt. Zusätzlich kann eine Abscheidung von Staubpartikeln erfolgen. Verfahrensprinzip ist die Durchleitung des Abluftstroms durch eine Schüttung aus organischem Material wie bspw. 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 sowie der Umgebungsbedingungen eine Wasserzufuhr in das Filtermaterial erforderlich. Realisiert wird dieses entweder über eine (quasi-)kontinuierliche Beregnung des Biofilters oder eine Befeuchtung der Abluft vor Eintritt in den Biofilter. Zur Ausschleusung der abgeschiedenen Schadstoffe bzw. deren Abbauprodukte aus dem Biofilter muss das Biofiltermaterial in regelmäßigen Intervallen ausgetauscht werden. Alternativ können bei höheren Berieselungsraten und Wasserumwälzung die Schadstoffe auch durch Abschlämmung des Umlaufwassers aus dem System entfernt werden.

Problematisch für den Betrieb von Biofiltern sind einerseits eine intervallweise Beschickung mit Abluft (z. B. Rein-Raus-Betrieb von Stallungen) und andererseits hohe Ammoniakfrachten in der Abluft. Durch eine nur zeitweise Beschickung mit Abluft kann die Filterwirkung geringer werden, sodass eine erneute Impfung der Biofilter erforderlich wird. Bei zu hohen Ammoniakfrachten kann die Funktion der geruchsstoffabbauenden Mikroorganismen durch angereicherte Abbauprodukte inhibiert werden. Des Weiteren wird ein verstärkter Abbau des Filtermaterials (Kompostierung) induziert, der zu einem starken Anstieg des Druckverlustes im Filter führen kann und die Lebensdauer des Filtermaterials deutlich reduziert. Erhöhte Staubgehalte können die Reinigungsleistung ebenfalls negativ beeinträchtigen, weil sich Staubpartikel am Filtermaterial anlagern und so den freien Strömungsquerschnitt des Filters reduzieren. Es resultieren verkürzte Gasverweilzeiten und eine entsprechend geringere Schadstoffabscheidung sowie ein erhöhter Druckverlust des Filters. Zur Vorabscheidung von Staub kann an der Lufteintrittsseite des Filters grobkörniges Filtermaterial eingesetzt werden. Allerdings sind auch mit einer solchen Anpassung nur relativ geringe Staubfrachten zu bewältigen, bei deutlich erhöhtem Staubanteil ist eine vorgeschaltete Abscheidung notwendig.

Vor allem aufgrund der beschriebenen Problematik bei erhöhten Ammoniakfrachten werden Biofilter zur Reinigung von Abluft aus der Tierhaltung meist in Kombination mit einem Waschverfahren eingesetzt.

### 5.1.1.2 Systemaufbau

Wesentlicher Bestandteil eines Biofilters ist die Filterschüttung, die auf einem Spaltenboden aufliegt. Die Abluft wird unterhalb des Spaltenbodens in das System geführt, sodass die Abluft vertikal durch das Filtermaterial strömt. Um die Filterbelastung zu vergleichmäßigen, ist unterhalb des Spaltenbodens eine Druckkammer installiert, die bei Bedarf mit Strömungseinbauten ausgestattet werden kann. Am Boden der Druckkammer befindet sich die Wasservorlage, in welcher überschüssiges Wasser aufgefangen wird. Der einzige Stromverbraucher des Systems ist die Berieselungspumpe, die zur Befeuchtung des Filtermaterials Wasser über ein Düsensystem aus der Wasservorlage pumpt und von oben auf die Schüttung aufbringt. Bei ausreichendem Leitungsvordruck kann auf diese Pumpe auch verzichtet werden, allerdings ist die Beregnungsmenge in diesem Fall passend auszulegen, um einen unnötig hohen Wasserverbrauch zu verhindern. Daneben existieren auch Biofilter mit horizontaler Durchströmung des Filtermaterials. Diese kommen vor allem bei mehrstufigen Abluftreinigungsanlagen zum Einsatz.

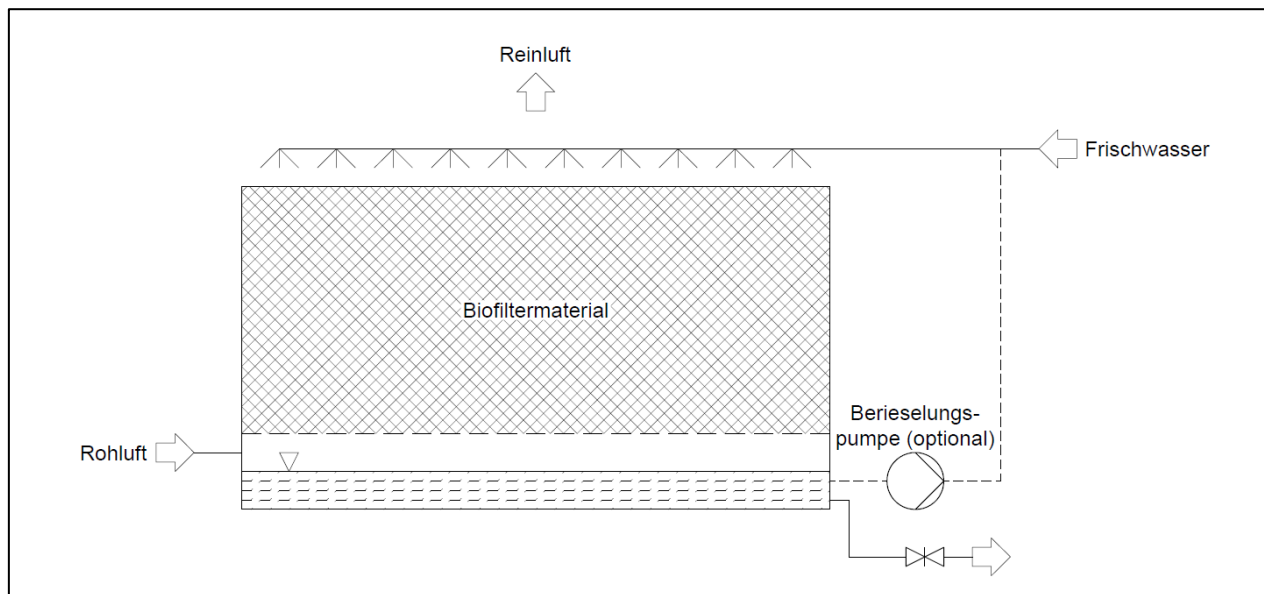


Abbildung 2: Prinzipskizze vertikal durchströmter Biofilter

### 5.1.1.3 Energetische Einflussgrößen

Zur Beeinflussung des Energieverbrauchs bei Betrieb eines Biofilters gibt es neben der Beeinflussung der Auslegung der Lüftungsanlage (s. hierzu Kap. 4.2) folgende Stellgrößen:

- **Pumpen:** Pumpen als stromaufnehmende Aggregate kommen bei Biofiltern lediglich zur unbedingt erforderlichen regelmäßigen Befeuchtung des Filtermaterials in Form einer Berieselungspumpe zum Einsatz. Wird Leitungswasser zur Befeuchtung eingesetzt, ist der Leitungsdruck zur Berieselung in der Regel ausreichend.
- **Einbauten und dadurch entstehende Druckverluste:** Ein wesentlicher Energiebedarf entsteht beim Betrieb eines Biofilters am Abluftventilator, weil der zusätzliche Druckverlust der Filterschüttung überwunden werden muss. Biofilter können einen zusätzlichen Druckverlust von 20 Pa bis zu 150 Pa darstellen, wodurch eine deutlich erhöhte Belüftungsleistung zur Aufrechterhaltung eines bestimmten Abluftvolumenstroms erforderlich ist. Aus energetischer Sicht ist daher ein möglichst geringer Druckverlust der Schüttung anzustreben. Hierfür sind, sofern eine Staubbelastung des Abluftstroms zu erwarten ist, grobkörnige Filtermaterialien (z. B. grobes Wurzelholz) zur primären Staubabscheidung einzusetzen, um einen erhöhten Druckverlust durch Zusetzen einer feinkörnigen Filterschüttung zu vermeiden.
- **Anströmfläche/Schichtdicke-Verhältnis:** Des Weiteren ist eine möglichst geringe Filterhöhe anzustreben, weil der Druckverlust proportional mit dem Strömungsweg ansteigt und proportional zum Quadrat der Anströmfläche abnimmt. Um eine zuverlässige Geruchsstoffeliminierung sicherzustellen, ist die für die Geruchstoffabsorption erforderliche Kontaktzeit zwischen Abluftstrom und Biofilter jedoch unbedingt zu gewährleisten. Eine Verringerung der Filterhöhe muss daher mit einer Vergrößerung der Anströmfläche einhergehen. Um eine gleichmäßige Beaufschlagung des Filters mit der Abluft zu ermöglichen, können hierbei zusätzliche Strömungseinbauten erforderlich werden. Die energetisch opti-

mierte Dimensionierung des Biofilters muss somit eine möglichst große Anströmfläche unter Berücksichtigung des zusätzlichen Druckverlustes durch eventuell erforderliche Strömungseinbauten anstreben.

- **Wartung:** Weil sich der Druckverlust des Filtermaterials mit fortschreitender Betriebsdauer erhöht, sollte aus energetischer Sicht ein möglichst häufiger Materialaustausch stattfinden. Letztendlich sind diesbezüglich allerdings Grenzen durch die hierbei entstehenden Kosten gesetzt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass frisches Filtermaterial erst nach einigen Tagen seine volle Abscheideleistung erreicht.
- **Steuerung:** Bisher verwendete Steuerungen der Luftmenge erfolgen ausschließlich über die Lüftungsanlage in Abhängigkeit von der Stalltemperatur. Energetisch sinnvoll ist eine Signalgebung für die erforderliche Reinigung bei erhöhtem Druckverlust durch Verschmutzung.

Der tatsächliche Strombedarf ist neben den beschriebenen verfahrenstechnischen Aspekten natürlich ebenfalls maßgeblich von der Energieeffizienz der eingesetzten Pumpen und Ventilatoren abhängig. Für eine nähere Betrachtung verfügbarer Aggregate und marktüblicher Systeme zur Leistungsregelung wird auf Kap. 5.3.1 verwiesen.

## 5.1.2 Wäscher

Einen Überblick über die verfahrenstechnischen Grundlagen, die Auslegung und die konstruktive Ausführung der Anlagen und typische Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Biowäschern gibt die VDI-Richtlinie 3478 Blatt 1. Der Stand der Technik für Rieselbettreaktoren wird in der VDI-Richtlinie 3478 Blatt 2 festgelegt. Bezüglich weiterführender Informationen wird daher auf diese Richtlinien verwiesen.

### 5.1.2.1 Verfahrensbeschreibung

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Abluftreinigung ist die Abluftwäsche. Die Verfahren werden generell zwischen

- Wasserwäsche,
- chemischer Wäsche,
- biologischer Wäsche und
- biologisch-chemischer Wäsche

unterschieden. Gängige Verfahrensprinzipien sind

- Rieselbettreaktoren und
- Sprühturmwäscher.

Grundprinzip ist die Zugabe eines Waschmediums, z. B. durch Verdüsung, in den Abluftstrom. Die Waschflüssigkeit wird kontinuierlich umgewälzt, bindet Staubpartikel und absorbiert, abhängig vom eingesetzten Waschmedium im Abluftstrom enthaltene Schadgase. Wird Wasser als Waschmedium eingesetzt, handelt es sich um biologische Wäscher. Hier werden Abluftinhaltsstoffe von den in der Waschflüssigkeit wachsenden Mikroorganismen abgebaut.

In der so genannten chemischen Wäsche werden dem Waschwasser Chemikalien zur Erhöhung der Aufnahmekapazität und/oder Selektivität des Waschmediums zugesetzt. Ein mikrobieller Stoffumsatz findet i. d. R. nicht statt.

Durch den Einsatz von Säuren kann die Aufnahmekapazität für Ammoniak deutlich erhöht werden. Je geringer der pH-Wert der Waschflüssigkeit eingestellt wird, desto mehr Ammoniak kann in Form von Ammoniumionen in der Waschflüssigkeit gelöst werden. Üblicherweise werden daher pH-Werte < 4 eingestellt. Ein Geruchsstoffabbau ist nur bedingt möglich, weil sich aufgrund des sauren Milieus kein biologischer Bewuchs bildet.

Ammonium und andere abgeschiedene Stoffe werden regelmäßig durch Abschlämmen aus dem umgewälzten Waschwasser ausgetragen. Eine ausreichende Abschlämmung ist für die gesicherte Reinigungsleistung zu garantieren.

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 Verbes-

serung 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. Zum Einsatz kommen hierfür überwiegend Füllkörper aus Kunststoff mit einer großen inneren Oberfläche, hohen Stabilität und gutem Selbstreinigungsvermögen (KTBL 2006). Wäscher, in denen das Waschmedium wie beschrieben über Strömungseinbauten verregnet wird, werden als Rieselbettreaktoren bezeichnet.

Die Strömungseinbauten dienen neben der Vergrößerung der Stoffaustauschfläche in biologischen Wäschern auch als Ansiedlungsfläche für Mikroorganismen, welche die in der Waschflüssigkeit gelösten Gase, vor allem Ammoniak, abbauen. Durch die permanente Reduktion von Ammonium kann bei den biologischen Wäschern auch bei neutralen pH-Werten eine hohe Reinigungsleistung bezüglich Ammoniaks erzielt werden. Durch den Eintrag von Ammoniak steigt der pH-Wert und sinkt bei der Oxidation von Ammoniak zu Nitrit und Nitrat in der Waschflüssigkeit.

In der biologisch-chemischen Wäsche wird eine weitere Verbesserung der Abscheideleistung durch den Einsatz von Säuren (in der Regel Schwefelsäure) erzielt. Die Säurezugabe ist hier allerdings auf einen für die Mikroorganismen verträglichen pH-Wert von ca. 6,4 beschränkt.

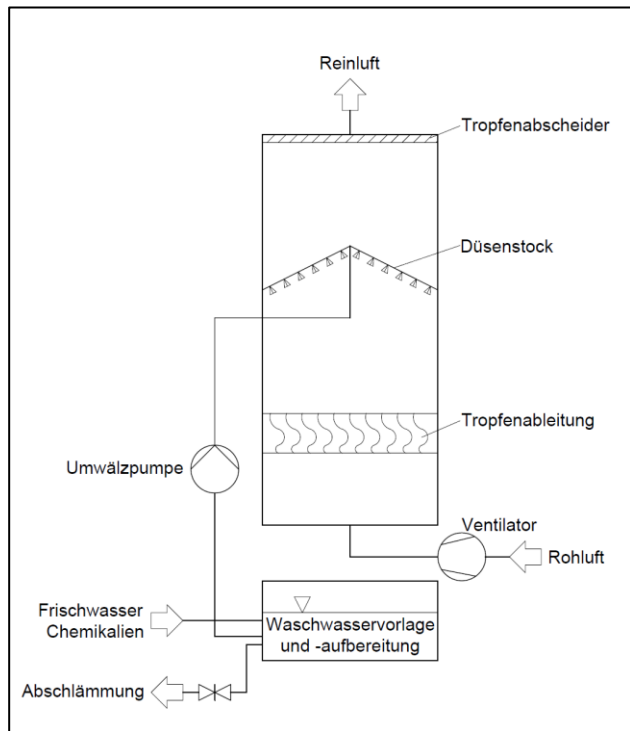
### 5.1.2.2 Systemaufbau

Abluftwäscher sind, wie beschrieben, sowohl als Sprühturmwäscher als auch als Rieselbettreaktor verbreitet.

Sprühturmwäscher bestehen aus einem vertikalen Zylinder, in welchem das Waschmedium über einen Düsenstock in die aufwärtsströmende Abluft eingedüst wird. Die Ausbildung eines möglichst feinen Sprühbildes ist hier entscheidend, um durch die Bereitstellung einer großen Stoffaustauschfläche auch bei geringen Kontaktzeiten einen ausreichenden Stoffaustausch sicherzustellen. Hierfür ist aufgrund des hohen Druckverlustes am Düsenaustritt der kleinen Düsen generell ein relativ großer Vordruck erforderlich. Im Wäscher kommt es unvermeidlich zur Bildung von Aerosolen, die vor Austritt des Luftstroms abgeschieden werden müssen. Tropfenabscheider sind daher ein unverzichtbarer Bestandteil des Sprühturmwäschers. Um einer Verstopfung des Tropfenabscheiders durch Staubpartikel entgegenzuwirken, kann bei Bedarf ein automatisches Abreinigungssystem (z. B. mittels Hochdruckpumpe) installiert werden. Das abfließende Waschwasser wird gesammelt und einem Vorlagebehälter zugeführt. Vor der Rezirkulation in den Wäscher ist eine Abscheidung der aufgenommenen Staubpartikel erforderlich, um eine Verstopfung der Düsen zu vermeiden. Gängige Abreinigungsverfahren sind Sedimentation zur Abscheidung grober Partikel und anschließende (mehrstufige) Filtration.

Das Herzstück des Rieselbettreaktors ist die Füllkörperpackung, die wie beschrieben einen verbesserten Stoffübergang ermöglicht und als Siedlungsfläche für Mikroorganismen dient. Die Anforderungen an die Füllkörper sind eine große spezifische Oberfläche (üblich sind ca.  $100\text{--}500\text{ m}^2/\text{m}^3$  (KTBL 2006)), ein geringer Druckverlust, eine geringe Anfälligkeit gegenüber Verstopfungen sowie gute Reinigungseigenschaften.

Die Abluft durchströmt das Rieselbett entweder vertikal von unten nach oben (Gegenstrom) oder horizontal (Kreuzstrom). Dabei ist sowohl ein Unterdruckbetrieb (Ventilator am Ausgang) als auch ein Überdruckbetrieb (Ventilator am Eingang) möglich, wobei aus Verschleißgründen üblicherweise der Überdruckbetrieb bevorzugt wird. Um den Austrag von Aerosolen zu vermeiden, ist dem Rieselbett üblicherweise ein Tropfenabscheider nachgeschaltet (in mehrstufigen Systemen kann die Funktion des Tropfenabscheiders auch durch andere Systemkomponenten, z. B. einen Biofilter, übernommen werden). Die Füllkörperpackung wird von oben entweder kontinuierlich oder in Intervallen mit Waschflüssigkeit berieselt. Die Flüssigkeitsaufgabe kann durch Düsen oder spezielle Flüssigkeitsverteiler gleichmäßig werden. Die abfließende Waschflüssigkeit wird unterhalb des Rieselbetts in einer Waschwasservorlage gesammelt und mithilfe einer Umwälzpumpe erneut über den Füllkörpern verrieselt. Die Waschwasservorlage ist üblicherweise mit einer Füllstandsregelung ausgestattet, anhand derer die Frischwasserzufuhr zum Ausgleich von Verdunstungs- und Abschlämmlverlusten geregelt wird. Die Abschlämmung erfolgt leitfähigkeitsgesteuert über die Umwälzpumpe. Kommt eine pH-Regelung zum Einsatz, wird die eingesetzte Chemikalie (in der Regel Schwefelsäure) über eine separate Dosierpumpe direkt in den Vorlagebehälter gepumpt.



**Abbildung 3: Prinzipskizze Sprühturmwäscher**

### 5.1.2.3 Energetische Einflussgrößen

Zur Beeinflussung des Energieverbrauchs beim Betrieb eines Wäscher gibt es neben der Beeinflussung der Auslegung der Lüftungsanlage folgende Stellgrößen:

- **Pumpen:** Der energetische Aufwand für den Betrieb der Umwälzpumpen wird im Wesentlichen durch die Menge an umgewälztem Waschmedium und die erforderliche Förderhöhe sowie den erforderlichen Vordruck zur Verdüsung bestimmt. Pumpen sollten möglichst exakt für den erforderlichen Volumenstrom ausgelegt sein und, sofern sich die Fördermengen im zeitlichen Verlauf ändern, mit einem Frequenzumrichter (FU) geregelt werden.
- **Einbauten und dadurch entstehende Druckverluste:** Der Druckverlust eines Abluftwäscher wird durch alle durchströmten Bauteile der Wäschereinheit definiert. Die wesentlichen Strömungswiderstände entstehen
  - im Falle eines Rieselbettes durch die Füllkörperschüttung und den Tropfenabscheider,
  - im Sprühturmwäscher durch den Tropfenabscheider.

Erhöhte Strömungswiderstände (Druckverlust bis ca. 100 Pa) machen eine deutlich größere Leistung des Abluftventilators zur Förderung des erforderlichen Volumenstroms notwendig.

- **Anströmfläche/Schichtdicke-Verhältnis:** Energetisch vorteilhaft ist ein großes Anströmfläche/Schichtdicke-Verhältnis. Strömungsgeschwindigkeit und Schüttungstiefe sind möglichst gering zu halten, was in beiden Fällen die Schaffung eines möglichst großen durchströmten Querschnitts bzw. eine große Anströmfläche bedeutet. Zugunsten einer weiteren Minimierung der Füllkörpertiefe in Strömungsrichtung der Abluft ist eine auf die erforderliche Mindestreinigungsleistung optimierte Auslegung erforderlich. Jede Erhöhung der Reinigungsleistung, die über das erforderliche Maß hinausgeht, führt aufgrund der größeren Schüttungstiefe zu einer Erhöhung des Strömungswiderstandes. Praktisch ist eine exakte Dimensionierung allerdings kaum umsetzbar, weil die genauen Abluftbedingungen im Voraus nicht bekannt sind und die erforderlichen Reinluftbedingungen für jeden Betriebszustand sicher eingehalten werden müssen. Eine Überdimensionierung ist daher in der Regel nicht vermeidbar und im Zweifelsfall durch eine Vergrößerung der Anströmfläche zu realisieren.
- **Konstruktion/Auslegung:** Der Aufbau eines Rieselbettes sollte zugunsten eines geringen Energieaufwandes für die Flüssigkeitsumwälzung hoch und schlank erfolgen, um bei vorgegebenem Volumen eine möglichst geringe Flüssigkeitsaufgabefläche zu ermöglichen. Aufgrund des relativ langen Strömungsweges kann so auch bei geringeren Bereg-

nungsmengen eine ausreichende Benetzung der Füllkörper und ein gleichmäßiger Phasenkontakt mit der Abluft sichergestellt werden. Grenzen sind der Reaktorhöhe neben konstruktiven Aspekten durch die Aufnahmekapazität des Waschmediums gesetzt. Es muss stets sichergestellt sein, dass auch im unteren Bereich des Wäschers die Reinigungsleistung und der Austrag von Reaktionsprodukten (und ggf. Biomasse) nicht durch ein zu hoch beladenes Waschmedium beeinträchtigt wird. Des Weiteren muss natürlich berücksichtigt werden, dass die Förderhöhe ebenfalls Auswirkungen auf den Energiebedarf der Umwälzpumpe hat.

- **Lufführung:** Bei Rieselbettreaktoren besteht, wie bereits beschrieben, generell die Möglichkeit, Abluft und Waschmedium entweder im Gegenstrom oder im Kreuzstrom zu führen. Aus energetischer Sicht ist hier unbedingt eine Kreuzstromführung zu bevorzugen, weil diese es ermöglicht, eine große vertikale Abluftanströmfläche bei gleichzeitig geringer horizontaler Waschmediumaufgabefläche zu realisieren. So können sowohl die Anforderungen an einen minimierten Druckverlust als auch an einen möglichst geringen Pumpenaufwand bedient werden.
- **Wartung:** Ein wichtiger Aspekt zur Reduzierung des Druckverlustes ist die regelmäßige Reinigung von Füllkörpern und Tropfenabscheidern. In einigen Sprühturmwäschern werden hierfür automatische Abreinigungssysteme eingebaut, üblicherweise erfolgt die Reinigung aber manuell mit Hochdruckreiniger. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit Entfernen des auf den Füllkörpern gebildeten Biofilms die Reinigungsleistung des Wäschers unter Umständen zeitweise abnehmen kann.
- **Steuerung:** Die Beregnungsmenge in Rieselbettreaktoren wird üblicherweise proportional zur Aufgabefläche bzw. zum Auslegungsvolumenstrom festgelegt und im Jahresverlauf unabhängig vom Abluftvolumenstrom konstant gehalten. Eine Regelung des umgewälzten Waschmediumvolumens in Abhängigkeit des Abluftstroms wäre energetisch deutlich vorteilhafter, ist allerdings in der Regel verfahrenstechnisch kaum möglich, um einen ausreichenden Phasenkontakt nicht zu gefährden und einen ausreichenden Abtransport von Reaktionsprodukten zu gewährleisten. Denkbar wäre dieses nur, sofern die Möglichkeit besteht, den von der Abluft durchströmten Querschnitt zu reduzieren (z. B. im Sommer- und Winterbetrieb). Eine Möglichkeit hierzu besteht beispielsweise in einem modularen Aufbau des Wäschers bzw. Sprühturms, in dem jedes Modul separat mit Abluft beaufschlagt werden kann. Eine solche Lösung ist allerdings sehr sorgfältig zu planen bzw. im Voraus zu untersuchen, weil für das Aufrechterhalten der biologischen Aktivität ein mehr oder weniger kontinuierlicher Betrieb erforderlich ist. Wird ein Wäscher nach dem Rieselbettverfahren über einen längeren Zeitraum nicht betrieben, kann der Zeitraum bis zum erneuten Erreichen der vollen Reinigungsleistung einige Wochen betragen. Das komplette Abschalten einzelner Rieselbettmodule ist daher nicht möglich. Denkbar wäre eine Realisierung über einen alternierenden Betrieb. Eine praktische Umsetzung dieses Ansatzes existiert allerdings nicht.

Der tatsächliche Strombedarf ist neben den beschriebenen verfahrenstechnischen Aspekten natürlich ebenfalls maßgeblich von der Energieeffizienz der eingesetzten Pumpen und Ventilatoren abhängig. Eine nähere Betrachtung verfügbarer Aggregate und marktüblicher Systeme zur Leistungsregelung ist unter Kap. 5.3.1 enthalten.

### 5.1.3 Mehrstufige Abluftreinigungsanlagen

Weil mit den verschiedenen Reinigungsverfahren unterschiedliche Reinigungsleistungen für die verschiedenen abzutrennenden Schadstoffkomponenten der Abluft erzielt werden, werden zur Abreinigung aller relevanten Komponenten häufig Systeme eingesetzt, in denen mehrere Reinigungsstufen verschiedener Reinigungsverfahren in Reihe geschaltet werden. Verbreitet sind vor allem zwei- und dreistufige Reinigungsanlagen. Üblich ist eine erste Stufe als Wasser-, Chemo- oder biologisch-chemische Wäsche zur Staub und Ammoniakabscheidung in Form eines Rieselbettes. Zur primären Staubabscheidung kann der ersten Stufe eine Bedüsungseinheit vorgeschaltet werden. Zur Erhöhung der Ammoniakentfernung ist die Erweiterung um eine zweite Wäscherstufe (in der Regel ebenfalls als Rieselbett ausgeführt) möglich. Die finale Reinigungsstufe dient dem Abbau von Geruchsstoffen. Hierfür werden üblicherweise unberieselte, vertikal aufgestellte Biofilter eingesetzt. Eine Befeuchtung des Biofiltermaterials ist aufgrund der hohen Abluftfeuchte nach den ersten Reinigungsstufen in der Regel nicht erforderlich.

Die energetischen Einflussgrößen mehrstufiger Waschsysteeme entsprechen, je nach eingesetzten Technologien, den oben dargelegten Punkten.



## 5.2 Verfügbare Systeme zur Abluftreinigung

Das Angebot an Abluftreinigungsanlagen ist umfangreich. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Betrachtung beschränkt sich auf 11 Abluftreinigungssysteme, welche durch die Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e. V. (DLG 2007–2012) geprüft und für den Einsatz in der Schweinehaltung zertifiziert wurden. Diese Prüfung konkretisiert die Anforderungen der VDI-Richtlinien 3477 und 3478, welche den allgemeinen Stand der Technik dokumentieren und die Einschätzung der Eignung bestimmter Abluftreinigungstechniken erlauben. Eine Übersicht über diese Abluftreinigungsanlagen ist in Tabelle 5 dargestellt. Vertiefende Angaben sind dem Anhang 1 dieser Studie zu entnehmen.

Zur Bewertung der Abluftreinigungsverfahren hinsichtlich Einsatzzweck, Investitionsbedarf und Betrieb wurde die KTBL-Schrift 451 (KTBL 2006) veröffentlicht. Die einzelnen Verfahren sind in den DLG-Prüfberichten detailliert beschrieben. An dieser Stelle erfolgt zunächst ein Systemvergleich im Hinblick auf die eingesetzten Reinigungsverfahren und die Reinigungsleistung. Eine energetische Bewertung der am Markt verfügbaren Anlagensysteme ist Kap. 6 zu entnehmen. Zusätzlicher Energieverbrauch bei Einsatz einer Abluftreinigungsanlage entsteht zum einen durch den zusätzlichen Druckverlust der Lüftung durch die Durchströmung der Abluftreinigungsanlage, zum anderen vor allem durch den Betrieb von Pumpen für die Wäscher.

**Tabelle 5: DLG-geprüfte Abluftreinigungssysteme (DLG 2007–2012)**

DLG-Nr.	Bezeichnung	Hersteller	Anzahl Stufen	Reinigungsverfahren
5699	Abluftreinigungssystem für die Schweinehaltung	Hagola Biofilter GmbH	1	Stufe 1: Biofilter mit Sandwichschichtaufbau
5702	Dorset-Rieselbettfilter	DORSET GREEN MACHINES B.V.	1	Stufe 1: Biologische Wäsche im Rieselbettreaktor (keine pH-Regelung), biologischer Abbau in Waschwasservorlage; Vorabscheidung grober Staubpartikel durch Vorbedüsung und 90°-Umlenkung Nachgeschaltete Tropfenabscheidung
5879	Biologic Clean Air Kombiwäscher BCA 70/90	Devriecom b.v.	1	Biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,5–6,8); Vorabscheidung grober Staubpartikel durch Vorbedüsung und 90°-Umlenkung Nachgeschaltete Tropfenabscheidung
5880	"Chemowäscher (+)"	Uniqfill Air b.v.	2	Stufe 1: chemische Wäsche (pH < 4) an Lamellenwaschwand zur Abscheidung von Staub und Ammoniak Stufe 2: Biologische Wasserwäsche in Rieselbettreaktor zur Geruchseliminierung Tropfenabscheider nach jeder Stufe
5944	Zweistufige Abluftreinigungsanlage	Dr. Siemers Umwelttechnik GmbH	2	Stufe 1: biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,5–6,7) Stufe 2: Biofilter
5954	BIO Flex 2-step	SKOV A/S	2	Stufe 1: Biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,4–6,8) zur Abscheidung von Staub und Ammoniak Stufe 2: Biologische Wäsche im Rieselbettreaktor zur Abscheidung von Staub und Ammoniak (keine pH-Wert-Regelung)
5955	BIO Flex 3-step	SKOV A/S	3	Stufe 1: Biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,4–6,8) zur Abscheidung von Staub und Ammoniak Stufe 2: Biologische Wäsche im Rieselbettreaktor zur Abscheidung von Staub und Ammoniak (keine pH-Wert-Regelung) Stufe 3: biologische Geruchseliminierung an unberieselter Füllkörperpackung (Biofilter)

DLG-Nr.	Bezeichnung	Hersteller	Anzahl Stufen	Reinigungsverfahren
5957	HelixX (klein)	Big Dutchman International GmbH	1	Stufe 1: Chemische Wäsche (pH < 3) in parallelen Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider
6050	HelixX (groß)	Reventa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG	1	Stufe 1: Chemische Wäsche (pH < 3) in parallelen Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider
6051	HelixX (groß)	Big Dutchman International GmbH	1	Stufe 1: Chemische Wäsche (pH < 3) in parallelen Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider
6098	Kombi Luftwäscher	KWB Airs Systems BV	3	Stufe 1: Vorbedüsung zur Staubabscheidung an Waschwand (pH = 6,5–7) Stufe 2: Biologisch-chemische Wäsche zur Ammoniakabscheidung (Rieselbett) Stufe 3: Biofilter zur Geruchseliminierung

Von der DLG wurden bislang 6 einstufige Verfahren, 3 zweistufige Verfahren und 2 dreistufige Verfahren geprüft und zertifiziert.

Die Abluftreinigungsanlagen umfassen sowohl Biofilter (3 Systeme), biologische und biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (4 bzw. 5 Systeme) als auch die rein chemische Wäsche im Sprühturm (3 Systeme, wobei letztere weitestgehend baugleich sind und sich lediglich in ihrer Dimensionierung unterscheiden). Reine Wasserwäscher kommen lediglich zur Vorabscheidung von Staub zur Anwendung. Insgesamt dominieren Verfahren mit Einsatz von Säure zur Ammoniakabscheidung, hierbei wird ausnahmslos Schwefelsäure eingesetzt.

10 der 11 zertifizierten Systeme enthalten einen Abluftwäscher zur Abscheidung von Ammoniak (und Staub). Einstufig werden dabei die chemischen Sprühturmgaswäscher der Firma Big Dutchman bzw. Reventa sowie die Rieselbettreaktoren von Dorset (biologische Wäsche) und Devriecom (biologisch-chemische Wäsche) betrieben. Die eingesetzten Rieselbettreaktoren werden zum Großteil im Kreuzstrom betrieben. Lediglich die Systeme von Dorset und Devriecom arbeiten nach dem Gegenstromprinzip. Die Menge an umgewälzter Waschflüssigkeit bleibt im Jahresverlauf in der Regel konstant. Lediglich der Wäscher der Fa. Devriecom arbeitet mit einer variablen, abluftvolumenstromabhängigen Berieselungsrate. Die Sprühturmwäscher sind jeweils aus bis zu fünf Modulen aufgebaut, die abhängig vom aktuellen Abluftstrom stufenweise zugeschaltet werden. Weil die Berieselungsmenge pro betriebenen Modul vorgegeben ist, kann die Flüssigkeitsaufgabe hierdurch zumindest in Stufen an den Abluftstrom angepasst werden.

Für den Abbau von Geruchsstoffen werden hauptsächlich Biofilter eingesetzt. Der einstufige Biofilter der Fa. Hagola wird horizontal betrieben. Zur Staubabscheidung ist das Filtersystem in Sandwichbauweise mit grobkörnigem Filtermaterial am Lufteintritt aufgebaut. Der Biofilter kommt auf eine Filterschichtdicke von insgesamt ca. 90 cm. Die in mehrstufigen Systemen integrierten Biofilter der Firmen SKOV, Dr. Siemers und KWB werden vertikal betrieben. Auf diese Weise kann bei relativ geringem Flächenbedarf ein energetisch vorteilhaftes großes Anströmfläche/Schichtdicke-Verhältnis realisiert werden. Aufgrund der vorangegangenen Wäsche können 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. Die eingesetzten Biofilter der Firmen Hagola und SKOV werden ohne Umwälzpumpe zur kontinuierlichen Befeuchtung betrieben. Für den einstufigen Biofilter der Fa. Hagola wird der Leitungsvordruck des Wasseranschlusses genutzt. Das System von SKOV kommt aufgrund der vorgeschalteten Wäsche gänzlich ohne zusätzliche Befeuchtung aus. In dem System von Uniqfill Air wird zur Geruchseliminierung anstelle eines Biofilters eine Wasserwäsche im Rieselbettverfahren eingesetzt. Die Schichtdicken betragen 15 bzw. 90 cm.



Eine Einschätzung der Abluftreinigungsleistung auf Basis der DLG-Prüfberichte ist Tabelle 6 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. 2.4) werden bei Eignung (+) erfüllt. Ein direkter Zusammenhang der Stufenzahl ist weder zum Abscheidespektrum noch zur erzielten Abscheideleistung zu erkennen.

**Tabelle 6: Reinigungsleistung der DLG-geprüften Anlagen (DLG 2007–2012)**

DLG-Nr.	Abluftreinigungsverfahren	Reinigungsleistung		
		Ammoniak	Staub	Geruch
5699	Biofilter	-	++	++
5702	Biowäscher	++	++	++
5879	Bio-Chemowäscher	+ ++ bei pH-Wert- Regelung	+	++
5880	Chemowäscher + Biowäscher	+	++	++
5944	Bio-Chemowäscher + Biofilter	++	+	++
5954	Bio-Chemowäscher + Biowäscher	+	+	-
5955	Bio-Chemowäscher + Biowäscher + Biofilter	+	++	++
5957	Chemowäscher	+	+	-
6050	Chemowäscher	+	+	-
6051	Chemowäscher	+	+	-
6098	Staubabscheider + Bio-Chemowäscher + Biofilter	+	+	-

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

## 5.3 Energieeffizienz der eingesetzten Aggregate

### 5.3.1 Verfügbare Aggregate

Die ganzheitlich energieeffiziente Gestaltung einer Förderaufgabe muss unter Betrachtung aller am Förder- und Strömungsprozess beteiligten Komponenten erfolgen. Aus energetischer Sicht ist die Förderung von Fluiden eine Kette von Energieumwandlungsprozessen, bestehend aus Förderaggregat (Ventilator und Pumpe) mit Antriebssystem (Motor) und Getriebe/Kupplung sowie der Antriebssteuerung und der Ausführung des Förderweges bzw. der Förderbedingungen (z. B. der Rohrleitungen oder Luftkanäle, Strömungswiderstände oder Förderhöhe), in der letztendlich elektrische Energie in kinetische (und potenzielle) Energie des Fluides umgesetzt wird. Für jede Einheit Nutzenergie am Ende der Kette entstehen bei jedem Umwandlungsprozess der Kette Verluste. Effizienzverbesserungen sind daher effektiver, je weiter hinten ihre Position in der Umwandlungskette ist. Der Optimierungsprozess beginnt daher immer am Ende der Umwandlungskette, also bei der Optimierung der Förderaufgabe. Dieses bedeutet zunächst, dass Fördermengen so gering wie möglich zu dimensionieren sind. Jedes unnötig geförderte Volumen erhöht den Energiebedarf am Förderaggregat und erzeugt zusätzliche Verluste entlang der Energieumwandlungskette. Gleichzeitig wird durch eine möglichst verlustfreie Gestaltung des Strömungsweges die für die Förderung des vorgegebenen Volumenstroms benötigte Energie minimiert. Darauf aufbauend müssen dann für das zu erwartende Profil der benötigten Volumenströme und Förderbedingungen

geeignete Förderaggregate und darauf abgestimmte Antriebe und Antriebssteuerungen ausgewählt werden, die bei den real auftretenden Betriebsbedingungen möglichst optimale Wirkungsgrade aufweisen. Das Herunterregeln von größeren Aggregaten mit höheren Nennwirkungsgraden ist generell für keine Komponente des Fördersystems sinnvoll. Im folgenden Abschnitt wird eine kurze Übersicht über Förderaggregat, Antriebssystem und Antriebssteuerung gegeben. Energieverbrauchende Aggregate, darunter auch Ventilatoren, Pumpen und elektrische Antriebe (Motoren), werden nach dem Energieverbrauchsrelevanten-Produkte-Gesetz (EVPG/Umsetzung der EU-Ökodesign-Richtlinie) in Abhängigkeit ihres Wirkungsgrades bei Nennlast und Nennspannung eingeordnet. Das EVPG regelt die Anforderungen und Kennzeichnungspflichten für energieverbrauchende Aggregate. Eine kurze Übersicht ist Kap. 5.3.1.4 zu entnehmen.

### 5.3.1.1 Ventilatoren

Gemäß der DLG-Arbeitsunterlage „Belüftung von Schweineställen“ werden aufgrund ihrer hohen Lebensdauer, ihrer guten Regelbarkeit und ihrem guten Wirkungsgrad in der Schweinezucht fast ausschließlich **Niederdruckaxialventilatoren** eingesetzt. Nachfolgend wird daher nur auf diese Bauart Bezug genommen.

Der Leistungsbedarf eines Ventilators ergibt sich aus

$$P = \frac{V \cdot \Delta p}{1000 \cdot \eta_V \cdot \eta_M}$$

mit

P = Leistungsbedarf der Ventilators (kW),

V = Volumenstrom (m<sup>3</sup>/s),

Δp = Totaldruckerhöhung (Pa),

η<sub>V</sub> = Wirkungsgrad des Ventilators einschl. Übertragung (-),

η<sub>M</sub> = Wirkungsgrad des Motors (-) s. dazu Kap. 5.3.1.3.

Die Leistungsaufnahme eines Ventilators wird demnach bestimmt über

- den zu fördernden Volumenstrom (V) und die erforderlichen Druckerhöhung (Δp),
- den Ventilatorwirkungsgrad (η<sub>V</sub>),
- den Motorwirkungsgrad (η<sub>M</sub>) (s. im Weiteren Kap. 5.3.1.3).

Volumenstrom und Druckerhöhung können nicht unabhängig voneinander variiert werden. Vielmehr besteht zwischen beiden Größen für jedes System und jeden Ventilator ein eindeutig definierter Zusammenhang. Durch den Strömungswiderstand eines gegebenen Systems wird festgelegt, wie groß der entstehende Druckverlust bei einem bestimmten Volumenstrom ist. Grafisch dargestellt bildet dieser Zusammenhang die so genannte Anlagenkennlinie. Auf der anderen Seite ist für jeden Ventilator abhängig von Größe, Bauart und Drehzahl eindeutig definiert, wie groß der geförderte Volumenstrom bei einem gegebenen zu überwindenden Gegendruck ist. Dieser Zusammenhang wird als Ventilator-kennlinie bezeichnet. Wird ein bestimmter Ventilator in einem bestimmten System betrieben, stellt sich der Volumenstrom ein, bei dem die Druckerhöhung durch den Ventilator dem Gegendruck des Systems entspricht. Dieses Wertepaar aus Volumenstrom und Druckverlust (bzw. Druckerhöhung) entspricht dem Schnittpunkt von Anlagen- und Ventilator-kennlinie und wird als Betriebspunkt bezeichnet. Der Betriebspunkt bestimmt zudem den Wirkungsgrad des Ventilators. Im Nennbetriebspunkt des Ventilators ist der Wirkungsgrad am größten. Weichen die Betriebsbedingungen vom Nennbetriebspunkt ab, sinkt der Wirkungsgrad.

Für einen minimalen Energieeinsatz zur Erfüllung einer gegebenen Förderaufgabe ist daher ein Ventilator auszuwählen, dessen Nennbetriebspunkt möglichst exakt dem realen Betriebspunkt entspricht. Von entscheidender Bedeutung ist neben dem Nennbetriebspunkt auch der Verlauf der Ventilator-kennlinie. Niederdruckaxialventilatoren weisen einen relativ steilen Kennlinienverlauf auf, was zu einem relativ starken Abfall des Volumenstroms mit ansteigendem Gegendruck führt. Diese geringe, so genannte Druckstabilität ist der große Nachteil dieses Ventilortyps. Der Druckverlust einer typischen Stallbelüftung von etwa 50 Pa kann in der Regel noch problemlos bewältigt werden. Soll die Stallbelüftung an eine Abluftreinigung angeschlossen werden, ist eine Verdreifachung des Druckverlustes nicht unüblich. Dieses kann bei

nicht ausreichend druckstabilen Ventilatoren zu einer erheblichen Reduzierung des Fördervolumens (und des Wirkungsgrades) führen. Für den Fall der Abluftreinigung ist daher unbedingt auf den Einsatz von Ventilatoren zu achten, die auch bei höheren Druckverlusten ausreichende Volumenströme fördern können (DLG 2003).

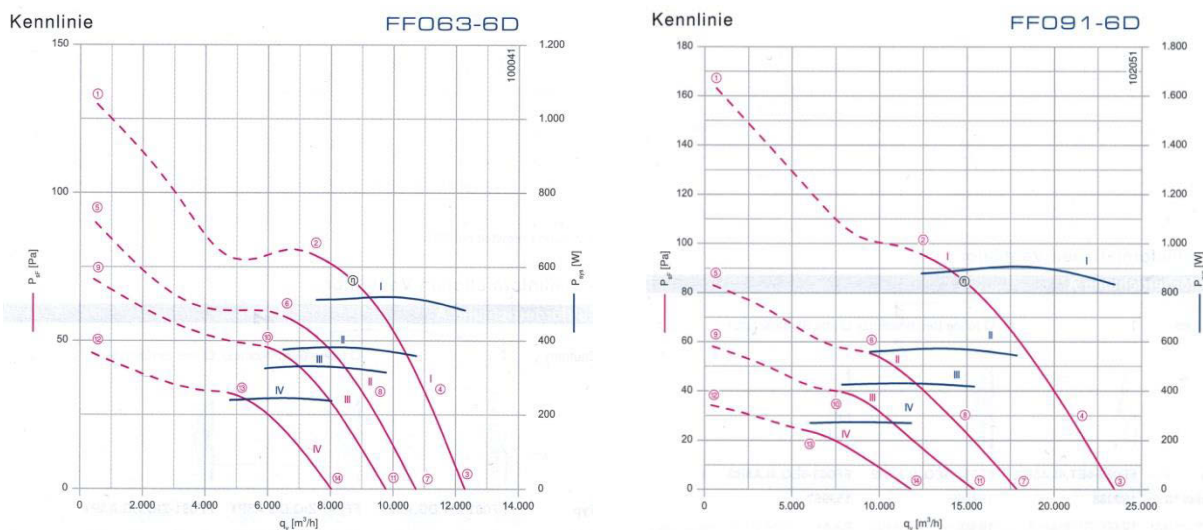


Abbildung 4: Kennlinie für zwei verschiedene Ventilatoren (h ... Auslegungspunkt mit höchstem Wirkungsgrad)

### Ventilatorwirkungsgrad

Aus der dargestellten Formel für die Leistungsaufnahme des Ventilators wird ersichtlich, dass die Minimierung des Energieeinsatzes durch eine Reduzierung von Druckverlust oder Volumenstrom sowie durch eine Erhöhung des Wirkungsgrades erreicht werden kann. Der Volumenstrom selbst ist in der Regel durch die äußeren Bedingungen festgelegt. Durch eine Reduzierung des Druckverlustes bzw. des Strömungswiderstandes, z. B. durch die Vermeidung unnötiger Umlenkungen und Strömungseinbauten sowie die Verwendung möglichst großer Rohrdurchmesser, kann der benötigte Energieeinsatz häufig relativ einfach und kostengünstig reduziert werden. Auch eine regelmäßige Reinigung der Strömungswege ist hier von entscheidender Bedeutung.

Ist die Förderaufgabe durch eine verlustarme Gestaltung des Förderweges optimiert, muss für einen geringen Energieeinsatz ein Ventilator mit möglichst hohem Wirkungsgrad im sich ergebenden Betriebspunkt ausgewählt werden, wobei zu bedenken ist, dass sich der Betriebspunkt z. B. durch Zunahme des Druckverlustes im Betriebsverlauf ändert und der Ventilator möglichst im gesamten Bereich der zu erwartenden Betriebsbedingungen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen sollte. Der Wirkungsgrad eines Ventilators setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad des Antriebes (Riemenantrieb oder Direktantrieb) und des Ventilators selbst. Der Wirkungsgrad des Ventilators wird durch den Flügelwirkungsgrad und den dynamischen Druckverlust bestimmt. Der Flügelwirkungsgrad ist abhängig von der Flügelkonstruktion. Niedrigste Wirkungsgrade erzielen einfache Blechflügel ohne Profil (Wirkungsgrad ca. 50–60 %). Durch den Einsatz von profilierten Flügeln lässt sich der Wirkungsgrad um ca. 10 % steigern. Die besten Wirkungsgrade erreichen profilierte Flügel in Sichelform (70–80 %). Durch weitere Optimierung der Flügelform können Wirkungsgrade bis 85 % erreicht werden. In der Anwendung ist ein hoher Wirkungsgrad nicht nur aufgrund des geringen Energiebedarfs anzustreben, sondern auch, weil deutlich weniger Energie in Schallenergie umgewandelt wird und daher deutlich reduzierte Schallemissionen entstehen (JACKMAN 2007).

Der dynamische Druckverlust liegt üblicherweise bei 60–70 % des Gesamtdruckverlustes und ist abhängig von den Strömungsbedingungen innerhalb des Ventilators. Er ist konstruktionsbedingt, aber vor allem auch abhängig von der erzeugten Luftgeschwindigkeit. Strömungsverluste nehmen quadratisch mit der Geschwindigkeit zu, daher sind geringe Luftgeschwindigkeiten vorteilhaft. Soll die Bereitstellung einer geforderten Förderleistung bei geringeren Drehzahlen realisiert werden, ist hierfür ein großes Drehmoment bzw. ein großer Flügeldurchmesser notwendig. Flügeldurchmesser sind daher so groß wie möglich zu wählen. Um den dynamischen Druckverlust im Betriebsverlauf gering zu halten, sind zudem regelmäßige Staubablagerungen am Ventilator zu entfernen.

## Volumenstromsteuerung

Für die hier zu bewertende Stallbelüftung ist aufgrund unterschiedlicher klimatischer Umgebungsbedingungen im Jahresverlauf die Förderaufgabe, sprich der zu fördernde Volumenstrom und der zu überwindende Gegendruck im zeitlichen Verlauf nicht konstant. Für die Volumenstromsteuerung stehen prinzipiell folgende Möglichkeiten zur Verfügung (vgl. Kap. 4.2):

- Kaskadenschaltung mehrerer Ventilatoren (vorzugsweise im Parallelbetrieb)
- Drosselregelung
- Drehzahlregelung

Werden mehrere Ventilatoren betrieben und lässt die Luftverteilung im Stall dieses zu, kann über die Zu- bzw. Abschaltung einzelner Aggregate der Förderstrom in groben Stufen geregelt werden. Weil alle Ventilatoren mehr oder weniger im Nenn- bzw. Auslegungspunkt im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden können (wobei hierbei zu berücksichtigen ist, dass sich parallel betriebene Ventilatoren gegenseitig beeinflussen), ist diese Variante aus Sicht der Energieeffizienz für die Grobregelung des Volumenstroms (z. B. Sommer-/Winterbetrieb) sinnvoll. Für eine Feinjustierung des Volumenstroms müssen zusätzliche Steuerungsmöglichkeiten eingesetzt werden.

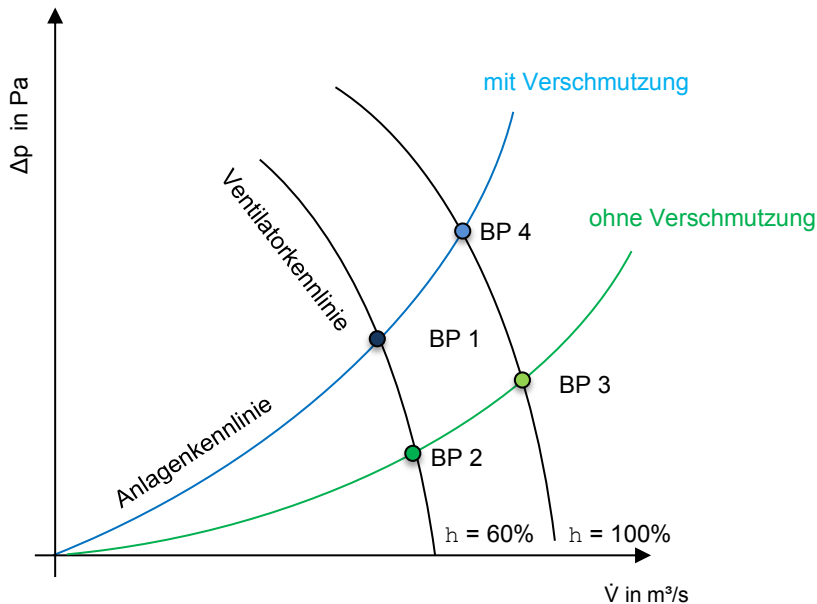
Eine weitere technisch einfache Möglichkeit zur Regulierung geförderter Volumenströme ist die Veränderung der Strömungsbedingungen durch den Einsatz von Drosselklappen oder Drosselventilen zur Verringerung des freien Strömungsquerschnitts. Durch diese künstliche Erhöhung des Strömungswiderstandes bzw. des Druckverlustes verschieben sich die Anlagenkennlinie und deren Schnittpunkt mit der Ventilatorkennlinie auf einen Betriebspunkt mit reduziertem Volumenstrom. Weil der Volumenstrom überproportional mit Zunahme des Druckverlustes sinkt, ergibt sich nachdem am Anfang dieses Abschnitts dargestellten Zusammenhang zwischen Volumenstrom, Druckverlust und Energieaufnahme ein geringfügig verringerter Energiebedarf des Ventilators. Aus energetischer Sicht ist eine solche Lösung möglichst zu vermeiden, weil es bei schwankenden Volumenströmen zu ausgeprägten Teillastverlusten kommt. Aufgrund ihrer Einfachheit sind Drosseleinrichtungen, vor allem in der Lüftungstechnik, allerdings sehr verbreitet. Klassischerweise wird der Luftdurchsatz dabei über die Stellung von im Strömungskanal verbauten Luftklappen über Stellmotoren gesteuert.

Wesentliche Einflussgröße des Leistungsbedarfs des Ventilators ist die Lüfterdrehzahl. Es gelten folgende Proportionalitätsgesetze bei gleichen Abmessungen des Ventilators:

- Der Volumenstrom ändert sich proportional mit der Drehzahl ( $V \sim n$ ).
- Der Druck steigt mit dem Quadrat der Drehzahl ( $p \sim n^2$ ).
- Der Leistungsbedarf des Lüfters steigt proportional mit der dritten Potenz der Drehzahl ( $P \sim n^3$ ).

Energetisch optimal und mittlerweile weit verbreitet sowie im Unterschied zu anderen Steuerungsvarianten direkt in eine automatische Lüftungssteuerung integrierbar, ist die Drehzahlregelung der Antriebswelle. Durch eine Drehzahländerung verschiebt sich die Ventilatorkennlinie, sodass der Ventilator auch ohne künstliche Erhöhung des Druckverlustes auf einem Betriebspunkt mit reduziertem Volumenstrom betrieben werden kann. Ohne künstliche Erhöhung des Strömungswiderstandes nimmt der Druckverlust proportional zum Quadrat des Volumenstroms ab ( $p \sim V^2$ ). Daraus folgt, dass bei ansonsten gleichbleibenden Anlagenbedingungen und dem proportionalen Zusammenhang zwischen Drehzahl und Volumenstrom ( $V \sim n$ ) die erforderliche Antriebsleistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl ist ( $P \sim n^3$ ). Damit wird ersichtlich, dass jede Reduzierung der Drehzahl zu massiven Energieeinsparungen führt. Hinzu kommt, dass sich bei Drehzahländerung auch die Wirkungsgradkurve verschiebt, sodass der optimale Wirkungsgradbereich hin zu niedrigeren Volumenströmen verschoben wird. Der Wirkungsgrad ist bei reduzierter Drehzahl zwar generell niedriger als bei Auslegungsdrehzahl, liegt in der Regel aber deutlich oberhalb des erreichten Wirkungsrades bei einer der o. g. Volumenstromregelungen über die Verschiebung der Anlagenkennlinie (z. B. durch Drosselklappen).

Der konkrete Betriebspunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Anlagenkennlinie (Kennlinie der Widerstände) und der Betriebskennlinie des Ventilators (vgl. Abbildung 5). Die Anlagenkennlinie zeigt, dass der zu überwindende Druckverlust und die damit verbundene Leistungsaufnahme bei Verschmutzung zunehmen. Bei Verringerung der Drehzahl des Ventilators bewegt sich der Betriebspunkt aus dem Optimum heraus.



**Abbildung 5: Ventilator- und Anlagenkennlinien und Betriebspunkte einer Anlage**

Möglichkeiten zur Drehzahlsteuerung der Antriebswelle bzw. des Antriebsmotors werden in Kap. 5.3.1.3 diskutiert.

Ein besonders effizienter Systemwirkungsgrad für Ventilatoren kann durch den Einsatz eines Antriebsmotors mit interner Drehzahlregelung, dem so genannten EC-Motor, erreicht werden. Ein am Markt erhältliches Ventilatorsystem mit EC-Motor ist beispielsweise der so genannte ETAvent der Fa. Ziehl-Abegg mit Leistungen bis 1,1 kW (einphasig) bzw. 3,8 kW (dreiphasig). Durch die eingebaute Elektronik erfordern diese jedoch auch deutliche höhere Investitionskosten. Wenn mehrere Ventilatoren zum Einsatz kommen sollen, ist die externe Regelung über einen gemeinsamen Frequenzumrichter in der Regel, trotz des etwas schlechteren Wirkungsgrades, gesamtwirtschaftlich günstiger.

Soll der Volumenstrom im Betriebsverlauf variiert werden, ist bei der Ventilatorauswahl generell darauf zu achten, dass Ventilatoreigenschaften, Ventilator-kennlinie und Wirkungsgradverlauf für den gesamten Bereich der angestrebten Betriebsbedingungen auch unter Beachtung der Regelstrategie geeignet sind.

### Gesamtwirkungsgrad = Systemwirkungsgrad

Die genannten Stellgrößen werden in der Praxis zu einem Systemwirkungsgrad zusammengefasst. Es ist ein Ventilator mit bestem Systemwirkungsgrad auszuwählen. Der Zusammenhang Volumenstrom und Systemwirkungsgrad ist konkret bei der Auswahl der Anzahl der parallel einzusetzenden Ventilatoren zu berücksichtigen.

### 5.3.1.2 Pumpen

Pumpen sind wie Ventilatoren Förderaggregate mit einer so genannten quadratischen Momenten-Last-Kennlinie. Die physikalischen Zusammenhänge für Pumpen entsprechen daher weitestgehend den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ausführungen, wobei für die Förderung von Flüssigkeiten, im Gegensatz zur Gasförderung, der zu überwindende Höhenunterschied zu berücksichtigen ist. Die benötigte Antriebsleistung kann über folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot H}{\eta_P \cdot \eta_M}$$

mit

$P$  = Leistungsbedarf der Pumpe in W,

$\rho$  = Dichte des Fluids ( $\text{kg/m}^3$ ),

$g$  = Fallbeschleunigung  $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ,

$V$  = Volumenstrom ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),

$H$  = Förderhöhe der Anlage inkl. Berücksichtigung von Reibungsverlusten (m),

$\eta_P$  = Pumpenwirkungsgrad,

$\eta_M$  = Motorwirkungsgrad.

In Abluftreinigungsanlagen werden in der Regel Kreiselpumpen zur Umwälzung von Waschflüssigkeiten eingesetzt.

Der Betriebspunkt der Pumpe, also das Wertepaar für Volumenstrom und Druckerhöhung (in obiger Formel dargestellt als  $\tau \cdot g \cdot H$ ), ergibt sich durch den Schnittpunkt von

- der Anlagenkennlinie, die den systemspezifischen Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Gegendruck aufgrund des Strömungswiderstandes und der zu überwindenden Förderhöhe darstellt und
- der Pumpenkennlinie, die das Fördervolumen der Pumpe in Abhängigkeit des aufzubringenden Druckunterschiedes darstellt.

Der Wirkungsgrad der Pumpe ist abhängig davon, auf welchem Punkt der Pumpenkennlinie die Pumpe tatsächlich betrieben wird. Der Pumpenwirkungsgrad variiert somit für die verschiedenen Betriebspunkte in Abhängigkeit von der Konstruktion und internen Reibungsverlusten der Pumpe. Der Wirkungsgrad steigt mit zunehmender Baugröße und zunehmender spezifischer Drehzahl. Generell ist hinsichtlich der Energieeffizienz neben konstruktiven Aspekten auch eine regelmäßige Wartung der Pumpe essentiell. Bei schlechter Wartung können sich zusätzliche Verluste von bis zu 15 % einstellen.

Für eine energetische Optimierung gilt für Pumpen wie für Ventilatoren, dass große und häufig einfach zu realisierende Energiesparpotenziale in der Optimierung der Förderaufgabe, durch Reduzierung von Strömungswiderständen und Minimierung des Volumenstroms liegen. Für eine gegebene (und optimierte) Förderaufgabe ist es dann entscheidend, eine Pumpe einzusetzen, deren Förderleistung beim gegebenen Gegendruck möglichst exakt dem erforderlichen Volumenstrom entspricht und die bei diesem Betriebspunkt im optimalen Wirkungsgradbereich liegt. Eine gute Pumpenauslegung ist für die Gesamtenergieeffizienz dabei häufig entscheidender als ein möglichst hoher Pumpenwirkungsgrad.

In vielen Anwendungsfällen variieren die Förderbedingungen im Laufe des Betriebes, entweder weil im zeitlichen Verlauf unterschiedliche Volumenströme benötigt werden oder weil die benötigte Druckerhöhung der Pumpe nicht konstant ist. Während es früher üblich war, die Pumpe auf den maximalen Durchfluss auszulegen, werden heute häufig leicht unterdimensionierte Pumpen mit ausreichender Leistungsreserve eingesetzt, um die Pumpen möglichst häufig mit optimalem Wirkungsgrad betreiben zu können. Sollen Volumenströme über einen größeren Bereich variiert werden, ist für die Pumpenauswahl nicht nur ein gute Pumpenauslegung und ein hoher Wirkungsgrad bei Nennbedingungen, sondern ein optimaler Verlauf von Kennlinie und Wirkungsgradkurve im gesamten Intervall auftretender Betriebsbedingungen entscheidend.

Grundsätzlich sind folgende Ansätze zur Volumenstromsteuerung verbreitet:

- By-Pass-Regelung
- Drosselung
- Zwei-Punkt-Regelung
- Drehzahlregelung

Bei der By-Pass-Regelung wird ein Teil des aus der Pumpe austretenden Volumenstroms zum Pumpeneingang zurückgeführt. Der Anteil des zurückgeführten Volumenstroms wird so eingestellt, dass der durchgelassene Anteil der gewünschten Fördermenge entspricht, der Rest wird kontinuierlich im Kreis gepumpt. Weil bei dieser Variante immer die gesamte ursprüngliche Fördermenge durch die Pumpe geführt wird, ergeben sich bei deren Anwendung keine Energieeinsparungen.



Auf die Drosselregelung bei Ventilatoren wurde im vorangegangenen Abschnitt bereits eingegangen. Die Anwendung bei Kreiselpumpen verläuft analog. Auch hier wird die Reduzierung des Volumenstroms durch die Schaffung eines künstlichen Druckverlustes in Form von Drosselventilen o. ä. realisiert. Die erzielbaren Energieeinsparungen sind aufgrund der zusätzlichen Strömungsverluste gering.

Bei Anwendungen, für die nicht zwangsläufig ein kontinuierlicher Volumenstrom benötigt wird und eine Förderung in Intervallen erfolgen kann, kann der Volumenstrom über einen diskontinuierlichen Betrieb des Förderaggregates auf den gewünschten Wert eingestellt werden (Zwei-Punkt-Regelung). Für viele Aufgaben der Flüssigkeitsförderung, z. B. für die Flüssigkeitsumwälzung zur Beregnung von Rieselbettreaktoren, ist diese Fahrweise üblich. Sie ist einfach zu realisieren und ermöglicht bei guter Auslegung, dass der Pumpenantrieb immer im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden kann. Nachteilig, vor allem bei kurzen Schaltzeiten, ist der häufige energieintensive Pumpenanlauf. Des Weiteren entstehen Energieverluste durch die höheren Fließgeschwindigkeiten, die eine Erhöhung des Druckverlustes und damit der benötigten Pumpenleistung nach sich ziehen. Bei Halbierung der Vollastzeit liegt somit der Energieverbrauch insgesamt oberhalb von 50 %.

Die Variation der Pumpendrehzahl ist die effizienteste Art der Volumenstromregelung. Analog zu Ventilatoren verhält sich die Aufnahmeleistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl bzw. des Volumenstroms. Bei einer Reduzierung des Fördervolumens auf 50 % wird theoretisch nur noch ein Achtel der ursprünglichen Antriebsleistung benötigt. Allerdings ist zu beachten, dass auch der überwindbare Gegendruck auf ein Viertel abfällt (die Drehzahlreduzierung wird daher oft durch die vom System vorgegebene Mindestdruckerhöhung begrenzt) und der Wirkungsgrad der Pumpe abnimmt. Für die Auswahl einer geeigneten Pumpe bei Einsatz einer Drehzahlregelung muss neben dem Verlauf der Kennlinie daher auch der Verlauf des optimalen Wirkungsgrades bei Drehzahländerung berücksichtigt werden. Drehzahlregelungen werden neben der Regelung von Volumenströmen auch eingesetzt, um bei variablen Förderbedingungen die Wirkungsgradkurve der Pumpe gezielt in den optimalen Bereich zu verschieben. Am Markt verfügbar sind hierfür Pumpen mit intern integrierter Antriebsregelung.

### 5.3.1.3 Elektrische Antriebe (Elektromotoren)

Der Antriebsmotor stellt die mechanische Leistung für den Betrieb des Förderaggregates zur Verfügung. Die vom Motor abgegebene Rotationsenergie wird über eine Kraftübertragungskomponente, z. B. ein Getriebe, an die Antriebswelle des Aggregates übergeben. Gemeinsam definieren diese Komponenten die Drehzahl und das maximal aufbringbare Drehmoment der Pumpe bzw. des Ventilators.

Der Leistungsbedarf des Antriebsmotors ergibt sich aus

$$P_M = \frac{P_W}{\eta_G \cdot \eta_M}$$

mit

$P_M$  = Leistungsbedarf des Antriebsmotors (kW),

$P_W$  = Leistung Getriebe (kW) z. B. Ventilatorwelle, Kraftübertragung Getriebe,

$\eta_G$  = Wirkungsgrad Kraftübertragungskomponente (-),

$\eta_M$  = Wirkungsgrad des Antriebsmotors (-).

Die energetische Effizienz eines Elektromotors wird demnach bestimmt über

- den Wirkungsgrad des Motors ( $\eta_M$ ),
- den Wirkungsgrad der Kraftübertragung  $\eta_G$ .

Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis aus abgegebener mechanischer Leistung zur zugeführten elektrischen Leistung. Ein Elektromotor weist verschiedene Verlustmechanismen auf, die zu einer Reduzierung des Wirkungsgrades führen, z. B. Reibungsverluste oder die Erwärmung der Motorwicklung durch elektrische Materialwiderstände. Die Ausprägung der Energieverluste ist abhängig von Typ, Konstruktionsqualität (Leiterquerschnitte, Qualität der Wicklungen, Fertigungstoleranzen etc.), Nenn- und effektiver Last des Motors.

Die wesentlichen Verlustmechanismen steigen bei allen Motortypen unterproportional zur Motorgröße. Motoren mit höherer Nennlast weisen daher grundsätzlich einen höheren Wirkungsgrad auf als (konstruktionsgleiche) Motoren mit geringerer Nennlast. Auf konstruktionsbedingte Wirkungsgradunterschiede soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Von Interesse für den Einsatz von Motoren sind an dieser Stelle lediglich die aus den Konstruktionsdetails resultierenden Wirkungsgrade sowie die Kosten des Motors (real spielen selbstverständlich weitere konstruktionsbedingte Aspekte wie Lärmentwicklung, Größe, Verschleiß etc. eine Rolle, deren Betrachtung im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie aber unerheblich ist).

### Motortypen

Gängige Elektromotortypen in der Fördertechnik sind einphasige und dreiphasige Asynchronmotoren und Drehstrom-Synchronmotoren. Einphasige Motoren kommen bei kleineren Aggregaten bis ca. 1 kW zum Einsatz. Für größere Leistungen werden Drehstrommotoren eingesetzt. Synchronmotoren zeichnen sich im Vergleich zu Asynchronmotoren durch einen höheren Wirkungsgrad auch im Teillastbereich aus. Zudem sind sie aufgrund ihrer drehmomentunabhängigen Drehzahl sehr präzise mittels Frequenzumrichter regelbar. Ein großer Nachteil der Synchronmotoren ist das hohe Anlaufmoment, welches eine Anlaufhilfe für den Motorenstart erforderlich macht. Asynchronmotoren dagegen sind von den Investitionskosten günstiger und so gut wie wartungsfrei.

Der höhere Preis und die Anlaufproblematik begründen, warum bis heute überwiegend Asynchronmotoren eingesetzt werden. Die in den letzten Jahren stattgefundenene Entwicklung preisgünstiger Frequenzumrichter, die abnehmenden Kosten für die in Synchronmotoren verbauten Permanentmagneten und steigende Energiekosten lassen vermuten, dass die Verbreitung von Synchronmotoren zukünftig zunehmen wird (Volz 2010).

### Lastverhalten

Bei der Auswahl eines Motors ist jedoch zu beachten, dass der auf Typenschild oder in der Motordokumentation angegebene Nennwirkungsgrad lediglich für den Betrieb bei Nennlast erreicht wird. Ein Betrieb unterhalb der Nennlast führt zu einer Reduzierung des Wirkungsgrades. Die Ausprägung und der Verlauf dieses so genannten Teillastverhaltens ist abhängig von der Motorkonstruktion und weist teilweise erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Typen auf. Für die tatsächliche Energieeffizienz eines Motors ist daher vor allem der Wirkungsgradverlauf innerhalb des im Betrieb zu erwartenden Lastbereichs entscheidend.

### Drehzahlregelung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, ist bei nicht konstanten Anforderungen an die Fluidförderung im Betriebsverlauf eine Regelung der Antriebsdrehzahl anzustreben.

Prinzipiell werden stufige und stufenlose Steuerungssysteme unterscheiden. Ein weiteres wichtiges Unterscheidungskriterium der Steuerungsarten ist, welche Eingangsgröße, Spannung oder Frequenz manipuliert wird. Bedeutung hat dieses zum einen für die Auswirkung der Steuerung auf den Motorwirkungsgrad und zum anderen auf die Eignung für bestimmte Motortypen. Die Steuerung der Drehzahl über Spannungsvariation ist bei Synchronmotoren nicht möglich. Für die stufige Drehzahlregelung stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Stern-Dreieckschaltung
- Polumschaltbare Motoren
- transformatorische Drehzahlregelung

Durch eine Stern-Dreieck-Schaltung kann bei Drehstrommotoren zwischen beiden Schaltungsvarianten gewechselt und so die Eingangsspannung (und damit die Drehzahl) in zwei Stufen variiert werden. Bei polumschaltbaren Motoren werden weder Eingangsspannung noch -frequenz verändert. Vielmehr wird die Drehzahl an der Antriebswelle durch die Umschaltung zwischen zwei Statorwicklungen mit unterschiedlicher Polpaarzahl variiert. Auch ein solcher Motor hat zwei Betriebspunkte. Mit transformatorischen Drehzahlreglern erfolgt eine Veränderung der Drehzahl über die Variation der Eingangsspannung. Der Aufbau entspricht einem Transformator mit mehreren, üblicherweise fünf, Spannungsausgängen. Es handelt sich entsprechend auch hier um eine diskrete Stufenregelung. Bei der Volumenstromregelung mittels stufigen Verfahren ist im Zusammenhang mit der Stallbelüftung auch auf den Abstand der einzelnen Drehzahlstufen, die



so genannte Spreizung, zu achten. Je geringer die Spreizung ist, desto schneller kann das Regelsystem auf schwankende Bedingungen reagieren und den Volumenstrom entsprechend regulieren (SLK 2008).

Eine stufenlose Antriebssteuerung kann prinzipiell durch eine Spannungs- oder eine Frequenzsteuerung erfolgen. Entscheidungshilfen zum Einsatz von drehzahlgesteuerten Antrieben liefert die VDI-Richtlinie 6014 „Energieeinsparung durch Einsatz drehzahlgesteuerter Antriebe in der technischen Gebäudeausrüstung“ (VDI 6014, 2008). Es existieren die folgenden Möglichkeiten zur stufenlosen Drehzahlsteuerung:

- Phasenanschnittsteuerung
- Steuerung der Eingangsfrequenz (Frequenzumrichter)
- EC-Motoren

Für die Spannungssteuerung wird eine so genannte Phasenanschnittsteuerung mit eingesetzt. Das Grundprinzip besteht darin, durch eine spezielle elektrische Schaltung mit so genannten Thyristoren oder Triacs einen bestimmten Anteil der eintretenden sinusförmigen Spannungswelle abzuschneiden und die Ausgangsspannung so zu reduzieren. Nachteilig ist allerdings, dass am Austritt keine gleichmäßige Sinuskurve mehr vorliegt, was ohne Kompensation in einigen Anwendungsfällen zu Komplikationen führen kann. Die Verluste durch diese Art der Steuerung liegen in etwa im Bereich der transformatorischen Drehzahlregelung. Zusätzliche Verluste entstehen allerdings durch eine erhöhte Stromaufnahme am Förderaggregat, sodass die Verluste insgesamt deutlich höher sind (SLK 2008).

Die Steuerung der Frequenz erfolgt in Frequenzumrichter (FU) nach dem Puls-Weiten-Modulationsverfahren. Dabei wird der Eingangsstrom zunächst über einen Gleichrichter in einen Gleichstrom und anschließend über einen Wechselrichter in Wechselstrom mit der gewünschten Frequenz umgewandelt. Frequenzumrichter zeichnen sich durch die Möglichkeit zur Manipulierung von Frequenz, Spannungshöhe und Phasenzahl in einem weiten Bereich bei geringen Verlusten aus (Wirkungsgrad über 95 %). Die Anschaffungskosten liegen deutlich oberhalb einfacher Motorarten, amortisieren sich bei teillastbetriebenen Motoren in der Regel aber in kurzer Zeit (VOLZ 2010). Frequenzumrichter sind die heute am häufigsten eingesetzten stufenlosen Steuergeräte.

In EC-Motoren ist die Steuerelektronik, die den Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt, direkt in den Motor integriert. EC-Motoren zeichnen sich durch einen sehr hohen Wirkungsgrad aus (85–89 % [JACKMAN 2007]) und sind bis Antriebsleistungen von ca. 5,5 kW verbreitet. Die Drehzahlsteuerung erfolgt hier ebenfalls über die Variation von Spannung und Frequenz (VOLZ 2010).

Bei allen Varianten zur Motorsteuerung ist zu berücksichtigen, dass durch die gezielte Reduzierung der Antriebsleistung der Arbeitspunkt des Antriebs im Wirkungsgrad-Last-Diagramm in den Teillastbereich, in dem eine deutliche Reduzierung des Motorwirkungsgrades auftritt, verschoben wird. Es entstehen also nicht nur Verluste durch die elektronische Vorschaltung, sondern auch durch eine Reduzierung des Motorwirkungsgrades selbst. Bei drehzahlgesteuerten Motoren ist daher auf einen geeigneten Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich zu achten. Mit Variation der Eingangsparameter tritt allerdings auch eine Verschiebung der Wirkungsgradkurve auf. Die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Diagramme beziehen sich in der Regel auf die Nennbedingungen. In welcher Weise sich die Wirkungsgradkurve verschiebt, ist abhängig vom veränderten Parameter.

Die höchste Energieeinsparung im reduzierten Drehzahlbereich wird beim Einsatz von EC-Motoren erreicht, gefolgt von der Drehzahlsteuerung mittels Frequenzumrichter. Ein Systemvergleich zeigte, dass mit der EC-Technik eine Stromersparnis von etwa 5 % gegenüber der Frequenzsteuerung und etwa 40 % gegenüber einer Spannungssteuerung zu erzielen sind (HANDEL 2008). Die Spannungssteuerung bietet im Vergleich das geringste Einsparpotenzial.

Der Einsatz von diskreten Steuerstufen, entweder an einem Aggregat oder auch durch Zu- und Abschalten mehrerer Aggregate, ist vor allem dann sinnvoll, wenn Förderströme über einen großen Bereich gesteuert werden sollen. Diese können dann, vorausgesetzt die Randbedingungen – z. B. die Belüftungsanforderungen – erlauben das Abschalten einzelner Aggregate, zur Bereitstellung der „Grundlast“ dienen, während ein (oder mehrere) gesteuerte Aggregate die Feinjustierung des Volumenstroms übernehmen.

Für den Einsatz von Motorsteuerungen ist grundsätzlich zu beachten, dass Motoren für den spannungs- bzw. frequenz-gesteuerten Betrieb zugelassen sein müssen.

Generell bleibt festzuhalten, dass eine Antriebsregelung nur dann zu einer besseren Energieeffizienz führt, wenn eine Variation von Fördervolumen oder Gegendruck am Förderaggregat tatsächlich auftritt. Heruntergeregelte überdimensionierten Maschinen und Motoren weisen generell höhere Verluste auf als für einen definierten Bedarfsfall ausgelegte Aggregate.

Motoren werden nach dem Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (Umsetzung der EU-Ökodesign-Richtlinie) in Abhängigkeit ihres Wirkungsgrades bei Nennlast und Nennspannung eingeordnet (s. Kap. 5.3.1.4).

#### 5.3.1.4 Ökodesign-Richtlinie

Die Ökodesign-Richtlinie der Europäischen Union (EU RL 2009/125/EG) regelt die Anforderungen und Kennzeichnungspflichten für auf den Markt gebrachte energieverbrauchende Aggregate, darunter auch Ventilatoren, Pumpen und elektrische Antriebe. Die Einhaltung der durch die Richtlinie gestellten Anforderungen ist Voraussetzung für den Erhalt des CE-Kennzeichens.

#### Einsatz elektrischer Antriebe

Gemäß der Ökodesign-Richtlinie und der dazugehörigen Durchführungsverordnung (EG) Nr. 640/2009 (EU VO 640/2009) bzw. deren Umsetzung in deutsches Recht in Form des so genannten Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) werden Elektromotoren in Abhängigkeit ihres Wirkungsgrades bei Nennlast und Nennspannung Effizienzklassen zugeordnet. Folgende Effizienzklassen werden durch die VO Nr. 640/2009 definiert:

- IE1: Standard-Wirkungsgrad
- IE2: Hoher Wirkungsgrad
- IE3: Premium-Wirkungsgrad
- IE4: Super-Premium-Wirkungsgrad

Die Effizienzklassen werden in Anhang 1 der Verordnung(EG) Nr. 640/2009 über Grenzkurven des Mindestwirkungsgrades in Abhängigkeit der Nennleistung definiert, um die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Motorgröße zu berücksichtigen.

Neben der Zuordnung zu Effizienzklassen wird zur sukzessiven allgemeinen Effizienzverbesserung der Einsatz von Elektromotoren geregelt. So müssen Motoren seit dem 16.06.2011 die Effizienzklasse IE2 erreichen. Ab 01.01.2015 müssen Motoren im Leistungsbereich 7,5–375 kW mindestens die Effizienzklasse IE3 bzw. IE2 bei Einsatz einer Drehzahlregelung erreichen. Ab dem 01.01.2017 wird diese Regelung auf Motoren im Leistungsbereich 0,75–375 kW erweitert. Des Weiteren werden die Kennzeichnungspflicht und Pflichten zur Bereitstellung von Herstellerinformationen geregelt.

In Deutschland sind hauptsächlich IE2- und IE1-Motoren in der Anwendung. Der Marktanteil von IE3-Motoren lag 2010 noch bei unter einem Prozent (VOLZ 2010).

#### Einsatz von Ventilatoren

Der Einsatz von Ventilatoren wird durch die am 30.03.2011 in Kraft getretene Durchführungsverordnung 327/2011 der europäischen Union (EU VO 327/2011) zur Richtlinie 2009/125/EG reguliert. Analog zu elektrischen Antrieben erfolgt die Bewertung der Ventilatoren nach ihrem Wirkungsgrad, wobei hier der Systemwirkungsgrad entscheidend ist, der sich aus den Wirkungsgraden für Antrieb, Steuerelektronik und Ventilator zusammensetzt. Die Verordnung schreibt abhängig von Ventilatorotyp, Leistungsbereich und Ventilatordruck Mindestwirkungsgrade für alle ab dem 01.01.2013 in Verkehr gebrachten Ventilatoren vor. Ab diesem Zeitpunkt dürfen ausschließlich Axialventilatoren mit einem statischen Systemwirkungsgrad von mindestens 24 % (bis 0,125 kW), 36 % (bis 10 kW) bzw. 39 % (bis 500 kW) bzw. einem totalen Wirkungsgrad von 38 % (bis 0,125 kW), 50 % (bis 10 kW) bzw. 53 % (bis 500 kW) auf den Markt gebracht werden (der statische Wirkungsgrad berücksichtigt nur die nutzbare Druckdifferenz, während der totale Wirkungsgrad auch die inter-

nen Druckverluste des Ventilators berücksichtigt). Ab dem 01.01.2015 werden die Mindestwirkungsgrade nochmals um jeweils vier (statisch) bzw. acht (total) Prozentpunkte angehoben.

### Einsatz von Pumpen

Der Einsatz von Umwälzpumpen wird durch die Verordnung 641/2009 vom 22.07.2009 (EU VO 641/2009) bzw. die Änderungsverordnung 622/2012 vom 11.07.2012 (EU VO 622/2009) reguliert. Die Verordnung regelt Kennzeichnungspflichten und beschreibt Anforderungen an die Energieeffizienz eingesetzter Pumpen im Leistungsbereich 1 W bis 2.500 W. Zur Bewertung wird der so genannte Energieeffizienzindex (EEI) eingeführt. Dieser berechnet sich aus der Aufnahmeleistung unter Berücksichtigung eines definierten Lastprofils bezogen auf einen Referenzverbrauch, der abhängig von der Pumpengröße bzw. der hydraulischen Leistungsabgabe im maximalen Arbeitspunkt der Pumpe nach den in der Verordnung definierten Berechnungsverfahren zu bestimmen ist.

Externe Umwälzpumpen, die ab dem 01.01.2013 in der EU auf den Markt gebracht werden, dürfen einen maximalen EEI von 0,27 aufweisen. Ab dem 01.08.2015 beträgt der maximale EEI 0,23. Zudem müssen auch in andere Produkte integrierte Umwälzpumpen den Anforderungen genügen. Von der Richtlinie ausgeschlossen sind Trinkwasserumwälzpumpen und in Produkte integrierte Pumpen, die bis 01.01.2020 Pumpen (die bis spätestens 01.08.2015 in Verkehr gebracht wurden) ersetzen.

## 6 Methodische Vorgehensweise der Energieeffizienzbewertung

### 6.1 Methodische Vorgehensweise

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Stellgrößen des Energieeinsatzes der Lüftungs- und Abluftreinigungsanlagen herausgearbeitet. Darauf aufbauend erfolgt die Bewertung des effizienten Einsatzes von Energie in folgenden Stufen:

1. Festlegung der Referenzbedingungen und Bestimmung des elektrischen Energieverbrauchs für den Einsatz einer Abluftreinigungsanlage mit Zwangsentlüftung (Kap. 6)
2. Systemvergleich DLG-Abluftreinigungsanlagen (Kap. 7)
  - a. Berechnung der zusätzlichen Leistungsaufnahme des Ventilators unter Berücksichtigung der Konstruktion, Einbauten, Anströmfläche/des Schichtdicke-Verhältnisses, der Luftführung und der Wartung
  - b. Berechnung der Leistungsaufnahme der Pumpen bei Einsatz einer Abluftreinigungsanlage
  - c. Abschätzung des Energieverbrauchs und Vergleich mit Angaben in den DLG-Prüfberichten
3. Ableitung möglicher Einsparmaßnahmen für den Betrieb der Abluftreinigungsanlagen und Bestimmung der monetären Einspareffekte auf Basis der ermittelten Energieverbräuche für die Referenzanlagen (Kap. 0).

Die Berechnungsgrundlagen werden in den einzelnen Kapiteln benannt.

### 6.2 Festlegung der Referenzbedingungen

Weil die erforderliche bereitzustellende Leistung und der Energieverbrauch der Anlagen von der jeweiligen Kapazität der Anlage abhängen, werden zunächst zwei Referenzanlagen definiert. Als Untergrenze der zu betrachtenden Betriebsgrößen wird eine Tierplatzzahl definiert, für die ein förmliches Genehmigungsverfahren gemäß 4. BImSchV erforderlich ist. Zugunsten einer möglichst einfachen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis wurden für die Referenzanlagen für

das Land Sachsen repräsentative Stallgrößen festgelegt. Dabei erfolgt die Bestimmung der Mindestluftfrate nach den Vorgaben der DIN 18910 Teil 1. Die Referenzbedingungen werden in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Referenzbedingungen Stallanlage für Mastschweine und Eckwerte nach DIN 18910**

	Referenzanlage 1				Referenzanlage 2			
Tierplätze pro Anlage	2.400				6.000			
Tierplätze pro Stallgebäude	600				1.000			
Anzahl eingesetzter baugleicher Ventilatoren je Stall	3				4			
Haltungsart	Rein-Raus-Verfahren mit 3 Mastzyklen im Jahr, Flüssigmistverfahren, Liegen plan befestigt, laufen perforiert							
Temperaturzone	Zone I, Außentemperatur > 26 °C, Temperaturdifferenz 2 K							
Durchschnittliches Tiergewicht in kg/Abschätzung für Jahresverlauf	30	50	70	100	30	50	70	100
Planungswerte Sommerluftfrate in m³/Tier	62	85	104	126	62	85	104	126
Ansatz max. Förderstrom je Stall in m³/h	37.200	51.000	62.400	75.600	62.000	85.000	104.000	126.000
Planungswert Winterluftfrate in m³/Tier	6,3	8,4	9,4	12,6	6,3	8,4	9,4	12,6
Ansatz max. Förderstrom je Stall in m³/h	3.780	5.040	5.640	7.560	6.300	8.400	9.400	12.600

Im Winter ist bei sehr geringen erforderlichen Luftmengen die Abfuhr der Schadstoffe (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, ...) die bestimmende Größe, im Sommer dagegen die Abfuhr der durch die Tiere und über die Gebäudehülle eingebrachten Wärme. In den nachfolgenden Berechnungen werden für die Sommerauslegung nur der Wärmeeintrag durch die Tiere und die daraus folgenden Luftmengen entsprechend DIN 18910-1 berücksichtigt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, das Sachsen teilweise in der Temperaturzone I (Außentemperatur > 26 °C im Sommer) und teilweise in der Temperaturzone II (Außentemperatur < 26 °C im Sommer) liegt. Die Temperaturdifferenz zwischen der angesaugten Außenluft und der den Wärmeeintrag abführenden Abluft darf bei der Temperaturzone I max. 2 K betragen (für die Abfuhr von 1 kW eingebrachter Wärmeleistung ist somit ein Volumenstrom von 1.500 m³/h erforderlich).

## 6.3 Energieverbrauch Referenzanlagen

### 6.3.1 Berechnungsgrundlagen

Als Berechnungsgrundlage für die Abschätzung der Luftmengen dient die DIN 18910-1 (Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe).

#### Berechnung Energieverbrauch Belüftungsaufwand

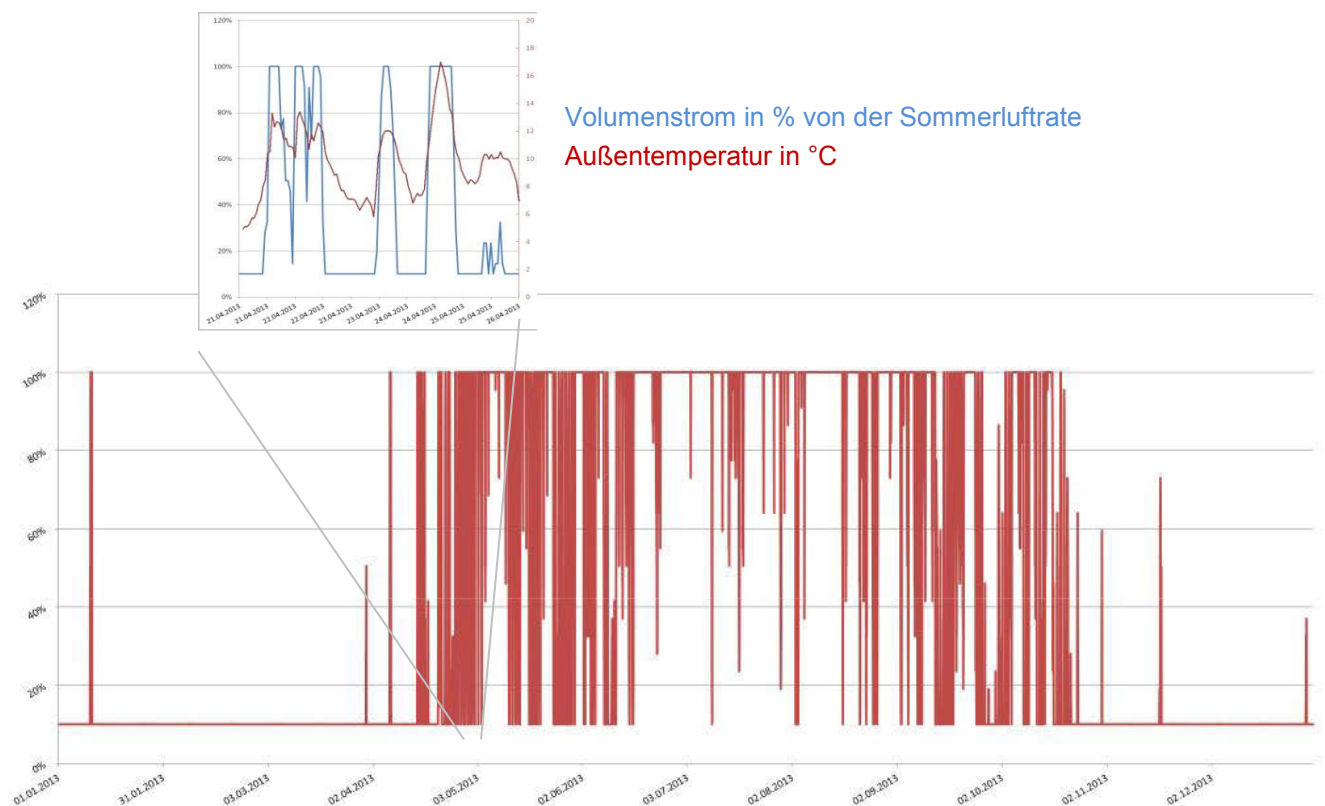
Zur Beurteilung der Luftführung wird das Programm AutoCAD mit dem Lüftungsaufsatz von liNear eingesetzt. Mit diesem Programm kann der entstehende Druckverlust im Auslegungsfall berechnet und die Luftführung beurteilt werden.

Der Strömungswiderstand des Stalls wird aufgrund fehlender Quantifizierungsmöglichkeit als konstant angenommen. Weil im Rahmen dieser Betrachtung weniger der absolute Energiebedarf als vielmehr der zusätzlich erforderliche Energieverbrauch für den Betrieb der Abluftreinigung von Interesse ist, ist diese Vereinfachung zulässig, solange ausgeschlossen werden kann, dass der Wirkungsgrad des Ventilators im anzunehmenden Druckbereich relevanten Veränderungen unterworfen ist. Wäre dies der Fall, würden für den Strombedarf durch den zusätzlichen Druckverlust der Abluftreinigung falsche Ventilatorwirkungsgrade für die unterschiedlichen Betriebszustände angenommen werden.

Der Aufwand für die Luftförderung wird durch die Ventilatoren und deren aufgenommene Leistung bestimmt. Die zu fördernde Luftmenge und damit die erforderliche Energie sind über das Jahr variabel (Sommer- und Winterbetrieb).

Zum Berechnen des Energieaufwandes kommt das Programm mh-RLT/ABS von der Firma mh-Software zum Einsatz. Mit diesem Programm können Energieverbräuche von Ventilatoren während eines Jahres berechnet werden. Der Betrieb der Ventilatoren kann über ein voreingestelltes Programm oder unter Berücksichtigung von Variablen wie bspw. Außentemperatur oder innere Wärmelasten erfolgen. Bei Systemen, in denen eine Volumenstromregelung durch (Drosselregelung, Drehzahlregelung oder Schaufelverstellung) zum Einsatz kommt, kann dies über einen zusätzlich aufzubringenden Druckverlust berücksichtigt werden.

Grundlage sind die Daten der Referenzventilatoren sowie Herstellerangaben zum Druckverlustverhalten bei unterschiedlichen Volumenströmen. Um den veränderlichen Belüftungsbedarf im Jahresverlauf zu berücksichtigen, wird eine Regelung in Abhängigkeit von der Außentemperatur definiert. Entsprechend den Vorgaben für Mastschweine mit einem Gewicht von 60–100 kg wird bis zu einer Außentemperatur von 10 °C die Winterlufrate gefahren, die dann ab 12 °C auf die Sommerlufrate erhöht wird. Die verwendete Temperaturkurve für die Außenlufttemperatur entspricht dem Testreferenzjahr der Station Chemnitz (s. Anhang 6). Aus den vorgenannten Bedingungen ergibt sich der in Abbildung 6 dargestellte Volumenstrom über das Jahr. 100 % entspricht dabei der Anlagenauslegung bzw. Sommerlufrate.



**Abbildung 6: Jahrgang Volumenstrom in % von der Sommerlufrate**

### Stallanlage

Für die simulierte Stallanlage wird der Druckverlust über die gesamte luftführende Strecke nach Tabelle 8 abgeschätzt. Für die Abschätzung der Betriebskostensenkung bei Umsatz von Effizienzmaßnahmen wird der Energieverbrauch über das Kalenderjahr auf Basis des Jahresverlaufs der zu fördernden Lufrate abgeschätzt. Dafür werden die in der Tabelle 7 aufgeführten Eckdaten genutzt. Es werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Wirkungsgrad Ventilator nach Last:  $h | 100 \% = 45 \%$ ;  $h | 10 \% = 22,5 \%$
- Ventilatorbetrieb entsprechend Jahrgang in Abbildung 6
- Druckverlust über die gesamte luftführende Strecke bei Sommerlufrate: Zuluft->Abluft->Reinigung: 100 Pa

■ Eine Lufrate von 100 % entspricht der maximalen Sommerlufrate der jeweiligen Referenzanlage.

**Tabelle 8: Druckverluste der Referenzanlagen**

Streckenteil	Druckverlust [Pa]
Zuluft	20
Abluft	20
Kniekanal	20
Abluftreinigung	40
Gesamt	100

**Abluftreinigungsanlage**

Als angeschlossene Abluftreinigungsanlage wird ein System mit Rieselbettverfahren angenommen. Die genaue Ausführung der Reinigungsanlage (Anzahl Stufen, Stromführung etc., Abmessungen) ist für die Betrachtung unerheblich und wird daher nicht vorgenommen.

Die für die Aufgabenstellung relevanten Parameter werden als Mittelwerte aus den im Rahmen des Systemvergleichs untersuchten realen Reinigungsanlagen ermittelt. Berücksichtigt wurden dabei alle Anlagen, die ein Rieselbettverfahren zur Ammoniakabscheidung beinhalten. Weil für alle herangezogenen Anlagen sowohl eine ausreichende Staub- als auch Ammoniakreduzierung durch die DLG-Prüfungen bestätigt wurde und diese mit Ausnahme von zwei Systemen auch eine ausreichende Geruchsstoffeliminierung ermöglichen, kann für die Referenzanlage von einer ausreichenden Reinigungsleistung für alle relevanten Komponenten ausgegangen werden. Die aus der Mittelwertbildung bestimmten Daten sind in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9: Referenzbedingungen Abluftreinigungsanlage**

Druckverlust bei mittlerer Verschmutzung	40 Pa bei maximalem Abluftvolumenstrom
Berieselungsmenge pro m <sup>3</sup> Abluft und Tierplatz bei maximalem Abluftvolumenstrom	0,43 l/(m <sup>3</sup> *h) bzw. 54 l/(TP*h)
Spezifische Stromaufnahme der Pumpe pro m <sup>3</sup> Waschflüssigkeit	0,079 kWh/(m <sup>3</sup> h)
Spezifische Leistungsaufnahme der Pumpe pro Tierplatz bei ganzjährigem Vollastbetrieb	4,28 W/TP

Die Verschmutzung der Füllkörper der Reinigungsanlage ist ein entscheidendes Kriterium für den Stromverbrauch über das Gesamtjahr. Eine belastbare Berücksichtigung der Verschmutzung erfordert detaillierte Kenntnis über den zeitlichen Verlauf der Zunahme des Druckverlustes in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Zeit. Weil diesbezüglich keine verwertbaren Daten bekannt sind, ist eine Berücksichtigung der Verschmutzung nicht möglich. Es wird daher von einer konstant mittleren Verschmutzung ausgegangen. Für die Berieselung wird, wie für die meisten Anlagen üblich, eine konstante, kontinuierliche Vollastberieselung ohne Pumpenregelung über das Gesamtjahr angesetzt.

### 6.3.2 Ergebnisse der Referenzanlagen

Auf Basis der der dargestellten Eingangsgrößen ergeben sich folgende Verbräuche der Referenzanlagen:

**Tabelle 10: Jahresenergiebedarf der Referenzanlagen für ein Stallgebäude**

Vorgaben	Referenzanlage 1	Referenzanlage 2
Förderstrom [m <sup>3</sup> /h]	75.600	126.000
Druckverlust [Pa]	100	100
Wirkungsgrad Ventilator	$\eta_{100\%} = 45\%$ $\eta_{10\%} = 22,5\%$	
Ventilatorbetrieb	Entsprechend Abbildung 6: Jahresgang Volumenstrom	
<b>Jahresverbrauch Ventilator (Belüftungsaufwand)</b>		
Spezifisch [kWh/(TP*a)]	23,3	23,3
pro Stallgebäude [kWh/a]	14.000	23.500
pro Anlage [kWh/a]	56.000	141.000
<b>Jahresverbrauch Pumpen</b>		
spezifisch [kWh/(TP*a)]	37,5	37,5
pro Stallgebäude [kWh/a]	22.500	37.500
pro Anlage [kWh/a]	90.000	225.000
<b>Kosten Stromverbrauch bei 0,16 €/kWh</b>		
Stromkosten Gesamtanlage [€/(TP*a)]	9,76	9,76
Stromkosten Gesamtanlage [€/a]	23.360	58.560

## 7 Vergleich der verfügbaren zertifizierten Systeme zur Abluftreinigung hinsichtlich des Energieeinsatzes

### 7.1 Berechnungsgrundlagen

Die in Tabelle 5 aufgeführten Abluftreinigungssysteme werden in diesem Abschnitt einem quantitativen Vergleich hinsichtlich des erforderlichen Energieeinsatzes unterzogen. Ziel dabei ist neben dem direkten Systemvergleich auch die Aufschlüsselung des Leistungsbedarfs auf die verschiedenen eingesetzten Verbraucher(-gruppen), um sinnvolle Ansatzpunkte für Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz identifizieren zu können.

Aufgrund der großen Schwankungen der Angaben der DLG-Prüfberichte hinsichtlich der zu Grunde liegenden Rahmenbedingungen (Anlagengröße, eingesetzte Ventilatoren und Durchsatzsteuerung, tierplatzbezogene Lüftungsraten, Ver-



schmutzungsgrad der Anlage) sowie der teilweise über unterschiedlichen Zeiträume erfolgten Verbrauchsmessungen sind diese Werte im Rahmen eines Systemvergleichs nicht direkt verwendbar (vgl. weitere Angaben in Kap. 7.2.5). Ebenso hängt der tatsächliche Verbrauch an elektrischer Energie stark von konkreten Angaben zur Betriebsweise, den eingesetzten Aggregaten und der Steuerung (z. B. mehrstufige Betriebsweise oder stufenlose Regelbarkeit) ab.

Die verschiedenen Systeme werden daher auf Basis der im Kap. 6 dargestellten Referenzanlagen und Angaben der Hersteller bei konkret festgelegten Randbedingungen verglichen. Für den Systemvergleich werden die maximalen Sommer- und Winterluftraten verwendet.

Real sind die verschiedenen Reinigungssysteme auf unterschiedliche maximale Baugrößen beschränkt, sodass einige Anlagen für die definierte Referenzgröße nicht verfügbar sind. Weil es sinnvoller erscheint, die Einschränkung einer maximalen Baugröße im Rahmen des Systemvergleichs zu vernachlässigen als die fragliche Reinigungsanlage vom Vergleich auszuschließen, wird davon ausgegangen, dass jedes System für die definierte Referenzanlage zur Verfügung steht. Auf Grundlage der jeweiligen Auslegungsparameter, in der Regel Anströmfläche in Abhängigkeit des maximalen Abluftvolumenstroms, werden die verschiedenen Abluftreinigungssysteme auf die Größe der Referenzanlagen skaliert und die erforderliche Leistung für beide Anlagengrößen berechnet.

Der Energiebedarf einer Abluftreinigung setzt sich generell zusammen aus dem Energieaufwand für den Betrieb von Umwälz- und Beregnungspumpen sowie durch den erhöhten Belüftungsaufwand zur Überwindung des zusätzlichen Druckverlustes der Reinigungsanlage. Beide Verbräuche werden zunächst separat eingeschätzt.

### 7.1.1 Berechnung zusätzlicher Leistung des Ventilators

Der zusätzliche Energieverbrauch der Ventilatoren ist abhängig vom Druckverlust der angeschlossenen Abluftreinigungsanlage. Der Druckverlust kann vereinfacht durch das Produkt aus der so genannten Widerstandszahl der Anlage  $z$  und dem Quadrat des Volumenstroms beschrieben werden:

$$\Delta p = z \cdot \dot{V}^2$$

mit

$\Delta p$  = Druckverlust der Abluftreinigungsanlage in Pa,

$z$  = Widerstandszahl der Abluftreinigungsanlage,

$\dot{V}^2$  = Abluftvolumenstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Für den Großteil der Reinigungsanlagen ist die Widerstandszahl im Jahresverlauf nicht konstant, sondern nimmt mit fortschreitender Verschmutzung der Anlage durch das biologische Wachstum der am Schadstoffabbau beteiligten Mikroorganismen und die Ablagerung von Staub und Abbauprodukten zu. Abhängig von den allgemeinen Strömungsbedingungen, der Schadstoffbelastung und der Reinigungshäufigkeit steigt dieser Wert im Betriebsverlauf deutlich an. Eine Verdoppelung im Vergleich zum „sauberen“ Zustand ist für Systeme mit Rieselbettwäschern nicht unüblich. Für die Abschätzung des Jahresverbrauches ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der zunehmenden Verschmutzung erforderlich. Diese Daten sind weder aus den DLG-Prüfberichten ersichtlich, noch konnte diese im Rahmen der Herstellerabfragen ermittelt werden. Der Systemvergleich kann daher nicht auf Grundlage eines Gesamtjahresverbrauches erfolgen. Stattdessen wird eine Abschätzung für die Leistungsaufnahme bei maximaler, mittlerer und minimaler Verschmutzung bei maximaler Sommer- und maximaler Winterluftrate durchgeführt.

Die Berechnung der Leistung erfolgt gemäß der Gleichung in Kap. 5.3.1.1.

Als kombinierter Ventilator- und Motorwirkungsgrad wird 45 % angesetzt. Dieser entspricht einem gängigen Stallventilator (z. B. Ziehl-Abegg FE091 [DLG 2002]) mit einem Antriebsmotor der Effizienzklasse IE2, wobei anzumerken ist, dass heutzutage auch deutlich effizientere Ventilatoren und Motoren verfügbar sind. Der Wirkungsgrad wird im gesamten zu erwartenden Betriebsverlauf mit ändernden Betriebsbedingungen als konstant angesetzt. Eine Veränderung des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Druckverlusten und Luftraten wird somit vernachlässigt. In einigen Abluftreinigungs-



systemen sind die Abluftventilatoren direkt integriert und werden vom Anlagenhersteller mitgeliefert. Es wird davon ausgegangen, dass hier Ventilatoren zum Einsatz kommen, die den getroffenen Annahmen entsprechen.

### 7.1.2 Berechnung Leistungsaufnahme Pumpen

Die Leistungsaufnahme der Pumpen ist, neben dem Wirkungsgrad des eingesetzten Aggregats, grundsätzlich abhängig vom Förderstrom und dem zu überwindenden Gegendruck (Förderhöhe). Der Einfluss des Gegendrucks kann nicht berücksichtigt werden, weil hierfür detailliertere Daten für Anlage (Verrohrung, eingesetzte Düsen, Förderhöhe etc.) und Pumpe (Kennlinie, Wirkungsgrade) erforderlich sind, aber nicht zur Verfügung stehen. Die Bedarfsabschätzung erfolgt daher über einen proportionalen Ansatz zwischen Fördervolumen und Stromverbrauch.

$$P = \dot{V} \cdot \left( \frac{W}{V} \right)_{Ref}$$

mit

$\dot{V}$  = Berieselungsmenge (m<sup>3</sup>/h),

$\left( \frac{W}{V} \right)_{Ref}$  = spezifischer Stromverbrauch (kWh/m<sup>3</sup>).

Als Referenzwertepaar werden die in den DLG-Prüfberichten angegebenen Verbräuche und Berieselungsmengen angenommen. Die Referenzverbräuche werden, sofern nicht anders angegeben, abhängig von den verfügbaren Daten entweder aus dem Produkt von tierplatzspezifischem Jahresverbrauch und Tierplatzzahl oder über die Hochrechnung von Tagesverbräuchen auf das Gesamtjahr bestimmt und anschließend auf die jährliche Berieselungsmenge bezogen. Zur einheitlichen Darstellung werden die auf diese Weise bestimmten Leistungsaufnahmen auf die Tierplatzzahl bezogen. Baugrößenbedingte Unterschiede von Wirkungsgraden können nicht berücksichtigt werden.

Insbesondere beim Einsatz von Schwefelsäure entstehen im stark sauren Milieu Ammoniumsalze, die zu einer Verstopfung der Berieselungsdüsen führen. Eine regelmäßige Kontrolle des Sprühbildes und Reinigung der Düsen im Bedarfsfall ist daher Voraussetzung für einen reibungslosen Betrieb und einen konstant günstigen Stromverbrauch der Pumpen. Im Rahmen der vorliegenden Betrachtung wird eine regelmäßige Kontrolle und Reinigung angenommen.

### 7.1.3 Verwendete Daten

Für die Abschätzung des Energiebedarfs der verschiedenen Abluftreinigungssysteme wurden die erforderlichen Daten, sofern nicht aus den Prüfberichten der DLG hervorgehend, bei den jeweiligen Anlagenherstellern abgefragt. Die abgefragten Daten umfassen die relevanten Auslegungsgrößen zur Ermittlung der Anlagendimensionen, das Druckverlustverhalten der Abluftreinigung zur Abschätzung der zusätzlich erforderlichen Leistung der Belüftung, Durchfluss- und Umwälzmengen von Betriebsmitteln (in der Regel Wasser oder stark verdünnte Schwefelsäure) zur Abschätzung der Pumpenauslastung sowie die Datenblätter der eingesetzten Aggregate zur Berechnung des Stromverbrauchs.

Eine Zusammenstellung der abgefragten und bereitgestellten Angaben ist dem Anhang 2 zu entnehmen.

Im Rücklauf der Herstelleranfragen eingegangene Daten der verschiedenen Abluftreinigungssysteme sind teilweise sehr lückenhaft. Insbesondere zu eingesetzten Aggregaten und dem Verschmutzungsverhalten der Anlage konnten kaum brauchbare Informationen ermittelt werden. Hintergrund für letzteres ist vor allem die große Abhängigkeit von den tatsächlichen Betriebsbedingungen (Luftdurchsatz, Schadstoffbelastung) und der mutmaßlich geringe Fokus auf eine umfangreiche energetische Optimierung der Reinigungsanlagen in der Vergangenheit.

Für die Ermittlung dieser Daten (Verlauf Druckverlust über den Betrieb) sind weitere experimentelle Untersuchungen an Bestandsanlagen notwendig. Ebenso konnten Druckverluste bzw. Widerstandszahlen für den gesäuberten Anlagenzustand nur selten ermittelt werden. In der Regel wurden lediglich maximale und durchschnittliche Druckverluste zur Verfügung gestellt, wobei über die Hintergründe der Datenermittlung für durchschnittliche Druckverluste (angesetzter Volumenstrom, Verschmutzung etc.) in der Regel keine Angaben gemacht wurden. Angaben zu maximalen Druckverlusten sind üblicherweise verfügbar, weil diese entscheidende Kriterien für die Ventilatorauswahl sind.

Widerstandszahlen bei starker, mittlerer und niedriger Verschmutzung zur volumenstromabhängigen Berechnung der Leistungsaufnahme können daher mit den verfügbaren Daten nur über die ermittelten maximalen, mittleren und minimalen Druckverluste abgeschätzt werden (Berechnung über die in Kap. 7.1.1 dargestellte Formel zur Berechnung des Druckverlustes). Sofern keine anderweitigen Angaben gemacht wurden, wird davon ausgegangen, dass sich die entsprechenden Werte stets auf den Auslegungsvolumenstrom beziehen. Es wird des Weiteren veranschlagt, dass die hieraus berechneten Widerstandszahlen auch für den Winterbetrieb gültig sind. Real können im Winterbetrieb deutlich höhere Verschmutzungsgrade toleriert werden. Eine mögliche Unterschätzung des Widerstandswertes im Winter hat aufgrund der deutlich reduzierten Leistungsaufnahme aufgrund des geringeren Volumenstroms nur eine sehr geringe Ergebniswirkung.

Die für die Berechnung ermittelten Daten sind der Tabelle 29 und Tabelle 30 im Anhang 3 zu entnehmen.

Der Wertebereich der spezifischen Stromverbräuche für die Pumpen, der im Rahmen der Datenerhebung ermittelt werden konnte, ist sehr breit gestreut. Denkbare Ursachen für diese Abweichungen sind der Einsatz unterschiedlich effizienter Pumpen, variierende Gegendrücke z. B. aufgrund unterschiedlicher Förderhöhen und eingesetzter Düsen. Des Weiteren spielen hier auch kleinere Stromverbraucher, deren Stromverbrauch nicht separat, sondern im Pumpenverbrauch zusammenfasst wurden, eine Rolle. Allerdings kommen auch anlagenunabhängige Einflussgrößen und eventuell abweichende Datenerhebung in Frage. Die aufbauend auf diesen Daten abgeschätzten Verbräuche sind daher stets als grobe Richtwerte zu verstehen.

Bei Verwendung der Stromverbräuche der Pumpen aus den DLG-Prüfberichten ist auch zu bedenken, dass die Zertifizierung teilweise nahezu zehn Jahre zurückliegt. Es ist davon auszugehen, dass für diese Systeme zwischenzeitlich eine Optimierung stattgefunden hat und bei Neuanlagen geringere Stromverbräuche erzielt werden.

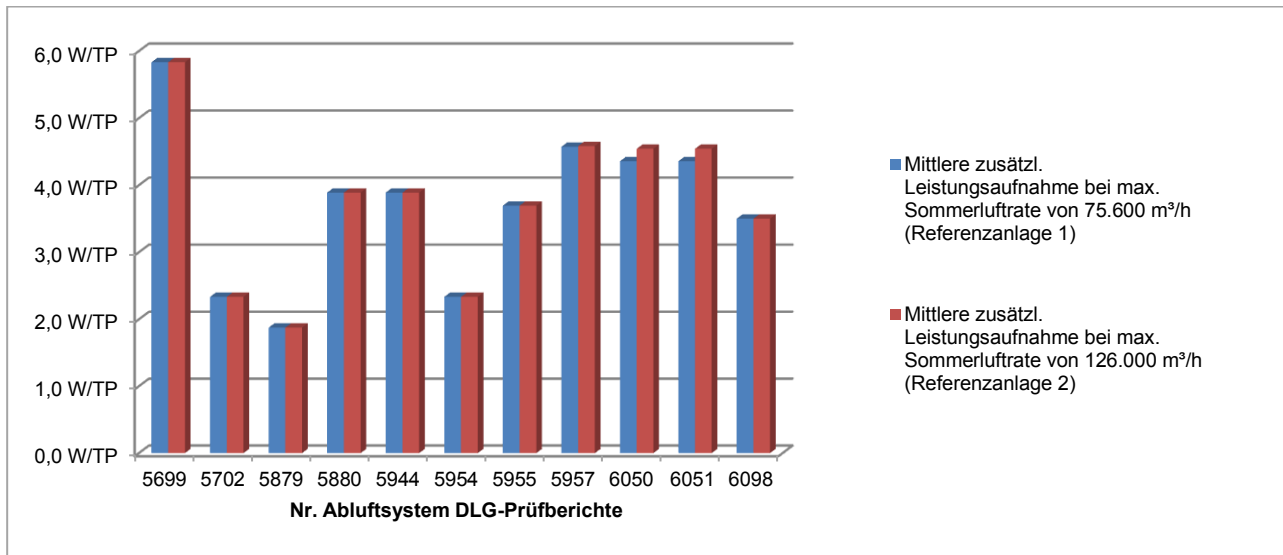
## 7.2 Systemvergleich

### 7.2.1 Zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators

Auf Basis der getroffenen Annahmen, ermittelten Anlagendaten und festgelegten Vorgehensweisen ergeben sich die im Folgenden dargestellten Leistungsaufnahmen bei maximaler Sommer- und maximaler Winterluftrate. Die einzelnen Berechnungsergebnisse sind der Tabelle 31 im Anhang 4 zu entnehmen. Die Leistungsaufnahme wurde bei maximaler, mittlerer und minimaler Verschmutzung bei maximaler Sommer- und maximaler Winterluftrate bestimmt.

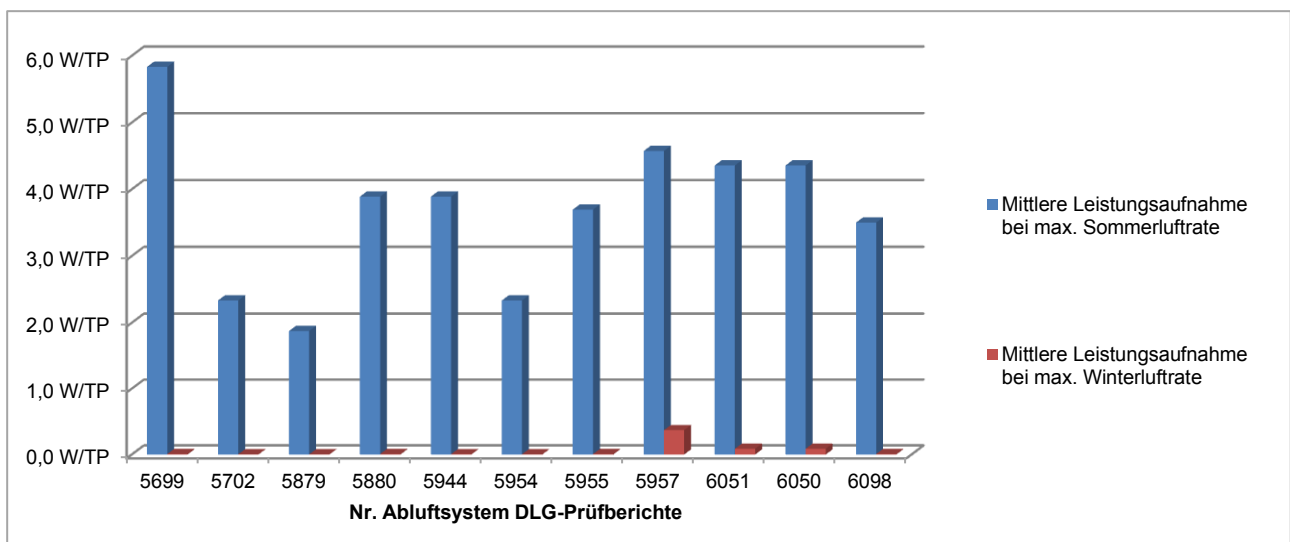
Die ermittelte Leistungsaufnahme, die durch den Betrieb der Abluftreinigungsanlage am Ventilator pro Tierplatz entsteht, ist für die meisten Anlagen, in denen keine anlagengrößenabhängige Konstruktionsunterschiede z. B. zur Verbesserung der Luftverteilung berücksichtigt wurden, unabhängig von der Anlagengröße. Ursache hierfür ist, dass die Filtergröße in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms so ausgelegt wird, dass bei Auslegungsvolumenstrom ein festgelegter Druckverlust erreicht wird. Für einen Vergleich verschiedener Anlagengrößen ergibt sich daraus, dass die Leistungsaufnahme des Ventilators für einen festgelegten Lastfall proportional zum Auslegungsvolumenstrom ist (einen größenunabhängigen Ventilatorwirkungsgrad vorausgesetzt). Weil der Abluftvolumenstrom ebenfalls proportional zur Tierplatzzahl berechnet wird, verhält sich auch die Leistungsaufnahme proportional zur Tierplatzzahl. Zudem wird angenommen, dass der Ventilatorwirkungsgrad unabhängig von der Anlagengröße bei 45 % liegt. Diese Annahme wird getroffen, weil davon ausgegangen wird, dass nur eine Ventilatorgröße zum Einsatz kommt und bei höheren Luftraten eine größere Anzahl an Ventilatoren parallel geschaltet wird.

Geringfügige Unterschiede entstehen bei den Anlagen 5957, 6050 und 6051. Diese Anlagen sind modular aufgebaut, die Anströmfläche kann daher nicht exakt an den Abluftvolumenstrom angepasst werden. Hierdurch entstehen größenabhängig unterschiedliche Flächenbelastungen und entsprechend geringfügig unterschiedliche Druckverluste.

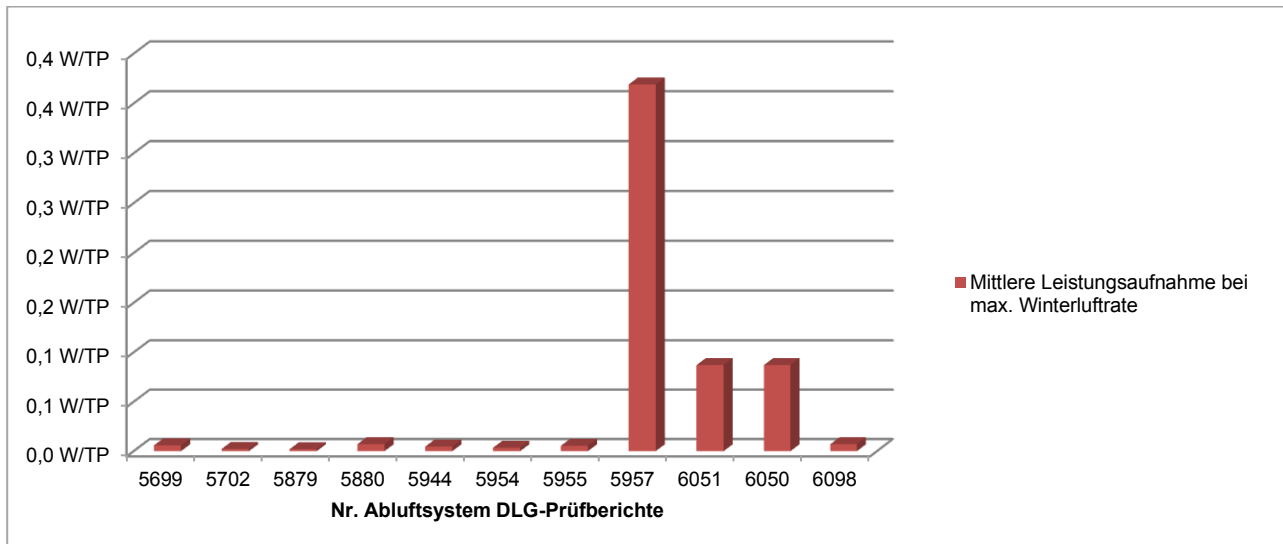


**Abbildung 7: Mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme Ventilatoren – Vergleich Referenzanlagen**

Im Winterbetrieb (ca. 10 % der Sommerluftfrate) reduziert sich die Leistungsaufnahme ohne Berücksichtigung veränderter Wirkungsgrade und Verluste durch die Volumenstromregelung auf etwa 0,1 % des Leistungsbedarfs bei Sommerluftfrate, weil die Leistungsaufnahme in etwa proportional zur dritten Potenz des Volumenstroms ist (vgl. Proportionalitätsgesetze im Kap. 5.3.1.1). Die saisonabhängige Leistungsaufnahme für die Referenzanlage 1 ist in Abbildung 8 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Reduzierung bei Winterbetrieb für die Sprühturmwäscher 5957, 6050 und 6051 geringer ausfällt (vgl. hierzu auch Abbildung 9). Begründet wird dies durch das Betriebsregime der Anlagen. Die Anlagen bestehen aus parallelen Reinigungsmodulen, die jeweils mit einem eigenen Ventilator ausgestattet sind. Wird die Luftfrate reduziert, so werden die Module stufenweise abgeschaltet. Ein Modul ist mit FU ausgestattet und sorgt für die Anpassung des Volumenstroms zwischen den Stufensprüngen. Diese Betriebsweise führt dazu, dass im Winter zwar weniger Module betrieben werden, in den betriebenen allerdings immer noch hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen, sodass die Abnahme des Druckverlustes geringer ausfällt als bei den Anlagen, für die auch im Winterbetrieb die volle Anströmfläche zur Verfügung steht. Diese Anlagen können daher nicht vollständig von reduzierten Volumenströmen profitieren und weisen bei reduziertem Volumenstrom eine höhere Leistungsaufnahme für die Ventilatoren auf.



**Abbildung 8: Vergleich mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators bei Sommer- und Winterluftfrate (Referenzanlage 1)**



**Abbildung 9: Vergleich mittlere tierplatzbezogene zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators bei Winterluft-  
rate (Referenzanlage 1)**

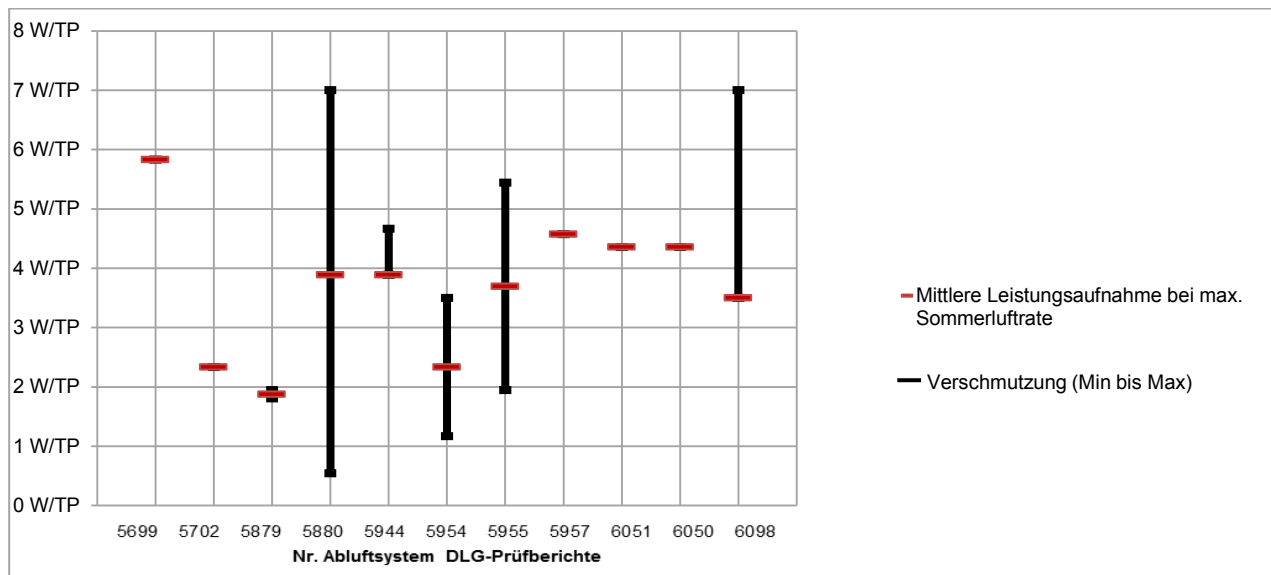
Aufgrund der, sofern vorhandenen, nur geringfügigen Unterschiede bei Veränderung der Anlagengröße sowie die im Vergleich zum Sommerbetrieb extrem niedrigen Leistungsaufnahmen bei Winterluft-  
rate erfolgt die weitere Betrachtung für die Referenzanlage 1 im Sommerbetrieb.

Die mittlere zusätzliche Leistungsaufnahme liegt zwischen 1,9 W/TP (Anlage 5879) und 5,8 W/TP (Anlage 5699). Der größte zusätzliche Leistungsbedarf wird rechnerisch für den einstufigen Biofilter (5699) ausgewiesen. Die deutliche Differenz zu den mehrstufigen Reinigungsanlagen (5944, 5955, 6098) mit Rieselbett und Biofilter entspricht nicht den Erwartungen, weil trotz der um ca. 50 % größeren Filtertiefe des einstufigen Biofilters gegenüber den Biofiltern in mehrstufigen Anlagen, v. a. auf Grund der Druckverluste durch die zusätzlichen Reinigungsstufen, keine deutlich höhere Leistungsaufnahme durch den Biofilter zu erwarten ist. Ursache hierfür sind die bereitgestellten Angaben der Anlagenhersteller, welche für diesen Fall nicht als plausibel eingeschätzt werden.

Die Reinigungsanlagen mit Rieselbettverfahren (5702 bis 5955 und 6098) weisen eine zusätzliche mittlere Leistungsaufnahme von 1,9 W/TP bis 3,9 W/TP auf. Die Leistungsaufnahmen der einstufigen Anlagen (5702, 5879) liegen dabei um etwa 40 % unterhalb der Leistungsaufnahmen der zweistufigen Anlagen (5880, 5944, 5954), wobei die Anlage 5954 im Bereich der einstufigen Anlagen angesiedelt ist. Die dreistufige Anlage 5955 unterscheidet sich zur Anlage 5954 durch die zusätzliche Biofilterstufe. Die mittlere Leistungsaufnahme des Ventilators wird hierdurch um ca. 1,4 W/TP (60 %) erhöht. Die dreistufige Anlage 6098 liegt im Bereich der zweistufigen Anlagen.

Die Anlagen 5880 und 6098 weisen im Vergleich zu den übrigen Reinigungsanlagen mit Rieselbettverfahren eine verhältnismäßig kleine Anströmfläche auf (ca. 50 % bzw. 35 % der durchschnittlichen Fläche). Ein direkter Einfluss auf den durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit verursachten höheren Druckverlust und damit auf die Leistungsaufnahme konnte anhand der übergebenen Daten nicht abgeleitet werden.

Die Sprühturmwäscher 5957, 6050 und 6051 haben eine vergleichsweise hohe zusätzliche mittlere Ventilatorleistungsaufnahme, welche auf den geringen Strömungsquerschnitt (nur grob 10 % oder weniger im Vergleich zur Anströmfläche der Rieselbettsysteme) mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und damit des Druckverlustes zurückzuführen ist. Die hierfür ermittelte zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators ist in Abbildung 10 dargestellt. (Der Unterschied zur mittleren Aufnahmeleistung wird in dieser Grafik, sofern bekannt, durch die schwarzen Balken dargestellt.)



**Abbildung 10: Bereich zusätzliche Leistungsaufnahme des Ventilators in Abhängigkeit von der Verschmutzung (Referenzanlage 1)**

Aus der Abbildung 10 wird ersichtlich, dass mit Zunahme der Verschmutzung teilweise erhebliche höhere Leistungen zur Förderung des Volumenstroms aufgebracht werden müssen. Die Unterschiede machen deutlich, dass der Verschmutzung der Füllkörper bzw. deren Abreinigung eine große Bedeutung für den Stromverbrauch der Anlagen zukommt. Der Grad der auftretenden Verschmutzungen im Jahresverlauf ist abhängig von den Füllkörpereigenschaften, der Schadstoffbelastung der Abluft und dem Umgang mit entstandenen Verschmutzungen. Hierfür werden durch die verschiedenen Anlagenhersteller unterschiedliche Konzepte verfolgt. Alle Anlagen verfügen generell über einen Drucksensor, der bei erhöhtem Gegendruck eine Alarmmeldung zur Reinigung der Filterflächen ausgibt. Dieses ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass jederzeit eine ausreichende Stallbelüftung erfolgen kann. Das Erreichen dieses Grenzdruckverlustes sollte aber zugunsten eines geringeren Energieverbrauches unterbunden werden. Die Reinigungszyklen sind daher so festzulegen, dass der Grenzdruckverlust im Normalbetrieb nicht erreicht wird. Die Systeme 5954 und 5955 arbeiten mit automatischen Abreinigungssystemen der ersten beiden Filterstufen. Für das System 5880 wird eine automatisch gesteuerte und zyklische Abreinigung der Lamellen (erste Filterstufe) angegeben. Für die Abluftreinigungsanlagen 5702 und 5879 ist gemäß Herstellerangabe keine Reinigung erforderlich. Durch die vertikale Durchströmung (Gegenstrom) und den Einsatz von Füllkörpern mit relativ großen Porenvolumina sowie einer geeigneten Flüssigkeitsaufgabe werden Verschmutzungen permanent ausgespült. Hierfür wird ein erhöhter Flächenbedarf der Anlage in Kauf genommen.

### 7.2.2 Leistungsaufnahme der Pumpen

Auf Basis der getroffenen Annahmen, ermittelten Anlagendaten und festgelegten Vorgehensweisen ergeben sich die in Abbildung 12 dargestellten Leistungsaufnahmen für den Pumpenbetrieb bei maximaler Sommer- und maximaler Winterluftfrate. Die einzelnen Berechnungsergebnisse sind der Tabelle 32 im Anhang 4 zu entnehmen.

Analog zur Leistungsaufnahme durch die Ventilatoren ist festzustellen, dass die auf den Tierplatz bezogenen Leistungsaufnahmen der Pumpen in der Regel unabhängig von der Anlagengröße sind. Bei messtechnischer Ermittlung ist sehr wohl von einem Unterschied des Pumpenstromverbrauchs auszugehen, weil beim Einsatz größerer Pumpen bessere Wirkungsgrade erreicht werden. Auch das Verteil- und Berieselungssystem ist bei unterschiedlicher Anlagengröße geringfügigen Änderungen unterworfen, sodass auch die Reibungswiderstände mit der Baugröße variieren. Beide Effekte können auf Grundlage der verfügbaren Daten nicht berücksichtigt werden. Insgesamt wird der dadurch bedingte Unterschied der Leistungsaufnahme als vernachlässigbar klein eingeschätzt.

Größenabhängige Unterschiede von Berieselungsrate und Leistungsaufnahme sind für die Sprühturmwäscher 6050, 6051 und 5957 (nur bei Winterluftfrate) sowie für den zweistufigen Wäscher 5880 festzustellen. Die Ursachen hierfür liegen nicht in Skalierungseffekten, sondern in der modularen Bauweise, die eine Anpassung der Berieselungsraten an den Abluftvolumenstrom nur in Stufen erlaubt. Die unterschiedlichen Leistungsaufnahmen der Anlage 6098 sind auf die

Verwendung unterschiedlicher spezifischer Stromverbräuche für die verschiedenen Anlagengrößen (Herstellerangaben) zurückzuführen.

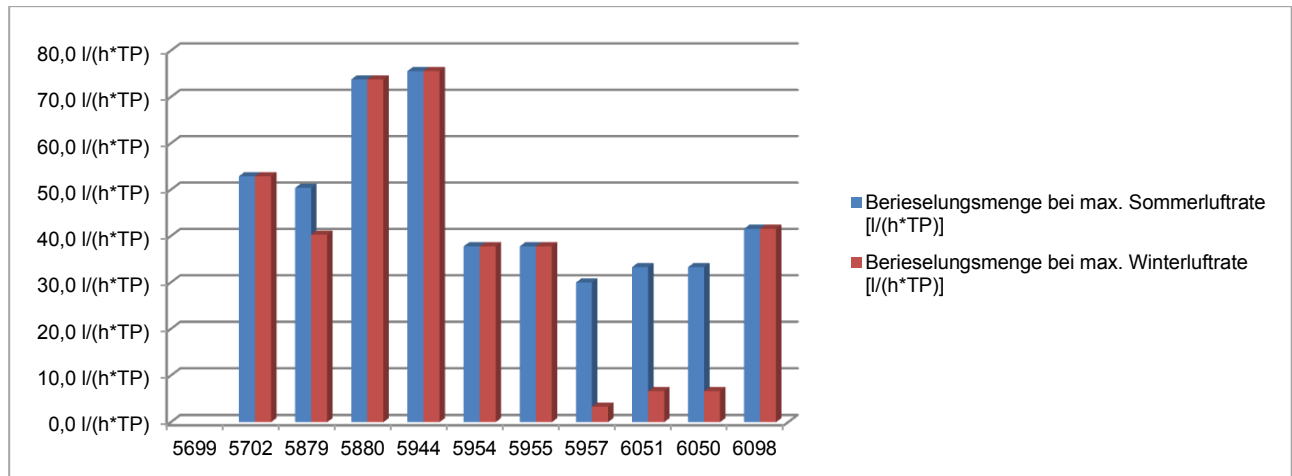


Abbildung 11: Tierplatzspezifische Berieselungsmengen Referenzanlage 1

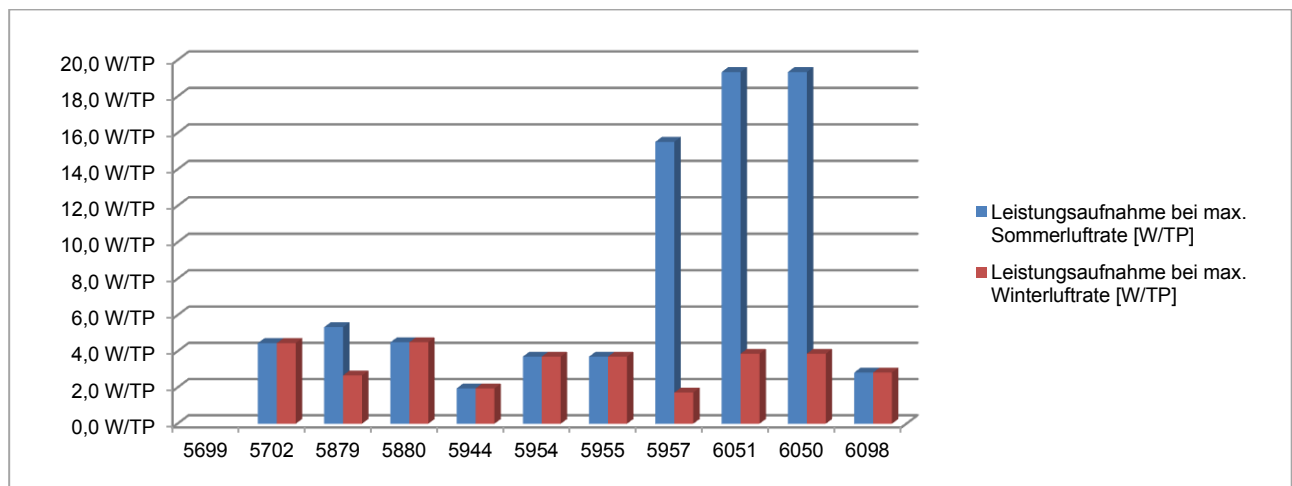


Abbildung 12: Tierplatzspezifische Leistungsaufnahme Referenzanlage 1

Auch zwischen Sommer- und Winterbetrieb sind nur in Ausnahmefällen unterschiedliche Berieselungsraten und Leistungsaufnahmen festzustellen, weil der Großteil der Anlagen mit einer konstanten, jahreszeitunabhängigen Aufgabemenge gefahren wird (werden muss). Ausnahmen stellen hier erneut die Sprühturmwäscher 6050, 6051 und 5957, bei denen aufgrund der modularen Bauweise eine Stufenanpassung der Berieselungsrate an die Winterluft rate möglich ist. Für die Sprühturmwäscher beträgt die mögliche Einsparung im Winter durch die Möglichkeit der Volumenstromreduzierung etwa 90 %. Auch beim Rieselbettwäscher 5879 ist eine Anpassung der Berieselungsmenge an den aktuellen Abluftstrom durch eine FU-Regelung möglich. Durch die Reduzierung des Fördervolumenstroms auf 80 % können mit diesem System im Winterbetrieb 50 % des Stromverbrauchs eingespart werden.

Im Vergleich der Systeme muss zwischen Sprühturmwäschern und Reinigungsanlagen mit Rieselbett unterscheiden werden. Die Berieselungsmengen der Sprühturmwäscher liegen im Sommer leicht unterhalb denen der Rieselbettsysteme, die Leistungsaufnahme ist allerdings deutlich erhöht. Grund ist hier mutmaßlich der höhere erforderliche Vordruck an den Düsen zur Erzeugung des benötigten feinen Sprühbildes. Im Winterbetrieb kann der Verbrauch, sofern mehrere Module installiert sind, durch die Abschaltung nicht benötigter Module reduziert werden. Die Leistungsaufnahme im Winterbetrieb liegt dann im Bereich der untersuchten Rieselbettsysteme. Trotz der Möglichkeit, die Berieselungsmenge an den Abluftvolumenstrom anzupassen, ist über das Gesamtjahr mit einem höheren Stromverbrauch zu rechnen als bei Wäschern mit Rieselbettverfahren.

Die tierplatzspezifischen Berieselungsmengen der Rieselbettwäscher bewegen sich im Bereich 38 bis 76 l/h. Die Leistungsaufnahmen variieren zwischen 2 und 5 W/TP. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Systemen mit einer Berieselungsstufe (5944) und zwei Berieselungsstufen (inkl. Vorbedüsung zur Staubabscheidung) (5702–5955) sind mit Bezug zur Berieselungsmenge nicht identifizierbar. Im Vergleich zu den zweistufigen Systemen ist der Verbrauch des einstufigen Systems deutlich reduziert. Das liegt vor allem am entsprechend der Herstellerangaben ermittelten, sehr niedrigen Pumpenverbrauch. Die Leistungsaufnahmen der zweistufigen Systeme sind weitestgehend gleich.

Auffällig ist, dass das System 5944 einen um 70 bis 75 % geringeren förderstromspezifischen Leistungsbedarf aufweist als die übrigen Systeme. Auch für die Anlage 5880 wurde eine vergleichsweise geringe spezifische Leistungsaufnahme ermittelt (ca. 25–45 % geringer). Die Ursachen hierfür sind unbekannt. Ein nennenswert höherer förderstromspezifischer Leistungsbedarf der Pumpen ist für Systeme, die intervallbetrieben werden (5880, 5954, 5955), anhand der verfügbaren Daten nicht festzustellen. Der förderstromspezifische Leistungsbedarf der Sprühtürme ist ca. siebenmal höher als der Durchschnittswert der Rieselbettwäscher. Eine mögliche Ursache hierfür sind die deutlich höheren Vordrücke, die zur Erzeugung eines ausreichend feinen Sprühbildes benötigt werden.

### 7.2.3 Leistungsaufnahme gesamt

Die gesamte Leistungsaufnahme für Ventilator und Pumpe bei maximaler Sommerluftfrate und bei maximaler Winterluftfrate für ein Stallgebäude der Referenzanlage 1 ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 zusammengefasst.

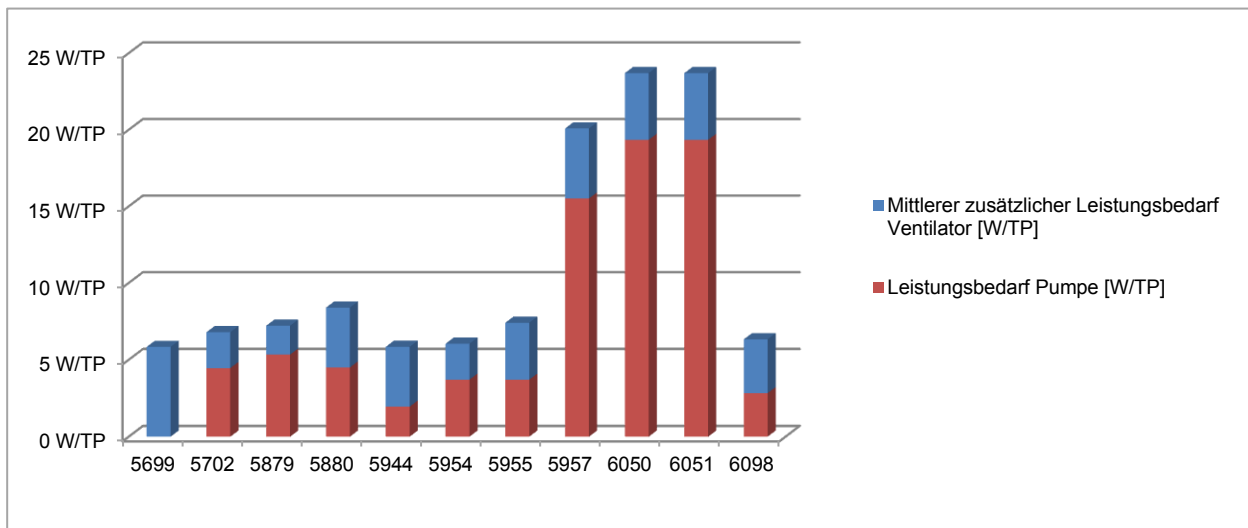


Abbildung 13: Tierplatzbezogene Leistungsaufnahme ARA gesamt bei max. Sommerluftfrate (Referenzanlage 1)

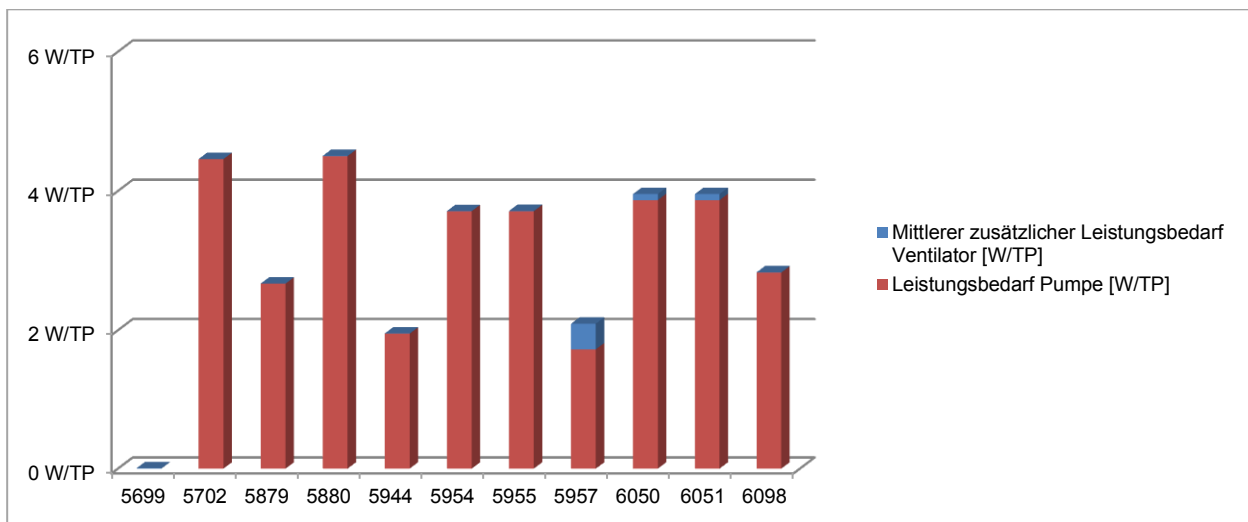


Abbildung 14: Tierplatzbezogene Leistungsaufnahme ARA gesamt bei max. Winterluftfrate (Referenzanlage 1)



Die summierte Leistungsaufnahme für Ventilator und Pumpe ist im Sommerbetrieb für die Anlagen 5699 bis 5955 sowie 6098 mit 5,8 bis 8,4 W/TP weitestgehend ähnlich.

Der Biofilter der Firma Hagola (5699) weist einen relativ hohen Leistungsbedarf des Ventilators auf (5,8 W/TP bei Sommerluftfrate), erfordert dafür aber auch keinen Pumpenaufwand. Das führt dazu, dass der Leistungsbedarf im Winter vernachlässigbar gering ist. Mit diesem System ist allerdings auch keine Ammoniakreduzierung möglich.

Die einstufigen Wäscher von Dorset (5702) und Devriecom (5879) haben mit ca. 6,7 bzw. 7,2 W/TP bei maximaler Sommerluftfrate einen ähnlichen Leistungsbedarf, wobei der für die Pumpe den größten Anteil hat. Für den Winterbetrieb wurde für die Anlage von Devriecom eine um etwa 1,8 W/TP oder 40 % reduzierte Leistungsaufnahme ermittelt. Das ist begründet durch die Anpassung der Berieselungsmenge an den Abluftvolumenstrom, welche für die Devriecomanlage realisiert worden ist. Für beide Systeme wurde im Rahmen der DLG-Prüfung eine ausreichende Entfernung von Staub, Ammoniak und Geruchsstoffen bestätigt, wobei die Reinigungsleistung für Staub und Ammoniak für die Anlage von Dorset tendenziell höher liegt. Beide Systeme arbeiten nach dem Gegenstromprinzip. Dass es sich hierbei um eine energetisch ungünstigere Stromführung handelt, wie theoretisch abgeleitet, kann anhand der Angaben der Hersteller zu den auftretenden Druckverlusten nicht bestätigt werden. Im Gegenteil, durch die Aufstellung ist die Neigung zur Füllkörperschmutzung deutlich reduziert, sodass die Anlage im Regelbetrieb dauerhaft mit geringem Druckverlust gefahren werden kann, was sich in einem vergleichsweise niedrigen Leistungsbedarf der Ventilatoren widerspiegelt. Für die Abreinigung ist im Gegenzug eine leicht erhöhte Pumpenleistung erforderlich.

Für die zweistufigen Rieselbettwäscher der Hersteller IUS (5944) und SKOV (5954) wird ein Leistungsbedarf für Pumpe und Ventilator im Sommerbetrieb in gleicher Höhe berechnet. Für die Anlage von SKOV ist jedoch die Leistungsaufnahme der Pumpe und für das System von IUS, weil hier nur eine Reinigungsstufe berieselt wird, die des Ventilators maßgeblich. Für die Anlage von Uniqfill (5880) wurde im Sommer ein höherer Leistungsbedarf ermittelt. Im Winterbetrieb weist die Anlage IUS (5944) aufgrund der geringen Pumpenleistung den niedrigsten Leistungsbedarf auf.

Um den Abbau von Geruchsstoffen zu gewährleisten, kann das System von SKOV um eine zusätzliche Reinigungsstufe in Form eines Biofilters erweitert werden (5955). Der Leistungsbedarf steigt dabei um etwa 1,4 W/TP (25 %), liegt aber immer noch im Bereich der ein- und zweistufigen Anlagen. Im Winterbetrieb ergibt sich keine Veränderung gegenüber der Ausführung ohne Biofilter.

Für die dreistufige Anlage von KWB (6098) wurde eine vergleichsweise hohe Leistungsaufnahme ermittelt, vor allem der Pumpenbedarf aufgrund der hohen Berieselungsrate erscheint sehr hoch angesetzt.

Für die Sprühturmwäscher von Big Dutchman (5957, 6051) und Reventa (6050) wurden aufgrund des hohen benötigten Drucks verhältnismäßig hohe Leistungsaufnahmen für die Pumpen berechnet. Im Winterbetrieb kann diese Leistungsaufnahme durch die Möglichkeit, einzelne Module abzuschalten, auf das Niveau der Rieselbettwäscher reduziert werden.

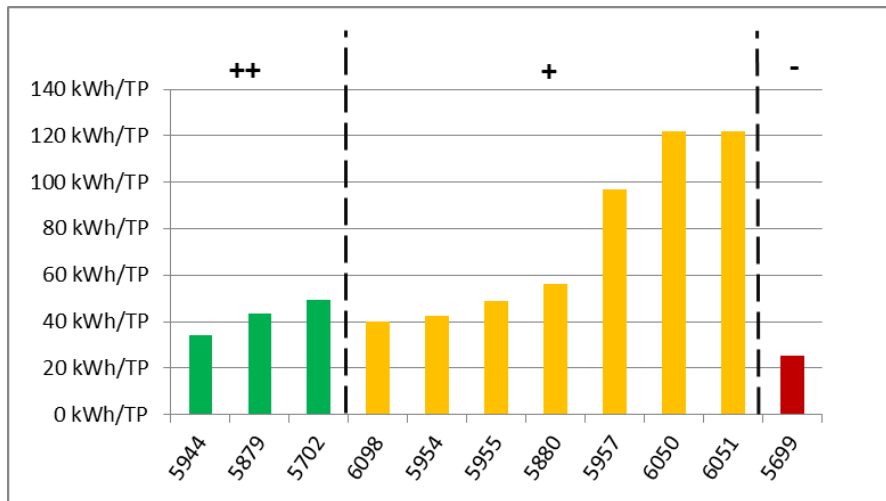
Abbildung 13 und Abbildung 14 machen deutlich, dass große und für die Reinigungssysteme jeweils individuelle Unterschiede in der Leistungsaufnahme für verschiedene Lastfälle bestehen. Zwar nimmt der Stromverbrauch aller Systeme bei verringerter Last (ermittelt am Lastbeispiel max. Winterluftfrate) ab, der Umfang, in dem dieses geschieht, ist jedoch für jedes System individuell. Für einen Vergleich der verschiedenen Reinigungsanlagen ist eine alleinige Betrachtung der Aufnahmeleistung für einen bestimmten Lastfall (z. B. maximale Sommerluftfrate) daher nicht ausreichend. Vielmehr müssen die verschiedenen auftretenden Lastfälle über ein Gesamtjahr in Form eines Gesamtjahresverbrauchs berücksichtigt werden. Hierzu ist jedoch die Erhebung weiterer Daten aus Messungen zum Betriebsverlauf erforderlich.

#### **7.2.4 Abschätzung des Jahresenergieverbrauchs in kWh/(TP\*a)**

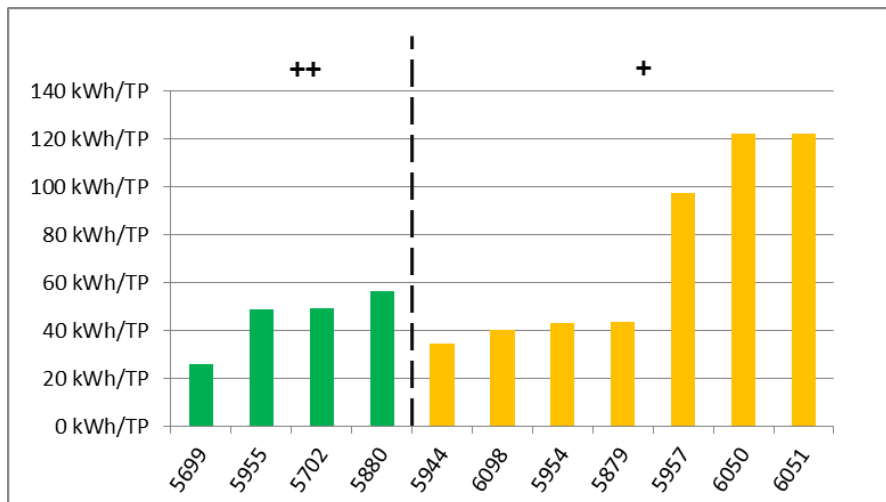
Ein Vergleich bezüglich des Gesamtjahresenergieverbrauchs mit Anspruch auf quantitative Korrektheit ist mit den verfügbaren Daten nicht möglich, eine qualitative Abschätzung scheint aber dennoch sinnvoll. Für eine Näherung an einen Gesamtjahresverbrauch wird angenommen, dass die im Verlauf eines Jahres auftretenden Lastfälle zu jeweils 50 % durch die maximale Sommer- und die maximale Winterluftfrate dargestellt werden. Literaturwerte weisen im Mittel Luftfraten von 48 % der maximalen Luftfrate mit einer Spanne von 42 % bis 54 % aus (KTBL 2006).

Real treten natürlich viele weitere Lastfälle auf, die unterhalb der maximalen Luftraten liegen. Gleichzeitig bleibt der Einfluss der verschiedenen und im Kap. 5.3.1.1 beschriebenen Regelungen des Volumenstroms unberücksichtigt. Ein auf diese Weise ermittelter Verbrauch kann daher den tatsächlichen Jahresverbrauch nicht quantitativ exakt abbilden. Er ermöglicht jedoch einen Vergleich der Abluftreinigungssysteme unter Berücksichtigung beider betrachteten Lastfälle. Die Funktion der Abluftreinigungsanlagen, also die Abreinigung der verschiedenen Schadstofffrachten aus dem Abluftstrom, ist immer das erste Kriterium für die Anlagenauswahl. Erst wenn festgelegt ist, welche Abreinigungsleistung für welchen Schadstoff erforderlich ist, kann eine Auswahl hinsichtlich des Energieverbrauchs erfolgen. Der Systemvergleich wird daher für verschiedene Schadstoffkomponenten separat durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse sind der Aufstellung in der Tabelle 11 bzw. Tabelle 33 im Anhang 5 zu entnehmen.

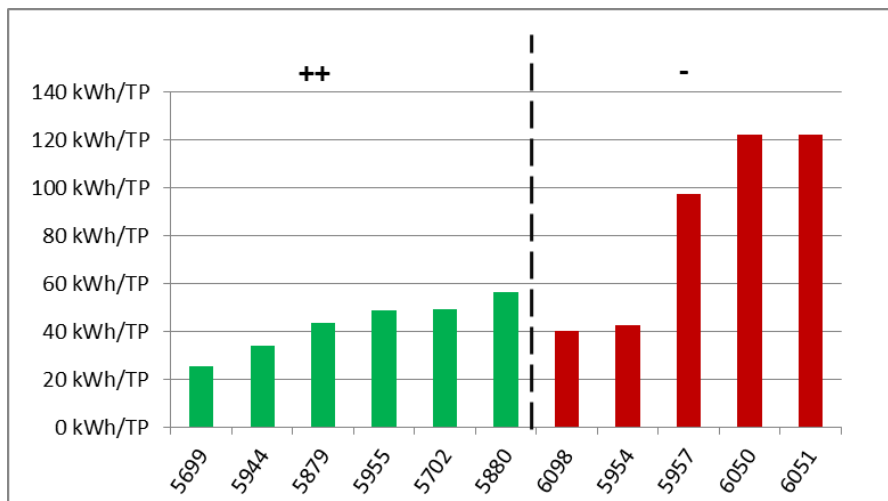
Grundlage für die Abschätzung der Reinigungsleistung sind die in der Tabelle 6 dargestellten Daten.



**Abbildung 15: Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Ammoniak**



**Abbildung 16: Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Staub**



**Abbildung 17: Systemvergleich – spezif. Jahresstromverbrauch geordnet nach Reinigungsleistung bzgl. Geruch**

Bis auf den einstufigen Biofilter der Fa. Hagola (5699) sind alle Reinigungssysteme für die Entfernung von Ammoniak aus dem Abluftstrom geeignet. Sehr gute Reinigungsleistungen erzielen gemäß den DLG-Prüfberichten die Systeme von IUS (5944), Devriecom (5879) und Dorset (5702). Die genannten Systeme weisen zudem einen niedrigen Energieverbrauch auf. Der Stromverbrauch der Anlagen der Hersteller KWB (6098), SKOV (5954 und 5955) und Uniqfill Air (5880) liegen in einem vergleichbaren Bereich, haben jedoch eine geringere Reinigungsleistung. Der Stromverbrauch der Sprühturmwäscher von Big Dutchman bzw. Reventa (5957, 6050 und 6051) ist deutlich höher. Am besten schneidet die Reinigungsanlage von IUS (5944) ab. Sie weist den geringsten Stromverbrauch bei optimaler Reinigungsleistung auf. Die bisher formulierten rechtlichen Anforderungen (vgl. Kap. 2.4) werden von allen Anlagen erfüllt.

Bezüglich der Eliminierung von Geruchsstoffen sind die Anlagen der Hersteller Hagola (5699), SKOV (5954 und 5955), Devriecom (5879), Dorset (5702) und Uniqfill Air (5880) gut geeignet. Die übrigen Systeme weisen keine ausreichende Geruchsentfernung auf. Aus energetischer Sicht ist hier das System von Hagola zu präferieren.

In der Gesamtbetrachtung stellt der Biofilter der FA. Hagola aufgrund des niedrigen Energieverbrauchs und der guten Reinigungsleistung bezüglich Staub und Geruchsstoffen die optimale Reinigungsanlage dar, sofern keine Entfernung von Ammoniak erforderlich ist. Eine optimale Ammoniakreduzierung bei gleichzeitiger Geruchs- und Staubentfernung ist mit der Reinigungsanlage der Fa. IUS (5944) möglich, für die der insgesamt zweitniedrigste Energieverbrauch ermittelt wurde. Die Staubentfernung ist hierbei allerdings geringer. Vergleichbare Reinigungsleistungen erreicht die Anlage von Devriecom (5879). Für diese wurde ein um ca. 25 % erhöhter Verbrauch gegenüber der IUS-Anlage bestimmt.

Ist keine Geruchsstoffeliminierung erforderlich, kann das zweistufige System von SKOV (5954) eingesetzt werden. Es weist in etwa den gleichen Verbrauch auf wie der Wäscher von Devriecom. Durch die Erweiterung um eine dritte Stufe (5955) ist auch mit dem System von Devriecom eine zuverlässige Geruchsentfernung möglich. Gleichzeitig wird die Abreinigungsleistung für Staub erhöht. Hierdurch entsteht allerdings ein Energiemehraufwand von ca. 14 %.

Der Energieverbrauch des Systems von Dorset (5702) liegt bei optimaler Abtrennung aller betrachteten Schadstoffkomponenten im Bereich der dreistufigen SKOV-Anlage und ist damit gegenüber der IUS-Anlage um ca. 44 % und gegenüber der Devriecom-Anlage um ca. 14 % erhöht.

### 7.2.5 Zusammenfassung und Vergleich mit Angaben in den DLG-Prüfberichten

Aus den Berechnungsergebnissen des Systemvergleichs kann geschlussfolgert werden, dass unabhängig vom Verfahren der Betrieb einer Abluftreinigungsanlage in Verbindung mit einer Zwangsentlüftung zu erhöhten Energieverbräuchen führt. Die Berechnungen weisen einen Mehrverbrauch von 26 bis 122 kWh/(TP\*a), im Mittel 62 kWh/(TP\*a) aus. Dabei entfallen ca. 17 bis 102 kWh/(TP\*a) auf den Betrieb der Pumpen und 8 bis 26 kWh/(TP\*a) auf den Mehrverbrauch der Ventilatoren bei Einsatz einer Abluftreinigung. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass ohne die Errichtung einer Abluftreinigungsanlage im Regelfall keine zentrale Zwangsentlüftung installiert wird. Somit wäre ein zusätzlicher Stromverbrauch

durch den Einsatz einer zentralen Abluftabsaugung (zusätzlicher Druckverlust durch längere Wege und notwendige Umlenkungen) im Vergleich zu einer dezentralen Absaugung zu berücksichtigen.

Literaturangaben zu den Stromverbräuchen für die Lüftung (Stallluft und Abluftreinigungsanlage) liegen bei der Schweinehaltung bei 18 bis 96,6 kWh/(Tierplatz\*a). Geht man davon aus, dass hiervon etwa 50–70 % auf den zusätzlichen Energiebedarf der Abluftreinigung entfallen, ergibt sich ein Mehrverbrauch von 14 bis 72 kWh/(Tierplatz\*a). In KTBL (2006) wird ein Richtwert von 70 Wh/1.000 m<sup>3</sup>Abluft bzw. von ca. 25 kWh/(TP\*a) für den Mehrverbrauch der Lüftung benannt. Dieser Wert liegt in der Wertespanne der DLG-Prüfberichte. Für die Pumpen liegt die in DLG (2007–2012) angegebene Spanne für den Stromverbrauch bei etwa 13 bis 82 kWh/(TP\*a). Die derzeit verfügbaren Angaben zum zusätzlichen Stromverbrauch weisen somit eine große Streubreite auf.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist der Tabelle 11 zu entnehmen. Dabei ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die Berechnung auf der Basis vorliegender Angaben der Hersteller oder der DLG-Prüfberichte erfolgte. Eigene Messungen zur Verifizierung der Ansätze waren nicht vorgesehen und sollten in Würdigung dieser ersten Untersuchung evtl. in einer nächsten Bearbeitungsstufe erfolgen.

**Tabelle 11: Zusammenfassung Stromverbrauch Abluftreinigungsanlagen und Vergleich mit Angaben der DLG-Prüfberichte**

DLG-Nr.	Abluftreinigungsverfahren		DLG-Prüfbericht	Eigene Berechnung	Abweichung
	Stufen	Verfahren	[kWh/(TP*a)]	[kWh/(TP*a)]	DLG/Berechnung
5699	Biofilter	Biofilter	43	26	170 %
5702	Biowäscher	Rieselbettverfahren	35	49	71 %
5879	Bio-Chemowäscher	Rieselbettverfahren	34	43	78 %
5880	Chemowäscher + Biowäscher	Rieselbettverfahren	35	56	63 %
5944	Bio-Chemowäscher + Biofilter	Rieselbettverfahren	41	34	121 %
5954	Bio-Chemowäscher + Biowäscher	Rieselbettverfahren	41	43	97 %
5955	Bio-Chemowäscher + Biowäscher + Biofilter	Rieselbettverfahren	53	49	109 %
5957	Chemowäscher	Sprühturmwäscher	117	97	121 %
6051	Chemowäscher	Sprühturmwäscher	95	122	78 %
6050	Chemowäscher	Sprühturmwäscher	95	122	78 %
6098	Staubabscheider + Bio-Chemowäscher + Biofilter	Rieselbettverfahren	82	40	203 %

Der Vergleich mit den Angaben der DLG-Prüfberichte zeigt, dass z. T. erhebliche Abweichungen auftreten, welche auf folgende Ursachen zurückzuführen sind:

- Die Angaben in den DLG-Prüfberichten verwenden keinen einheitlichen Ansatz für die Ventilatoren (z. B. Wirkungsgrad, Volumenstromregelung). Die im Rahmen der DLG-Prüfung eingesetzten Aggregate sind nicht bekannt und konnten nicht ermittelt werden.
- Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass unterschiedliche Bezugsgrößen bei der Berechnung tierplatzbezogener Verbräuche für die DLG-Prüfberichte herangezogen worden sind (z. B. Haltungsverfahren Mastschwein) und damit unterschiedliche tierplatzspezifische Lufraten.
- Die Angaben zu Druckverlusten in den DLG-Prüfberichten weichen teilweise stark von den im Rahmen der Herstellerabfragen erfassten Daten ab.

- Der im Messzeitraum der DLG-Prüfung aufgetretene Abluftvolumenstrom ist häufig nicht dokumentiert. Die Repräsentativität der berechneten Jahresverbräuche für Strom ist daher nicht einschätzbar.
- Für den Systemvergleich wurde die Anlage auf eine Stallgröße normiert (dadurch Über- bzw. Unterdimensionierung im Vergleich zu DLG-Prüfberichten).
- Die Zertifizierung der Anlagen erfolgte z. T. bereits vor 10 Jahren (mögliche zwischenzeitliche Weiterentwicklung von Einzelaggregaten noch nicht berücksichtigt).

Eine Auflistung der Einzeldaten für die Verbrauchergruppen, der Berechnungsgrundlagen und weitere Ursachen für Abweichungen ist der Tabelle 33 im Anhang 5 zu entnehmen.

## 8 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

In diesem Kapitel werden mögliche Maßnahmen zur Energieeinsparung vertiefend betrachtet. Im vorgegebenen Projektumfang kann nur eine grobe Abschätzung der Einspareffekte zur Bewertung von Einzelmaßnahmen erfolgen. Hierbei wurde der Fokus überwiegend auf die Abluftreinigung gelegt, weil zum effizienten Betrieb von Lüftungsanlagen bereits eine Vielzahl an Veröffentlichungen vorliegt. Eine Einsparung kann prinzipiell erreicht werden durch:

- Konstruktive Maßnahmen
  - Optimierung der Luftführung mit Minderung möglicher Druckverluste
  - Anströmfläche-/Schichtdicke-Verhältnis
- Einsatz effizienter Aggregate
  - Ventilatoren
  - Pumpen
- Beeinflussung des Betriebsverhaltens
  - Volumenstromregelung
  - Zuluftkühlung
  - Reduzierung Wassermenge
  - Regelmäßige Wartung
  - Reinigung von Teilströmen
  - Abwärmenutzung

Die grobe Analyse der Einzelmaßnahmen basiert auf Auswertungen von Literaturangaben und eigenen Berechnungen. Um die Ergebnisse zur Energieeffizienzsteigerung zunächst normiert vergleichbar darstellen zu können, werden sie auf den Volumenstrom von 1.000 m<sup>3</sup>/h bezogen. Dabei werden die in Tabelle 12 dargestellten Annahmen getroffen. Diese entsprechen den in der Praxis gängigen Aggregaten. Darauf aufbauend werden auf Basis der in Kap. 6 definierten Referenzanlagen die Stromverbräuche pro Jahr ermittelt und die monetären Einsparungen abgeschätzt.

**Tabelle 12: Vereinfachter Ansatz für spezifische Abschätzung der Einspareffekte**

Vorgaben	Basis
Förderstrom [m <sup>3</sup> /h]	1.000
Druckverlust [Pa]	100
Systemwirkungsgrad Ventilator	$\eta_{100\%} = 45\%$
Ventilatorbetrieb	Entsprechend Abbildung 6: Jahresgang Volumenstrom
Referenzverbrauch Ventilator [kWh/a]	185 (davon ca. 74 kWh/a für die Abluftreinigung)
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta_P = 65\%$
Motorwirkungsgrad Pumpe IE2	$\eta_M = 85,8\%$
Referenzverbrauch Pumpe [kWh/a]	298
Referenzverbrauch Gesamtanlage [kWh/a]	483 (davon ca. 372 kWh/a für die Abluftreinigung)

## 8.1 Konstruktive Maßnahmen

### 8.1.1 Einfluss Luftführung und Druckverlust

Die Luftführung bestimmt den entstehenden Druckverlust. Dieser ist durch den bzw. die Ventilatoren aufzubringen. Ein höherer Druckverlust geht mit einem höheren Energieverbrauch einher. Beispielhaft werden im Anhang 7 die Einflüsse von Bauteilen auf den Druckverlust dargestellt.

Mit dem Aufbau einer Anlage, die geringere Druckverluste aufweist, kann der Energieverbrauch der Lüftungsanlage gesenkt werden. Die möglichen Energieeinsparungen sind in Tabelle 13 dargestellt. Der Druckverlust nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit zu. Eine geradlinige Verlegung des Abluftkanals ist wünschenswert, aber nicht immer auf Grund baulicher Gegebenheiten möglich. Notwendige Luftumlenkungen sind immer mit erheblichem Druckverlust verbunden und sollten vermieden werden.

Der Druckverlust über eine einzige Luftumlenkung weist i. d. R. ähnlich große Druckverlustwerte auf wie der geradlinige Abluftkanal insgesamt. Einflussgrößen der Luftführung (z. B. Kanalabmessungen, Umlenkungen) auf den Druckverlust sind beispielhaft in Anhang 7 dargestellt.

**Tabelle 13: Senkung des Jahresenergiebedarfs durch verminderte Druckverluste**

Vorgaben	Basis	Reduzierte Druckverluste	
Förderstrom [m <sup>3</sup> /h]	1.000		
Druckverlust [Pa]	100	80	60
Referenzverbrauch Ventilator [kWh/a]	185	148	111
Einsparung Bezug Ventilator [kWh/(TP*a)]	-	4,7	9,3
		20	40
Einsparung Bezug Gesamtanlage [%]	-	8	15

Während die möglichen Einsparungen am Ventilator erheblich sind, ist das Einsparpotenzial in Bezug auf die Gesamtanlage aufgrund des hohen Anteils der Pumpe am Gesamtstromverbrauch vergleichsweise gering.

### 8.1.2 Vergrößerung der Anströmfläche und Reduzierung der Filtertiefe der Abluftreinigungsanlage

Die Reinigungsleistung eines Wäschers nach dem Rieselbettverfahren ist abhängig vom Rieselbettvolumen. Aus energetischer Sicht ist eine Ausführung mit möglichst großer Anströmfläche und geringer Filtertiefe vorteilhaft, weil eine größere Anströmfläche die Strömungsgeschwindigkeit und damit den entstehenden Druckverlust reduziert. Die gleichzeitig mögliche Verringerung des Strömungsweges führt ebenfalls zu einer Druckverlustreduzierung. Um die Auswirkung einer Variation des Flächen/Tiefen-Verhältnisses bei konstantem Filtervolumen auf den Druckverlust zu quantifizieren, können folgende Zusammenhänge verwendet werden:

$$\Delta p = z \cdot \frac{\dot{V}^2}{A^2}$$

mit

$\Delta p$  = Druckverlust (Pa)

$z$  = Verlustbeiwert ( $\text{Pa}/(\text{m}/\text{h})^2$ )

$\dot{V}$  = Volumenstrom ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$A$  = Anströmfläche ( $\text{m}^2$ )

$$l = V/A$$

mit

$V$  = Filtervolumen ( $\text{m}^3$ )

$l$  = Filtertiefe (m)

$$z' = z/l$$

mit

$z'$  = längenbereinigter Widerstandswert ( $\text{Pa}/(\text{m}/\text{h})^2/\text{m}$ )

und

$$A_{\text{Neu}} = A_{\text{Alt}} \cdot (1 + x)$$

mit

$A_{\text{Neu}}$  = Neue Anströmfläche ( $\text{m}^2$ )

$A_{\text{Alt}}$  = Ursprüngliche Anströmfläche ( $\text{m}^2$ )

$x_1$  = Prozentuale Vergrößerung der Anströmfläche bei  $V = \text{const.}$

ergibt sich

$$\Delta p_{\text{Neu}} = \Delta p_{\text{Alt}} \cdot \frac{1}{(1 + x_1)^3}$$

Hieraus ergibt sich, dass für eine Reduzierung des Druckverlustes auf 75 % eine Vergrößerung der Anströmfläche um 10 % erforderlich ist. Bei einer 50%igen Flächenvergrößerung wird sogar eine Reduktion des Druckverlustes auf 30 % erreicht.

Marktgängige Reinigungsanlagen werden bereits mit relativ geringen Filtertiefen ausgeführt. Ob eine weitere Reduzierung möglich bzw. zielführend ist, muss bezweifelt werden. Allerdings können Einspareffekte auch durch die alleinige Vergrößerung der Filterfläche erzielt werden, ohne die Filtertiefe zu variieren. In diesem Fall entfällt die Druckverlustreduktion durch Verringerung der Filtertiefe. Dabei entstehen jedoch höhere Investitionskosten durch die Vergrößerung des Reaktorvolumens. Die Reduktion des Druckverlustes ergibt sich für diesen Fall aus

$$\Delta p_{\text{Neu}} = \Delta p_{\text{Alt}} \cdot \frac{1}{(1 + x_2)^2}$$

mit

$x_2$  = Prozentuale Vergrößerung der Anströmfläche bei  $l = \text{const.}$

Die erzielbaren Einsparungen für beide Varianten sind in Tabelle 14 dargestellt.



**Tabelle 14: Einsparpotenziale durch Vergrößerung der Filterfläche und Reduzierung der Filtertiefe**

		Basis	Erweiterung Filterfläche und Reduzierung Filtertiefe			
Filterfläche	[%]	100	110	150	110	150
Filtertiefe	[%]	100	91	67	100	100
Druckverlust	[Pa]	100	90	72	93,2	77,6
Referenzverbrauch Ventilator	[kWh/a]	185	166,5	133,2	172,4	143,56
Einsparung Bezug Ventilator	[kWh/(TP*a)]	-	2,3	6,5	1,6	5,2
	[%]	-	10	28	7	22
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	4	11	3	9

Die Reduzierung des zusätzlichen Stromverbrauchs des Ventilators für die Abluftreinigung verhält sich proportional zur Druckverlustreduktion. Bereits bei geringer Vergrößerung der Filterfläche entsteht eine deutliche Senkung des Stromverbrauchs für den Ventilatorbetrieb, auch ohne Reduzierung der Filtertiefe. Weil eine Flächenvergrößerung höhere Investitionskosten und einen höheren Platzbedarf erfordert, ist diese Maßnahme am konkreten Anwendungsfall zu bewerten. Deutlich wird, dass eine geringfügige Überdimensionierung des Filters sinnvoll ist. Das spezifische Einsparpotenzial sinkt mit steigender Flächenvergrößerung.

## 8.2 Einsatz effizienter Aggregate

### 8.2.1 Einsatz effizienterer Ventilatoren

Für die energetische Optimierung des Ventilators ist der Wirkungsgrad (vgl. Kap 5.3.1.1) und die Regelung entscheidend. Mit dem Einsatz effizienterer Ventilatoren, d. h. Ventilatoren mit einem hohen Systemwirkungsgrad, wird der Energieverbrauch der Lüftungsanlage gesenkt. Der Systemwirkungsgrad wird bestimmt durch die Bauart des Ventilators, den Antrieb, die Art der Regelung, die Einbausituation und den Motor. Die möglichen Energieeinsparungen sind in Tabelle 15 dargestellt (siehe auch Nutzung EC-Technik Kap. 5.3.1.1 bzw. Kap. 5.3.1.4).

**Tabelle 15: Senkung des Jahresenergiebedarfs durch effizientere Ventilatoren**

Vorgaben		Basis		Erhöhte Wirkungsgrade	
Förderstrom	[m <sup>3</sup> /h]	1.000			
Druckverlust	[Pa]	100			
Wirkungsgrad Ventilator gesamt		$\eta_{100\%} = 45\%$	$\eta_{100\%} = 50\%$	$\eta_{100\%} = 55\%$	
Ventilatorbetrieb		Entsprechend Abbildung 6			
Referenzverbrauch Ventilator	[kWh/a]	185	165	150	
Einsparung Bezug Ventilator	[kWh/(TP*a)]	-	2,52	4,41	
	[%]	-	11	19	
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	4	7	

### 8.2.2 Einsatz effizienterer Pumpen und Antriebsmotoren in der Abluftreinigungsanlage

Für die energetische Optimierung der Pumpe sind der Pumpenwirkungsgrad und der Motorwirkungsgrad entscheidend. Betrachtet wird der Einsatz eines Antriebsmotors der Effizienzklasse IE3 und einer effizienteren Pumpe mit einem Pumpenwirkungsgrad von 75 % (theoretisch sind gemäß KSB [2013] auch höhere Wirkungsgrade für Kreiselpumpen mit einer Förderleistung von ca. 50 m<sup>3</sup>/h erreichbar; weil die genauen Förderbedingungen nicht bekannt sind, wird ein geringerer Wirkungsgrad angenommen). Es wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis der Wirkungsgrade im Betriebspunkt dem Verhältnis der Nennwirkungsgrade entspricht, sodass die Leistungsaufnahme umgekehrt proportional zum Nennwirkungsgrad ist.

**Tabelle 16: Einsparpotenziale durch effizientere Pumpen und Antriebe**

		Basis	Austausch Motor	Austausch Pumpe	Austausch Motor und Pumpe
Pumpennennwirkungsgrad		65 %	65 %	75 %	75 %
Motorwirkungsgrad		85,80 %	88,10 %	85,80 %	88,10 %
Referenzverbrauch Pumpe	[kWh/a]	298	290	258	252
Einsparung Bezug Pumpe	[kWh/(TP*a)]	-	1,0	5,0	5,8
	[%]	-	3	13	15
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	2	8	10

Die Einsparpotenziale durch den Austausch des Motors sind unter den getroffenen Annahmen mit 3 % des Energiebedarfs für den Pumpenbetrieb gering. Größere Einsparpotenziale ergeben sich bei zusätzlichem Austausch der Pumpe. Hierfür wurde ein Einsparpotenzial von ca. 15 % des Energiebedarfs für den Pumpenbetrieb und 10 % für die Gesamtanlage ermittelt.

## 8.3 Beeinflussung des Betriebsverhaltens

### 8.3.1 Volumenstromregelung

Entscheidend für den Energieverbrauch ist die eingesetzte Volumenstromregelung des Ventilators. Die in den Stallanlagen üblicherweise eingesetzte Kombination von Drosselklappe und Drehzahlregelung und bei starken jahreszeitlichen Schwankungen dem Parallelbetrieb von Ventilatoren bietet die Möglichkeit eines optimalen Betriebes. Pauschale Ansätze für Einsparungen können nur für die Art der Drehzahlregelungen gegeben werden, weil alle weiteren Faktoren stark von der Anlagenkennlinie und Ventilator-kennlinie und den Bedingungen vor Ort abhängen.

Für die Umstellung der Frequenzsteuerung von Frequenzumrichter auf EC-Technik werden in der Literatur Einsparungen von 5–10 % angegeben, im Vergleich zur Spannungssteuerung mit Phasenanschnitt oder Stufentransformator sind Einsparungen von 30–35 % realistisch (HANDEL 2008). In den Untersuchungen der DLG (DLG 2003) werden die Systeme im Hinblick auf ihren Energieeinsatz wie folgt bewertet (gelistet von energetisch günstig zu ungünstig):

- EC-Motor (Spezialventilator)
- Ventilator mit Frequenzumrichter
- Standardventilator mit Trafo-Steuerung
- Standardventilator mit Phasenanschnitt-Steuerung

### 8.3.2 Abkühlen der Zuluft im Sommer

Während die Belüftung des Schweinestalls im Winter für die Schadstoffabführung erforderlich ist, dient sie bei höheren Außentemperaturen vornehmlich der Kühlung. Der zur Kühlung eines gegebenen Schweinestalls benötigte Luftdurchsatz

ist abhängig von der Lufttemperatur, durch eine Abkühlung der Zuluft ist eine deutliche Reduzierung möglich. Entsprechend sinkt der Strombedarf für Belüftung und Abluftreinigung. Weil die Abluftreinigungsanlage bei reduziertem Volumenstrom kleiner ausgeführt werden kann, verringert sich neben dem zusätzlichen Stromverbrauch des Ventilators auch der Stromverbrauch der Umwälzpumpe. Dem entgegensetzen ist der Energieverbrauch der Zuluftkühlung. Der benötigte Energieeinsatz für die Kühlung ist abhängig vom Kühlkonzept.

Zur Reduzierung der abzuführenden Wärmemenge können zunächst einfache bautechnische Maßnahmen ergriffen werden, sofern diese an der konkreten Anlage nicht bereits umgesetzt sind. Beispielhaft sind hier zu nennen:

- ausreichende Wärmedämmung des Stallgebäudes (Verhinderung der Strahlungsabsorption)
- Verschattung der Zuluftöffnungen am Stallgebäude durch Begrünung
- Dämmung der Zuluftschächte (insbesondere bei Lage im Dachraum)

In ihrer Effektivität sind diese Maßnahmen vor allem im Hochsommer allerdings begrenzt, sodass für eine deutliche Volumenstromreduktion technische Lösungen für eine aktive Zuluftkühlung eingesetzt werden müssen.

Verfügbare Technologien sind:

- Erdwärmetauscher (Zuluftkühlung im Sommer um 5–10 K)
- oberflächennahe Luftansaugung im Erdreich (2–3 K)
- Verdunstungskühlung durch Versprühung von Kühlwasser (bis 4 K)
- Kühldecken im Zuluftkanal aus wasserdurchflossenen Wärmeleitprofilen (4–5 K) (LfL 2006)

Zu Möglichkeiten der Stallkühlung und deren Effekte liegen umfangreiche Untersuchungen des LfULG vor (LfULG 2014). Die Ergebnisse zeigen, dass der Kühleffekt der untersuchten Technologien mit steigender Außentemperatur zunimmt.

Für die Belüftung im Sommerbetrieb gilt, dass die Ablufttemperatur maximal 2 K über der Außentemperatur liegen darf. Kann die Zulufttemperatur um 2 K gesenkt werden, sind für die Einhaltung der optimalen Stalltemperatur theoretisch nur noch 50 % des Luftdurchsatzes notwendig (der erhöhte Energiegehalt der Abluft bei Reduzierung des Abluftvolumenstroms aufgrund der tendenziell höheren Luftfeuchtigkeit der Abluft wird dabei vernachlässigt). Bei einer Reduzierung um 4 K ist sogar eine Reduzierung des Luftdurchsatzes auf ein Drittel theoretisch möglich.

Aus Gründen der Tiergesundheit und des Tierwohls soll allerdings eine max. Stalltemperatur von 30 °C nicht überschritten werden. Daher ist die oben getroffene Vereinfachung der Reduzierung des Zuluftvolumenstroms für diese Fälle nicht anwendbar. Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen (LfULG 2014) erscheint eine max. Reduzierung des Zuluftvolumenstroms in der Ferkelaufzucht und Schweinemast um ca. 30 % bei Einsatz einer Kühlung realisierbar, um das erforderliche Stallklima zu erhalten. Entsprechend kann auch die Abluftreinigungsanlage um diesen Faktor verkleinert werden.

### **Berechnungsgrundlagen**

Für die Berechnung der möglichen Einsparpotenziale wird angesetzt, dass die Kühlung immer dann betrieben wird, wenn die Belüftung im Berechnungsmodell dem Zweck der Wärmeabfuhr dient und die Außentemperatur von 15 °C überschritten wird. Der Luftdurchsatz wird bei der Kühlung der Zuluft dann um den o. g. Faktor reduziert. Die Untergrenze der Reduzierung stellt die maximale Winterluftrate dar, sodass stets eine ausreichende Abfuhr von Schadstoffen gewährleistet wird.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Lüftungs- und Abluftreinigungsanlage entsprechend der max. Sommerluftrate unter Berücksichtigung der Kühlung der Zuluft dimensioniert wird. Damit ist bei geringerem maximalem Luftdurchsatz weiterhin der gleiche Druckverlust anzusetzen. Diese Vereinfachung ist unter der Annahme zulässig, dass eine zentrale Abluftführung mit Abluftreinigung neu zu errichten ist. Zusätzlich werden somit auch die erforderlichen Investitionskosten minimiert. Bei der Installation einer Zuluftkühlung an einer Bestandsanlage mit bereits vorhandener

zentraler Ablufführung ist bei einer Senkung des Luftdurchsatzes eine Reduzierung der Druckverluste anzusetzen. Entsprechend reduziert sich in diesem Fall der Stromverbrauch der Ventilatoren. Für die Pumpen ergibt sich bei gleicher Anlagengröße keine bzw. eine geringe Einsparung. Die in Tabelle 17 dargestellten Berechnungsergebnisse weisen somit eine konservative Abschätzung der Einsparpotenziale für den Stromverbrauch der Ventilatoren und eine Überschätzung der Einsparpotenziale für die Pumpen bei Nachrüstung einer Zuluftkühlung aus.

**Tabelle 17: Einsparpotenziale bei Zuluftkühlung**

		Basis	Zuluftkühlung
Zuluftkühlung um		0 K	1–5 K in Abhängigkeit von der Außentemperatur
Maximaler Förderstrom	[m³/h]	1000	700
Referenzverbrauch Ventilator	[kWh/a]	185	138
Einsparung Bezug Ventilator	[kWh/(TP*a)]	-	5,9
	[%]	-	25
Referenzverbrauch Pumpe	[kWh/a]	298	208
Einsparung Bezug Pumpe	[kWh/(TP*a)]	-	11,3
	[%]	-	30
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	28

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass eine Kühlung der Zuluft neben der Verbesserung des Stallklimas auch zu Einsparungen des Stromverbrauchs des Ventilators und bei möglicher kleiner dimensionierter Abluftreinigungsanlage auch bezüglich des Stromverbrauchs der Pumpen führt.

### 8.3.3 Reduzierung der Waschwassermenge in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms

Durch eine Anpassung der Waschwassermenge zur Beschickung des Rieselbettes an den aktuell durchgesetzten Abluftvolumenstrom kann der jährliche Stromverbrauch der Umwälzpumpe(n) maßgeblich reduziert werden. Die mögliche Verringerung ist allerdings begrenzt, weil zum einen immer ein ausreichender Phasenkontakt zwischen Waschflüssigkeit und Abluftstrom sowie die Befeuchtung der Mikroorganismen sichergestellt und zum anderen eine ausreichende Abführung der Abbauprodukte gewährleistet sein muss. Im Winterbetrieb treten zwar geringere Volumenströme auf, die Abluft weist allerdings eine deutlich höhere Schadstoffbelastung auf. Wird durch eine Verringerung der Berieselungsmenge z. B. die chemische Bindung von Ammoniak reduziert, kann sich dies nachteilig auf die Lebensdauer nachgeschalteter Reinigungsstufen, insbesondere auf Biofilter auswirken. Um welchen Anteil die umgewälzte Waschwassermenge reduziert werden kann, ist anlagenabhängig.

Für den Großteil der am Markt verfügbaren Reinigungsanlagen ist eine Reduzierung der Umwälzmenge nicht vorgesehen und aufgrund der DLG-Zertifizierung auch nicht zulässig. Der Optimierungsansatz ist auf die Mehrzahl der verfügbaren Reinigungsanlagen daher nicht anwendbar. Das einzige Anlagekonzept, welches die Möglichkeit dieses Ansatzes demonstriert, ist die Reinigungsanlage von Devricom (DLG-Nr. 5879).

Unabhängig davon soll nachfolgend jedoch abgeschätzt werden, welche generellen Potenziale dieser Optimierungsansatz bietet. Daher wird zunächst angenommen, dass der Waschwasservolumenstrom in Abhängigkeit der Abluftrate um bis zu 20 % und um 40 % reduziert werden kann. Eine Prüfung dieses pauschalen Ansatzes liegt nicht vor. Bei Einsatz einer FU-Regelung und einer Stromversorgung mit 50 Hz Wechselstrom entsprechen die Reduzierungen einer reduzierten Frequenz auf 40 Hz bzw. 30 Hz. Aus den im Modell liNear (vgl. Kap. 6.3.1) ermittelten stündlichen Werten für den Abluftvolumenstrom wurde der Waschwasserdurchsatz für jede Betriebsstunde berechnet. Für Abluftvolumenströme

oberhalb 80 % bzw. 60 % der maximalen Sommerluftfrate (Auslegungsgröße für den konstanten Waschwasservolumenstrom) wird der auftretende Volumenstrom zur Ermittlung der Waschwassermenge mit dem Faktor 0,43 l/m<sup>3</sup> (vgl. Ansatz in Kap. 6.3.1) multipliziert. Bei geringeren Abluftvolumenströmen (< 80 % bzw. < 60 % der max. Sommerluftfrate) wird ein konstant um 20 % bzw. 40 % verminderter Waschwasserdurchsatz im Vergleich zur ausgelegten Waschwassermenge angesetzt. Die jeweilige Leistungsaufnahme wird im Folgenden aus dem in Kap. 5.3.1.1 dargestellten Proportionalitätsgesetzen abgeleiteten Zusammenhang berechnet:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\dot{V}_1^3}{\dot{V}_2^3}$$

mit

P: Leistungsaufnahme der Pumpe (kW)

$\dot{V}$ : Volumenstrom Waschflüssigkeit (m<sup>3</sup>/h)

Es ist zu berücksichtigen, dass bei Reduzierung der Frequenz neben dem Volumenstrom auch die Förderhöhe der Pumpe abnimmt (quadratisch). Weil durch den Pumpenvorgang ein Höhenunterschied überwunden werden muss, kann die Förderhöhe nicht beliebig weit abgesenkt werden. Es muss stets eine Mindestförderhöhe eingehalten werden. Für eine gegebene Pumpe begrenzt dieses die mögliche Volumenstromreduzierung mittels Frequenzabsenkung. Zur genauen Ermittlung der minimal möglichen Frequenz und dem dazugehörigen Volumenstrom ist die Kenntnis von Anlagen- und Pumpenkennlinie erforderlich. Anhand dieser Daten ist zu prüfen, ob die betrachteten Frequenzreduzierungen tatsächlich realisierbar sind. Es wird für die vorliegende Abschätzung davon ausgegangen, dass zumindest eine Reduzierung um 20 % bzw. 40 % möglich ist.

Eine Änderung des Pumpenwirkungsrades wird vernachlässigt. Die unter den genannten Ansätzen theoretischen Einsparpotenziale sind Tabelle 18 zu entnehmen.

**Tabelle 18: Einsparung bei Reduzierung Waschwassermenge**

		Basis	Reduzierung Waschwassermenge	
Waschwassermenge	[%]	100	80	60
Referenzverbrauch Pumpe	[kWh/a]	298	209	151
Einsparung Bezug Pumpe	[kWh/(TP*a)]	-	11,2	18,5
	[%]	-	30	49
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	18	30

Mit einer Reduzierung der Waschwasserumwälzung in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms sind erhebliche Energieeinsparungen möglich. Es ist zu beachten, dass bei einer Reduzierung der Antriebsfrequenz die Förderhöhe nicht kleiner als die erforderliche Mindestförderhöhe sein darf.

### 8.3.4 Optimierung der Reinigung

Die Verschmutzung der Wäscher und Filter durch mikrobiologisches Wachstum und Ablagerungen von Staub und Reaktionsprodukten ist ein wichtiger Einflussfaktor auf den Stromverbrauch der Anlage. Die Quantität der Auswirkung ist dabei stark vom jeweiligen Abluftreinigungssystem abhängig. Wie bereits gezeigt (vgl. Angaben im Angang 3), variiert die Zunahme der Druckverluste durch Verschmutzung für die verschiedenen Anlagenkonzepte stark. Während für einige Systeme laut Herstellerangaben so gut wie keine manuelle Reinigung erforderlich ist, ist diese für andere eine wichtige Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb. Die Häufigkeit, mit der eine Anlagenreinigung erforderlich wird, ist von verschiedenen Faktoren (Abluftbelastung, Schüttkörpereigenschaften, automatische Abreinigungssysteme, Berieselungskonzept) sowie dem tolerierbaren Druckverlust abhängig. Üblicherweise wird vom Anlagenhersteller ein empfohlenes Reinigungsintervall vorgegeben (in der Regel 1 bis 3 Reinigungen pro Jahr). Weil die Reinigungshäufigkeit generell

nur einen Richtwert darstellt und vom Anlagenbetreiber überwacht und durchgeführt werden muss, ist der Anlagenbetreiber selbst einer der zentralen Einflussfaktoren.

Neben der Verschmutzungsneigung des Rieselbettes und der Reinigungshäufigkeit ist vor allem der Zeitpunkt der Reinigung von entscheidender Bedeutung. Soll der jährliche Stromverbrauch minimiert werden, muss das Produkt aus Druckverlust ( $\Delta p$ ) und Volumenstrom ( $V$ ) über das Gesamtjahr minimiert werden. Mathematisch lässt sich dieses folgendermaßen darstellen:

$$\int \Delta p \cdot \dot{V} dt = \min$$

Der Druckverlust ist das Produkt aus dem Widerstandswert  $z$  und dem Quadrat des Volumenstroms.

$$\Delta p = z \cdot \dot{V}^2$$

Es gilt also

$$\int z \cdot \dot{V}^3 dt = \min$$

Der Widerstandswert  $z$  nimmt mit zunehmender Verschmutzung zu. Das Integral über das Gesamtjahr wird dann minimal, wenn  $z$  bei großem  $V$  möglichst geringe Werte des im Gesamtjahr auftretenden Wertebereichs einnimmt. Reinigungen sind daher generell vor dem Auftreten großer Volumenströme, also im Frühsommer, durchzuführen. Eine Reinigung der Anlage bei Auftreten von hohen Druckverlusten, z. B. beim Auslösen einer Alarmmeldung für den maximal tolerierbaren Druckverlust, ist generell ungünstig, weil dieses (aufgrund des quadratischen Einflusses des Volumenstroms auf den Druckverlust) vornehmlich bei hohen Volumenströmen auftritt. Die Reinigung sollte präventiv erfolgen. Die Optimierung des Reinigungszeitpunktes ist vor allem bei mehreren Reinigungszyklen pro Jahr komplex und erfordert detaillierte Kenntnisse der Anlage und des Jahresganges der Abluftrate.

Sowohl für die Optimierung des Reinigungszeitpunktes als auch für die Erhöhung der Reinigungshäufigkeit entstehen, abgesehen vom Arbeitszeitbedarf, keine zusätzlichen Kosten.

Als erste Abschätzung der Effizienzpotenziale bei Optimierung der Reinigung, z. B. durch die Erhöhung der Reinigungshäufigkeit oder der Optimierung des Reinigungszeitpunktes, kann aus den im Rahmen des Systemvergleichs ermittelten Daten ein oberer Grenzwert der möglichen Einsparungen abgeleitet werden. Aus der Auswertung der über die Herstelleranfragen erhobenen Daten erscheint ein minimaler Druckverlust bei maximalem Volumenstrom von etwa 25 Pa realistisch. Die obere Grenze der Einsparpotenziale wird dabei so angesetzt, dass keine Erhöhung des Druckverlustes durch Verschmutzung auftritt. Für diesen Fall ergibt sich mit dem verwendeten Berechnungsmodell ein Stromverbrauch für den Ventilator im Gesamtjahr von 19,8 kWh/(TP\*a), was einer Strombedarfsreduzierung des Ventilators um 15 % gegenüber dem Referenzmodell entspricht.

Wird eine weniger optimistische Reinigungswirkung betrachtet, sodass bei maximalem Volumenstrom der durchschnittliche Druckverlust 5 Pa oberhalb des Minimums, also bei 30 Pa liegt, ergibt sich noch eine Einsparung von 10 % gegenüber dem Referenzmodell.

**Tabelle 19: Einsparpotenziale durch optimierte Reinigung**

		Basis	Verbesserte Reinigung	Maximale Reinigung
Mittlerer Druckverlust Abluftreinigung bei max. Volumenstrom	[Pa]	40	30	25
Referenzverbrauch Ventilator	[kWh/a]	185	166,5	157,3
Einsparung Bezug Ventilator	[kWh/(TP*a)]	-	2,3	3,5
	[%]	-	10	15
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	4	6

Die Optimierung der Reinigung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die erzielbare Einsparung des Stromverbrauchs des Ventilators. Der ausschließlich durch die Abluftreinigung verursachte Energieverbrauch des Ventilators von 74 kWh/a kann unter den getroffenen Annahmen um knapp 38 % reduziert werden.

Die Ergebnisse stellen jedoch lediglich eine erste grobe Abschätzung zur Bestimmung der Größenordnung der erzielbaren Einsparungen dar. Welche Einsparungen tatsächlich möglich sind, setzt die Ermittlung der Verschmutzungsdynamik in Abhängigkeit von Volumenstrom und Zeit voraus. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Generell ist zu beachten, dass eine Verschmutzung der Filterfläche durch mikrobiologisches Wachstum zwar energetisch nachteilig, gleichzeitig aber auch Voraussetzung für eine hohe Reinigungsleistung ist. Inwiefern eine verstärkte Abreinigung sinnvoll ist, kann daher nicht pauschalisiert werden. Konkret ist diese abhängig von den vorliegenden Bedingungen für den Phasenkontakt, also den Übergang der Schadstoffe in die Waschflüssigkeit und der Schadstoffbelastung des Abluftstroms sowie der biologischen Aktivität.

### 8.3.5 Reinigung von Teilströmen

Als weitere Möglichkeit zur Senkung des Energieverbrauchs der Abluftreinigungsanlage soll die Reinigung von Teilströmen diskutiert werden. Speziell im Sommer bzw. wenn hohe Luftdurchsätze zur Stallkühlung notwendig sind, wäre dann nicht der vollständige Abluftstrom der Reinigungsanlage zuzuführen. Die Abluftreinigungsanlage könnte in diesem Fall entsprechend kleiner dimensioniert werden. Solange der Abluftvolumenstrom unterhalb des Auslegungsvolumenstroms der Abluftreinigungsanlage liegt, wird der komplette Luftstrom gereinigt. Übersteigt er die Kapazität der Reinigungsanlage, würde der überschüssige Anteil ungereinigt über separate Ableitsysteme an die Umgebung abgeführt. Hierdurch würde der Energieaufwand für die Reinigung zwar reduziert werden, die Menge der emittierten Schadstoffe steigt jedoch. Eine Betrachtung der Energieeinsparpotenziale ist daher nur unter Berücksichtigung der zusätzlichen Schadstoffemission sinnvoll.

Für die Abschätzung der Energieeinsparpotenziale der betrachteten Maßnahme wird zunächst der neue Auslegungsvolumenstrom für die Abluftreinigungsanlage festgelegt und hierfür unter Annahme der folgenden Vereinfachungen der Jahresstromverbrauch berechnet. Es werden Reduzierungen des maximal gereinigten Abluftvolumenstroms um 20 %, 30 % und 50 % betrachtet.

Die Grundlage für die Berechnungen bilden die für das Referenzmodell (vgl. Kap. 6.3.1) ermittelten Stundenwerte des benötigten Abluftvolumenstroms. Für Volumenströme unterhalb des „Grenzvolumenstroms“ (entspricht dem Auslegungsvolumenstrom der Abluftreinigung) wird der Stromverbrauch der Ventilatoren bei vollständiger Abluftreinigung berechnet. Bei Überschreitung des Grenzvolumenstroms wird der zusätzlich erforderliche Volumenstrom separat vor Eintritt in die Abluftreinigungsanlage an die Atmosphäre abgeleitet. Der Stromverbrauch der Ventilatoren setzt sich somit aus dem Stromverbrauch für die Förderung des Grenzvolumenstroms über Abluftkanal und Abluftreinigung und dem Stromverbrauch für die Förderung ohne Ableitung über die Abluftreinigung zusammen.



Um abzuschätzen, in welchem Maße sich die im Gesamtjahr emittierte Schadstoffmenge erhöht, wird beispielhaft die Schadstoffkomponente Ammoniak betrachtet. Bei vollständiger Reinigung wird die Emissionsmenge stundenweise folgendermaßen berechnet:

$$m_{\text{Emission}}/\text{TP} = \text{EF} \cdot (1 - R)$$

mit

TP = Tierplatzzahl (Mastschweine)

EF = Emissionsfaktor (Mastschweine) (kg/(TP\*d))

R = Prozentuale Reinigungsleistung der Abluftreinigungsanlage

Wird ein Anteil der Luft ungereinigt abgegeben, so wird nur die Schadstoffmenge des gereinigten Abluftanteils um die Reinigungsleistung reduziert und dann zur Schadstoffmenge des nicht gereinigten Abluftanteils addiert.

$$m_{\text{Emission}}/\text{TP} = \text{EF} \cdot (1 - R) \cdot \dot{V}_{\text{Grenz}}/\dot{V}_{\text{Gesamt}} + \text{EF} \cdot \left(1 - \dot{V}_{\text{Grenz}}/\dot{V}_{\text{Gesamt}}\right)$$

mit

$\dot{V}_{\text{Grenz}}$  = Grenzvolumenstrom (maximal gereinigter Abluftvolumenstrom) (m<sup>3</sup>/h)

$\dot{V}_{\text{Gesamt}}$  = Gesamter Abluftvolumenstrom (m<sup>3</sup>/h)

Es werden folgende, stark vereinfachte Annahmen für die Berechnungen getroffen:

- Druckverlust bei Grenzvolumenstrom = maximal zu reinigender Förderstrom entspricht 60 Pa für die Ablufführung und 40 Pa für die Abluftreinigung (hier wird eine Anpassung der Dimensionierung der Anlage vorausgesetzt)
- Druckverlust der separaten Ablufführung entspricht 60 Pa bei maximalem Volumenstrom (Maximale Sommerluftfrate – Grenzvolumenstrom)
- keine gegenseitige Beeinflussung der Ablufführungen
- Lastabhängige Ventilatorwirkungsgrade entsprechen den Annahmen des Berechnungsmodells. Für zentrale und separate Ablufführung wird jeweils ein eigener Ventilator verwendet. Die jeweilige Last wird getrennt berechnet und die lastabhängigen Wirkungsgrade entsprechen den Annahmen des Berechnungsmodells.
- Konstante Schadstoffemissionen im Jahresverlauf der Tiere von 3,64 kg NH<sub>3</sub>/(TP\*a) bzw. 0,415 g NH<sub>3</sub>/(TP\*h)
- Reinigungsleistung der Abluftreinigung bzgl. Ammoniak: 90 %

Auf der Basis dieser Ansätze ergeben sich die in Tabelle 20 dargestellten Einsparpotenziale.

**Tabelle 20: Einsparpotenziale bei Reinigung von Teilabluftvolumenströmen**

		Basis	Reinigung Teilabluftvolumenstrom			
Anteil des zu reinigenden Förderstroms	[%]	100	80	70	50	
Maximal zu reinigender Förderstrom (Grenzvolumenstrom)	[m <sup>3</sup> /h]	1.000	800	700	500	
Referenzverbrauch Ventilator	[kWh/a]	185	175	169	157	
Einsparung Bezug Ventilator	[kWh/TPa]	-	1,3	2,0	3,5	
	[%]	-	5	9	15	

		Basis	Reinigung Teilabluftvolumenstrom		
Referenzverbrauch Pumpe	[kWh/a]	298	238	208	149
Einsparung Bezug Pumpe	[kWh/(TP*a)]	-	7,6	11,3	18,8
	[%]	-	20	30	50
Einsparung Bezug Gesamtanlage	[%]	-	14	22	37
Ammoniakemission	[kg/a]	2,9	4,6	5,6	7,6
Gesamtreinigungsleistung	[%]	90	84	81	74

Die Ergebnisse zeigen, dass die Reduzierung der Reinigungsleistung der Anlagen durch die Reinigung von Teilströmen auch zu erheblichen Einsparungen im Betrieb führen kann. Demgegenüber steht die proportional geringere Emissionsreduktion.

### 8.3.6 Abwärmenutzung

Unabhängig von der Nutzung der Abluftreinigungsanlage besteht prinzipiell die Möglichkeit der Abwärmenutzung der Abluft zur Vorwärmung der Zuluft oder zur Erwärmung von Brauchwasser. Aus folgenden Gründen sind hierbei jedoch nur geringe Einsparpotenziale zu erwarten:

- sehr geringe Volumenströme im Winter
- aufgrund der großen räumlichen Distanz zwischen Zu- und Abluft nur Kreislauf-Verbund-System einsetzbar mit ungünstigen Rückwärmezahlen und hohen Investitionskosten
- zusätzlicher statischer Druckverlust im System durch Wärmetauscher und damit verbundenem erhöhtem Stromverbrauch für die Förderung des Abluftvolumenstroms
- hoher Verschmutzungsgrad vor Eintritt in Abluftreinigung und damit mögliches Zusetzen des Wärmetauschers
- niedrige Temperatur nach Austritt aus Abluftreinigung und damit geringe Nutzungspotenziale

Auf eine weitere Betrachtung dieser Maßnahme wurde daher verzichtet.

## 8.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die dargestellten ersten Ansätze möglicher Maßnahmen werden in Tabelle 21 zusammengefasst. Dabei werden ausgehend von im Kap. 6 definierten Referenzanlagen und der Berechnung des Gesamtverbrauchs je Stall und der Gesamtanlage monetäre Einspareffekte ausgewiesen, die sich bei Umsetzung der Maßnahmen theoretisch realisieren lassen. Anhand dieser Einspareffekte kann abgeschätzt werden, welche Investitionen möglich sind. Auf die Darstellung von Investitions- und Betriebskosten für die Einzelmaßnahmen wurde zunächst verzichtet, weil diese sich stark von der Größenordnung der eingesetzten Anlagen unterscheiden. Zudem ist zunächst eine generelle Prüfung der Umsetzbarkeit der genannten Maßnahmen und Prüfung der angegebenen Größenordnungen anhand von konkreten Messungen erforderlich.

**Tabelle 21: Zusammenfassung möglicher Maßnahmen und Abschätzung Einsparpotenziale Referenzanlage 1**

Maßnahme		Stromverbrauch	Stromverbrauch	Kosten	Kosten	Einspa-	Einspa-	Einspar-
		je Stall	je Anlage	Stall <sup>1</sup>	Anlage <sup>1</sup>	rung Stall	rung Anlage	potenzial
		kWh/a	kWh/a	€/a	€/a	€/a	€/a	%
Ventilatoren (s. Kap.6.3)	Basis	14.000	56.000	2.240	8.960	-	-	-
Pumpen (s. Kap.6.3)	Basis	22.500	90.000	3.600	14.400	-	-	-
<b>Gesamt (s. Kap.6.3)</b>	<b>Basis</b>	<b>36.500</b>	<b>146.000</b>	<b>5.840</b>	<b>23.360</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Reduzierung Druckverlust	von 100 auf 80 Pa	33.704	134.816	5.393	21.571	447	1.789	8
	von 100 auf 60 Pa	30.908	123.631	4.945	19.781	895	3.579	15
Änderung Filtergeometrie Verhältnis Fläche A zu Tiefe h	A +10 % h -9 % (30 Pa)	35.102	140.408	5.616	22.465	224	895	4
	A +50 % h -30 % (12 Pa)	32.586	130.342	5.214	20.855	626	2.505	11
	A +10 % h -0 % (33,1 Pa)	35.548	142.191	5.688	22.751	152	609	3
	A +50 % h -0 % (17,8 Pa)	33.368	133.474	5.339	21.356	501	2.004	9
Erhöhung Systemwirkungsgrad Ventilator	von 45 % auf 50 %	35.040	140.160	5.606	22.426	234	934	4
	von 45 % auf 55 %	33.855	134.200	5.417	21.667	423	1.693	7
Einsatz effizienter Pumpen	Austausch Motor (IE3 statt IE2)	35.895	143.582	5.743	22.973	97	387	2
	Austausch Pumpe h 75 % statt 65 %	33.477	133.909	5.356	21.425	484	1.935	8
	Austausch Motor + Pumpe	33.024	132.095	5.284	21.135	556	2.225	10
Zuluftkühlung	Kühlung (Red. max. V-Strom auf 70 %)	26.147	104.588	4.184	16.734	1.656	6.626	28
Reduzierung Wassermenge	Reduzierung um 20 %	29.774	119.097	4.764	19.056	1.076	4.304	18
	Reduzierung um 40 %	25.391	101.565	4.063	16.250	1.777	7.110	30
Verbesserung Reinigung	Senkung Druckverlust von 40 Pa auf 30 Pa	35.102	140.408	5.616	22.465	224	895	4
	Senkung Druckverlust von 40 auf 25 Pa	34.403	137.612	5.504	22.018	336	1.342	6
Reinigung von Teilabluftströmen	Verringerung um 20 %	31.210	124.841	4.994	19.974	846	3.386	14
	Verringerung um 30 %	28.490	113.959	4.558	18.233	1.282	5.127	22
	Verringerung um 50 %	23.124	92.497	3.700	14.800	2.140	8.560	37

<sup>1</sup> Ansatz 0,16 €/kWh Nettokosten

**Tabelle 22: Zusammenfassung möglicher Maßnahmen und Abschätzung Einsparpotenziale Referenzanlage 2**

Maßnahme		Stromverbrauch		Kosten	Kosten	Einspa-	Einspa-	Einspar-
		je Stall	je Anlage	Stall	Anlage	rung Stall	rung Anlage	potenzial
		kWh/a	kWh/a	€/a	€/a	€/a	€/a	%
Ventilatoren (s. Kap.6.3)	Basis	23.500	141.000	3.760	22.560	-	-	-
Pumpen (s. Kap.6.3)	Basis	37.500	225.000	6.000	36.000	-	-	-
<b>Gesamt (s. Kap.6.3)</b>	<b>Basis</b>	<b>61.000</b>	<b>366.000</b>	<b>9.760</b>	<b>58.560</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Reduzierung Druckverlust	von 100 auf 80 Pa	5.6327	337.963	9.012	54.074	748	4.486	8
	von 100 auf 60 Pa	51.654	309.925	8.265	49.588	1.495	8.972	15
Änderung Filtergeometrie Verhältnis Fläche A zu Tiefe h	A +10 % h -9% (30 Pa)	58.664	351.981	9.386	56.317	374	2.243	4
	A +50 % h -30% (12 Pa)	54.458	326.748	8.713	52.280	1.047	6.280	11
	A +10 % h -0% (33,1 Pa)	59.409	356.452	9.505	57.032	255	1.528	3
	A +50 % h -0% (17,8 Pa)	55.766	334.598	8.923	53.536	837	5.024	9
Erhöhung Systemwirkungsgrad Ventilator	von 45 % auf 50 %	58.560	351.360	9.370	56.218	390	2.342	4
	von 45 % auf 55 %	56.580	339.478	9.053	54.317	707	4.243	7
Einsatz effizienter Pumpen	Austausch Motor (IE3 statt IE2)	59.990	359.938	9.598	57.590	162	970	2
	Austausch Pumpe h 75 % statt 65 %	55.948	335.689	8.952	53.710	808	4.850	8
	Austausch Motor + Pumpe	55.190	331.143	8.830	52.983	930	5.577	10
Zuluftkühlung <sup>2</sup>	Kühlung (Red. max. V-Strom auf 70 %)	43.698	262.186	6.992	41.950	2.768	16.610	28
Reduzierung Waschwassermenge	Reduzierung um 20 %	49.760	298.559	7.962	47.769	1.798	10.791	18
	Reduzierung um 40 %	42.435	254.609	6.790	40.737	2.970	17.823	30
Verbesserung Reinigung	Senkung Druckverlust von 40 Pa auf 30 Pa	58.664	351.981	9.386	56.317	374	2.243	4
	Senkung Druckverlust von 40 auf 25 Pa	57.495	344.972	9.199	55.196	561	3.364	6
Reinigung von Teilabluftströmen <sup>2</sup>	Verringerung um 20 %	52.159	312.957	8.346	50.073	1.414	8.487	14
	Verringerung um 30 %	47.613	285.677	7.618	45.708	2.142	12.852	22
	Verringerung um 50 %	38.646	231.876	6.183	37.100	3.577	21.460	37

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind folgende vorab getroffenen Vereinfachungen zu berücksichtigen:

- Es erfolgt keine Anpassung des Volumenstroms an die Wachstumskurve der Tiere.
- Der Fördervolumenstrom wird ab 12 °C Außentemperatur konstant auf die max. Sommerluft rate gesetzt.
- Einsparungen ergeben sich ohne Berücksichtigung von Effekten einer angepassten Steuerung der Anlage.
- Es wurde vorausgesetzt, dass die Dimensionierung der Anlage auf den Volumenstrom bei Umsetzung von Maßnahmen angepasst wird.

Somit kann der tatsächlich auftretende Betrag der Einsparung erheblich von den Rechenergebnissen abweichen. Unabhängig davon zeigen die Ausführungen vielversprechende Ansätze für einen möglichen effizienteren Betrieb. Konkret die Kühlung der Zuluft sollte in weiteren Bearbeitungsschritten auch unter Berücksichtigung der Tiergesundheit und der Investitions- und Betriebskosten für die Kühlung vertiefend betrachtet werden.

Weiterhin ergeben sich Einsparpotenziale bei der Anlagendimensionierung, der Auswahl der Einzelaggregate (Pumpen und Ventilatoren i. V. m. Antriebsmotoren), der richtigen Luftführung und durch die optimierte Reinigung der Wäscher der Abluftreinigungsanlage.

Die Maßnahmen „Reinigung von Teilströmen“ und „Reduzierung der Waschwassermengen“ sind zunächst in ihrer technischen und immissionsschutzfachlichen Umsetzbarkeit zu prüfen.

## 9 Anlagen in Sachsen

Zur Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse wurden Anlagen in Sachsen ausgewählt, die Abluftreinigungen in der Schweinehaltung betreiben.

In Sachsen werden an zwei Standorten 3-stufige Kombiwäscher der Fa. Siemers (neu Firma IUS) und an einem Standort ein Hartmann Biofilter betrieben. Die Anlagen konnten besichtigt werden. Nachfolgend werden die Stallanlagen und die eingesetzten Lüftungs- und Abluftreinigungsanlagen kurz vorgestellt. Ausgehend von den vorliegenden Unterlagen zu den Einzelanlagen wurde der Stromverbrauch der Lüftungs- und Abluftreinigungsanlage auf Basis der verfügbaren Angaben zu den Einzelaggregaten abgeschätzt.

### 9.1 Praxisbeispiel 1 – Schweineaufzucht

#### 9.1.1 Kurzbeschreibung Anlagenbetrieb

Es handelt sich um eine Tierhaltungsanlage zur Schweineaufzucht. Der Betrieb ist für 2.606 Sauenplätze und 4.050 Ferkelplätze genehmigt. Die Anlage fällt somit unter „Große Anlagen zur Schweinehaltung“ (vgl. Ausführungen in Kap. 2.4).

Die Sauen und Ferkel werden in 7 Stallgebäuden mit 13 Stallbereichen auf Teil- und Vollspaltenböden gehalten. Es handelt sich um ein geschlossenes System, d. h., die selbst erzeugten Ferkel werden bis zur Deckfähigkeit aufgezogen und als Ersatz für selektierte Sauen eingestellt. Zuchtuntaugliche Ferkel werden zur Mast an einem anderen Betrieb ab einem Gewicht > 15 kg verkauft. Selektierte zuchtuntaugliche Sauen werden am Standort geschlachtet.

Lediglich eines der Stallgebäude, der Jungsau Stall (E17), wird mit einem Biofilter betrieben. Der Stall umfasst 550 Tierplätze. Die Tiere werden hier mit einem Gewicht von 60 kg bis 130 kg eingestallt. Aufgrund des geringen Abstandes zur vorhandenen Wohnbebauung war bei Änderung des Betriebes die Nachrüstung des Biofilters zur Begrenzung der Geruchsemissionen behördlicherseits gefordert worden (ursprünglich als Maststall genehmigt).

Derzeit wird ein 2. Wartestall für die trächtigen Sauen errichtet. Eine Erhöhung der Tierplatzzahlen am Gesamtstandort ist nicht vorgesehen.

Zur energetischen Nutzung der anfallenden Gülle wird am Standort eine Biogasanlage mit BHKW betrieben. Die erzeugte Wärme wird für die Tierhaltungsanlage und das Nahwärmenetz genutzt. Die elektrische Energie wird in das öffentliche Netz eingespeist.

### 9.1.2 Verfahren der Zwangsentlüftung und Abluftreinigung

Die Stallanlagen am Standort sind mit Ausnahme des Jungsauenstalls (E17) mit dezentralen Zwangsentlüftungssystemen ausgestattet. Die einzelnen Abteile werden separat über Klimacomputer in Abhängigkeit von der Stalltemperatur gesteuert. Die Regelung der einzelnen Ventilatoren erfolgt z. T. über eine Phasenanschnittsteuerung oder Stufenregelung gekoppelt mit einer Drosselregelung der Zuluftklappen. Die Ableitung der Abluft erfolgt senkrecht über Dach (vgl. Abbildung 18). Jedem Abteil ist ein Abluftschacht mit jeweils einem Abluftventilator zugeordnet. Insgesamt verfügt der Standort über 50 Abluftpunkte (ohne Jungsauenstall). Die Beheizung der Ställe erfolgt über das eigene BHKW mit angeschlossener Biogasanlage.

#### Luftführung und Abluftreinigung

Eine Abluftreinigung kommt nur für den Jungsauenstall zur Anwendung. Dazu wurde die dezentrale Zwangsentlüftung auf eine zentrale umgerüstet. Ziel der Abluftreinigung war ausschließlich die Minderung der Geruchsemissionen, sodass die kostengünstigste Variante – die Errichtung eines Biofilters – gewählt wurde. Die Anlage wurde 2008 errichtet.

Die frische **Zuluft** wird über einen seitlich angeordneten Kanal im Dachraum von den Seitenwänden des Stalls in den Kontrollgang geführt (Ganglüftung). Die Nachströmung erfolgt über kurze Stiche von der Seitenwand. Die Druckverluste sind bei einer derartigen Ausführung vernachlässigbar.

Die **Abluft** wird oberflur in einen zentralen Abluftkanal (2,80 m x 2,80 m) abgesaugt. Aus dem zentralen Abluftkanal wird die Abluft direkt in die Druckkammer innerhalb des Biofilters gelenkt, um diesen dann von unten nach oben zu durchströmen. Die Ventilatoren sind am Ende des Abluftsammelkanals vor dem Biofilter angeordnet. Der Biofilter arbeitet mit Überdruck. Der Biofilter ist aus einer Druckkammer, einem Tragegestell für das Filterbett, dem Filterbett und dem Filtermaterial aufgebaut. Das Filtermaterial besteht aus Hölzern. Holzschwaden aus Hartholz (größere Randstücke mit Rinden) werden bis zu 0,7 m Höhe auf den Rosten des Filters aufgebracht. Darüber werden Weichholzhäcksel bis zur einer Höhe von 0,3 m geschichtet. Ein Auffüllen dieses Filtermaterials ist nach Auskunft des Betreibers in der Regel alle zwei bis drei Jahre erforderlich. Durch die offene Bauweise und damit mögliche Befeuchtung durch Niederschlag ist eine Befeuchtung des Abgases i. d. R. nicht erforderlich. Die für die Mikroorganismen zum Geruchsabbau erforderlich Feuchtigkeit wird zusätzlich über eine dosierte Berieselung des Filters sichergestellt.

Es sind 3 druckstabile **Ventilatoren** installiert, welche im Parallelbetrieb arbeiten. Ein Abschalten einzelner Ventilatoren bei Mindestluftströmung ist nicht vorgesehen.

#### Steuerung und Regelung

Die Zuluftöffnungen je Abteil sind mit Drosselklappen ausgestattet. Im Stall sind 7 Abteile angeordnet, welche über einzelne Klimacomputer für eine temperaturabhängige Volumenstrom- und Heizungsregelung verfügen. Die Einstellung der Temperaturkurve und Mindestluftströmung erfolgt händisch in Abhängigkeit von der Stallbelegung. Die Ventilatoren werden über den Klimacomputer in Abhängigkeit vom Abteil mit größter geöffneter Drosselklappe und der Stalltemperatur gesteuert, sodass der geringstmögliche Druckverlust eingestellt wird. Es werden EC-Motoren eingesetzt. Die installierte Steuer- und Regelungstechnik lässt sich wie folgt zusammenfassen:

##### ■ Messung für Steuerung

- Messventilator zur Volumenstromerfassung in Ablufterfassung je Abteil mit Drosselklappe
- Unterdruck im zentralen Abluftkanal
- Temperatur im Stall

##### ■ Regelung

- Drehzahl Ventilator über EC-Motor

- Stellung Drosselklappen Zuluftöffnungen über Stellmotoren
- Unterdruck in Abhängigkeit vom Abteil mit größter geöffneter Drosselklappe
- Einstellbare Vorgaben Steuerung
  - Kurve Solltemperatur in Abhängigkeit von Stallbelegung
  - Mindestluftfrate, Regelbereich

Je nach Temperaturdifferenz zwischen der Außentemperatur und der Abteilterperatur variiert der eingestellte Regelbereich zwischen 2 °C und 6 °C.

Der Biofilter verfügt nach Aussage des Betreibers über eine Datenaufzeichnung. Es werden folgende Daten erfasst:

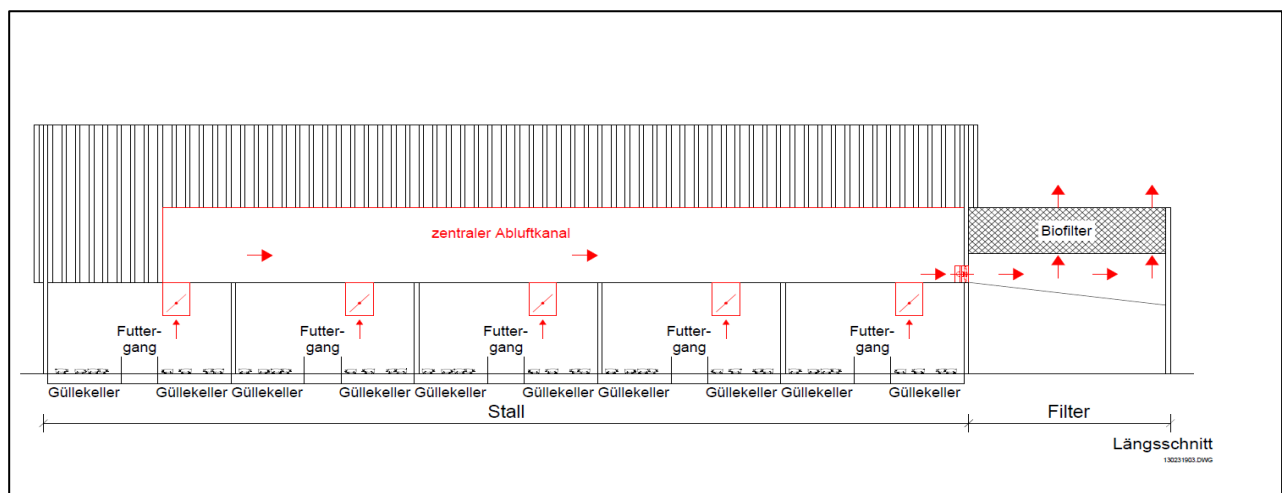
- Luftdruckmessung, Alarmauslösung bei > 100 Pa

Die Auslegungsparameter des Biofilters und der Ventilatoren sind Tabelle 23 zu entnehmen.

**Tabelle 23: Kenndaten der eingesetzten Abluftreinigung Standort 1**

Parameter	Wert	Einheit
Tierplätze (Auslegung Biofilter)	550	Anzahl
Gesamtluftfrate nach DIN18910	47.300	m³/h
Anzahl der Ventilatoren (2 x Fancom Typ 3480P, 1 x 1450P)	3	Stück
Max. Druckerhöhung des Systems	135	Pa
Luftleistung der Ventilatoren bei 150 Pa	52.220	m³/h
Filterfläche Biofilter	59,1	m²
<u>Filterdicke</u>		
Hartholzabschwarten	0,7	m
Weichholzhäcksel	0,3	m

Ein Längsschnitt der Stallanlage und Ablufführung ist Abbildung 18 zu entnehmen.



**Abbildung 18: Längsschnitt Jungsauensall mit Darstellung der Ablufführung**



### 9.1.3 Betriebserfahrungen

Nach Auskunft des Betreibers und der Erfassung im Rahmen der Vor-Ort-Besichtigung wird eine sehr gute Geruchsreduzierung erreicht. Der Betrieb läuft störungsfrei. Eine zusätzliche Befeuchtung des Filtermaterials ist nur in Ausnahmefällen notwendig.

Durch die zentrale Ablufterfassung sieht der Betreiber eine Gefahr der Tiergesundheit bei Stromausfall, weil im Gegensatz zur dezentralen Entlüftung eine Notlüftung durch Eigenthermik nicht realisiert werden kann. Gleichzeitig verringert sich die thermische und kinetische Überhöhung der Abluftableitung über den Biofilter (nahezu auf null) und damit eine immissionsseitig günstige Verteilung der Schadstoffe.

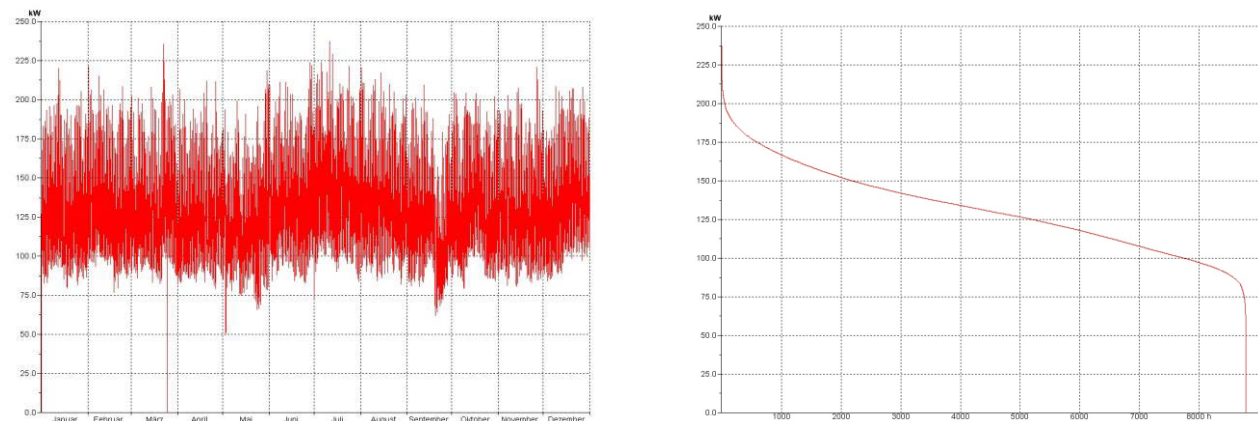
Bei Nachrüstung weiterer Reinigungsanlagen in Verbindung mit dem zentralen Lüftungssystem sollten bauliche Schwierigkeiten infolge des Platzbedarfs für den Abluftkanal und die Reinigungsanlagen zwingend mit betrachtet werden. Die Errichtung eines Zentralkanal war im Stall E17 möglich, weil ein freitragender großer Dachraum vorhanden war, was in den anderen am Standort vorhandenen Ställen nicht der Fall ist.

### 9.1.4 Energetische Bewertung

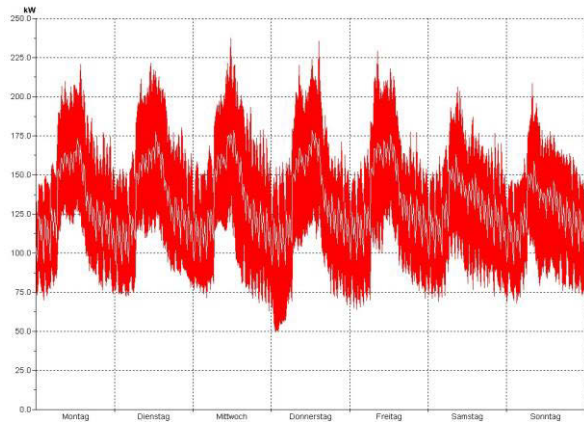
Für den Standort 1 wurde der Lastgang 2012 für den Strombezug übergeben. Weiterhin standen Auswertungen des Betriebstagebuches (Handaufzeichnungen) zum Stromverbrauch zur Verfügung. Folgende Eckdaten sind daraus ableitbar

- Gesamtverbrauch: Sauenzuchtanlage 557.591 kWh/a
- Jahresmaximum: 200,1 kW
- Jahresminimum: 50 kW
- Vollbenutzungsstunden: 5.807 h
- Stromverbrauch Jungsauenstall E17: 21.058,47 kWh/a

Der Jahrgang des Strombezuges zeigt keine ausgeprägte Sommerlast, welche aufgrund der dann höheren Abluftraten zu erwarten wäre. Für eine konkrete Auswertung der Lastgänge sind in einem weiteren Bearbeitungsschritt die Einzelverbraucher am Standort zu erfassen und zu analysieren.



**Abbildung 19: Lastganganalyse Jahrgang ungeordnet (links) und geordnet (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtstandort 1**



**Abbildung 20: Lastganganalyse Wochenlastgang (links) und Tagesgang (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 1**

Aus den Angaben des Betreibers zur Stallbelegung am Standort ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von **38,3 kWh/(TP\*a)** unter Bezug auf die erfassten Daten zum Energieverbrauch der Belüftungsanlage. Diese Messdaten stimmen mit den im Kap. 7 durchgeführten Berechnungen für Biofilter (5699) gut überein.

In Tabelle 24 werden die Energieverbräuche der Zwangsentlüftung mit Biofilter und die dafür erforderlichen Betriebskosten zusammengestellt und mit den im Kap. 7 ermittelten Daten verglichen.

**Tabelle 24: Energieverbrauch Lüftung- und Abluftreinigungsanlagen**

		Stall E17 Jungsaunen
Anzahl Tierplätze lt Auslegung		550
Stromverbrauch Lüftung	kWh/a	21.058,5
	kWh/(TP*a)	38,3
Eigene Berechnung Biofilter (nur zusätzlicher Anteil Ventilator für ARA)	kWh/(TP*a)	26
Energiekosten bei 0,16 €/kWh	€/a	3.369

### 9.1.5 Ermittlung energetischer Schwachstellen und Ableitung Verbesserungspotenziale

#### Lufführung/Luftgeschwindigkeit

Der Abluftkanal ist geradlinig und ausreichend groß ausgeführt. Ein Umbau wird nicht empfohlen.

#### Ventilator: Einsatz Ventilatoren mit elektronisch kommutiertem Motor

Es werden bereits energieeffiziente Ventilatoren mit EC-Motoren im Parallelbetrieb eingesetzt.

#### Steuerung

Die Steuerung ist auf energiesparsamen Verbrauch ausgelegt. Die Regelung erfolgt laut Aussage des Betreibers automatisch auf maximale Öffnung einer Klappe, sodass der geringstmögliche Druckverlust eingestellt wird. Die Regelung der einzelnen Stallbereiche erfolgt automatisch.

#### Abluftreinigung

Weitere Energieeinsparungen können über folgende, im Kap. 8 hergeleiteten Ansätze erzielt werden.

**Tabelle 25: Maßnahmen Energieeinsparung Abluftreinigung Standort 1**

Idee für Maßnahme		Einsparung in %	Stall E17
Energieverbrauch (Basis 2012)	kWh/a		21.058,5
Einsparung Zuluftkühlung Ventilator	kWh/a	25	5.265
	€/a		842
Einsparung Reinigung von Teilströmen (80 %)	kWh/a	14	2.948
	€/a		472

Die ausgewiesenen Einsparungen für die Zuluftkühlung lassen nur geringe Möglichkeiten für Investitionen zu (bei Amortisationszeit von 5–6 Jahren ca. 5.000 Euro). Eine aktive Kühlung mit Betriebskosten durch Umwälzpumpen, Kompressionspumpen o. ä. ist demnach nicht zu empfehlen. Weitere Ansatzpunkte, wie die Nutzung von Kühldecken mit Brunnenwasser oder Luftkühler/Kühlpads sind vor Ort zu prüfen. Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte nicht abschließend geprüft werden, welcher min. Volumenstrom zur Abführung der Schadstoffe im Sommerbetrieb erforderlich ist (vgl. Kap. 8.3.2). Die Einsparungen durch Reinigung von Teilströmen bedürfen einer immissionsschutzrechtlichen Änderungsgenehmigung mit Ausbreitungsberechnung zum Nachweis der damit verbundenen Umweltauswirkungen (hier Bewertung der Geruchsbelästigung). Die dafür erforderlichen Aufwendungen rentieren sich nach erster Einschätzung aufgrund der geringen Einspareffekte nicht.

## 9.2 Praxisbeispiel 2 – Schweinezucht- und Mastanlage

### 9.2.1 Kurzbeschreibung Anlagenbetrieb

Es handelt sich um eine Schweinezucht- und Mastanlage. Der Standort verfügt über eine Anlagengenehmigung vom 31.01.2006 für den Betrieb von 6 Stallanlagen mit einer Tierkapazität von insgesamt 7.127 Tierplätzen. Die Anlage fällt somit unter „Große Anlagen zur Schweinehaltung“ (vgl. Ausführungen in Kap. 2.4). Der komplette Ausbau wurde aufgrund der geringeren Nachfrage bisher jedoch nicht realisiert.

Die Stallanlage liegt im Außenbereich. Die nächstgelegene Wohnbebauung befindet sich in einer Entfernung von ca. 450 m. Derzeit werden am Standort drei Stallanlagen im Flüssigmistverfahren betrieben:

- Stall 2: Sauenstall, 439 TP
- Stall 3: Abferkelstall, 120 TP (genehmigt für 323 TP)
- Stall 4: Ferkelstall, 2.640 TP bis 30 kg Lebendgewicht

Die genehmigten Tierplatzzahlen werden nicht ausgeschöpft. Die Beheizung der Ställe erfolgt über direkte Gasbrenner. Die anfallende Gülle wird den Güllebehältern zugeführt und nach Bedarf auf landwirtschaftlichen Flächen verbracht.

#### Verfahren der Zwangsentlüftung und Abluftreinigungsanlage

In den Ställen wurde jeweils eine zentrale Unterdruck-Zwangsentlüftung mit Abluftreinigung installiert. Zur Reinigung der Abluft werden dreistufige Kombiwäscher der Firma Siemers eingesetzt. Die Abgasreinigungsanlagen wurden 2007/2008 errichtet, wobei die Anlage für den Stall 2 aufgrund der geringeren Tierplatzzahl noch gedrosselt gefahren wird.

### Luftführung und Abluftreinigung

Die Zuluft wird über gesteuerte Zuluftklappen an den Längsseiten der Ställe unterhalb der Traufkante in den Dachraum und von dort über Luftöffnungen (Eigenbau) in den Stallbereich geführt (vgl. Abbildung 21). Dabei wurde die Dachdämmung komplett perforiert.

Die Abluft wird über einen zentralen Abluftkanal je Stall mit einer Oberflurabsaug-Öffnung je Abteil/Stallbereich abgesaugt. Dazu sind am Ende des zentralen Abluftsammlkanals vor Eintritt in die Abluftreinigungsanlagen jeweils vier Ventilatoren installiert (vgl. Abbildung 22). Das Prinzip der Luftführung entspricht somit einer Unterdrucklüftung. Der Abluftkanal ist im Dachbereich des Stalles angeordnet und endet an der Giebelseite des Stalles im Vorraum der Abluftreinigungsanlage. Die Ventilatoren sind am Ende des Abluftkanals am Übergang zum Vorraum der Abluftreinigungsanlage angeordnet.



Abbildung 21: Zuluftführung (links: Stall 4; rechts: Stall 2)

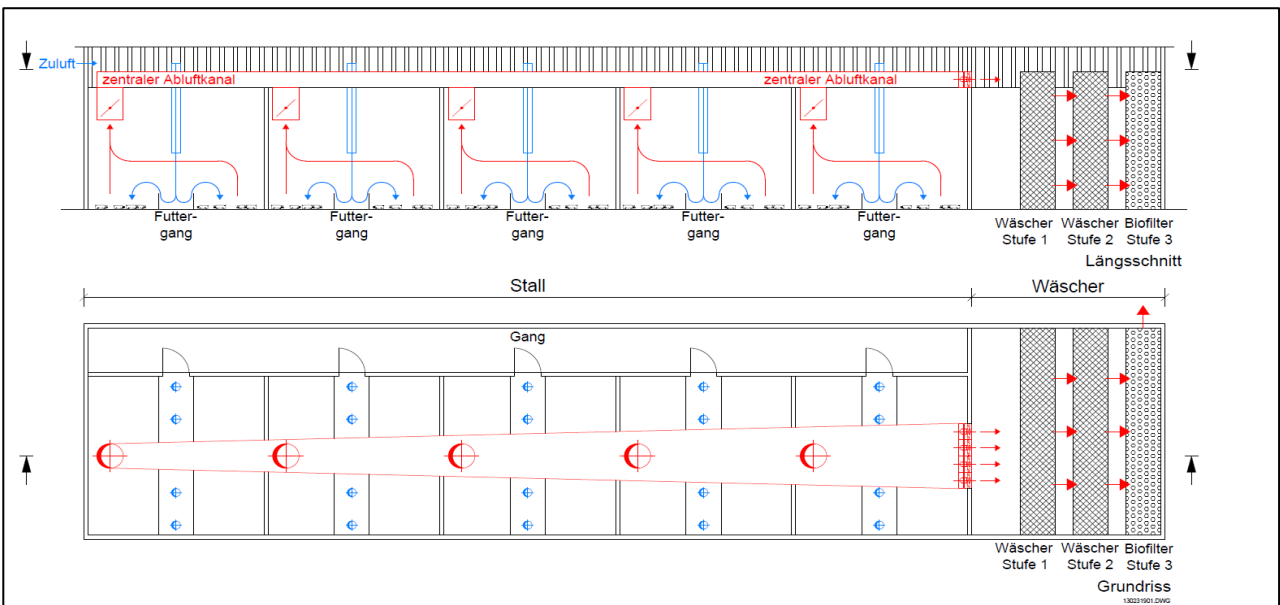


Abbildung 22: Längsschnitt und Draufsicht Stall 4 (Ferkelstall) mit Darstellung der Abluftführung 2

Nach einer zweistufigen chemischen Wäsche erfolgt eine Geruchsstoffentfernung über einen offenen Biofilter aus Rindenmulch (vgl. Abbildung 22). Die Filterschichten sind senkrecht hintereinander geschaltet. Für die chemischen Wäscher, bestehend aus beschichtetem Kunststoff, ist je Stufe eine Tauchpumpe installiert. Die Filterwände der chemischen Wäscher werden kontinuierlich von oben mit Wasser, welches mit Schwefelsäure angereichert ist, aus separaten Speicherbecken befeuchtet. Die erste Filterwand dient überwiegend der Feststoffabscheidung (Hautabrieb, Staub). Das abfließende Wasser wird daher zum Abscheiden der Feststoffe drei in Reihe geschalteten Absetzbecken zugeführt. Aus

dem 3. Becken wird das Wasser wieder zur Befeuchtung der Filterwand angesaugt. Dadurch wird ein Verstopfen des Befeuchtungssystems vermieden. Das erste Wasserspeicherbecken ist regelmäßig von der abgesetzten Schlammschicht zu säubern. Die wesentliche Abscheidung von Ammoniak erfolgt in der 2. Stufe. Aufgrund der hohen Wasserverdunstung in den Stufen 1 und 2 wird eine Austrocknung der Biofilterschüttung der 3. Stufe vermieden. Die Abluft wird über die offene Biofilteroberfläche an die Atmosphäre abgegeben.

Die vorliegenden Auslegungsparameter der Abluftreinigungsanlage und der Ventilatoren sind Tabelle 26 zu entnehmen. Weiterführende technische Dokumentationen und Daten (z. B. Höhe, Dicke Füllkörper, Filterflächenbelastung) wurden vom Anlagenbetreiber und auch von der zuständigen Behörde nicht übergeben.

Es sind druckstabile AC-Ventilatoren installiert, die im Parallelbetrieb arbeiten. Im Winterbetrieb erfolgt nach Auskunft des Betreibers ein manuelles Abschalten einzelner Ventilatoren.

### Steuerung und Regelung

Die Zuluftöffnungen je Abteil sind mit Drosselklappen ausgestattet, welche manuell verstellt werden. Die einzelnen Stallbereiche/Abteile verfügen über Klimacomputer (Stienen CBA 200) für eine temperaturabhängige Volumenstrom- und Heizungsregelung. Die Einstellung der Temperaturkurve und Mindestluftfrate erfolgt über eine Wachstumskurve mit 4 Knickpunkten in Abhängigkeit von der Stallbelegung (Gewicht und Alter). Die Ventilatoren werden über den Klimacomputer der Stalltemperatur gesteuert. Die Regelung der Drehzahl erfolgt über Frequenzumrichter. Die installierte Steuer- und Regelungstechnik lässt sich wie folgt zusammenfassen:

#### ■ Messung für Steuerung

- Messventilator zur Volumenstromerfassung in Ablufferfassung je Abteil
- Temperatur im Stall
- Außentemperatur

#### ■ Regelung

- Ventilatoren über FU
- Stellung Drosselklappen Zuluftöffnungen händisch

#### ■ Einstellbare Vorgaben Steuerung

- Kurve Solltemperatur in Abhängigkeit von Stallbelegung
- Mindestluftfrate, Regelbereich

Angaben zum eingestellten Regelbereich liegen nicht vor.

**Tabelle 26: Kenndaten der eingesetzten Abluftreinigung Standort 2  
(Quelle: Antragsunterlagen nach BImSchG)**

Parameter	Stall 2	Stall 3 <sup>2</sup>	Stall 4	Einheit
Tierplätze	439	323	2640 Ferkel	Anzahl
Gesamtluftrate nach DIN18910 (lt. Antrag)	84.368	69.729	141.900	m <sup>3</sup> /h
Anzahl der Ventilatoren (Stienen SGS 92)	4	4	4	Stück
Max. Druckerhöhung des Systems	150	150	150	Pa
Luftleistung der Ventilatoren bei 150 Pa	22.400	22.400	22.400	m <sup>3</sup> /h
Install. Volumenstrom	89.600	89.600	89.600	m <sup>3</sup> /h
Filterstufe 1 und 2: Wäscher				
Filterschichtdicke	Je 0,15	Je 0,15	Je 0,15	m
Filteroberfläche	280	280	280	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Leistung installierte Tauchpumpe	2 x 0,85	2 x 0,85	2 x 1,1	kW
Filterstufe 3: Biofilter				
Filterfläche	37,82	k. A.	44,7	m <sup>2</sup>

### 9.2.2 Betriebserfahrungen

Zur Auswertung des Betriebes der Anlage wurden die Betriebstagebücher für den Sauenstall und die Ferkelaufzucht ausgewertet. Die Erfassung von Betriebsdaten der Ventilatoren (z. B. Stromverbrauch, Laufzeiten) ist prinzipiell möglich, d. h. es sind weitere Eingänge verfügbar. Die Ventilatoren und andere Kenndaten der Lüftung wurden bisher jedoch nicht im Betriebstagebuch integriert.

Die erfassten Daten für 2012 werden im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst. Die Reinigung der Wäscher erfolgt ca. alle 50 Tage. Bei Bedarf wird Schwefelsäure zugegeben. Zur Prüfung ist eine pH-Wert-Sonde mit Alarmgeber installiert.

### 9.2.3 Energetische Bewertung

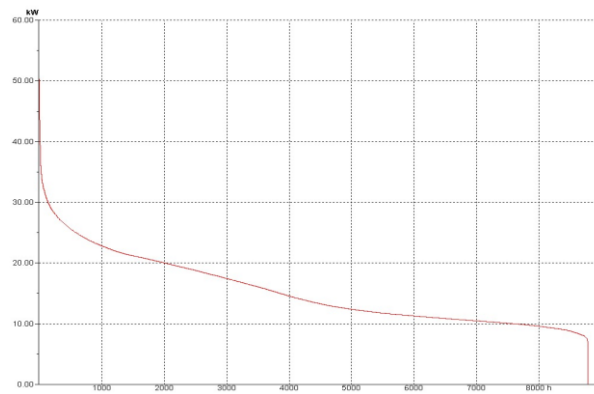
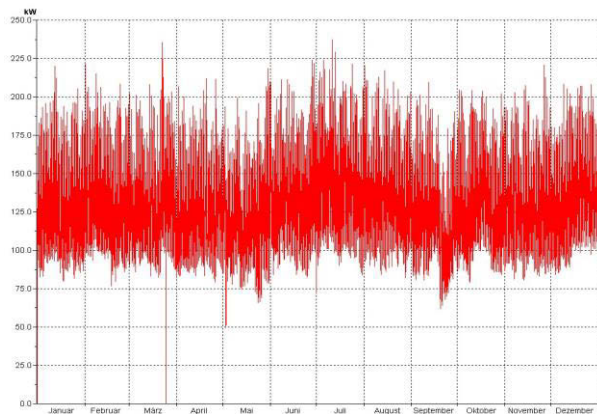
Die vorliegenden Lastgänge für 2012 zum Gesamtstromverbrauch des Standortes werden in Abbildung 23 und Abbildung 24 ausgewertet. Folgende Eckdaten sind daraus ableitbar:

- Gesamtverbrauch: Sauenzuchtanlage 135.709,4 kWh/a
- Jahresmaximum: 50,3 kW
- Jahresminimum: 6,5 kW
- Vollbenutzungsstunden: 2.698 h

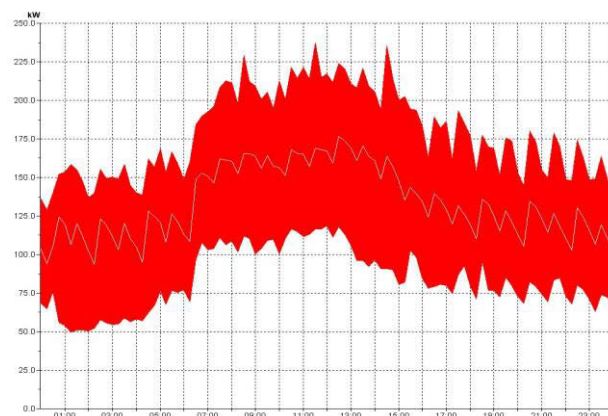
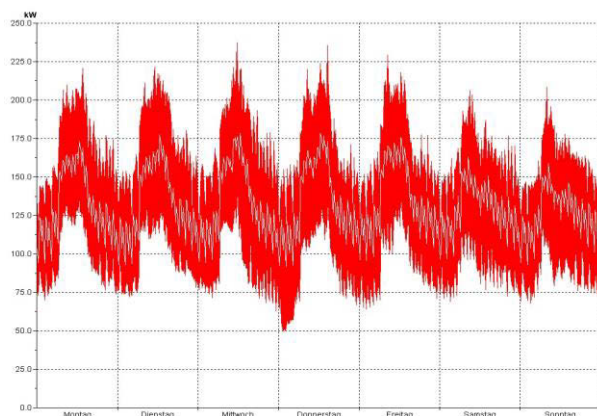
Der Jahresgang des Strombezuges zeigt keine ausgeprägte Sommerlast, welche aufgrund der dann höheren Abluftraten zu erwarten wäre.

<sup>2</sup> Werte der Genehmigung, Stall wird derzeit nur z. T. genutzt





**Abbildung 23: Lastganganalyse Jahresgang ungeordnet (links) und geordnet (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 2**



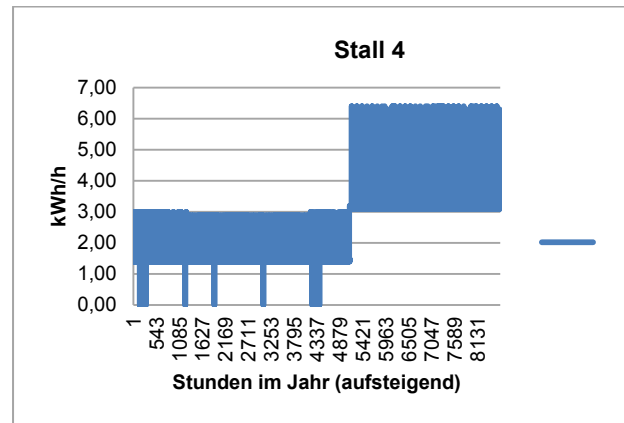
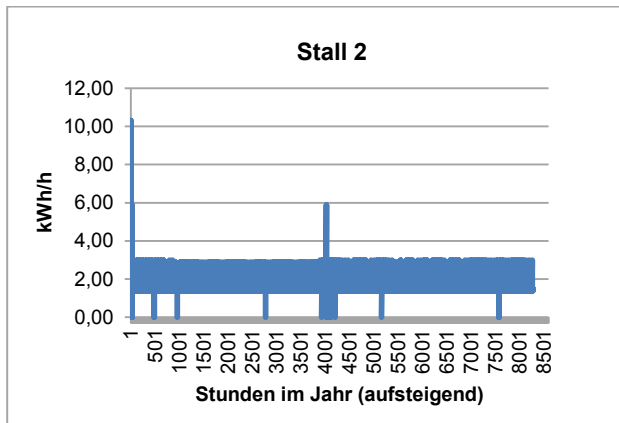
**Abbildung 24: Lastganganalyse Wochenlastgang (links) und Tagesgang (rechts) für Strombezug 2012 Gesamtanlage 2**

Aus den Angaben des Betreibers zur Stallbelegung am Standort ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von **136 kWh/(TP\*a)<sup>3</sup>** bei Umrechnung der Ferkelplätze auf Sauenplätze bzw. 42 kWh/(TP\*a) ohne Umrechnung.

Dieser Wert liegt im Vergleich mit Literaturwerten (s. Kap. 3) sehr hoch. Es konnte nicht geklärt werden, ob weitere Verbraucher über den Anschluss versorgt werden oder ob ggf. die angegebene Stallbelegung nicht korrekt ist. Hierzu sind weitere Erhebungen erforderlich.

Der Energieverbrauch der Pumpen und der Steuerung der Abluftreinigungsanlage kann aus den Messdaten der Betriebstagebücher für die Ställe 2 und 4 berechnet werden (vgl. Abbildung 25). Für den Stall 3 (teilbelegt) wurde kein Betriebstagebuch übergeben, sodass eine grobe Abschätzung erfolgt. Weiterhin erfolgt eine Abschätzung des Energieverbrauchs der Ventilatoren anhand der vorliegenden Angaben. Die Auswertung ist Tabelle 27 zu entnehmen.

<sup>3</sup> Die Anpassung erfolgt anhand der NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren. 3,6 kg NH<sub>3</sub> pro Mastschwein und Jahr, 0,6 kg NH<sub>3</sub> pro Ferkel und Jahr; also 6 Ferkel = 1 Mastschwein. Demzufolge entsprechen 2.640 Ferkelplätze 440 Sauenplätzen.



**Abbildung 25: Summe des Energieverbrauchs von Pumpen und Steuerung der Abluftreinigung Stall 2 (links) und Stall 4 (rechts)**

Die Ursache für den Sprung des Energieverbrauchs der Reinigungsanlage im Stall 4 konnte im Nachgang nicht geklärt werden. Vermutet werden kann, dass ab diesem Zeitpunkt eine andere Pumpe installiert worden ist. In Tabelle 27 werden die Energieverbräuche der Zwangsentlüftung mit Abluftreinigung und dafür erforderlichen Betriebskosten zusammengestellt und mit den im Kap. 7 ermittelten Daten verglichen.

**Tabelle 27: Energieverbrauch Lüftung- und Abluftreinigungsanlagen**

		Stall 2 Jungsaunen	Stall 3 Abferkelstall	Stall 4 Ferkelstall	SUMME
Anzahl Tierplätze		439	120	2.640	999
Stromverbrauch Lüftung (eigene Abschätzung)	kWh/a	19.000	8.000	24.000	51.000
Stromverbrauch Abluftreinigung (Pumpen + Steuerung)	kWh/a	12.517	4.448	19.062	36.027
	kWh/(TP*a)	29	37	43	36
Pumpe (Eigene Berechnung für Rieselbett)	kWh/(TP*a)				17 bis 39
Summe Stromverbrauch	kWh/a	31.517	12.448	43.062	87.027
	kWh/(TP*a)	72	104	98	87
Eigene Berechnung Rieselbett (nur zusätzlicher Anteil Ventilator für ARA)	kWh/(TP*a)				34 bis 54
Anteil an Gesamtverbrauch Sauenzuchtanlage	%	23 %	9 %	32 %	64 %
Energiekosten	€/a	5.043 €	1.992 €	6.890 €	13.924 €

## 9.2.4 Ermittlung energetischer Schwachstellen und Ableitung Verbesserungspotenziale

### Luftführung/Luftgeschwindigkeit

Die Druckverluste im Zuluftbereich sind wegen der großflächigen Nachströmmöglichkeiten im Dachbereich vernachlässigbar. Der Abluftkanal ist geradlinig und konisch und somit im Hinblick auf auftretende Druckverluste energetisch günstig ausgeführt. Aufgrund der Luftzuführung über den ungedämmten Dachraum heizt sich die Frischluft vor Eintritt in den Stall auf, was zu höheren Lufraten für den Sommerbetrieb und damit höherem Energiebedarf für die Förderung führt. Zusätzlich wurde die vorhandene Deckendämmung durch die Installation perforiert und damit eine zusätzliche Wärmebrücke mit Wärmeverlusten im Winter und Wärmeeinträgen im Sommer geschaffen.



## Ventilator/Steuerung

Die Ventilatoren werden mit AC-Motoren betrieben, die Regelung der Drehzahl erfolgt laut Aussage des Betreibers manuell. Eine Umrüstung auf EC-Motoren würde zu Energieeinsparungen führen (vgl. Tabelle 28).

Die manuelle Regelung der Ventilatoren führt dazu, dass höhere Drehzahlen eingestellt werden müssen, sodass die Regelung der Stallbereiche sichergestellt bleibt. Hier ist eine Regelung denkbar, die auf eine möglichst weite Öffnung der Regelklappen für die einzelnen Stallbereiche und damit auf geringere Druckverluste abstellt. Der Idealfall hierbei ist, dass eine Klappe maximal geöffnet ist und die anderen Klappen entsprechend dem Bedarf abdrosseln.

## Abluftreinigung

Mögliche Energieeinsparungen können über die im Kap. 8 hergeleiteten Ansätze abgeschätzt werden. Bei einer nachträglichen Errichtung einer Zuluftkühlung kann die im Kap. 8 ermittelte Einsparung jedoch nicht erreicht werden, weil eine Verkleinerung der Abluftreinigungsanlage ohne größere investive Maßnahmen nicht möglich ist. Auch weitere benannte Maßnahmen wie die Reduzierung der Waschwassermenge und die Reinigung von Teilströmen ist nachträglich schwer zu realisieren und bringt aufgrund der nachträglich nicht anpassbaren Dimension der Anlage nicht die im Kap. 8 beschriebenen Effekte der Einsparung.

Eine Zusammenfassung möglicher Maßnahmen am Standort 2 ist Tabelle 28 zu entnehmen.

**Tabelle 28: Maßnahmen Energieeinsparung Abluftreinigung Standort 2**

Idee für Maßnahme	Einheit	Einsparung in %	Stall 2	Stall 3	Stall 4
Energieverbrauch Ventilatoren	kWh/a		19.000	8.000	24.000
Energieverbrauch Pumpen/Steuerung ARA	kWh/a		12.517	4.448	19.062
Reduzierung Druckverlust um 10 Pa durch automatische Steuerung Drosselklappen	kWh/a	9 % Ventilator	1.710,00	720,00	2.160,00
	€/a		274	115	346
Einsatz EC-Motoren (Erhöhung Systemwirkungsgrad)	kWh/a	5 % Ventilator	950	400	1.200
	€/a		152	64	192
Einsparung Zuluftkühlung ohne Änderung Anlagengröße	kWh/a	25 % Ventilator	4.750	2.000	6.000
	€/a		760	320	960
Einsparung Reinigung von Teilströmen (80 %)	kWh/a	14 %	4.412	1.743	6.029
	€/a		706	279	965

Die Investitionskosten für die Umrüstung auf EC-Ventilatoren liegen beim Einsatz von 4 Ventilatoren mit Einbau bei ca. 5.500,- € je Stallanlage. Eine Amortisation dieser Anlage ist somit erst nach ca. 28 Jahren gegeben. Wesentlich lohnender ist der Einsatz einer automatischen Steuerung der Drosselklappe.

Eine Zuführung kühlerer Frischluft bzw. Verhinderung des Aufheizens der Frischluft im Dachraum kann zunächst durch eine einfache Maßnahme, die Errichtung gedämmter Zuluftkanäle, erreicht werden. Die dann mögliche weitere Einsparung durch aktive Kühlung ist durch weitere Untersuchungen zu verifizieren. Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte nicht abschließend geprüft werden, welcher min. Volumenstrom zur Abführung der Schadstoffe im Sommerbetrieb erforderlich ist (vgl. Kap. 8.3.2).

Die Einsparungen durch Reinigung von Teilströmen bedürfen einer immissionsschutzrechtlichen Änderungsgenehmigung mit Ausbreitungsberechnung zum Nachweis der damit verbundenen Umweltauswirkungen. Die dafür erforderlichen Aufwendungen rentieren sich nach erster Einschätzung aufgrund der geringen Einspareffekte nicht.

### Sonstiges – Einsatz Lastmanagementsystem

Der Strombezug im Jahr 2012 betrug 135,7 MWh<sub>el</sub> bei einer maximalen Leistung von 50,3 kW<sub>el</sub>. Daraus ergibt sich eine Vollbenutzungsstundenzahl von 2.698 h. Ein Stromlastschwerpunkt ist nicht auszumachen. Vielmehr zeigt sich eine relativ kontinuierliche Lastanforderung.

Bei einer Minderung der Verrechnungsspitzenleistung durch ein Optimierungssystem würde dies zu einer Senkung der laufenden Kosten in Form eines niedrigeren Leistungspreises für die Bestelleistung und zu einer Erhöhung der Vollbenutzungsstunden mit einer möglichen Verbesserung der Tarifsituation führen. Im vorliegenden Fall wurde ermittelt, dass ca. 214 Viertelstundenwerte durch ein Lastmanagementsystem (LMS) gesenkt werden könnten, um die maximale Bezugsleistung auf 33 kW zu begrenzen. Das entspricht einer Minderung um 17 kW gegenüber der Maximallast bzw. 1.360 €/a Jahr bei einem Leistungspreis von 80 €/kW (üblicher Preis, Bezugsrechnung wurde nicht übergeben). Die Einführung eines LMS wird deshalb empfohlen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Die rechtliche Entwicklung und Notwendigkeit zur Reduzierung von Schadstoffemissionen stellt an den Betreiber von Schweinehaltungsanlagen neue Anforderungen. Dabei ist die Errichtung von Abluftreinigungsanlagen eine weiterführende Maßnahme, welche nach der Emissionsminderung und Minderung der Immissionen durch Verbesserung der Ableitbedingungen eingesetzt werden sollten. Die vorliegende Studie liefert in diesem Zusammenhang Ansätze

- für den Vergleich der am Markt verfügbaren Abluftreinigungssysteme für die Schweinhaltung im Hinblick auf den notwendigen Energieeinsatz und
- für mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz für den Betrieb der Abluftreinigungsanlagen mit zentraler Zwangsentlüftung.

Es konnte nachgewiesen werden, dass der Betrieb einer Abluftreinigung zu erheblichen Betriebskosten führt, welche zum einen auf die zusätzlich zu überwindenden Widerstände der Luftreinigungseinheit und weiterer Abluftwege und zum anderen auf den Betrieb der Pumpen für die Wäscher zurückzuführen ist. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei Stallanlagen ohne Abluftreinigung die Lüftung i. d. R. direkt nach oben über Dach erfolgt. Insofern ist auch der Energiebedarf durch die zentrale Entlüftung durch längere Abluftwege und Strömungshindernisse sowie des Wegfalls der Nutzung der Eigenthermik der Abluft dem Betrieb einer Abluftreinigungsanlage zuzurechnen.

Zur Priorisierung der Maßnahmenansätze erfolgte eine vereinfachte quantitative Abschätzung der Einsparpotenziale. Darauf aufbauend sollte in einem nächsten Bearbeitungsschritt ein validiertes Modell auf Basis von Messungen aufgestellt werden, welche eine bessere Quantifizierung von Einsparmöglichkeiten erlaubt.

Prinzipiell ist festzustellen, dass

- die vorhandene Datenlage der Hersteller keine abschließende Beurteilung der Betriebsbedingungen der Abluftreinigungsanlagen und damit verbundenen Stromverbräuche ermöglicht,
- der Betrieb einer Abluftreinigungsanlage mit zentraler Zwangsentlüftung zwangsläufig zu erheblichen Mehraufwendungen für den Stromverbrauch führt,
- eine Vielzahl von Maßnahmen einen relativ effizienten Betrieb sicherstellen können und
- eine Optimierung bereits bei der Planung der Anlage entscheidend für die Minimierung der Mehrkosten für den späteren effizienten Betrieb ist.

## Empfehlungen für den notwendigen Einsatz von Abluftreinigungsanlagen

Zusammenfassend ergeben sich folgende Anforderungen an einen energieeffizienten Einsatz von Abluftreinigungsanlagen:

- Auswahl der Anlage nach der Reinigungsleistung, dem konkreten Einsatzfall und dem notwendigen Energieeinsatz
- Angepasste Dimensionierung der Anlage ggf. unter Berücksichtigung der Möglichkeit einer Zuluftkühlung, Reinigung von Teilströmen
- Optimale Auslegung der Luftführung der zentralen Zwangsentlüftung (z. B. große Querschnitte, runde Winkel, keine Einbauten)
- Richtige Auswahl der Aggregate (Ventilatoren und Pumpen) unter Berücksichtigung der erforderlichen Betriebspunkte (Einbeziehung der Betriebskosten in Investitionsentscheidung)
- Einsatz hocheffizienter Antriebe
- Einsatz Steuerung mit geringstem Druckverlust für Regelung Volumenstrom (Ansteuerung Drosselklappe, maximale Öffnung einer Klappe, Drehzahlregelung über FU/EC-Motor, Parallelbetrieb Ventilatoren)

## Weitere Bearbeitungsschritte

Die vorliegende Studie hat erstmalig die am Markt verfügbaren Abluftreinigungsanlagen für die Schweinehaltung unter Ansatz gleicher Randbedingungen im Hinblick auf den notwendigen Energieeinsatz geprüft. Dabei konnten aufgrund des Bearbeitungsumfanges nur erste Ansätze für die Optimierung des Betriebes abgeleitet werden. Für weitere Untersuchungen wird daher die Umsetzung folgender weiterer Arbeitsschritte empfohlen:

- Bewertung der verfügbaren Abluftreinigungsanlagen im Betriebsverhalten; hierzu fehlen derzeit maßgebliche Messdaten zum Verlauf des Druckverlustes, der Häufigkeit der Reinigung etc.
- Aufbau und die Validierung eines belastbaren Modells für den Energieeinsatz der Lüftung durch Aufnahme eines konkreten Verlaufs der Volumenströme in Abhängigkeit von Wachstumskurve und Außentemperatur bei paralleler Erfassung der Leistung (z. B. durch Messung, Auswertung Betriebstagebücher, ggf. Integration Lüfter in Betriebstagebuch Standort 2)
- Auswertung von Daten zum Konzentrationsverlauf für Ammoniak über das Jahr und Verifizierung max. mögliche Absenkung des Volumenstroms bei Zuluftkühlung zur Anpassung der Auslegung der Abluftreinigungsanlage
- Gesamtbetrachtung der klimatischen Auswirkung bei Reduzierung der Reinigungsströme, d. h. Bilanzierung CO<sub>2</sub>-Äquivalente zusätzlicher Ammoniakemission im Vergleich zur Minderung des Energieverbrauchs
- Ermittlung Einsparpotenziale durch sachgerechte Anpassung des Abluftvolumenstroms in Abhängigkeit der Luftschadstoffkonzentration im Stall. Diese Darstellung setzt den Einsatz von Sensoren zur Erfassung der Schadstoffkonzentration im Stall voraus.
- Einbeziehung weiterer Maßnahmen, um die Betriebskosten einer Abluftreinigungsanlage zu verringern (z. B. Reduzierung des Wasserverbrauchs, durch Aufbereitung des Umlaufwassers Reduzierung Wärmeverbrauch)

# Literatur

- AEL Heft 8 (1993): Stalllüftungsanlagen Planung, Berechnung, Installation, Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendungen in der Landwirtschaft e.V.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2006): Einsatz einer Kühldecke mit wasserdurchflossenen Wärmeleitprofilen zur Zuluftkühlung im Sauenstall
- BÜSCHER, W. (2006): Konzepte der Stallklima-Führung und technischen Ausführung, Baubriefe Landwirtschaft 40 Mast-schweinehaltung
- BÜSCHER, W. (2008): Heizenergieeinsparung in der Tierhaltung, KTBL-Schrift 463
- DIN18910-1 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, Beuth Verlag
- DLG (2002): Prüfbericht 5024, <http://www.dlg-test.de/pbdocs/5024.pdf>, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Abfrage 11/2013
- DLG (2003): DLG-Arbeitsunterlage Lüftung von Schweineställen, 3. überarbeitete Fassung. – Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
- 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 (2002): Prüfbericht 5075 Klimacomputer SC 2000, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Abfrage 09/2013
- DRÖSSLER, R. (2011): Kosten senken durch energieeffiziente Antriebstechnik -Neue wirtschaftliche und gesetzliche Rahmenbedingungen- Handeln Sie jetzt (Präsentation), Siemens AG
- European IPPC Bureau (2011): Reference Document on Best Available Techniques for the Intensive Rearing of Poultry and Pigs, Draft, 1. März 2011
- EU RL 2009/125/EG: RICHTLINIE 2009/125/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte
- EU VO 327/2011: VERORDNUNG (EU) Nr. 327/2011 DER KOMMISSION vom 30. März 2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW angetrieben werden
- EU VO 622/2009: VERORDNUNG (EU) Nr. 622/2012 DER KOMMISSION vom 11. Juli 2012 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 641/2009 in Bezug auf die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierten Nassläufer-Umwälzpumpen
- EU VO 640/2009: VERORDNUNG (EG) Nr. 640/2009 DER KOMMISSION vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren
- EU VO 641/2009: VERORDNUNG (EG) Nr. 641/2009 DER KOMMISSION zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierten Nassläufer-Umwälzpumpen vom 22. Juli 2009, zuletzt geändert am 11. Juli 2012
- HAHNE, J. (2011): Entwicklung der Abluftreinigung in der Tierhaltung in Deutschland, Landtechnik 66 (2011), no. 4, pp. 289-293
- HAHNE, J. (2010): Mehrstufige Abluftreinigung für die Geflügelhaltung, Landtechnik 65 (2010), no. 5, pp. 334-337
- HAHNE, J.; HARTUNG, E.; GRIMM, E. & DÖHLER, H. (2007): Abluftreinigung und weitere Möglichkeiten zur Minderung von Emissionen aus Schweinestallungen - Stand der Technik
- HANDEL, A. (2008): Energiesparende Systeme bei Lüftungsanlagen in der Landwirtschaft – Präsentation, Ziehl-Abegg AG
- JACKMAN, H. (2007): Fachveröffentlichung – Sinnvoller Einsatz energiesparender Ventilatoren, Günther AG & Co.KG, Fürstenfeldbruck
- KTBL (2006): Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen, Verfahren-Leistungen-Kosten, KTBL-Schrift 451, Darmstadt. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
- KTBL (2008): Energieeffiziente Landwirtschaft, KTBL-Vortragstagung vom 8.–9. April 2008 in Fulda, KTBL-Schrift 463, Darmstadt. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft

- KSB (2013): KSB Pumpenlexikon – Pumpenwirkungsgrade,  
[http://www.ksb.com/Kreiselpumpenlexikon\\_de/Pumpenlexikon/1562836/pumpenwirkungsgrad.html](http://www.ksb.com/Kreiselpumpenlexikon_de/Pumpenlexikon/1562836/pumpenwirkungsgrad.html), Abruf  
 11/2013
- LfULG (2014): Möglichkeiten der Kühlung im Schweinestall, Fachtag Bauen und Technik in Köllitsch, 12.03.2014, Vortrag Thomas Heidenreich
- MKULNV (2013): Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Tierhaltungsanlagen, Erlass vom 19.2.2013. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
- Niedersachsen (2013): Durchführung immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren; hier: Abluftreinigungsanlagen in Schweinehaltungsanlagen und Anlagen für Mastgeflügel sowie Bioaerosolproblematik in Schweine- und Geflügelhaltungsanlagen, Erlass vom 22.03.2013
- Niedersachsen (2013): Leitfaden zur Durchführung des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens für Schweinehaltungsanlagen, Gem. RdErl. d. MU, d. MS u. d. ML v. 22.03.2013
- SLK (2008): Ratgeber für Stallklimatisierung, Führung des Stallklimas in der Schweinehaltung, Eingrenzen und Beseitigen von Problemen im Stallklimabereich, Sächsisches Landeskuratorium Ländlicher Raum e. V. und Universität Halle-Wittenberg, Mai 2008
- TierSchNutzV (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
- UBA (2003): Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken der Intensivhaltung von Geflügel und Schweinen, mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung, Umweltbundesamt
- VDI 6014 (2008): VDI-Richtlinie 6014: Energieeinsparungen durch Einsatz drehzahlsteuerbarer Antriebe in der Technischen Gebäudeausrüstung, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik
- VOLZ, G. (2009): Effiziente elektrische Antriebe und Drehzahlsteuerung in der Technischen Gebäudeausrüstung – VDI 6014 und Initiative der EnergieEffizienz der dena – Vortrag bei der Gemeinschaftsveranstaltung des Württembergischen VDI und VDE am 19.10.2009
- VOLZ, G. (2010): Ratgeber „Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin
- VDI-Richtlinie 3471 (1986): Emissionsminderung - Schweine, ersetzt durch VDI-Richtlinie 3894 Bl. 1 und Bl. 2
- VDI-Richtlinie 3472 (1986): Emissionsminderung - Hühner, ersetzt durch VDI-Richtlinie 3894 Bl. 1 und B. 2
- VDI-Richtlinie 3473 Blatt 1 (1994): Emissionsminderung Tierhaltung - Rinder (Geruchsstoffe), ersetzt durch VDI-Richtlinie 3894 Bl. 1 und B. 2
- VDI-Richtlinie 3474 Blatt1E (2001): Emissionsminderung Tierhaltung Geruchsstoffe, ersetzt durch VDI-Richtlinie 3894 Bl. 1 und B. 2
- VDI-Richtlinie 3477 (2004): Biologische Abgasreinigung – Biofilter, November 2004
- VDI-Richtlinie 3894 Blatt 1 (2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Haltungsverfahren und Emissionen; Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde; September 2011
- 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

# Anhang 1: Maßgebliche Daten Abluftreinigungssystem aus DLG-Berichten

DLG-Nr.	Titel	Hersteller	Stufen	Reinigungsverfahren	Kapazität	Reinigungsleistung	Betriebs-hilfsmittel-einsatz	Ausle-gungsgrö-ße	Berieselungs-menge	Stromverbrauch	Referenzstall
5699	Abluftrei-nigungssystem für die Schweinehal-tung	Hagola Biofilter GmbH	1	Biofilter mit Sandwichschichtaufbau	-	<b>Ammoniak:</b> - <b>Staub:</b> > 90 % (94,3 %) <b>Geruch:</b> > 90 %; < 300 GE/m <sup>3</sup> (190/253 GE/m <sup>3</sup> ); (>300 GE/m <sup>3</sup> direkt nach Materialwechsel)	-	440 m <sup>3</sup> AL/m <sup>2</sup> Filterflä-che/h	Stufe 1: 5,5l/1.000 m <sup>3</sup> AL (Volumenstrom-gesteuert)	<b>Ventilatoren:</b> 0,18 kWh/1.000 m <sup>3</sup> Abluft zusätz-lich	250 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 32.000 m <sup>3</sup> /h
5702	Dorset-Rieselbettfilter	DORSET GREEN MACHINES B.V.	1	Biologische Wäsche im Rieselbettreaktor (keine pH-Regelung), biologischer Abbau in Waschwasservorlage Vorabscheidung grober Staubpartikel durch Vorbedüsung und 90°-Umlenkung Nachgeschaltete Tropfenabscheidung	8.000–500.000 m <sup>3</sup> /h	<b>Ammoniak:</b> > 90 % (98 %); < 1 ppm <b>Staub:</b> > 90 % (93,4 %) <b>Geruch:</b> <300 GE/m <sup>3</sup> (215 GE/m <sup>3</sup> ); Abbau > 70 %	-	2.000 m <sup>3</sup> AL/m <sup>2</sup> h	Stufe 1: 700–800 l/m <sup>2</sup> FF (konstant)	<b>Pumpe:</b> 36,5 kWh/d <b>Ventilatoren</b> (Mittelwert): 39,9 kWh/d	240 Ferkelplätze; 520 Mastplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 75.000 m <sup>3</sup> /h
5879	Biologic Clean Air Kombi-wäscher BCA 70/90	Devriecom b.v.	1	biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,5–6,8) Vorabscheidung grober Staubpartikel durch Vorbedüsung und 90°-Umlenkung Nachgeschaltete Tropfenabscheidung	-	<b>Ammoniak:</b> > 70 %; >90 % bei automatischer pH-Wert-Regelung und max. 20 mS/cm <b>Staub:</b> > 80 % (82,6 %) <b>Geruch:</b> > 70 %; < 300 GE/m <sup>3</sup> (178 GE/m <sup>3</sup> )	Schwefel-säure	1.870 m <sup>3</sup> AL/m <sup>3</sup> FK	Stufe 1: 0,4 l/(m <sup>3</sup> /h)	<b>Pumpe:</b> 85,9 kWh/d <b>Ventilatoren:</b> 54,6 kWh/d	1.080 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 103.750 m <sup>3</sup> /h
5880	Abluftrei-nigungsanlage "Chemo-wäscher (+)"	Uniqfill Air b.v.	2	<b>Stufe 1:</b> chemische Wäsche (pH < 4) an Lamellenwaschwand zur Abschei-dung von Staub und Ammoniak <b>Stufe 2:</b> Biologische Wasserwäsche in Rieselbettreaktor zur Geruchseliminie-rung Tropfenabscheider nach jeder Stufe	20.000–150.000 m <sup>3</sup> /h	<b>Ammoniak:</b> > 80 % (84 %); < 2,5 ppm <b>Staub:</b> > 90 % (96,4 %) <b>Geruch:</b> > 70 %; < 300 GE/m <sup>3</sup> (230 GE/m <sup>3</sup> )	Schwefel-säure	Stufe 1: 5.000 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h) Stufe 2: 5.000 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	Stufe 1: 1,5 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> *h) Stufe 2: 11,4 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> *h)	<b>Pumpe:</b> 21,6 kWh/d <b>Ventilatoren:</b> 62,7 kWh/d	64 Abferkelplät-ze, 400 Fer-kelaufzuchtplät-ze, 40 Jungsau-enplätze, 50; Abluftvolumen-strom gemäß DIN 18910: 30.000 m <sup>3</sup> /h

DLG-Nr.	Titel	Hersteller	Stufen	Reinigungsverfahren	Kapazität	Reinigungsleistung	Betriebs-hilfsmittel-einsatz	Ausle-gungsgrö-ße	Berieselungs-menge	Stromverbrauch	Referenzstall
5944	Zweistufige Abluftreini-gungsanlage	IUS-Innovative Umweltsys-teme	2	<b>Stufe 1:</b> biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,5–6,7) <b>Stufe 2:</b> Biofilter	-	<b>Ammoniak:</b> >90 % (91,2 %) ; < 3 ppm <b>Staub:</b> > 80 % (84 %) <b>Geruch:</b> >80 %; < 300 GE/m <sup>3</sup> (174 GE/m <sup>3</sup> )	Schwefel-säure	2.872 m <sup>3</sup> Abluft/(m <sup>2</sup> *h)	Stufe 1: 0,6 l/m <sup>3</sup> AL Stufe 2: min. 20,7 l/(m <sup>3</sup> h) (entspricht 0,005 l/m <sup>3</sup> AL)	<b>Pumpe:</b> 15,2 kWh/(Mastplatz und Jahr) <b>Ventilatoren</b> (inkl. Abluftreini-gungs-anlage): 47,7 kWh/(Mastplatz und Jahr)	1.000 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 85.000 m <sup>3</sup> /h
5954	BIO Flex 2-step	SKOV A/S	2	<b>Stufe 1:</b> biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,4–6,8) zur Abscheidung von Staub und Ammoniak <b>Stufe 2:</b> biologische Wäsche im Rieselbettreaktor zur Abscheidung von Staub und Ammoniak (keine pH-Wert-Regelung)	-	<b>Ammoniak:</b> >80 % (85,4 %) <b>Staub:</b> > 80 % (81,4 %) <b>Geruch:</b> -	Schwefel-säure	2.121 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	Stufe 1: 0,18 l/m <sup>3</sup> AL; 100s/170s Berieselung Stufe 2: 0,12 l/m <sup>3</sup> AL 65s/170s Berieselung	<b>Abluftreini-gungssystem:</b> 32,8 kWh/(Mastplatz und Jahr) <b>Ventilatoren:</b> < 28,6 kWh/(Mastplatz und Jahr)	180 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 22.900 m <sup>3</sup> /h
5955	BIO Flex 3-step	SKOV A/S	3	<b>Stufe 1:</b> biologisch-chemische Wäsche im Rieselbettreaktor (pH = 6,4 - 6,8) zur Abscheidung von Staub und Ammoniak <b>Stufe 2:</b> biologische Wäsche im Rieselbettreaktor zur Abscheidung von Staub und Ammoniak (keine pH-Wert-Regelung) <b>Stufe 3:</b> biologische Geruchseliminie-rung an unberieselter Füllkörperpackung	-	<b>Ammoniak:</b> > 80 % (89 %) <b>Staub:</b> > 90 % (93,3 %) <b>Geruch:</b> >70 %; <300 GE (107 GE/m <sup>3</sup> )	Schwefelsäu-re	2121 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	Stufe 1: 0,18 l/m <sup>3</sup> AL; 100s/170s Berieselung Stufe 2: 0,12 l/m <sup>3</sup> AL 65s/170s Berieselung	<b>Abluftreinigung:</b> 32,8 kWh/(Mastplatz und Jahr) <b>Ventilatoren:</b> 28,6 kWh/(Mastplatz und Jahr)	180 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 22.900 m <sup>3</sup> /h
5957	HelixX (klein)	Big Dutchman International GmbH	1	Chemische Wäsche (pH < 3) in paralle-len Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider	8.500–42.500 m <sup>3</sup> /h	<b>Ammoniak:</b> >80 % (86 %). Dauerhaft < 3 ppm <b>Staub:</b> > 80 % (88,6 %) <b>Geruch:</b> -	Schwefel-säure; evtl. Entschäumer		2 m <sup>3</sup> /h pro Modul	<b>Abluftreinigung:</b> 75,6 kWh/(Mastplatz und Jahr) <b>Ventilatoren</b> (Sommer): 96,6 kWh/(Mastplatz und Jahr)	180 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 17.000 m <sup>3</sup> /h
6051	HelixX (groß)	Big Dutchman Internatio-	1	Chemische Wäsche (pH < 3) in paralle-len Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider	17.500–87.500 m <sup>3</sup> /h	<b>Ammoniak:</b> > 80 % (87,5 %) <b>Staub:</b> > 80 % (85 %) <b>Geruch:</b> -	Schwefel-säure (96 %)		4 m <sup>3</sup> /h pro Modul	<b>Abluftreinigung:</b> 30 kWh/(Mastplatz und Jahr)	4.490 Ferkel (äq: 748 Tierplätze)

DLG-Nr.	Titel	Hersteller	Stufen	Reinigungsverfahren	Kapazität	Reinigungsleistung	Betriebs-hilfsmittel-einsatz	Ausle-gungsgrö-ße	Berieselungs-menge	Stromverbrauch	Referenzstall
6050	HelixX (groß)	Big Dutchman International GmbH; Anmelder: Reventa	1	Chemische Wäsche (pH < 3) in parallelen Sprühturm-Gaswäschern Tropfenabscheider	17.500–87.500 m³/h	<b>Ammoniak:</b> > 80 % (87,5 %) <b>Staub:</b> > 80 % (85 %) <b>Geruch:</b>	Schwefel-säure (96 %)		4 m³/h pro Modul	<b>Abluftreinigung:</b> 30 kWh/(Mastplatz und Jahr)	4.490 Ferkel (äq: 748 Tierplätze)
6098	Dreistufige Abluftreini-gungsanlage Kombi Luft-wäscher	KWB Airs Systems BV	3	<b>Stufe 1:</b> Vorbedüsung zur Staub-abscheidung an Waschwand (pH = 6,5–7) <b>Stufe 2:</b> biologisch-chemische Wäsche zur Ammoniakabscheidung (Rieselbett) <b>Stufe 3:</b> Biofilter zur Geruchseliminie-rung	-	<b>Ammoniak:</b> > 80 % (S: 83,4; W: 92,1) Dauerhaft < 5 ppm <b>Staub:</b> > 70 % (S:72,5; W:76) <b>Geruch:</b> teilweise > 300 GE/m³	Schwefel-säure (saiso-nal unter-schiedliche Konzentratio-nen)	6.216 m³ AL/m2 Filterflä-che/h	Stufe 1: 1,35 m³/(m2h) Stufe 2: 4,05 m³/(m2h) Stufe 3: 1,362 m³/(m2h)	<b>Abluftreinigung (Pumpen):</b> 90 kWh/d (61 kWh/(Mastplatz und Jahr) <b>Ventilatoren</b> Sommer/Winter 65/30 kWh/d	540 Tierplätze; Max Abluftvolu-menstrom: 46.000 m³/h



# Anhang 2: Herstellerangaben zu DLG-Abluftreinigungssystemen

Folgende Daten wurden zusätzlich zu den Angaben der DLG-Berichte abgefragt:

1. Wie verhält sich der Druckverlust des Wäschers in Abhängigkeit des Volumenstroms, der Filtertiefe (alternativ Widerstandszahl) und des Filteralters?
2. Nach welcher Größe wird der Rieselbettreaktor dimensioniert (Verweilzeit Abluft, Volumenbelastung)? Wird hierbei die Schadstofffracht berücksichtigt?
3. Welche Dimensionen (Anströmfläche, Filtertiefe) werden für die Auslegung variiert, welche sind vorgeben?
4. Wie groß ist die Berieselungsmenge bzw. wie wird diese ausgelegt?
5. Wird die Berieselungsmenge an den aktuellen Luftvolumenstrom angepasst (bzw. Sommer-/Winterbetrieb o. ä.)?
6. Erfolgt eine eventuelle Anpassung der Berieselungsmenge über die Pumpenlaufzeit oder eine Regelung der Fördermenge? Wenn letzteres, welche Art der Pumpenregelung wird eingesetzt?
7. Bei Einsatz eines Biofilters: Nach welcher Größe wird der Biofilter dimensioniert (Verweilzeit Abluft, Volumenbelastung)? Wird hierbei die Schadstofffracht berücksichtigt?
8. Welche Dimensionen (Anströmfläche, Filtertiefe) werden für die Auslegung variiert, welche sind vorgegeben?
9. Welche Aggregate werden eingesetzt (Datenblätter)?

Diese Daten konnten ermittelt werden:

**DLG-Nummer:** 5699

**Hersteller:** Hagola-Biofilter

**Ansprechpartner:** Norbert Harms; Tel.: 05442 8047916; E-Mail: nharms@hagola-biofilter.de

**Stromverbrauch für Pumpen:** keine Pumpe im Einsatz; Berieselung über Leitungsdruck

**Berieselungsmenge:** Keine Angabe

**Filterauslegung:** Keine Angabe

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Es kann keine Widerstandszahl für die Druckverlustberechnung angegeben werden, weil der Druckverlust zwar im direkten Zusammenhang mit dem Volumenstrom steht, die Druckverlusterrhöhung bei steigendem Volumenstrom aber abnimmt.

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Im Laufe eines Jahres stellt sich nach dem Holzwechsel und der ersten ausreichenden Durchfeuchtung der Filterschicht ein Gegendruck unterhalb des Filters ein, der sich dann nur noch in Abhängigkeit des Volumenstroms ändert. In der Vergangenheit gab es Anlagen, bei denen der Materialwechsel nicht regelmäßig vorgenommen wurde. Hier stieg der Druckverlust auf 200 Pa an.

**$\Delta p_{max}$ :** Keine Angabe

**$\Delta p_{med}$ :** 75 Pa

**$\Delta p_{min}$ :** Keine Angabe

**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe

**Bemerkung:** -

**DLG-Nummer: 5702****Hersteller:** DORSET GREEN MACHINES B.V.**Ansprechpartner:** G. Groot Wassink, E-Mail: g.grootwassink@dorset.nu**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe**Berieselungsmenge:** 750 l/m<sup>2</sup> Filterfläche; keine Variation zulässig**Filterauslegung:** Keine Angabe**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Veränderung im Normalbetrieb, weil eine vertikale Durchströmung vorliegt und Füllkörper mit relativ großen Porenvolumina eingesetzt werden, sodass Verschmutzungen permanent ausgespült werden.**Δp<sub>max</sub>:** 30 Pa**Δp<sub>med</sub>:** 30 Pa**Δp<sub>min</sub>:** Keine Angabe**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe**Bemerkung:** -**DLG-Nummer: 5879****Hersteller:** Devriecom b.v.**Ansprechpartner:** L. Dekker, Tel.: 01755969240, E-Mail: l.dekker@devrie.com**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe**Berieselungsmenge:** 0,4 l/m<sup>3</sup>; Anpassung per FU an aktuellen Luftdurchsatz; maximal Reduktion um 40 %, bei weiterer Reduzierung wird die Förderhöhe der Pumpe zu gering**Filterauslegung:** Stellgröße Filterfläche, konstante Filtertiefe 1,2 m; Auslegungsparameter: 2.250 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Angabe**Δp<sub>max</sub>:** 25 Pa (nach 4 Jahren Betrieb ohne Reinigung gemessen)**Δp<sub>med</sub>:** Keine Angabe**Δp<sub>min</sub>:** 23,2 (11 pa/m für Filterpaket und 10 Pa für Tropfenabscheider; jeweils bei Volllast)**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe**Bemerkung:** Zugunsten eines niedrigen Druckverlustes werden durchlässige Füllkörper eingesetzt und ein größerer Flächenbedarf in Kauf genommen.**DLG-Nummer: 5880****Hersteller:** Uniqfill Air b.v.**Ansprechpartner:** Roland Tapken, Tel.: 054348069806, E-Mail: Roland.tapken@ewetel.net**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe**Berieselungsmenge:** in der Chemo-Stufe: 1,5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h; in der Wasserstufe: 11,4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h; keine Variation zulässig**Filterauslegung:** Modulbauweise: 15.000 m<sup>3</sup>/h und 2 m<sup>2</sup> Anströmfläche pro Modul**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:****Δp<sub>max</sub>:** 90 Pa (Wert aus DLG-Berichten telefonisch bestätigt)**Δp<sub>med</sub>:** 40–60 Pa**Δp<sub>min</sub>:** 5–9 Pa nach Reinigung**Eingesetzte Aggregate:** Pumpe LOWARA SA(E) 40/125/15; Nennleistung 1,5 kW; Nennwirkungsgrad 66 %**Bemerkung:** Bei der Auslegung spielt die Volumenbelastung eine große Rolle, denn bei sog. Unterflur Absaugung erhöht sich die Filterbelastung mind. 15–20 %, entsprechend muss der Wäscher dann größer geplant werden! Sollte der Hersteller Einfluss auf die Lüftungsplanung nehmen können (und das tut er zu 80 %), dann wird keine Unterflur-Absaugung empfohlen.Zukünftig wird die zweite Stufe vergrößert auf 3,375 m<sup>2</sup>, um mehr Verweilzeit für den Geruchsabbau zur Verfügung zu stellen.

**DLG-Nummer: 5944**

**Hersteller:** IUS-Innovative Umweltsysteme (ehemals Dr. Siemers Umwelttechnik GmbH)

**Ansprechpartner:** Dr. Joergen Haneke, Tel.: 04496925282 , E-Mail: j.haneke@ius-markhausen.de

**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe

**Berieselungsmenge:** Keine Angabe; keine Anpassung an Volumenstrom zulässig. Im Winter hat man zwar geringe Volumenströme, aber auch höhere Konzentrationen. Insbesondere bei Einsatz eines nachgeschalteten Biofilters wäre, bei geringer Berieselung, die chemische Bindung von bspw. Ammoniak in der ersten Stufe – bei gleichem pH – verschlechtert; für die Lebensdauer der Biofilter also unzweckmäßig.

**Filterauslegung:** Filterfläche, konstante Filtertiefe 0,5 m und 0,6 m

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Angabe

**$\Delta p_{max}$ :** 60 Pa (Alarmmeldung)

**$\Delta p_{med}$ :** 50 Pa bei max. Volumenstrom

**$\Delta p_{min}$ :** Keine Angabe

**Eingesetzte Aggregate:** Pumpe; Nennleistung 1,5 kW; Nennwirkungsgrad 66 %

**Bemerkung:** Es wird empfohlen, die Filterfläche zugunsten der Reinigungsleistung erst bei Erreichen des Alarmdruckverlustes zu reinigen.

**DLG-Nummer: 5954**

**Hersteller:** SKOV A/S

**Ansprechpartner:** Michael Taecker, Tel.: 004572175624, E-Mail: mt@skov.com

**Stromverbrauch für Pumpe:** Keine Angabe

**Berieselungsmenge:** Keine Angabe

**Filterauslegung:** Keine Angabe

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Angabe

**$\Delta p_{max}$ :** 45 Pa

**$\Delta p_{med}$ :** Keine Angabe

**$\Delta p_{min}$ :** 15 Pa

**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe

**Bemerkung:** -

**DLG-Nummer: 5955**

**Hersteller:** SKOV A/S

**Ansprechpartner:** Michael Taecker, Tel.: 004572175624, E-Mail: mt@skov.com

**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe

**Berieselungsmenge:** Keine Angabe

**Filterauslegung:** Keine Angabe

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Angabe

**$\Delta p_{max}$ :** 70 Pa

**$\Delta p_{med}$ :** Keine Angabe

**$\Delta p_{min}$ :** 25 Pa

**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe

**Bemerkung:** -

**DLG-Nummer: 5957**

**Hersteller:** Big Dutchman International GmbH

**Ansprechpartner:** Sven Künnen, Tel.: 044478014807, E-Mail: skuennen@bigdutchman.de

**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe

**Berieselungsmenge:** 2 m<sup>3</sup>/h/Modul; kontinuierlich

**Filterauslegung:** Kein Filter im Einsatz; Aufbau als Waschturmmodule mit einem Durchmesser von 0,5 m<sup>2</sup> für jeweils maximal 8.500 m<sup>3</sup>/h

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Veränderung. Der Tropfenabscheider wird regelmäßig automatisch abgereinigt (ca. 2 min/d).

**Δp<sub>max</sub>:** 60 Pa

**Δp<sub>med</sub>:** 60 Pa

**Δp<sub>min</sub>:** 60 Pa

**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe

**Bemerkung:** siehe Anlage Nr. 6050/6051

**DLG-Nummer: 6050/6051 (Alle Informationen von Big Dutchman International GmbH)**

**Hersteller:** Big Dutchman International GmbH

**Ansprechpartner:** Sven Künnen, Tel.: 044478014807, E-Mail: skuennen@bigdutchman.de

**Stromverbrauch für Pumpen:** Keine Angabe

**Berieselungsmenge:** 4 m<sup>3</sup>/h/Modul; kontinuierlich; Anpassung an Abluftvolumenstrom über Anzahl betriebener Module

**Filterauslegung:** Kein Filter im Einsatz; Aufbau als Waschturmmodule mit einem Durchmesser von 0,9 m<sup>2</sup> für jeweils maximal 17.500 m<sup>3</sup>/h

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Veränderung. Der Tropfenabscheider wird regelmäßig automatisch abgereinigt (ca. 2 min/d).

**Δp<sub>max</sub>:** 60 Pa

**Δp<sub>med</sub>:** 60 Pa

**Δp<sub>min</sub>:** 60 Pa

**Eingesetzte Aggregate:** Pumpe ARBO; Nennleistung 11 kW

Ventilator Ziehl Abegg FE 091; Nennwirkungsgrad ca. 45 %

**Bemerkung:** Die Abluftreinigung ist direkt mit dem Modul gekoppelt. Je nach erforderlichem Volumenstrom werden ein oder mehrere Module eingesetzt, sodass jeweils in 17.500 m<sup>3</sup>-Schritten ein Modul hinzukommt. Es wird insgesamt eine Pumpe eingesetzt. Die eine Pumpe für die Bedüsung wird mittels FU geregelt, sodass immer min. 4,5 bar vorliegen, unabhängig davon, wie viele Module in Betrieb sind.

Maximale Anlagengröße: 5 Module;

In einer nachträglichen E-Mail wurden die folgenden Daten mitgeteilt:

Leistungsaufnahme der kleinen Helixx: 6.804 kWh/a

Leistungsaufnahme der großen Helixx: 30 kWh pro Mastplatz

Druckverlust der Abluftreinigung: 100 Pa

Diese Daten konnten aufgrund der späten Zusendung nicht mehr für die Studie berücksichtigt werden.

**DLG-Nummer: 6098**

**Hersteller:** KWB Airs Systems BV

**Ansprechpartner:** Sabine Schulze-Everding, Tel.: 02568935544, E-Mail: schulze-everding@inotec-systems.com

**Stromverbrauch für Pumpen:**

Anlagengröße 75.000 m<sup>3</sup>/h: 1,7 kW

Anlagengröße 90.000 m<sup>3</sup>/h: 2,7 kW

Anlagengröße 180.000 m<sup>3</sup>/h: 5,2 kW

**Berieselungsmenge:**

Anlagengröße 75.000 m<sup>3</sup>/h: 15–35 m<sup>3</sup>/h

Anlagengröße 180.000 m<sup>3</sup>/h: 20–30 m<sup>3</sup>/h

Anlagengröße 180.000 m<sup>3</sup>/h: 40–60 m<sup>3</sup>/h

(Für die Berechnung wurden die jeweiligen Mittelwerte verwendet)

**Filterauslegung:** Stellgröße: Filterfläche; konstante Filtertiefe Stufe 1: 0,5, Stufe 2: 0,15 m; Auslegungsparameter Filterflächenbelastung= 6.200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h

**Widerstandzahl(en) der Abluftreinigungsanlage:** Keine Angabe

**Veränderung des Druckverlustes im zeitlichen Verlauf:** Keine Angabe

**Δpmax:** 90 Pa

**Δpmed:** 40–45 Pa

**Δpmin:** Keine Angabe

**Eingesetzte Aggregate:** Keine Angabe

**Bemerkung:** Große Unterschiede bzgl. der Berieselungsmenge zwischen DLG-Bericht und Herstellerangaben. Ursache konnte auf Nachfrage nicht genannt werden.

# Anhang 3: Systemvergleich – Eingangsgrößen

**Tabelle 29: Eingangsgrößen Berechnung Leistungsaufnahme Ventilator**

DLG-Nr.	Hersteller	Druckverlust bei max. Volumenstrom in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad*			Auslegungsgröße Anströmfläche	Bemerkung
		Max.	Min.	Med.		
5699	Hagola Biofilter GmbH	n.b.	n.b.	75 Pa	4,84 m <sup>2</sup> /Modul und 2.130 m <sup>3</sup> /h/Modul	Der Grenzdruckverlust, bei dem eine Alarmmeldung ausgelöst wird, liegt bei 180 Pa. Dieser wird bei empfohlenem jährlichem Austausch nicht erreicht.
5702	DORSET GREEN MACHINES B.V.	n.b.	30 Pa	30 Pa	2.000 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	bis 80 Pa Druckverlust gemäß DLG Prüfbericht
5879	Devriecom b.v.	25 Pa	23,2 Pa	24,1 Pa	2.250 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	-
5880	Uniqfill Air b.v.	90 Pa	7 Pa	50 Pa	3 m <sup>2</sup> /Modul und 15.000 m <sup>3</sup> /h/Modul	Der Grenzdruckverlust, bei dem eine Alarmmeldung ausgelöst wird, liegt bei 90 Pa. Dieser wird bei empfohlenem Reinigungszyklus nicht erreicht. Herstellerangaben: Druckverlust bei Sommerluft rate nach Reinigung: 5–9 Pa; Mittlerer Druckverlust bei Sommerluft rate: 40–60 Pa.
5944	Dr. Siemens Umwelttechnik GmbH / IUS	60 Pa	n.b.	50 Pa	2.872 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	Der Grenzdruckverlust, bei dem eine Alarmmeldung ausgelöst wird, liegt bei 70 Pa. Dieser wird bei empfohlenem Reinigungszyklus nicht erreicht.
5954	SKOV A/S	45 Pa	15 Pa	30 Pa	2.121 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	
5955	SKOV A/S	70 Pa	25 Pa	47,5 Pa	2.121 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	-
5957	Big Dutchman International GmbH	60 Pa	60 Pa	60 Pa	0,53 m <sup>2</sup> /Modul und 8.500 m <sup>3</sup> /h/Modul	Sprüh turmwäscher mit automatischer Abreinigung des Tropfenabscheiders, daher keine Zunahme des Druckverlustes durch Verschmutzung (Herstelleran gabe)
6050	Reventa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG	60 Pa	60 Pa	60 Pa	0,93 m <sup>2</sup> /Modul und 17.500 m <sup>3</sup> /h/Modul	System analog DLG-Prüfbericht 6051 Sprüh turmwäscher mit automatischer Abreinigung des Tropfenabscheiders, daher keine Zunahme des Druckverlustes durch Verschmutzung (Herstelleran gabe)
6051	Big Dutchman International GmbH	60 Pa	60 Pa	60 Pa	0,93 m <sup>2</sup> /Modul und 17.500 m <sup>3</sup> /h/Modul	Sprüh turmwäscher mit automatischer Abreinigung des Tropfenabscheiders, daher keine Zunahme des Druckverlustes durch Verschmutzung (Herstelleran gabe)
6098	KWB Airs Systems BV	90 Pa	n.b.	45 Pa	6.200 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)	Maximaler Druckverlust ist der maximale im Rahmen der DLG-Prüfung gemessene Druckverlust.

n. b.: nicht bekannt bzw. Daten konnten nicht ermittelt werden

\*: der maximale Volumenstrom entspricht dem Volumenstrom zur Anlagenauslegung. Er wird mit der maximalen Sommerluft rate gleichgesetzt

Min: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für minimale Verschmutzung

Med: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für mittlere Verschmutzung

Max: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für maximale Verschmutzung

**Tabelle 30: Eingangsdaten Berechnung Pumpenverbrauch**

DLG-Nr.	Bezugsgröße für Fördermenge	Spezifische Fördermenge	Referenzverbrauch Pumpe pro m <sup>3</sup> Waschflüssigkeit	Bemerkung
5699	-	-	-	Keine Pumpe im Einsatz
5702	Anströmfläche	0,84 m <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> h)	0,0842 kWh/m <sup>3</sup>	Konstante Berieselungsrate
5879	Aktuelle Lufrate	0,4 l/m <sup>3</sup>	0,1059 kWh/m <sup>3</sup>	Pumpe wird per FU in Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms bis auf 80 % der Förderleistung (entspricht 40 Hz) geregelt (Herstellerangabe). Der Referenzverbrauch ist berechnet aus der durchschnittlichen Leistungsaufnahme im Zeitraum 29.07.–18.11. und dem maximalen gemäß DLG-Prüfbericht. Weil der maximale Volumenstrom und damit die maximale Berieselungsrate angesetzt wurde, ist dieser Wert als Abschätzung nach unten zu verstehen. Im Winterbetrieb wird aufgrund der FU-Regelung der Pumpe ein spezifischer Verbrauch von 50 % im Vergleich zum Sommerbetrieb angenommen.
5880	Anzahl Module	7,38 m <sup>3</sup> /h/Modul	0,1059 kWh/m <sup>3</sup>	Pumpe arbeitet im Intervallbetrieb mit min. 15 min/h.
5944	Auslegungsablufrate	0,6 l/m <sup>3</sup>	0,0258 kWh/m <sup>3</sup>	
5954	Auslegungsablufrate	0,3 l/m <sup>3</sup>	0,0981 kWh/m <sup>3</sup>	
5955	Auslegungsablufrate	0,3 l/m <sup>3</sup>	0,0981 kWh/m <sup>3</sup>	Verbrauch inkl. elektrische Beheizung der Waschflüssigkeit
5957	Anzahl betriebener Module	2 m <sup>3</sup> /h/Modul	0,517 kWh/m <sup>3</sup>	Pumpe wird per FU geregelt, sodass immer ein Druck von 4,5 bar erreicht wird. Wert für Referenzverbrauch wurde berechnet aus 75,6 kWh/(Mastplatz * a) (Angabe DLG-Prüfbericht) und 180 Mastplätzen und 2 Helixmodulen (Referenzanlage DLG-Prüfbericht) unter der Annahme, dass im Durchschnitt 1,5 Module während der Messung betrieben wurden.
6050	Anzahl betriebener Module	4 m <sup>3</sup> /h/Modul	0,5803 kWh/m <sup>3</sup>	System analog DLG-Prüfbericht 6051
6051	Anzahl betriebener Module	4 m <sup>3</sup> /h/Modul	0,5803 kWh/m <sup>3</sup>	Pumpe wird per FU geregelt, sodass immer ein Druck von 4,5 bar erreicht wird. Aus DLG-Prüfberichten gehen die realen Verbrauchswerte nicht eindeutig hervor. Es wurden folgende Eingangsgrößen verwendet (alle Angaben aus DLG-Bericht): 61.000 kWh/a bei Betrieb von 3 Modulen. Aufgrund des hohen Verbrauchs wird davon ausgegangen, dass sich die Leistungsangabe auf 3 parallel betriebene Module bezieht.
6098	Auslegungsablufrate	1,13 l/m <sup>3</sup>	0,068 bzw. 0,09 kWh/m <sup>3</sup>	Referenzverbrauch aus Herstellerangaben für verschiedene Baugrößen berechnet

# Anhang 4: Systemvergleich – Berechnungsergebnisse zusätzliche Leistungsaufnahme Ventilator und Pumpe

Tabelle 31: Leistungsberechnung Ventilator Ergebnisse in Watt/Tierplatz

DLG-Nr.	Referenzanlage 1 (1 Stallgebäude)						Referenzanlage 2 (1 Stallgebäude)					
	Leistungsaufnahme Sommerbetrieb			Leistungsaufnahme Winterbetrieb			Leistungsaufnahme Sommerbetrieb			Leistungsaufnahme Winterbetrieb		
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med
5699	n.b.	n.b.	5,8	n.b.	n.b.	0,0058	n.b.	n.b.	5,8	n.b.	n.b.	0,0058
5702	n.b.	2,3	2,3	n.b.	0,0023	0,0023	n.b.	2,3	2,3	n.b.	0,0023	0,0023
5879	1,8	1,9	1,9	0,0018	0,0019	0,0019	1,8	1,9	1,9	0,0018	0,0019	0,0019
5880	0,5	7,0	3,9	0,0005	0,0070	0,0039	0,5	7,0	3,9	0,0005	0,0070	0,0039
5944	n.b.	4,7	3,9	n.b.	0,0047	0,0039	n.b.	4,7	3,9	n.b.	0,0047	0,0039
5954	1,2	3,5	2,3	0,0012	0,0035	0,0023	1,2	3,5	2,3	0,0012	0,0035	0,0023
5955	1,9	5,4	3,7	0,0019	0,0054	0,0037	1,9	5,4	3,7	0,0019	0,0054	0,0037
5957	4,6	4,6	4,6	0,37	0,37	0,37	4,58	4,58	4,58	0,35	0,35	0,35
6051	4,4	4,4	4,4	0,087	0,087	0,087	4,5	4,5	4,5	0,24	0,24	0,24
6050	4,4	4,4	4,4	0,087	0,087	0,087	4,5	4,5	4,5	0,24	0,24	0,24
6098	n.b.	7,0	3,5	n.b.	0,007	0,0035	n.b.	7,0	3,5	n.b.	0,007	0,0035

n. b.: nicht bekannt bzw. Daten konnten nicht ermittelt werden

Min: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für minimale Verschmutzung

Med: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für mittlere Verschmutzung

Max: Leistungsaufnahme bei Widerstandszahl für maximale Verschmutzung



**Tabelle 32: Leistungsberechnung Pumpe Ergebnisse pro Tierplatz**

DLG-Nr.	Referenzanlage 1 (1 Stallgebäude)				Referenzanlage 2 (1 Stallgebäude)			
	Sommerbetrieb		Winterbetrieb		Sommerbetrieb		Winterbetrieb	
	Berieselungsmenge	Leistungsaufnahme	Berieselungsmenge	Leistungsaufnahme	Berieselungsmenge	Leistungsaufnahme	Berieselungsmenge	Leistungsaufnahme
5699	0 l/(h*TP)	0 W/TP	0 l/(h*TP)	0 W/TP	0 l/(h*TP)	0 W/TP	0 l/(h*TP)	0 W/TP
5702	52,9 l/(h* TP)	4,5 W/TP	52,9 l/(h*TP)	4,5 W/TP	52,9 l/(h*TP)	4,5 W/TP	52,9 l/(h*TP)	4,5 W/TP
5879	50,4 l/(h* TP)	5,3 W/TP	40,3 l/(h*TP)	2,1 W/TP	50,4 l/(h*TP)	5,3 W/TP	40,3 l/(h*TP)	2,1 W/TP
5880	73,8 l/(h* TP)	4,5 W/ TP	73,8 l/(h*TP)	4,5 W/TP	66,4 l/(h*TP)	4,1 W/TP	66,4 l/(h*TP)	4,1 W/TP
5944	75,6 l/(h* TP)	2,0 W/TP	75,6 l/(h*TP)	2,0 W/TP	75,6 l/(h*TP)	2,0 W/TP	75,6 l/(h*TP)	2,0 W/TP
5954	37,8 l/(h* TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP
5955	37,8 l/(h* TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP	37,8 l/(h*TP)	3,7 W/TP
5957	30,0 l/(h* TP)	15,5 W/TP	3,3 l/(h*TP)	1,7 W/TP	30,0 l/(h*TP)	15,5 W/TP	4,0 l/(h*TP)	2,1 W/TP
6051	33,3 l/(h* TP)	19,3 W/TP	6,7 l/(h*TP)	3,9 W/TP	32,0 l/(h*TP)	18,6 W/TP	4,0 l/(h*TP)	2,3 W/TP
6050	33,3 l/(h* TP)	19,3 W/TP	6,7 l/(h*TP)	3,9 W/TP	32,0 l/(h*TP)	18,6 W/TP	4,0 l/(h*TP)	2,3 W/TP
6098	41,6 l/(h* TP)	2,8 W/TP	41,6 l/(h*TP)	2,8 W/TP	41,6 l/(h*TP)	3,7 W/TP	41,6 l/(h*TP)	3,7 W/TP

# Anhang 5: Abschätzung Stromverbrauch Abluftreinigungsanlagen (Einzelkomponenten) und Vergleich mit DLG-Prüfberichten

Tabelle 33: Daten Energieverbrauch DLG-Prüfberichte, Berechnungsgrundlagen und Abweichungen zu vorliegenden Rechnungen

DLG-Nr.	Hersteller	Angaben DLG-Prüfbericht		DLG-Prüfbericht	Rechnung auf Basis DLG-Prüfbericht		DLG-Prüfberichte		Herstellerangaben 2013	Eigene Berechnung		DLG-Prüfbericht	Eigene Berechnung	
		Pumpen	Ventilatoren	Randbedingungen	Pumpen	Ventilatoren für Stall und ARA	Stall	ARA	ARA mittl. Verschmutzung	Pumpen	Ventilator	Summe Abluftreinigung	Summe Abluftreinigung	Abweichung
					[kWh/(MP*a)]	[kWh/(MP*a)]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[kWh/(MP*a)]	[kWh/(MP*a)]	[kWh/(MP*a)]	[kWh/(MP*a)]	[%]
5699	Hagola Biofilter GmbH	0	0,18 kWh/1.000 m³	250 Schweinemastplätze, Max.luftrate 20.000m³/h	0	63	50	110	75	0	26	43	26	170
5702	DORSET GREEN	37 kWh/d	40 kWh/d	ca. 600 Plätze, Max.luftrate 42.500m³/h	22	24	70	80	30	39	10	35	49	71
5879	Devriecom b.v.	86 kWh/d	55 kWh/d	1100 Schweinemastplätze, Max.luftrate 85.000 m³/h	29	18	50	20	24	35	8	34	43	78
5880	Uniqfill Air b.v.	22 kWh/d	63 kWh/d	ca. 600 Plätze, Max.luftrate 30.000 m³/h	13	38	110	150	50	39	17	35	56	63
5944	Dr. Siemers	15 kWh/(MP*a)	48 kWh/(MP*a)	1.000 Mastplätze, Luftrate 85.000 m³/h	15	48	55	65	50	17	17	41	34	121
5954	SKOV A/S	32 kWh/(MP*a)	29 kWh/(MP*a)	180 Mastplätze, Luftrate 21.000 m³/h	32	29	95	45	30	32	10	41	43	97
5955	SKOV A/S	33 kWh/(MP*a)	29 kWh/(MP*a)	180 Mastplätze, Luftrate 21.000 m³/h	33	29	30	70	47,5	32	16	53	49	109
5957	Big Dutchman	75,6 kWh/(MP*a)	96,6 kWh/(MP*a)	180 Mastplätze Luftrate 17.000 m³/h	76	96,6	140 gesamt	k.A.	60	76	22	117	97	121
6051	Big Dutchman	61.000 kWh/a	22 kWh/(MP*a)	748 Mastplätze 17.500 m³/h	82	22	100 gesamt	k.A.	60	102	20	95	122	78
6050	Reventa	61000 kWh/a	22 kWh/(MP*a)	748 Mastplätze 17.500 m³/h	82	22	100 gesamt	k.A.	60	102	20	95	122	78%
6098	KWB Airs Systems BV	61 kWh/(MP*a)	44/21 kWh/(MP*a)	550 Mastplätze, 31000 m³/h	61	35	60	90	45	25	15	82	40	203%

# Anhang 6: Jahresgang Temperaturverlauf Station Chemnitz

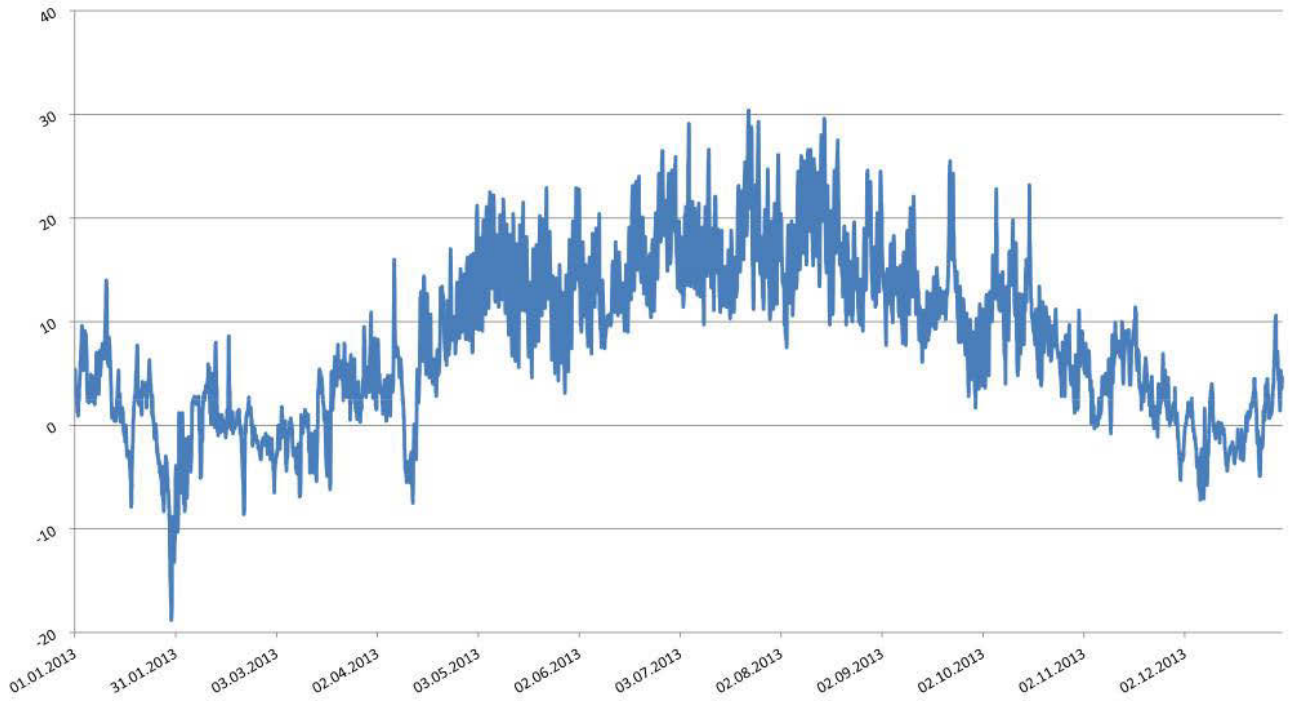


Abbildung 26: Jahresgang Außenlufttemperatur Station Chemnitz

# Anhang 7: Energieverbrauch Luftführung

Der Aufbau der Luftführung bestimmt den entstehenden Druckverlust. Dieser ist durch den bzw. die Ventilatoren aufzubringen. Ein höherer Druckverlust geht mit einem höheren Energieverbrauch einher.

Zur Beurteilung der Luftführung wurde ein Modell mit fünf einzelnen Stallbereichen angenommen, die über eine zentrale Ablufführung gemeinsam abgesaugt werden. Jeder Stallbereich wird mit einer Luftmenge von 20.000 m<sup>3</sup>/h beaufschlagt. Die gesamte Abluftmenge beträgt demnach 100.000 m<sup>3</sup>/h.



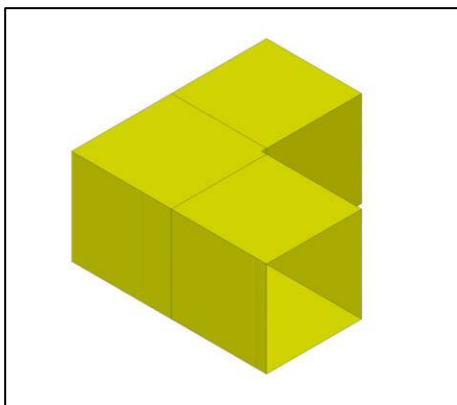
**Abbildung 27: Modell zur Luftführung**

Für die Beurteilung wurde die Kanalgröße und damit einhergehend die Luftgeschwindigkeit variiert. Daraus ergeben sich verschiedene Druckverluste, die in Tabelle 34 dargestellt sind.

**Tabelle 34: Druckverlust über Abluftkanal**

Max. Luftgeschwindigkeit im Kanal [m/s]	Kanalabmessungen [m x m]	Druckverlust über Abluftkanal [Pa]
3,1	3 x 3	10
3,7	2,75 x 2,75	12
4,4	2,5 x 2,5	15
5,5	2,25 x 2,25	21
7,1	2,25 x 1,75	31

Der Druckverlust nimmt, wie zu erwarten, mit steigender Luftgeschwindigkeit zu. Eine geradlinige Verlegung des Abluftkanals ist wünschenswert, aber nicht immer auf Grund baulicher Gegebenheiten möglich. Eine notwendige Luftumlenkung wird im Allgemeinen als Kniekanal ausgeführt werden. Für eine rechtwinklige Umlenkung, wie sie in Abbildung 28 dargestellt ist, wird der damit verbundene Druckverlust in Tabelle 35 aufgeführt.



**Abbildung 28: Darstellung Luftumlenkung (Kniekanal)**

**Tabelle 35: Druckverlust über Umlenkung (Kniekanal)**

Max. Luftgeschwindigkeit im Kanal [m/s]	Kanalabmessungen [m x m]	Druckverlust über Kniekanal [Pa]
3,1	3 x 3	7
3,7	2,75 x 2,75	10
4,4	2,5 x 2,5	15
5,5	2,25 x 2,25	22
7,1	2,25 x 1,75	44

Bemerkenswert dabei ist, dass der Druckverlust über eine einzige Luftumlenkung ähnlich große Druckverlustwerte aufweist wie der geradlinige Abluftkanal insgesamt. Im AEL-Heft 8 (1993) werden leicht höhere Werte für die Druckverluste angeführt. Die höheren Werte werden durch eine flache Kanalform, die Höhe ist nur halb so groß wie die Breite, verursacht.

**Tabelle 36: Druckverlust über Umlenkung – Literaturwerte: AEL-Heft 8 (1993)**

Max. Luftgeschwindigkeit im Kanal [m/s]	Druckverlust über Kniekanal [Pa]
2,5	6
5,0	23
7,5	51

Die bisherige Betrachtung wurde allein mit dem Abluftkanal durchgeführt. Die Kanalführung der zuzuführenden Zuluft ist auf die gleiche Art und Weise zu berücksichtigen.

**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:**

Anja Köhler, Doris Grahn, Falk Rebbe, Jan Berthold, Manuel Vollmer  
Umweltmanagement und Energietechnik  
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 Straße 3a, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-5216  
Telefax: +49 351 2612-5299  
E-Mail: michael.lohberger@smul.sachsen.de

**Fotos:**

René Pommer (Titel)  
GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH

**Redaktionsschluss:**

10.04.2014

**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 zugunsten 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.