



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 10.11.2020

Minergie-A/P Mastgeflügelstall

Geflügelmaststall, Berghof, 3429 Hellsau BE

Monitoring-Bericht



Mastgeflügelstall Leuenberger, Hellsau BE, 2019



Datum: 20.10.2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Globogal AG
Postfach 317
CH-5600 Lenzburg
www.globogal.ch

Projektpartner / Subventionsempfänger/innen:

Globogal AG
Postfach 317
CH-5600 Lenzburg
www.globogal.ch

WPC WärmepumpenCenter AG
Rubigenstrasse 79
CH- 3076 Worb
Email: info@wpcenter.ch
Web: www.wpcenter.ch

Betreiber/Betriebsleiter Geflügelmaststall
GG Hans und Matthias Leuenberger
Berghof 1
CH-3429 Hellsau BE
bergbauer@besonet.ch

Kurt Ruprecht, Bauing. HTL/SIA
Hinterruer 1323
9123 Nassen
Kurt.ruprecht@bluewin.ch

**Autor/in:**

Ludo Van Caenegem, ludo.vancaenegem@hotmail.com

David Stauffer, Globogal AG, ds@globogal.ch

Markus Sax, Agroscope Tänikon, markus.sax@agroscope.admin.ch

Kurt Ruprecht, kurt.ruprecht@bluewin.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, BFE, 3003 Bern, men.wirz@bfe.admin.ch

Marc Köhli, Enerconom AG, Weyermannsstrasse 20, 3001 Bern, koehli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501885-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Der Heizbedarf in einem konventionellen Geflügelmaststall von 600 m² für 8'700 Masthühner beträgt etwa 160'000 kWh pro Jahr. Im Minergie-A/P-Stall Leuenberger, Hellsau, konnte dank besserer Wärmedämmung, Wärmerückgewinnung in der Abluft und optimierter CO₂-, relative-Feuchtigkeit- und Temperatursteuerung der Lüfrate der Wärmebedarf für die Heizung in der Periode von 10.04.2019 bis 09.04.2020 auf 69'369 kWh begrenzt werden. Die mittlere CO₂-Konzentration (1744 ppm) war im Vergleich zu konventionellen Ställen sehr niedrig. Auch in der kalten Jahreszeit war sie nicht höher als 2'100 ppm, was sich positiv auf die Gesundheit und das Wachstum der Tiere auswirkte. Etwa drei Viertel der Einsparung ist der Wärmerückgewinnung zu verdanken, ein Viertel der besseren Wärmedämmung. Der Strombedarf der Sole-Wasser-Wärmepumpe für die Heizung und das Warmwasser betrug 18'922 kWh. Die Lüftung, Beleuchtung, Wärmeverteilung und Stalleinrichtungen benötigten 13'511 kWh. Der gesamte elektrische Energiebedarf betrug folglich 32'433 kWh. Die PV-Anlage auf dem Stalldach produzierte im gleichen Zeitraum 78'049 kWh. Hiervon konnte dank Wärme- und Stromspeicher 39.2 % für den Stall und das Wohnhaus selbst genutzt werden. Der Netto-Beitrag des Stalles an erneuerbarer Energie betrug 45'616 kWh. Die Mehrkosten des Pilot-Stalles belaufen sich auf CHF 392'140. Demgegenüber stehen geringere Energiekosten von CHF. 21'011 pro Jahr.

Résumé

Le besoin de chauffage dans un poulailler d'engraissement conventionnel de 600 m² (8'700 poulets) est de quelque 160'000 kWh par an. Dans le poulailler Minergie-A/P de Leuenberger, Hellsau, la demande de chaleur pendant la période du 10.04.2019 au 09.04.2020 est réduite à 69'369 kWh grâce à l'isolation meilleure, la récupération de chaleur dans la sortie d'air et le contrôle optimisé de la ventilation en fonction de la concentration CO₂, de l'humidité relative et de la température. La concentration moyenne de CO₂ (1744 ppm) est assez faible par rapport aux taux usuels des poulaillers conventionnels. Elle ne dépasse pas 2'100 ppm même en hiver ayant un effet positif sur la santé et la croissance des animaux. Environ trois quarts des économies d'énergie sont dus à la récupération de chaleur, un quart à l'amélioration de l'isolation. La demande d'électricité de la pompe à chaleur (chauffage et eau sanitaire) s'élève à 18'922 kWh. La ventilation, l'éclairage, la répartition uniforme de chaleur et l'autre équipement nécessitent 13'511 kWh. La consommation d'électricité totale est de 32'433 kWh. Le système photovoltaïque sur le toit a généré 78'049 kWh dans la même période. Grâce au stockage de chaleur et de l'électricité 39.2% du courant généré est utilisé pour le poulailler et la maison d'habitation. La contribution nette du poulailler aux énergies renouvelables s'élève à 45'616 kWh. Les coûts additionnels du poulailler pilote sont de CHF 392'140. D'autre part les coûts annuels d'énergie sont réduits de CHF 21'011.

Summary

The heat requirement in a conventional broiler house of 600m² for 8'700 standard broilers is about 160'000 kWh per year. In the newly erected Minergie- A/P-broilerhouse Leuenberger, Hellsau, the heat requirement was reduced to 69'369 kWh in the period from April 10th 2019 to April 9th 2020 thanks to improved insulation, air-air heat exchanger and optimized air flow based on CO₂, humidity and temperature control. The average CO₂-concentration (1744 ppm) has been very low compared to conventional houses. Even in cold season it did not exceed 2'100 ppm, which had a positive impact on the health status and productivity of the birds. About three quarters of the heat savings is due to the heat exchanger, one quarter due to better insulation. The energy consumption of the heat pump for



heating and warm water provision was 18'922 kWh. For ventilation, lighting, heat distribution and other implements 13'511 kWh were needed. The entire energy requirement was therefore 32'433 kWh. The Photo-voltaic installation on the roof produced in the same period 78'046 kWh. Thanks to heat- and electricity storage 39.2% thereof could be used for the broiler house and the farmhouse. The net contribution of the broiler house in renewable energy was 45'616 kWh. The additional costs of the pilot-broiler house amount to CHF. 392'140. On the other hand the annual energy costs are reduced by CHF 21'011.

Take-home messages

- Der Wärmebedarf für die Heizung in Mastgeflügelställen lässt sich durch die Wärmerückgewinnung in der Abluft und die bessere Wärmedämmung der Bauhülle mehr als halbieren.
- Die Wärmerückgewinnung ist für etwa drei Viertel, die bessere Wärmedämmung für etwa ein Viertel der Energieeinsparungen verantwortlich.
- Die Investitionen für die Wärmetauscher lassen sich durch die Energieeinsparungen in drei bis vier Jahren zurückzahlen.
- Die PV-Anlage (Stalldach Ost-West) produziert mehr als doppelt so viel Strom, wie für die energieeffiziente Heizung (Wärmepumpe), Lüftung (EC-Lüfter) und Beleuchtung (LED) und sonstigen Einrichtungen benötigt wird.
- Dank Wärme- und Stromspeicher wird etwa 87 % des gesamten Strombedarfs des Stalles durch die PV-Anlage gedeckt.
- Die Mehrkosten des Minergie-A/P – Pilotstalls werden bei den aktuellen Energietarifen und unter Einbezug der Förderbeiträge durch die tieferen Energiekosten kompensiert.
- Eine Senkung der Jahreskosten durch Optimierung ist möglich.
- Der zukünftige Minergie-Geflügelmaststall wird nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich interessant.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	4
Summary	4
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	6
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Projektziele	9
2 Anlagenbeschrieb	10
3 Vorgehen und Methode.....	15
4 Ergebnisse und Diskussion	16
5 Schlussfolgerungen und Fazit	38
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	39
7 Kommunikation	40
8 Literaturverzeichnis	40
9 Anhang	41



Abkürzungsverzeichnis

A_E : Energiebezugsfläche m^2

A_{th} : Thermische Gebäudehüllfläche m^2

H : Wärmetransferkoeffizient W/K

H_s : Spezifische Wärmekapazität des Wärmespeichers kWh/K

L : Gesamtlänge der Rippenrohre m

m : Durchflussmenge in den Rippenrohren L/h

P : Heizleistung kW

t : Zeitdauer h

T_a : Aussentemperatur $^{\circ}C$

T_i : Stalltemperatur $^{\circ}C$

T_r : Mittlere Wassertemperatur in den Rippenrohren

$T_{rück}$: Rücklauftemperatur $^{\circ}C$

T_s : Wasserspeichertemperatur $^{\circ}C$

T_{vor} : Vorlauftemperatur $\approx$ Wasserspeichertemperatur $^{\circ}C$

WP: Wärmepumpe

WRG: Wärmerückgewinnungsanlage



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Geflügelmastställe haben wegen der relativ hohen Stalltemperatur und grossen Lufraten einen hohen Heizbedarf. Die erforderliche Temperatur beträgt am Anfang der Mast 33 °C und nimmt gegen Mast-Ende auf 20 °C ab. Die Lufrate muss ausreichen, um die CO₂-Konzentration unter dem Grenzwert von 3000 ppm (Tierschutzgesetz) zu halten, die relative Feuchtigkeit, wenn möglich, nicht über 60 % steigen zu lassen und eine Überhitzung der Tiere bei hohen Aussentemperaturen zu vermeiden. Der erforderliche Luftwechsel in einem Stall mit 8'700 Masthühnern schwankt zwischen 500 und 60'000 m³/h.

Wegen der hohen Staubbelastung in der Luft wurde die Wärmerückgewinnung in Geflügelmastställen lange Zeit als nicht praxistauglich betrachtet. Erst 2012 gelang es Globogal AG dank senkrechten Rohrbündelwärmetauschern mit integrierter Reinigung die Wärmerückgewinnung zum Durchbruch zu verhelfen. Wird die Förderkapazität der Wärmetauscher ausreichend dimensioniert, ermöglichen diese nicht nur die Heizkosten zu halbieren [8], sondern sorgen auch für bessere Stallklimabedingungen, indem die relative Feuchtigkeit dank höherer Lufrate gesenkt werden kann und so die Einstreue trocken bleibt. Dies hat geringere Ammoniakemissionen zur Folge und verhindert gesundheitliche Probleme bei den Tieren.

In konventionellen Geflügelmastställen beträgt der Heizbedarf etwa 160'000 kWh pro Jahr. In Ställen mit Wärmetauscher liegt der Heizbedarf unter 80'000 kWh/Jahr. Von diesen Wärmeverlusten werden nur etwa 20% durch Transmission und 80% durch Lüftung verursacht.

Hans und Matthias Leuenberger haben sich als Bauherrschaft das ambitionierte Ziel gesetzt, ihren Geflügelmaststall im Minergie Baustandard zu erstellen. Die Minergie - Zertifizierungsstelle des Kantons Bern, Bruno Hari, hat mit den Projektbeteiligten die Rahmenbedingungen zur Spezialzertifizierung festgelegt (Auszug)

- Gebäudekategorie Industrie
- Zertifizierung Minergie-A
- Anforderung Gebäudehülle Minergie P: Grenzwert $Q_{h,li} = Q_{h,li} 0.70$, SIA 380/1: 2016
- Monitoring
- Lüfterneuerung nach Stand der Technik (WRG>50 %, bedarfsgesteuert, reinigbar)

BE-081-A, Nachweisversion 2019.2, Definitive Zertifizierung: 19. August 2019

Detaillierte Anforderungen:

- Gebäudehülle: 0.7 $Q_{h,li}$
- Luftdichtigkeit: Messung erforderlich, Öffnungen abgeklebt
- Sommerlicher Wärmeschutz: nicht relevant
- Wärmeerzeugung: Erdregister, WP, Warmwasser, WP-Boiler
- Eigenstromerzeugung: Standardbedarf
- Beleuchtung: Standard Industrie
- Lüfterneuerung, Lüftung/Klima: Stand der Technik
- Monitoring: erforderlich

Minergie-Zertifizierungsstelle Kanton Bern:

c/o Energie hoch drei AG
Optingenstrasse 54
3013 Bern
Bruno Hari
bh.be@minergie.ch
031 544 37 77



Mit der erfolgreichen Realisation des Bauvorhabens können nun im Betrieb des Geflügelmaststalles die Einflüsse des Minergie-A/P – Standards auf den Energiebedarf gemessen werden. Im Weiteren besteht die Möglichkeit weitere Massnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs zu prüfen und zu bewerten. Die empirischen Daten werden durch Modellrechnungen überprüft. Diese beruhen auf die Messreihen betreffende Klima (aussen und innen) und Tiere (Anzahl, Gewicht) und simulieren ceteris paribus den Einfluss der verschiedenen Massnahmen auf den Energiebedarf. Die Ergebnisse dienen als Entscheidungshilfe für die Weiterentwicklung der Ställe.

Mit dem vorliegenden Projekt wird gleichzeitig das geforderte Monitoring von Minergie erfüllt.

1.2 Motivation des Projektes

Trotz Wärmerückgewinnung bleibt der Energiebedarf in Mastgeflügelställen hoch. Weiteres Energiesparpotenzial ist vorhanden. Herkömmliche Ställe werden in der Regel mit direkt befeuerten Gaserhitzern beheizt. Diese sind sehr flexibel und weisen einen thermischen Wirkungsgrad von 100 % auf. Nachteilig sind jedoch die zusätzliche CO₂- und Wasserdampfabgabe, die das Stallklima belasten und einen höheren Luftwechsel erfordern. Die Heizung mit Wärmepumpe und Rippenrohren statt mit direkt befeuerten Gaserhitzern soll für ein besseres Stallklima sorgen.

1.3 Projektziele

Der Stall soll nicht nur CO₂-neutral, sondern auch noch einen Netto-Beitrag an erneuerbarer Energie liefern.

Der Pilot-Versuch im Geflügelstall Leuenberger soll zeigen, dass Minergie-A/P im Geflügelmastställen technisch und wirtschaftlich möglich ist.

Die energetische Autarkie des Stalles soll durch aufeinander abgestimmten PV-Anlage, Wärme- und Stromspeicher möglichst hoch sein.



2 Anlagenbeschreibung

- Gebäudehülle (Abb. 1, Grundriss im Anhang)

	Fläche	U-Wert	Red.- Faktor	H
	m ²	W/m ² K		W/K
Boden (300 mm Misapor)	718.51	0.26	0.47	87.8
Sockelwände (160 mm PIR)	107.46	0.20	1.00	21.5
Sockelwände (80mm XPS)	38.49	0.38	1.00	14.6
Aussenwände (Sandw. 240 mm)	362.78	0.10	1.00	36.3
Auslaufschieber	12.00	0.95	1.00	11.4
Lichtpaneele	57.80	1.20	1.00	69.4
Fenster (Vorraum)	3.68	0.96	1.00	3.5
Sektionaltor	11.38	0.51	1.00	5.8
Aussentüre	8.82	1.51	1.00	13.3
Dach (40+140 mm PIR)	746.90	0.14	1.00	104.6
Wärmebrücken				24.9
				393.1

- Energiebezugsfläche: 722.2 m², Ath/AE: 2.86

Abb. 1: Aussen- und Innenansicht des Stalles



- Lüftungsprinzip: Gleichdrucklüftung mit zwei Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG) in der Abluft (Abb. 2, 3). Jede WRG verfügt über einen EC-Lüfter (elektronisch kommutiert) auf der Zuluft- und Abluftseite und weist einen maximalen Luftvolumenstrom von etwa 11'000 m³/h bei einem Luftwiderstand von etwa 100 Pa auf. Mittels einer oberhalb des Rohrbündels installierten Wasserdüse wird die Staubablagerung auf der Abluftseite zweimal pro Tag grösstenteils entfernt. Die beiden WRG sind auf dem Dach zugänglich, was eine gründliche Reinigung nach jedem Mastdurchgang ermöglicht. Sobald die maximale Förderrate der WRG ausgeschöpft ist (22'000



m³/h) kommt automatisch zusätzlich die «Sommerlüftung» in Betrieb. Diese besteht aus Mehrfachventilen in den beiden Längswänden und 2 frequenzgesteuerten Lüftern in der Giebelwand. Die «Sommerlüftung» wird als 2. Lüftungsstufe stufenlos zugeschaltet. Die gesamte Förderkapazität für den Stall beträgt etwa 66'000 m³/h.

- Lüftung technische Daten

WRG Reventa Typ 1270, Rohrbündeltauscher, Höhe 3m.

Zu- & Ablüfter WRG Typ ZIEHL-ABEGG EC910, max. Leistungsaufnahme 0.96 kW.

Sommerlüfter ZIEHL-ABEGG AC910, max. Leistungsaufnahme, 0.96 kW, stufenlos geregelt über Frequenzumrichter mit Sinusfilter Typ FSET.

6 Deckenlüfter MIXAIR für kontinuierliche Lüftumwälzung, max. Leistungsaufnahme 110 W, stufenlos geregelt.

Produktionscomputer Typ IMAGE 2 von Agro Logic, welcher alle relevanten Prozesse im Stall steuert und die Daten im Stundentakt aufzeichnet. Diese Daten werden dank der Web-applikation WEBCHICK regelmässig auf einem Server gespeichert.

Abb. 2: Rohrbündel-Wärmetauscher, Aussen- und Innenansicht.

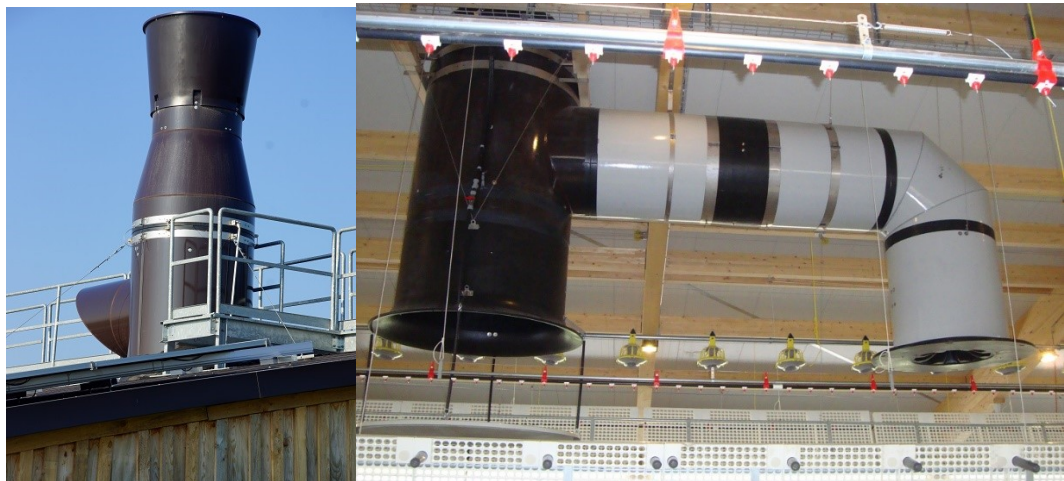
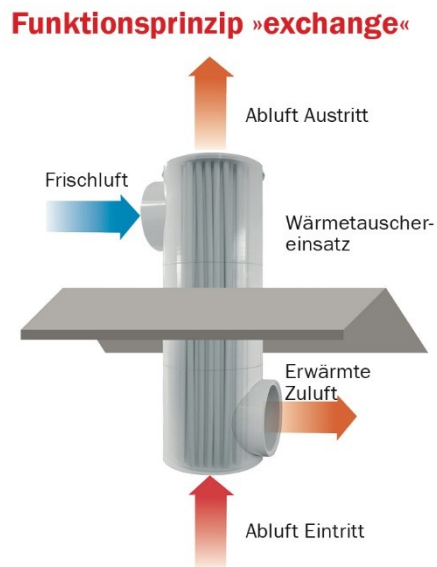




Abb. 3: Wirkungsprinzip WRG



- Heizung: Sole-Wasser-Wärmepumpe (Abb. 4) mit Flächenregister (Horizontalsonde) Typ: Viessmann Vitocal BW 352.B54 mit Pufferspeicher 20 m³ (Abb. 5).

Sole-Durchflussmenge	2x4'000 l/h
Tiefe Sole-Stränge	1.30-1.50 m
Gesamtlänge Stränge	2'800 m
Durchmesser Stränge	63 mm
Bodenfläche	ca. 1 ha
Strombedarf WP 0/W35	2x4.3 kW
Strombedarf WP 10/W35	2x4.5 kW
Nenn-Wärmeleistung B0/W15	57.4 kW
Maximale Vorlauftemperatur	70 °C
Wärmeträgermedium Antitox GEO (biologisch abbaubar)	ca. 8 m ³



Abb. 4: Wärmepumpe im Vorraum. Sole-Leitungen insgesamt 2'800 m neben dem Stall verlegt.



- Wärmespeicher

Masse	D= 2.00, H= 6.50 m
Wasservolumen L	20'000
Speicherkapazität kWh/K	23.2
Wärmeverluste W/K	12

Der zylindrische Wärmespeicher (Abb. 5) ist über den ganzen Umfang mit 200 mm PUR wärmegeklämt.

Abb. 5: Wärmespeicher (links) und Stromspeicher (rechts).





- Stromspeicher: Salzbatteie Innovenergy, Salino 18 (Abb. 5).

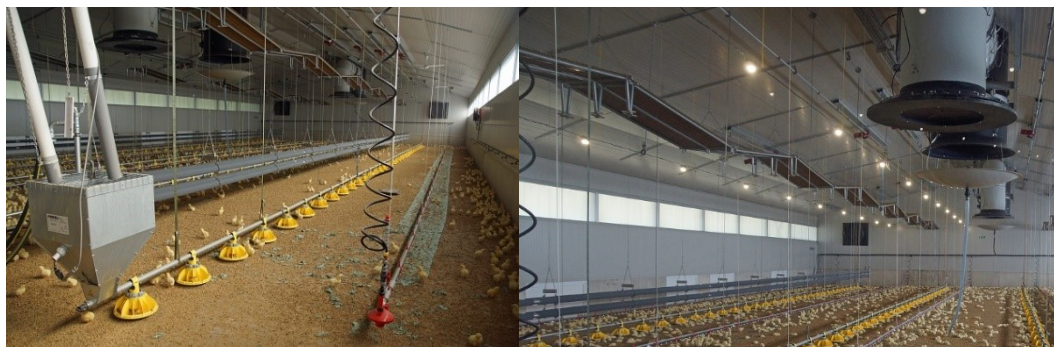
Salzbatterie	FZSoNick
Typ	2x48TL200
Nominale Speichergrösse	18.8 kWh
Täglich nutzbar	17 kWh
Ladeleistung	4 kW
Dauerleistung entladen	9 kW
Wechselrichter	3x3 kW/400 V
H / B / T	165x74x74 cm
Gewicht	290 kg
Visualisierung/ Datenanalyse	Wictron Web App IOS & Android

- Beleuchtung: 38 LED-Induktionslampen von 10 W. Lichtausbeute: 110 lm/W (Abb. 6).

- Wärmeverteilung: Reventa-Rippenrohre (224 m) freihängend in der Halle Typ REVAL (Abb. 6), Vorlauftemperatur <60°C. Anbindung Wohnhaus über Fernleitung.

Für die spezifische Wärmeleistung der Rippenrohre siehe Anhang.

Abb. 6: Heizverteilung mit freihängenden Rippenrohren (links), Beleuchtung mit LED-Lampen (10 W)



- PV-Anlage: 256 Module von 275 Wp Ost-West, gesamt 70 kWp, 4 Wechselrichter (Abb. 7).



Abb. 7: PV-Anlage Ost-West (70 kWp)



3 Vorgehen und Methode

Der Geflügelmaststall (8700 Masthühner) Hans Leuenberger, Berghof 1, 3429 Hellsau BE wurde 2019 von der Firma Globogal AG Lenzburg schlüsselfertig gebaut und eingerichtet. Die Heizung wurde von der Firma WPC WärmepumpenCenter AG, Worb konzipiert und installiert. Während genau eines Jahres (10.04.2019 bis 09.04.2020) wurden alle relevanten Tier-, Energie- und Stallklimaparameter in Stundentakt oder pro Tag aufgezeichnet:

- Wärmebedarf Stall und Warmwasser (Wärmezähler, kWh pro Tag)
- Energiebedarf Wärmepumpe (kWh pro Tag)
- Energiebedarf einzelner Lüfter (Abluft, Zuluft, Sommer) (kWh pro Tag)
- Energiebedarf Beleuchtung (kWh pro Tag)
- Sonstiger Energiebedarf: Deckenlüfter, Umwälzpumpen, Gefriertruhen, Klappen, Steuerung, Fütterung... (kWh pro Tag)
- Stallklima: Temperatur (Stallluft, Aussenluft, Zuluft, Fortluft), relative Feuchtigkeit (Stallluft, Aussenluft), CO₂-Konzentration (Stallluft) (pro Stunde)
- Tierrelevante Parameter (Futtermittelverbrauch, Wasseraufnahme, Anzahl und Gewicht der Tiere) (pro Tag)

Die Messdauer umfasst 8 vollständige Mastumtriebe und die ersten zehn Tage des neunten Mastumtriebs. Jeder Mastumtrieb betrug jeweils 35 bis 36 Tage, ausser beim zweiten Umtrieb, als schon nach 31 Tagen ausgestallt wurde. Die Solltemperatur im Stall betrug am 1. Tag 33 °C und nahm bis am 32. Tag auf 20 °C ab. Der Sollwert der CO₂-Konzentration lag stets bei 2000 ppm.



Aus den Temperaturwerten der Stallluft, Zuluft, Abluft und Aussenluft wurde der thermische Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung berechnet. Neben den Messwerten wurden Ergebnisse aus Modellrechnungen verwendet, um einerseits Messdaten zu überprüfen, andererseits Energiebilanzen zu erstellen und zu analysieren. Um die Tierparameter (fühlbare und latente Wärmeabgabe, CO₂-Abgabe) zu modellieren, wurden international anerkannte Formeln der C.I.G.R., ([1], [2], [3], [4]) verwendet. Weiter wurden die Autarkie und der Nutzungsgrad des Wärmespeichers aufgrund des Wärmebedarfs, der Temperatur im Wärmespeicher und der Stalltemperatur berechnet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Energiebedarf für Heizung und Warmwasser

Der gesamte Wärmebedarf für die Stallheizung beträgt 69'369 kWh, für das Warmwasser 1'371 kWh (Tab. 1). Die Sole-Wasser-Wärmepumpe (WP) hat einen Strombedarf von 18'922 kWh bei einem mittleren thermischen Wirkungsgrad von 3.74 (cop). In dieser Jahresarbeitszahl ist der Strombedarf für die Umwälzpumpen, zwei für die Wärmeverteilung im Stall (Rippenrohre) und eine für das Wohnhaus, nicht berücksichtigt. Die Beziehung zwischen Heizbedarf und mittlerer Aussentemperatur (t_{aussen}) ist nicht linear. Einerseits ist der Mittelwert der Aussentemperatur während der Mast nicht repräsentativ. Tiefe Aussentemperaturen wirken sich wegen der höheren Stalltemperaturen und der geringeren Wärmeabgabe der Tiere stärker am Anfang als am Schluss der Mast aus. Andererseits hängt der Wärmebedarf pro Umtrieb ebenfalls von der Zeitspanne zwischen Ausställen und neu Einställen ab. Diese war zwischen den einzelnen Mastumtrieben nicht gleich lang. Während dieser Zeitspanne wird der Stall ausgemistet und gereinigt. Je länger die Periode, desto stärker kann der Stall auskühlen und desto mehr Energie erfordert das Aufheizen auf 33°C vor dem Einstellen der Eintagsküken. Die mittlere CO₂-Konzentration liegt bei 1744 ppm.



Tab. 1: Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser sowie Energiebedarf für die Wärmepumpe (WP) pro Mastumtrieb inklusiv Reinigung nach dem Ausstallen. (Umtrieb 9: nur Anfangsphase). Die Klimaparameter (Aussentemperatur und CO₂-Konzentration im Stall) sind Mittelwerte der jeweiligen Periode.

Umtrieb	Periode	Anzahl	t aussen	CO ₂	Heizung	Warmwasser	WP	cop
		Tage	°C	ppm	kWh	kWh	kWh	
1	10.04.19-26.05.19	47	10.0	1'190	9'630	174	2'642	3.71
2	27.05.19-01.07.19	36	14.0	1'585	4'534	128	1281	3.64
3	02.07.19-18.08.19	48	21.7	1'264	5'180	148	1'369	3.89
4	19.08.19-30.09.19	43	17.2	1'516	5'280	163	1'379	3.95
5	01.10.19-12.11.19	43	11.3	1'793	6'872	168	1'743	4.04
6	13.11.19-05.01.20	54	3.3	2'094	13'257	224	3'565	3.78
7	06.01.20-16.02.20	42	1.6	2'116	11'639	170	3'318	3.56
8	17.02.20-30.03.20	43	6.3	2'071	10'135	171	2'838	3.63
9	31.03.20-09.04.20	11	6.5	2'066	2'842	25	787	3.64
Gesamt				1'744	69'369	1'371	18'922	3.74

Tab. 2: Heizbedarf während und zwischen den Mastumtrieben (U).

Umtrieb	Periode	t aussen	Gesamt	während U	zwischen U
		°C	kWh	kWh	kWh
1	10.04.19-26.05.19	10.0	9'630	7'735	1'895
2	27.05.19-01.07.19	14.0	4'534	3'680	854
3	02.07.19-18.08.19	21.7	5'180	2'630	2'550
4	19.08.19-30.09.19	17.2	5'280	2'880	2'400
5	01.10.19-12.11.19	11.3	6'872	4'329	2'543
6	13.11.19-05.01.20	3.3	13'257	6'070	7'187
7	06.01.20-16.02.20	1.6	11'639	8'888	2'751
8	17.02.20-30.03.20	6.3	10'135	7'030	3'105
9	31.03.20-09.04.20	6.5	2'842	2'842	
Gesamt			69'369	46'084	23'285

Etwa ein Drittel des Heizbedarfs fällt - über das ganze Jahr betrachtet - in der Reinigungsphase zwischen den Mastumtrieben (U) an (Tab. 2). Bei einer thermischen Masse des Stalles von etwa 100 kWh/K erfordert allein das Aufheizen des Stalles von beispielsweise 20 auf 33 °C jeweils 1'300 kWh. Hinzu kommt die Energie für die Verdunstung von Reinigungswasser. Der Betonboden muss vor dem Einstallen ausreichend ausgetrocknet sein, damit die Einstreue keine Feuchtigkeit aufnimmt. Der Heizbedarf lässt sich durch Verkürzung der Periode zwischen den einzelnen Mastumtrieben reduzieren. Weiter soll darauf geachtet werden, dass die Tore so wenig wie möglich geöffnet sind.



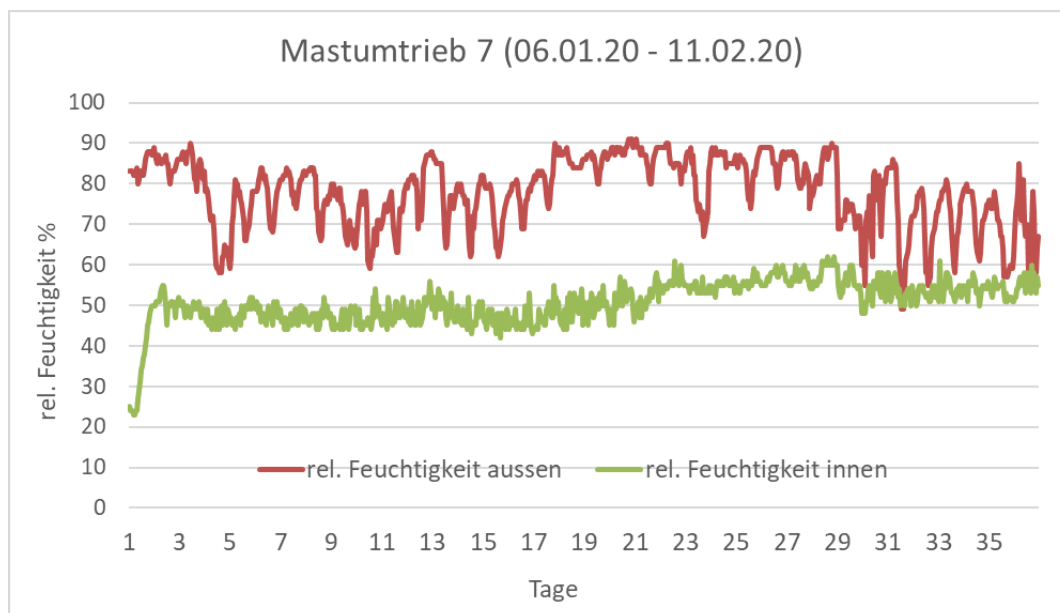
Tab. 3: Heizbedarf und Strombedarf Wärmepumpe (WP) während des 7. Mastumtriebs.

Tag	Tag	Mittlere Aussentemp.	Mittlere Stalltemp.	Heizbedarf	WP
		°C	°C	kWh/Tag	kWh/Tag
1	06.01.20	-0.2	31.8	401	115.0
2	07.01.20	1.6	31.4	501	139.2
3	08.01.20	1.5	30.8	473	133.0
4	09.01.20	4.5	30.5	438	121.5
5	10.01.20	6.6	29.8	386	110.5
6	11.01.20	4.2	29.3	426	117.0
7	12.01.20	1.7	29.0	510	139.9
8	13.01.20	1.3	28.7	437	123.4
9	14.01.20	2.4	28.4	398	109.4
10	15.01.20	4.2	28.3	313	89.1
11	16.01.20	4.5	27.6	399	108.6
12	17.01.20	2.8	27.4	281	80.0
13	18.01.20	3.1	26.8	452	123.1
14	19.01.20	0.8	26.3	352	97.6
15	20.01.20	0.3	25.9	395	109.1
16	21.01.20	-0.9	25.7	438	119.5
17	22.01.20	-1.7	25.1	264	77.2
18	23.01.20	-2.2	24.7	478	128.7
19	24.01.20	-1.3	24.5	182	52.5
20	25.01.20	-0.9	24.1	323	86.3
21	26.01.20	1.5	24.4	211	59.5
22	27.01.20	3.5	24.3	172	51.4
23	28.01.20	4.0	23.8	14	4.6
24	29.01.20	3.5	23.9	81	26.4
25	30.01.20	3.5	25.0	44	7.1
26	31.01.20	8.0	25.5	42	20.3
27	01.02.20	8.0	24.7	0	0.0
28	02.02.20	10.0	24.4	114	38.0
29	03.02.20	13.0	23.9	1	0.0
30	04.02.20	3.5	23.7	20	10.3
31	05.02.20	1.5	22.8	55	15.5
32	06.02.20	-0.5	22.7	91	30.7
33	07.02.20	0.0	22.9	30	1.8
34	08.02.20	0.5	23.1	33	18.0
35	09.02.20	4.5	22.9	10	2.7
Mittelwert		2.8	26.1	250.4	70.5



Der Heizbedarf nimmt im Verlauf des 7. Mastumtriebs mit zunehmender Mastdauer ab (Tab. 3). Diese Abnahme ist wegen schwankender Aussentemperaturen nicht linear. Am 27. Tag genügt die Wärmeabgabe der Tiere, um die Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung zu kompensieren. Der Wärmebedarf in den folgenden Tagen ist einerseits auf die relativ (zu) hohe Stalltemperatur und andererseits auf höhere Luftraten, erforderlich um die relative Feuchtigkeit unter 60 % zu senken, zurückzuführen. Die mittlere relative Feuchtigkeit im Stall betrug 53 % (Abb. 8). Der Strombedarf der Wärmepumpe entspricht an einzelnen Tagen nicht immer dem Heizbedarf. Dies ist auf die Phasenverschiebung zwischen Heizen im Stall einerseits und Laden des Wärmespeichers andererseits zurückzuführen. In der zweiten Masthälfte reichte die im Wärmespeicher aufgeschlagene Wärme auch noch teilweise für den folgenden Tag aus, was dazu führte, dass die Wärmepumpe am nächsten Tag weniger in Betrieb war.

Abb. 8: Verlauf der relativen Feuchtigkeit in der Aussen- und Stallluft während des 7. Mastumtriebs.



Energiebedarf für Lüftung, Licht, Einrichtungen

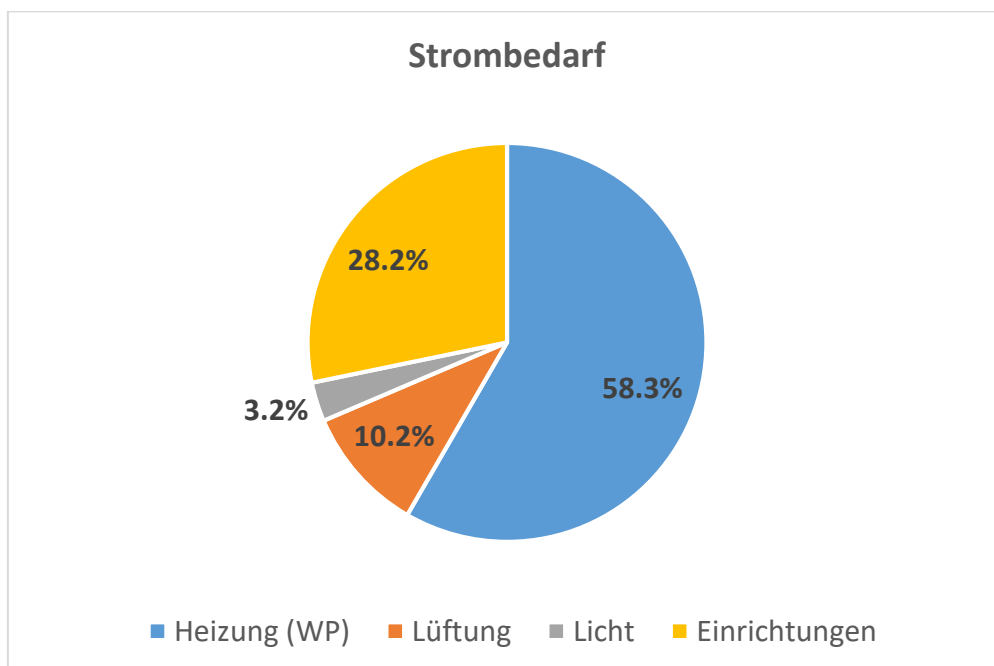
Der Energiebedarf für Lüftung, Licht und Einrichtungen (sonst) beträgt insgesamt 16'166 kWh (Tab. 4). Der Strombedarf für die Lüftung ist erwartungsgemäss im Sommer (Umtrieb 3) am höchsten, jener für die Beleuchtung im Winter (Umtrieb 7). Der Strombedarf für die Einrichtungen beträgt etwa 28% des gesamten Strombedarfs (Abb. 9). Er umfasst nicht nur den Bedarf für die Fütterung, die Umwälzpumpen, die Steuerung, die Stellmotoren für die Klappen, den Tiefkühler, die Deckenlüfter im Stall (6 Stück), sondern auch für den Besucherraum.



Tab. 4: Strombedarf für Lüftung, Licht und Einrichtungen (sonst).

Umtriebe	Periode	t aussen	Lüftung	Licht	Sonst
		°C	kWh	kWh	kWh
1	10.04.19-26.05.19	10.0	339	116	
2	27.05.19-01.07.19	14.0	508	63	
3	02.07.19-18.08.19	21.7	851	63	
4	19.08.19-30.09.19	17.2	432	118	
5	01.10.19-12.11.19	11.3	324	149	
6	13.11.19-05.01.20	3.3	272	162	
7	06.01.20-16.02.20	1.6	250	163	
8	17.02.20-30.03.20	6.3	325	157	
9	31.03.20-09.04.20	6.5	19	40	
Gesamt			3320	1031	9'160

Abb. 9: Aufteilung des gesamten Strombedarfs (%)



Dieser Strombedarf wurde nicht detailliert gemessen. Aufgrund der Leistung und der geschätzten Einschaltdauer kann er annähernd den einzelnen Stromverbrauchern zugeordnet werden (Tab. 5). Es zeigt sich, dass vor allem die Propeller, die die Stallluft durchmischen und die Wärme gleichmässig verteilen, einen relativ hohen Energiebedarf aufweisen. Diese waren auch teilweise während der Reinigungszeit zwischen den einzelnen Mastumtrieben eingeschaltet.



Tab. 5: Aufteilung des sonstigen Strombedarfs.

	Anzahl	Mittlere Leistung	Tage	Stunden	Strombedarf
		W		h/Tag	kWh/Jahr
Propeller (Mixer)	6	75	300	24	3240
Hochdruckpumpe Kühlung	1	2500	100	4	1000
Umwälzpumpen	3	120	180	24	1555
Hochdruckreiniger	1	6400	12	10	768
Tiefkühltruhe	1				300
Kühlschrank	1				220
Pumpe Vorreinigung	1	3000	8	3	72
Fütterung/Klappen/Steuerung					1200
Besucherraum					800
					9155

In der kalten Jahreszeit (Umtriebe 6, 7) wird 90% des Strombedarfs für die Lüftung durch die Zuluft- und Abluft-Lüfter der beiden Wärmerückgewinnungsanlagen verursacht (Tab. 6). Beim ersten Umtrieb sind die beiden Sommerlüfter nur für 3.9% des Strombedarfs verantwortlich. Dies ist den relativ tiefen Aussentemperaturen am Ende der Mast zuzuschreiben. Die beiden Abluftlüfter benötigen mehr als doppelt so viel Energie wie die beiden Zuluftlüfter. Dies lässt sich durch die Drehzahl der Zuluftlüfter, die auf 70 % begrenzt war, erklären.

Tab. 6: Anteil der einzelnen Lüfter am gesamten Strombedarf für die Lüftung.

Umtriebe	Periode	t aussen	Abluft	Zuluft	Sommer
		°C	%	%	%
1	10.04.19-26.05.19	10.0	65.2%	30.9%	3.9%
2	27.05.19-01.07.19	14.0	45.1%	22.5%	32.4%
3	02.07.19-18.08.19	21.7	39.5%	15.4%	45.1%
4	19.08.19-30.09.19	17.2	52.2%	20.9%	26.9%
5	01.10.19-12.11.19	11.3	39.1%	18.9%	42.0%
6	13.11.19-05.01.20	3.3	61.4%	28.4%	10.2%
7	06.01.20-16.02.20	1.6	61.8%	28.8%	9.4%
8	17.02.20-30.03.20	6.3	52.8%	24.7%	22.5%
9	31.03.20-09.04.20	6.5	49.9%	35.6%	14.5%
Gesamt			49.4%	22.2%	28.3%

Aus der CO₂-Konzentration, der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur innen und aussen sowie auch den Tierdaten lässt sich eine gesamte Luftmenge von 93'596'991 m³ pro Jahr errechnen (Tab. 7). Die mittlere Luftrate beträgt 10'685 m³/h (14.8 m³/h m²).



Tab. 7: Gesamte Lufrate (m³) und spezifischer Strombedarf (Wh/1000 m³)

Umtrieb	Periode	t aussen	Luftmenge	Strombedarf	Strombedarf
		°C	m³	kWh	Wh/1000 m³
1	10.04.19-26.05.19	10.0	8'531'180	339	40
2	27.05.19-01.07.19	14.0	13'261'631	508	38
3	02.07.19-18.08.19	21.7	22'795'084	851	37
4	19.08.19-30.09.19	17.2	14'645'016	432	30
5	01.10.19-12.11.19	11.3	11'242'148	324	29
6	13.11.19-05.01.20	3.3	6'343'134	272	43
7	06.01.20-16.02.20	1.6	6'990'897	250	36
8	17.02.20-30.03.20	6.3	9'084'796	325	36
9	31.03.20-09.04.20	6.5	703'105	19	26
Summe			93'596'991	3'320	
Mittelwert					35

Über das ganze Jahr betrachtet fliesst etwa 74 % der gesamten Lufrate durch die Wärmetauscher (Tab. 8). Angesichts des relativ hohen Widerstands des Wärmtauschers (etwa 100 Pa jeweils auf der Zu- und Abluftseite bei 11'000 m³/h) ist ein mittlerer spezifischer Strombedarf der 4 WRG-Lüfter von 33 Wh/1000 m³ als sehr niedrig einzuschätzen. Dies lässt sich durch den sehr hohen Wirkungsgrad der EC-Lüfter bei niedrigen Drehzahlen erklären. In den ersten 10 Tagen der Mast lag die mittlere Drehzahl der EC-WRG-Lüfter unter 9 % beim Umtrieb 3 (Winter) und unter 20 % bei den Umtrieben 2 und 3 (Sommer). Bei den Sommerlüftern (frequenzgesteuert) fällt der hohe spezifische Strombedarf während der Umtriebe 6 bis 8 auf. Dies ist teilweise auf den bedeutenden Stand-by-Verbrauch (0.23 kWh/Tag) der Sommerlüfter zurückzuführen. Die Bereitschaftsverluste erhöhen den mittleren spezifischen Strombedarf desto mehr, je kürzer die Einschaltdauer der Lüfter ist.

Tab. 8: Lufrate und spezifischer Strombedarf der Wärmetauscher-Lüfter und der Sommerlüfter.

Umtrieb	Lüfter WRG			Sommerlüfter		
	V WRG	Strom	Strom	V Sommerl.	Strom	Strom
	m3	kWh	Wh/1000 m3	m3	kWh	Wh/1000 m3
1	7'819'401	326	42	711'779	13	19
2	8'849'171	343	39	4'412'460	165	37
3	11'450'309	467	41	11'344'775	384	34
4	9'726'303	316	32	4'918'713	116	24
5	9'155'464	188	21	2'086'684	136	65
6	6'145'134	245	40	198'000	28	140
7	6'816'272	226	33	174'625	23	134
8	8'457'741	251	30	627'055	73	117
9	703'105	16	23	0	3	
Summe	69'122'900	2'379		24'474'090	941	
Mittelwert			33			71



Der mittlere thermische Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage beträgt während der ersten 10 Tage der Mastumtriebe 52.8% (Tab. 9). Während der ersten zwei Tage ist der Wirkungsgrad zeitweise mehr als 65 %. Gegen Ende der Mast nimmt er wegen der zunehmenden Staubbelastung und der steigenden Lufrate bis auf 40 % ab. Diese Abnahme hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf den Heizbedarf, da zu dieser Zeit, ausser bei tiefen Aussentemperaturen, die Energiebilanz positiv ist.

Tab. 9: Thermischer Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung (WRG) während der ersten zehn Tage der einzelnen Mastumtriebe.

Umtrieb	Periode	WRG
		%
1	10.04.19-19.04.19	51.7
2	27.05.19-05.06.19	49.9
3	02.07.19-11.07.19	54.3
4	19.08.19-28.08.19	52.3
5	01.10.19-10.10.19	53.2
6	13.11.19-22.11.19	50.4
7	06.01.20-15.01.20	54.6
8	17.02.20-26.02.20	51.8
9	31.03.20-08.04.20	56.7
Mittelwert		52.8

Produktionsdaten

Dank der tiefen relativen Feuchtigkeit war die Beschaffenheit der Einstreue während der ganzen Dauer der Umtriebe sehr gut (Abb. 10).

Tab. 10: Produktionsergebnisse der 8 Mastumtriebe. Im Mastumtrieb 4 wurde früher ausgestallt. (FVI: Futterverwertungsindex)

Umtriebe	Periode	Endgewicht	Referenz. Endgewicht	FVI	Referenz FVI	Fussballen- geschwüre
		kg	kg	kg/kg	kg/kg	%
1	10.04.19-26.05.19	2.254	2.268	1.485	1.493	4
2	27.05.19-01.07.19	2.171	2.244	1.478	1.495	0
3	02.07.19-18.08.19	2.183	2.213	1.516	1.494	0
4	19.08.19-30.09.19	1.676	1.609	1.527	1.482	0
5	01.10.19-12.11.19	2.221	2.251	1.456	1.471	0
6	13.11.19-05.01.20	2.060	2.171	1.505	1.503	2
7	06.01.20-16.02.20	2.172	2.097	1.442	1.506	0
8	17.02.20-30.03.20	2.074	2.114	1.523	1.523	0
Mittelwert		2.101	2.121	1.492	1.496	0.750



Dies widerspiegelt sich auch in den guten Produktionsergebnissen (Tab. 10). Mit Ausnahme vom ersten Umtrieb wurden praktisch keine Fussballengeschwüre verzeichnet. In konventionellen Ställen, wo eine Wärmerückgewinnung fehlt, wird aus Energiespargründen oft weniger gelüftet und liegt folglich die mittlere CO₂-Konzentration vor allem in der kalten Jahreszeit weit über 2000 ppm. Hieraus resultiert oft eine höhere relative Feuchtigkeit, wodurch die Einstreue feucht wird, was zu schmerzhaften Fussballenverletzungen führt.

Abb. 10: Ausgezeichnete Einstreubedingungen auch noch am 32. Alterstag dank bedarfsgerechter Lüftung (mittlere CO₂-Konzentration 1744 ppm).





Anforderungen Minergie-A/P

Trotz relativ hohem Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung und sehr guter Wärmedämmung wird der Grenzwert für den Wärmebedarf (QH, li) gemäss Energienachweis für Industriegebäude [5] massiv überschritten (Tab 11).

Tab. 11: Gegenüberstellung der Anforderungen gemäss Systemnachweis und der Messwerte.

	Fläche AE	Grenzwert QH,li	Projektwert QH	Elektrizitäts- bedarf	Lufrate	mittlere Temperatur
	m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	m ³ /h m ²	°C
Systemnachweis Minergie-A	722.2	51.0	32.0	17	0.7	18
Systemnachweis Minergie-P		35.7	32.0			
Messwerte			96.2	19	14.8	25

Für den 1.85 fach-höheren Energiebedarf im Vergleich zum QH,li (Grenzwert für Industriegebäude gemäss Systemnachweis Minergie-A) und den 3-fach höheren Energiebedarf zu QH (Grenzwert für Industriegebäude Minergie-P) gibt es zwei wesentliche Gründe:

- Die 21-fach höhere Lufrate: 14.8 statt 0.7 m³/h m², diese ist teilweise auf die relativ niedrige CO₂-Konzentration (Mittelwert 1744 ppm) zurückzuführen. Eine niedrige CO₂-Konzentration zählt sich durch bessere Tierleistungen aus.
- Die höhere Raumtemperatur: 25 statt 18 °C

Eine noch bessere Wärmedämmung reduziert den Energiebedarf nur noch marginal, da die Transmissionsverluste weniger als ein Viertel der gesamten Verluste ausmachen. Eine beträchtliche Energieeinsparung kann vor allem durch Verkürzung der Reinigungsphase zwischen den einzelnen Umtrieben realisiert werden. Diese Zeitspanne kann der Landwirt jedoch nur bedingt selber bestimmen. Die Lufrate während der Mastumtriebe kann nicht reduziert werden, ohne dass die Gesundheit der Tiere beeinträchtigt wird. Um die Lüftungsverluste zu verringern bleibt nur die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads der Wärmerückgewinnungsanlage. Dies bedingt jedoch höhere Wärmetauscher, die weiter aus dem Dach ragen, schwieriger für die Reinigung zugänglich sind und möglicherweise in Konflikt zum Landschaftsschutz stehen.

In konventionellen Ställen liegt gemäss Erfahrungswerten (Quelle Micarna) der Energiebedarf bei etwa 160'000 kWh pro Jahr. Dazu wird in solchen Ställen eine CO₂-Konzentration von bis zu 3000 ppm (Grenzwert nach Tierschutzgesetz) toleriert. Im Kapitel Einflussfaktoren auf den Energiebedarf wird der Einfluss der Lufrate auf die Energiebilanz analysiert.



Beitrag an erneuerbare Energie

Der Stall liefert einen bedeutenden Beitrag an erneuerbare Energie (45'616 kWh). Die PV-Anlage produzierte während der Messperiode 78'049 kWh, der gesamte Energiebedarf für die WP, Lüftung, Licht und Einrichtungen (sonstiger Bedarf) betrug lediglich 32'433 kWh (Tab. 12). Da mehr Strom produziert wurde als gebraucht, sind die Minergie-A-Anforderungen erfüllt.

Tab. 12: Beitrag an erneuerbare Energie (WP = Wärmepumpe).

	Strombedarf kWh	Stromproduktion kWh	Beitrag erneuerbare Energie kWh
WP	18'922		
Lüftung	3'320		
Licht	1'031		
Sonstiger Bedarf	9'160		
Strombedarf gesamt	32'433	78'049	45'616

Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

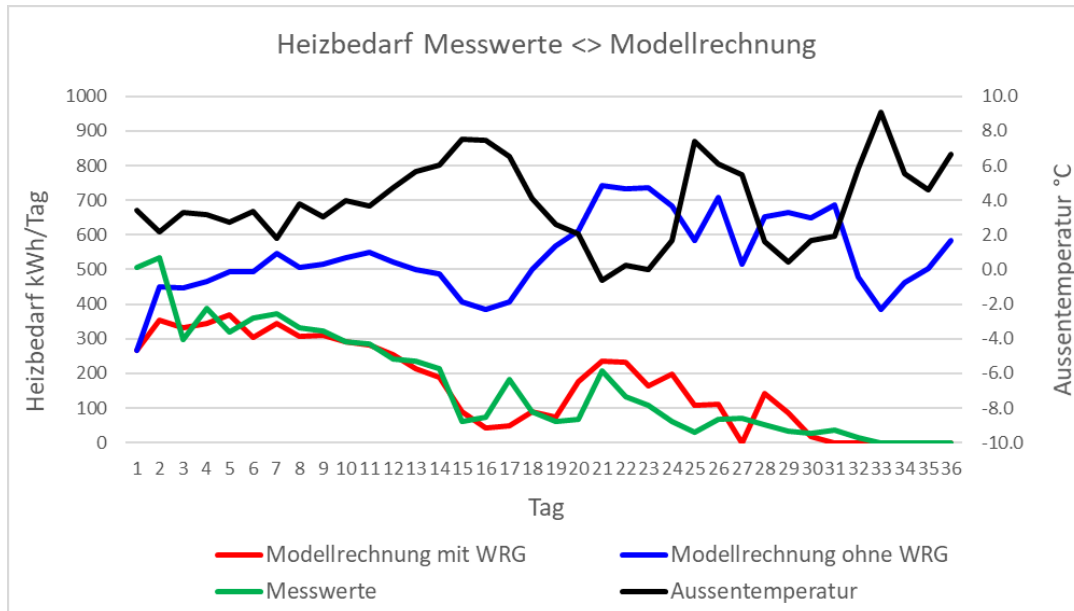
Einfluss der Wärmerückgewinnung

Der Heizbedarf wird einerseits durch die Wärmeverluste (Transmission und Lüftung) und andererseits durch die Wärmeabgabe der Tiere bestimmt [6]. In den Modellrechnungen wurde für die Wärmeverluste durch Transmission ein Wert von 466 W/K angenommen (berechnet anhand der vorhandenen Wärmedämmung). Die Wärmeverluste durch Lüftung hängen von der Lüftrate ab. Diese wird einerseits durch die CO₂-Produktion und andererseits durch die Wasserdampfabgabe der Tiere bestimmt. Diese Werte lassen sich nach der Methode der C.I.G.R. ([1], [2], [3], [4]) berechnen. Die dazu erforderlichen Parameter (Tierzahl und Tiergewicht, Stall-, Aussen-, Zuluft-, Ablufttemperatur, relative Feuchtigkeit im Stall und aussen und CO₂-Konzentration) wurden den Messreihen entnommen.

Der mit dem Modell berechnete Heizbedarf einerseits und der gemessene andererseits zeigen beim 6. Mastumtrieb eine gute Übereinstimmung (Abb. 11). Die höheren Messwerte an den beiden ersten Tagen sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Gebäudemasse (vor allem Bodenplatte und seitliche Betonwände) wegen der thermischen Trägheit beim Mastanfang noch nicht auf der gewünschten Temperatur war. Abweichungen nach dem 20. Tag zwischen beiden Kurven können durch Sonneneinstrahlung, die nicht erfasst wurde, verursacht sein. Am Ende der Mast spielt auch der Auslauf eine Rolle. Während dieser Zeit sind die Klappen zum Wintergarten offen und fliesst ein Teil der Lüftrate nicht durch den Wärmetauscher. Der gemessene Heizbedarf während des gesamten 6. Umtriebs beträgt 6'070 kWh, der errechnete liegt etwas tiefer bei 5'961 kWh. Ab dem 32. Tag ist die Energiebilanz ausgeglichen. Verwendet man in der Modellrechnung anstelle der Temperaturwerte der Zuluft jene der Aussenluft, lässt sich simulieren, wie gross der Heizbedarf ohne Wärmerückgewinnung (WRG) wäre (blaue Kurve). Für die gleichen Klimabedingungen würde der Heizbedarf 19'041 kWh betragen. Lässt man die beiden ersten Tage ausser Betracht, beträgt der maximale Heizbedarf mit WRG etwa 400 kWh/Tag, ohne WRG 730 kWh/Tag.



Abb. 11: Heizbedarf des 6. Mastumtriebs: Messwerte und Modellrechnung mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG).



Der Heizbedarf wird massgebend von der Lufrate beeinflusst. Diese wird CO₂- und Temperatur-gesteuert. Der Sollwert für CO₂ betrug 2000 ppm, der mittlere registrierte Wert im 6. Umtrieb 2094 ppm (Abb. 12). Die Stalltemperatur ist am Ende der Mast höher als erforderlich. Die automatischen Temperatur-Sollwerte des Stalklimacomputers wurden bewusst manuell übersteuert, um die relative Feuchtigkeit im Stall zu senken und die Einstreue trocken zu halten.

Abb. 12: Lufrate und Klimawerte (Temperatur Stallluft und Aussenluft, CO₂-Konzentration).

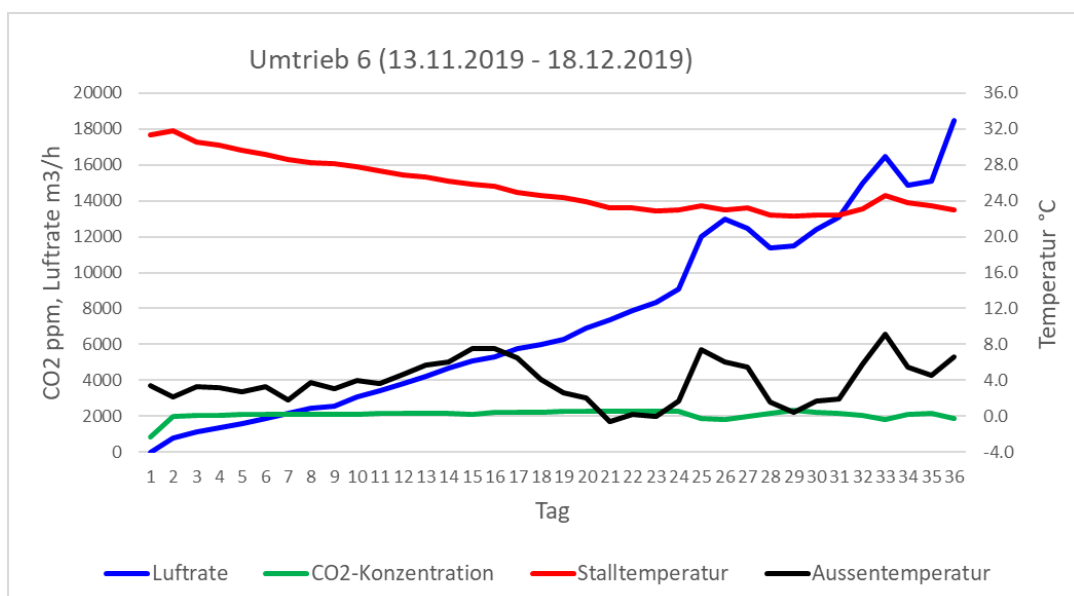
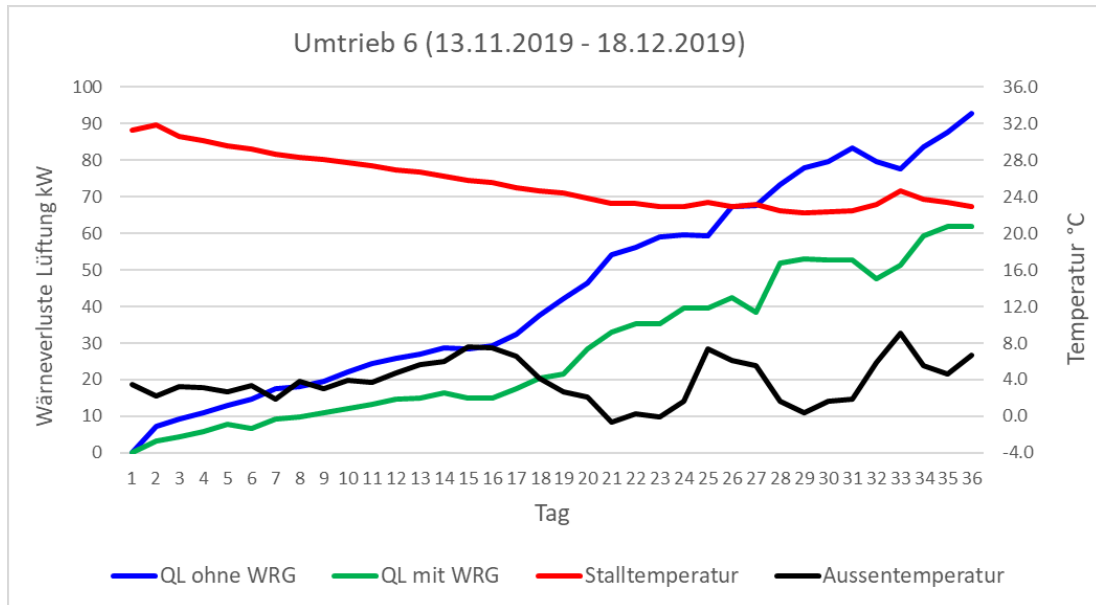




Abb. 13: Wärmeverluste durch die Lüftung (QL) einerseits mit Wärmerückgewinnung (WRG), andererseits ohne Wärmerückgewinnung (Modellrechnung).



Die Wärmeverluste durch die Lüftung (QL) betragen am Ende der Mast 61 kW. Ohne WRG würden sie gemäss Modellrechnung 92 kW betragen (Abb. 13).

Die Gegenüberstellung der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung einerseits und der fühlbaren Wärmeabgabe der Tiere andererseits zeigt, dass die Energiebilanz am 16. Und 17. Tag des 6. Mastumtriebs ausgeglichen ist, nachher wegen der sinkenden Aussentemperaturen wieder negativ wird und ab dem 30. Tag erneut positiv wird (Abb. 14). Wäre die Stalltemperatur ab dem 25. Tag nicht um 2 bis 3 °C höher als für die Tiere erforderlich gewesen, wäre auch die Energiebilanz schon ab diesem Tag positiv gewesen.



Abb. 14: Gegenüberstellung der Wärmegewinne (Fühlbare Tierwärme) und Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung; Modellrechnung mit Wärmerückgewinnung.

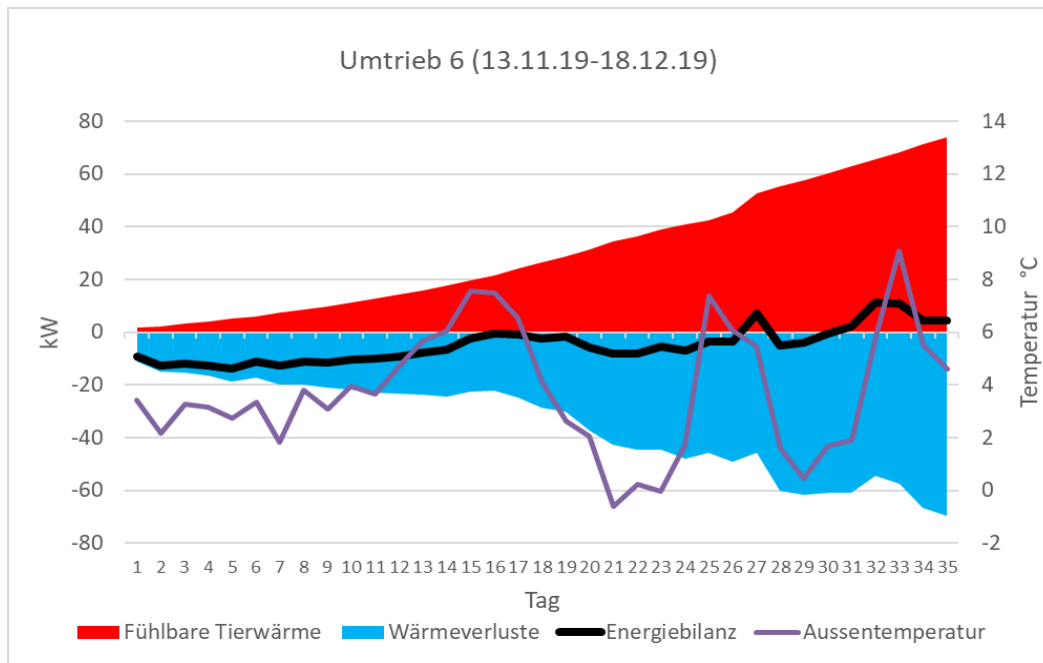
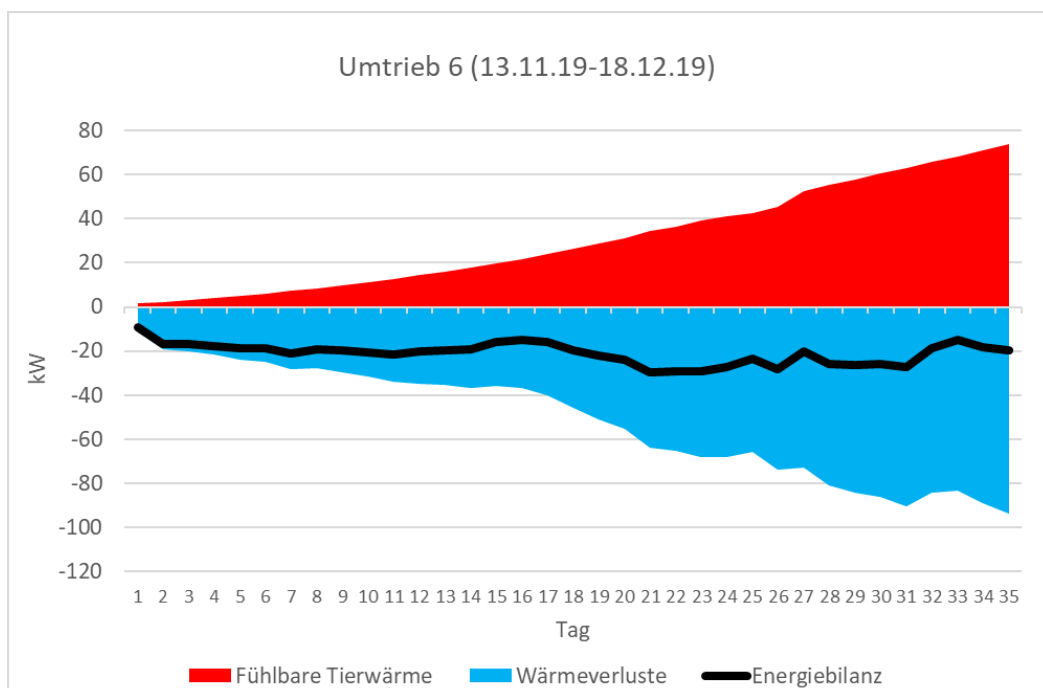


Abb. 15: Gegenüberstellung der Wärmegewinne (fühlbare Tierwärme) und Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung; Modellrechnung ohne Wärmerückgewinnung.





Ohne Wärmerückgewinnung würde für die gleichen Stallklimabedingungen die Energiebilanz am Ende der Mast etwa -20 kW betragen (Abb. 15). Der Heizbedarf ohne WRG nimmt ab dem 17. Tag zu, obschon die Stalltemperatur abnimmt. Die Zunahme ist auf die tieferen Aussentemperaturen und die steigende Luftrate (Abb. 12) zurückzuführen.

Vergleich Wärmeverluste Transmission - Lüftung

Die Wärmeverluste durch Transmission nehmen wegen sinkender Stalltemperatur mit zunehmender Mastdauer ab, jene durch Lüftung jedoch stark zu (Abb. 16). Am Ende des 6. Mastumtriebes betragen die Wärmeverluste durch Lüftung (18'000 m³/h) etwa 62 kW. Die Summe der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung beläuft sich auf 69 kW. Der Anteil der Lüftung macht am Ende 84 % der gesamten Wärmeverluste aus (Abb. 17). Über der ganzen Mastperiode ist die Lüftung für etwa 76 % der Wärmeverluste verantwortlich. Je nach Sollwert der CO₂-Konzentration können sich die Anteile stark verschieben. Je tiefer der Sollwert, desto grösser die Luftrate und die Wärmeverluste. Die fühlbare Wärmeabgabe der Tiere erreicht am Ende der Mast bei einer Stalltemperatur von 20 °C nach C.I.G.R. 82 kW. Bei 23 °C nimmt der Anteil der fühlbaren Wärme auf 72 kW ab, jener der latenten Wärme auf 78 kW zu.

Abb. 16: Aufschlüsselung der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung (kW).

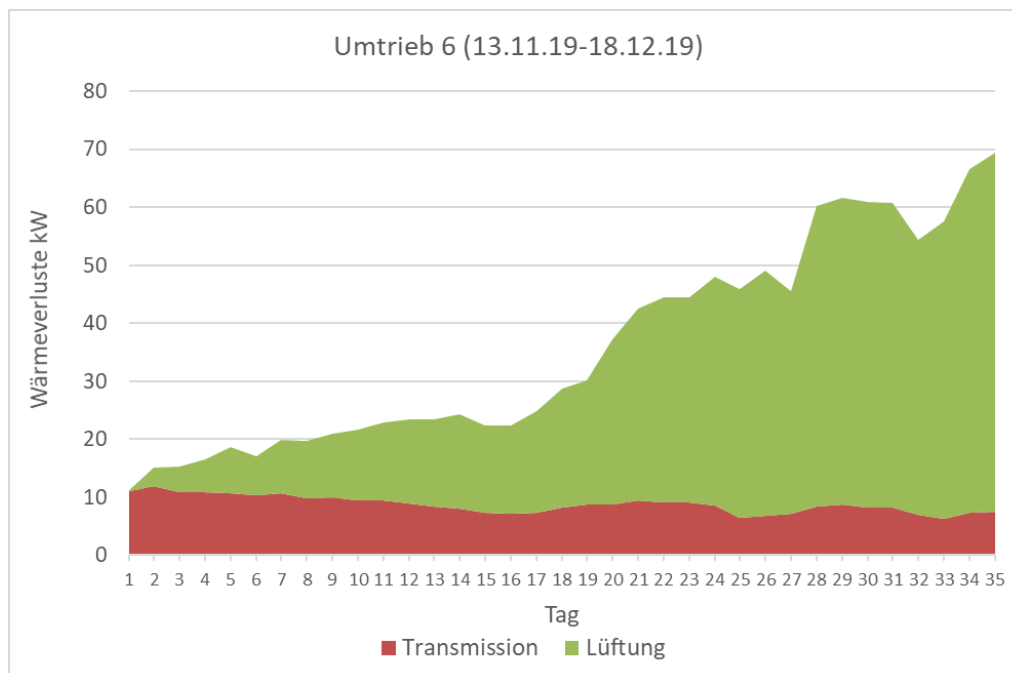
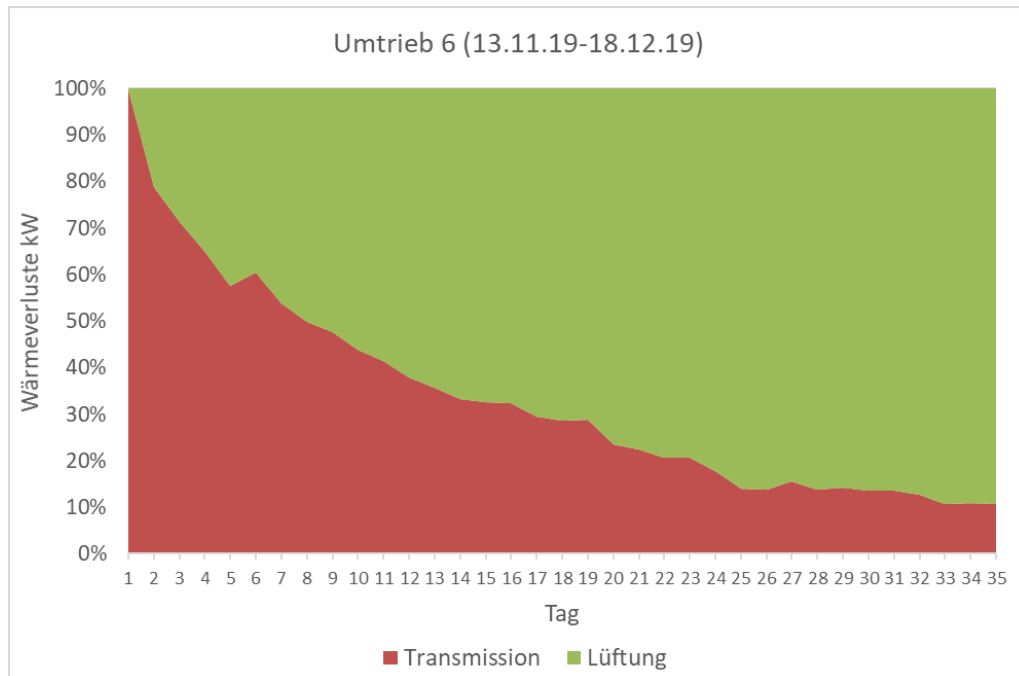




Abb. 17: Aufschlüsselung der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung (%).



Einfluss der Wärmedämmung

Der Stall weist einen rechnerischen H-Wert von 466 W/K auf. Bei $H = 750$ W/K (herkömmlicher Stall) würde sich der gesamte Energiebedarf des 6. Umtriebs um 4'530 kWh von 6'070 kWh auf 10'600 kWh (Modellrechnung) erhöhen. Der Verzicht auf Wärmerückgewinnung würde dagegen den Heizbedarf um etwa 13'000 kWh erhöhen. Von beiden Massnahmen hat die Wärmerückgewinnung das bessere Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Autarkie und Nutzungsgrad des Wärmespeichers

Der Wärme- und der Stromspeicher dienen in erster Linie dazu, möglichst viel des erzeugten PV-Stroms selbst zu nutzen.

Der Wasserbehälter (20'000 L) hat eine Speicherkapazität von 23,2 kWh/K und kann durch die Wärmepumpe bis auf 55 °C aufgeladen werden. Die bei der Entladung im Stall freigesetzte Wärme (Q) hängt von folgenden Faktoren ab:

- Wassertemperatur T_s (°C)
- Stalltemperatur T_i (°C)
- Mittlere Wassertemperatur in den Rippenrohren T_r (°C)
- Vorlauftemperatur T_{vor} (°C) $\approx$ Speichertemperatur T_s (°C)
- Rücklauftemperatur $T_{rück}$ (°C)
- Spezifische Wärmekapazität des Wärmespeichers H_s (kWh/K)
- Gesamtlänge der Rippenrohre L (m)
- Durchflussmenge in den Rippenrohren m (L/h)
- Zeitdauer t (h)
- Heizleistung P (kW)



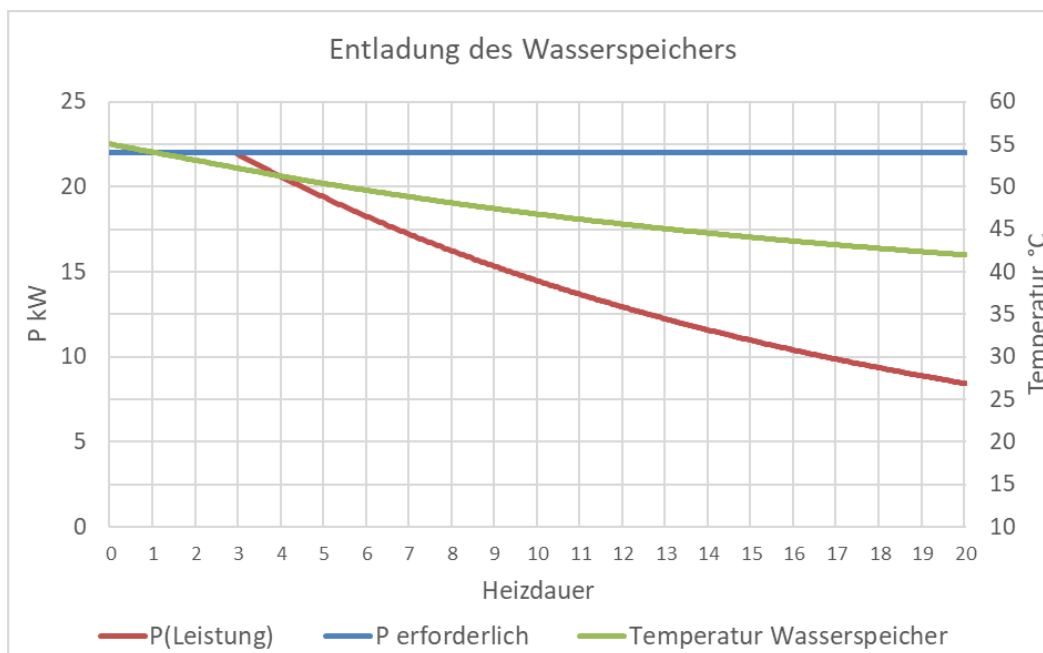
Für die Berechnungsmethode siehe Anhang.

Für die Bedingungen am Anfang der Mast (Tab. 13) beträgt die minimal erforderliche Wassertemperatur im Speicher 52.3 °C (Abb. 18). Diese Temperatur wird bei einer Wärmeleistung von 22 kW schon nach 2.9 Stunden erreicht. Ab diesem Zeitpunkt muss die Wärmepumpe zugeschaltet werden, um die Temperatur im Speicher auf dem Niveau zu halten.

Tab. 13: Annahmen zur Berechnung der minimalen Wassertemperatur im Speicher und der Autarkie des Wasserspeichers. (T_a : Aussentemperatur, $T_{s(t=0)}$: Wassertemperatur am Anfang der Entladung, H_s : spez. Wärmekapazität des Wärmespeichers, L : Länge der Rippenrohre, m : Durchflussmenge in den Rippenrohren, P_{erf} : erforderliche Wärmeleistung, T_i = Stalltemperatur)

T_a	$T_{s(t=0)}$	H_s	L	m	P_{erf}	T_i
°C	°C	kWh/K	m	L/h	kW	°C
0	55	23.2	224	3000	22	33

Abb. 18: Entladung des Wärmespeichers am Anfang der Mast ($T_i = 33$ °C). Nach ca. 3 Stunden kann die erforderliche Heizleistung (22 kW) nicht mehr erreicht werden.

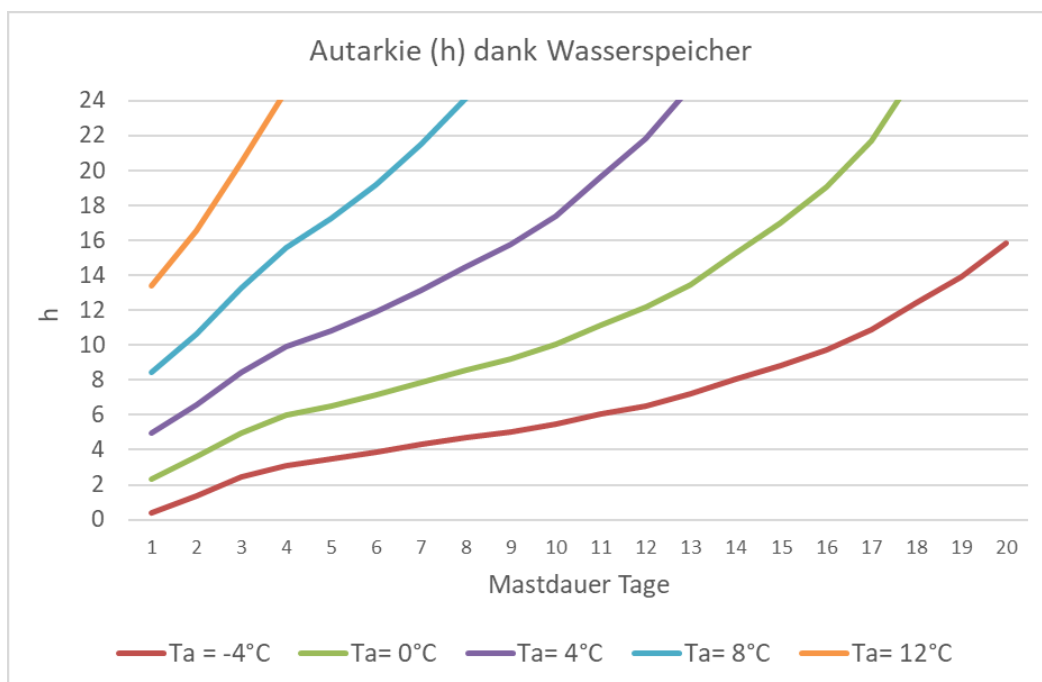


Berücksichtigt man die Wärmeverluste des Speichers an die Umgebung (12 W/K), reduziert sich die Autarkie des Speichers sogar auf 2.4 h. Die minimal erforderliche Wassertemperatur beträgt 52.7 °C bei einer Wärmeleistung im Stall von 22 kW. Das bedeutet, dass die Speicherkapazität nur um $(55-52.7) / (55-33) = 10.4\%$ genutzt wird. Die freigesetzte Wärmemenge während 2.4 h beträgt lediglich 52.8 kWh.



Mit abnehmender Stalltemperatur und sinkendem Wärmebedarf nimmt der Nutzungsgrad des Wärmespeichers zu (Tab. 14). Am 10. Tag beträgt er bei einer Aussentemperatur von 0 °C etwa 33 %. Der Stall kann während 10 Stunden mit der Wärme aus dem Speicher geheizt werden, ohne dass die Wärmepumpe eingeschaltet werden muss. Die Autarkie des Wärmespeichers hängt ebenfalls stark von der Aussentemperatur ab (Abb. 19). Bei einer Aussentemperatur von – 5°C wird gemäss Modellrechnung erst am 20. Masttag eine Autarkie von 12 Stunden erreicht. Bei einer Aussentemperatur von 12 °C beträgt die Autarkie schon am ersten Masttag 13 Stunden.

Abb. 19: Autarkie (h) des Wärmespeichers in Abhängigkeit der Aussentemperatur (T_a).





Tab. 14: Minimal erforderliche Wassertemperatur (T_{min}) und Autarkie (t) des Wärmespeichers im Verlauf der Mast (Modellrechnung). Aussentemperatur = 0°C.

Tag	T_i	Ohne Wärmeverluste			Verluste	Mit Wärmeverlusten			Nutzungsgrad
		Perf	T_{min}	t	Q_{mittel}	Perf incl. Verl.	T_{min}	t	
	°C	kW	°C	h	kW	kW	°C	h	%
1	33	22.0	52.3	2.9	0.64	22.6	52.7	2.4	10.4%
2	32	21.7	51.1	4.2	0.64	22.4	51.5	3.6	15.1%
3	31	21.4	49.8	5.6	0.63	22.0	50.3	5.0	19.7%
4	30.5	20.9	49.0	6.6	0.62	21.5	49.5	6.0	22.6%
5	30	20.9	48.5	7.2	0.62	21.5	48.9	6.5	24.3%
6	29.5	20.8	47.9	7.9	0.62	21.4	48.4	7.2	26.0%
7	29	20.7	47.3	8.6	0.61	21.3	47.8	7.9	27.8%
8	28.6	20.4	46.8	9.3	0.61	21.0	47.2	8.6	29.5%
9	28.2	20.3	46.3	10.0	0.61	20.9	46.7	9.2	31.0%
10	27.7	20.1	45.6	10.9	0.60	20.7	46.0	10.1	32.9%
11	27.3	19.6	44.9	12.0	0.60	20.2	45.3	11.2	35.0%
12	26.9	19.2	44.2	13.1	0.60	19.8	44.6	12.2	37.0%
13	26.4	18.7	43.3	14.4	0.59	19.3	43.8	13.5	39.3%
14	26	18.0	42.4	16.3	0.58	18.5	42.8	15.2	42.0%
15	25.6	17.3	41.5	18.1	0.58	17.9	41.9	17.0	44.5%
16	25.2	16.5	40.5	20.3	0.57	17.1	41.0	19.0	47.1%
17	24.7	15.7	39.4	23.1	0.57	16.2	39.8	21.7	50.1%
18	24.3	14.4	38.1	27.3	0.56	15.0	38.5	25.6	53.8%
19	23.9	13.3	36.8	31.7	0.55	13.9	37.2	29.7	57.1%
20	23.4	12.1	35.4	37.7	0.54	12.6	35.8	35.3	60.8%
21	23	10.4	33.7	47.5	0.53	11.0	34.1	44.3	65.4%
22	22.6	9.0	32.0	59.5	0.52	9.5	32.5	55.2	69.5%
23	22.2	7.3	30.3	78.3	0.51	7.8	30.7	71.9	74.1%
24	21.7	5.6	28.2	111.3	0.50	6.1	28.7	100.5	79.1%
25	21.3	3.3	25.6	205.2	0.48	3.8	26.1	176.1	85.7%
26	20.9	1.3	22.9	583.8	0.47	1.7	23.5	419.5	92.4%
27	20.5	0.0	20.5	∞	0.45	0.5	21.4	1720.1	97.4%
28	20.2	0.0	20.2	∞	0.45	0.5	21.1	1742.5	97.4%
29	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
30	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
31	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
32	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
33	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
34	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
35	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%
36	20	0.0	20.0	∞	0.45	0.5	20.9	1757.6	97.4%

Die Autarkie des Wärmespeichers lässt sich durch folgende Massnahmen erhöhen:



- Erhöhung der Anfangstemperatur im Speicher. Eine Erhöhung von 55 auf 60 °C würde die Autarkie bei $T_a = 0\text{ °C}$ am ersten Masttag von 2.4 auf 7.5 Stunden vergrössern. Die Erhöhung der Wasserspeichertemperatur, sofern möglich, könnte sich folglich hinsichtlich Selbstnutzung des Solarstroms trotz Verringerung des cop -Werts lohnen.
- Erhöhung der Gesamtlänge der Rippenrohre. Eine Verdoppelung der Länge vergrössert die Autarkie bei sonstigen gleichen Bedingungen am ersten Tag von 2.4 auf 9.3 Stunden.
- Eine grössere Durchflussmenge in den Rippenrohren verringert die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf. Eine Zunahme von 3000 auf 6000 L/h erhöht die Autarkie unter sonstigen gleichen Bedingungen am ersten Masttag von 2.4 auf 4 Stunden.

Es bedarf einer eingehenden Kosten-Nutzen-Analyse um die Rentabilität und Praxistauglichkeit dieser Massnahmen zu beurteilen. Die Wärmeverluste des Wasserspeichers an die Umgebung betragen bei einer Betriebsdauer von 300 Tagen etwa 3500 kWh. Im Anbetracht, dass im Fall Leuenberger der Wärmespeicher sowohl für das Wohnhaus wie auch für den Stall genutzt wird, belaufen sich die Verluste auf 3.7 % der gesamten Wärmeverluste (Stall + Haus). Die Wärmeverluste an die Umgebung verursachen einen zusätzlichen Strombedarf von 930 kWh für die Wärmepumpe. Dank dem Wasserspeicher kann andererseits die Selbstnutzung des erzeugten PV-Strom stark erhöht werden. Wie viel exakt dem Wasserspeicher zu verdanken ist, kann aufgrund der vorliegenden Messergebnisse noch nicht genau beziffert werden.

Nutzen Stromspeicher

Zusätzlich zu den 25'325 direkt genutzten kWh, wurden indirekt dank dem Stromspeicher weitere 5'332 kWh des PV-Stroms selbst gebraucht. Bei einer Entladung des Stromspeichers stehen pro Zyklus maximal 17 kWh zur Verfügung. Diese Menge reicht theoretisch aus, um den mittleren Strombedarf für Lüftung, Licht und Einrichtungen (1.84 kW) während etwa 9 Stunden zu decken. Bei einer Verdoppelung der Speicherkapazität könnte auch in den Wintermonaten der gesamte Strombedarf mit Ausnahme der Wärmepumpe während der ganzen Nacht gedeckt werden, vorausgesetzt, die Sonnenstrahlung tagsüber reicht aus, um den Speicher ausreichend zu laden.

Insgesamt wurden 30'659 kWh (25'325 kWh direkt und 5'332 kWh indirekt) oder 39.2% des erzeugten PV-Stroms (78'049 kWh) für den Stall und das Haus genutzt. Die Menge deckt 94.5% des gesamten Strombedarfs für Wärmepumpe (18'922 kWh) Lüftung (3'320 kWh), Licht (1'031 kWh) und sonstige Stromverbraucher (9'160 kWh) ab.

Beitrag erneuerbare Energie

Dank dem relativ niedrigen Energiebedarf für Heizung, Lüftung, Licht und Einrichtungen einerseits und der Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlage andererseits betrug der Netto-Beitrag an erneuerbarer Energie 45'616 kWh (Tab. 15). Diese Menge übertrifft den gesamten Strombedarf des Geflügelmaststalls.

Tab. 15: Beitrag an erneuerbarer Energie

PV-Stromerzeugung	Strombedarf	Beitrag an erneuerbare Energie
78'049	32'433	45'616



Wirtschaftlichkeit Minergie-A / Minergie-P

Da die Nutzungsdauer (Tab. 16) der Gebäudehülle und der einzelnen Einrichtungen (Heizung, Lüftung, Speicher...) unterschiedlich lang ist, können die Lebenszykluskosten nur unter Annahme von höchst unsicheren zukünftigen Entwicklungen ermittelt werden. Deshalb werden hier nur die Jahreskosten unter Einbezug von Kapitalzinsen (1%) berechnet.

Bei einem Propangaspreis von 11 Rp/kWh (Tab. 17), einem Strompreis von 20 Rp (Mittel Hoch/Niedertarif) und einer Einspeisevergütung für PV-Strom von 9.5 Rp/kWh errechnet sich für die Energiekosten eine Differenz von CHF 21'011 /Jahr (Tab. 18). Der Leuenberger Stall bezieht etwa 87 % seines Stroms aus der PV-Anlage.

Tab. 16: Nutzungsdauer der Gebäudehülle und Einrichtungen

	Beschreibung		Nutzungsdauer	
	Stall Leuenberger	Konvention. Stall	Stall Leuenberger	Konvention. Stall
			Jahre	Jahre
Bauhülle	H = 466 W/K	H = 770 W/K	30	
Wärmerückgewinnung	2x Reventa Typ 1270	-	20	
Wärmeerzeugung	Sole-Wasser WP Stromaufnahme 9 kW	Gasbefeuerte Lufterhitzer 2 x 60 kW	20	20
Wärmequelle	Erdregister		50	
Wärmeverteilung	Rippenrohre	-	20	
Wärmespeicher	20'000 Liter	-	30	
Stromspeicher	18 kWh	-	10	
PV-Anlage	70 kWp Ost-West	-	20	
Beleuchtung	LED-Lampen	Leuchtstoffrohre	10	10

Tab. 17: Energietarife

	CHF/kWh
Propangas	0.110
Strom < Netz	0.200
Strom 87% PV / 13% Netz	0.109



Tab. 18: Energiebedarf und Energiekosten

	Energiebedarf		Energiekosten	
	Stall Leuenberger	Konvention. Stall	Stall Leuenberger	Konvention. Stall
	kWh/Jahr	kWh/Jahr	CHF/Jahr	CHF/Jahr
Heizung	18'922	160'000	2'056	17'600
Tankmiete				800
Lüftung	3'320	3'000	361	600
Beleuchtung	1'031	1'200	112	240
PV, Einspeisung ins Netz			-4'300	
Gesamt			-1'771	19'240
Differenz				21'011

Tab. 19: Investitionen und Jahreskosten (Kapitalzins 1%)

	Investitionen		Jahreskosten	
	Stall Leuenberger	Konvention. Stall	Stall Leuenberger	Konvention. Stall
	CHF	CHF	CHF/Jahr	CHF/Jahr
Mehrkosten Bauhülle ¹	18'000		697	
Mehrkosten Lüftung mit Wärmerückgewinnung	22'500		1247	
Wärmeerzeugung ²	71'250	13'500	3948	748
Wärmequelle ²	71'250		1818	
Wärmeverteilung	23'400		1297	
Wärmespeicher	36'000		1395	
Stromspeicher	27'000		2851	
PV-Anlage ³	134'320		7443	
Beleuchtung	4'520	2'600	477	275
Energiekosten			-1'771	19'240
Wartung/Unterhalt			1'500	1'000
Gesamt	408'240	16'100	20'902	21'263
Differenz	392'140		-361	

¹⁾ Mehrkosten der Wärmdämmung: CHF 90'000, Minergiebeitrag CHF 72'000

²⁾ Wärmeerzeugung (WP) und Wärmequelle (Erdregister): 75 % Stall, 25 % Wohnhaus

³⁾ PV-Anlage: CHF 161'320, Förderbeitrag CHF 27'000

Die Investitionen des Leuenberger Stalls sind unter Berücksichtigung der Beiträge (Minergie und PV-Anlage) um CHF 392'140 höher als für einen vergleichbaren konventionellen Stall (Tab. 19). Da die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme anteilmässig um etwa 25% ins Wohnhaus fliesst, werden die Investitionen der Wärmepumpe nur um 75 % dem Stall zugeordnet.

Die Jahreskosten für die getroffenen Annahmen sind leicht tiefer (CHF 361). Die Abschreibung der PV-Anlage und des Stromspeichers machen fast die Hälfte der Jahreskosten aus. Von allen Massnahmen ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis der besseren Wärmedämmung und der Wärmerückgewinnung am grössten.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Dank besserer Wärmedämmung, Wärmerückgewinnung in der Abluft und Sole-Wasser-Wärmepumpe konnte der Energiebedarf für die Heizung auf etwa 19'000 kWh pro Jahr gesenkt werden. Der Strombedarf für die Lüftung betrug dank der neuesten Generation von EC-Lüftern und der CO₂-Steuerung der Lüfrate lediglich 3'320 kWh. Die LED-Induktionslampen ermöglichten den Strombedarf für die Beleuchtung auf 1'031 kWh zu verringern.

Mehr als drei Viertel der gesamten Heizenergie-Einsparungen sind der Wärmerückgewinnung zu verdanken. Die Investitionen und die Unterhaltskosten für die Wärmetauscher sind relativ gering und lassen sich innerhalb von 3 bis 4 Jahren amortisieren.

Die PV-Anlage produzierte etwa 78'000 kWh. Hiervon konnte dank Wärme- und Stromspeicher etwa 39% auf dem Betrieb (Stall und Wohnhaus) selber genutzt werden.

Optimierungsbedarf besteht noch bei der Nutzung des Wärmespeichers. Damit möglichst viel Wärme des Wärmespeichers genutzt werden kann, sollte die Wassertemperatur am Anfang der Mast etwa 60 °C betragen und der Unterschied zwischen Vor- und Rücklauftemperatur möglichst gering sein. Dies bedingt grosszügig dimensionierte Heizkörper (Rippenrohre).

Etwa ein Drittel des Heizbedarfs fällt beim Aufheizen des Stalles vor jedem neuen Mastumtrieb an. Je stärker der Stall in der Reinigungsphase nach jedem Umtrieb auskühlt, desto mehr Energie muss aufgewendet werden, um die Stalltemperatur auf 33 °C zu erhöhen. Je kürzer die Zeitspanne zwischen den Mastumtrieben, desto weniger gespeicherte Wärme aus der Bauhülle fliesst ab.

Der vorhandene Stromspeicher (18.8 kWh) reicht aus, um den Strombedarf für Lüftung, Licht und Einrichtungen während 9 Stunden zu decken. Um den gesamten Strombedarf auch im Winter während der Nacht zu decken, ist eine Verdoppelung der Speicherkapazität erforderlich.

Es zeigt sich, dass Minergie-A/P bei jedem neuen Mastgeflügelstall grundsätzlich möglich ist. Die Technik ist ausgereift und die Betriebssicherheit hoch.

Die Mehrkosten für die bessere Wärmedämmung, die Wärmepumpe, den Wärme- und Stromspeicher sowie die PV-Anlage werden durch die tieferen Energiekosten kompensiert. Der Return on Investment bei den heutigen Anlagekosten und Energietarifen beträgt etwa 5.4%. Hierbei sind die besseren Tierleistungen und die geringeren Ammoniakemissionen dank niedriger relativen Feuchtigkeit und folglich ausgezeichneter Einstreu-Beschaffenheit nicht berücksichtigt.

Es ist anzunehmen, dass sich die notwendigen Investitionen durch Optimierung bei zukünftigen Minergie-Ställen noch senken lassen. Die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen hängt nicht zuletzt von der zukünftigen Preisentwicklung der fossilen Energieträger und der Steigerung der Tierleistungen dank einem besseren Stallklima ab.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Eine weitere Senkung des gesamten Energiebedarfs ist theoretisch möglich. Welche Massnahmen sinnvoll sind, wird von ihrem Grenzertrag bestimmt. Eine noch bessere Wärmedämmung bewirkt im Verhältnis zu den Mehrkosten nur geringe Energieeinsparungen. Am erfolgversprechendsten ist zweifelsohne eine Erhöhung der Wärmerückgewinnung. Dies bedingt eine grössere Wärmetauschfläche, was beim bestehenden System durch eine Verlängerung des Rohrbündels möglich ist. Wie gross die tatsächliche Energieeinsparung ist, kann wegen der zunehmenden Staubablagerung nur bedingt durch Modellrechnungen vorausgesagt werden. Wegen des grösseren Luftwiderstands, ist mit einem höheren Energiebedarf für die Lüftung zu rechnen. Bei den Lüftern und Beleuchtung, die schon jetzt einen sehr hohen Wirkungsgrad aufweisen, sind kaum weitere Energieeinsparungen zu erwarten.

Am wirtschaftlichsten sind betriebliche Massnahmen. Sie bedingen keine zusätzlichen Investitionen. Mittels einer guten Organisation kann die Zeitspanne zwischen den Mastumtrieben auf ein Minimum begrenzt werden. Die Auskühlung des Stalls verringert und es muss folglich weniger Energie für die Aufheizung des Stalls vor dem nächsten Mastumtrieb aufgewendet werden. Die Luftmixer könnten während der zweiten Masthälfte ausgeschaltet werden, ohne dass die Wärmeverteilung im Stall beeinträchtigt wird. Eine Verknüpfung der Wärmespeichertemperatur mit dem Heizbedarf im Stall führt zu einer höheren Autarkie am Anfang der Mast und geringeren Stillstandverlusten in der zweiten Masthälfte, wenn der Heizbedarf gering ist.

Die Erkenntnisse dieses Pilot-Projektes werden in die Planung von neuen Geflügelmastställen einfließen. Durch weitere Optimierung lässt sich die Autarkie noch steigern und die Wirtschaftlichkeit der Investitionen verbessern.

Neben Neubauten ist das Energiesparpotenzial bei bestehenden Mastgeflügelställen sehr gross. Welche der im Pilot-Projekt untersuchten Massnahmen bei diesen Ställen wirtschaftlich implementiert werden können, werden weitere Versuche zeigen müssen.



7 Kommunikation

Das Projekt wurde einer breiteren Öffentlichkeit bekannt gemacht durch Organisation eines Tages der offenen Tür am 23. & 24.8.2020.

Im Nachgang erschienen Fachartikel im Schweizer Bauer, der Bauernzeitung und in der Schweizerischen Geflügelzeitung.

Es ist angedacht die Resultate in obgenannten Medien lesergerecht aufzubereiten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] C.I.G.R., 1984. First Report of working group on Climatization of Animal Houses. Scottish Farm Buildings Investigation Unit, GB-Aberdeen. 72 p.
- [2] C.I.G.R., 1992. Second Report of working group on Climatization of Animal Houses. Faculty of Agricultural Sciences, State University of Ghent, B-Gent. 147 p.
- [3] C.I.G.R., 1994. Third Report of working group on Climatization of Animal Houses. F. Rennes. 116 p.
- [4] C.I.G.R., 2002. Fourth Report of working group on Climatization of Animal Houses. Pedersen S., Sällvik K. 45 p.
- [5] SIA-Norm 380/1: 2016. Heizwärmebedarf
- [6] Van Caenegem L., Wechsler B., 2000. Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe Nr. 51, Agroscope Reckenholz-Tänikon.
- [7] Van Caenegem L., Jöhl G., Sax M., Soltermann A., 2010. Energiebedarf bei Heizung und Lüftung mehr als halbieren. ART-Bericht 735.
- [8] Van Caenegem L., 2013. Prüfbericht Wärmerückgewinnung in Pouletmastställen. Hoher Wirkungsgrad, Halbierung der Heizkosten und besseres Stallklima. Interner Bericht.



9 Anhang

Autarkie und Nutzungsgrad des Wärmespeichers

- Wassertemperatur T_s (°C)
- Stalltemperatur T_i (°C)
- Mittlere Wassertemperatur in den Rippenrohren T_r (°C)
- Vorlauftemperatur T_{vor} (°C) $\approx$ Speichertemperatur T_s (°C)
- Rücklauftemperatur $T_{rück}$ (°C)
- Spezifische Wärmekapazität des Wärmespeichers H_s (kWh/K)
- Gesamtlänge der Rippenrohre L (m)
- Durchflussmenge in den Rippenrohren m (L/h)
- Zeitdauer t (h)
- Heizleistung P (kW)

Wärmeabgabe (dQ) der Rippenrohre in der Zeitspanne dt :

$$dQ = P * dt = 1.16 * m * (T_{vor} - T_{rück}) * dt = C * L * (T_r - T_i)^{1.3189} * dt \quad (I)$$

$$T_r = 0.5 * (T_{vor} + T_{rück})$$

$$T_{vor} - T_{rück} = \frac{1000 * P}{1.16 * m}$$

Für Reventa-Rippenrohre gilt: $C = 2.512 * 10^{-3}$

Minimal erforderliche Wassertemperatur (°C) im Wasserbehälter (T_{smin}) für eine erforderliche Leistung (P_{eff}) bei Stalltemperatur T_i :

$$T_{smin} = \frac{500 * P_{eff}}{(1.16 * m)} + T_i + \left(\frac{P_{eff}}{C * L}\right)^{1/1.3189} \quad (II)$$

Autarkie (t in Stunden) oder Zeitdauer während welcher die erforderliche Heizleistung (P_{eff}) durch die im Behälter gespeicherte Wärme erbracht werden kann:

$$t = (T_{s(t=0)} - T_{smin}) * \frac{H_s}{P_{eff}} \quad (III)$$

$T_{s(t=0)}$ = Wassertemperatur im Speicher am Anfang (°C)

$$\eta = \frac{T_{s(t=0)} - T_{smin}}{T_{s(t=0)} - T_i} * 100$$

η : Nutzungsgrad des Wärmespeichers (%)



Stallgrundriss mit Position der Temperatur-, relative Feuchtigkeit- und CO₂-Fühler.

