

Forschungsbericht

Nr. 182

Verfahrenstechnische Bewertung konkurrierender Lösungen zur Nutzung regenerativer Energie zum Heizen und Kühlen von Stallanlagen

Verfasser:

Prof. Dr. agr. W. Büscher

Dipl.-Ing. agr. H. Licharz

Institut für Landtechnik

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standort-gerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, September, 2015

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. agr. Wolfgang Büscher

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. agr. Hannah Licharz

Institut für Landtechnik
Nussallee 5
53115 Bonn

Zitiervorschlag:

BÜSCHER, W.; H., LICHARZ (2015): Verfahrenstechnische Bewertung konkurrierender Lösungen zur Nutzung regenerativer Energie zum Heizen und Kühlen von Stallanlagen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 182, 127 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole.....	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm	3
2 Literaturanalyse	6
2.1 Wärmebilanzierung als Grundlage der energetischen Stallplanung.....	6
2.2 Einsatz von Wärmedämmung.....	8
2.2.1 Dämmstoffgruppen.....	8
2.2.2 Dämmstoffformen	11
2.2.3 Physikalische Größen	12
Wärmeleitfähigkeit λ	12
Rohdichte ρ	12
Wärmespeicherkapazität c	13
Baustoffklassen.....	13
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	14
Druckbelastbarkeit.....	14
U-Wert.....	15
2.2.4 Art und Auswirkung von Feuchtigkeitsaufnahme von Dämmstoffen.....	16
2.2.5 Schutzmaßnahmen zur Verhütung von Feuchtigkeitsschäden an Dämmstoffen	17
2.2.6 Ungeziefer und Nagetierbefall.....	18
2.3 Stallwandaufbauten	20
2.3.1 Dach- und Deckenkonstruktionen, Fenster und Türen.....	22
2.4 Wärmerückgewinnung.....	23

2.4.1	Einsatz von Wärmerückgewinnungsverfahren in der Tierhaltung	26
2.5	Regenerative Heiz- und Kühltechnologien	29
2.5.1	Zuluftkonditionierung bei Tierställen mittels Erdwärmetauscher.....	30
2.5.2	Heizen von Tierställen mittels Wärmepumpe	34
3	Material und Methoden	39
3.1	Wärmerückgewinnung.....	39
3.1.1	Der rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher.....	39
	Vorstellung der Stallanlage	39
	Vorstellung der Messtechnik und des Untersuchungszeitraumes	40
3.2	Regenerative Heiz- und Kühltechnologien	41
3.2.1	Unterflurzuluftführung in der Schweinehaltung.....	41
	Vorstellung der Stallanlage	41
	Vorstellung der Messtechnik und Untersuchungszeitraum	42
	Untersuchungszeitraum	43
3.2.2	Einsatz einer Grundwasser-Wärmepumpe	44
	Abferkelstall	44
	Ferkelaufzuchtstall.....	44
	Untersuchungszeitraum	45
	Erfassung der Wärmemenge.....	45
	Dokumentation der Wasser-, Strom- und Gasverbräuche	46
	Aufzeichnungen durch die Wärmepumpen-Software	46
	Temperaturerfassung	46
	Bilanzgrenzen und COP-Berechnung.....	47
4	Ergebnisse	50
4.1	Charakterisierung der ausgewählten Dämmstoffe und deren Anwendungsbereich	50
4.1.1	Organische Dämmstoffe natürlichen Ursprungs und deren Kennzahlen	51
	Zellulose	51
	Holz	54
	Hanf	56
	Flachs.....	59
	Seegras.....	61

4.1.2	Synthetisch hergestellte organische Rohstoffe und deren Kennzahlen	64
	Expandiertes Polystyrol (EPS) und Extrudiertes Polystyrol (XPS)	64
	Polyurethan (PUR)	68
4.1.3	Anorganische Rohstoffe natürlichen Ursprungs und deren Kennzahlen	72
	Perlit	72
4.1.4	Synthetisch hergestellte anorganische Rohstoffe und deren Kennzahlen	74
	Mineralwolle als Glas- beziehungsweise Steinwolle	74
4.2	Ergebnisse zu organischen und anorganischen Dämmstoffen	77
4.3	Ergebnisse zur Wärmerückgewinnung	79
4.3.1	Der rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher	79
	Auslastung der WRG	79
	Temperaturverläufe	80
	Temperaturwirkungsgrad	81
	Heizleistung	82
4.4	Ergebnisse zu den regenerativen Heiz- und Kühltechnologien	85
4.4.1	Die Unterflurzuluftführung	85
	Temperaturverläufe	85
	Kühl- und Vorwärmeeffekte	88
	Volumenstrommessung	91
4.4.2	Die Grundwasser-Wärmepumpe	93
	Klimatische Randbedingungen während des Untersuchungszeitraumes	93
	Auslastung der Grundwasser-WP	93
	Leistungszahl der Grundwasser-WP	95
	Wärmemengen und erbrachte Heizleistung	96
	Grundwasserfördermengen	98
5	Diskussion	100
5.1	Dämmmaterial	100
5.2	Wärmerückgewinnung	101
5.2.1	Bewertung der Ergebnisse zum rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauscher	101
5.3	Regenerative Heiz- und Kühltechnologien	103

5.3.1	Unterflurzulufführung	103
5.3.2	Einsatz einer Grundwasser-Wärmepumpe	104
	Bewertung der Ergebnisse zur Grundwasser-Wärmepumpe.....	104
5.4	Fazit und Handlungsempfehlungen	105
5.4.1	Dämmstoffe	105
5.4.2	Wärmerückgewinnung.....	105
	Rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher	105
5.4.3	Regenerative Heiz- und Kühltechnologien	106
	Unterflurzulufführung	106
	Grundwasser-Wärmepumpe	106
6	Zusammenfassung	109
6.1	Dämmstoffe	109
6.2	Einsatz von WRG und regenerativer Energien.....	110
7	Literaturverzeichnis	113
8	Kurzfassung in Deutsch und Englisch.....	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
Abbildung 1: Wärmebilanzwaage mit Ausgleichmöglichkeit.....	7
Abbildung 2: Unterteilung der organischen und anorganischen Dämmstoffe verändert nach (Pfundstein et al., 2007; DREWER, 2013; BÖHMFELD 2009 und DANNER, 2010)	9
Abbildung 3: Aufnahme organischer Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs (DANGUILLIER, 2015)	10
Abbildung 4: Aufnahme verschiedener Dampfsperren (DANGUILLIER, 2015)	17
Abbildung 5: Darstellung verschiedener Wandaufbauten in Nutztierställen (BÖHMFELD, 2009)	21
Abbildung 6: Einteilung der Wärmerückgewinnungsverfahren (verändert nach KLEMENT, 2001)	23
Abbildung 7: Zustandsgrößen und Messpunkte beim Durchgang rekuperativer Wärmerückgewinnungsanlagen (verändert nach VDI 2071, 1997)	24
Abbildung 8: Funktionsprinzip eines rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers (RÖSMANN et al., 2011a; Zeichnung: THIEMEYER).....	27
Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines Luft-Luft-Rohrwärmetauschers (RÖSMANN et al., 2011; Zeichnung: Möller GmbH, Diepholz).....	28
Abbildung 10: Aufbau einer Energiewand (KELLER, 2015)	29
Abbildung 11: Verlegung der EWT-Rohre neben oder unter dem Stallgebäude (verändert nach DLG, 2008)	31
Abbildung 12: Zuluftkonditionierung mittels Unterflur-Zuluftführung (SCHIERBAUM, 2003)	33
Abbildung 13: Luftführung bei dem Erdwärmetauscher „Opti-Klima“ (Modulstall) der Firma ACO Funki GmbH (DLG, 2008)	34
Abbildung 14: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe (RECKNAGEL, 2015).....	36
Abbildung 15: Beispiel für die Abhängigkeit der zu erreichenden Leistungszahl einer Wärmepumpe von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Wasser, Boden, Luft) und Heizwasserstrom (verändert nach BAUMANN et al., 2007).....	37
Abbildung 25: Blick in den Zentralkanal (POMMER, 2015)	41
Abbildung 26: Schematischer Stallgrundriss mit Messstellen der Stallanlage in Naundorf (POMMER, 2015)	43
Abbildung 27: Installationsschema der WP im Abferkelstall (a) und der Ferkelaufzucht (b) mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der COP. 1 Förderbrunnen (110 m tief); 2 Grundwasserförderpumpe; 3 Schluckbrunnen (70 m tief);	

4 Pufferspeicher (a) Brauchwasser (50°C), (b) Heizung Ferkelneest (45°C), (c) Heizung Ferkelaufzucht (50°C); 5a Ferkelneest; 5b abgedeckter Liegebereich mit Heizrohren; 6 Wärmemengenzähler; 7 Umwälzpumpen (a) Heizkreislauf Abferkelstall (b) Module A&B Abferkelbereich (c) Heizkreislauf Ferkelaufzucht, (d) Module A&B Master-WP, (e) Module A&B Slave-WP; 8 Kompressoren (a) Module A&B Abferkelbereich, (b) Module A&B Master-WP, (c) Module A&B Slave-WP; 9 Wasserzähler.....	48
Abbildung 16: Aufnahme Zellulose Dämmstoff (http://www.raumprobe.de/material/isofloc-waermedaemmtechnik-gmbh/zellulose-daemmstoff-isofloc-l/datenblatt).....	52
Abbildung 17: Aufnahme von Holzdämmstoffen (DANGUILLIER, 2015)	54
Abbildung 18: Aufnahme von Hanfdämmstoffen (DANGUILLIER, 2015)	57
Abbildung 19: Aufnahme von Flachsdämmstoffen (http://www.flachsdemmung.de/Bilder/PLATTEN.jpg)	59
Abbildung 20: Abbildung von Seegrasfasern und Seegrasfaserbällen (DANGUILLIER, 2015)	62
Abbildung 21: Aufnahme verschiedener Polystyrolämmstoffe (DANGUILLIER, 2015).....	64
Abbildung 22: Aufnahme verschieden beschichteter Polyurethandämmstoffe (DANGUILLIER, 2015).....	69
Abbildung 23: Aufnahme von Perlitdämmstoffen (http://www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/perlit)	72
Abbildung 24: Aufnahmen von Glaswoll- (links) und Steinwollämmstoffen (rechts) http://www.gschwend-holzbau.ch/index_Isolation_Details.html http://www.knaufinsulation.at/steinwolle-daemmstoffe	74
Abbildung 28: Relative monatliche Betriebsauslastung der WRG (RÖSMANN, 2012)	79
Abbildung 29: Temperaturverläufe an den Messpunkten (RÖSMANN, 2012)	80
Abbildung 30: Zuluft-Erwärmung und Abluft-Abkühlung (RÖSMANN, 2012).....	81
Abbildung 31: Temperaturwirkungsgrad der WRG (RÖSMANN, 2012).....	82
Abbildung 32: Heizleistung der WRG (RÖSMANN, 2012)	83
Abbildung 33: Heizleistung der WRG in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Ab- und Frischluft (RÖSMANN, 2012).....	84
Abbildung 34: Monatliche Heizleistung der WRG in Abhängigkeit der T- Frischluft (RÖSMANN, 2012)	85
Abbildung 35: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf (Pommer, 2015)	86
Abbildung 36: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf vom 24.01. bis 30.01.2014 (POMMER, 2015).....	87
Abbildung 37: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf des 25.04.2014 (POMMER, 2015)	88

Abbildung 38: Abkühlung der Zuluft im meteorologischen Sommer 2014 (POMMER, 2015)	89
Abbildung 39: Vorkonditionierung der Zuluft im meteorologischen Winter 2013/14 (POMMER, 2015).....	90
Abbildung 40: Pufferwirkung des Zuluftkanales in Abhängigkeit von der Tagestemperaturdifferenz der Stallumgebung (POMMER, 2015).....	91
Abbildung 41: Volumenstrom und Abteilterperatur im kleineren Stallabschnitt (POMMER, 2015).....	92
Abbildung 42: Betriebsstunden und Betriebsauslastung der WP-Kompressoren im Abferkelstall (a) und in der Ferkelaufzucht (b) (RÖSMANN, 2012)	94
Abbildung 43: Thermischer Energiegewinn und unterschiedliche elektrische Energieverbräuche im Abferkelstall (a) und in der Ferkelaufzucht (b) während des Versuchszeitraums.....	95
Abbildung 44: Wärmemengenverteilung auf die Verbraucher und die benötigte Heizleistung. Die Säulen der Brauchwasserbereitung und Ferkelnestheizung sind mit einer Fehlerangabe ($\pm 5\%$ vom Messwert) angegeben sowie der Leistungswert entsprechenden Standardabweichung (RÖSMANN, 2012).....	97
Abbildung 45: Heizenergieaufwendungen im Ferkelaufzuchtstall und der dafür erforderliche Leistung der Heiztechnik. Die Säulen der produzierten Wärmemengen des Flüssiggasstrahlers und der Wärmepumpe werden unter Angabe des Messfehlers ($\pm 5\%$) angegeben. Die dafür erforderliche Heizleistung wird mit ihrer Standardabweichung abgebildet (RÖSMANN, 2012).	98
Abbildung 46: Täglicher Grundwasserdurchfluss durch die Wärmepumpen und erreichte Wärmeproduktion je m^3 Grundwasser. Die entsprechenden Standardabweichungen sind ebenfalls zu entnehmen (RÖSMANN, 2012).	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Seite
Tabelle 1: Baustoffklassen und deren Bedeutung (ELLERSIEK, 2009)	14
Tabelle 2: Anzustrebende U-Werte einzelner Bauelemente.....	16
Tabelle 3: Schädlingsabweisende Wirkung von Dämmstoffen, laut Herstellerangaben (verändert nach DREWER, 2013)	19
Tabelle 4: Spezifische Entzugsleistung für Erdwärmesonden in Abhängigkeit vom Bodentyp (nach THEIß, 2008)	31
Tabelle 5: Bedeutung und Abkürzung der Einsatzbereiche für Dämmstoffe nach (DREWER, 2013).....	50
Tabelle 6: Angaben zu den physikalischen Größen von Zellulose- Dämmprodukten*Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	53
Tabelle 7: Angaben zu den physikalischen Größen von Holz-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	55
Tabelle 8: Angaben zu den physikalischen Größen von Hanf-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	58
Tabelle 9: Angaben zu den physikalischen Größen von Flachs-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013).	60
Tabelle 10: Angaben zu den physikalischen Größen von Neptunballfaser- Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, (verändert nach DREWER 2013)	63
Tabelle 11: Angaben zu den physikalischen Größen von ESP-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	66
Tabelle 12: Angaben zu den physikalischen Größen von XPS-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	67
Tabelle 13: Angaben zu den physikalischen Größen von PUR-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	71
Tabelle 14: Angaben zu den physikalischen Größen von Perlit-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)	73
Tabelle 15: Angaben zu den physikalischen Größen von Mineralwolle Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, (verändert nach DREWER, 2013)	76
Tabelle 16: Verhältnis des Stromaufwandes zum Energieertrag bei untersuchten regenerativen Heiz- und Kühlsystemen	111

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
+		plus
<		kleiner
>		größer
±		plus/minus
≤		kleiner/gleich
μ		Wasserdampfdiffusionswiderstand
A1		nichtbrennbares Material
A2		nichtbrennbares Material, mit Anteil von brennbaren Stoffen versetzt
<i>B</i>	m	Breite
B1		schwerentflammbares Material
B2		normalentflammbares Material
B3		leichtentflammbares Material
<i>c</i>	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Wärmespeicherkapazität
cm		Zentimeter
CO ₂		Kohlenstoffdioxid
COP		coefficient of performance
COP _p		coefficient of performance unter Berücksichtigung des Elektroenergieverbrauch von der Förderpumpe (Grundwasser) und dem Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP)
COP _T		coefficient of performance unter Berücksichtigung der Heizenergie von der WP und aller elektrischen Verbraucher

COP _Z		coefficient of performance unter Berücksichtigung der Heizenergie von der WP, der Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP) und der Elektroenergieverbrauch der Umwälzpumpen A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP)
$c_{p,L}$	Wh kg ⁻¹ K ⁻¹	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck ($c_{p,L} = 0,28 \text{ Wh kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
d	mm	Durchmesser
d_M	m	Dicke
d_T		Tag
DAA		Außendämmung von Dächern oder Decken, Dämmung unter Abdichtungen
DAD		Außendämmung von Dächern oder Decken, Dämmung unter Decken
DEO		Innenraumdämmung von Decken oder Bodenplatten, Dämmung unter Estrich ohne Schallschutzanforderungen
DES		Innenraumdämmung von Decken oder Bodenplatten, Dämmung unter Estrich mit Schallschutzanforderungen
DI		Innenraumdämmung von Decken oder Dächern, Dämmung unter Sparren, Tragkonstruktionen, abgehängten Decken
DUK		Außendämmung von Dächern
DZ		Zwischensparrendämmung, Dämmung zweischaliger Dächer, Dämmung zugänglicher, aber nicht begehbarer oberster Geschossdecken
ESP		Expandiertes Polystyrol
EWT		Erdwärmetauscher

FP		Ferkelplatz
h		Stunde
h	kJ kg^{-1}	Enthalpie
H	m	Höhe
HBCD		Hexabromcyclododecan
J		Joule
JAZ		Jahresarbeitszahl
K		Kelvin
kg		Kilogramm
kPa		Kilopascal
kW		Kilowatt
kWh		Kilowattstunde
kWh_{el}		Energiemenge elektrisch
kWh_{th}		Energiemenge thermisch
L	m	Länge
l		Liter
lfdm		laufender Meter
LM	kg	Lebendmasse
m		Meter
	kg s^{-1}	Luftmassenstrom
m^2		Quadratmeter
m^3		Kubikmeter
max.		maximal
mm		Millimeter
MSP		Mastschweineplatz
N		Newton
η_{T}		Temperaturwirkungsgrad
PB		außen liegende Wärmedämmung unter Bodenplatten gegen Erdreich
P_{el}	kW	elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren
ppm		parts per million
PUR		Polyurethan
PVC		Polyvinylchlorid
PW		außen liegende Wärmedämmung von Wänden gegen Erdreich
Q	kW	Heizleistung
Q_{WP}	kW	Heizleistung der WP
\dot{Q}_{WRG}	kW	Heizleistung der WRG
R	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$	Wärmedurchlasskoeffizient
r. LF	%	relative Luftfeuchte

LFR _{se}	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$	Wärmeübergangswiderstand außen
R _{si}	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$	Wärmeübergangswiderstand innen
s		Sekunde
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
TCEP		Tris(2-chlorethyl)phosphat
TCPP		Trichlorphenylphosphat
TierSchNutzv	-	Tierschutznutztierverordnung
U-Wert	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	Wärmedurchgangswert
\dot{V}	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	Luftvolumenstrom
W		Watt
WAA		Außendämmung von Wänden hinter Abdichtung
WAB		Außendämmung von Wänden hinter Bekleidung
WAP		Außendämmung von Wänden unter Putz
W _{FP}	kW	Elektroenergieverbrauch von der Förderpumpe (Grundwasser)
WH		Dämmung von Konstruktionen in Holzrahmen- und Holztafelbauweise
WI		Innendämmung von Wänden
WP		Wärmepumpe
WRG		Wärmerückgewinnung
WTH		Dämmung zwischen Haustrennwänden mit Schallschutz-Anforderungen
WTR		Dämmung von Raumtrennwänden
W _{U,A+B}	kW	Elektroenergieverbrauch der Umwälzpumpen A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP)
W _{U,AS bzw. U,FA}	kW	Umwälzpumpe Abferkelstall bzw. Ferkelaufzucht
W _{V,A +B}	kW	Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP)
WZ		Dämmung von zweischaligen Wänden, Kerndämmung
x	g kg^{-1}	Feuchtegehalt
\bar{x}		arithmetisches Mittel

\tilde{x}		Median
XPS		Extrudiertes Polystyrol
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ε		Leistungsziffer (COP-Zahl = coefficient of performance)
ε_{WRG}		Leistungsziffer (COP-Zahl = coefficient of performance) der Wärmerückgewinnung
ε_{WP}		Leistungsziffer (COP-Zahl = coefficient of performance) der Wärmepumpe
λ	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kPa	Rohdichte
ρ_{D}	Pa	Druck
σ		Standardabweichung

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung fordert die Bundesregierung ein umfassendes Energiekonzept. Dabei stehen die Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieverbrauchs zum einen und die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoenergieverbrauch und der Energieeffizienz durch verbesserte Bewirtschaftungsformen zum anderen im Vordergrund. Als einflussstärkster Faktor auf Emissionsminderungen ist der sinkende Einsatz fossiler Brennstoffe zu nennen. Im Gegensatz dazu erhöhten sich die Emissionen in der Landwirtschaft von 69 Mio. Tonnen (2012) auf 71 Mio. Tonnen (2013). Insgesamt verzeichnet der Sektor Landwirtschaft einen Anstieg der Emissionen von 4,3 (1990) auf 7,5 % auf (UMWELTBUNDESAMT, 2015). Dieser Trend zeigt deutlich, dass der Anteil der Energieerzeugung in der Landwirtschaft aus fossilen Energiequellen gewonnen wird. Zusätzlich beeinflussen schrumpfende fossile Energiereserven die Energiepreise durch eine erhöhte Nachfrage bzw. durch das Wachstum von Schwellenländern. Demnach ist ein wichtiges Ziel mit erneuerbarer Energie (als eine klimaschonende Alternative, wie Biogas, Wind, Sonne (CORRÉ et al., 2003) oder auch Erdwärme) fossile Energie zu substituieren (KROMMWEH et al. 2014). Des Weiteren muss eine Steigerung der Energieeffizienz und dadurch der Verbrauch von fossilen und regenerativen Energiequellen gesenkt werden.

Aus diesem Anlass werden folgende Fragen in der Landwirtschaft immer häufiger diskutiert.

- Welche regenerativen Energiequellen sollen in der Tierhaltung zukünftig stärker und wirksamer genutzt werden?
- Wie können regenerative Energien in Tierställen zu Heizzwecken im Winter und zur Kühlung in den Sommermonaten eingesetzt werden?
- Welche langlebigen und gegen Schädlinge beständigen Dämmtechniken stehen der Landwirtschaft zur Verfügung? Gibt es praxiserichte Möglichkeiten zur nachträglichen Zusatzdämmung von energieintensiven Stallgebäuden?

Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, wurde unter Mitwirkung von Herrn Professor Dr. Büscher eine *Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der*

Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau verfasst, die kleinere und mittlere Unternehmen mit gezielten Energieaudits in den Bereichen Gebäude, Anlagen und Nutzerverhalten unterstützen soll. Die Problematik zum Thema (regenerativer) Energieeinsatz in der Nutztierhaltung lässt sich dabei auf folgende Bereiche fokussieren:

1. Ökonomischer und ökologischer Nutzen regenerativer Technologien:

Investitionsentscheidungen von Tierhaltern auf dem Gebiet der regenerativen Heiz- und Kühltechnik müssen neben dem Ziel, gesunde und vitale Tiere zu produzieren, auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit getroffen werden (KLUGE, 2001). Neben den ökonomischen Zielen gewinnen jedoch auch die ökologischen Aspekte zunehmend an Bedeutung. Aus diesen Gründen benötigen Landwirte und Berater zeitnahe, fundierte und objektive Praxisbewertungen der derzeit auf dem Markt verfügbaren regenerativen Technologien.

2. Lüftungswärmeverluste:

Betrachtet man die Wärmebilanz von zwangsbelüfteten Stallanlagen fällt auf, dass neben den Transmissionswärmeverlusten durch Bauteile die Lüftung mit einem Anteil von ca. 80 % die größte Verlustquelle von Heizenergie bei zwangsbelüfteten Warmställen darstellt (VAN CAENEGEM, L; B. WECHSLER, 2000). Darum erscheint es aus ökonomischer und ökologischer Sicht zwingend erforderlich, diese Verlustquelle vor dem Hintergrund der Energieeffizienz durch den Einsatz geeigneter Technik (Luft-Luft-Wärmetauscher) weitestgehend zu minimieren.

3. Transmissionswärmeverluste:

Geeignete Wärmedämmung kann die Transmissionswärmeverluste durch Bauteile (etwa 20 % der Gesamtwärmeverluste) mindern. Zusätzlich können dadurch Oberflächenkondensation und Schäden an der Bausubstanz vermieden werden (VAN CAENEGEM und WECHSLER, 2000). Deshalb benötigen Landwirte bei ihrer Entscheidungsfindung praxisnahe Informationen über Dämmstoffe, die langfristig den

extremen Ansprüchen in der Tierhaltung (Schadnager, Feuchtigkeit, mechanische Belastung) gerecht werden.

4. Gesetzliche Rahmenbedingungen:

Die TierSchNutzV (2009) verlangt in § 22 (2) 4. Allgemeine Anforderungen an Haltungseinrichtungen für Schweine: „Haltungseinrichtungen müssen so beschaffen sein, dass eine geeignete Vorrichtung vorhanden ist, die eine Verminderung der Wärmebelastung der Schweine bei hohen Stalllufttemperaturen ermöglicht.“ Die derzeit in der Praxis eingesetzten Lüftungsanlagen sollten aus diesem Grund bezüglich ihres Kühlpotentials in den Sommermonaten (mit Hilfe regenerativer Energiequellen) wissenschaftlich untersucht werden.

1.2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Vor diesem Hintergrund sind wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich, um die vorhandenen Möglichkeiten und Potentiale zum Einsatz regenerativer Technologien zur fossilen Energieeinsparung und gleichzeitiger Steigerung der Energieeffizienz in der Nutztierhaltung genauer zu quantifizieren und zukünftig sachgerecht zu nutzen!

Aus den oben genannten Gründen sollen mit dem Forschungsprojekt vorrangig zwei Ziele verfolgt werden:

Ziel 1: In mindestens drei zwangsbelüfteten Warmställen mit installierter Heiz- und Kühltechnik auf der Basis regenerativer Energiequellen sollen unter Praxisbedingungen durch langfristige messtechnische Untersuchungen die Leistungspotentiale dieser Systeme wissenschaftlich erfasst werden. In der vorliegenden Arbeit wurden daher verschiedene Stallungen von Schweinen hinsichtlich ihres Einsatzes regenerativer Energien, baulichen Konzeptes und der Zuluft- sowie Abluftführung unterschieden, untersucht.

Grundwasser-Wärmepumpe:

Prüfung der zu untersuchenden Grundwasser-Wärmepumpe im praktischen Einsatz unter Berücksichtigung der Erfahrung des Landwirts und des beteiligten Heizungsinstallateurs; Quantifizierung der für den landwirtschaftlichen Einsatz realistischen Jahresarbeitszahl

(JAZ) dieser Technik sowie dessen Potential zur Substitution und Einsparung fossiler Energieträger.

Es müssen dazu folgende Größen kontinuierlich messtechnisch erfasst werden:

1. Stromverbrauch des gesamten Wärmepumpensystems,
2. Bereitgestellte Wärmemenge durch die Wärmepumpe,
3. Geförderten Grundwassermengen für die Wärmepumpe,
4. Energieaufwendungen für zusätzlich installierte Wärmequellen

(z.B. Gasstrahler).

Wärmerückgewinnung durch Luft-Luft Wärmetauscher:

Prüfung der zu untersuchenden Technik im praktischen Einsatz unter Berücksichtigung der Erfahrung des Landwirts und der beteiligten Lüftungsfirma; Quantifizierung der Heizleistung (kW) dieser Technik sowie dessen Potential zur Substitution und Einsparung fossiler Energieträger.

Für die Bewertung dieser Wärmerückgewinnungstechnik müssen daher folgende Parameter erfasst werden:

1. Lufttemperaturen der Frisch-, Zu-, Ab- und Fortluft;
2. Luftvolumenströme zu- und abluftseitig;
3. Energieaufwendungen für die Wärmerückgewinnung.

Für eine umfassende energetische Betrachtung der Stallanlage sind des Weiteren die Energieaufwendungen für zusätzlich installierte Wärmequellen (z.B. Gasstrahler oder -therme) zu berücksichtigen.

Zuluft-Konditionierung mittels Erdwärmetauscher und Unterflurzuluft:

Prüfung der zu untersuchenden Technik im praktischen Einsatz unter Berücksichtigung der Erfahrung des Landwirts und der beteiligten Stallbaufirmen; Quantifizierung der Kühl- und Heizleistung dieses Systems sowie dessen Potential zur Substitution und Einsparung fossiler Energieträger.

Für die wissenschaftlichen Untersuchungen zum Leistungspotential dieser Technik sollten hierbei möglichst kontinuierlich und zeitgleich folgende Parameter erfasst werden:

1. Außen- und Stallinnenraumtemperaturen;
2. Temperaturen aller beteiligten Luftströme;

3. Luftvolumenströme;
4. Energieaufwendungen für die Lüftungstechnik;
5. Auftretende Druckverluste in der Luftführung;
6. Energieaufwendungen für evtl. zusätzlich installierte Wärmequellen.

Ziel 2: Ausgehend von einer Literaturanalyse sollen die im praktischen Einsatz befindlichen **Dämmstoffe** erfasst, beschrieben und in ihrer Praxistauglichkeit mittels Infrarot-Thermografischer Untersuchungen überprüft werden. Dabei soll es nicht nur um das theoretische Potential von Dämmmaßnahmen gehen, sondern aufgrund der extremen Beanspruchung der Dämmmaterialien in Tierställen (z. B. Schadnager, Feuchtigkeit) um die langfristige Beurteilung ihrer Nachhaltigkeit.

Ziel ist es mit einer systematischen Vorstellung der verschiedenen Dämmstoffe, die geeigneten für den jeweiligen Einsatz zu identifizieren. Hierfür werden sowohl handelsübliche, also marktführende, als auch weniger gebräuchliche, aber leicht verfügbare Dämmstoffe vorgestellt. Entscheidend für den Einsatz eines dämmenden Materials ist in erster Linie dessen normativ geregelte oder baurechtlich zugelassene definierte Qualität. Weiterhin werden die speziell der Landwirtschaft gestellten Anforderungen an Dämmstoffe beschrieben. Berücksichtigt werden dabei unter anderem der sommerliche Wärmeschutz sowie die physikalischen und chemischen Einflüsse, die auf ein solches Material einwirken.

Über die funktionale Betrachtung hinaus sind bei der Wahl eines Dämmstoffes auch ökologische Aspekte von Bedeutung. Fragen des Ressourcenverbrauchs zur Erzeugung dämmender Materialien, Verfügbarkeit und gesundheitliche Aspekte beim Verbau von Dämmstoffen sowie Möglichkeiten der umweltfreundlichen Wiederverwertung oder Entsorgung dieser Materialien werden erläutert.

2 Literaturanalyse

2.1 Wärmebilanzierung als Grundlage der energetischen Stallplanung

Um ein dauerhaft optimales Stallklima unter Berücksichtigung der aktuell geltenden Gesetze (Bauvorschriften) herzustellen, müssen die Ansprüche der Nutztiere an das Stallklima sowie das thermische/physikalische Verhalten von Stallgebäuden entsprechend berücksichtigt werden. Durch den hohen Wärmeanspruch von Jungtieren gestaltet sich gerade die Aufzucht in der Nutztierhaltung sehr energieintensiv. Der Gesamtenergiebedarf in unseren Breitengraden beträgt bis zu 300 kWh pro Sauenplatz plus Ferkelaufzucht und Jahr (BÜSCHER, 2009). Die Aufstallung dieser Nutztiere findet in der Regel in zwangsbelüfteten Warmställen statt. Um die anzustrebende Umgebungstemperaturen im Aufenthaltsbereich der Tiere für neugeborene Ferkel 35°C - 37°C, für Saugferkel 28°C - 32°C und für Absetzferkel 25°C - 27°C (HEINRITZI et al., 2006) und optimale Oberflächentemperaturen im Ferkelnest in der ersten Säugeweche zwischen 38°C und 39°C, für ältere Ferkel in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur zwischen 33°C und 36°C (MEYER et al., 2011) aufrecht zu halten, muss ein Warmstall nach der DIN 18910-1 (2004) geplant werden. Hier werden die Berechnungsgrundlagen- und wege für den Heizbedarf unter Berücksichtigung der Luftmassen bzw. den Luftvolumenströme sowie die Berechnung der Sommer- und Winterlufrate dargestellt. Eine beispielhafte Planung ist im AEL HEFT 17 (2007) zu finden. Diese Maßnahme zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste ist ein erster Schritt die Nutztierhaltung energieeffizient, ökologisch und ökonomisch zu gestalten. Eine andere Möglichkeit stellt den Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) (RÖSMANN & BÜSCHER, 2010; vgl. ALLEN und PAYNE, 1987; LINDLEY und WHITAKTER, 1996; VDI 2071, 1997) dar, um die Heizverluste über die Lüftung zu minimieren. Diese bewegen sich in einer Größenordnung von 70 bis 90 % (LINDLEY und WHITAKTER, 1996; SPRENGLER und STOMBAUGH, 1983; VAN CAENEGEM, 2008). Darüber hinaus sind der Einsatz regenerativer Energien zum Heizen sowie die Bewertung des energetischen Leistungspotentials im Praxiseinsatz zu untersuchen.

Die Berechnung der Wärmebilanz einer Stallanlage ist ein Planungsschritt, mit dem die Funktionsfähigkeit des Stalles unter ungünstigen Bedingungen geprüft werden kann. Die DIN 18910-1 (2004) macht Vorgaben, wie die Berechnung der Wärmebilanz durchgeführt

und somit der Heizenergiebedarf einer Stallanlage ermittelt werden kann. Die in Abbildung 1 dargestellte Wärmebilanz-Waage zeigt, welche Faktoren auf das Stallklima zwangsbelüfteter Stallanlagen einen Einfluss haben und welche Ausgleichsmöglichkeiten sich daraus ergeben.

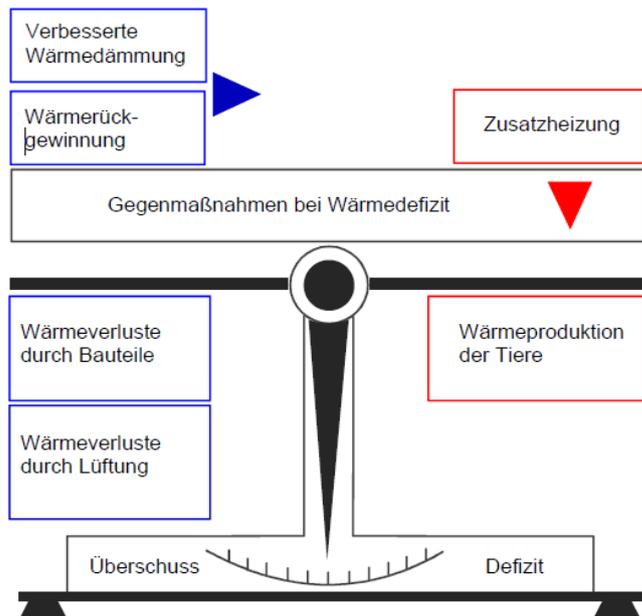


Abbildung 1: Wärmebilanzwaage mit Ausgleichmöglichkeit

Die Auslegung der Heizung ergibt sich aus der Gleichung für Wärmebilanzen, wobei physikalisch für den Wärmestrom der Formelbuchstabe Q benutzt wird (BÜSCHER, 2009).

Formel 1: Auslegung der Heizung

$$Q_{\text{Überschuss/Defizit}} = Q_{\text{Tier}} - (Q_{\text{Bauteile}} + Q_{\text{Lüftung}})$$

Hat man bei der Bilanzierung der Wärmeströme ein Defizit festgestellt, kann sich im Tierbereich die angestrebte Temperatur nicht einstellen. In diesem Fall gibt es folgende Möglichkeiten, um die Raumtemperatur zu steigern (BÜSCHER, 2009):

- Verbesserte Wärmedämmung,
- Wärmerückgewinnung aus der Stallabluft,
- Heizung.

2.2 Einsatz von Wärmedämmung

Dämmstoffe spielen eine wesentliche Rolle beim energieeffizienten Bauen in der Landwirtschaft. Der Einsatz von Dämmstoffen spart Heiz- und Kühlenergie und trägt somit ganz im Sinne der weltweiten Umweltbemühungen zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes bei. Heute kommt der Aspekt immer weiter steigender Energiepreise, zu diesem Umdenken hinzu (PFUNDSTEIN et al., 2007).

An Dämmstoffe, die in Nutztierställen eingesetzt werden sollen, werden hohe Ansprüche gestellt. Sie müssen unempfindlich gegen Stallluft, alterungsbeständig, verrottungssicher, ungeziefer- und nagetierresistent sein. Des Weiteren müssen die Oberflächen feuchte- und wasserbeständig Eigenschaften aufweisen sowie beständig gegen Desinfektionsmittel und mechanische Belastungen, (z. B. bei Säuberung mittels Hochdruckreiniger mit einem Druck von bis zu 100 bar) sein. Da viele Landwirte durch Eigenleistung beim Bau eines Stallgebäudes Kosten sparen wollen, ist eine einfache Handhabung beim Einbau der Dämmstoffe von Vorteil. Leichtes Verlegen, Zuschneiden und Befestigen erspart den kostenintensiven Einsatz von Fremdfirmen (BÖHMFELD 2009 und KLUßMANN, o.J.).

Voraussetzung möglichst ausgeglichener Wärmebilanzen sind intakte, gute Wärmedämmungen der Wände und Stalldecken (BÜSCHER, 2009). Innovative, schnell einsetzbare und zerstörungsfreie Mess- und Untersuchungsmethoden (Infrarot-Thermografie) ermöglichen die Bewertung und Lokalisation von Baumängeln, mit der sich daraus ergebenden Möglichkeit, Maßnahmen zur Beseitigung dieser abzuleiten (FOUAD und RICHTER, 2009).

2.2.1 Dämmstoffgruppen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Dämmstoffe einzuteilen. Sie werden in organische (nachwachsende) und anorganische (mineralische) Dämmmaterialien unterteilt. Diese beiden Hauptgruppen werden dann anhand der für sie verwendeten Rohstoffe in synthetische und natürliche Gruppen aufgliedert. Als „natürlich“ wird ein Rohstoff bezeichnet, wenn er prinzipiell unverändert bleibt. „Synthetisch“ sind Rohstoffe, wenn sie durch eine spezielle Verarbeitung in ihrer mineralogischen Zusammensetzung verändert

wurden. Eine detaillierte Auflistung von Dämmstoffen organischen und anorganischen Ursprungs wird in Abbildung 2 dargestellt.

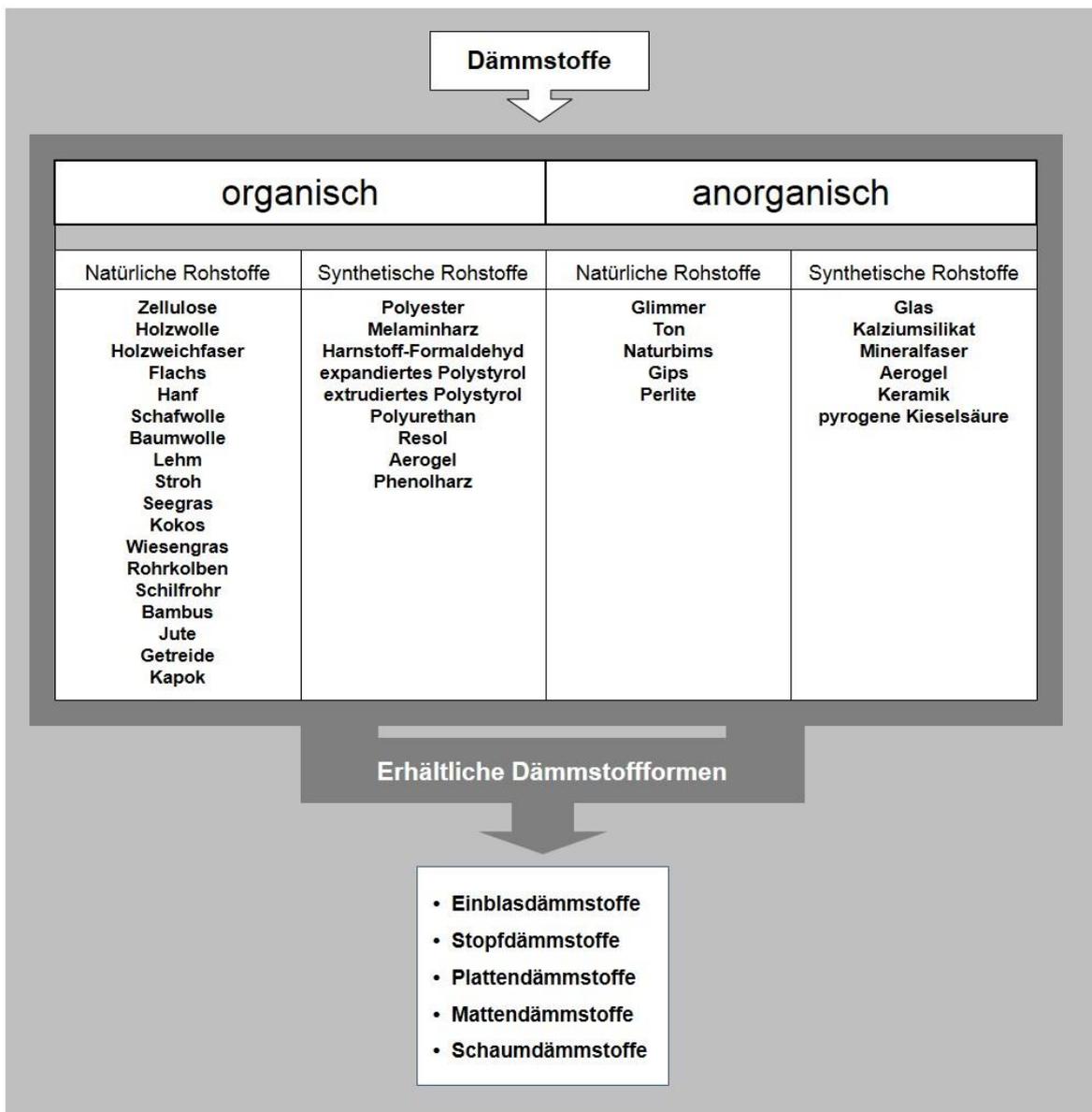


Abbildung 2: Unterteilung der organischen und anorganischen Dämmstoffe
 verändert nach (Pfundstein et al., 2007; DREWER, 2013; BÖHMFELD
 2009 und DANNER, 2010)

Dämmstoffe aus pflanzlichen oder tierischen Rohstoffen (siehe Abbildung 2, Spalte 1), also aus belebtem Material entstanden, besitzen zumeist eine hohe Wärmekapazität, sind also in der Lage, Wärme zu speichern. Mittels einer hohen Anzahl von Poren mit geringem Durchmesser, der Kapillarität, ist ein Feuchteaustausch zwischen Raumluft und

Dämmstoff möglich. Der Energiegehalt der benötigt wird um aus den vorhandenen Rohstoffen einen Dämmstoff herzustellen, genannt Primärenergiegehalt, ist in der Regel sehr gering. Durch die zumeist stark brennbaren Eigenschaften werden organische Dämmstoffe natürlichen Ursprungs vielfach nur imprägniert eingesetzt, was eine spätere Kompostierung der Materialien oftmals unmöglich macht.



**Abbildung 3: Aufnahme organischer Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs
(DANGUILLIER, 2015)**

Organische Rohstoffe synthetischen Ursprungs (s. Abbildung 1, Spalte 2) weisen sehr gute wärmedämmende Eigenschaften auf und sind nach der Nutzung thermisch verwertbar, da sie auf Erdölbasis produziert werden. Bei der Herstellung dieser Dämmstoffe bedarf es eines hohen Primärenergiegehalts (PFUNDSTEIN et al., 2007 und DREWER, 2013).

Anorganische beziehungsweise mineralische Dämmstoffe (s. Abbildung 1, Spalte 3 und 4) zeichnen sich durch ihre Verrottungsbeständigkeit und ihre Nichtbrennbarkeit aus. Der Primärenergiegehalt, der benötigt wird, um diese herzustellen, ist allerdings in den meisten Fällen sehr hoch. Man unterscheidet zwischen natürlich vorkommenden mineralischen Rohstoffen wie Perliten aus Vulkangestein (s. Abbildung 1, Spalte 3) und synthetisch hergestellten mineralischen Rohstoffen (s. Abbildung 1, Spalte 4) wie Glaswolle, welche aus Altglas und weiteren Rohstoffen besteht (PFUNDSTEIN et al., 2007; DREWER, 2013 und BÖHMFELD 2009).

Dämmstoffe aus recycelten Materialien können sowohl aus organischen als auch aus anorganischen Rohstoffen bestehen. Der Primärenergiegehalt, der benötigt wird, um aus recycelten Materialien wieder einen funktionsfähigen Dämmstoff herzustellen, ist sehr gering. So kommt den Materialien eine längere Nutzungsdauer zu (DREWER 2013 und DANNER 2010).

2.2.2 Dämmstoffformen

Die Lieferform, in der sich ein Dämmstoff befindet, ist entscheidend für dessen mögliche Einsatzbereiche. Grundsätzlich lassen sich gebundene und lose Dämmstoffe sowie Schäume unterscheiden. (DREWER 2013)

Unter gebundenen Dämmstoffen versteht man Plattendämmstoffe, die sich durch eine hohe Stabilität auszeichnen und in Bereichen wie der Fußbodendämmung, als Perimeterdämmung oder in Wärmedämm-Verbundsystemen zum Einsatz kommen. Platten weisen unterschiedliche Randausprägungen wie gerade Kanten, umlaufend genutete oder mit Nut und Feder versehene Profile auf. Matten fallen aufgrund ihrer hohen Flexibilität und ihrer Eigenschaft, Unebenheiten durch Stauchung des Materials ausgleichen zu können, unter die gebundenen Dämmstoffe.

Lose Dämmstoffe wie Einblasdämmstoffe eignen sich zur nachträglichen Dämmung schwer zugänglicher Hohlräume. Schüttdämmstoffe hingegen werden hauptsächlich zur Ausgleichsschüttung meist unebener Flächen wie Böden eingesetzt. Mit Stopfdämmstoffen werden u. a. schwer zugängliche Hohlräume verschlossen und ergänzend zu anderen Dämmstoffen wird damit an Anschlussstellen und Fugen gearbeitet.

Schäume als Aufsprühdämmung finden vor allem in der unterseitigen Dämmung von Decken und als Füllmaterial für schwer erreichbare Hohlräume Verwendung (DREWER, 2013, und KLUßMANN, o.J.).

Alle Dämmstoffe unterliegen Form- und Längenveränderungen durch Temperaturschwankungen. In den meisten Fällen sind diese Veränderungen reversibel. Geschlossenzellige Hartschaumstoffe sowie Polystyrol-Platten müssen bis zur Maßkonstanz abgelagert werden, um nachträgliche Formänderungen zu verhindern. Ein fachgerechter, passgenauer Einbau ist Voraussetzung für die langfristige Erhaltung der

dämmenden Eigenschaften aller Dämmstoffe (PFUNDSTEIN et al., 2007 und BÖHMFELD, 2010).

2.2.3 Physikalische Größen

Die Bewertung und Eignung eines Materials als Dämmstoff lässt sich konkret an einigen physikalischen Parametern festmachen. Als wichtigste Eigenschaft eines Wärmedämmstoffes gilt eine geringe Wärmeleitfähigkeit λ . Kriterien wie Rohdichte ρ , Wärmespeicherkapazität c , Wasserdampfdiffusionswiderstand μ und Brandverhalten sind ebenfalls ausschlaggebend.

Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie, zu „transportieren“. Diese wärmedämmende Wirkung ergibt sich aus den technischen Eigenschaften, die sich durch die Verarbeitung der Rohstoffe ergeben. Sie ist für die Bewertung von Dämmstoffen die wichtigste Größe und wird definiert durch die Wärmeübertragung, die ständig bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin durch eine 1 m starke Stoffschicht dringt. Je kleiner der Wert für die Wärmeleitfähigkeit ausfällt, desto besser ist die dämmende Wirkung eines Stoffes. Ermittelt wird die Wärmeleitfähigkeit in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Laut DIN 4108 „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden“ darf ein Baustoff erst ab einer Wärmeleitfähigkeit $\leq 0,1 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ als Dämmstoff bezeichnet werden. Materialien mit einer sehr guten Wärmeleitfähigkeit erreichen Werte $< 0,030 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Als mäßig können wärmedämmende Werte $> 0,070 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ betrachtet werden. Der Hauptvolumenanteil in den meisten Dämmstoffen ist „stehende Luft“. Je größer die Anzahl dieser Lufteinschlüsse in einem Material ist und je geringer der Durchmesser der Einschlüsse ist, desto geringer ist auch die Wärmeleitfähigkeit dieses Materials (DREWER, 2013; HOLZMANN et al., 2012 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Rohdichte ρ

Die Rohdichte ρ gibt das Gewicht von 1 m^3 Dämmstoff an. Ein günstiger Rohdichtebereich liegt zwischen 20 und 100 kg m^{-3} . Für die Dämmstoffauswahl ist die Rohdichte eher von geringer Bedeutung, allerdings ist für die Statik eines Gebäudes der Wert der Rohdichte entscheidend. Bei einer geringen Rohdichte weisen Baustoffe in der Regel ein höheres

Hohlraumvolumen auf, so dass von einer besseren wärmedämmenden Eigenschaft des Materials ausgegangen werden kann (DREWER 2013 und HOLZMANN et al., 2012).

Wärmespeicherkapazität c

Die Eigenschaft sommerliche Höchst-Temperaturen, die auf ein Gebäude einwirken abzupuffern, wird als Wärmespeicherkapazität c bezeichnet. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Wärme aufzunehmen, zu speichern und zeitversetzt wieder abzugeben, auch „Phasenverschiebung“ genannt. Genauer beziffert sie, „wie viel thermische Energie ein Material bezogen auf seine Masse bei einer Temperaturveränderung von 1 K speichern kann“ (DREWER, 2013). Die Materialeigenschaften schützen vor Temperaturspitzen im Innern von Gebäuden meist stark abhängig von der Struktur und Rohdichte des Dämmstoffes. „Je höher die Wärmespeicherkapazität eines Dämmstoffs ist, desto mehr Wärme kann er speichern“ (DREWER, 2013). Angegeben wird die Wärmespeicherkapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ (DREWER 2013 und HOLZMANN et al., 2012).

Baustoffklassen

Die Baustoffklasse eines Dämmstoffs gibt Auskunft über dessen Verwendbarkeit unter Brandschutzgesichtspunkten. Anforderungen an die Dämmstoffe bezüglich der Brandentwicklung, der Brandweiterleitung, der Rauchentwicklung sowie an das Schmelzen und Abtropfen von Dämmmaterial werden berücksichtigt. Gemäß der Regelung DIN 4102-1 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen“ (1998) wird je nach den unterschiedlichen Anforderungen des Bundeslandes den Dämmstoffen eine Baustoffklasse zugeteilt. Die Auswahl eines Dämmmaterials nach dazugehöriger Baustoffklasse kann - je nach dessen Einstufung - Auswirkungen auf die Höhe der Prämien für eine Feuerversicherung haben. In Tabelle 1 werden die Baustoffklassen aufgeführt (DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Tabelle 1: Baustoffklassen und deren Bedeutung (ELLERSIEK, 2009)

Baustoffklassen	Bedeutung
A1	nichtbrennbares Material
A2	nichtbrennbares Material, mit Anteil von brennbaren Stoffen versetzt
B1	schwerentflammbares Material
B2	normalentflammbares Material
B3	leichtentflammbares Material, (nicht zugelassen)

Wasserdampfdiffusionswiderstand μ

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ ist abhängig von der Dicke und Struktur eines Materials und beschreibt die Fähigkeit eines Dämmstoffs, Wasserdampf aufzunehmen, zu transportieren und bei abnehmender relativer Luftfeuchte wieder an die Umgebung abzugeben. Durch den Vergleich der Dampfdichtigkeit einer 1 m dicken Luftschicht und einer 1 m dicken Materialschicht erhält man den dimensionslosen Widerstandsfaktor μ . Dämmstoffe, die dazu in der Lage sind Feuchtigkeit aufzunehmen, sind durchzogen von kleinsten miteinander verbundenen Kapillaren, die in den ersten 10-20 mm Außenschicht Feuchte aufnehmen können. Sinkt die relative Luftfeuchte im Innenraum eines Gebäudes ab, wird über die Kapillaren Wasser an die Oberfläche des Materials geleitet und kann dort wieder verdunsten. „Je höher der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist, desto weniger Wasserdampf kann durch den Baustoff diffundieren“ (DREWER, 2013). Jegliche Aufnahme von Wasser in einem Dämmstoff ist unerwünscht, da die Wasseraufnahme immer mit einer starken Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit einhergeht (DREWER, 2013; HOLZMANN et al., 2012 und PFUNDSTEIN et al., 2007). „Die meisten Dämmstoffe sind nicht hygroskopisch, nehmen also keine Feuchtigkeit aus der Luft auf, oder sind bei der Herstellung hydrophobiert und können so Feuchtebelastungen schadlos überstehen“ (PFUNDSTEIN et al., 2007).

Druckbelastbarkeit

Die Druckbelastbarkeit beschreibt die maximale Spannung, angegeben in N mm² oder kPa, ab der es zum Materialversagen kommt. Die dabei ermittelten Werte dienen lediglich der Qualitätskontrolle oder dem Vergleich mit anderen Produkten. Keinesfalls können

mittels dieser Daten Berechnungen zu dauerbelasteten Dämmkonstruktionen erstellt werden. Diese auch sogenannte Druckspannung oder Druckfestigkeit von Dämmstoffen wird nach DIN 53421 bestimmt (PFUNDSTEIN et al., 2007 und KLUBMANN o.J.).

U-Wert

Der U-Wert ist das Maß für den Wärmedurchgang einer Wand pro m^2 von einem Fluid durch einen festen Körper (Wand oder Bauteil) in ein zweites Fluid. „Niedrige U-Werte sind als günstig anzusehen, hohe Werte kennzeichnen eine schlechte Wärmedämmung“ (BÜSCHER, 2009). Aus der Wärmeleitfähigkeit λ kann über die folgende Formel der U-Wert hergeleitet werden.

Formel 2: U-Wert Berechnung

$$R = d/\lambda$$

$$R_{Gesamt} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_{se}$$

$$U\text{-Wert} = 1/R_{Gesamt}$$

Der Wärmedurchlasswiderstand R beschreibt wie gut ein bestimmter Baustoff Wärme dämmt. Sein Kehrwert ist der Wärmedurchlasskoeffizient: $R = d/\lambda$, d beschreibt dabei die Schichtdicke in Metern. R_{Gesamt} setzt sich aus R_{si} , R_{se} zusammen die Wärmeübergangswiderstände, den Wärmetransport von der Raum- beziehungsweise Außenluft auf die Wand beschreiben und aus $R_1 + R_2 + \dots$ welche die Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Bauteilschichten wiedergeben. Der U-Wert errechnet sich dann aus den Kehrwert von R_{Gesamt} . Tabelle 2 zeigt die anzustrebenden U-Werte für die einzelnen Bauelemente in zwangsbelüfteten Geflügel- und Schweineställen (BÜSCHER, 2009 und JOKO, 2012).

Tabelle 2: Anzustrebende U-Werte einzelner Bauelemente

Bauelemente	U-Wert	Einheit
Wände	≤ 0,4	W m ⁻² K ⁻¹
Decken	≤ 0,35	W m ⁻² K ⁻¹
Fenster	≤ 1,3	W m ⁻² K ⁻¹
Türen	≤ 1,0	W m ⁻² K ⁻¹

2.2.4 Art und Auswirkung von Feuchtigkeitsaufnahme von Dämmstoffen

Die Durchfeuchtung von Dämmstoffen kann vielerlei Ursachen haben. Zum einen geben die Tiere ständig Wasserdampf beziehungsweise Feuchtigkeit an ihre Umgebung ab. Des Weiteren kann es durch die regelmäßige Stallreinigung mit Wasser – intensiv per Hochdruckreiniger - und ggf. Reinigungsschäumen und der anschließenden Desinfektion zur Durchfeuchtung und Kondensatbildung im Inneren der Dämmschicht kommen.

Durch sogenannte Diffusions- und Kondensationsvorgänge kann es ebenfalls zur Durchfeuchtung von Dämmstoffen kommen. Entsteht ein erheblicher Druckunterschied von der Innen- zur Außenseite eines Gebäudes (Sättigungsdruck), kann Wasserdampf durch einen Dämmstoff diffundieren, um einen Konzentrationsausgleich zu schaffen. Die Aufnahme von Wasserdampf aus der Umgebungsluft wird Hygroskopizität genannt. Kühlt sich dieser Wasserdampf an beispielsweise kalten Bauteilen ab, kann es zur Kondensatbildung, also zur Durchnässung des Dämmstoffes kommen, der sogenannten Kernkondensation (PFUNDSTEIN et al., 2007).

Ab einer Raumtemperatur von 15°C bei einer Luftfeuchtigkeit von 80 % bildet sich bereits bei einer Wandtemperatur von 11,6°C am Mauerwerk Kondensat, das auch als Tauwasser bezeichnet wird. Diese Tauwasserbildung wird durch hohe Temperaturdifferenzen zwischen den Wand- oder Deckenaufbauten, dem sogenannten Konzentrationsgefälle, begünstigt. Nicht flächendeckend auftretende Tauwasserbildung weist auf sogenannte Kältebrücken hin. Durch nicht ausreichend gedämmten Fensterstürze, Deckenauflagerungen, Ringbalken, Sockel- oder Außenecken entstehen energetische Schwachstellen. Es besteht die Gefahr, dass beim Gefrieren des Dämmstoffes im Winter eine starke Ausdehnung des dämmenden Materials stattfindet. Des Weiteren kann es zur

Fäulnis, zu Korrosionsschäden und zu Form- und Volumenveränderungen kommen. Die Durchfeuchtung eines Dämmstoffes bedeutet in den meisten Fällen einen völligen Funktionsverlust des Materials. Deshalb sollten Dämmstoffe, die an wasserberührende Bauteile angrenzen, eine Wasseraufnahmefähigkeit von unter 5 % besitzen, also extrudiert sein. Nur durch bauphysikalisch korrekten Schichtenaufbau kann die Diffusion und Kondensation in einem Dämmstoff verhindert werden (BÖHMFELD, 2009 und 2012; KLUBMANN, o.J.; PFUNDSTEIN et al., 2007 und ENGLERT, 1978).

2.2.5 Schutzmaßnahmen zur Verhütung von Feuchtigkeitsschäden an Dämmstoffen

Das Ausmaß des Feuchtigkeitsschutzes richtet sich immer nach der Kapillarität eines Dämmstoffes. Sie beschreibt bei Dämmstoffen die Aufnahme flüssigen Wassers mittels der feinen Kapillaren des Baustoffs. Dieses aufgenommene Wasser verteilt sich schnell im Material und wird auch wieder schnell abgegeben. Der Schutz der Dämmstoffe beginnt schon vor deren Einbau. Sie müssen trocken gelagert werden, also vor Regen und Bodennässe geschützt sein. Wasserundurchlässige Trennschichten wie Dachpappe, wasserdichte Anstriche (z. B. Bitumen) und dampfdurchlässige Putze können eingesetzt werden. Es sollte verhindert werden, dass der Wasserdampfdruck zu stark ansteigt oder die Temperatur im Stallinnern zu stark absinkt, so dass die Luft die in ihr enthaltene Feuchtigkeit nicht mehr halten kann. Dampfbremsen beziehungsweise Dampfsperren (siehe Abbildung 4) sind eine Möglichkeit, zu verhindern dass Feuchtigkeit in einen Dämmstoff eindringen kann. Eine weitere Möglichkeit ist der Einbau dampfdurchlässiger Schichten oder eine Hinterlüftung an der Außenseite des Stallgebäudes.

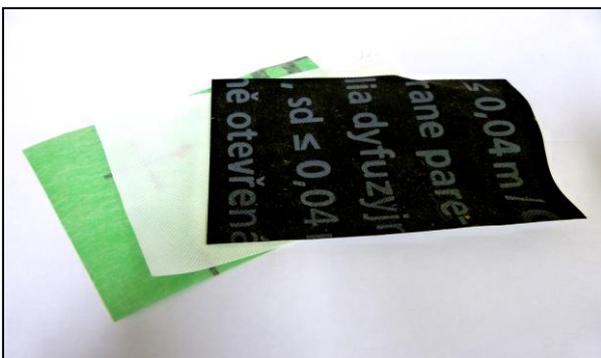


Abbildung 4: Aufnahme verschiedener Dampfsperren (DANGUILLIER, 2015)

2.2.6 Ungeziefer und Nagetierbefall

Ein weit verbreitetes Problem in landwirtschaftlich genutzten Gebäuden stellt der Schädlingsbefall dar. Es wird zwischen Insekten, also Ungezieferbefall und Nagetierbefall durch Mäuse oder Ratten unterschieden. Letztere Spezies richtet in den dämmenden- und Bauelementen erheblichen Schaden an. Mäuse fressen und verunreinigen Futter sowie Agrarprodukte. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass sie Krankheiten auf Nutztiere übertragen könnten. Fast alle auf dem Markt befindlichen Dämmstoffe werden mehr oder weniger früher oder später von Mäusefraß beeinflusst. Betroffen sind vor allem „ganzjährig temperierte Geflügel- und Schweineställe mit einstreulosen Haltungssystemen“ (WÄRMEDÄMMSTOFF UND MÄUSEFRAß, 1982). Diese bieten den Schadnagern ein optimales Nahrungs- und Klimaangebot. Gerade in der kalten Jahreszeit bauen sich die Tiere Nester und Gänge in den zumeist leicht zu erreichenden Dämmschichten. Die Folge ist ein Verlust der Dämmwirkung, meist ohne dass dies vom Bauherrn bemerkt wird.

Mehlkäfer und auch deren Larven sowie der schwarze Getreideschimmelkäfer verursachen dicht aneinander liegende Bohrgänge. Häufen sich diese, kommt es zu Abplatzungen und Abblättern größerer Dämmflächen.

Laut eines Versuchs, der von der Bayerischen Landesanstalt für Tierzucht (BLT) im Jahr 1977 durchgeführt wurde, „zerstörten Mäuse mehr oder weniger sämtliche im Versuch sich befindenden Dämmstoffe“ (WÄRMEDÄMMSTOFF UND MÄUSEFRAß, 1982) Nur die Stramit-Dachplatte zeigte den besten Widerstand gegenüber Schadnagern. Diese Platte besteht aus unter hohem Druck und großer Hitze gepresstem Stroh. In einem Versuch von 1982, der in dem Artikel „Wärmedämmstoff und Mäusefraß“ in der Zeitschrift „Der Tierzüchter“ beschrieben wird, zeigt die Holzwolleleichtbauplatte, und Schaumglas, ein geschäumtes Glas auf Aluminiumsilikatbasis, den längsten Widerstand gegenüber Mäusefraß. Dennoch wurden alle im Versuch befindlichen Dämmstoffe früher oder später zerstört. Die schlechtesten Ergebnisse bezüglich der Widerstandsfähigkeit gegen Mäusefraß erbrachte die Glasfaserplatte. Expandiertes Polystyrol in Mehrschichtplatten wurde ebenfalls nach einer geringen Zeitspanne zerstört. Die getesteten Dämmstoffe spiegeln nur einen geringen Anteil der auf dem Markt befindlichen Dämmstoffe wider (WÄRMEDÄMMSTOFF UND MÄUSEFRAß, 1982; SÜSS et al., 1977).

Bezogen auf die in dieser Arbeit beschriebenen Dämmstoffe werden in Tabelle 3 Angaben zu den Schädlingsbefall-Resistenzen der dämmenden Materialien laut Herstellern gemacht. Die Holzwolleleichtbauplatte enthält mechanisch zerkleinerte Holzwolle sowie magnesit- oder zementgebundenes Bindemittel. Dieses Gemisch wird verpresst und ist aufgrund seiner Zusammensetzung beständig gegen Schimmelpilz- und Nagetierbefall. Des Weiteren sollen Flachsschäben und die Neptunballfaser eine schädlingsabweisende Wirkung zeigen. Letztere sind aufgrund ihres hohen Salzgehalts auch verrottungsbeständig. Blähperlite verhindern durch ihre rieselnde Struktur, dass Nager Gänge in das Material graben können, da diese sofort wieder einstürzen. Da Blähperlite sehr leicht ist, kann es zur nachträglichen Dämmung von Zwischenräumen und Deckenkonstruktionen genutzt werden. Um ein Verfliegen des Materials zu verhindern, müssen Gitterfolien aufgebracht sein. Laut Herstellerangaben besitzen auch die Glaswollplatten eine schädlingsabweisende Wirkung (DREWER, 2013; ZITZKE, 1999 und GARTUNG, et al., 2009).

Tabelle 3: Schädlingsabweisende Wirkung von Dämmstoffen, laut Herstellerangaben (verändert nach DREWER, 2013)

Schädlingsabweisende Wirkung			
Einblas-, Schüttzellulose	-	XPS-Platte, -Granulat	-
Zellulosesprühdämmung, -platte, -pellets, -dämmputz, -wabe	-	PUR-Platte, -Calciumsilicatplatte, -Zementplatte, -Schaum,	-
Holzweichfasermatte, -platte	-	Biobasierter PUR-Schaum, PUR-	
Holzwolleleichtbauplatte	ja	Recyclinggranulat	
Holzfasern, Holzfasern mit Lehm, Holzspäne, -granulat	-	Einblas-, Schüttblähperlite, Blähperliteplatte	ja
Hanfaser, -stopfwolle, -matte, -platte, -gemische	-	Einblas-, Stopfglaswolle, Glaswollmatte	-
Flachsfaser, -fasermatte, -platte	nein	Glaswollplatte	ja
Flachsschäben	ja	Einblas-, Stopfsteinwolle,	-
Neptunballfaser, -schütffaser	ja	Steinwollmatte, -platte	
EPS-Platte, -Granulat, Zementgebundenes EPS-Granulat, EPS-PUR-Verbundplatte	-		

Zum Schutz vor Schädlingsbefall sollten also Vorkehrungen getroffen werden. Bei der Außendämmung von Wänden muss besondere Sorgfalt auf die Grenzschicht zwischen Sockelfundament und Dämmstoff gelegt werden. Dazu sollten Alu- oder sonstige

Metallschienen zum Schutz vor eindringenden Nagetieren als untere Begrenzung des Dämmstoffs angebracht werden. Vom Einbau von Schutzgittern anstelle der Metallschienen ist abzuraten, da Insekten leicht durch diese eindringen können. Durch Maßnahmen zur prophylaktischen Schädlingsbekämpfung, wie beispielsweise durch einen Schädlingsbekämpfer besonders in Geflügel- und Schweinställen kann ein vermehrtes Übergreifen der Schadnager auf den Dämmstoff vermieden werden (KLUBMANN, o.J. und WÄRMEDÄMMSTOFF UND MÄUSEFRAB, 1982).

2.3 Stallwandaufbauten

Bei einer einschaligen Wandkonstruktion übernimmt das Mauerwerk alle statischen und bauphysikalischen Anforderungen. Je nach unterschiedlichen wärmedämmenden Eigenschaften des Mauerwerks muss eine 30-36,5 cm starke Wanddicke eingehalten werden, um eine geringe Wärmeleitfähigkeit λ zu gewährleisten. Grundsätzlich bietet die massive, eigenleistungsfreundliche, einschalige Baukonstruktion einen hohen Wärmeschutz kombiniert mit einer günstigen Wärmespeicherkapazität c . Dabei sollten möglichst großformatige Steine eingesetzt werden um den Fugenanteil zu reduzieren. Generell sind einschichtige Wandaufbauten nicht durch Kernkondensation gefährdet. Durch das Anbringen eines zusätzlich beschichteten Dämmmaterials oder eine zusätzliche Materialschicht, beispielsweise einer Dampfbremse an der Innenwand oder Decke, kann das Eindringen von Feuchtigkeit jeglicher Art vermieden werden (BÖHMFELD, 2009 und 2012).

Einschaliges Mauerwerk mit Außendämmung und hinterlüfteter Fassade bietet zum einen eine vollflächige Wärmedämmung zur Vermeidung von Kältebrücken. Zum anderen bleibt die Eigenschaft der Wand erhalten Wärme- und Feuchtigkeit zu speichern. Des Weiteren wird die Tauwasserbildung unterbunden (KLUBMANN, o.J.).

Der Einsatz von Leichtbauwänden besitzt den Vorteil, dass sie dicke Dämmschichten enthalten und im Werk zeit- und kostensparend vorgefertigt werden. Nachteilig sind die fehlenden Eigenleistungsmöglichkeiten. Auf Grund fehlender Masse sind diese Wandkonstruktionen aber nur bedingt in der Lage, Temperaturschwankungen auszugleichen. Eine ausreichende Statik eines Stallgebäudes aus Leichtbauwänden kann nur gewährleistet werden, wenn die Hülle des Stalls durch eine umfassende

Tragkonstruktion aus Stahl, Holz oder Beton fixiert wird. Vorgefertigte Wandelemente, die dem Bauherrn kurze Bauzeiten bieten, können aus zementgebundenen Platten oder vorgefertigten Betonfertigteilen bestehen, die jeweils mit einer Kerndämmung versehen sind. Je mehr Dämmstoff in ein Wandelement eingebracht wird, desto leichter wird dieses, kann aber höhere U-Werte erreichen. Die Leichtbauwandkonstruktion bietet variable Gestaltungsmöglichkeiten und besitzt gute Wärmedämm- und Speicherfähigkeiten, ist aber kostenintensiver (BÖHMFELD, 2009 und 2012).

Die mehrschalige Wand ist flexibel mit verschiedenen Dämmmaterialien kombinierbar. Dies ermöglicht dem Bauherrn, Einfluss auf die Preisgestaltung zu nehmen. Der Vorteil der mehrschaligen Wand mit zwischenliegender Wärmedämmung ist zum einen, dass die Wärmespeicherkapazität c und der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ der massiven Wand durch die Wahl einer frostsicheren und witterungsbeständigen Außenhaut erhalten bleibt. Das innen liegende Mauerwerk bildet die Statik des Gebäudes, während die äußeren Schalen für die Wärmedämmung und den Witterungsschutz verantwortlich sind. Die einzelnen Schichtaufbauten einer mehrschaligen Stallwand oder -decke sollten so angeordnet sein, dass von innen nach außen der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ der verwendeten Baumaterialien sinkt. So kann in das Material von der Innenraumseite her eindringende Feuchtigkeit durch die einzeln aufgebauten Dämmschichten hindurch an den Außenwänden des Gebäudes entweichen. In Abbildung 5 finden sich die zur Wahl stehenden Wandaufbauten (BÖHMFELD, 2009 und 2012; KLUßMANN, o.J.).

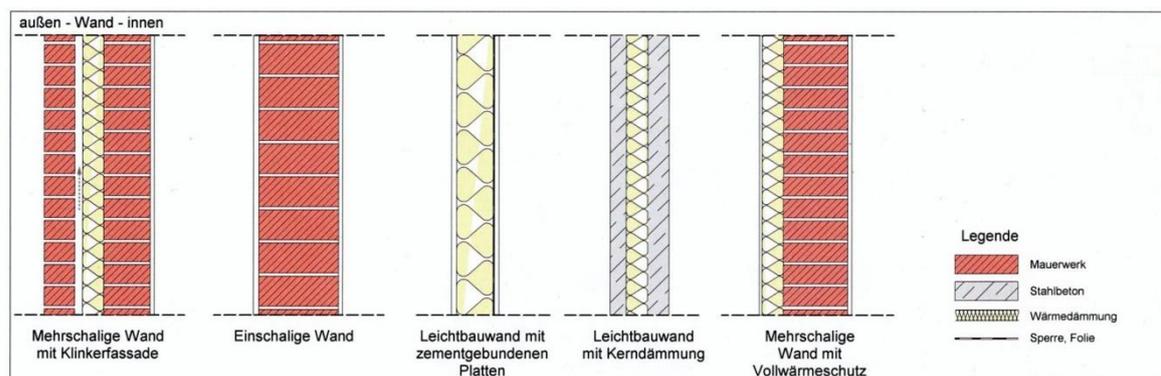


Abbildung 5: Darstellung verschiedener Wandaufbauten in Nutztierställen
(BÖHMFELD, 2009)

Bei stark beanspruchten Flächen im Innenbereich empfiehlt es sich, ein abriebfestes, leicht zu reinigendes Material anzubringen. Dies verhindert nicht nur den Eintritt von Feuchtigkeit, sondern schützt das Dämmmaterial auch vor chemischen und physikalischen Einflüssen. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit λ der verwendeten Materialien soll im Schichtaufbau von innen nach außen sinken (BÖHMFELD, 2009 und 2012).

2.3.1 Dach- und Deckenkonstruktionen, Fenster und Türen

Das Dach sollte möglichst freitragend sein, um spätere Nutzungsänderungen zu ermöglichen. „Üblicherweise werden Fachwerkbinder, Stahlrahmen oder Sparrenpfettendächer mit geraden untergehängten wärme gedämmten Decken“ (BÖHMFELD, 2009) gebaut. Durch die Trennung der Stalldecke von der Dachhaut entsteht ein gut belüfteter Dachraum, das sogenannte „hinterlüftete Dach“, das den Abzug von im Stallinneren entstehendem Wasserdampf ermöglicht. Der Aufbau der Decken besteht in den meisten Fällen nur aus einer Dämmschicht und der Dampfbremse. Zur Unterdeckendämmung werden derzeit meist extrudierte und andere Polystyrolhartschäume, Mineralwolle und Polyurethanhartschäume verwendet. Nur der erstgenannte Dämmstoff besitzt eine wasserabweisende Wirkung und kann ohne eine raumseitige dampfdichte Beschichtung eingesetzt werden. Ansonsten muss durch eine unterseitig angebrachte Verkleidung aus mineralischen, metallischen oder kunststoffhaltigen Materialien eine Schutzschicht gebildet werden. Diese sollte hart, glatt und leicht zu reinigen sein. Sprühschaum besitzt den Vorteil, Wand- oder Deckflächen mit beispielsweise vielen Durchleitungen flächendeckend ohne viel Arbeitsaufwand dämmen zu können. Durch abgehängte Deckenkonstruktionen können niedrige Räumhöhen geschaffen werden. Dies verbessert gleichzeitig die Energiebilanz des Stallgebäudes, da ein geringeres Luftvolumen erwärmt werden muss. An Belüftungsöffnungen der Dach-Konstruktion sollten vorsorglich Schutzgitter angebracht werden, um das Eindringen von Insekten, Nagern und Vögeln zu verhindern (BÖHMFELD, 2009 und 2012; ZITZKE, 1999 und KLUBMANN, o.J.).

Fenster und Türen sind im energetischen Stallbau die Schwachstellen des Gebäudes. Der Anteil der Fensterfläche beträgt in der Regel mind. 3 % der Grundfläche des gesamten Stallgebäudes. Auf dem Markt befindliche Fenster und Türen entsprechen den heutigen wärmedämmenden Ansprüchen. Sie sind wärme gedämmt und besitzen eine Isolierverglasung. Es sind bereits einbaufertige Fenster erhältlich, die möglichen

Wärmeverlusten durch Fugendurchlässigkeit entgegenwirken und gleichzeitig kostengünstiger in der Anschaffung sind (BÖHMFELD, 2009 und 2012).

2.4 Wärmerückgewinnung

Eine negative Energiebilanz kann auch durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung, z. B. mit Luft-Luft-Wärmetauschern, in zwangsbelüfteten Tierställen ausgeglichen werden. Die VDI-Richtlinie 2071 (1997) legt Definitionen und Grundbegriffe der Wärmerückgewinnung (WRG) fest (VDI 2071, 1997).

Eine Einteilung der Wärmerückgewinnungssysteme kann Abb. 6 entnommen werden.

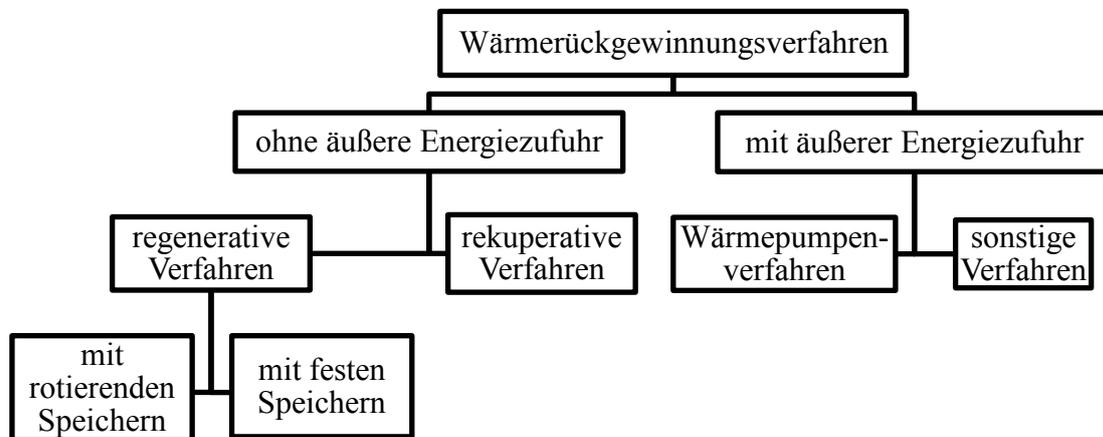


Abbildung 6: Einteilung der Wärmerückgewinnungsverfahren (verändert nach KLEMENT, 2001)

Bei rekuperativen Verfahren wird ein Teil der in der Abluft gebunden Wärme auf die angesaugte Frischluft im Gegenstromprinzip übertragen (BÜSCHER, 2009 und RÖSMANN et al., 2010 und 2011). Sie sind nach DIN EN 305 (1997) dadurch gekennzeichnet, dass eine „Wärmeübertragung von dem Primärfluid zu einem Sekundärfluid, entweder direkt durch eine Trennwand oder indirekt durch ein Zwischenmedium“ stattfindet. Dadurch wird der warme Luftstrom (Primärfluid) abgekühlt und der kältere Luftstrom (Sekundärfluid) erwärmt. Unterschreitet der abgekühlte Luftstrom die Taupunkttemperatur, fällt an den Tauscherflächen nach VDI 2071 (1997) auf der Seite des abgekühlten Luftstromes Kondensat aus.

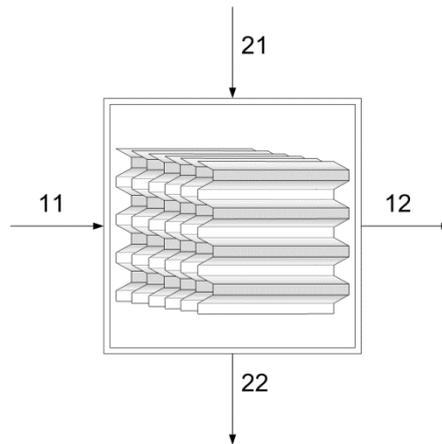


Abbildung 7: Zustandsgrößen und Messpunkte beim Durchgang rekuperativer Wärmerückgewinnungsanlagen (verändert nach VDI 2071, 1997)

Dabei ist

- 11: der Fortluftzustand vor Eintritt in den Wärmerückgewinner (nachfolgend als Abluft bezeichnet);
- 12: der Fortluftzustand nach Austritt aus dem Wärmerückgewinner (nachfolgend als Fortluft bezeichnet);
- 21: der Außenluftzustand vor Eintritt in den Wärmerückgewinner (nachfolgend als Frischluft bezeichnet);
- 22: der Außenluftzustand nach Austritt aus dem Wärmerückgewinner (nachfolgend als Zuluft bezeichnet).

Für die Berechnung der Kenngrößen von WRG-Systemen werden frisch-, zu-, ab- und fortluftseitig nach VDI 2071 (1997) folgende Parameter gemessen bzw. berechnet:

- der Luftmassenstrom \dot{m} in kg s^{-1} ;
- die Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$;
- der Feuchtegehalt x in g kg^{-1} ;
- die Enthalpie h in kJ kg^{-1} ;
- der Druck p_D in Pa.

Anhand dieser Messgrößen kann die Rückwärmezahl (nachfolgend als Temperaturwirkungsgrad bezeichnet), die Rückfeuchtezahl (nachfolgend als Enthalphiewirkungsgrad bezeichnet) und die Druckdifferenz abgeleitet werden (VDI 2071, 1997).

Der Temperaturwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der Zulufterwärmung zur Gesamttemperaturdifferenz zwischen Frisch- und Abluft und wird unter Gewährleistung gleicher Zu- und Abluftmassenströme folgendermaßen berechnet:

Formel 3: Berechnung des Temperaturwirkungsgrades bei rekuperativen WRG-Anlagen (verändert nach VDI 2071, 1997)

$$\eta_T = \frac{T_{22} - T_{21}}{T_{11} - T_{21}}$$

Dabei ist

η_T der Temperaturwirkungsgrad der WRG;

T die Temperatur an den Messpunkten 22, 21 und 11 in °C.

Die Heizleistung der WRG, eine wichtige Planungsgröße bei der Wärmebilanzierung von Stallanlagen sowie bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen, wird nach DLG (1985) folgendermaßen berechnet:

Formel 4: Berechnung der Heizleistung von WRG-Anlagen (verändert nach DLG, 1985)

$$\dot{Q}_{WRG} = \dot{m} * c_{p,L} * \Delta T$$

Dabei ist

\dot{Q}_{WRG} die Heizleistung der WRG in W;

\dot{m} der Luftmassenstrom der Zuluft in kg h⁻¹;

$c_{p,L}$ die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck in $\text{Wh kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ($c_{p,L} = 0,28 \text{ Wh kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Zu- und Frischluft in K.

Die Effizienz einer WRG-Anlage kann nach TGA Fachplaner (2009) auch durch die Leistungsziffer (ε) (die sogenannte COP-Zahl = coefficient of performance) beschrieben werden. Diese setzt die erzielte Heizleistung der WRG ins Verhältnis zur aufgewandten elektrischen Leistung. COP-Zahlen > 10 sollen dabei von guten WRG-Anlagen erreicht werden.

**Formel 5: Berechnung der Leistungsziffer (COP-Zahl) von WRG-Anlagen
(verändert nach TGA-Fachplaner, 2009)**

$$\varepsilon_{WRG} = \frac{\dot{Q}_{WRG}}{P_{el}}$$

Dabei ist

ε_{WRG} die Leistungsziffer;

\dot{Q}_{WRG} die Heizleistung der WRG in kW;

P_{el} die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren in kW.

2.4.1 Einsatz von Wärmerückgewinnungsverfahren in der Tierhaltung

Um diese Wärmeverluste zu minimieren, wurden bereits in den achtziger Jahren Luft-Luft-Wärmetauscher in Schweineställen eingebaut (vgl. Abb. 8). Diese konnten sich jedoch in der Praxis nicht durchsetzen, da sie aufgrund ihrer Bauart sehr wartungsanfällig und unwirtschaftlich (hohe Investitionskosten, geringe Primärenergiepreise) waren (VAN CAENEGEM und WECHSLER, 2000).

„Steigende Energiepreise sowie die technische Weiterentwicklung der Luft-Luft-Wärmetauscher machen die Wärmerückgewinnung aus der Abluft für

Veredelungsbetriebe in jüngster Zeit wieder interessant“ (RÖSMANN und BÜSCHER, 2010).

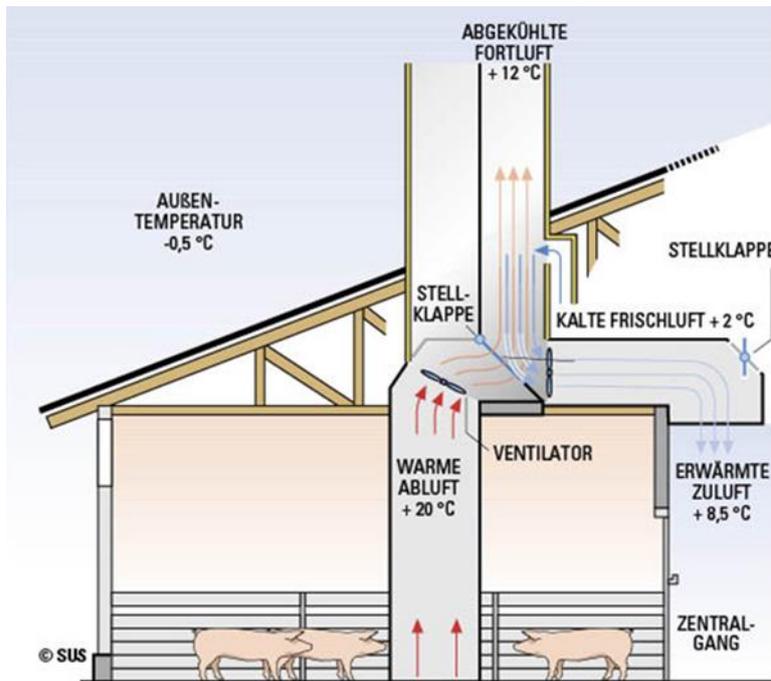


Abbildung 8: Funktionsprinzip eines rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers
(RÖSMANN et al., 2011a; Zeichnung: THIEMEYER)

Für den Tierbestand ist der Einsatz eines rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers im Winter vorteilhaft, weil durch das Anwärmen der Frischluft häufig die nach DIN 18910-1 (2004) geforderte Mindestluftfrate übertroffen, die Durchmischung der Stallluft begünstigt und dadurch die Luftqualität im Tierstall verbessert werden kann (GUIVARCH et al., 2004; RÖSMANN und BÜSCHER, 2010).

„Als nicht direkt monetär zu bewertender positiver Effekt der Wärmerückgewinnung ist die Möglichkeit zur Einsparung fossiler Energieträger mit den dadurch eingesparten CO₂-Emissionen zu nennen“ (RÖSMANN und BÜSCHER, 2010).

Neben den Kompaktbauweisen von rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschern, die zentral oder dezentral in der Abluftführung von Stallgebäuden installiert werden, bietet die Firma Möller GmbH (Diepholz) einen Luft-Luft-Rohrwärmetauscher an (RÖSMANN et al., 2011). Dieser wird, wie in Abbildung 9 dargestellt, in die Konstruktion der Zwischenwände zum Zentralgang integriert.

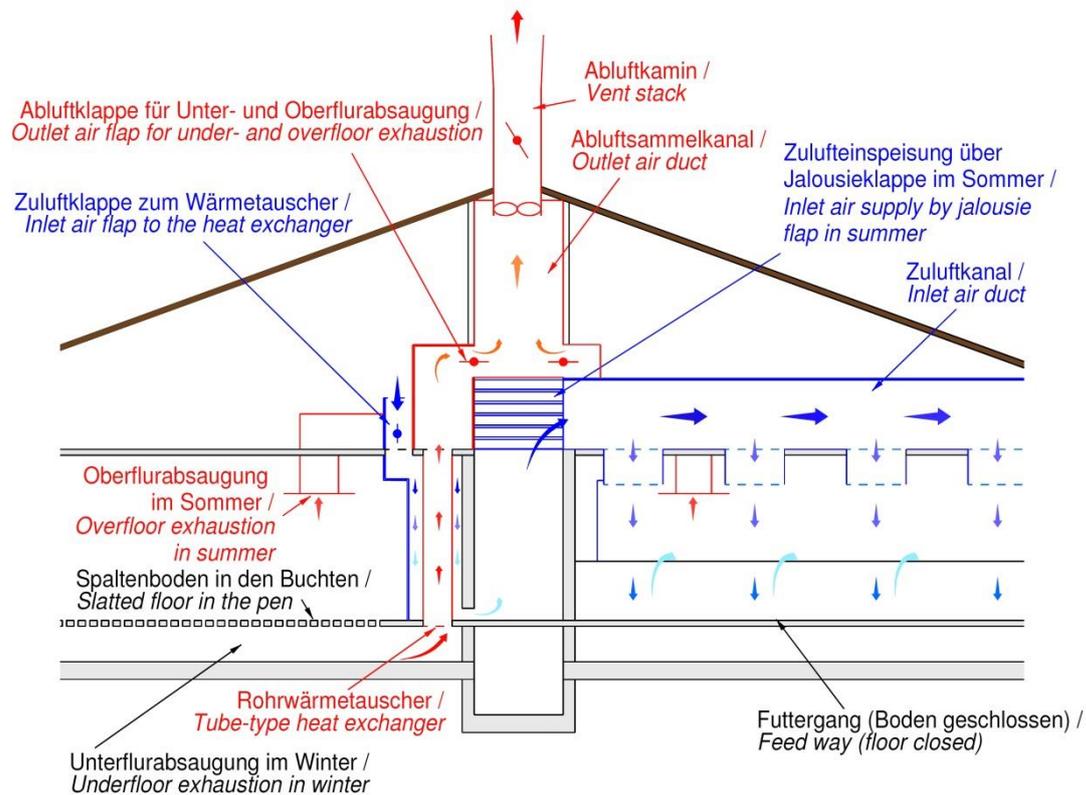


Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines Luft-Luft-Rohrwärmetauschers
 (RÖSMANN et al., 2011; Zeichnung: Möller GmbH, Diepholz)

Die Abluft aus den Abteilen wird im Winterbetrieb unterflurseitig in PVC-Rohre geführt und in den zentralen Abluftkanal gesaugt. Die Frischluft aus dem Dachraum strömt in entgegengesetzter Richtung in die Wand des Rohrwärmetauschers ein und nimmt beim Durchströmen konvektiv einen Teil der Wärme aus der Abluft auf. Durch diese Art der Luftführung kann die Zuluft um bis zu 8,2 K erwärmt werden. Für diese Bauart wurde eine Heizleistung zwischen 12,2 und 37,1 kW erreicht (3. - 4. März 2010). Der Temperaturwirkungsgrad schwankte im gleichen Zeitraum zwischen 0,19 und 0,41. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Frisch- und Abluft von 29,1 K wurde ein η_T von 0,27 erreicht (RÖSMANN et al., 2011).

Ein ähnliches Verfahren bietet die Firma Gillig + Keller GmbH (Uffenheim) in Form einer einfachen Energiewand (Wärmewand) an (s.Abb. 10). Dabei besteht die Außenwand aus Glasfaserbeton und die Innenwand, die als Tauscherfläche fungiert, aus glasfaserverstärkten Kunststoff. Gehalten wird die Wand durch eine doppelte Holzständerbauweise (GILLIG + KELLER, 2015).

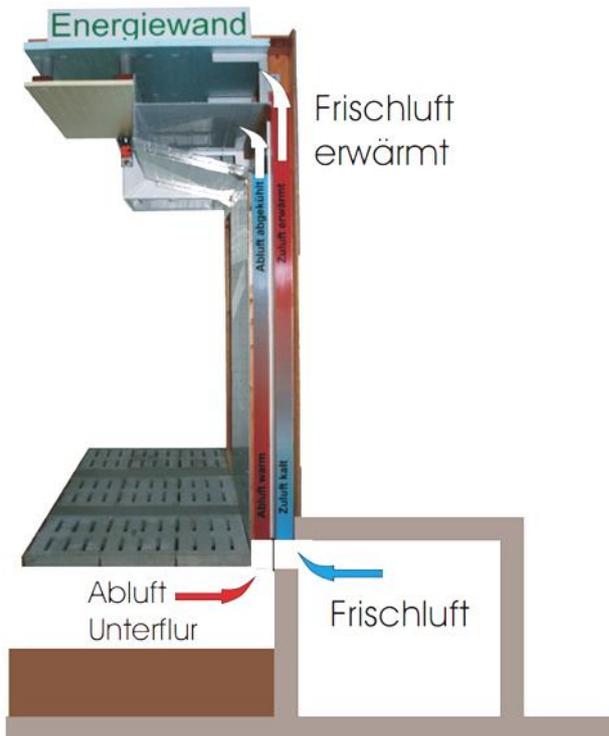


Abbildung 10: Aufbau einer Energiewand (KELLER, 2015)

Dieses Verfahren basiert auf einer Unterflurzulufteführung und Unterflurabluftsystem. Dabei wird die Frischluft in einen betonierten Zuluftkanal unterhalb des Zentralgangs angesaugt und in den Hohlraum zwischen Außenwand und Innenwand, den Luft-Luft-Wärmetauscher geleitet. Gleichzeitig gelangt die warme Abluft unterflur in den Wärmetauscher. Anders als bei dem vorherigen Verfahren strömen Frischluft und Abluft parallel zueinander durch die Energiewand.

2.5 Regenerative Heiz- und Kühltechnologien

Für eine nachhaltige Energieversorgung sollen in der Nutztierhaltung effiziente und ökonomisch sinnvolle Systeme zur Nutzung regenerativer Energien eingesetzt werden. Theoretisch stehen hierfür neben der direkt nutzbaren Sonneneinstrahlung auch Geothermie, Windenergie, Wasserkraft und Biomasse als umgewandelte Formen der Sonnen- und Erdenergie „unerschöpflich“ bereit (THEIB, 2008). Als regenerative Heiz- und Kühltechniken werden in der Nutztierhaltung aufgrund von Verfügbarkeit, Investitionsvolumen und erforderlichem Leistungsbedarf der Anlagen (Passfähigkeit)

meist Erdwärmetauscher, Wärmepumpen oder solarthermische Anlagen installiert (MATTHIAS, 2009).

2.5.1 Zuluftkonditionierung bei Tierställen mittels Erdwärmetauscher

Erdwärmetauscher (EWT) nutzen das natürliche Wärmespeichervermögen des Erdreichs. Dadurch werden bereits in geringen Tiefen die Außentemperaturschwankungen stark abgeschwächt. Dieser natürliche Wärme- und Kältespeicher ermöglicht die Anwärmung der Zuluft im Winter und die Abkühlung im Sommer (VAN CAENEGEM und DIDIER, 1998).

Das Erdreich kann im Rahmen der Gebäude- und Stallklimatisierung zur Zuluftkonditionierung genutzt werden. Dabei stellt die Nutzung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds zunächst einmal grundsätzlich keine neuartige Heiz- bzw. Kühltechnik dar. Bereits seit 3.000 Jahren wird im Nahen Osten das Erdreich genutzt, um Gebäude zu kühlen. In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung werden EWT hingegen erst seit den letzten Jahrzehnten in der Stallklimatisierung eingesetzt und untersucht (VAN CAENEGEM und DEGLIN, 1997; STINGL, 1985; BAHADORI, 1978).

Das Funktionsprinzip eines EWTs beruht auf der Temperatur des Erdreiches. Ist diese höher als die der Frischluft, wird die in das Stallgebäude gesaugte Zuluft angewärmt. Verhält es sich umgekehrt, wird die Zuluft gekühlt (DLG, 2008). Der Vorteil des EWTs besteht darin, die Zuluft zu erwärmen bzw. abzukühlen und Heiz- bzw. Kühlenergie einzusparen (FELLER, 2009; HESSEL und VAN DEN WEGHE, 2011). Die spezifische Entzugsleistung von Erdwärmetauschern ist neben der verfügbaren Tauscherfläche maßgeblich von der Bodenbeschaffenheit des Untergrundes und vom Grundwasserstand abhängig (THEIB, 2008) und mit zunehmender Tiefe werden die jahres- und tageszeitlichen Temperaturschwankungen im Boden geringer (vgl. GEIGER, 1961; STINGL, 1985).

Tabelle 4: Spezifische Entzugsleistung für Erdwärmesonden in Abhängigkeit vom Bodentyp (nach THEIB, 2008)

Untergrund	Spezifische Entzugsleistung in W m^{-1}
trockener, sandiger Boden	20
feuchter, sandiger Boden	40
feuchter, felsiger Boden	60
grundwasserführende Erdschichten	80 - 100

Bei der Konditionierung der Zuluft mittels EWT wird diese durch im Erdreich verlegte Rohre oder Unterflur-Zuluftkanäle im Unterdruckverfahren in das Stallgebäude gesaugt (VAN CAENEEM UND DEGLIN, 1997).

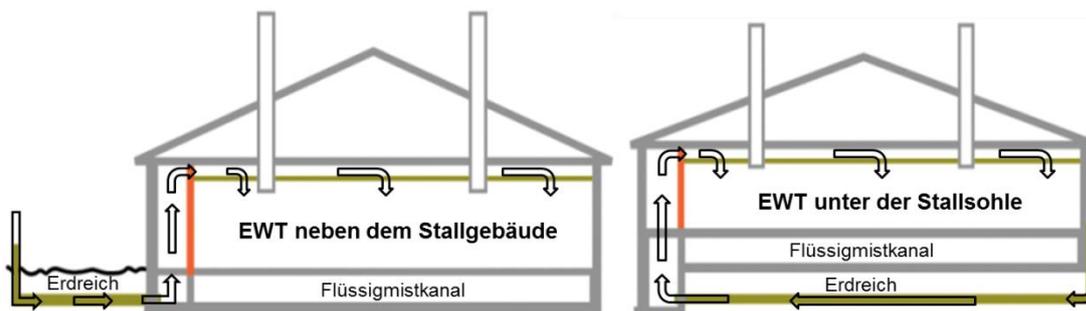


Abbildung 11: Verlegung der EWT-Rohre neben oder unter dem Stallgebäude (verändert nach DLG, 2008)

Im Falle des Rippenrohr-Erdwärmetauschers werden PVC-Rippenrohre verwendet, die dem jeweiligen Bauvorhaben entsprechend unterschiedliche Rohrdurchmesser und -längen aufweisen und entweder neben dem Stallgebäude oder unterhalb der Stallsohle verlegt werden.

Der Wärmeaustausch zwischen Erdreich und EWT wird durch die Luftgeschwindigkeit bzw. die Verweildauer im Röhrensystem beeinflusst (VAN CAENEEM UND DEGLIN, 1997 und 1998 und STINGL, 1985). Dabei korreliert eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit in den Rohren stark mit einer Reduzierung des Wärmeaustausches zwischen Erdboden und Zuluft pro m^3 Luft. Der Wärmeübergang wird des Weiteren durch die physikalischen

Eigenschaften der luftführenden Rohre (z. B. Material, Stärke, Oberfläche je lfdm Rohr) beeinflusst (STINGL, 1985; VAN CAENEGEM und DEGLIN, 1998). Die benötigte Rohrlänge kann in Abhängigkeit vom Bodentyp, dem Rohrdurchmesser und der Luftgeschwindigkeit berechnet werden, um eine angestrebte Leistungszahl (Rendement) zu erreichen. Als Rendement wird nach Van Caenegem und Deglin (1997) die „prozentuelle Ausnutzung des Temperaturgefälles zwischen der Außenluft und dem ungestörten Erdreich in Verlegetiefe der Rohre“ verstanden. Grundsätzlich erhöht sich die Effektivität des Systems mit zunehmender Rohrlänge. Demgegenüber stehen aber entsprechende Platzansprüche und Investitionskosten. Zudem geschieht der Wärmeaustausch unter Normalbedingungen überwiegend im ersten Rohrabschnitt (DEGLIN et al., 1999).

Um die Leistungszahl (Rendement) bei EWT berechnen zu können, sind folgende Parameter in °C zu erfassen:

- Temperatur am Eingang des EWTs
- Temperatur am Ausgang des EWTs
- Erdreichtemperatur auf Höhe der EWT-Rohre

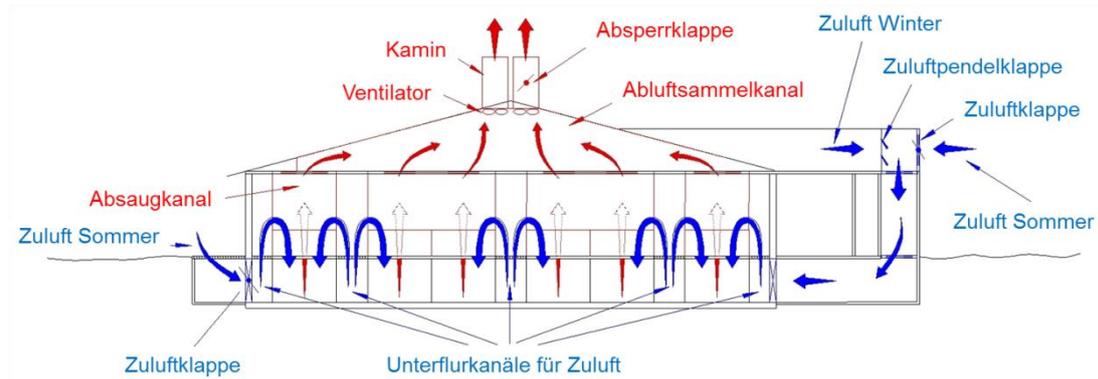
Diese Leistungszahl kann folgendermaßen berechnet werden:

**Formel 6: Berechnung des Rendements bei Erdwärmetauschern
(verändert nach VAN CAENEGEM und DEGLIN, 1997)**

$$\text{Rendement} = \left(\frac{T_{\text{EingangEWT}} - T_{\text{AusgangEWT}}}{T_{\text{EingangEWT}} - T_{\text{Erdreich}}} \right) * 100$$

Dabei ist.

Als zweite Möglichkeit der direkten Zuluftkonditionierung mittels Erdwärme stellen sich seitlich oder unterhalb des Stallgebäudes betonierte Unterflurzuluftkanäle dar. Diese Bauweise ermöglicht als positive Nebenerscheinung die Kombination von Erdwärme mit weiteren Heiz- bzw. Kühltechniken (z. B. Zusatzheizung oder Hochdruckbefeuchtung), die aufgrund der relativ großen Kanaldimensionen installiert werden können (THREM et al., 2011).



**Abbildung 12: Zuluftkonditionierung mittels Unterflur-Zuluftführung
(SCHIERBAUM, 2003)**

Eine Sonderstellung nimmt der Modulstall (z. B. Erdwärmetauscher „Opti Klima“ der Firma ACO Funki GmbH oder Krieger Systemstall) ein, denn dieser nutzt den Hohlraum zwischen Erdreich und Flüssigmistwanne zur Zuluftkonditionierung. Der Hohlraum wird durch die spezielle modulare Konstruktion der einzelnen Boden- und Wandelemente auf Streifenfundamenten (Stellmauern) erreicht, wodurch ein Luftkanal zwischen Flüssigmistwanne und Erdreich entsteht (BÜSCHER et al., 2007; DLG-PRÜFBERICHT 5520 F, 2005 und VAN CAENEGEM, 2007). Die Zuluft kann durch diese Konstruktion mittels Unterdrucksystem seitlich des Stalles durch Lüftungsschächte angesaugt werden. Im Falle des Modulstalles der Firma ACO Funki GmbH wird sie danach unterhalb des Stalles, zwischen Erdreich und Flüssigmistkanal entlang, in den Zentralgang und anschließend in den Dachraum geführt. Von dort gelangt die angewärmte oder gekühlte Außenluft durch die Zuluftelemente in die einzelnen Abteile (DLG, 2005).

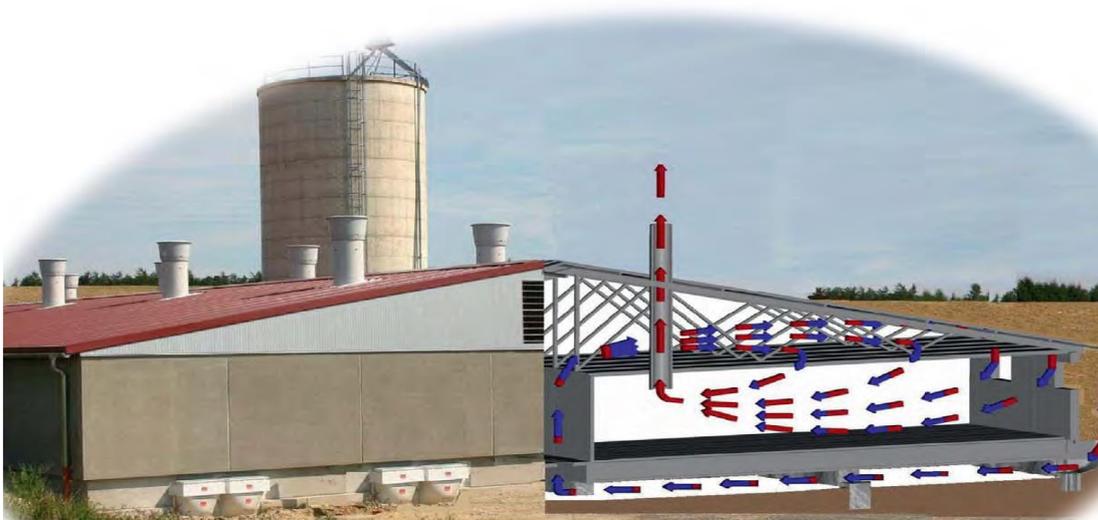


Abbildung 13: Luftführung bei dem Erdwärmetauscher „Opti-Klima“ (Modulstall) der Firma ACO Funki GmbH (DLG, 2008)

Als wärmetauschende Elemente werden im DLG-Prüfbericht 5520 F (2005) das Erdreich, die Unterseite der Güllewanne sowie nicht isolierte, zentralseitige Abteiltrennwände genannt. Auch der Modulstall hat durch seine Luftführung einen positiven Einfluss auf die in das Stallgebäude eintretende Zuluft. Im Winter wurde die Zuluft um bis zu 15,9 K angewärmt, im Sommer bis zu 8,5 K abgekühlt. Durch die Amplitudendämpfung entsteht insgesamt ein homogenes Stallklima, welches sich positiv auf die Tiergesundheit auswirkt (DLG, 2005).

2.5.2 Heizen von Tierställen mittels Wärmepumpe

Die Anzahl eingesetzter Wärmepumpen (WP) ist in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung gering. Dies liegt zum einen an den relativ hohen Anschaffungskosten für WP-Systeme. Zum anderen haben die bisherigen Rohstoffpreise für fossile Energieträger nur wenige Tierhalter dazu bewegen können, in diese im Wohnungsbau etablierte Technik zu investieren (BAUMANN et al., 2007).

Die Attraktivität für den Einsatz von Wärmepumpen besteht darin, dass Energie von einem niedrigerem Temperaturniveau unter Zugabe einer kleineren Energiemenge auf ein deutlich höheres, zum Heizen geeignetes Niveau angehoben werden kann. Die Effizienz dieses Prozesses wird durch die Jahresarbeitszahl (JAZ, im weiteren Verlauf als COP_T

bezeichnet) der Anlage charakterisiert. In der gemäßigten Klimazone werden WP überwiegend zu Heizzwecken eingesetzt, während in wärmeren Klimaregionen der Erde diese auch zum Kühlen von Gebäuden verwendet werden (BAUMANN et al., 2007).

Der wirtschaftliche Betrieb einer WP ist bei dem aktuellen Energiepreisniveau gewährleistet, wenn Jahresarbeitszahlen (COP_T) um 4 (d.h. 4 kWh_{th} zu 1 kWh_{el}) erreicht werden. Der aktuelle Marktpreis für elektrische Energie ist bei der Bewertung der JAZ einer WP jedoch immer zu berücksichtigen. Dieser hat nämlich maßgeblichen Einfluss darauf, welche COP_T von einer WP erreicht werden muss, um ökonomisch betrieben werden zu können (MATTHIAS, 2009).

Wärmepumpen können auf unterschiedlichste regenerative Energiequellen wie Außenluft, Grundwasser und Erdreich zurückgreifen (RECKNAGEL, 2015). Die Funktionsweise dieser Technik wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Eine WP entzieht einer Wärmequelle (z. B. Grundwasser) durch Verdampfung des WP-Arbeitsmittels Wärme. Diese nun im Arbeitsmittel gebundene Energie wird im Anschluss daran dem Verdichter zugeführt. Dort verflüssigt sich das Arbeitsmittel durch die Druckerhöhung wieder und gibt die bei der Verdampfung vom Grundwasser aufgenommene Energie (auf einem höheren nutzbaren Temperaturniveau) an den umgebenden Heizkreislauf ab. Das Arbeitsmittel ist ein spezielles Medium im WP-Kreislauf, das bei niedrigen Temperaturen siedet. Es bewegt sich in einem Kreislauf und durchläuft kontinuierlich nacheinander die Schritte verdampfen, verdichten, verflüssigen und entspannen (vgl. Abb. 14) (MATTHIAS, 2009; BAUMANN et al., 2007).

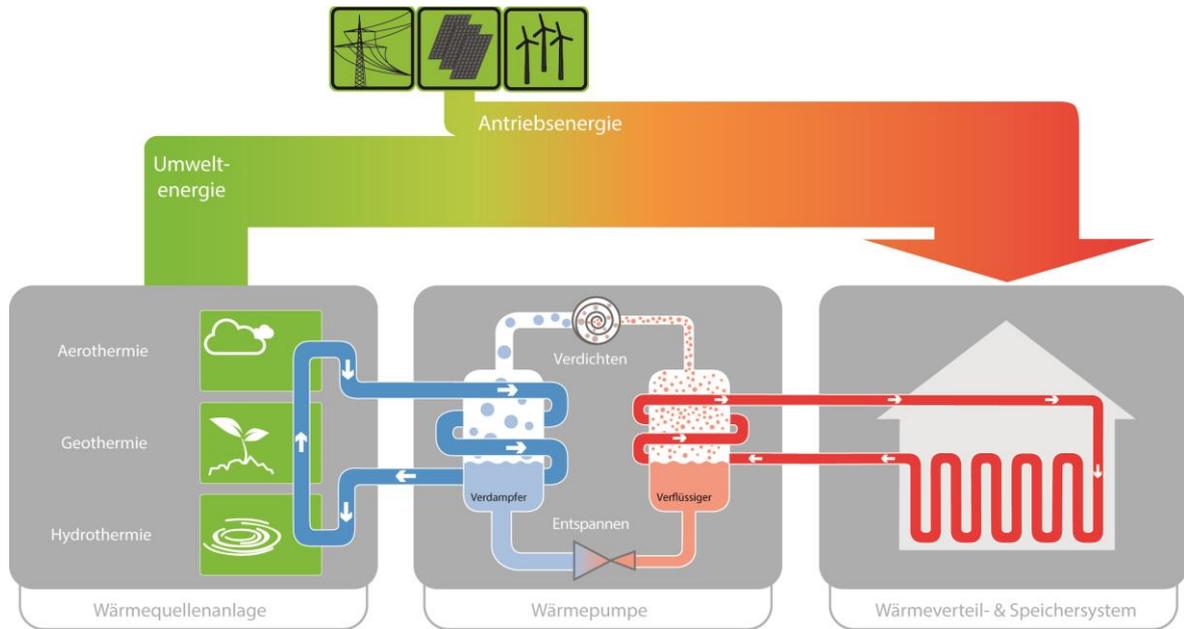


Abbildung 14: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe (RECKNAGEL, 2015)

Die Vorlauftemperatur einer Niedertemperatur-Warmwasserheizung sollte so niedrig wie möglich gewählt werden (z. B. 35°C), da Wärmepumpen in diesem Temperaturbereich besonders energieeffizient Wärme bereitstellen (vgl. Abb. 15). Vorlauftemperaturen zwischen 55°C und 65°C können jedoch mittels Wärmepumpen auch erreicht werden (BAUMANN et al., 2007).

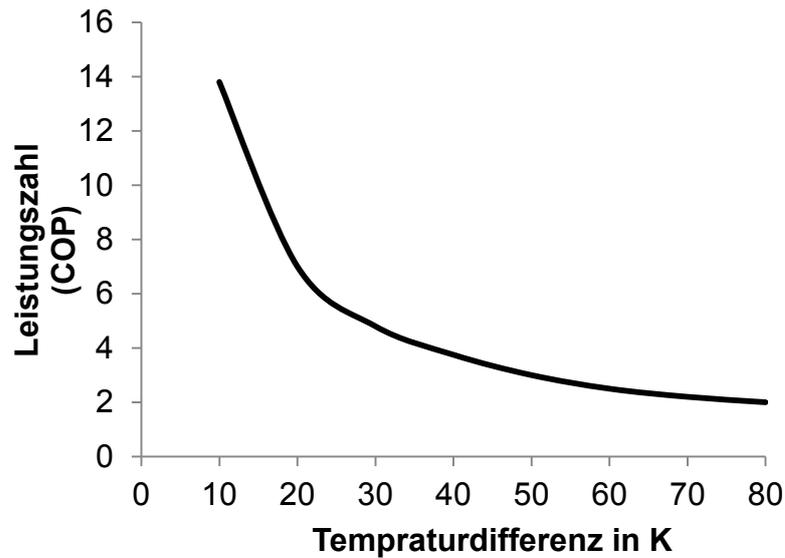


Abbildung 15: Beispiel für die Abhängigkeit der zu erreichenden Leistungszahl einer Wärmepumpe von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Wasser, Boden, Luft) und Heizwasserstrom (verändert nach BAUMANN et al., 2007)

Abb. 15 zeigt den Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke auf die Leistungszahl (COP= coefficient of performance) einer Wärmepumpe. Der ökonomische und ökologische Betrieb einer WP wird maßgeblich von einer möglichst hohen COP beeinflusst, welche von mehreren Faktoren wie Vorlauftemperatur, Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke abhängt. Die COP demonstriert die energetische Vergleichbarkeit zwischen den WP. Sie wird unter Verwendung der folgenden Formel berechnet (DIN 8900 Teil 6, 1987).

Formel 7: COP-Zahl Berechnung

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP}}$$

Dabei ist

ε_{WP} die Leistungszahl der WP;

\dot{Q}_{WP} die Wärmeleistung der WP in kW;

P_{WP} die elektrische Leistungsaufnahme der WP in kW.

Vor diesem Hintergrund müssen bei der Ermittlung der COP einer WP auf dem Prüfstand die Temperaturen auf der Wärmequellen- und Heizungsseite genau definiert und eingehalten werden (BAUMANN et al., 2007). Andererseits resultiert aus dem in Abb. 2 beschriebenen Zusammenhang, dass die COP einer WP immer von den individuellen Einsatzbedingungen der Anlage abhängig ist und in der Praxis von den Prüfstandergebnissen stark abweichen kann. Zusätzlich beeinflusst die Anzahl der berücksichtigten elektrischen Verbraucher (z. B. Förderpumpen, Umwälzpumpen) beim Einbau der Anlage im Gebäude die Effizienz des Systems.

Berichte zum Wärmepumpeneinsatz in der landwirtschaftlichen Nutztierställen liegen bislang nur in einem geringen Umfang vor (z. B. CREMER, 2011; MATTHIAS, 2009; LÜCKE und HÖRSTEN, 2006; RIVA et al., 2000). Landwirtschaftliche Anwendung findet die WP insbesondere in wärmeaufwendigen Produktionsbereichen wie beispielsweise der Gewächshausklimatisierung oder der Trocknung von Erntegütern wie z. B. von Arzneipflanzen (z. B. ZIEGLER et al., 2011; BENLI & DURMUS, 2009). Als Wärmequelle dient oftmals das Erdreich wobei die Verlegung von Erdwärmekollektoren als Flächenkollektoren aus Kostengründen einer Erdwärmesonde vorgezogen wird. Neben diesen beiden Systemen, bei denen in einem geschlossenen Kreislauf Sole zirkuliert, gibt es auch noch die Möglichkeit Grundwasser als Wärmequelle zu nutzen (MATTHIAS, 2009). Das Potential für den Einsatz dieser Technik ist in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung als gut einzuschätzen, weil die Vorlauftemperatur von Warmwasser-Heizungssystemen (ca. 45°C) wirtschaftlich von Wärmepumpen bereitgestellt werden kann (CREMER, 2011).

3 Material und Methoden

3.1 Wärmerückgewinnung

3.1.1 Der rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher

Bei der untersuchten WRG handelt es sich um einen rekuperativen Luft-Luft-Gegenstrom-Wärmetauscher vom Typ WVTL 480 der Firma Schönhammer Wärmetauscher und Lüftungstechnik GmbH, Mengkofen. „Bei dem WVTL 480 wird die Frischluft auf der einen Seite durch glatte, gewendelte und aus Kunststoff bestehende Tauscherflächen von oben durch den Wärmetauscher geführt. Die warme Abluft wird in entgegengesetzter Richtung aus dem zentralen Abluftsammelkanal von unten nach oben durch den Wärmetauscher geleitet. Die abgekühlte Fortluft verlässt schließlich das Stallgebäude. Die gewendelte Oberfläche vergrößert die Tauscher- bzw. Kontaktfläche zwischen der Zu- und Abluft. Zusätzlich soll durch die Verwirbelung die Wärmeleitung erhöht werden. Bei Bedarf kann die Tauscherfläche durch eine fest installierte Reinigungsanlage abluftseitig von Stallstaub gereinigt werden“ (vgl. RÖSMANN und BÜSCHER, 2010).

Der Hersteller nennt für diesen Konstruktionstyp eine maximale Winterlufrate von $19.200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Die Nenn-Heizleistung der WRG wird mit 110 kW angegeben (bei $\Delta T = 30 \text{ K}$ und $\dot{V} = 19.200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Der Wärmetauscher hat die Konstruktionsmaße von: $L 3,54 \times B 1,26 \times H 3,99 \text{ m}$.

Vorstellung der Stallanlage

Der Luft-Luft-Wärmetauscher befindet sich im Dachraum eines Ferkelaufzuchtstalles mit insgesamt 2.200 Ferkelaufzuchtplätzen in Gunzenhausen, Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen in Mittelfranken. Hierbei handelt es sich um einen Neubau aus dem Jahr 2009. Die Absetzferkel werden nach der Säugezeit in eines der neun Aufzuchtteile gestellt und verbleiben dort bis zu einem Vermarktungsgewicht von etwa 30 kg LM.

„Die Abluftführung erfolgt über eine zentrale Unterflurabsaugung. Diese sammelt die warme Abluft aus den Aufzuchtteilen unter dem Zentralgang und führt sie im Winterbetrieb über den Wärmetauscher aus dem Stall. Während der Sommerlüftung wird die Abluft mittels Stellklappen an der Tauscherfläche vorbei direkt aus dem Stall gefördert. Die Frischluft gelangt über die Traufe in den Dachraum. Von dort wird sie über den

Wärmetauscher in einen zentralen Versorgungskanal mit anschließender Einspeisung über Rieseldecken in die Aufzuchtteile geführt“ (vgl. RÖSMANN und BÜSCHER, 2010).

Vorstellung der Messtechnik und des Untersuchungszeitraumes

Für die messtechnische Erfassung der wärmetechnischen Zusammenhänge innerhalb eines rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers wurden kontinuierlich die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftvolumenstrom sowie der elektrische Energieaufwand der WRG erfasst.

Erfassung Temperatur und relative Luftfeuchte

Für die Erfassung der Lufttemperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeiten wurden elektronische Sensoren des Typs ConSens Thor II als Außenfeuchte- und Temperaturfühler eingesetzt. Sie wurden in zweiwöchigem Abstand mittels ALMEMO® Datenloggern kalibriert. Die kapazitiven Feuchte-Fühler erwiesen sich bereits nach kurzer Einsatzzeit für die korrosive und z. T. wasserdampfgesättigte Ab- bzw. Fortluft als ungeeignet.

Erfassung Luftvolumenstrom

Zur Luftvolumenstromerfassung und zur Synchronisierung der zu- und abluftseitigen Luftfördermengen standen des Weiteren die in der Zu- und Abluft installierten Messventilatoren zur Verfügung, die vor der Installation von der DLG-Prüfstelle in Groß-Umstadt kalibriert wurden.

Dokumentation der Stromverbräuche

Die elektrischen Energieaufwendungen der WRG (für die eingesetzten Ventilatoren) wurden zu- und abluftseitig mit handelsüblichen Drehstromzählern erfasst und zweiwöchentlich manuell ausgelesen.

Mit Ausnahme der elektrischen Energieaufwendungen (Drehstromzähler) wurden alle erfassten Messgrößen online von einem im Serviceraum der Stallanlage installierten Messrechner in zehnminütigem Messintervall aufgezeichnet und gespeichert. Via Internet konnten die aufgezeichneten Daten vom Arbeitsplatzrechner in Bonn bei Bedarf abgefragt werden.

Untersuchungszeitraum

Die Datenerfassung aller benötigten Messgrößen für die Bewertung der WRG war (mit Ausnahme der r. F.) von Oktober 2009 bis einschließlich September 2010 gewährleistet.

3.2 Regenerative Heiz- und Kühltechnologien

3.2.1 Unterflurzuluffführung in der Schweinehaltung

Die Untersuchungen zur Unterflurzuluffführung wurden in einer Schweinemastanlage mit 5.160 Mastplätzen in Naundorf durchgeführt.

Vorstellung der Stallanlage

Die Anlage besteht aus 2 Kammställen und ist mit einer Unterflurzuluffführung ausgestattet. Die Zuluft wird durch unter den Gebäuden liegende Kanäle angesaugt, was einen Wärmeaustausch mit dem um die Kanäle liegenden Erdreich zur Folge hat. Das Kanalsystem besteht aus einem unter dem Zentralgang liegenden Zentralkanal (Abb. 25). Davon zweigen unter den Triebwegen der Abteile gelegene Stichkanäle ab, durch die die Zuluft in die Abteile gelangt. Über die Buchtenabtrennungen strömt die Luft in die Buchten.



Abbildung 16: Blick in den Zentralkanal (POMMER, 2015)

Am Zentralkanal befinden sich 4 Zuluftschächte. Diese sind mit Rosten abgedeckt, die bei geringem Luftbedarf durch das Auflegen von Gummimatten anteilig verschlossen werden können. An der dem Zentralkanal gegenüber liegenden Stallseite verfügen die Stichkanäle ebenso über weitere Luftschächte, die nach Bedarf manuell freigegeben oder verschlossen werden können.

Vorstellung der Messtechnik und Untersuchungszeitraum

Zur Bewertung des Zuluftkanales wurde im Stall 2 ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, in dessen Verlauf Temperaturen, Volumenströme und Energieverbräuche sowie punktuell Druckdifferenzen und Ammoniakgehalte der Stallluft gemessen wurden. Der betrachtete Stall verfügt über 2.268 Mastplätze in 7 Abteilen (je 324). Er dient ausschließlich der Endmast ab ca. 50 kg.

Die Abluftführung erfolgt über Zentralabsaugung. Da der Stall durch eine Brandmauer in 2 Abschnitte mit 3 bzw. 4 Abteilen geteilt werden musste, ist auch der Abluftkanal zweigeteilt. Für den kleineren Bereich wurden 4 und für den Größeren 6 Abluftkamine errichtet. Die eingesetzten Ventilatoren haben eine maximale Förderleistung von je 23.500 m³h⁻¹. Die Abteile verfügen über je 4 Schächte zur Zentralabsaugung.

An mehreren Stellen im und um den Stall wurden Datenlogger Tinytag Ultra oder Plus für Temperatur und Luftfeuchte angebracht. Die Abbildung 26 zeigt das Messschema der Temperaturmessungen im Versuchsstall.

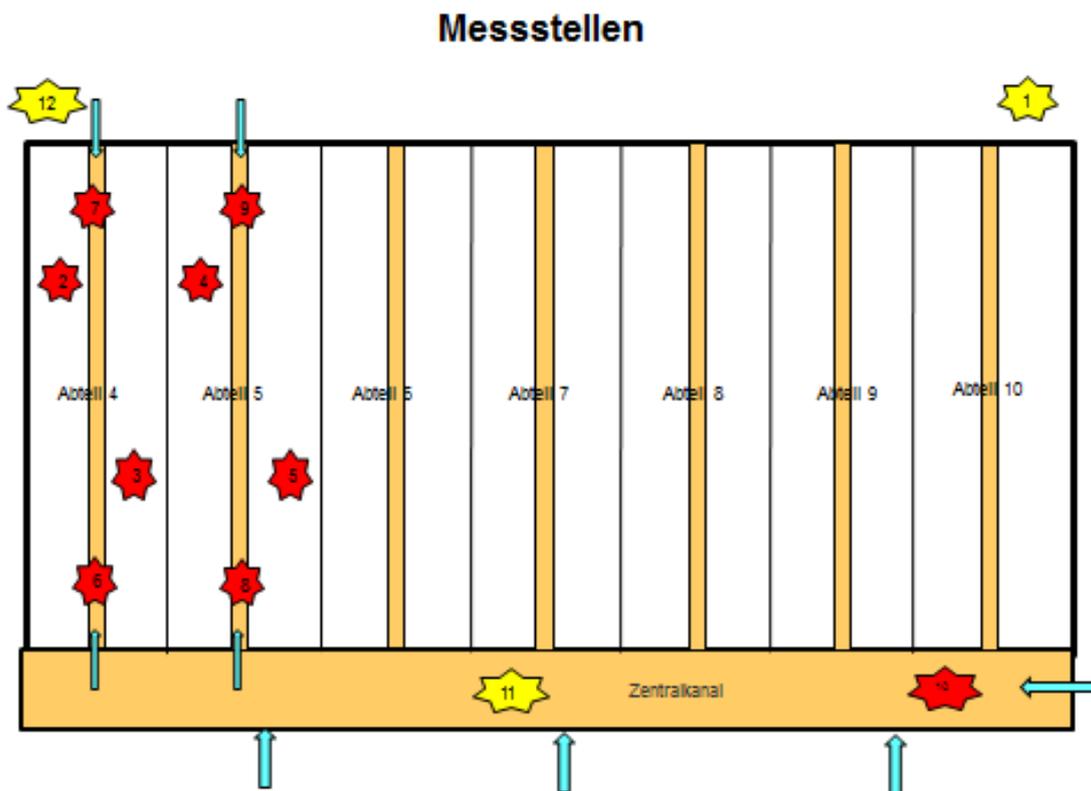


Abbildung 17: Schematischer Stallgrundriss mit Messstellen der Stallanlage in Naundorf (POMMER, 2015)

Außerdem wurden handelsübliche Unterzähler für elektrischen Strom der einzelnen Anlagenkomponenten installiert. Die Zentralabsaugung wurde mit Messventilatoren ausgerüstet.

Um die Wirkung verschiedener Kühlsysteme auf die Zulufttemperatur vergleichen zu können, ist eine einheitliche Temperatur als Bezugsbasis erforderlich. Heidenreich (2012) stellte dazu eine Methode vor, bei der der Kühleffekt in K bei 30°C Außentemperatur dargestellt wird. Dazu werden die Temperaturdifferenzen zwischen „Eintritt in den Stall“ und „Eintritt ins Zuluftsystem“ (entspricht der Außentemperatur) ermittelt. Anschließend wird die lineare Regression der Temperaturdifferenz zur Außentemperatur ermittelt.

Untersuchungszeitraum

Die Unterflurzuluftführung wurden im Zeitraum von Januar 2014 bis Januar 2015 untersucht.

3.2.2 Einsatz einer Grundwasser-Wärmepumpe

In einer saisonalen Betrachtung wurden drei baugleiche Grundwasser-Wärmepumpen des Typs Fighter 1330 (NIBE Systemtechnik GmbH, Celle, Germany) in zwei wärmegeämmten, zwangsbelüfteten Schweineställen in Westdeutschland (Kreis Recklinghausen in NRW) untersucht. Eine der Wärmepumpen wurde in einem Abferkelstall (88 m x 37 m Grundfläche) eingebaut, die zwei anderen in einem Ferkelaufzuchtstall (61 m x 35 m Grundfläche). Jede Wärmepumpe besteht aus zwei Modulen (A und B). Beide Ställe sind Teil eines Veredelungsbetriebs mit 740 Zuchtsauen, die zur Jungsauvermehrung eingesetzt werden. Abferkel- und Ferkelaufzuchtstall wurden 2009 im Außenbereich neu errichtet.

Abferkelstall

Der Abferkelstall verfügt über 172 Abferkelplätze, aufgeteilt in vier Abteile mit jeweils 38 Abferkelbuchten und einem weiteren Abteil mit 20 Abferkelbuchten. Jede Bucht ist mit einer 0,65 m² großen Warmwasser-Ferkelheizplatte ausgestattet, die durch die Wärmepumpe bedient werden. Zur besseren Tierkontrolle sind keine zusätzlichen Wärmeschutzabdeckungen der Ferkelnester installiert worden. Für die neugeborenen Ferkel werden jedoch in den ersten Tagen zusätzlich 100 W Infrarot-Wärmelampen eingesetzt.

Die beiden Module der Wärmepumpe weisen zusammen eine Nenn-Heizleistung von 40 kW auf. In diesem Stall speisen die Module A und B unterschiedliche Speicher. Das Modul A ist für die Temperierung eines Pufferspeichers (500 Liter) auf etwa 40°C zuständig. Dieser dient als Heizquelle für die Warmwasser-Ferkelnestheizplatten. Wärmepumpenmodul B steht als Wärmequelle für einen Brauchwasserspeicher (300 l) zur Verfügung und sorgt für eine Wassertemperatur im Speicher von circa 50°C (Abb. 27a).

Ferkelaufzuchtstall

Der Ferkelaufzuchtstall gliedert sich in acht gleichgroße Abteile mit jeweils 500 Aufzuchtplätzen. Beheizt werden die Abteile durch vier an der Wand übereinander parallel verlaufenden Stahlrohren, die vom Warmwasser der Wärmepumpen durchströmt werden. Der Durchmesser der Rohre beträgt 63 mm. Die Liegebereiche der Abteile sind mit Wärmeschutzabdeckungen versehen. Die Abteilstemperatur liegt in Abhängigkeit vom Alter der Tiere zwischen 32°C und 24°C. Wird die Solltemperatur um mehr als 2 K

unterschritten, schaltet sich ein 10 kW Flüssiggas-Heizluftgebläse zu der Warmwasserheizung hinzu. Zum Aufheizen der Abteile vor Neubelegung oder zum Abtrocknen kommt nach der Reinigung eine 30 kW Heizluftgebläse zum Einsatz.

Zur regulären Beheizung der Abteile werden zwei Grundwasserwärmepumpen verwendet. Diese sind in modularer Master-Slave-Kombination installiert, d.h. die Master-Wärmepumpe wird bei geringem Heizleistungsbedarf gesondert betrieben. Die Slave-Wärmepumpe wird von der Master-Wärmepumpe gesteuert und bei hohem Heizbedarf zugeschaltet. Alle vier Wärmepumpenmodule der zwei Wärmepumpenmodule speisen eine 1.500l-Pufferspeicher mit einer Solltemperatur von ca. 50°C.

Als Wärmequelle dient in beiden Heizkreisläufen (Abferkel- und Aufzuchtstall) Grundwasser mit einer Temperatur von ungefähr 10°C, das aus einem gemeinsamen Förderbrunnen mit einer frequenzgeregelten Grundwasserpumpe (7,5 kW; max. 40 m³ h⁻¹) aus 110 m Tiefe bezogen wird. Danach zirkuliert das Grundwasser mit einem Betriebsdruck von 1,30 bar durch die Wärmepumpe und gibt hier seine Energie an das Arbeitsmittel ab. Nachdem das Wasser die Wärmepumpen durchlaufen hat, wird es in einen Schluckbrunnen (70 m tief) weitergepumpt, der sich in 20 m Entfernung vom Förderbrunnen befindet (Abb. 27b).

Die Grundwasser-Wärmepumpen von Abferkel- und Ferkelaufzuchtstall werden unabhängig voneinander betrieben. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit dieser Systeme gewährleistet.

Untersuchungszeitraum

Die beiden Wärmepumpen-Systeme wurden im Zeitraum vom 8. Dezember 2011 bis zum 15. Februar 2012 untersucht. Es wurden kontinuierlich folgende Messparameter erfasst: Wärmemenge, Stromverbrauch, Betriebsstunden der Wärmepumpen, Temperaturen der Außen- und Abteilterperatur sowie Flüssiggasverbrauch.

Erfassung der Wärmemenge

In den Heizkreisläufen der beiden Stallbereiche erfassten vier geeichte ALLMESS Ultraschall Wärmemengenzähler des Typs CF Echo II die von der Grundwasserwärmepumpe erzeugte Wärmemenge in kWh.

Dokumentation der Wasser-, Strom- und Gasverbräuche

Zur Dokumentation der durch die Anlage geflossenen Wassermenge wurden insgesamt drei geeichte Wasserzähler in den Grundwasservorläufen der Wärmepumpensysteme und im Trinkwasserversorgungsnetz eingesetzt. Die Erfassung der Wassermenge war notwendig, da auch die Trinkwasserversorgung beider Ställe mit der gleichen Grundwasser-Förderpumpe gewonnen wird. Parallel hat ein Drehstromzähler den Energiebedarf der Grundwasser-Förderpumpe aufgezeichnet, welcher anschließend den einzelnen Grundwasserabnehmern (Abferkel- bzw. Ferkelaufzuchtstall) quantitativ zugeordnet werden konnte. Um eine energetische Vergleichbarkeit beider Wärmepumpensysteme zu erreichen, wurde hier gleichermaßen der zusätzliche Elektroenergiebedarf mit separaten Drehstromzählern erfasst. Der Flüssiggasverbrauch des Ferkelaufzuchtstalls (in m³) erfolgte mittels geeichtem Flüssiggaszähler.

Aufzeichnungen durch die Wärmepumpen-Software

Eine spezielle Wärmepumpensoftware hat kontinuierlich verschiedene Betriebsparameter erfasst, u.a. die Betriebsstunden der einzelnen Wärmepumpen in Stunden (h) sowie die Grundwassertemperatur im Wärmepumpeneingang und -ausgang in Grad Celsius (°C). Letzteres konnte, obwohl jede WP mit jeweils zwei Vor- und Rücklauf temperaturfühlern ausgestattet war, nicht erfüllt werden. Die Temperaturfühler stellten aufgrund eines Defektes keine brauchbaren Datensätze zur Verfügung.

Temperaturerfassung

Die Außentemperatur sowie die Abteilmperaturen beider Ställe sind mit Temperaturdatenloggern des Typs Testo T175 T1 (Testo AG, Lenzkirchen, Germany) erfasst und aufgezeichnet worden. Der Messbereich dieser Sensoren reicht von -35°C bis +70°C und weist eine Genauigkeit von ±0,5°C auf.

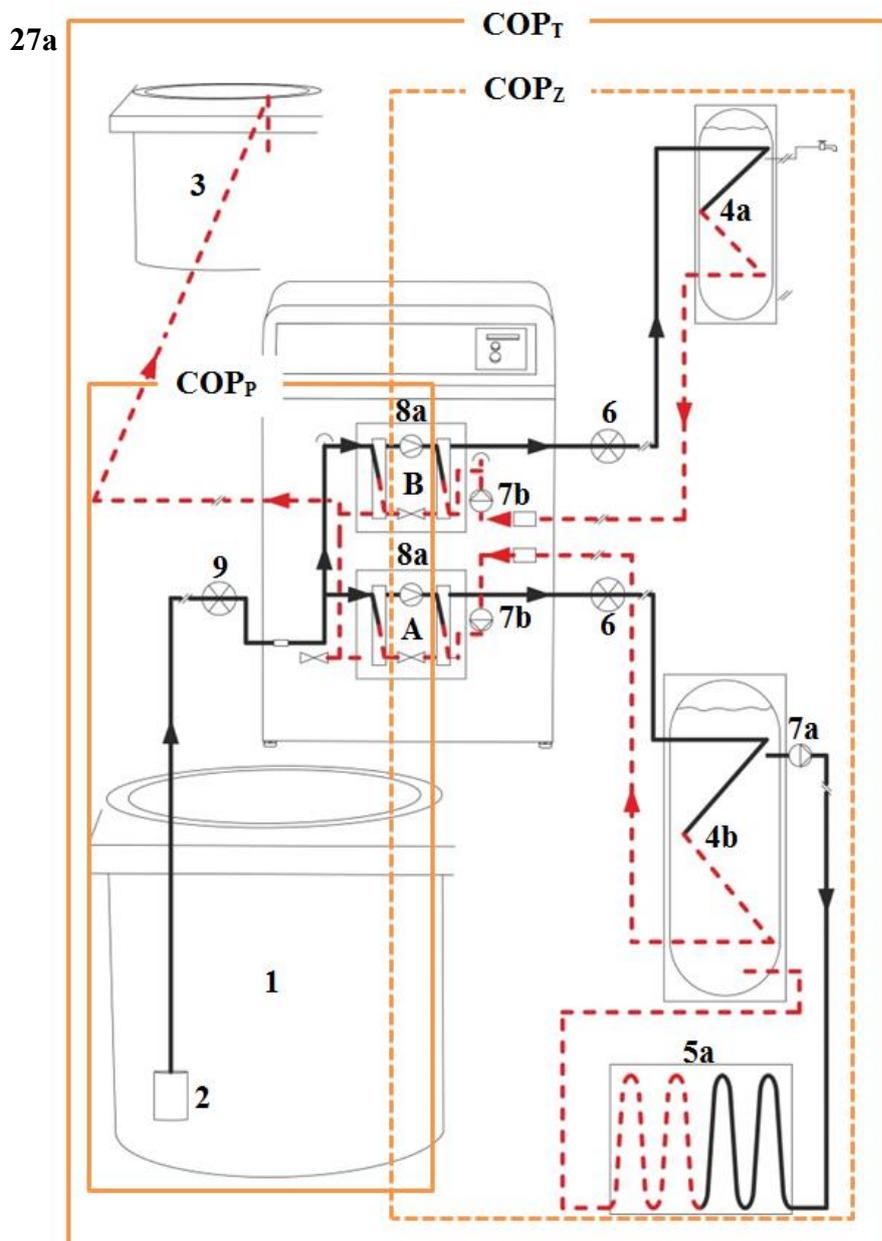
Methode der Datenauswertung

Die statistische Auswertung erfolgte durch Microsoft Excel 2010 und Systat Sigma Plot 11.0. In der Datenanalyse wurden gleichermaßen kurzzeitige als auch langfristige Untersuchungszeiträume herangezogen. Dabei wurde einerseits das maximale Leistungspotential unter extremen Klimabedingungen bestimmt und andererseits eine realistische Einschätzung über das langfristige Leistungspotential der untersuchten Technik

gegeben. Bei den genannten Mittelwerten handelt es sich um das arithmetische Mittel (\bar{x}); der Median (\tilde{x}) wird gesondert dargestellt.

Bilanzgrenzen und COP-Berechnung

In der Praxis wird die Effizienz der WP durch die COP (vgl. Formel 9) ausgedrückt. Dabei sind grundsätzlich verschiedene Bilanzgrenzen nach Anzahl der hinzugezogenen elektrischen Verbraucher im System möglich (vgl. COP_T), um unterschiedliche Effizienzstufen eines Heizkreislaufes zu ermitteln. Demzufolge werden insgesamt drei Bilanzgrenzen definiert, die jeweils in Abbildung 27a und 27b dargestellt sind.



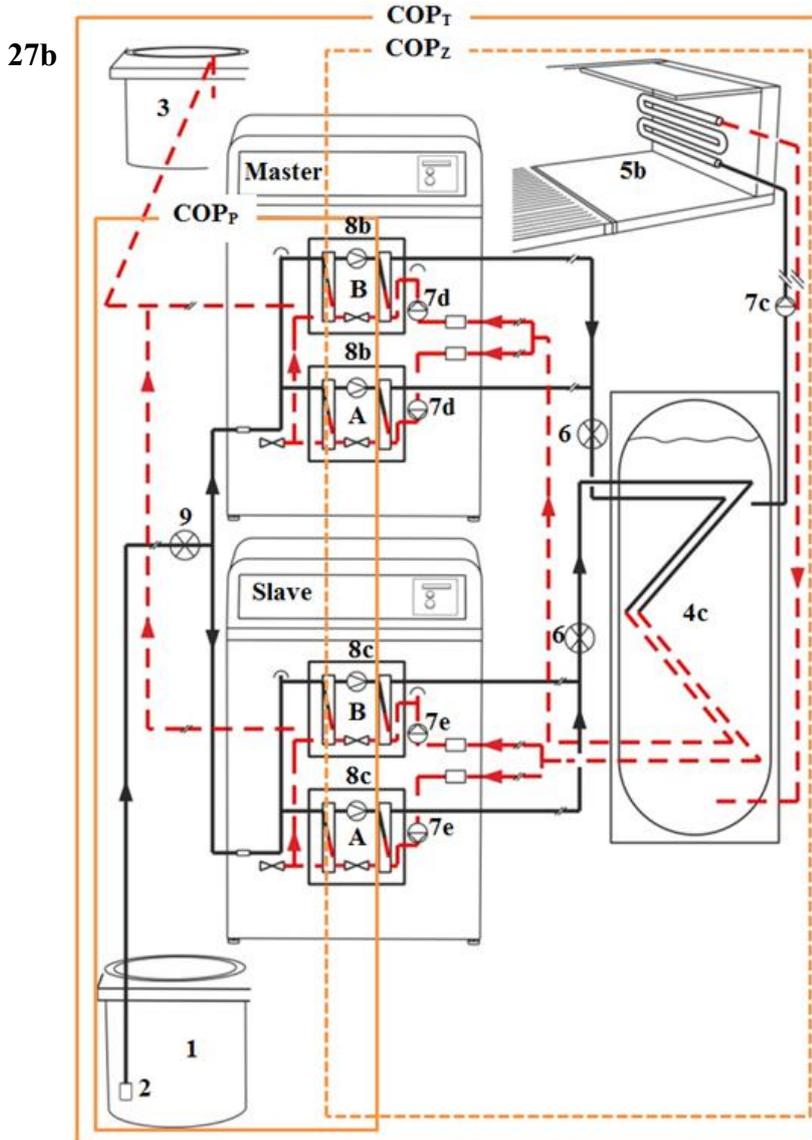


Abbildung 18: Installationsschema der WP im Abferkelstall (a) und der Ferkelaufzucht (b) mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der COP. 1 Förderbrunnen (110 m tief); 2 Grundwasserförderpumpe; 3 Schluckbrunnen (70 m tief); 4 Pufferspeicher (a) Brauchwasser (50°C), (b) Heizung Ferkelstall (45°C), (c) Heizung Ferkelaufzucht (50°C); 5a Ferkelstall; 5b abgedeckter Liegebereich mit Heizrohren; 6 Wärmemengenzähler; 7 Umwälzpumpen (a) Heizkreislauf Abferkelstall (b) Module A&B Abferkelbereich (c) Heizkreislauf Ferkelaufzucht, (d) Module A&B Master-WP, (e) Module A&B Slave-WP; 8 Kompressoren (a) Module A&B Abferkelbereich, (b) Module A&B Master-WP, (c) Module A&B Slave-WP; 9 Wasserzähler.

Die Bilanzgrenzen variieren in Abhängigkeit der berücksichtigten Anzahl der elektrischen Verbraucher. Nachstehend werden durch Berechnungsformeln die Bilanzgrenzen für die COP genauer erklärt.

$$COP_T = \frac{Q_{WP}}{W_{FP} + W_{V,A+B} + W_{U,A+B} + W_{U,AS \text{ bzw. } U,FA}}$$

$$COP_P = \frac{Q_{WP}}{W_{FP} + W_{V,A+B}}$$

$$COP_Z = \frac{Q_{WP}}{W_{V,A+B} + W_{U,A+B} + W_{U,AS \text{ bzw. } U,FA}}$$

COP = coefficient of performance

COP_T = coefficient of performance unter Berücksichtigung der Heizenergie
von der WP und aller elektrischen Verbraucher

COP_P = coefficient of performance unter Berücksichtigung des
Elektroenergieverbrauch von der Förderpumpe (Grundwasser) und dem
Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der
Ferkelaufzucht beider WP)

COP_Z = coefficient of performance unter Berücksichtigung der Heizenergie
von der WP, der Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der
Ferkelaufzucht beider WP) und der Elektroenergieverbrauch der
Umwälzpumpen A + B (bei der Ferkelaufzucht beider WP)

Q_{WP} = Heizenergie von der WP

W_{FP} = Elektroenergieverbrauch von der Förderpumpe (Grundwasser)

W_{V,A+B} = Elektroenergieverbrauch der Verdichter A + B (bei der
Ferkelaufzucht beider WP)

W_{U,A+B} = Elektroenergieverbrauch der Umwälzpumpen A + B (bei der
Ferkelaufzucht beider WP)

W_{U,AS bzw. U,FA} = Umwälzpumpe Abferkelstall bzw. Ferkelaufzucht

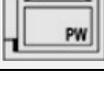
4 Ergebnisse

4.1 Charakterisierung der ausgewählten Dämmstoffe und deren Anwendungsbereich

In den vorherigen Abschnitten wurden organische und anorganische Dämmstoffe nach dem Ursprung ihrer Rohstoffe unterteilt.

In Tabelle 5 sind zur besseren Beschreibung der Dämmstoffe, der Einsatzbereich, die Art der Dämmung und die dazugehörige Abkürzung aufgeführt.

Tabelle 5: Bedeutung und Abkürzung der Einsatzbereiche für Dämmstoffe nach (DREWER, 2013)

Einsatzbereich	Art der Dämmung	Abkürzung	Zeichen
Decken- und Dachdämmung	Außendämmung von Dächern oder Decken, Dämmung unter Abdichtungen	DAA	
	Außendämmung von Dächern oder Decken, Dämmung unter Decken	DAD	
	Innenraumdämmung von Decken oder Bodenplatten, Dämmung unter Estrich ohne Schallschutzanforderungen	DEO	
	Innenraumdämmung von Decken oder Bodenplatten, Dämmung unter Estrich mit Schallschutzanforderungen	DES	
	Innenraumdämmung von Decken oder Dächern, Dämmung unter Sparren, Tragkonstruktionen, abgehängten Decken	DI	
	Außendämmung von Dächern	DUK	
	Zwischensparrendämmung, Dämmung zweischaliger Dächer, Dämmung zugänglicher, aber nicht begehbare oberster Geschossdecken	DZ	
	außen liegende Wärmedämmung unter Bodenplatten gegen Erdreich	PB	
Perimeterdämmung	außen liegende Wärmedämmung von Wänden gegen Erdreich	PW	

Einsatzbereich	Art der Dämmung	Abkürzung	Zeichen
Wanddämmung	Außendämmung von Wänden hinter Abdichtung	WAA	
	Außendämmung von Wänden hinter Bekleidung	WAB	
	Außendämmung von Wänden unter Putz	WAP	
	Dämmung von Konstruktionen in Holzrahmen- und Holztafelbauweise	WH	
	Innendämmung von Wänden	WI	
	Dämmung zwischen Haustrennwänden mit Schallschutz-Anforderungen	WTH	
	Dämmung von Raumtrennwänden	WTR	
	Dämmung von zweischaligen Wänden, Kerndämmung	WZ	

4.1.1 Organische Dämmstoffe natürlichen Ursprungs und deren Kennzahlen

Zellulose

Bei Zellulose-Dämmstoffen handelt es sich um ein Recyclingprodukt aus nachwachsenden Rohstoffen. Dieses Produkt wird aus zerkleinertem, sortenreinem Altpapier hergestellt. Dazu wird das zerkleinerte Altpapier in einer Feinmühle zu einem lockeren, faserigen Material verarbeitet (Abb. 16).



Abbildung 19: Aufnahme Zellulose Dämmstoff

(<http://www.raumprobe.de/material/isofloc-waermedaemmtechnik-gmbh/zellulose-daemmstoff-isofloc-l/datenblatt>)

Erhältlich ist dieser Dämmstoff als Einblas-, Schütt- oder Sprühdämmung, als Platte, in Form von Pellets, als dämmender Putz oder als Wabe. Zellulose besitzt, wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, eine sehr hohe Wärmespeicherkapazität von $2.005\text{-}2.100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Des Weiteren ist Zellulose feuchteregulierend und weist schalldämmende Eigenschaften auf. Einblas-, Sprüh- und Zelluloseplatten weisen einen guten Wärmeleitfähigkeitswert λ von $0,04 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Da Zellulose stark hydrophil ist und keine wasserabweisende Wirkung besitzt, muss der Dämmstoff vor übermäßiger Feuchtigkeit geschützt werden, weil er sonst aufquillt und seine dämmenden Eigenschaften verliert. Des Weiteren sind Zellulosefasern sehr empfindlich gegenüber Säuren und Laugen. Zum Zwecke der Brandverhütung werden der Zellulose Borsalze, Magnesiumsulfat oder Ammoniumphosphat zugesetzt, so dass alle Zellulose-Dämmstoffe der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) entsprechen. Borsalze werden allerdings als „reproduktionstoxisch“ und „schwach wassergefährdend“ eingestuft. Produkte mit diesem Zusatz können nicht kompostiert, sondern müssen thermisch verwertet werden. Es sind aber bereits alternative Zellulose-Dämmstoffe ohne Borsalze erhältlich. Bei der Fertigung von Zellulose-Platten wird unter anderem noch Tallharz, Aluminiumsulfat oder Ligninsulfonat als Bindemittel zugegeben. Um die Stabilität der Platte zu gewährleisten, werden Polyolefinfasern oder Jutegarn mit eingearbeitet. Bei der Verarbeitung dieser Dämmstoffe muss ein entsprechender Anzug zum Schutz vor entstehendem Produktstaub getragen werden. Da es sich um ein Recyclingprodukt handelt, wird zu dessen Herstellung nur eine geringe Primärenergie benötigt. Da Zellulosepellets, Zellulosedämmputz und Zellulosewaben noch keine Zulassung besitzen, dürfen diese auch

nicht als Dämmstoffe eingesetzt werden. Der Dämmstoff Zellulose besitzt einen Marktanteil von 1 % (DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Tabelle 6: Angaben zu den physikalischen Größen von Zellulose-Dämmprodukten*Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)

Produktname	Einblas-zellulose	Schütt-zellulose	Zellulosesprüh-dämmung	Zelluloseplatte	Zellulose-pellets	Zellulose-dämmputz	Zellulosewabe
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	0,04	0,045	0,04	0,04	0,07	0,052	0,074-0,1
Rohdichte ρ in kg/m ³	25-65	30-65	40-65	70	500	93	100
Wärmespeicher-kapazität c in J/(kgK)	2.100	2.100	2.100	2.000	2.000	2.005	-
Baustoffklasse	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
Wasserdampf-diffusions-widerstand μ	1-2	1-2	1-2	2-3	1	2-3	-
wasserabweisende Wirkung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	-
Druckbelastbarkeit	-	nein	-	gering	mittel	-	-
Anwendungstypen*	DAD, DI, DZ, WH, WI, WTR						
Regelungen und Zulassungen	Z-23.11-280, Z-23.11-289, Z-23.11-1236, Z-23.11-1921, Z-23.11-1262, Z-23.16-1554, Z-23.16-1555, Z-23.16-1636, ETA-05/0186, ETA-06/0076, ETA-06/0085, ETA-06/0086, ETA-10/0004, ETA-10/0384	Z-23.11-1236, Z-23.16-1554, Z-23.16-1555, ETA-05/0186	Z-23.11-280, Z-23.11-289, Z-23.16-1555, Z-23.16-1636, ETA-04/0081, ETA-08/0009, ETA-08/0029	Z-23.16-1338	keine Zulassung	keine Zulassung	keine Zulassung

Holz

Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, der vornehmlich in der winterlichen Ruhezeit geschlagen wird. Obwohl das Holz zu diesem Zeitpunkt sehr wenig Feuchtigkeit enthält, muss es anschließend getrocknet werden. Neben seinen bekannten Einsatzgebieten als Bau- oder Brennstoff kann Holz auch speziell zur Dämmung eingesetzt werden. Für den Einsatz als Dämmstoff werden vornehmlich Nadelhölzer, teilweise auch Laubhölzer verwendet. In der Regel nimmt man Späne und Hackschnitzel von Fichtenholz aus Sägewerken. Dämmmaterialien aus Holz sind in verschiedenen Formen erhältlich. Die bekanntesten Dämmprodukte aus Holz sind die Holzweichfaserplatte, Holzweichfaserplatte und die Holzwolllleichtbauplatte. Neben Holzfasern kommen auch ein Holzfasergemisch mit Lehm, Holzspänen oder Holzgranulat als Schütt- beziehungsweise Stopfdämmstoff zum Einsatz.



Abbildung 20: Aufnahme von Holzdämmstoffen (DANGUILLIER, 2015)

Wie in Tabelle 7 dargestellt, weisen dämmende Produkte aus Holzfasern eine hohe Wärmespeicherkapazität c von $2.100-2.150 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Nur Holzweichfaserplatten zeigen je nach Hersteller eine Spannweite von Wärmespeicherkapazitäten c von $1.500-2.100 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Teilweise sind Dämmstoffe aus Holzfasern auch schalldämmend. Des Weiteren sind sie diffusionsoffen, feuchteregulierend, formstabil und je nach Verarbeitung auch flexibel und druckstabil. Die Wärmeleitfähigkeit λ weist je nach Hersteller bei der Holzweichfaserplatte, -platte und -faser die geringsten Werte ab $0,039 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Die Funktionsfähigkeit der unterschiedlichen Holzprodukte kann durch verschiedene Stoffe beeinflusst werden.

Tabelle 7: Angaben zu den physikalischen Größen von Holz-Dämmprodukten
***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)**

Produktname	Holzweichfaser- matten	Holzweich- faserplatte	Holzwoolleicht- bauplatte	Holz- faser	Holz- faser mit Lehm	Holz- späne	Holz- granulat
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	0,039- 0,040	0,040- 0,083	0,09	0,04	0,045	0,049	0,075-0,094
Rohdichte ρ in kg/m ³	40- 55	110- 600	350-440	25-45	90-110	50-90	370-480
Wärmespeicher- kapazität c in J/(kgK)	2.100	1.500- 2.100	2.100	2.100	2.150	2.100	-
Baustoffklasse	B2	B1, B2	B1	B2	B2	B2	B1, B2
Wasserdampf- diffusions- widerstand μ	1- 5	3-5	2-5	1-3	1-2	2	0-5
wasserabw eisende Wirkung	nein	ja, nein	ja	nein	nein	nein	nein
Druckbelastbarkeit	gering	ja	ja	nein	-	-	ja
Anw endungstypen*	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WH, WTR	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WH, WTR	DIN EN 13168, Z-23.11-1120, Z-23.11-1883, ETA-12/0236	keine Zulassung	keine Zulassung	siehe Tabelle Teil 1	Z-23.16-1657, Z-23.11-1718, Z-23.11-1852
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13171, Z-23.15-1417, Z-23.15-1452, Z-23.15-1452	DIN EN 13171, Z-23.15-1417, Z-23.15-1452, Z-33.43-931, Z-33.47-668	DIN EN 13168, Z-23.15-1563	Z-23.11-1120, Z-23.11-1883, ETA-12/0236	keine Zulassung	Z-23.16-1657, Z-23.11-1718, Z-23.11-1852	Z-23.11-1718, Z-23.11-1852

Bei der Herstellung einer Holzweichfasermatte wird beispielsweise zusätzlich ein Flammschutzmittel, meist Ammoniumphosphat beigefügt. Dennoch erreichen nur die Holzweichfaserplatte, -wolleleichtfaserplatte und das Holzgranulat je nach Hersteller Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar). Um die Stabilität der Platten-Dämmstoffe zu erhöhen, werden synthetische Fasern oder Maisstärkefasern untergemischt. In der Holzweichfaserplatten-Produktion können zur Erhöhung der Festigkeit zusätzlich harz- oder bitumenhaltige Bindemittel verwendet werden. Außerdem werden Paraffine und ggf. Latex, Wasserglas und Weißleim als Hydrophobierungsmittel, d. h. zum Erzeugen einer wasserabweisenden Wirkung, hinzugegeben. Diese wasserabweisende Wirkung besitzen je nach Hersteller nur Holzweichfaserplatten und Holzwoolleleichtbauplatten. Bei der Erzeugung der reinen Holzfasern werden lediglich Borsalze oder Ammoniumphosphat als Flammschutzmittel beigefügt. Die Energie, die bei der Herstellung der Dämmstoffe aufgewendet werden muss, ist sehr hoch, was den Vorteil der kurzen Transportwege aus heimischer Holzproduktion schmälert. Eine Kompostierung dieser Dämmstoffe ist nur dann gewährleistet, wenn keine synthetischen Zusatzstoffe oder Fasern enthalten sind. Ansonsten kann durch thermische Verwertung oder Recycling Abhilfe geschaffen werden. Gesundheitliche Risiken beim Einsatz von Holzfaserdämmprodukten sind nicht bekannt. Holzfasern mit Lehm besitzen derzeit weder eine Europäische technische Zulassung noch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Die Holzwoolleplatte besitzt zurzeit einen Marktanteil von etwa 1 %, die Holzfasern dagegen >1 % (HOLZMANN et al., 2012, DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Hanf

Hanf ist ein nachwachsender Rohstoff, der ganz traditionell als Feldfrucht angebaut und ab August vor der Samenreife mit speziellen Erntemaschinen eingefahren wird. Hanf kann einen Fasergehalt von bis zu 35 % enthalten und ist in verschiedenen Formen wie Platten, Matten oder als loser Einblas-, Schütt- oder Stopfdämmstoff erhältlich (Abb. 18). Als Dämmstoff besitzt er schallisolierende und feuchteregulierende Eigenschaften.



Abbildung 21: Aufnahme von Hanfdämmstoffen (DANGUILLIER, 2015)

Wie in Tabelle 8 dargestellt, eignet sich Hanf hervorragend als Wärmeschutz durch geringe Wärmeleitfähigkeit λ beispielsweise der Hanfmatte und -platte ab $0,04 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ je nach Hersteller. Des Weiteren bringen die Hanffaser, -stopfwohle und Hanfgemische eine hohe Wärmespeicherkapazität c von bis zu $2.200 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Als eigenschaftsverändernde Zusätze werden Hanf-Schüttdämmstoffen neben Hanffasern unter anderem Blähton, Blähglas, Lehm, Bitumen, Kalksplitt oder Polypor beigemischt. So können Hanfgemische einen Wasserdampfdiffusionswiderstand μ von 1-9 erzielen. Da es sich bei Hanf um ein Naturprodukt handelt, muss es mit Natriumcarbonat, Borsalz oder Ammoniumphosphat als Flammenschutzmittel, aber auch als Antipilzmittel behandelt werden, um der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zu entsprechen. Wie aus Tabelle 8 zu entnehmen ist, können einige Hersteller auch Produkte aus Hanffaser, -stopfwohle und -gemischen anbieten die bereits eine Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar) erzielen.

Tabelle 8: Angaben zu den physikalischen Größen von Hanf-Dämmprodukten
***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)**

Produktname	Hanffaser	Hanfstopfwohle	Hanfmatte	Hanfplatte	Hanfgemische
Wärmeleitfähigkeit λ in $W \cdot m^{-1} K^{-1}$	0,048-0,050	0,045-0,047	0,040-0,047	0,040-0,041	0,045-0,100
Rohdichte ρ in $kg \cdot m^{-3}$	50-60	50	30-40	100	100-400
Wärmespeicherkapazität c in $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$	2.200	1.700-2.200	1.600-1.700	1.700	1.600-2.200
Baustoffklasse	B1, B2	B1, B2	B2	B2	B1, B2
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	12	12	12	12	19
wasserabweisende Wirkung	nein	nein	nein	nein	nein
Druckbelastbarkeit	nein	nein	nein	ja	je nach Hersteller
Anwendungstypen*	DZ ,DI, WH, WI, WTR				
Regelungen und Zulassungen	keine Zulassung	keine Zulassung	ETA-05/0037	keine Zulassung	Z-23.11-1185, Z-23.11-1799, ETA-11/0204

Zur Herstellung dieser Hanfprodukte bedarf es nur eines geringen Primärenergieaufwandes. Soweit keine synthetischen Fasern im Dämmstoff enthalten sind, ist dieser sogar teilweise kompostierbar oder muss thermisch verwertet werden. Meist werden den Hanffaserplatten anteilig auch synthetische oder Maisfasern als Stützfasern zugesetzt. Aufgrund ihres natürlichen Ursprungs sind bei Hanfprodukten keine gesundheitlichen Bedenken bekannt. Unter den Hanfprodukten haben derzeit nur die

Hanfmatte und die Hanfgemische eine Europäische technische Zulassung. Alle weiteren Hanfprodukte besitzen diese momentan noch nicht. Hanfdämmstoffe besitzen einen Marktanteil von weit unter 1 % (DREWER, 2013, HOLZMANN et al., 2012 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Flachs

Flachs, auch Gemeiner Lein genannt, ist ein nachwachsender Rohstoff, der zur Gewinnung der Bastfaser oder wegen seiner ölhaltigen Samen angebaut wird. Er wird ca. einen Meter hoch und kann mittels einer Getreidedrillmaschine Mitte bis Ende April ausgesät und Anfang Juli bis Mitte August geerntet werden. Dazu wird die gesamte Pflanze aus dem Boden ausgerissen, damit die bastfaserhaltigen Stängel, welche bis in die Wurzeln des Flachs reichen, voll genutzt werden können. Die Stängel können einen Fasergehalt von 19-25 % aufweisen, der sich aus 25-100 mm langen Elementar- oder Einzelfasern zusammensetzt. Verwendung findet Leinöl und Leinsamen vor allem als Nahrungsmittel oder Viehfutter. Die Flachsfasern werden überwiegend als Dämmmaterial oder zur textilen Verarbeitung genutzt. Flachsschäben werden hingegen zur Wärmeenergiegewinnung verwendet oder zu Spanplatten verpresst (HOLZMANN et al., 2012). Erhältlich sind die Dämmstoffe in Form von Fasermatten, als Flachsschäben oder als einfache Fasern, die als Stopf- oder Schüttdämmstoff verwendet werden können (Abb.19).



Abbildung 22: Aufnahme von Flachsdämmstoffen

(<http://www.flachsaemmung.de/Bilder/PLATTEN.jpg>)

Flachsmatten besitzen schalldämmende und feuchteregulierende Eigenschaften und sind alkalibeständig. Wie in Tabelle 9 angegeben, besitzen Flachsdämmstoffe eine mittlere Wärmespeicherkapazität c von $1.550 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufwärts, und eine gute Wärmeleitfähigkeit λ ab $0,039 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Tabelle 9: Angaben zu den physikalischen Größen von Flachs-Dämmprodukten

***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013).**

Produktname	Flachsfaser	Flachsfaser- matte	Flachsplatte	Flachsschäben
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,04	0,039- 0,04	0,04	0,05
Rohdichte ρ in kg m^{-3}	50	30- 60	30- 50	100
Wärmespeicher- kapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	1.550-1.640	1.550- 1.640	1.660	1.550- 1.640
Baustoffklasse	B3	B2	B2	B2
Wasserdampf- diffusions- widerstand μ	1	1- 5,7	1	1
wasserabweisende Wirkung	nein	nein	-	nein
Druckbelastbarkeit	nein	nein	gering	gering
Anwendungstypen*	DZ, DI, WH, WI, WTR			
Regelungen und Zulassungen	keine Zulassung	ETA-09/0023	ETA-09/0023	keine Zulassung

Vorteilhaft ist auch die Flexibilität und Klemmfähigkeit der Matten- und Plattendämmstoffe. Zum Erhalt des Dämmvolumens können den Dämmmaterialien „Polyesterstützfaser oder 10 % thermo-mechanisch aufgeschlossene Kartoffelstärke beigefügt“ (HOLZMANN et al., 2012) werden. Als Flammschutzmittel beziehungsweise

Fungizid wird dem Dämmstoff entweder Ammoniumphosphat, Natriumcarbonat oder Borsalz zugesetzt. Bis auf Flachsfasern fallen alle Flachsdämmstoffe unter die Baustoffklasse B2 (normalentflammbar). Aufgrund ihrer beigefügten Inhaltsstoffe sind Flachsdämmstoffe nur teilweise kompostierbar oder thermisch verwertbar. Flachs ist ein heimischer, mit niedriger Primärenergie erzeugter Dämmstoff, der auf Grund seiner Regionalität leicht verfügbar ist. Da Borsalz in den Flachsmatten enthalten sein kann und dieser Stoff als reproduktionstoxisch eingestuft wird, gibt es bei dessen Einsatz allerdings gesundheitliche Bedenken. Unter den Flachsprodukten besitzt nur die Flachsfasermatte und die Flachsplatte eine Europäische Technische Zulassung. Flachsdämmstoffe besitzen einen Marktanteil von weit unter 1 % (DREWER, 2013, HOLZMANN et al., 2012 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Seegras

Seegras ist eine Blütenpflanze, die als ‚submarin‘ in allen Weltmeeren bis zu einer Tiefe von 15 Metern gedeiht, wobei Lichtmangel in größeren Tiefen des Meeres die natürliche Vegetationsgrenze schafft. Im Mittelmeer sind das Gemeine Seegras (*Zostera Marina*) und das etwas seltener vertretene Zwerg-Seegras (*Zostera Noltii*) beheimatet. Die Wuchshöhe dieses nachwachsenden Rohstoffs wird mechanisch durch beim Wellenschlag abknickende Blätter und durch Abfrieren der obersten Blattspitzen bei Niedrigwasser reguliert. Diese abgestorbenen Pflanzenteile können dann als gestrandetes Material geerntet werden (HOLZMANN et al., 2012). Neben seiner heutigen Funktion als Dämmstoff diente es schon vor Hunderten von Jahren als Verpackungsmaterial, Füllstoff beispielsweise für Kissen und als medizinisches Produkt. Heute kann es vornehmlich als Schütt-, Stopf-, und Einblasdämmstoff oder in Form von Matten und Faserplatten erworben werden (Abb. 20).



Abbildung 23: Abbildung von Seegrasfasern und Seegrasfaserbällen (DANGUILLIER, 2015)

Aufgrund seines hohen Salzgehalts ist Seegras schwer entflammbar und benötigt keine weiteren chemischen brandverhütenden Zusätze. Eine Entsorgung durch thermische Verwertung des Materials ist somit ausgeschlossen, aber eine Kompostierung oder Verwendung als Pflanzsubstrat ist möglich (HOLZMANN et al., 2012 und DREWER, 2013).

Ein vergleichbarer Dämmstoff ist die Neptunballfaser, welche sich aus Seegrasfasern am Grund des Meeres durch die Wellenbewegung des Wassers bildet. Diese Faserballen werden an den Küsten des Mittelmeers angeschwemmt und können dort eingesammelt werden. Die Neptunballfasern unterscheiden sich von den ans Ufer geschwemmten Seegräsern nur durch ihren mechanisch veränderten Zustand. Diese Bälle werden entweder in ihrer ursprünglichen Form belassen und als Schütt- oder Einblasdämmstoffe eingesetzt, oder die Fasern werden in Schneidmühlen zerkleinert, so dass ein Stopfdämmstoff entsteht. Sie besitzen neben ihrer schalldämmenden Eigenschaft und der hohen Wärmespeicherkapazität c von $2.502 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ auch eine feuchteregulierende Wirkung. Mit einer Wärmeleitfähigkeit λ von $0,049 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegt der Dämmstoff im mittleren Bereich (Tab. 10). Die Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) erfüllt die Neptunballfaser nur durch den natürlich hohen Salzgehalt und ohne den Zusatz von Fremdstoffen. Außerdem ist sie aufgrund dieses Salzgehalts verrottungsbeständig und besitzt eine schädlingsabweisende Wirkung. Die Neptunballfaser besitzt nur eine geringfügige wasserabweisende Wirkung.

Tabelle 10: Angaben zu den physikalischen Größen von Neptunballfaser-Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, (verändert nach DREWER 2013)

Produktname	Neptun-Ballfaser	Neptun-Schüttfaser
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,049	0,049
Rohdichte ρ in kg m^{-3}	85- 130	65-75
Wärmespeicherkapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	2.502	2.502
Baustoffklasse	B2	B2
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	1 2	1 2
wasserabweisende Wirkung	geringfügig	geringfügig
Druckbelastbarkeit	nein	nein
Anwendungstypen*	DZ, DI, DEO, WH, WI, WTR	
Regelungen und Zulassungen	Z-23.11-1836	Z-23.11-1836

Die Primärenergie, die zur Herstellung des Dämmstoffes verwendet wird, ist sehr gering. Aber der lange Transportweg vom Mittelmeer und die damit verbundenen Emissionen machen eine niedrige Energiebilanz hierzulande zunichte. Da es sich um einen natürlichen, nachwachsenden Rohstoff handelt, ist sowohl eine Kompostierung, als auch eine Verwertung als Pflanzsubstrat möglich. Weil keine Zusatzstoffe in dem Dämmprodukt enthalten sind, gibt es keine gesundheitlichen Bedenken bei dessen Einsatz. Die Neptunballfaser und die Neptunball-Schüttfaser besitzen eine allgemeine bauaufsichtliche

Zulassung. Der Neptunfaserballdämmstoff besitzt einen Marktanteil von weit unter 1 % (DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

4.1.2 Synthetisch hergestellte organische Rohstoffe und deren Kennzahlen

Expandiertes Polystyrol (EPS) und Extrudiertes Polystyrol (XPS)

Expandiertes Polystyrol wird aus synthetisch erzeugten organischen, erdölbasierten Rohstoffen hergestellt. Dieses Material ist auch unter dem Synonym „Styropor“ bekannt. Durch Polymerisation des monomeren Styrols unter Beigabe des Treibmittels Pentan wird Polystyrolgranulat erzeugt. Nach wiederholten Behandlungen mit Wasserdampf expandiert das Granulat durch das Verdampfen des Treibmittels und verschweißt zu einem homogenen schnittfähigen Material. Gegebenenfalls kann durch den Einbau von Graphitpartikeln in die Zellstruktur die Wärmeleitfähigkeit des Materials weiter abgesenkt werden.



Abbildung 24: Aufnahme verschiedener Polystyrol-Dämmstoffe (DANGUILLIER, 2015)

Erhältlich ist EPS in Form von Platten, als Granulat sowie zementgebundenes EPS-Granulat oder als eine EPS-PUR-Verbundplatte aus Mischmaterialien (Abb.21). Dieser Dämmstoff besitzt schalldämmende Eigenschaften und weist eine geringe Rohdichte ρ ab 10 kg m^{-3} (siehe Angaben aus Tabelle 10). Mit einer Wärmeleitfähigkeit λ ab $0,03 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ weist EPS gute wärmedämmende Eigenschaften auf. Nur der λ -Wert der EPS-PUR-Verbundplatte, die derzeit keine Zulassung besitzt, unterschreitet diesen Wert mit $0,024 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Wärmespeicherkapazität c der EPS-Dämmstoffe ist mit Werten ab $1.195 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ relativ gering. Einen besonders hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand μ bietet die EPS-Platte mit einem Wert von 20-100 und die EPS-PUR-Verbundplatte, die vollkommen diffusionsdicht ist. Aus EPS hergestellten Dämmstoffe sind wasserabweisend,

verrottungsbeständig, formstabil und besitzen hygroskopische Eigenschaften. Ist EPS hydrophobiert, kann es auch für Perimeterdämmungen verwendet werden. Das bei der Herstellung verwendete Treibmittel Pentan wird als gesundheitsschädlich und wassergefährdend eingestuft. Durch die Geschlossenzelligkeit des expandierten Polystyrols, ist es aber in diesem gebunden und gilt somit als unbedenklich. EPS-Dämmstoffe besitzen einen Marktanteil von 30 % (DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Tabelle 11: Angaben zu den physikalischen Größen von ESP-Dämmprodukten***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)**

Produktname	EPS-Platte	EPS-Granulat	Zementgebundenes EPS-Granulat	EPS-PUR-Verbundplatte
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,03 - 0,04	0,033- 0,035	0,05- 0,12	0,024-0,025
Rohdichte ρ in kg m^{-3}	10 - 60	16- 26	90- 400	30
Wärmespeicherkapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	1.500	1.300	1.195	-
Baustoffklasse	B1, B2	B2	A1- B2	B2
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	20- 100	5	57	diffusionsdicht
wasserabweisende Wirkung	ja	ja	ja	Ja
Druckbelastbarkeit	ja		ja	Ja
Anwendungstypen*	DAA, DAD, DEO, DES, DI, DZ, PB, PW, WAB, WAP, WH, WI, WTR, WZ	-	DEO, DES	-
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13163, mehrere hundert abZ und ETA erteilt	DIN EN 13163, Z-23.12-1632, Z-23.12-1665, Z-23.12-1707, Z-23.12-1736, Z-23.12-1751, Z-23.12-1762, Z-23.12-1764, Z-23.12-1780, Z-23.12-1792	Z-23.11-266, Z-23.11-1450	keine Zulassung

Extrudiertes Polystyrol (XPS) wird ebenfalls aus synthetisch erzeugten organischen, erdölbasierten Rohstoffen hergestellt. Extrudiert bedeutet, dass die Wasseraufnahmefähigkeit des Materials unter 5 % liegt. Es ist auch unter den Synonymen „Styrodur“ oder „Styrofoam“ bekannt. Durch die Polymerisation des monomeren Styrols zu Polystyrol entsteht ein Polystyrolgranulat. Dieses wird mit dem Treibmittel Kohlendioxid versetzt, in einem Extruder aufgeschmolzen und mittels einer

Breitschlitzdüse auf ein Fließband aufgetragen. Dabei bläht sich das Material auf und erhält seine bis zu 98 % geschlossenzellige Struktur. Erhältlich ist dieser Dämmstoff in Form von Platten und als Granulat. XPS besitzt genau wie EPS (siehe Tabelle 12) eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit λ ab $0,03 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ je nach Material. Die Wärmespeicherkapazität c weist nur mittlere Produktwerte ab $1.300 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf.

Tabelle 12: Angaben zu den physikalischen Größen von XPS-Dämmprodukten
*Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)

Produktname	XPS-Platte	XPS-Granulat
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W}/(\text{mK})$	0,03- 0,04	0,04
Rohdichte ρ in kg/m^3	20- 60	85- 105
Wärmespeicherkapazität c in $\text{J}/(\text{kgK})$	1.400- 1.500	1.300- 1.700
Baustoffklasse	B1, B2	B2
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	80- 300	2- 5
wasserabweisende Wirkung	ja	ja
Druckbelastbarkeit	ja	-
Anwendungstypen*	DAA, DAD, DEO, DI, DUK, PB, PW, WAB, WAP, WI, WZ	WZ
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13164, Z-23.15-1532, Z-23.34-1493, Z-23.34-1760	keine Zulassung

Die XPS-Platte hat zudem einen sehr hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand μ von 80-300 je nach Hersteller. Sie ist hoch druckbelastbar, wasserabweisend und verrottet nicht. Zu beachten ist aber, dass das Material durch den Kontakt mit Lösungsmitteln, Kraftstoffen und Mineralölen zerstört werden kann. XPS-Granulat besitzt derzeit keine Zulassung. XPS-Dämmstoffe besitzen einen Marktanteil von 6 % (DREWER, 2013, PFUNDSTEIN et al, 2007 und ENGLERT, 1978).

Wie in Tabelle 12 zu erkennen ist, können EPS-Dämmprodukte je nach Hersteller und Materialzusammensetzung die Baustoffklasse von B2 (normalentflammbar) bis A1 (nichtbrennbar) erfüllen. Bei XPS-Dämmprodukten liegen die Baustoffklassen zwischen B1 (schwerentflammbar) und B2 (normalentflammbar). Zur Brandverhütung werden beide Dämmstoffe mit Hexabromcyclododecan (HBCD) behandelt. Dieser Zusatz wird als wassergefährdend eingestuft, ist aber in gebundener Form im Polystyrol unbedenklich. Der Grundstoff Styrol ist als gesundheitsschädlich eingestuft wird durch die Auspolymerisation des Styrols zu Polystyrol jedoch unbedenklich. Der Einsatz dieser Dämmstoffe bei Holzkonstruktionen ist nur mit einem chemischen Holzschutz zulässig. Zur Herstellung von EPS und XPS bedarf es einen hohen Aufwand an Primärenergie. Die Materialien können thermisch verwertet werden oder müssen auf einer Deponie entsorgt werden. Die beiden Dämmstoffe besitzen mehrere Hundert deutsche allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, Europäische technische Zulassungen und sind zum Teil sogar über international anerkannte DIN EN festgelegt. Neben der EPS-PUR-Verbundplatte besitzt auch das XPS-Granulat keine Zulassungen (DREWER, 2013; BÖHMFELD, 2012 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Polyurethan (PUR)

Polyurethan (PUR) wird aus synthetisch erzeugten organischen, erdölbasierten Rohstoffen erzeugt. Im Herstellungsverfahren wird Polyolen mit Pentan als Treibmittel vermengt und anschließend Polyisocyanat hinzugegeben. Durch Wärmeentwicklung verdampft das Treibmittel Pentan und das Gemisch expandiert. Bei dieser Reaktion entsteht das Polyurethan (PUR). Dieser Dämmstoff kann in den verschiedensten Formen und Materialkombinationen erworben werden, u.a. als PUR-Platte, PUR-Calciumsilicatplatte, PUR-Zementplatte, PUR-Schaum, biobasiertem PUR-Schaum oder als Recyclinggranulat (Abb. 22).



**Abbildung 25: Aufnahme verschieden beschichteter Polyurethandämmstoffe
(DANGUILLIER, 2015)**

Polyurethan (PUR) wird aus synthetisch erzeugten organischen, erdölbasierten Rohstoffen erzeugt. Im Herstellungsverfahren wird Polyolen mit Pentan als Treibmittel vermengt und anschließend Polyisocyanat hinzugegeben. Bei dieser Reaktion entsteht das Polyurethan (PUR). Dieser Dämmstoff kann in den verschiedensten Formen und Materialkombinationen erworben werden: unter anderem als PUR-Platte, PUR-Calciumsilicatplatte, PUR-Zementplatte, PUR-Schaum, biobasiertem PUR-Schaum oder als Recyclinggranulat.

Wie in Tabelle 13 zu erkennen, weist PUR je nach Hersteller eine geringe Wärmeleitfähigkeit λ ab $0,023 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf, ist schalldämmend, bis auf die PUR-Calciumsilicatplatte wasserabweisend, und hoch druckbelastbar je nach Produkttyp. Die Wärmespeicherkapazität c der PUR-Dämmprodukte liegt in einem mittleren Bereich ab $1.089 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Des Weiteren ist das Material verrottungs- und schimmelpilzbeständig und unempfindlich gegen Lösungsmittel, Weichmacher, Kraftstoffe, Mineralöle, verdünnte Säuren und Alkalien. Ohne eine Deckschicht sind Polyurethan-Platten allerdings diffusionsoffen. PUR-Calciumsilicatplatten wirken durch die Calciumsilicatlochungen feuchteregulierend. Beim Granulat ist die schalldämmende Eigenschaft des PUR gering, das Material lässt sich aber gut verdichten. Der als Treibmittel verwendete Stoff Pentan gilt als gesundheitsschädlich und als wassergefährdend. In gebundener Form ist er als unbedenklich einzustufen. Der Rohstoff Polyisocyanat, der zur Herstellung des Polyurethan verwendet wird, wird ebenfalls als gesundheitsschädlich eingestuft, ist aber in der polymerisierten Form des PUR unbedenklich. Um die Brandsicherheit von Polyurethan herzustellen, werden halogenierte Phosphorsäureester TCEP oder TCPP verwendet. TCEP

wird als gesundheitsschädlich und umweltgefährdend eingestuft und TCPP als wassergefährdend. Diese Flammschutzmittel sind in gebundener Form ebenfalls unbedenklich. Aufgrund dieser Zusatzstoffe besitzen alle PUR-Dämmprodukte die Baustoffklasse B2 (normalentflammbar). PUR-Schaum, der aus Zweikomponentenschäumen besteht, enthält als Treibmittel teilhalogenierte Fluorwasserstoffe, die zu den Treibhausgasen gehören. Ortsschäume müssen von Fachpersonal ausgebracht werden. Bei der Herstellung von Polyurethan wird ein hoher Einsatz von Primärenergie benötigt. Es kann je nach Materialzusammensetzung thermisch verwertet werden oder muss als Sondermüll entsorgt werden. Die PUR-Platten können jedoch wiederverwendet oder auch recycelt werden. Bis auf die PUR-Zementplatte und den biobasierten PUR-Schaum besitzen alle PUR- Dämmprodukte eine Zulassung und sind zum Teil auch über DIN EN international geregelt. PUR-Dämmprodukte besitzen einen Marktanteil von 5 % (DREWER, 2013; PFUNDSTEIN et al., 2007 und KLUßMANN, o.J.).

Tabelle 13: Angaben zu den physikalischen Größen von PUR-Dämmprodukten
***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)**

Produktname	PUR-Platte	PUR-Calcium-silicatplatte	PUR-Zementplatte	PUR-Schaum	Biobasierter PUR-Schaum	PUR-Recyclinggranulat
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	0,023- 0,03	0,033	0,036- 0,1	0,027- 0,030	0,026- 0,038	0,036
Rohdichte ρ in kg/m ³	>30	35- 45	200- 700	-	8- 34,4	40- 50
Wärmespeicherkapazität c in J/(kgK)	1.200- 1.500	-	1.089	-	-	1.200- 1.500
Baustoffklasse	B2	B2	B2	B2	B2	B2
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	40- 200	27	33	110	2- 17	30- 200
wasserabweisende Wirkung	ja	nein	ja	ja	ja	ja
Druckbelastbarkeit	ja	mittel	ja	-	-	-
Anwendungstypen*	DAA, DAD, DEO, DI, WI, DI, DZ, PB, PW, WAA, WAB, WAP, WZ, WI, WP	DI, WI	-	-	-	DAA, DEO, DI, DZ, WI, WZ
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13165, Z 23.15-1425, Z 23.15-1428, Z 23.15-1671	DIN EN 13165, Z 23.15-1735	keine Zulassung	DIN EN 14315-1, DIN EN 14315-2, Z 23.11-1553, Z 23.12-1794	keine Zulassung	Z 23.15-1655

4.1.3 Anorganische Rohstoffe natürlichen Ursprungs und deren Kennzahlen

Perlit

Bei Perlit handelt es sich um ein gemahlenes Vulkangestein, das zur Verwendung als Dämmstoff kurzfristig auf 1000°C erwärmt wird. Durch das schlagartige Erhitzen des im Perlit enthaltenen Wassers expandiert dieses und das Perlit erreicht das 15-20-fache seines ursprünglichen Volumens. Es kommt zur Entstehung eines aufgeblähten Granulats, das als Einblas-, Schütt- oder Plattendämmstoff verwendet werden kann.



Abbildung 26: Aufnahme von Perlitdämmstoffen

(<http://www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/perlit>)

„Hydrophobierte“, d. h. wasserabweisend behandelte Blähperlite sind auch unter dem Namen „Hyperlite“ bekannt. Ohne diese wasserabweisende Eigenschaft spricht man von „Superliten“. Zur Entstehung einer Blähperlitplatte werden organische und/oder anorganische Fasern sowie Stärke im Nassverfahren mit Blähperlit verpresst. Superlite, welche ohne Zusatzstoffe versehen sind, besitzen die Baustoffklasse A1 (nichtbrennbar) (Tab. 14). Je nach enthaltenen Zusatzstoffen wird von niedrigeren Baustoffklassen bis auf B2 (normalentflammbar) ausgegangen. Blähperlit ist generell verrottungsbeständig und beständig gegen Schädlingsbefall. Die Blähperlitplatte ist zudem druckbelastbar, feuchteregulierend, alterungsbeständig und resistent gegen Schimmelpilzbefall. Die Wärmeleitfähigkeit λ beginnt bei Perliten ab 0,04 in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Wärmespeicherkapazität c liegt bei einem mittleren Wert von $1.000 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Je nach Hersteller können Perlite eine wasserabweisende Wirkung besitzen aber nur einen geringen Wasserdampfdiffusionswiderstand μ von 3. Zudem weist Einblasblähperlit eine sehr geringe Rohdichte ρ ab 45 kg m^{-3} auf. Der Rohstoff Perlit ist ausreichend verfügbar, muss

aber aus Südeuropa/Südamerika importiert werden. Bei der Herstellung dieses Dämmstoffs wird zudem eine hohe Primärenergie benötigt.

Tabelle 14: Angaben zu den physikalischen Größen von Perlit-Dämmprodukten

***Legende laut Tabelle 5, verändert nach (DREWER, 2013)**

Produktname	Einblasblähperlit	Schüttblähperlit	Blähperlitplatte
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,04-0,045	0,05-0,11	0,045-0,06
Rohdichte ρ in kg m^{-3}	45-65	85-600	90-210
Wärmespeicherkapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	1.000	1.000	1.000
Baustoffklasse	A1	A1-B2	A1-B2
Wasserdampf- diffusionswiderstand μ	3	3	3
wasserabweisende Wirkung	ja	ja, nein	ja
Druckbelastbarkeit		ja	ja
Anwendungstypen*	DI, DZ, WZ	DAA, DAD, DEO, DES, DI, DZ, WH, WTH, WTR, WZ	DEO, DES, DI, WI
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13169, Z-23.12-1393, Z-23.15-1635	DIN EN 13169, Z-23.11-1243, Z-23.11-1286, Z-23.11-1287, Z-23.11-1288, Z-23.15-1621, Z-23.15-1634, Z-23.15-1635	DIN EN 13169, Z- 23.15-1524, Z-23.16-1732, ETA-08/0313

Gesundheitliche Bedenken sind bei der Anwendung des Blähperlits als Plattendämmstoff nicht bekannt. Als Einblas- oder Schüttdämmstoff muss jedoch bei der Ausbringung auf einen ausreichenden Atemschutz geachtet werden. Je nach Zusatzstoffen kann Perlit wiederverwertet werden oder muss auf einer Bauschuttdeponie entsorgt werden. Alle Dämmprodukte aus Perlit besitzen eine Zulassung und sind international anerkannt durch DIN EN genormt. Blähperlit besitzt einen Marktanteil von 1,1 % (DREWER, 2013; ENGLERT, 1978 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

4.1.4 Synthetisch hergestellte anorganische Rohstoffe und deren Kennzahlen

Mineralwolle als Glas- beziehungsweise Steinwolle

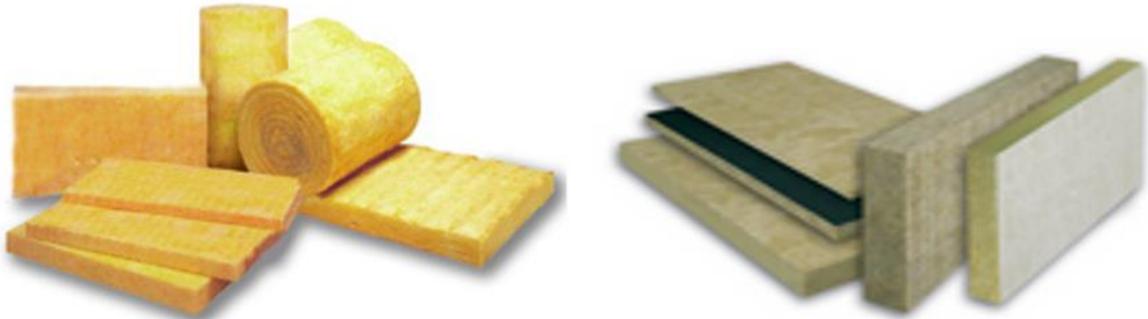


Abbildung 27: Aufnahmen von Glaswoll- (links) und Steinwollämmstoffen (rechts)

http://www.gschwend-holzbau.ch/index_Isolation_Details.html

<http://www.knaufinsulation.at/steinwolle-daemmstoffe>

„Mineralwolle ist eine zusammenfassende Bezeichnung für die anorganischen Faserdämmstoffe Glaswolle und Steinwolle. Sie unterscheiden sich lediglich durch ihre Rohstoffe und einige Eigenschaften“ (PFUNDSTEIN et al., 2007). Glaswolle besteht zu 85 % aus dem Recyclingprodukt Altglas und weiteren je nach Verwendungszweck beigemischten Komponenten. Steinwolle besteht zum größten Teil aus Mineralien wie Dolomit, Basalt, Diabas und Anorthosit. Des Weiteren können unterschiedliche Recyclingmaterialien verwendet werden. Produktspezifisch kann ein Hydrophobierungsmittel oder auch Öle zur Staubminderung hinzugegeben werden. Zusätzlich kann harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd als Bindemittel enthalten sein. Hergestellt werden diese Dämmstoffe durch Verflüssigen der jeweiligen Rohstoffe bei 1.300-1.500°C. Durch Zerfasern der dabei entstehenden Schmelze im Düsenschleuderverfahren entsteht die Mineralwolle. Erhältlich sind Mineralwollämmstoffe in Form von Einblas-, Stopf-, Matten- oder Plattendämmstoffen. Sowohl Glaswolle als auch Steinwolle besitzen mit einer Wärmeleitfähigkeit λ ab $32 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ein sehr gutes Dämmvermögen (Tab. 15), sind schalldämmend, diffusionsoffen und resistent gegen Schimmel-, Fäulnis- und Ungezieferbefall. Der Wert der Wärmespeicherkapazität c ist sowohl bei Glas- als auch bei Steinwolle ab $800 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ eher gering. Sie zeichnen sich auch durch ihre Beständigkeit gegen schwache Laugen,

Säuren, organische Lösungsmittel und UV-Strahlung aus. Glaswolle ist hoch flexibel mit einer Rohdichte ρ ab 12-120 kg m⁻³ und somit leicht zu verarbeiten, deshalb aber auch nur geringfügig druckbelastbar. Steinwolle ist im Regelfall mit einer höheren Rohdichte ρ von 10 bis zu 220 kg m⁻³ weniger flexibel. Im Brandfall hält Glaswolle Temperaturen von bis zu 500°C stand, ist bei einer Baustoffklasse von A2 (nichtbrennbar, mit Anteil von brennbaren Stoffen versetzt) bis A1 (nichtbrennbar). Steinwolle verträgt Dauertemperaturen von bis zu 750°C und ihr Schmelzpunkt liegt bei über 1000°C. Sie erfüllt ebenfalls die Baustoffklasse A1 (nichtbrennbar) oder A2 (nichtbrennbar, mit Anteil von brennbaren Stoffen versetzt) und ist daher nichtbrennbar (Tab. 15). Eine wasserabweisende Wirkung der Mineralwolldämmstoffe ist Produkt- und Herstellerspezifisch. Die vor 1996 hergestellt wurden, können karzinogene, lungengängige Mineralfasern enthalten. Produkte jüngerer Datums enthalten dagegen biolösliche Fasern, die im Körper abgebaut oder schnell ausgeschieden werden können und somit gesundheitlich unbedenklich sind. Bei der Verarbeitung dieser Dämmstoffe ist ein Schutz gegen den Produktstaub dennoch erforderlich. Das Bindemittel Phenol-Formaldehyd enthält karzinogen eingestufte Substanzen, ist jedoch in ausgehärteter Form des Dämmproduktes unbedenklich. Bei der Herstellung von Mineralwolle wird viel Energie benötigt, obgleich der Dämmstoff lokal verfügbar ist und nur kurze Transportwege zurückgelegt werden müssen. Mineralwolle ist nicht kompostierbar und nur begrenzt recycelbar. Produktspezifisch unterschiedlich kann Mineralwolle auf einer Hausmülldeponie oder muss auf einer Bauschuttdeponie entsorgt werden. Alle Mineralwolldämmstoffe sind zugelassen und besitzen eine DIN EN mit Ausnahmen von Stopfglaswolle und die Steinwollmatte. Mineralwolldämmprodukte besitzen einen Marktanteil von 5,5 % (DREWER, 2013 und PFUNDSTEIN et al., 2007).

Tabelle 15: Angaben zu den physikalischen Größen von Mineralwolle Dämmprodukten *Legende laut Tabelle 5, (verändert nach DREWER, 2013)

Produktname	Einblass- glaswolle	Stopfglaswolle	Glaswollmatte	Glaswollplatte	Einblass- steinwolle	Stopf- steinwolle	Steinwollmatte	Steinwollplatte
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	0,035-0,045	0,035	0,032-0,04	0,032-0,04	0,04-0,045	0,033-0,112	0,035-0,045	0,035-0,045
Rohdichte ρ in kg/m ³	12-40	50-80	13-100	13-100	35-120	60-220	10-200	90-165
Wärmespeicher- kapazität c in J/(kgK)	840	1.030	840	840-850	840	840-1.000	800-1.000	840-1.030
Baustoffklasse	A1	A1	A1, A2	A1	A1	A1	A1,A2	A1
Wasserdampf- diffusions- widerstand μ	1	1	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1
wasserabweisende Wirkung	ja/nein	ja	ja	ja	ja/nein	ja	ja	ja/nein
Druckbelastbarkeit	-	-	-	ja	-	-	-	ja
Anwendungstypen*			DAD, DI, DZ, WH, WI, WTR, WZ	DAD, DES, DI, DZ, WAB, WH, WI, WTH, WTR, WZ	DI, DZ, WTR, WZ		DAD, DI, DZ, WAB, WI, WH, WTR	DAA, DAD, DEO, DES, DI, DZ, WAB, WAP, WH, WI, WTH, WTR, WZ
Regelungen und Zulassungen	DIN EN 13162, Z-23.12-1875	keine Zulassung	DIN EN 13162, Z-23.15-1456, Z-23.15-1461, Z-23.15-1642	DIN EN 13162, Z-23.15-1456, Z-23.15-1459	DIN EN 13162, Z-23.2.1-127, Z-23.11-1612, Z-23.11-1720, Z-23.11-1753, Z-23.12-1164, Z-23.12-1668, Z-23.15-1475	Z-23.11-1720, Z-2315-1459	keine Zulassung	DIN EN 13162, Z-33.4.3-96, Z-33.43-201

4.2 Ergebnisse zu organischen und anorganischen Dämmstoffen

Aufbauend auf den bisherigen Verlauf der vorgestellten Grundlagen und dem Einsatz von Dämmstoffen in der Landwirtschaft, wird eine Auswertung der vorgestellten Datenreihen vorgenommen. Dazu werden die Dämmstoffe nicht nur nach organischer und anorganischer Herkunft miteinander verglichen, sondern unterteilt nach natürlicher oder synthetischer Herkunft ihrer Rohstoffe. Ein Vergleich der physikalischen Größen und Baustoffklassen der einzelnen Dämmstoffgruppen untereinander soll Aufschluss über deren Eignung in Tierställen geben.

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 dargelegt, lässt sich die Eignung eines Dämmstoffes an verschiedenen physikalischen Parametern fest machen. Betrachtet man die Wärmeleitfähigkeit λ aller vorgestellten Dämmstoffe, so lässt sich erkennen, dass nur organische und anorganische Dämmstoffe aus synthetisch hergestellten Rohstoffen Werte von unter $0,03 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ erzielen wie beispielsweise der PUR-Schaum (siehe Tabelle 13). Dämmstoffe, die sowohl organischen als auch anorganischen Ursprungs sind, aber aus natürlich vorkommenden Rohstoffen bestehen, liegen nur knapp über diesen Werten. Beispiele dafür sind die Holzweichfasermatte oder die Flachsfasermatte, welche Werte ab $0,039 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ erzielen.

Die Rohdichte ρ der vorgestellten Dämmstoffe ist je nach Form oder Beimischung von Zusatzstoffen sehr unterschiedlich. Entscheidend ist der jeweils vorgesehene Einsatzort des dämmenden Materials, um die Statik eines Gebäudes nicht zu gefährden. Dementsprechend sind Platten- und Matten- meist schwerer als Einblas- oder Schüttdämmstoffe. Sowohl organische als auch anorganische Dämmstoffe können sehr niedrige Rohdichtewerte erzielen.

Betrachtet man die Wärmespeicherkapazität c von organischen Dämmstoffen aus natürlichen Rohstoffen ist diese im Vergleich zu den anderen Dämmstoffgruppen am höchsten. Die Neptunballfaser weist beispielsweise sehr hohe Werte von $2.502 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf (siehe Tabelle 10). Dieser Dämmstoff ist besonders gut in der Lage, Wärme aufzunehmen, zu speichern und zeitversetzt wieder abzugeben. Hingegen erzielt die PUR-Platte, welche aus synthetisch hergestellten Rohstoffen organischen Ursprungs produziert wird, nur $1.200\text{-}1.500 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Anorganische Mineralwolldämmstoffe erreichen teilweise sogar nur $800 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ (vgl. Tab. 15). Offensichtlich sind Dämmstoffe organischen

Ursprungs durch Struktur und Zusammensetzung ihrer Rohstoffe in ihrer Eigenschaft der Wärmespeicherung gegenüber den anorganischen bevorteilt.

Bei der Einteilung in Brandschutzklassen erzielen anorganische Dämmstoffe, mineralischen Ursprungs grundsätzlich die Klasse A1 (nichtbrennbar). Nur durch zusätzlich beigemischte eigenschaftsverändernde Zusatzstoffe in Dämmstoffen kann es zu niedrigeren Brandschutzklasseneinstufungen kommen. Dämmstoffe organischen Ursprungs, ob aus erdölbasierten, pflanzlichen oder tierischen Rohstoffen, können im Regelfall nur durch brandverhütende Zusatzstoffe eine Baustoffklassenzuteilung ab B1 (schwerentflammbar) erhalten.

Einen hohen Wasserdampfdiffusionswiderstandswert μ erreichen nur vereinzelte Produkte organischer Dämmstoffe synthetischen Ursprungs. Darunter befinden sich die XPS-Platte mit einem μ Wert von $80-300 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ und die EPS-PUR-Verbundplatte, welche vollkommen diffusionsdicht ist (vgl. Tabelle 12 und 13). Wie schon in Kapitel 2.2.5 erwähnt, ist es für den Einsatz von Dämmstoffen in Nutztierställen von besonderer Bedeutung, ein gewisses Maß an Feuchtigkeit tolerieren zu können, ohne dass diese durch Durchnässung ihre wärmedämmenden Eigenschaften zu verlieren. Fast alle weiteren Dämmstoffgruppen weisen nur mittelmäßige bis sehr geringe Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte μ auf.

Eine wasserabweisende Wirkung ist bei organischen Dämmstoffen aus Rohstoffen natürlichen Ursprungs nicht vorhanden. Mit Ausnahme der Holzweichfaserplatte und der Holzwoleleichtbauplatte. Je nach Hersteller wird diese Eigenschaft durch Zusatzstoffe herbeigeführt. Produkte aus Seegrass beziehungsweise Neptunballfaser besitzen durch ihren natürlichen Salzgehalt nur eine geringfügige wasserabweisende Wirkung. Alle weiteren vorgestellten dämmenden Materialien besitzen diese Eigenschaft oder sind nur durch eigenschaftsverändernde Zusätze in dieser eingeschränkt. Im Stallbau ist eine wasserabweisende Wirkung von Dämmstoffen erwünscht, da Feuchtigkeitsschäden an diesen vermieden werden sollen und im Innenraum oft hohe r. LF vorliegen.

Beim Vergleich der Druckbelastbarkeit der einzelnen Dämmprodukte zeigt sich, dass bis auf die Ausnahmeprodukte Holz und Hanf die organischen Dämmstoffe aus Rohstoffen natürlichen Ursprungs keinen Druckbelastungen standhalten. Hingegen weisen alle weiteren Dämmprodukte mindestens eine Dämmstoffform auf, die druckbelastbar ist.

4.3 Ergebnisse zur Wärmerückgewinnung

4.3.1 Der rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher

Zur Bewertung der WRG standen Messdaten für den Zeitraum Oktober 2009 - September 2010 zur Verfügung. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend vorgestellt.

Auslastung der WRG

Aus den Daten der Messventilatoren konnten die Betriebsstunden der WRG im Jahresverlauf abgeleitet werden. Abb. 28 gibt einen Überblick über die prozentuale monatliche Betriebsauslastung der WRG.

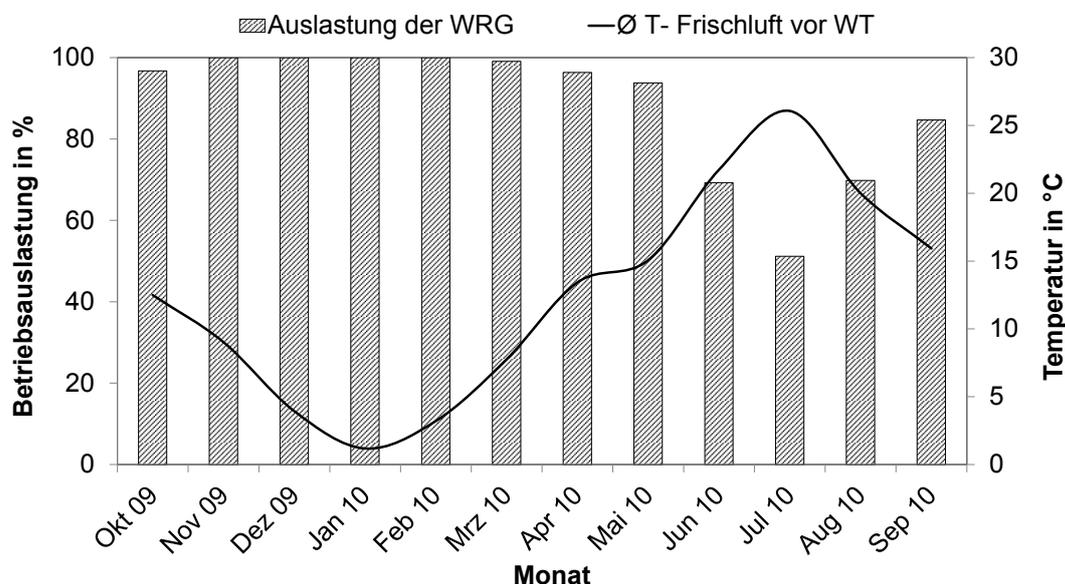


Abbildung 28: Relative monatliche Betriebsauslastung der WRG (RÖSMANN, 2012)

Die WRG war von November 2009 bis Februar 2010 durchgängig in Betrieb (Auslastung = 100 %). Im Frühjahr, Sommer und Herbst hingegen wechselte die WRG teilweise vom „Tauschbetrieb“ in den Betriebszustand „Sommerlüftung ohne WRG“. Der Wärmetauscher wurde so betrieben, dass er bei Frischlufttemperaturen $\leq 23^{\circ}\text{C}$ den Tauschbetrieb automatisch aufnahm und bei Frischlufttemperaturen $> 23^{\circ}\text{C}$ in den Betriebszustand „Sommerlüftung ohne WRG“ ging. Die warme Abluft wurde dann direkt (an der Tauscherfläche vorbei) ins Freie gefördert.

Die jährliche Auslastung der WRG lag bei 88,4 % (7.744 Betriebsstunden). Im Juli 2010 war die WRG 381 Stunden (51,2 % der Monatsstunden) in Betrieb. Die Zuluftkonditionierung fand in diesem Monat überwiegend in den kühlen Nachtstunden statt. Die durchschnittliche Frischlufttemperatur lag im kältesten Monat Januar bei 1,2°C und im wärmsten (Juli) bei 26,0°C.

Temperaturverläufe

Charakteristische Temperaturzustände der Außen-, Frisch-, Zu-, Ab- und Fortluft am rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauscher werden in Abb. 29 dargestellt.

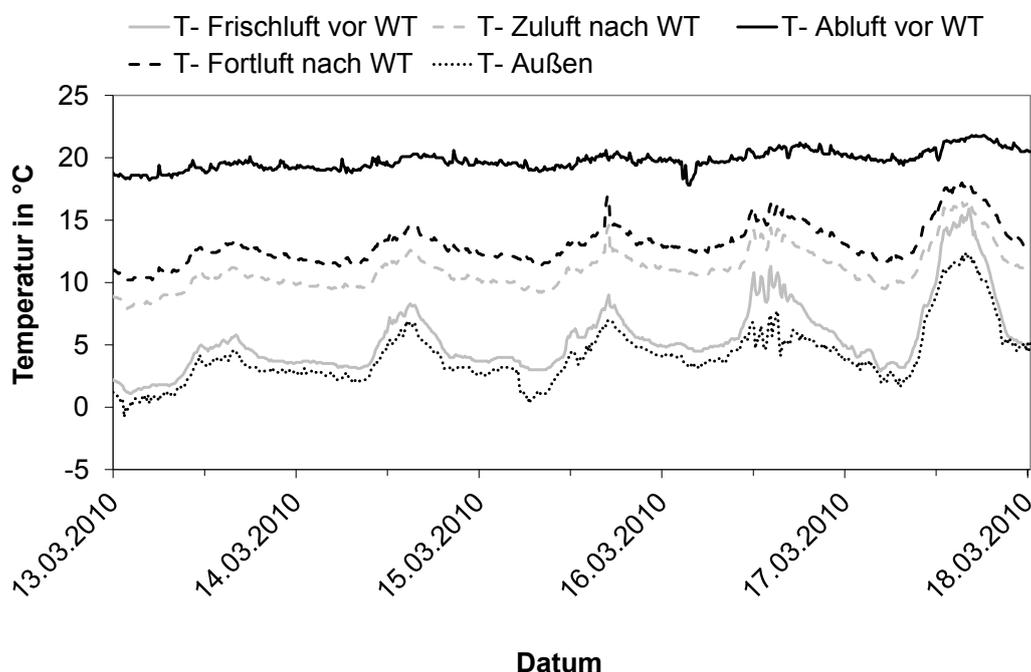


Abbildung 29: Temperaturverläufe an den Messpunkten (RÖSMANN, 2012)

Die Außentemperatur erreichte in diesen Tagen nachts Werte um den Gefrierpunkt (-0,8°C). In den Mittagsstunden wurden Außentemperaturen von bis zu 12,4°C gemessen. Die vom Wärmetauscher aus dem Dachraum angesaugte Frischluft war im Mittel 1,4 K ($\sigma = 0,8$ K; $\bar{x} = 1,1$ K) wärmer als die Außentemperatur.

Während die Außen- und Frischluft sehr hohen Temperaturschwankungen unterlagen (bis zu 13,2 K bzw. 14,8 K), strömte die durch die WRG angewärmte Zuluft wesentlich gleichmäßiger temperiert in das Stallgebäude ein. Durch die Amplitudendämpfung der

Zuluftkonditionierung betrug die Temperaturdifferenz der Zuluft max. 8,7 K im Betrachtungszeitraum.

Die Zuluft erwärmte sich um $\bar{x} = 5,6$ K ($\sigma = 1,2$ K; $\tilde{x} = 6,0$ K), während sich im gleichen Zeitraum die Abluft um $\bar{x} = 6,7$ K ($\sigma = 1,0$ K; $\tilde{x} = 6,9$ K) abkühlte (vgl. Abb. 30).

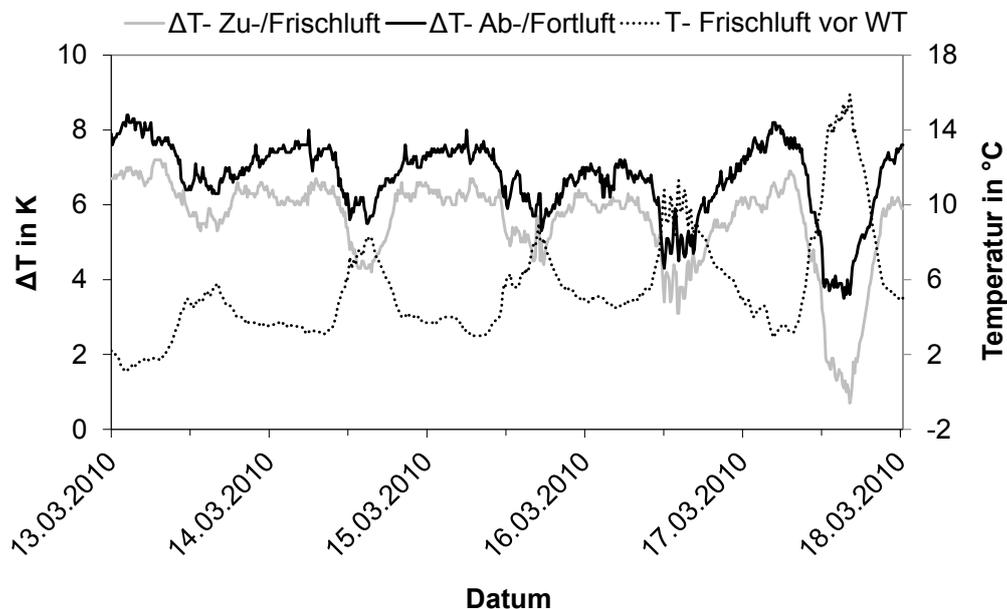


Abbildung 30: Zuluft-Erwärmung und Abluft-Abkühlung (RÖSMANN, 2012)

Temperaturwirkungsgrad

Der Temperaturwirkungsgrad (η_T) kann Abb. 31 für den Zeitraum 13. - 18. März 2010 entnommen werden und beträgt im Mittel 0,38 ($\sigma = 0,04$; $\tilde{x} = 0,39$). Es fällt auf, dass sich η_T gegenläufig zur Frischlufttemperatur verhielt. Die von der WRG angesaugte Frischlufttemperatur hatte den maßgeblichen Einfluss auf η_T , da die Ablufttemperatur, als ein weiterer Einflussparameter auf den Temperaturwirkungsgrad, während des Betrachtungszeitraums mit $\bar{x} = 19,7^\circ\text{C}$ ($\sigma = 0,8^\circ\text{C}$; $\tilde{x} = 19,7^\circ\text{C}$) nahezu konstant war.

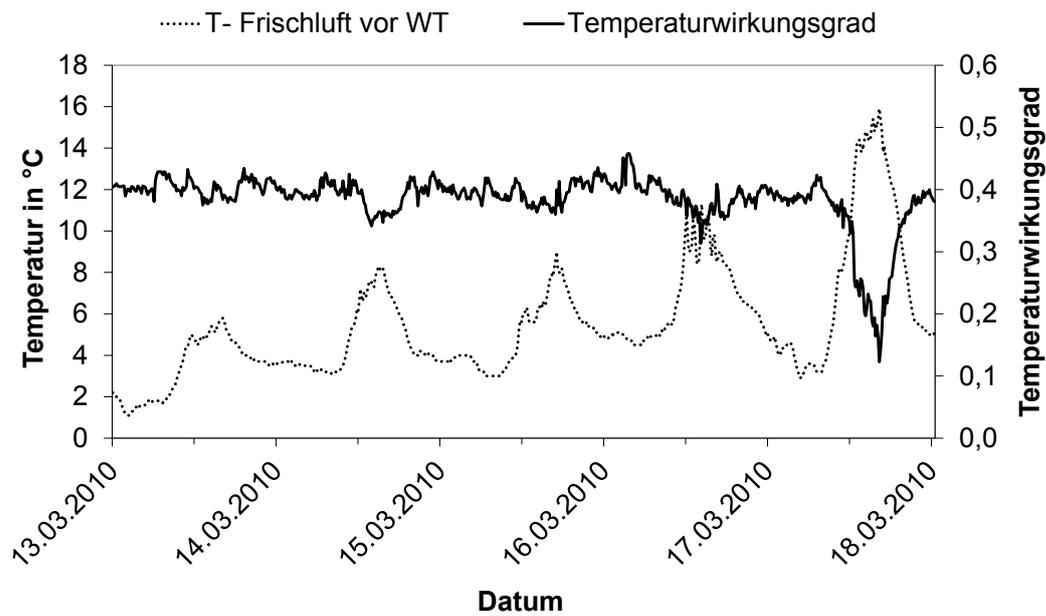


Abbildung 31: Temperaturwirkungsgrad der WRG (RÖSMANN, 2012)

Heizleistung

Die Heizleistung der WRG wurde mit Formel 6 berechnet. Ihr Verlauf wird beispielhaft für den Zeitraum 13. - 18. März 2010 in Abb. 32 dargestellt. Sie schwankte zwischen 3,4 kW und 34,6 kW, wobei im Durchschnitt eine Heizleistung von 21,6 kW ($\sigma = 4,4$ kW; $\bar{x} = 22,3$ kW) in den fünf Tagen erzielt wurde. Als Temperaturerhöhung der Zuluft wurde im Mittel

für diesen Zeitraum 5,6 K berechnet; der Zuluftvolumenstrom betrug $\bar{x} = 11.575 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

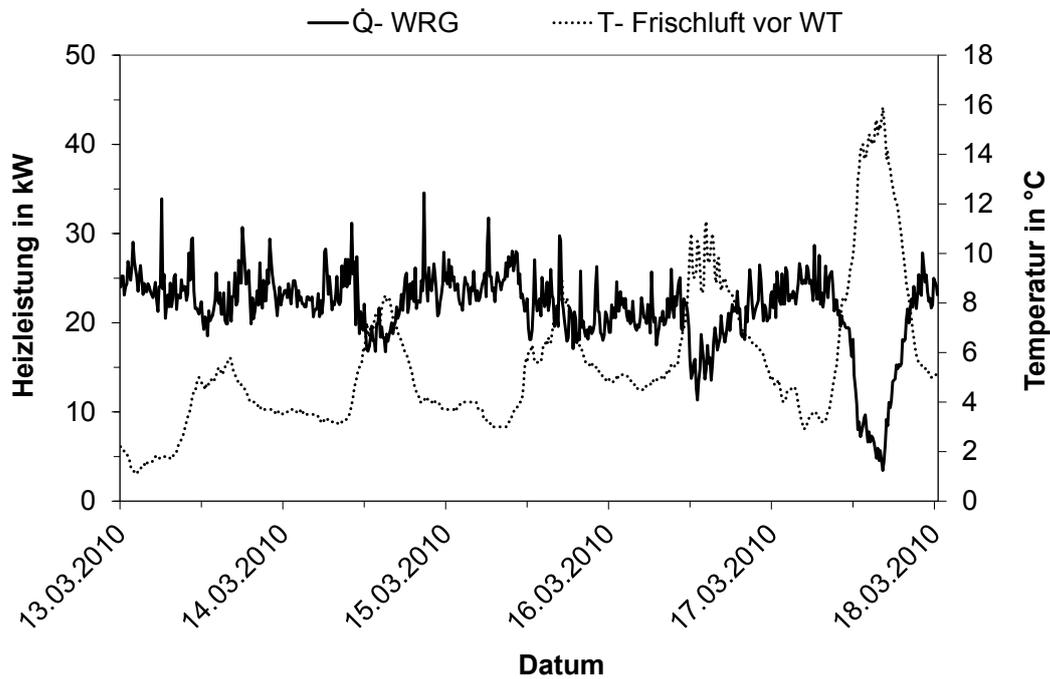


Abbildung 32: Heizleistung der WRG (RÖSMANN, 2012)

Abb. 32 verdeutlicht den Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Frisch- und Abluft auf die zu erwartende Heizleistung der WRG. Die von der WRG angesaugte Frischlufttemperatur hatte dabei den größten Einfluss auf die Temperaturdifferenz, da die Abluft der Stallanlage nur sehr geringen Temperaturschwankungen unterlag. Steigende Temperaturdifferenzen (resultierend aus sinkender Frischlufttemperatur) gingen mit steigenden Heizleistungen einher und umgekehrt.

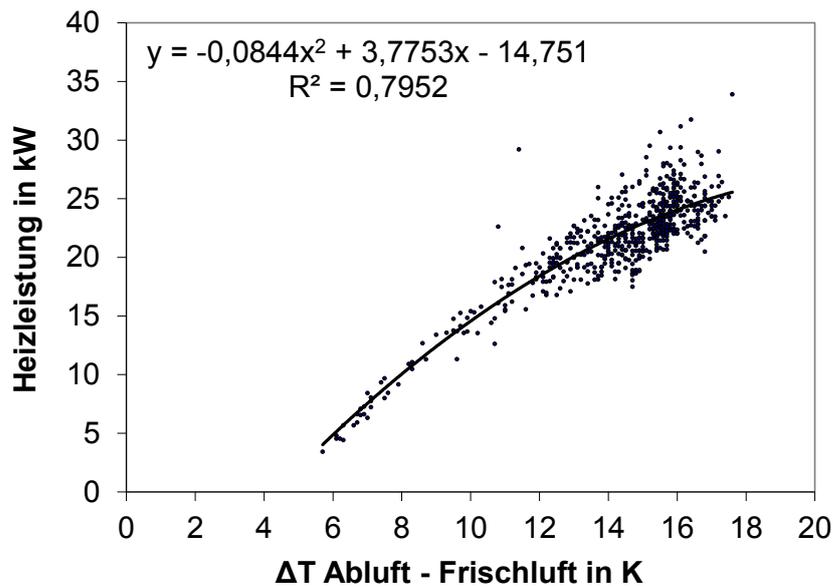


Abbildung 33: Heizleistung der WRG in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Ab- und Frischluft (RÖSMANN, 2012)

Die monatlichen Heizleistungen der WRG für den Zeitraum Oktober 2009 - September 2010 können Abb. 34 entnommen werden.

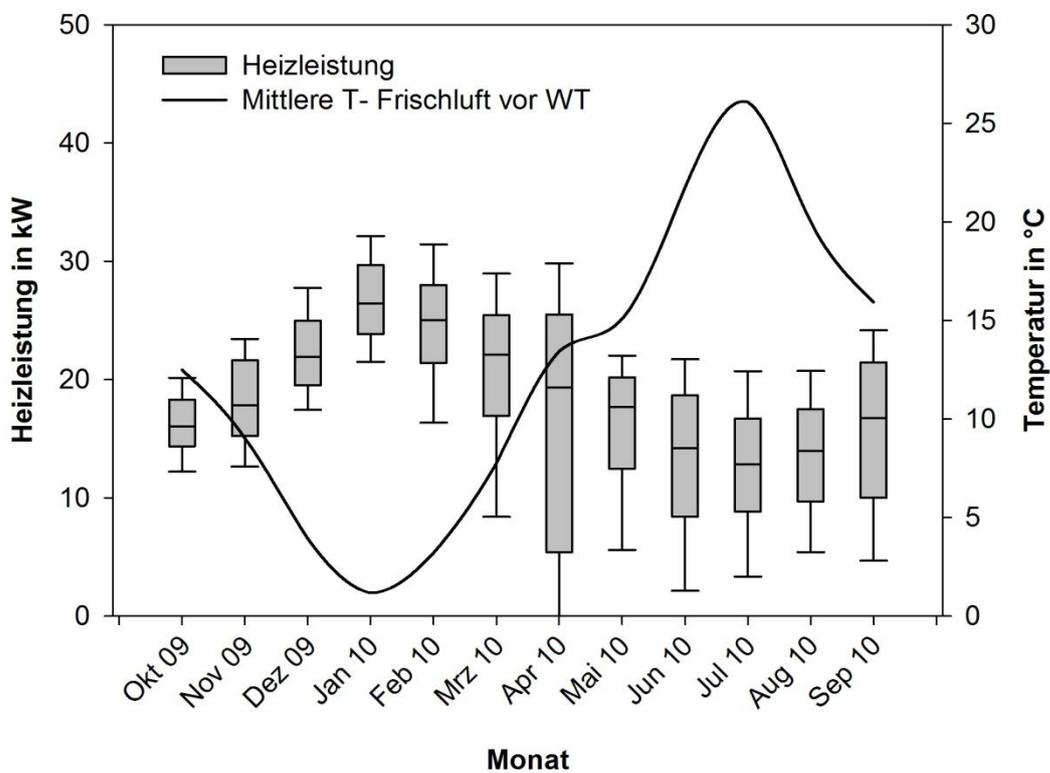


Abbildung 34: Monatliche Heizleistung der WRG in Abhängigkeit der T- Frischluft (RÖSMANN, 2012)

Ein Vergleich der Werte im Jahresverlauf zeigt, dass die Variationsbreite von Oktober bis Februar relativ gering war. Vom Frühling (vor allem im April) bis in den Sommer hinein waren die Variationsbreiten der Heizleistungen größer. Diese ergaben sich aus den hohen Tag-Nacht-Schwankungen der Außen- und Frischlufttemperaturen.

Die Heizleistung (\dot{Q} - Zuluft) der WRG betrug im Betriebszustand durchschnittlich 18,7 kW ($\sigma = 8,3$ kW; $\bar{x} = 19,7$ kW). Sie erreichte im Mittel ca. 17 % der vom Hersteller angegebenen maximalen Heizleistung im Jahresverlauf. Die Energieabgabe der Abluft betrug in diesem Zeitraum im Durchschnitt 19,8 kW ($\sigma = 9,0$ kW; $\bar{x} = 21,3$ kW).

Die Zuluft wurde im Jahresdurchschnitt um 4,9 K ($\sigma = 2,3$ K; $\bar{x} = 4,8$ K) erwärmt, die Abluft um 4,9 K ($\sigma = 2,5$ K; $\bar{x} = 5,1$ K) abgekühlt.

Die WRG förderte für den Zeitraum Oktober 2009 - September 2010 eine durchschnittliche Zulufrate von $11.336 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\sigma = 3.041 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $\bar{x} = 11.471 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Die Abluftrate lag um durchschnittlich $1.657 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\sigma = 4.214 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $\bar{x} = 827 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) höher und betrug $12.993 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\sigma = 3.873 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $\bar{x} = 12.315 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).

4.4 Ergebnisse zu den regenerativen Heiz- und Kühltechnologien

4.4.1 Die Unterflurzuluftführung

Temperaturverläufe

Abbildung 35 zeigt beispielhaft einen von hohen Temperaturen geprägten Sommertemperaturverlauf der Außenluft und der Zuluft im Kanal. Nachts sank die Umgebungstemperatur nur auf minimal 18°C ab. Im Zentralkanal lag die Temperatur zeitgleich etwa 1 K darüber. Ab 7:00 Uhr stieg die Außentemperatur an und erreichte zwischen 15:00 und 16:00 Uhr ihr Maximum mit fast 33°C. Auch der Zentralkanal hat sich im Tagesverlauf aufgeheizt. Zum Zeitpunkt der maximalen Außentemperatur lag er aber bei vergleichsweise kühlen 25°C. Erst gegen Mitternacht hat sich die Umgebungstemperatur unter die Kanaltemperatur abgekühlt.

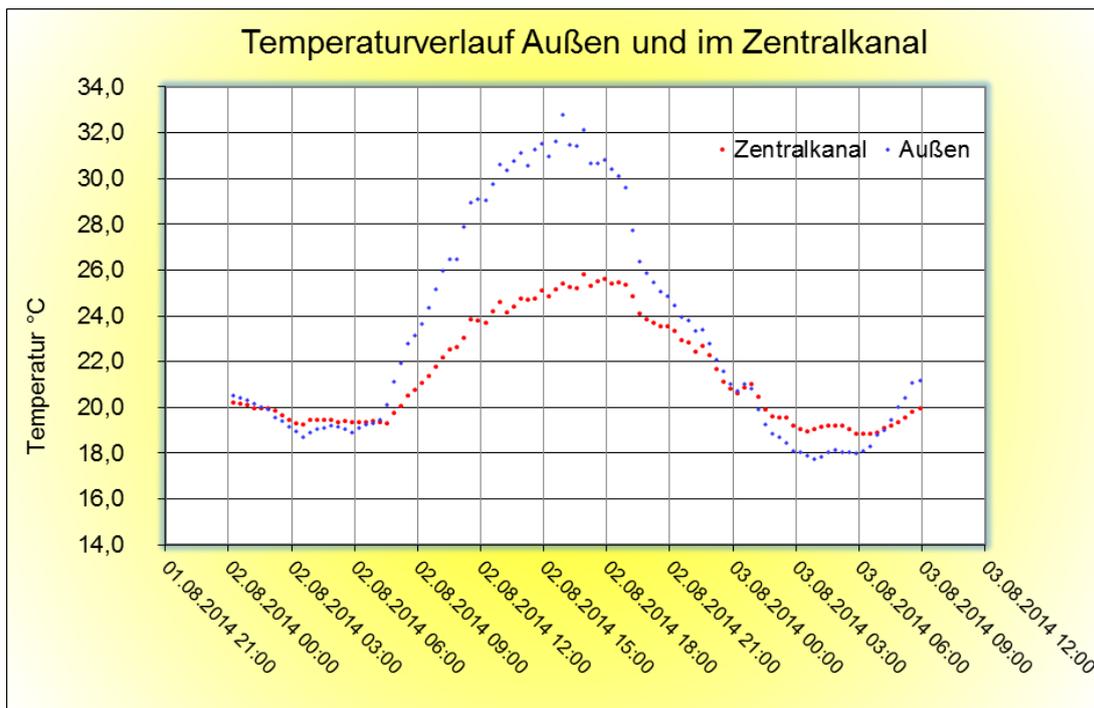


Abbildung 35: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf (Pommer, 2015)

In Kälteperioden geschieht das Gegenteil. Abbildung 36 zeigt einen beispielhaften Tagestemperaturverlauf im Winter. Am Anfang des Untersuchungszeitraums die Außentemperatur über 2 Tage kontinuierlich bis auf minus 12°C. Auch die Temperatur im Zentralkanal sank, aber nur bis minus 4°C.

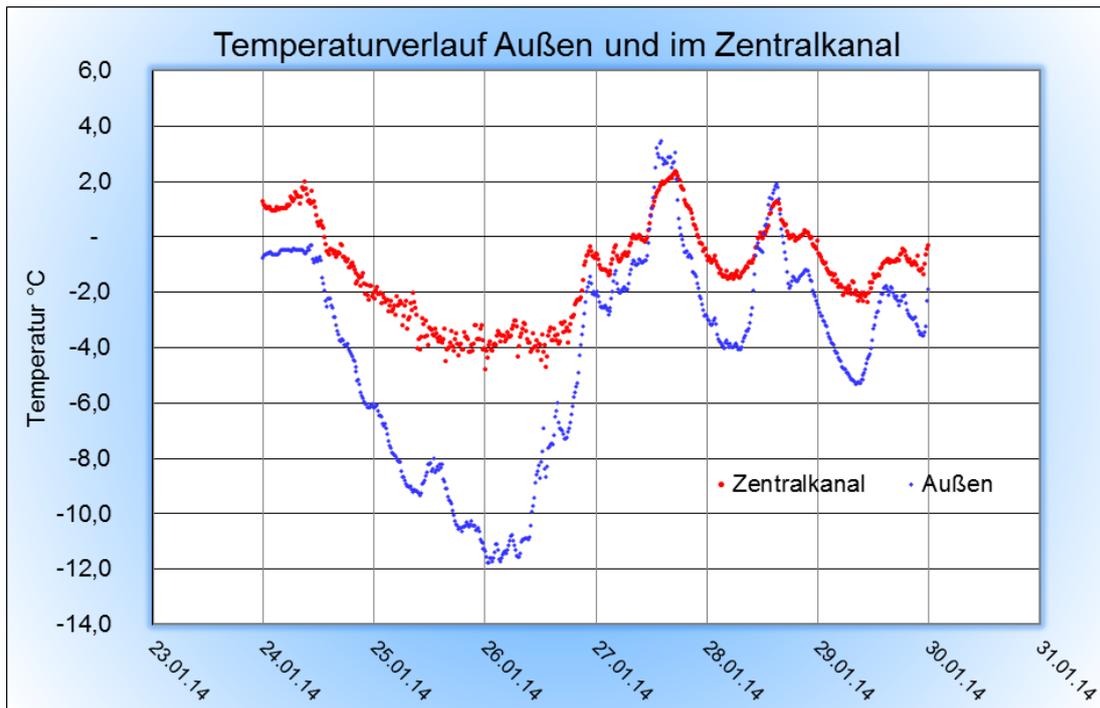


Abbildung 36: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf vom 24.01. bis 30.01.2014 (POMMER, 2015)

Im Verlauf der Messungen stellten sich die typischen Tag-Nach-Kurvenverläufe ein. Die Auskühlung des Kanalsystems hatte zur Konsequenz, dass die Zuluft zwar nur kurzzeitig, aber bereits bei etwa $+2^{\circ}\text{C}$ im Kanal abgekühlt wurde. Bei regelmäßigen Tag-Nacht-Temperaturschwankungen ist die Pufferwirkung des Kanals deutlich ausgeprägt (Abb. 36).

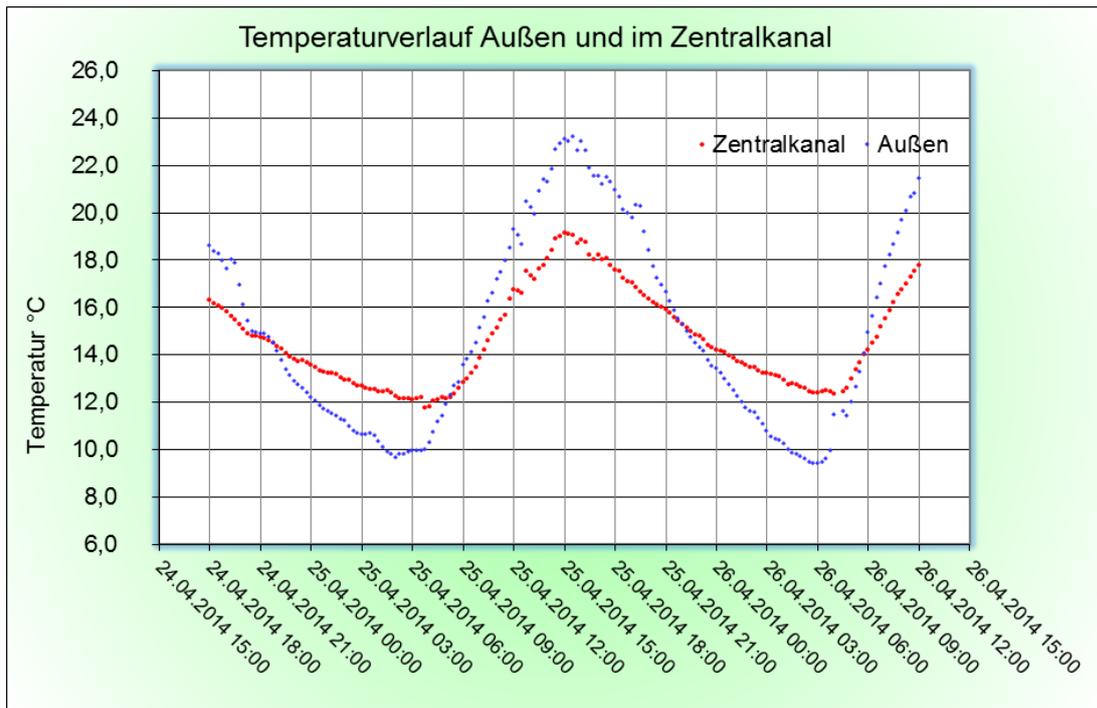


Abbildung 37: Außentemperatur und Zulufttemperatur im Zentralkanal im Tagesverlauf des 25.04.2014 (POMMER, 2015)

Ein typischer Kurvenverlauf ist Abbildung 37 zu entnehmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass in Abhängigkeit der Außentemperatur entweder eine Erwärmung oder Kühlung der Außenluft aufgezeichnet wird.

Kühl- und Vorwärmefekte

Um den unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen gerecht zu werden, wurden die Temperaturdaten nach Jahreszeiten getrennt ausgewertet. In Abbildung 38 sind die Differenzen zwischen Außentemperatur und Kanalmitte in Abhängigkeit von der Außentemperatur für den meteorologischen Sommer 2014 (1.6. bis 31.8.) dargestellt. Im Durchschnitt wurde die Zuluft bei einer Außentemperatur von 30°C um 5,5 K abgekühlt. Der thermoneutrale Punkt lag bei 16,8°C.

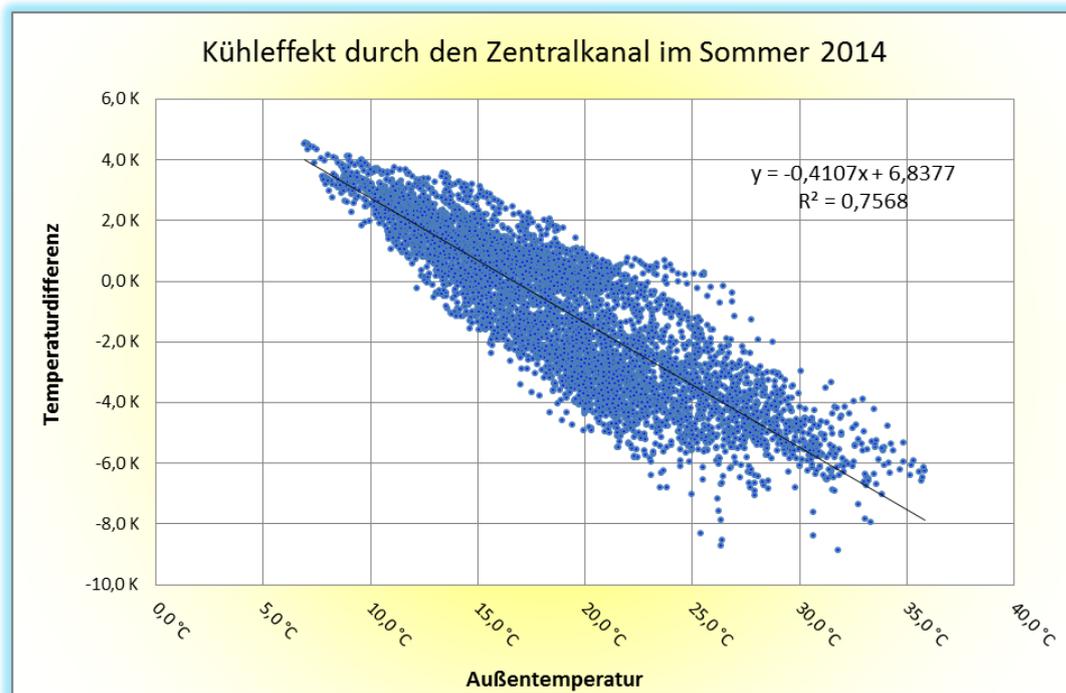


Abbildung 38: Abkühlung der Zuluft im meteorologischen Sommer 2014 (POMMER, 2015)

Im Winter 2013/14 (Abb. 39) hingegen wurde eine mittlere Vorwärmung von 5,8 K bei -10°C Außentemperatur erreicht. Der thermoneutrale Punkt lag bei 7,5°C.

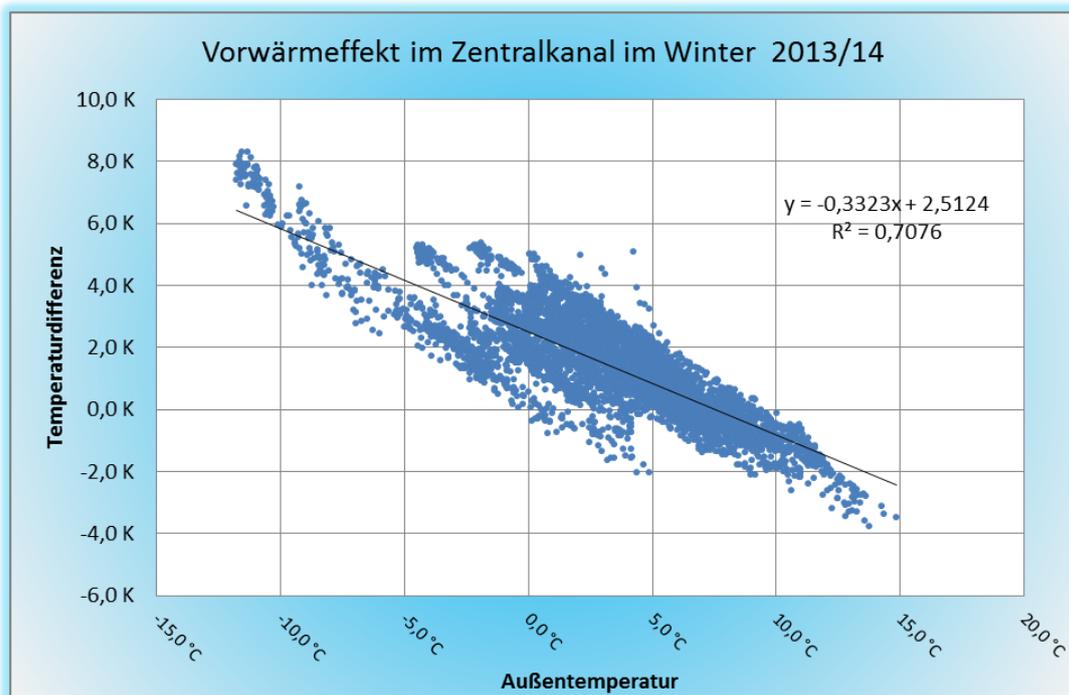


Abbildung 39: Vorkonditionierung der Zuluft im meteorologischen Winter 2013/14 (POMMER, 2015)

Zur Verdeutlichung der Pufferwirkung des Kanales wurden die Differenzen zwischen den Tagestiefst- und Tageshöchsttemperaturen berechnet. Im Jahresdurchschnitt 2014 betrug die Tagestemperaturdifferenz der Stallumgebung 8,9 K, im Zuluftkanal nur 4,1 K, d.h. die mittlere Pufferung durch den Kanal beträgt 4,8 K. Betrachtet man die Pufferung des Kanales in Abhängigkeit von der Tagestemperaturdifferenz der Außenluft wird deutlich, dass mit zunehmender Tagestemperaturdifferenz auch die Pufferwirkung steigt (Abb. 40). So wird eine extreme Tag-Nach-Schwankung von 20 K durch den Kanal um 11 K auf 9 K reduziert.

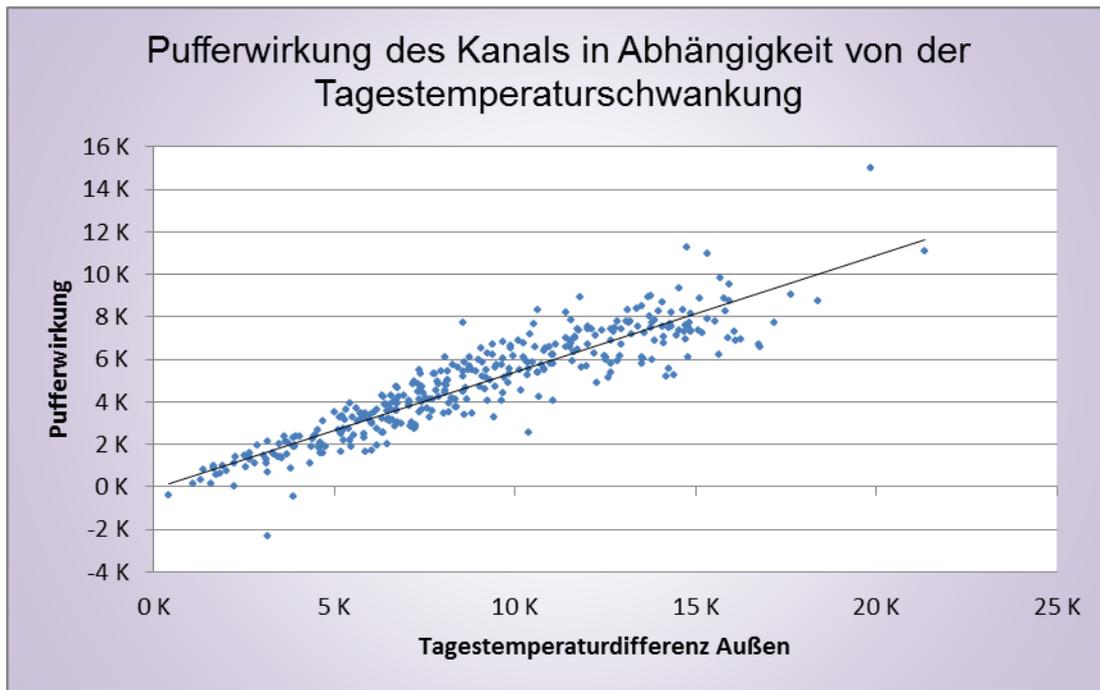


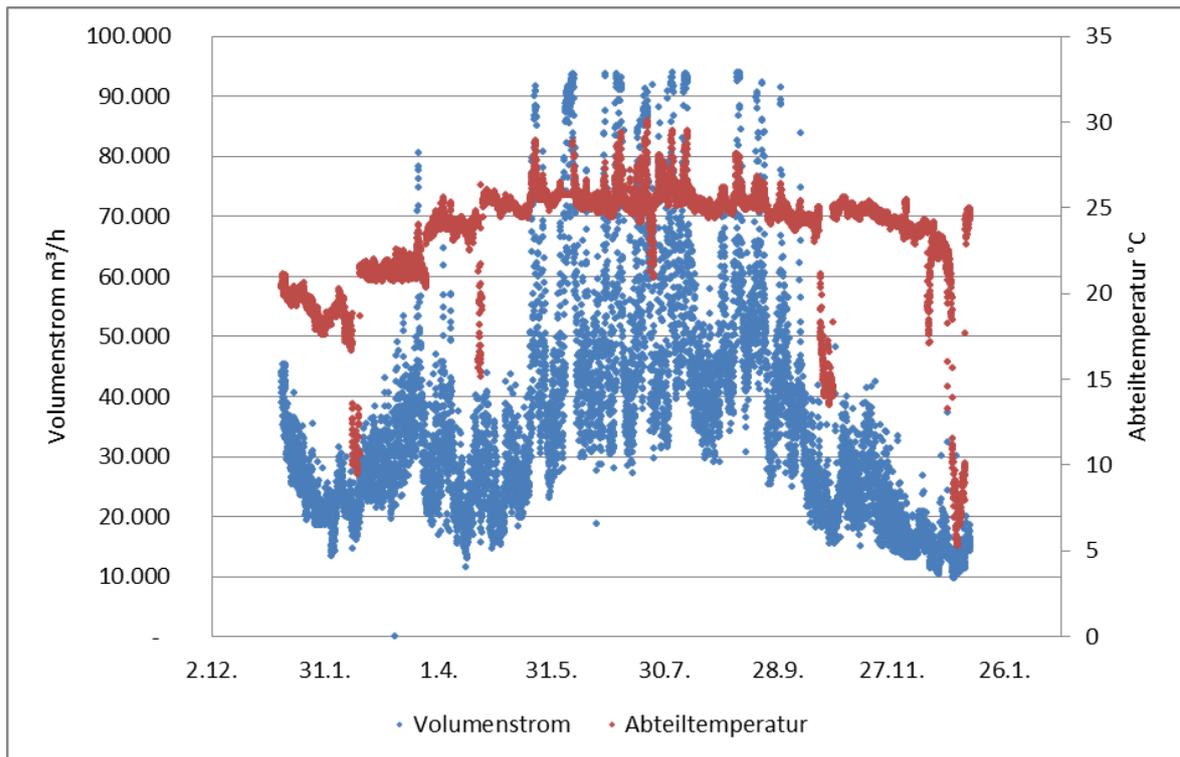
Abbildung 40: Pufferwirkung des Zuluftkanales in Abhängigkeit von der Tagestemperaturdifferenz der Stallumgebung (POMMER, 2015)

Volumenstrommessung

Die Messungen des Volumenstroms wurden für den Zeitraum 08.01.2014 bis 07.01.2015 ausgewertet.

Nach DIN 18910-1 muss für ein Endmastschwein in der Sommertemperaturzone I eine Lüfterleistung von $126 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ und für die Sommertemperaturzone II eine Lüfterleistung von $86 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ vorgesehen werden, um ein Ansteigen der Abteiltemperatur um mehr als 2 bzw. 3 K über die Außentemperatur zu verhindern. Da sich der Stall an der Grenze beider Temperaturzonen befindet, wurde als Planungsgrundlage mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 2,5 K gerechnet. Daraus ergibt sich eine maximale Sommerlufrate von 103 m^3 je Stunde.

Im kleineren Stallabschnitt (972 MSP) wurde die installierte Lüfterleistung von maximal 94.000 m^3 je Stunde im Jahr 2014 an 11 Tagen kurzzeitig abgerufen. Gleichzeitig wurde eine Abteiltemperatur von 30°C zwar kurzzeitig erreicht, aber nicht überschritten (Abbildung 41).



**Abbildung 41: Volumenstrom und Abteiltemperatur im kleineren Stallabschnitt
(POMMER, 2015)**

Im größeren Stallabschnitt wurde die installierte Leistung von 141.000 m³/h zu keinem Zeitpunkt voll abgerufen (max. 137.710 m⁻³h⁻¹). Hierzu muss angemerkt werden, dass sich im zentralen Abluftkanal des größeren Stallabschnittes Platten gelöst hatten, wodurch Falschluf angesaugt wurde, welches durch die Lüfter ausgeglichen werden musste.

Ergänzend zu den Volumenstrommessungen wurde am 14.10.2014 und am 20.1.2015 der Ammoniakgehalt in der Stallluft mehrerer Abteile bestimmt. Die Luftraten lagen der kühlen Jahreszeit entsprechend im Bereich von 10 und 30 %. Der maximal gemessene Wert bei der Minimumluftrate lag bei 17 ppm. Der Grenzwert der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung von 20 ppm wurde eingehalten.

Im Ergebnis kann eingeschätzt werden, dass die installierte Lüfterleistung ausreicht, um die Zielstellungen des Wärmeabtransportes nach DIN 18910 sowie der Schadgasgehalte nach Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung einzuhalten.

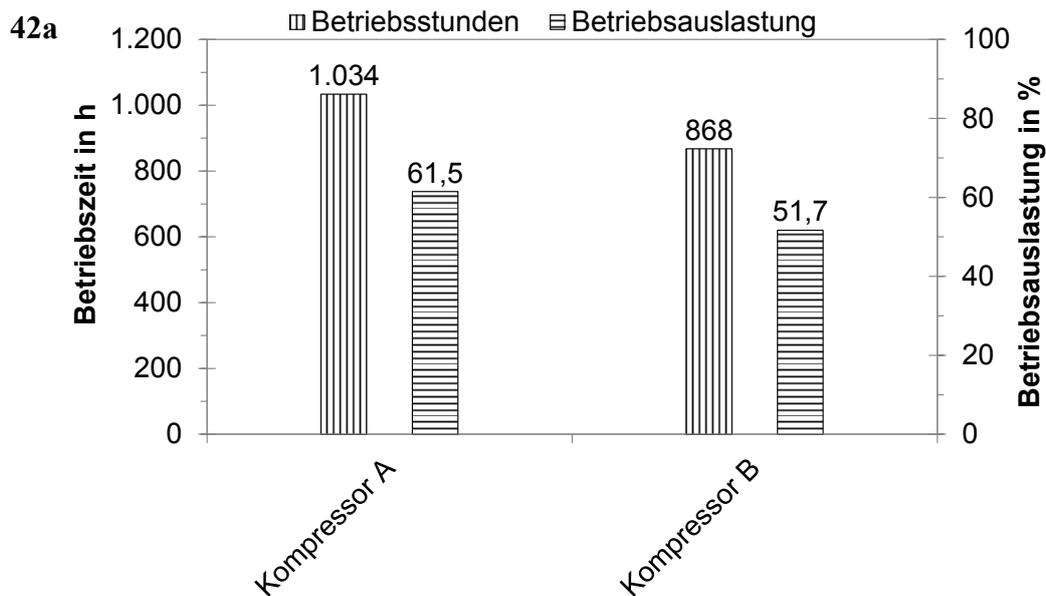
4.4.2 Die Grundwasser-Wärmepumpe

Klimatische Randbedingungen während des Untersuchungszeitraumes

Die Außentemperatur am Versuchsstandort waren im Mittel bei 2,0°C ($\bar{x}= 3,5^\circ\text{C}$). Der maximale Messwert lag bei 12,8°C und der Minimale bei -15,2°C. Die Temperaturen im Abferkelbereich betragen im Durchschnitt 23,0°C ($\bar{x}= 23,1^\circ\text{C}$) und war nahezu konstant. Bedingt durch die deutlich höheren Einstalltemperaturen von 34,0°C lag die Abteiltemperatur höher und betrug im Mittel 28,4°C ($\bar{x}=28,1^\circ\text{C}$). Zum Ende der Aufzuchtperiode wurde die Abteiltemperatur auf kontinuierlich auf 25,0°C heruntergeregelt.

Auslastung der Grundwasser-WP

Die Software der WP zeichnete die Betriebsstunden der Kompressoren A und B auf und legt sie im internen Datenspeicher ab. Diese könne kumuliert Abbildung 42a und 4b entnommene werden.



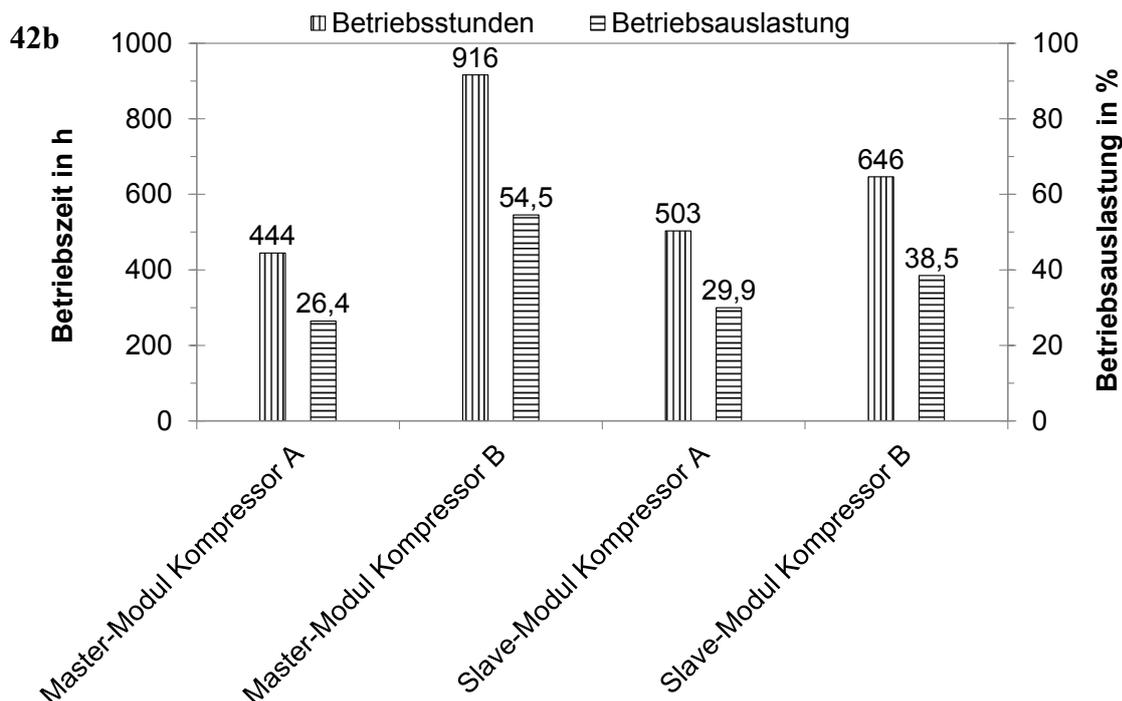


Abbildung 42: Betriebsstunden und Betriebsauslastung der WP-Kompressoren im Abferkelstall (a) und in der Ferkelaufzucht (b) (RÖSMANN, 2012)

Neben den absoluten Betriebsstunden der Kompressoren wird ergänzend die relative Betriebsauslastung der Kompressoren angegeben. Die Betriebsstunden von Kompressor A im Abferkelbereich lagen im Versuchszeitraum bei 1034 Stunden von 1680 möglichen was einer Betriebsauslastung von 61,5 % entspricht. Kompressor B erreichte mit 868 Betriebsstunden eine Auslastung von 51,7 % (Abb.: 42a).

Die vier Wärmepumpen-Kompressoren in der Ferkelaufzucht waren im Untersuchungszeitraum in der Summe 2.509 Stunden in Betrieb. Das entspricht für die Gesamtanlage im Mittel einer Betriebsauslastung von 37,3 %. Die Kompressoren der Master-Wärmepumpen liefen 211 Stunden länger als die kumulierten Betriebszeiten der zwei Module (Kompressoren) der Slave-Wärmepumpe. Die höchste Betriebsauslastung von 54,5 % konnte bei Kompressor B des Mastermoduls mit 916 Betriebsstunden ermittelt werden (Abb. 42b).

Leistungszahl der Grundwasser-WP

Die Abbildung 43 zeigt den elektrischen Energiekonsum unter Berücksichtigung der verschiedenen Bilanzgrenzen und gleichzeitig die daraus generierte nutzbare Wärmeenergie.

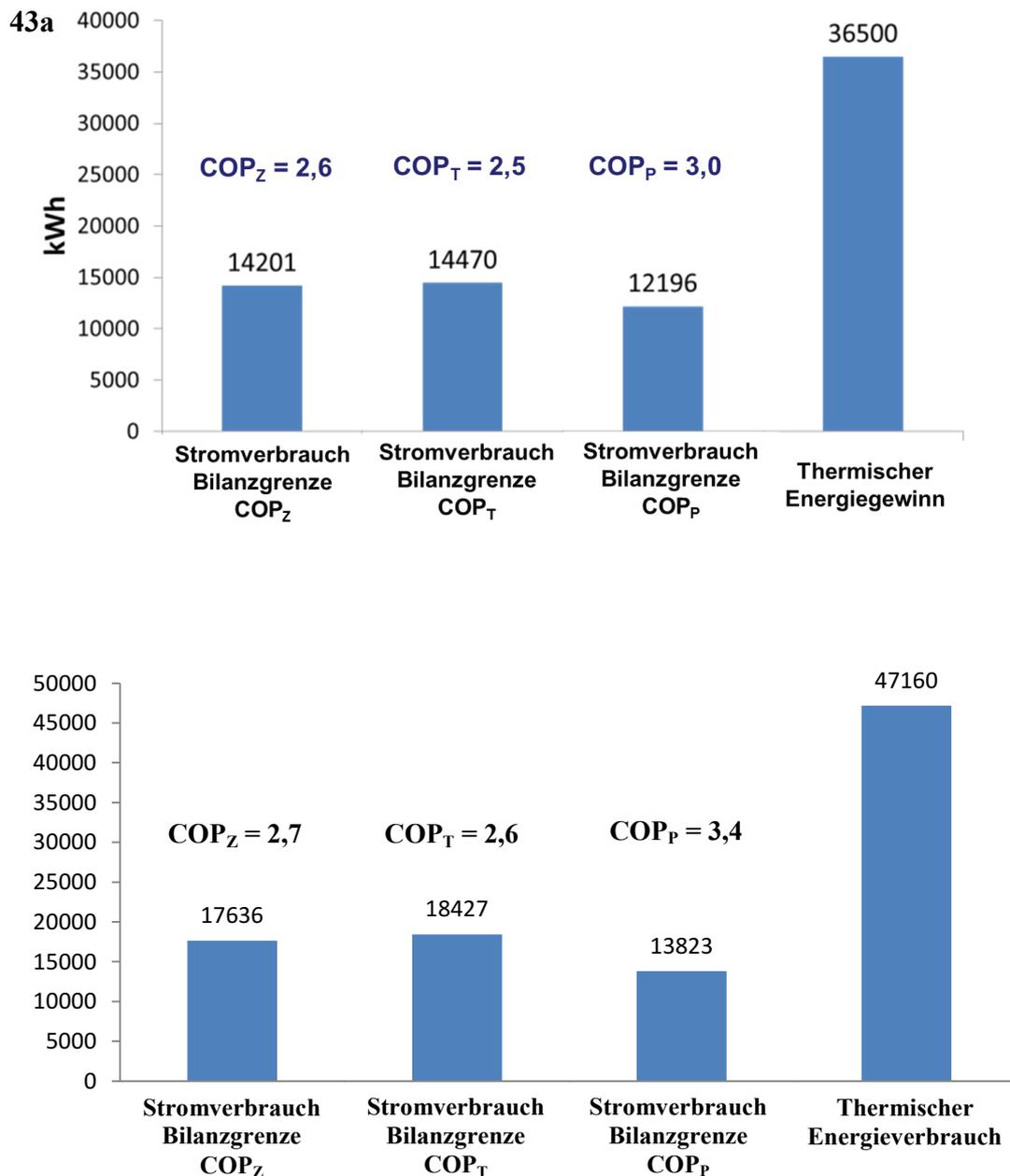


Abbildung 43: Thermischer Energiegewinn und unterschiedliche elektrische Energieverbräuche im Abferkelstall (a) und in der Ferkelaufzucht (b) während des Versuchszeitraums.

Für den gesamten Untersuchungszeitraum ergeben sich folgende Daten. Während der Messtage hatte die WP zusammen mit der Grundwasserförderpumpe im Abferkelbereich insgesamt 14.201 kWh verbraucht. Im gleichen Zeitraum stellte die WP in der Summe 36.500 kWh nutzbare Wärmeenergie für Heizzwecke zur Verfügung. Die COP_Z beträgt somit 2,6. Addiert man den zusätzlichen Stromverbrauch der Umwälzpumpen der drei Heizkreise von insgesamt 296 kWh_{el} hinzu, sinkt die COP um 0,1 auf 2,5. Betrachtet man das gesamte System ohne den Stromverbrauch der Grundwasserförderpumpe ergibt sich eine COP_P von 3,0 (Fig. 43a).

Für die Master-Slave-Wärmepumpe in der Ferkelaufzucht wurde für die WP und der Grundwasserförderpumpe 17.636 kWh_{el} aufgewendet. Im gleichen Zeitraum betrug die von der Wärmepumpe bereitgestellte nutzbare Wärmemenge zum Heizen in der Summe 47.160 kWh_{th}. Die COP der WP wurde analog zur COP der WP im Abferkelstall berechnet. Sie beträgt für COP_Z 2,7 und für COP_T 2,6. Betrachtet man hingegen das Wärmepumpensystem ohne die Grundwasserförderpumpe steigt die COP_P auf 3,4 (Fig. 43b).

Wärmemengen und erbrachte Heizleistung

Abbildung 44 gibt einen Überblick über die Wärmemengenverteilung im Abferkelbereich auf die jeweiligen Verbraucher. Als Ergänzung ist die benötigte Heizleistung der Wärmepumpe zur Bereitstellung der erforderlichen Wärmemenge dargestellt. Für die Beheizung der warmwasserdurchströmenden Ferkelnester wurden 36.160 kWh der von der WP bereitgestellten Wärme aufgewendet. Dies bedeutet, dass 3,0 kWh Ferkelnest⁻¹ d⁻¹ im Winter gebraucht wurden. Im Untersuchungszeitraum wurde im Mittel eine Leistung von 22,5 kW abgerufen. Dies entspricht etwa 57,5 % der max. Herstellerangaben.

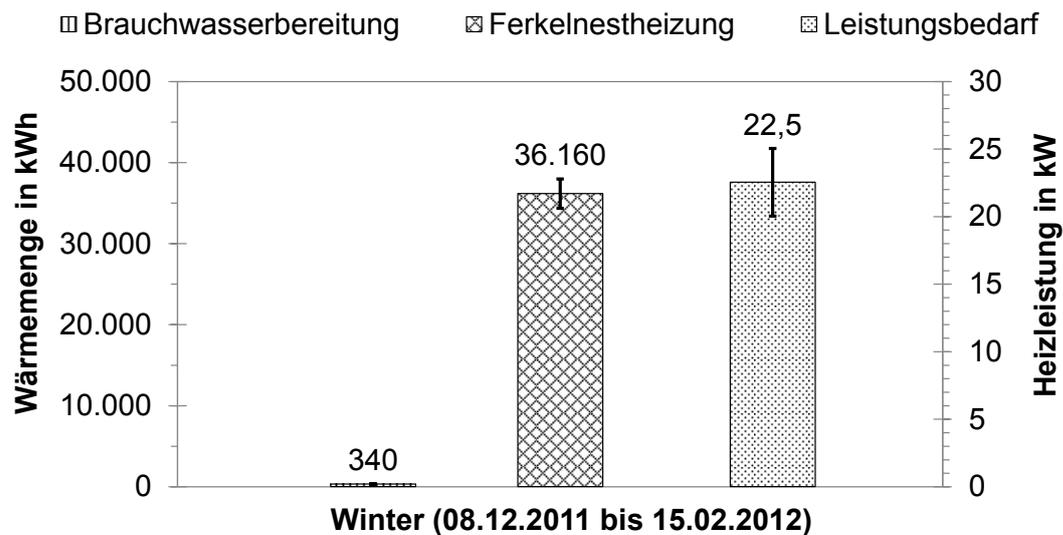


Abbildung 44: Wärmemengenverteilung auf die Verbraucher und die benötigte Heizleistung. Die Säulen der Brauchwasserbereitung und Ferkelneheizung sind mit einer Fehlerangabe ($\pm 5\%$ vom Messwert) angegeben sowie der Leistungswert entsprechenden Standardabweichung (RÖSMANN, 2012).

Dem Ferkelaufzuchtstall wurde mittels Flüssiggasstrahler und Grundwasser-WP im Versuchszeitraum insgesamt 55.216 kWh Wärme zugeführt. Das entspricht im Mittel etwa 790 kWh d^{-1} oder $0,2 \text{ kWh FP}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Die Wärmepumpe stellte 85,4 % der Wärmeenergie bereit, der Flüssiggasstrahler 14,6 %. Als erforderliche Heizleistung wurde für die Ferkelaufzucht, unter Berücksichtigung von Wärmepumpe und Flüssiggasstrahler, im Mittel 37 kW ($\sigma = 7,9 \text{ kW}$; $\tilde{x} = 36,1 \text{ kW}$) berechnet. Dieser Wert entspricht im Mittel 46,3 % der maximalen Anlagenleistung des Master-Slave-Systems (Abb. 45).

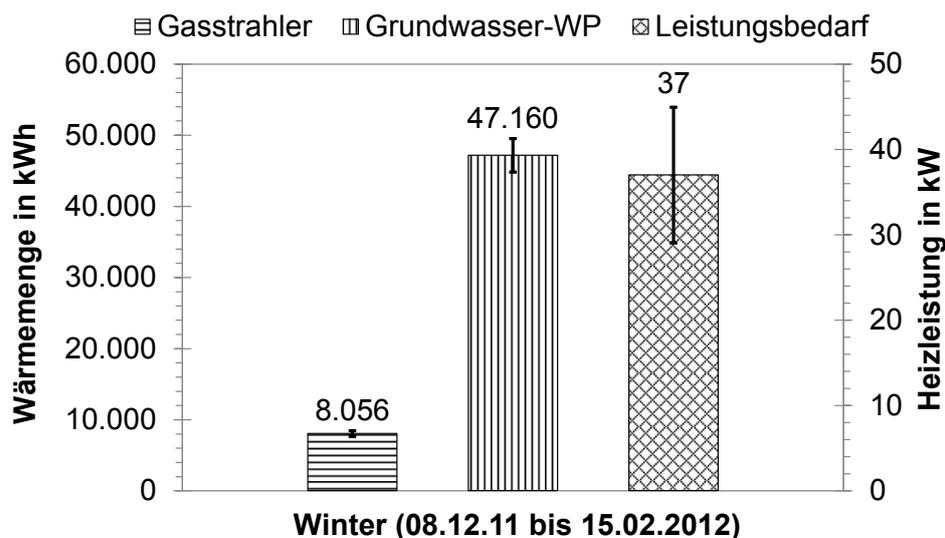


Abbildung 45: Heizenergieaufwendungen im Ferkelaufzuchtstall und der dafür erforderliche Leistung der Heiztechnik. Die Säulen der produzierten Wärmemengen des Flüssiggasstrahlers und der Wärmepumpe werden unter Angabe des Messfehlers ($\pm 5\%$) angegeben. Die dafür erforderliche Heizleistung wird mit ihrer Standardabweichung abgebildet (RÖSMANN, 2012).

Grundwasserfördermengen

Für die Wärmepumpenprozesse im Abferkel- und Ferkelaufzuchtstall wurden dem Förderbrunnen im Untersuchungszeitraum 18.049 m^3 Grundwasser entnommen, durch die Wärmepumpen geleitet und anschließend dem Schluckbrunnen zugeführt. Diese Summe entspricht einem täglichen Grundwasserbedarf unter in Abb. 42a und 42b angegebenen Betriebsauslastungen von zusammen gut $258 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Das Grundwasser trat mit einer nahezu konstanten Vorlauftemperatur von $\bar{x} = 9,7^\circ\text{C}$ ($\sigma = 0,1^\circ\text{C}$; $\tilde{x} = 9,7^\circ\text{C}$) in die Wärmepumpe ein und mit durchschnittlichen $6,7^\circ\text{C}$ ($\sigma = 1,4^\circ\text{C}$; $\tilde{x} = 6,7^\circ\text{C}$) wieder aus. Es wurde in der Wärmepumpe folglich um durchschnittlich $3,0 \text{ K}$ abgekühlt.

Dem Wärmepumpen-Prozess wurde über das Grundwasser im Mittel etwa $3,5 \text{ kWh}_{\text{th}} \text{ m}^{-3}$ an Wärmeenergie zugeführt.

In Abbildung 46 werden die Wassermengen angegeben, die täglich durch die Wärmepumpen gefördert wurden sowie das Verhältnis aus täglicher Wärmemengenproduktion zu täglichem Grundwasserdurchfluss durch die Anlagen an.

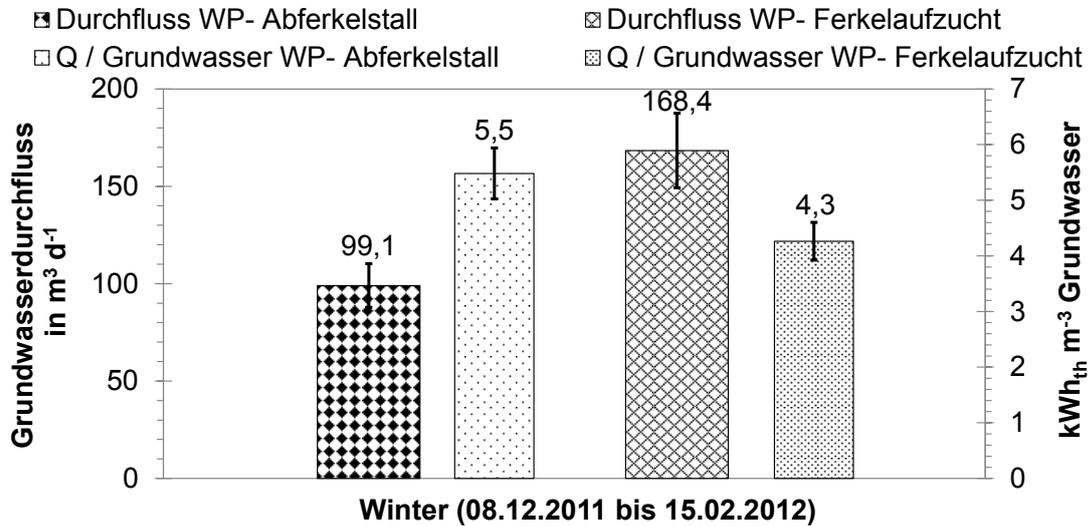


Abbildung 46: Täglicher Grundwasserdurchfluss durch die Wärmepumpen und erreichte Wärmeproduktion je m³ Grundwasser. Die entsprechenden Standardabweichungen sind ebenfalls zu entnehmen (RÖSMANN, 2012).

Im Abferkelstall wurden im Mittel 5,5 kWh_{th} je gefördertem m³ Grundwasser ($\sigma = 0,5$ kWh_{th} m⁻³; $\tilde{x} = 5,5$ kWh_{th} m⁻³) von der WP für Heizzwecke bereitgestellt, im Ferkelaufzuchtstall waren es bei einem täglichen Grundwasserdurchfluss von 168,4 m³ im Mittel 4,3 kWh_{th} m⁻³ ($\sigma = 0,3$ kWh_{th} m⁻³; $\tilde{x} = 4,3$ kWh_{th} m⁻³).

5 Diskussion

5.1 Dämmmaterial

Organische Dämmstoffe natürlichen Ursprungs sind in der Tierhaltungsbranche nicht sehr verbreitet. Dies mag zum einen daran liegen, dass eine ständige Verfügbarkeit dieser Dämmstoffe auf Grund der noch relativ geringen Nachfrage nicht gegeben ist. Diese bedingt leider auch den oftmals höheren Anschaffungspreis. Zum anderen wurden althergebrachte Dämmmaterialien im Zuge der Dämmstoffproduktion aus erdölbasierten Rohstoffen regelrecht verdrängt. Oft fehlen aber auch die Erfahrungswerte mit alternativen Dämmmaterialien oder die Anforderungen an die Form des Dämmstoffes können noch nicht erfüllt werden, obgleich diese Dämmstoffe gegenüber den aus synthetischen Rohstoffen hergestellten fast identische Wärmeleitfähigkeitswerte λ hervorbringen oder wesentlich höhere Wärmespeicherkapazitäten c aufweisen. Diese alternativen Stoffe haben also durchaus ihre Berechtigung. Auch der Problematik des Schädlings- beziehungsweise Nagetierbefalls kann mittels dieser Dämmstoffe entgegengewirkt werden. Die Erzeugung und Entsorgung dieser Dämmstoffe bieten langfristig umweltfreundlichere Alternativen, wenn von einem Einsatz brandverhütender Mittel abgesehen werden kann. Ein großer Nachteil ist die geringe bis fehlende wasserabweisende Wirkung. Es muss daher gewährleistet sein, dass der Dämmstoff vor direkter Wassereinwirkung geschützt wird.

Organische und Dämmstoffe synthetischen Ursprungs besitzen zusammen den größten Marktanteil und sind die am häufigsten in Nutztierställen eingesetzten Dämmstoffe. Sie haben sich bewährt in ihrer einfachen Handhabung und dem günstigen Anschaffungspreis. Des Weiteren sind sie tolerant gegenüber Feuchtigkeit. Steigt der Feuchtegehalt eines Faserdämmstoffes an, steigt auch in gleichem Maße die Wärmeleitfähigkeit des Materials und verschlechtert so dessen Dämmwirkung. Geschlossenzellige Dämmstoffe wie Polystyrol können nur sehr geringe Mengen Feuchtigkeit aufnehmen und werden so in ihrer wärmedämmenden Funktion kaum beeinflusst (PFUNDSTEIN et al., 2007). Durch Beschichtungen werden sie widerstandsfähiger gegen Druck und Wassereinfluss gemacht. Ihre Wärmeleitfähigkeit ist gegenüber anderen Dämmstoffen besonders gut. Die jedoch zum Teil mittelmäßigen Wärmespeicherkapazitätswerte sowie ihre Anfälligkeit für Schädnerbefall bedeuten einen großen Nachteil. Ein fachgerechter Einbau ist

unerlässlich, da Form- und Längenveränderungen die Funktion dieser Dämmstoffe stark einschränken können.

Anorganische Dämmstoffe aus natürlichen und synthetischen Rohstoffen besitzen eine sehr gute bis gute Wärmeleitfähigkeit. Diese Dämmstoffe bieten den Vorteil, dass sie in der Regel nicht brennbar sind und so unter die Baustoffklassen A1 oder A2 fallen. Nachteilig ist, dass die Wärmespeicherkapazität c dieser Dämmstoffe mit Werten von 1.030 bis 800 J kg⁻¹K⁻¹ relativ gering ist. Ihre wasserabweisende Wirkung macht sie dennoch für den Stallbau interessant. Schüttdämmungen (wie die aus Bläherlit) bieten den großen Vorteil Nagetierbefall zu unterdrücken, da eine Zerstörung nicht möglich ist.

Eine schädlingsabweisende Wirkung, wie in Kapitel 2.2.6 bereits erläutert, ist nur vereinzelt möglich. Es fällt auf, dass kein Produkt der organischen Dämmstoffe aus Rohstoffen synthetischen Ursprungs diese Eigenschaft besitzt. Nur Dämmstoffe aus Bläherlit verhindern auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften einen Gang- und Nestbau vollkommen. Alle weiteren Dämmstoffe wie die Flachsschäben, die Neptunballfaser und die Glaswollplatte scheinen den Nagern auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften zwar nicht als Futtermittel zu dienen, sind aber vor langfristigem Verbiss durch die Schadnager ebenfalls nicht vollkommen geschützt.

Die Exponatsammlung mit den Kennzahlen wurde in Campus Klein-Altendorf in Vitrinen Besucher gezeigt.

5.2 Wärmerückgewinnung

5.2.1 Bewertung der Ergebnisse zum rekuperativen Luft-Luft- Wärmetauscher

Aus dem einjährigen Untersuchungszeitraum der WRG ergab sich die Möglichkeit, die Technik umfassend hinsichtlich ihres Leistungspotentials zu quantifizieren. Des Weiteren konnten die sich auf die Leistung auswirkenden Faktoren bestimmt und untersucht werden. Fundierte Aussagen über die Leistung von Rekuperatoren sind unter sich ständig ändernden Bedingungen nur durch Langzeitmessungen zu erreichen. Bei Kurzzeitbetrachtungen oder Punktmessungen zur Bewertung solcher Systeme besteht die große Gefahr einer Überschätzung der Wärmerückgewinnungstechnik!

Die Literatur nennt für die Lüftungswärmeverluste von Stallanlagen eine relative Größenordnung zwischen 65 % und 90 % der Gesamtwärmeverluste (vgl. Kap. 1.1). Diese

Zahlen verdeutlichen das große Wärmepotential, das durch eine WRG einem Stallgebäude zum Teil erneut nutzbar gemacht werden kann.

Etwa 142.000 kWh_{th} wurden durch den rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher in dem einjährigen Untersuchungszeitraum von der Abluft auf die Zuluft übertragen. Diese Wärmemenge wäre ohne WRG ungenutzt an die Umwelt abgegeben worden!

Feller (2008) berechnete für einen rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauscher vom Typ WVTL 630 ein Verhältnis vom Stromaufwand zum Wärmeertrag von etwa

1 kWh_{el} zu 11 kWh_{th}. Der Temperaturwirkungsgrad lag in dieser Untersuchung auf einem Niveau zwischen 0,1 und 0,2. Bei Klement (2001) lagen über 90 % der Werte des Temperaturwirkungsgrades in einem Bereich zwischen 0,2 und 0,3.

Der WVTL 480 wurde von Okt. 2009 bis Sep. 2010 messtechnisch betreut und erzielte bei einer mittleren Betriebszeitauslastung von 88,4 % im Jahresdurchschnitt ein Energieverhältnis von 1 kWh_{el} zu 15,8 kWh_{th}. Er erreichte somit in Bezug auf das Wärmeertragsverhältnis von Feller 2008 ein um 43,6 % besseres Ergebnis. Ähnlich verhielt es sich mit dem Wirkungsgrad. Im Jahresdurchschnitt erreichte die WRG einen Temperaturwirkungsgrad von 0,41 ($\sigma = 0,07$; $\bar{x} = 0,40$). 86,6 % der Messwerte lagen in einem Bereich von $\eta_T \geq 0,35$.

Das von Klement (2001) diskutierte Problem der Verschmutzung von Tauscherflächen durch Stallstäube konnte im Untersuchungszeitraum teilweise bestätigt werden. Grundsätzlich befinden sich in der Abluft von Tierställen ohne vorherige Filterung Stäube, deren Zusammensetzung vielseitig ist. Haften sich diese an den gewendelten Tauscherwarben kontinuierlich an, sinkt der Temperaturwirkungsgrad der Anlage innerhalb kürzester Zeit drastisch ab und die Anlagenwiderstände nehmen zu (HEINRICH et al., 1993; KLEMENT, 2001). Dieses Phänomen wurde über den gesamten Winterzeitraum bei abgeschalteter Tauscherflächenreinigung nicht beobachtet! Als Grund hierfür ist das ständig abluftseitig anfallende Kondensat zu nennen. Dieses fällt an der Tauscherfläche bei großen Temperaturdifferenzen der beteiligten Luftströme kontinuierlich an und führt so durch den vertikalen Abfluss zur fortwährenden Reinigung der WRG.

In der Übergangszeit und im Sommer verhielt es sich jedoch anders: Durch die geringere Temperaturdifferenz zwischen der Ab- und Frischluft unterblieb die kontinuierliche Kondensatbildung an den Kontaktflächen. Der WVTL 480 wurde in dieser Zeit so

betrieben, dass er über die teilautomatisch gesteuerte Tauscherreinigung in regelmäßigen Abständen die Tauscherflächen von anhaftendem Staub befreite.

5.3 Regenerative Heiz- und Kühltechnologien

5.3.1 Unterflurzuluffführung

Bewertung der Temperaturverläufe

Der Beton sowie das den Kanal umgebende Erdreich nehmen eine Speicherfunktion wahr. In langen Hitzeperioden mit durchgängig hohen Temperaturen auch nachts („tropische Nächte“) heizt sich das Material auf. Dementsprechend verschiebt sich der thermoneutrale Punkt (die Temperatur, bei der die Zuluft weder gekühlt noch geheizt wird), nach oben. Deshalb sind die punktuell nachgewiesenen 8 K Abkühleffekt nicht verallgemeinerbar.

Schierbaum (2003) gibt für diesen Typ des EWTs an, dass die in das Stallgebäude einströmende Zuluft im Sommer (Frischlufansaugung von außen) und Winter (Frischlufansaugung aus dem Dachraum) jeweils um ca. 2 K geringer bzw. höher ist als die angesaugte Frischlufemperatur. In seiner Auswertung wird der Effekt der Amplitudendämpfung dieses Systems deutlich, wodurch die Zuluft im Tagesverlauf sehr gleichmäßig temperiert in den Tierbereich einströmt (vgl. auch BEYERSDORFER und GERNAND, 2011).

Threm et al. (2011) konnten für den Winter durch die Unterflur-Zuluftführung eine Erwärmung der angesaugten Frischluf bis zum Abteileintritt von bis zu 10 K messen, wobei die Temperaturerhöhung um 7 K bereits auf den ersten 32 m des Luftkanals geschah. Um weitere 3 K wurde die angesaugte Frischluf im zweiten, 26 m langen Teil des Kanals erwärmt. Erwähnt sei an dieser Stelle jedoch, dass im ersten Bereich des Luftkanals Heizelemente installiert waren, die die Frischluf zusätzlich aufheizten.

Beyersdorfer und Gernand (2011) untersuchten einen Abferkelstall mit 266 Abferkelplätzen und Unterflurzulufführung. Als Ergebnis ihrer Messungen geben sie für Sommertage mit 28°C bis 33°C Außentemperatur eine Abkühlung der in die Abteile einströmenden Zuluft von 6 K (bei 35°C bis zu 8 K) an. Als positive Randerscheinungen der Zuluft-Führung werden zusätzlich die Luftfeuchtekkonditionierung sowie eine NH₃-Minderung im Abteil genannt. Es wird jedoch von den Autoren darauf hingewiesen, dass

das Kühlpotential einer Unterflur-Zuluftführung von vielen Faktoren wie z. B. Ort des Frischlufteintrittes (Himmelsrichtung), Kanallänge, -querschnitt, -geometrie oder Luftgeschwindigkeit abhängig ist.

5.3.2 Einsatz einer Grundwasser-Wärmepumpe

Bewertung der Ergebnisse zur Grundwasser-Wärmepumpe

Die relativ geringen Auslastungsgrade der WP (vgl. Abb.44 und 45) beruhen auf der Tatsache, dass bei deren Dimensionierung eine Verdoppelung beider Stallanlagen zu einem späteren Zeitpunkt eingeplant wurde. Im Abferkelstall könnte es bei Verdopplung des Gebäudes zu einem Leistungsdefizit der WP kommen (vgl. Abb. 44; Nennleistung 40 kW), welches durch Einsatz des Heißluftgebläses ausgeglichen werden könnte. Die erbrachte Heizleistung der WP in der Ferkelaufzucht lässt erwarten, dass die installierte WP eine ausreichende Dimensionierung aufweist (vgl. Abb.45; Nennleistung 80 kW).

Cremer (2011) schätzt die Einsatzmöglichkeit von Wärmepumpen in der Nutztierhaltung auf Grund der relativ geringen Vorlauftemperaturen (ca. 45°C) bei Einsatz von Niedertemperatur-Warmwasser-Heizungen als gut und damit wirtschaftlich ein. Die Ferkelnester im Abferkelstall wurden mit einer Warmwasser-Vorlauftemperatur von 44°C betrieben. Nur ein sehr geringer Teil der produzierten Wärme (0,9 %) wurde für das auf 50°C zu erhitzende Brauchwasser benötigt (vgl. Abb.44).

Die Vorlauftemperatur des Heizkreislaufes im untersuchten Ferkelaufzuchtstall fiel mit 50°C (für die Raumheizung) um 5 K höher aus. Aufgrund dieser erhöhten Vorlauftemperatur sind negative Auswirkungen bereits im Vorfeld auf die COP der Wärmepumpenanlage zu erwarten gewesen. Es wurden lediglich COP-Werte zwischen 2,5 und 3,3 erzielt.

Um die COP der Wärmepumpe zu verbessern, wurde durch Steigerung des Grundwasserdurchflusses und durch die Absenkung der Vorlauftemperatur im Abferkelstall versucht, die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke zu verringern und somit die COP zu verbessern (vgl. Abb. 15). Diese Modifizierung wurde nach kurzer Laufzeit rückgängig gemacht, weil die gewünschte Liegeflächentemperatur von circa 38-40°C im Abferkelstall (aufgrund der abgesenkten Vorlauftemperatur) nicht

mehr erzielt wurde und sich die COP aufgrund des steigenden Leistungsaufwandes für die Grundwasser-Förderpumpe nur um etwa 0,1 verbesserte.

5.4 Fazit und Handlungsempfehlungen

5.4.1 Dämmstoffe

Die Ausarbeitungen zeigen dass, kein Dämmstoff alle an ihn gestellten Anforderungen erfüllen kann. Es sind viele Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, um die Entscheidung für einen Dämmstoff zu treffen. Da bei der energetischen Betrachtung des baulichen Wärmeschutzes immer sowohl der winterliche als auch der sommerliche Wärmeschutz berücksichtigt werden muss, führen Bemühungen die Dämmstoffdicken zu verstärken meist nicht zu einem ausschlaggebend gelungenen Wärmeschutz. Vielmehr ist eine ausgewogene Kombination aus Wärmedämmung, Speicherfähigkeit der verwendeten Materialien und der Kostenfaktor entscheidend. Mit Blick auf immer weiter ansteigende Energiepreise sollte dennoch ganz klar zwischen einmaligen Investitionen und laufenden Kosten unterschieden werden. Hohe Anschaffungskosten für einen Dämmstoff können sich bei der richtigen Wahl schnell bezahlt machen (ELLERSIEK, 2009). Werden die verwendeten Materialien zusätzlich fachgerecht verbaut, kann langfristig von Energieersparnissen im Bereich der Anlagen- und Lüftungstechnik, sowie von einer verbesserten Tiergesundheit ausgegangen werden. (BÖHMFELD, 2009)

5.4.2 Wärmerückgewinnung

Rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher

Die zu erzielende Heizleistung der WRG ist in einem hohen Maß von der Temperaturdifferenz zwischen der angesaugten Frisch- und Abluft abhängig. Daher eignet sich diese Technik zum einen besonders für Nutztierställe, in denen ganzjährig hohe Innenraumtemperaturen zu gewährleisten sind. Als mögliche Einsatzgebiete können hierfür beispielsweise die Ferkelaufzucht, die Aquakultur (geschlossene Kreislaufanlagen) oder die Geflügelmast genannt werden. Allerdings muss es sich in allen diesen Fällen, als eine Lüftungstechnische Voraussetzung, um zwangsbelüftete Warmställe (vorzugsweise mit Zentralabsaugung) handeln.

Außerdem lässt sich die WRG sinnvoll in klimatischen Gebieten mit relativ geringen Jahresdurchschnittstemperaturen bzw. langen Winterperioden einsetzen. Neben einer hohen durchschnittlichen Heizleistung kann hier auch eine hohe zeitliche Auslastung der WRG erwartet werden.

Die Überwachung der WRG-Technik ist mit einem Arbeitszeitaufwand verbunden, der bei einer Investitionsentscheidung zu berücksichtigen ist. Eine kontinuierliche Kontrolle und evtl. Reinigung der Tauscherflächen garantieren hohe Wirkungsgrade und geringe spezifische Gesamtkosten für die zurückgewonnene Wärme. Zusätzlich ist der Einsatz im zentralen Kanal vorteilhaft.

5.4.3 Regenerative Heiz- und Kühltechnologien

Unterflurzuluffführung

Die vorliegende Untersuchung zur Ermittlung und Bewertung der Unterflurzuluffführung in einer Schweinemastanlage konnte folgende Resultate erzielen.

- Im Sommer konnte bei einer Umgebungstemperatur von 30°C eine mittlere Abkühlung der Zuluft um 5,5 K erreicht werden.
- Im Winter konnte bei einer Umgebungstemperatur von -10°C eine mittlere Vorwärmung um 5,8 K erreicht werden.
- Die Tag-Nacht-Schwankungen der Zulufttemperatur wurden im Jahresdurchschnitt um 4,8 K verringert. Mit zunehmenden Tagestemperaturdifferenzen steigt der Effekt.

Es bleibt festzuhalten, dass durch die Kühlung der Zuluft Temperaturspitzen über 30°C im Abteil weitestgehend vermieden werden. Damit leistet diese Zuluftführung einen messbaren Beitrag zum Wohlbefinden der Mastschweine und trägt zu einer effizienten Nutzung der eingesetzten Energien sowie zur Vermeidung von Hitzestress bei.

Grundwasser-Wärmepumpe

Die vorliegende Untersuchung der WP-Systeme liefert einen Beitrag zur Beurteilung der zu erwartenden Leistungen von regenerativen Heiztechnologien in der Praxis. Des Weiteren konnte die WP realistisch bezüglich ihres Verhältnisses des Stromaufwandes zum Energieertrag sowie Energieeffizienz charakterisiert werden.

Grundwasser-Wärmepumpen können in der Nutztierhaltung nur bei geringen Vorlauftemperaturen des Heizkreislaufes bzw. bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ökologisch und ökonomisch Wärme bereitstellen (vgl. Abb. 14). Diese in der Literatur häufig erwähnte Bedingung an die Heizkreis-Vorlauftemperatur einer WP (z. B. BAUMANN et al., 2007) konnte auch in der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden. Aus diesem Grund sollten bei der Installation einer Grundwasser-Wärmepumpe in Nutztierställen u. a. folgende Aspekte unbedingt berücksichtigt werden:

1. Die Warm-Wasser- Zonenheizungsvariante ist aufgrund der tendenziell geringeren Vorlauftemperatur den Raumheizungsvarianten vorzuziehen.
2. Warmwasserleitungen des Heizkreislaufes sollten möglichst gut wärmegeklämt und auf direktem Weg zum Heizkörper bzw. zur beheizten Liegefläche geführt werden. Dadurch bleiben die Transportwärmeverluste gering und die Vorlauftemperaturen können entsprechend niedriger gewählt werden.
3. Zonenheizungen sollten möglichst im Parallelverfahren verlegt werden. Das verkürzt die zu überbrückenden Distanzen des Heizkreis-Vorlaufes mit der sich daraus ergebenden Möglichkeit, die Vorlauftemperaturen möglichst niedrig zu wählen und dennoch eine homogene Wärmeverteilung im Aufenthaltsbereich der Tiere gewährleisten zu können.
4. Liegeflächen sollten möglichst mit einer Wärmeschutzabdeckung versehen werden. Dadurch kann den wärmebedürftigen Tieren bereits bei einer niedrigen Heizkreis-Vorlauftemperatur ein optimales Mikroklima bereitgestellt werden.
5. Die Energieaufwendungen der elektrischen Verbraucher sollten möglichst gering gehalten werden.

Durch Berücksichtigung der zuvor genannten Installationsempfehlungen bei der Wärmeverteilung in Tierställen werden die Voraussetzungen für eine möglichst niedrige Vorlauftemperatur des Heizkreislaufes geschaffen. Diese stellt die wichtigste und beeinflussbarste Stellgröße für den ökonomischen und ökologischen Betrieb einer Grundwasser-WP dar.

Unter diesem Aspekt ist eine Kombination mit anderen regenerativen Heizsystemen in der Praxis gewiss sinnvoll, um eine Effizienzsteigerungen zu erreichen. Als eine mögliche Kombination würde sich in diesem Zusammenhang beispielsweise ein Modulstall mit EWT als Ferkelaufzuchtstall anbieten, dessen Heizsystem durch eine Sole-WP ergänzt wird. Der Sole-Kreislauf der WP würde dabei in den zentralen Abluft-Sammelkanal des Modulstalles integriert. Der Abluft könnte auf diese Weise auf hohem Temperaturniveau Wärme entzogen werden. Allerdings müsste dabei ein sicherer Abfluss des im Abluftsammlkanal kontinuierlich anfallenden Kondensates gewährleistet sein, um Bauschäden ausschließen zu können.

6 Zusammenfassung

6.1 Dämmstoffe

In der vorgestellten Untersuchung wurde vergleichend eine Auswahl von Dämmstoffen vorgestellt und eine mögliche Eignung für den Gebrauch in landwirtschaftlich genutzten Gebäuden aufgezeigt.

In den ersten Kapiteln wurden dazu zunächst wichtige Grundlagen (historische, begriffliche, und theoretische) gelegt. Im Anschluss wurden die Dämmprodukte vorgestellt und mittels Tabellen die Eignungsmöglichkeit für den Einsatz in Stallgebäuden näher betrachtet. Durch den Vergleich der physikalischen Größen der Dämmstoffe konnten Stärken und Schwächen dieser Materialien aufgezeigt werden. Dabei wurde festgestellt, dass ein direkter Vergleich zwischen Dämmstoffen organischen und anorganischen Ursprungs nicht möglich ist. Vielmehr sollte zwischen Dämmstoffen aus Rohstoffen natürlichen und solchen synthetischen Ursprungs unterschieden werden.

Der direkte Vergleich der organisch dämmenden Materialien aus natürlichen und aus synthetischen Rohstoffen zeigt die höhere Wärmeleitfähigkeitswerte λ von nur $0,039 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ der Holzweichfaserplatte und der Flachsfaserplatte im Gegensatz zu dem Wärmeleitfähigkeitswert der PUR-Platte von $0,023 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Auch der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ ist im Vergleich um ein Vielfaches geringer. Wasserabweisende Wirkung und Druckbelastbarkeit sind bei denen aus natürlichen Rohstoffen kaum bis gar nicht vorhanden. Im Gegensatz dazu zeigen, bis auf eine Ausnahme, die synthetischen Dämmmaterialien eine wasserabweisende Wirkung und eine Beständigkeit gegen Druck. Die Wärmespeicherkapazitätswerte sind allerdings nur bei den natürlichen Dämmmaterialien besonders hoch und auch eine schädlingsabweisende Wirkung ist nur bei einigen dieser natürlichen Dämmstoffe gegeben.

Anorganische Dämmstoffe aus Rohstoffen natürlichen Ursprungs weisen z. B. bei Bläherliten geringere Wärmeleitfähigkeitswerte von bis zu $0,04 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Bei Dämmstoffen aus synthetischen Rohstoffen zeigen die Mineralwollämmstoffe etwas geringere Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $0,032 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. In beiden Gruppen zeigen die Wärmespeicherkapazitäten niedrige Werte zwischen $1.030\text{-}800 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ als die der organischen Dämmmaterialien. Eine wasserabweisende Wirkung und Druckbelastbarkeit

ist je nach Hersteller grundsätzlich gegeben. Markante Unterschiede weisen organische und anorganische Dämmstoffe vor allem bei der Einteilung in die jeweiligen Baustoffklassen auf. Während anorganische Dämmstoffe bereits ab einer Feuerwiderstandsklasse von B1 (schwerentflammbar) erworben werden können, sind organische Dämmstoffe erst ab einer Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) erhältlich.

6.2 Einsatz von WRG und regenerativer Energien

Der Einsatz regenerativer Energietechnologien (einschließlich WRG) ist in der Nutztierhaltung ein geeigneter Ansatz, die Stallklimagestaltung in zwangsbelüfteten Warmställen energieeffizient, ökonomisch und ökologisch zu gestalten. Dafür stehen dem Tierhalter grundsätzlich seit mehreren Jahrzehnten unterschiedliche technische Anlagenlösungen zur Verfügung. Das Ziel war deshalb, regenerative Heiz- und Kühlsysteme in zwangsbelüfteten Tierställen hinsichtlich ihres energetischen Leistungspotentials unter Praxisbedingungen zu bewerten. Repräsentative Datenerhebungen zur energetischen Bewertung von regenerativen Heiz- und Kühltechniken erfordern aufgrund einer Vielzahl von Einflussfaktoren Langzeituntersuchungen unter praxisüblichen Bedingungen. Die Ergebnisse der Langzeitmessungen sollten realistische Kennzahlen für Beratung und Praxis liefern.

Die untersuchten Anlagen konnten auf Basis aller relevanten, kontinuierlich erfassten Messgrößen die anlagenspezifischen Leistungsparameter bestimmt werden.

Die Wärmerückgewinnung (WRG) wurde in einem Ferkelaufzuchtstall für 2.200 Tiere installiert. Die kalte Frischluft wird auf der einen Seite durch glatte, gewendelte und aus Kunststoff bestehende Tauscherflächen von oben durch das Tauschaggregat geführt. Die warme, aus dem zentralen Abluftsammelkanal stammende Abluft wird gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung von unten nach oben durch den Wärmetauscher geleitet. Die angewärmte Zuluft gelangt anschließend über den Zentralgang in die Ferkelaufzuchtteile. Während der einjährigen Untersuchung (Okt. 2009 - Sep. 2010) konnte bei einer durchschnittlichen Betriebszeitauslastung von 88,4 % im Jahresdurchschnitt eine Heizleistung von 18,7 kW erzielt werden. Sie erreichte somit im Mittel ca. 17 % der vom Hersteller angegebenen maximalen Heizleistung im Jahresverlauf. Unter Aufwendung einer kWh elektrischen Energie konnte der rekuperative Luft-Luft-Wärmetauscher einen Wärmeoutput von 15,8 kWh generieren.

Das Verfahren der Unterflurzuluftführung ist Bestandteil einer Schweinemastanlage mit 5.160 Tierplätzen, die in Naundorf in den Jahren 2011/12 errichtet wurde. Die Anlage besteht aus 2 Kammställen und Sie ist mit einer Unterflurzuluftführung ausgestattet. Die Zuluft wird durch unter den Gebäuden liegende Kanäle angesaugt, was einen Wärmeaustausch mit dem um die Kanäle liegenden Erdreich zur Folge hat. In den Sommermonaten konnte eine Abkühlung der Zuluft um 5,5 K erreicht werden. In den Wintermonaten wurde Zuluft um 5,8 K erwärmt. In Tabelle 16 ist neben den im Ergebnissteil aufgeführten Verfahren, der Stromaufwand und Energieertrag des Modulstalls mit ETW dargestellt. Dieser steht exemplarisch für die durch das Erdreich beeinflusste Zuluftführung. Die Werte verdeutlichen, dass regenerative Energiequellen auch für Kühl- und Heizzwecke in Tierställen (insb. Schweinemastanlagen) nutzbar sind. Ihr Einsatz ist allerdings schon früh bei der Anlagenplanung zu berücksichtigen.

Tabelle 16: Verhältnis des Stromaufwandes zum Energieertrag bei untersuchten regenerativen Heiz- und Kühlsystemen

Q in kWh	Rekuperativer Luft-Luft- Wärmetauscher (RÖSMANN, 2012)	Modulstall mit Erdwärmetauscher (KROMMWEH et al., 2014)	Grundwasser-WP (RÖSMANN, 2012)	
			Ferkel- aufzucht	Abferkel- stall
Stromaufwand in kWh _{el}	8.958	2.568 ^{*2}	17.636	14.202
Σ Energieertrag	141.923	508.275	47.160	36.500
davon Wärme	141.923	489.820	47.160	36.500
davon Kälte in kWh _{th}	-	18.455	-	-
COP _T	15,8	197,9 24,7 ^{*4}	2,6	2,5

Die untersuchten Grundwasser-Wärmepumpen sind dagegen eine Technik die nachträglich eingebaut werden kann. Jedoch bleibt auch hier zu beachten, dass es sich um ein

Niedertemperaturheizsystem handelt, das nur mit niedrigen Vorlauftemperaturen effizient Wärme bereitstellt. Die untersuchten WP wurden in einem Abferkelstall für 172 säugende Sauen und in einem Ferkelaufzuchtstall für 4.000 Ferkel installiert. Als Wärmequelle stand in beiden Wärmepumpen-Heizkreisläufen Grundwasser mit einer Temperatur von ca. 10°C zur Verfügung, dass aus einem gemeinsamen Förderbrunnen aus ca. 110 m Tiefe gefördert wird. Dieses Wasser gibt einen Teil der Grundwasserwärme an das Arbeitsmittel ab und wird im Anschluss daran mit einer Wassertemperatur von ca. 7°C in den etwa 20 m vom Förderbrunnen entfernten Schluckbrunnen gepumpt. Die unterschiedlichen COP der Bilanzgrenzen der Wärmepumpen lagen im Winter im Mittel zwischen 2,5 und 3,4.

7 Literaturverzeichnis

AEL HEFT 17, 2007

Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft e.V.,
Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in geschlossenen Ställen
(Calculation and planning foundations for the climate in forced ventilated
livestock buildings) Berlin, (2007)

ALLEN AND PAYNE, 1987 W.H. Allen, F.A. Payne

Designing animal ventilation schedules with counterflow heat exchangers
Transactions of the ASAE, 30 (3) (1987), pp. 782–788

BAUMANN et al., 2007 M. Baumann, H.-J. Laue, P. Müller

Wärmepumpen – Heizen mit Umweltenergie 4., erweiterte und vollständig
überarbeitete Auflage, 978-3-934595-60-6 BINE Informationsdienst, Verlag
Solarpraxis AG, 10115 Berlin, (2007)

BAHADORI, 1978 M.N. BAHADORI

Passive cooling systems in Iranian architecture Scientific American, 238 (2)
(1978), S. 144–154

BENLI und DURMUS, 2009 H. Benli, A. Durmus

Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system
performance in greenhouse heating, Energy and Buildings 41(2) (2009), S. 220-
228

BEYERSDORFER und GERNAND, 2011 G. Beyersdorfer, Gernand U.

Kühlung von Schweineställen durch Unterflur-Zuluftführung, 978-3-941583-
55-9 Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Kiel (2011) S. 189-196

BÖHMFELD, 2009 J. Böhmfeld

Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz. 978-3-7843-3410-3, Baubriefe Landwirtschaft e. V. 47, Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster-Hiltrup, (2009), S. 29-34

BÖHMFELD, 2010 J. Böhmfeld

Stallkonstruktion und Bauausführung. Baubriefe Landwirtschaft e. V. 47, Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster-Hiltrup, (2009), S.86-98

BÜSCHER et al., 2007 W. Büscher, C. Nannen, T. Schneider

Thermotechnical characteristics of a modular stable Landtechnik, 62 (5) (2007), S. 340–341

BÜSCHER, 2009 W. Büscher

Energiebedarf und Leistungsbereitstellung in er Schweinehaltung, 978-3-7843-3410-3, Baubriefe Landwirtschaft e. V. 47, Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster-Hiltrup, (2009), S. 10-15

CORRÉ et al., 2003 W. Corré, J. Schröder, J. Verhagen

Energy use in conventional and organic farming systems, Proceedings no. 511, 0-85310-147-7, 1466-1314, The International Fertiliser Society, York, UK (2003)

CREMER, 2011 P. Cremer

Wärmepumpeneinsatz in landwirtschaftlichen Betrieben-Hinweise und Beispiele, Tagungsbeitrag Förderkreis Stallklima 2011 Dummerstorf, 06. Oktober 2011

DANGULLIER, 2015 T. Dangullier

Vergleichende Literaturanalyse zu organischen und anorganischen Dämmstoffen und deren Einsatz in der Landwirtschaft, Bachelorarbeit , Universität Bonn

DANNER, 2010 H. Danner

Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0, Leitfaden zur Dämmstoffauswahl für den normgerechten Einsatz. Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt, Bauzentrum München (2010)

DEGLIN et al., 1999 D. Deglin, Van Caenegem L., Dehon P.

Subsoil Heat Exchangers for the Air Conditioning of Livestock Buildings, Journal of Agricultural Engineering, Research 73 (1999) S. 179-188

DIN 18910-1, 2004

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Ed.), Wärmeschutz geschlossener Ställe – Wärmedämmung und Lüftung – Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, (2004)

DIN 4102-1, 1998

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Ed), Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Beuth Verlag GmbH 10772 Berlin (1998)

DIN 8900 Teil 6, 1987

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Ed), Anschlußfertige Heiz-Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern; Meßverfahren für installierte Wasser/Wasser-, Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen, Beuth Verlag GmbH 10772 Berlin, (1987)

DIN EN 305, 1997

Wärmetauscher; Begriffe und allgemeine Festlegungen bei der Prüfung zur Leistungsbestimmung, Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH 10772 Berlin (1997)

DLG, 1985

Prüfprogramm – Wärmetauscher Luft-Luft-Wärmetauscher (Rekuperatoren der Kategorie I gem. VDI 2071) DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft); Groß-Umstadt (1985)

DLG, 2008

DLG-Merkblatt 346; 2008 Kühlung von Schweineställen DLG-Ausschuss Technik in der tierischen Produktion, 2. Auflage, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Frankfurt am Main (2008)

DLG, 2005

DLG-Prüfbericht 5520F. Erdwärmetauscher “Opti-Klima”, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (Ed.), Frankfurt am Main (2005)

DREWER, 2013 A. Drewer, Paschko H., Paschko K., Patschke M.

Wärmedämmstoffe. Kompass zur Auswahl und Anwendung., 978-3-481-03094-0 Rudolf Müller Verlag, Köln (2013)

ELLERSIEK , 2009 H. H. Ellersiek

Anforderungen an das Management. 978-3-7843-3410-3, Baubriefe Landwirtschaft e. V. 47, Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster-Hiltrup, (2009), S. 28

ENGLERT, 1978 G. Englert

Wärmedämmung von Stallgebäuden. Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft, Landtechnik Weihenstephan

FELLER, 2008 B. Feller

Leistung eines Luft-Luft-Wärmetauschers im Praxisbetrieb, Tagungsbeitrag Förderkreis Stallklima 2008, Potsdam, 07. und 08. Oktober 2008

FELLER, 2009 B. Feller

Stressminderung durch Zuluftkonditionierung in der Schweinhaltung, Klimawandel - Konsequenzen für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung, ISSN 0943-9684, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL Nr. 158, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 23. Wissenschaftliche Fachtagung am 29. Januar 2009, S. 43-49

FOUAD und RICHTER, 2009 N.A Fouad, Richter T.

Leitfaden Thermografie im Bauwesen – Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung, 978-3-8167-7669-7, 3., unveränderte Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2009)

GARTUNG et al., 2009 J. Gartung, Uminski J. K, Hoch C.

Bauausführung und Haltungstechnik geschlossener Mastschweineeställe. interner Abschlussbericht Nr. 389 aus dem Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL, Braunschweig, S. 35–45 https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Tierhaltung/Schwein/Mast/Bauausfuehrung/Mast_Bauausfuehrung.pdf. [21.07.2014]

GEIGER, 1961 R. Geiger

Das Klima der bodennahen Luftschicht, Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage mit 281 Abbildungen, Verlag Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig (1961) S. 58-71

GILLIG und KELLER, 2015

<http://www.gilligundkeller.de/stalltechnik/stallklima-und-lueftung/energiewand/> [03.01.2015]

GUIVARCH et al., 2004 C. Guivarch, P. Flageul, P. B. Kernevez B., Haudry G.

Beurteilung eines Luft-zu-Luft-Wärmetauschers in einem Ferkelaufzucht-Gebäude auf der Grundlage der Analyse zweier Zuchtanlagen, Erschienen als Anlage zum Tagungsbeitrag „Erfahrungen mit Luft-Luft-Wärmetauschern und Ergebnisse zum Langzeiteinsatz“ von Dönselmann-Theile, H.; hdt-Anlagenbau, Tagungsbeitrag Förderkreis Stallklima 2004, Grub, 05. und 06. Oktober 2004

HEINRITZI et al. 2006, K. Heinritzi, Gindele H. R., Reiner G., Schnurrbusch U.

Schweinekrankheiten, UTB 8325, 978-3-8252-8325-4, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart (2006), S. 18-22

HESSEL und VAN DEN WEGHE, 2011 E. F. Hessel, Van den Weghe H. F. A.

Potenzial und energetische Effizienz eines Erdwärmetauschers zur ganzjährigen Zuluftkonditionierung im Abferkelstall, 978-3-941583-55-9 S. 273-279, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) 10th Conference Construction, Engineering and Environment in Livestock Farming, Kiel ,27.-29. September 2011,

HOLZMANN et al., 2012 G. Holzmann, Wangelin M., Bruns R.

Natürliche und pflanzliche Baustoffe. Rohstoff-Bauphysik-Konstruktion, 978-3-8348-1321-3, 2. Auflage, Vieweg + Teubner Wiesbaden (2012)

JOKO, 2015

U-wert_Berechnung Beispiele_txt.
http://www.kolboske.de/cms/mat/hz/u_wert_berechnung_beispiele_txt.pdf
[20.02.2015]

KLEMENT, 2001 S. Klement

Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes rekuperativer Wärmetauscher bei der Klimatisierung von Schweineställen, 0931-6264, Dissertation Uni Gießen, Veröffentlicht als VDI-MEG Schrift 372 (2001)

KLUGE, 2001 J. Kluge

Bewertender Vergleich verschiedener Heizungs- und Lüftungsverfahren in der Ferkelaufzucht, 0931 – 6264, Dissertation Uni Halle (Saale), Veröffentlicht als VDI-MEG Schrift 369 (2001)

KLUßMANN, o.J. U. Klußmann

Dämmstoffe in der Landwirtschaft, Industriegespräch, Bauförderung Landwirtschaft (BFL), Landwirtschaftsverlag Münster (ohne Jahr)

KROMMWEH et al. 2014, M.S. Krommweh, Rösmann P., Büscher W.

Investigation of heating and cooling potential of a modular housing system for fattening pigs with integrated geothermal heat exchanger, Biosystems Engineering, 121 (2014), S. 118–129

LINDLEY und WHITAKER, 1996 J.A. Lindley, Whitaker J.H.

Agricultural buildings and structures, 978-0-929355-73-3 ASAE, The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA (1996), S. 249–270 347–356

LÜCKE und HÖRSTEN 2006 W. Lücke, Hörsten D.

Utilization of accumulated heat in roofs, Landtechnik, 61(4), (2006), S. 208-209

MATTHIAS, 2009 J. Matthias

Wärmepumpen zur Stallbeheizung, 978-3-7843-3410-3, Baubriefe Landwirtschaft e. V. 47, Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster-Hiltrup, (2009), S. 70-72

MEYER et al., 2011 E. Meyer, Vogel M., Wähler M.

Untersuchungen zur Akzeptanz und Größe von Ferkelnestern, 978-3-941583-55-9 KTBL Tagungsband, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt (2011), S. 40-46

PFUNDSTEIN et al., 2007 M. Pfundstein, Gellert R., Spitzner M. H.; Rudolphi A.

Dämmstoffe, Grundlagen, Materialien, Anwendungen. 978-3-920034-18-8 Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, DETAIL Praxis, München (2007)

RECKNAGEL et al., 2015 H. Recknagel, Sprenger E., Albers K. J.

Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 978-38356-7136-2 Band 1, Deutscher Industrieverlag GmbH (DIV), München (2015), S.1035

BMEL, 2015

Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und im Gartenbau, Hg. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin (bisher unveröffentlichtes Dokument)

RIVA et al., 2000 G. Riva, Pedretti E. F., Fabbri C.

Utilization of a Heat Pump in Pig Breeding for Energy Saving and Climate and Ammonia Control, *Journal of Agricultural Engineering Research* 77(4) (2000), S. 449-455

RÖSMANN und BÜSCHER, 2010 P. Rösmann, Büscher W.

Rating of an air-to-air heat exchanger in practice, *Landtechnik*, 65 (6) (2010), S. 418–420

RÖSMANN et al., 2011 P. Rösmann, Boge H., Büscher W.

Rating of an air-to-air tube-type heat exchanger in a piglet house, *Landtechnik*, 66 (5), 2011 S. 345-348

RÖSMANN et al., 2011a P. Rösmann, Büscher W., Schulte M.

„Der Wärmetauscher spart 7000 € Heizkosten im Jahr!“, *Schweinezucht und Schweinemast (SUS)* 1 (2011) Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup S. 48-51

RÖSMANN, 2012 P. Rösmann

Einsatz von regenerativen Energiequellen zum Heizen und Kühlen von zwangsbelüfteten Tierställen, 0931-6264, VDI-MEG-Schrift nr. 509, Institut für Landtechnik, Universität Bonn, (2012)

SCHIERBAUM, 2003 H. Schierbaum

Zuluftkühlung über Unterflurzuluft, Verfahren und Kosten, Tagungsbeitrag Förderkreis Stallklima 2003, Göttingen (2003)

SPENGLER und STOMBAUGH, 1983 R.W. Spengler, Stombaugh D.P.

Optimization of earth-tube heat exchangers for winter ventilation of swine housing, Transactions of the ASAE, 26 (4) (1983), S. 1186–1193

STINGL, 1985 W. Stingl

Erdspeicher zur Klimatisierung von Schweineställen, 3-7843-1743-x, KTBL-Schrift 302, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL),KTBL-Schriften-Vertrieb, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup (1985)

SÜSS et al., 1977 M. Süss, Mittrach B., Koller G.

Mäuse zerstören fast jeden Dämmstoff. Kuratorium für Landtechnik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Landtechnik (2), Eduard F. Beckmann KG, Lehrte 1982

TGA Fachplaner, 2009:

Neue WRG-Bewertung nach EN 13053, Effizienz der Wärmerückgewinnung, Sonderdruck aus TGA Fachplaner (Das Magazin für die Technische Gebäudeausrüstung), 8. Jahrgang, Gentner Verlag, Juni 2009

THEIß, 2008 E. Theiß

Regenerative Energietechnologien, Anlagenkonzepte, Anwendungen, Praxistipps Geothermie, 978-3-8167-7514-0, Fraunhofer IRB Verlag (2008) S. 69-95

THREM et al., 2011 J. Threm, Gallmann E., Pflanz W., Jungbluth T.

Vergleich von Zuluftführungs- und Kühlungssystemen in der Schweinemast, Landtechnik 6 (5) 2011, S. 349-353

TIERSCHNUTZTV, 2009

„Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die durch die Verordnung vom 1. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3223) geändert worden ist“ (2009)

UMWELTBUNDESAMT, 2015

UBA- Emissionsdaten 2014 zeigen Trendwende beim Klimaschutz – Emissionen sinken auf niedrigsten Wert seit 2010, Presseinfo Nr. 14 vom 31.03.2015,

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/381/dokumente/pi_2015_31_03_uba-emissionsdaten_2014_zeigen_trendwende_beim_klimaschutz.pdf

VAN CAENEGEM und DEGLIN , 1997 L. Van Caenegem, Deglin D.

Erdwärmetauscher für Schweineställe, FAT-Berichte Nr. 504, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT),CH-8356 Tänikon TG (1997)

VAN CAENEGEM und DEGLIN , 1998 L. Van Caenegem, Deglin L.

Erdwärmetauscher für Mastschweineställe, 3-9521054-7-3, Heft 48, Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG (1998)

VAN CAENEGEM und DIDIER, 1998 L. Van Caenegem, Didier D.

Erdwärmetauscher für Mastschweineställe, 3-9521054-7-3, Eidge. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH- 8356 Tänikon TG (1998)

VAN CAENEGEM und WECHSLER, 2000 L. Van Caenegem, Wechsler B.

Stallklimawerte und ihre Berechnung, 3-9521755-2-8, Heft 51, Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon TG (2000)

VAN CAENEGEM, 2007 L. Van Caenegem

Zuluft aus dem Hohlraum unter dem Stall, 1661-7568, ART-Berichte Nr. 672/2007 , Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Tänikon TG (2007)

VAN CAENEGEM, 2008 L. Van Caenegem

Energieeffizienz in Abferkelställen durch Erdwärmenutzung , 978-3-939371-59-5, Energieeffiziente Landwirtschaft, KTBL-Schrift 463, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt, (2008), S. 162-172

VDI 2071, 1997

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (Ed.), VDI-Richtlinie 2071: Wärmerückgewinnung in Raumluftechnischen Anlagen, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, (1997)

WÄRMEDÄMMSTOFF UND MÄUSEFRAß, 1982

Wärmedämmstoff und Mäusefraß, Der Tierzüchter. Ausgabe 12 (1982)

ZIEGLER et al., 2011 T. Ziegler, Teodorov T., Mellmann J.

Fixed bed drying of medicinal plants using dehumidification of air, Landtechnik, 66 (3) 2011 S.167-169

ZITZKE, 1999 H.-J. Zitzke

Bauausführung und Baugestaltung, 3-7843-2999-X, Mastschweinehaltung, BauBriefe Landwirtschaft (BFL) 40, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup (1999) S.129-134

Internetquellen

<http://www.raumprobe.de/material/isofloc-waermedaemmtechnik-gmbh/zellulose-daemmstoff-isofloc-l/datenblatt>

<http://www.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fmediapackages.raufeld-cotent.de>

<http://www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/perlit>

http://www.gschwend-holzbau.ch/index_Isolation_Details.html

<http://www.knaufinsulation.at/steinwolle-daemmstoffe>

<http://www.flachsaemmung.de/Bilder/PLATTEN.jpg>

8 Kurzfassung in Deutsch und Englisch

In dem Projekt wurde der aktuelle Einsatz von Wärmerückgewinnung sowie regenerativen Energiequellen in der Praxis untersucht. Neben der Passfähigkeit der Systeme wurden auch unterschiedliche Dämmmaterialien unter Berücksichtigung der in der Landwirtschaft gestellten Anforderungen in einer Literaturanalyse vergleichend beschrieben und bewertet. Die Messung zur Wärmerückgewinnung (rekuperativer Luft-Luft-Wärmetauscher) erfolgte in einem Ferkelaufzuchtstall mit insgesamt 2.200 FP. Für die messtechnische Erfassung der wärmetechnischen Zusammenhänge innerhalb eines rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers wurden kontinuierlich die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftvolumenstrom sowie der elektrische Energieaufwand der WRG erfasst.

Die Untersuchungen zur Unterflurzuluftführung wurden in einer Schweinmastanlage mit 5.160 Mastplätzen durchgeführt. Zur Bewertung des Zuluftkanals wurde ein Messprogramm durchgeführt, in dessen Verlauf Temperaturen, Volumenströme und Energieverbräuche sowie punktuell Druckdifferenzen und Ammoniakgehalte der Stallluft aufgezeichnet wurden.

Die Messungen der Grundwasser-Wärmepumpen wurden in zwei wärmegeprägten, zwangsbelüfteten Schweineställen durchgeführt. Der Abferkelstall verfügt über 172 Abferkelplätze und ist in fünf Abteile gegliedert. Vier dieser Abteile bestehen aus 38 Buchten, das fünfte Abteil besteht aus 20 Buchten. Jede Bucht ist mit einer Warmwasser-Ferkelheizplatte ausgestattet. Der Ferkelaufzuchtstall gliedert sich in acht gleichgroße Abteile mit jeweils 500 Aufzuchtplätzen. Beheizt werden die Abteile durch vier an der Wand übereinander parallel verlaufende Stahlrohre. Zur Bereitstellung der Wärme für die beiden Heizkreisläufe wurden drei Wärmepumpen installiert. Eine der Wärmepumpen wurde in dem bereits genannten Abferkelstall eingebaut, die zwei anderen in dem Ferkelaufzuchtstall. Als Wärmequelle dient in beiden Heizkreisläufen Grundwasser mit einer Temperatur von ungefähr 10°C. Zur Bewertung der beiden WP-Systeme wurden kontinuierlich folgende Messparameter erfasst: Wärmemenge, Stromverbrauch, Betriebsstunden der Wärmepumpen, Außen- und Abteilmperatur sowie Flüssiggasverbrauch.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz des rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauschers, die unvermeidlichen Wärmeverluste die aufgrund der Lüftung auftreten, stark minimiert werden können. Etwa 142.000 kWh_{th} wurden durch den rekuperativen Luft-Luft-Wärmetauscher in dem einjährigen Untersuchungszeitraum von der Abluft auf die Zuluft übertragen. Auch die Unterflurzuluftführung in der Schweinemast zeigt gute Effekte auf das Stallklima. Im Sommer konnte bei einer Umgebungstemperatur von ca. 30°C eine mittlere Abkühlung der Zuluft um 5,5 K und im Winter konnte bei einer Umgebungstemperatur von -10°C eine mittlere Vorwärmung um 5,8 K erreicht werden. Andere Ergebnisse liefern die Grundwasser-Wärmepumpen. Da es sich hier um ein Niedertemperaturheizsystem handelt ist besonders auf eine niedrige Vorlauftemperatur zu achten. Die Vorlauftemperaturen lagen im Abferkelbereich bei 45°C und in der Ferkelaufzucht bei 50°C. Aufgrund dieser erhöhten Vorlauftemperaturen waren negative Auswirkungen auf die COP der Wärmepumpenanlagen bereits im Vorfeld zu erwarten. Es wurden lediglich COP-Werte zwischen 2,5 und 3,4 erzielt.

Abstract

In the project the current application of heat recovery as well as renewable energy sources in practice was investigated. The compatibility of the systems and even though the use of different insulation materials were assayed in literature analysis. Regarding the insulation materials there was a special focus on the requirements of agriculture.

The measurement of heat recovery (recuperative air-to-air heat exchanger) was conducted in a piglet rearing barn including 2,200 piglets. For the metrological capture of the thermic interrelations in the recuperative air-to-air heat exchanger the parameters temperature, air humidity, air volume flow and the electrical energy demand have been documented continuously.

The investigations concerning under floor ducting of fresh air were realized in a pig fattening barn with 5,160 feeding places. For the evaluation of the air supplying duct, a measuring program was used, including the measurement of temperature, air volume flow, electrical energy demand and punctual mensuration of pressure difference and ammonia content of the air inside the barn.

The measurements of the groundwater heat pump were carried out in two forced-ventilated pig buildings. The farrowing barn consists of 172 places divided into five compartments.

Four of the compartments are subdivided into 38 pens. The fifth compartment is subdivided into 20 pens. Each pen is equipped with a warm water piglet heater. The piglet rearing barn is divided into eight equal compartments, each has 500 breeding places. The compartments were heated by four parallel steel tubes. These tubes were mounted on the wall one above the other. For the delivery of heat for both circulation systems, three pumps have been installed. One of the pumps was installed in a farrowing barn, the other two in the piglet rearing barn. In both heating circulation systems, the source of heat was ground water with a temperature around 10°C. For the evaluation of both heat pump systems the following measuring parameters have been collected continuously: heat quantity, electrical energy demand, operating hours of the heat pumps, outside and inside temperature, as well as LPG consumption.

The results show, that the use of the recuperative air-to-air heat exchanger minimizes the unpreventable heat losses occurring due to the ventilation system. Approximately 142,000 kWh_{th} were transferred by the recuperative air-to-air heat exchanger from the exhaust air to the supply air in the experimental period of one year. Even though the under floor ducting of fresh air in the pig fattening shows positive effects on the climate inside the barn. In the summer at outside temperatures of about 30°C, there was a cooling effect of the supply air with a mean of 5.5K. In the winter at outside temperatures of about -10°C, there was a warming effect of the supply air with a mean of 5.8K. The groundwater heat pumps deliver different results. Handling with a low temperature heating system, attention should be paid to a minimal flow temperature. The flow temperature of the farrowing barn was 45°C and the flow temperature of the piglet rearing barn was 50°C. Because of these high flow temperatures negative effects of the heat pump system's COP were expected already in the run-up phase. COP-values between 2.5 and 3.4 were reached.