



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30.12.2021

BTSpplus Geflügelstall

Geflügelstall 3.0 – höheres Tierwohl, weniger Emissionen, vollständig energieneutral



Quelle: © Bell Schweiz AG 2020



Datum: 30.12.2021

Ort: Zell

Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Amt für Umweltkoordination und Energie des Kantons Bern (AUE)
Reiterstrasse 11, CH-3011 Bern
energie.foerderung@bve.be.ch

Subventionsempfänger/innen:

Bell Schweiz AG
Zelgmatte 1, CH-6144 Zell LU
www.bellfoodgroup.com

Autor/in:

Stefan Werren, Bell Schweiz AG, stefan.werren@bellfoodgroup.com
Maik Albert, DM Energieberatung AG, maik.albert@dmeag.ch

BFE-Projektbegleitung:

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

BFE-Vertragsnummer: SI/501808-01

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



Zusammenfassung

In modernen Pouletställen wachsen die Hühner während rund 35-tägigen Umtrieben auf ihr Schlachtgewicht heran. Dabei werden die Ställe auf anfänglich 34°C geheizt und die Temperatur bis Ende des Produktionszyklus schrittweise auf 22°C abgesenkt, zur Abfuhr von Feuchtigkeit und CO₂ müssen die Ställe zudem aktiv belüftet werden. Der entsprechend grosse Heizwärmebedarf wird heute meist durch sogenannte Gaskanonen mit Propangas als Brennstoff abgedeckt.

Im Rahmen des Demonstrationsprojektes wurde erstmals das neuartige Stallkonzept «BTSplus» umgesetzt, mit dem Ziel, einen CO₂-freien und energieneutralen Geflügelstall zu realisieren und gleichzeitig das Tierwohl zu verbessern.

Zur Reduktion des Heizwärmebedarfes und in Hinblick auf künftige Anforderungen zur Reduktion von Ammoniak-Emissionen wurde der Stall mit einem Luftwäscher zur Rückgewinnung von Abwärme aus der Abluft realisiert. Mit der Abwärme wird die Zuluft zu zwei Wintergärten vorgewärmt, von wo die Luft anschliessend in den Stall gelangt. Zusammen mit einer verbesserten Wärmedämmung wurde der Heizwärmebedarf dadurch im Vergleich zu konventionellen Ställen um 48% reduziert.

Dank der Vorwärmung der Aussenluft können die Auslauflappen in die Wintergärten ab dem 22. Tag durchgehend geöffnet bleiben, womit die Tiere während 43% statt rund 9% der Zeit Auslauf an die frische Luft hatten. Zudem kann in der zweiten Hälfte des Umtriebs jeweils stärker gelüftet werden, wodurch im Stall eine deutlich tiefere Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration erzielt wird. Dass die Qualität der Einstreu besser war, spiegelt sich auch in der sehr geringen Zahl der Fussballenveränderungen wider.

Der verbleibende Heizwärmebedarf wird durch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe abgedeckt, welche die vollflächige Bodenheizung und an den Wänden installierte Spiralrohrheizungen speist. Mit einer PV-Anlage (57 kWp) wird die benötigte elektrische Energie für die Wärmepumpe, die Lüftung, die Wärmerückgewinnung und die Stalleinrichtungen erzeugt. Da der Verbrauch für die Wärmepumpe und den Wäscher höher ausgefallen ist als erwartet und der Ertrag der PV-Anlage unter den Erwartungen lag, wurde im ausgewerteten Zeitraum effektiv 57% des Verbrauches abgedeckt. Beim Wäscher und dem Klima-Management sind noch Optimierungen möglich, um den Verbrauch weiter zu senken.

Durch das Projekt konnte nicht nur die Funktionalität eines neuen Konzeptes aufgezeigt, sondern auch wichtige Konzept- und Auslegungsgrundlagen für die nächste Generation von energieneutralen Geflügelställen gewonnen werden. Zwei weitere Projekte für multiplizierbare Stallkonzepte sind bereits geplant.



Résumé

Dans les poulaillers modernes, les poulets grandissent jusqu'à leur poids d'abattage pendant des rotations d'environ 35 jours. Les poulaillers sont alors chauffés à une température initiale de 34°C, puis la température est progressivement abaissée à 22°C jusqu'à la fin du cycle de production. Pour évacuer l'humidité et le CO₂, les poulaillers doivent en outre être activement ventilés. Aujourd'hui, les besoins en chauffage importants sont généralement couverts par des "canons à gaz" utilisant le gaz propane comme combustible.

Dans le cadre du projet de démonstration, le nouveau concept de poulailler "SSTplus" a été mis en œuvre pour la première fois. Son objectif étant de réaliser un poulailler neutre en énergie et exempt de CO₂, ainsi que d'améliorer le bien-être des animaux. Pour réduire les besoins en chauffage et en vue des futures exigences de réduction des émissions d'ammoniac, le poulailler a été réalisé avec un laveur d'air pour récupérer la chaleur perdue de l'air évacué. La chaleur récupérée permet de préchauffer l'air entrant dans deux jardins d'hiver, d'où l'air est ensuite transmis au poulailler. En combinaison avec une meilleure isolation thermique, les besoins en chauffage ont ainsi été réduits de 48% par rapport aux bâtiments d'élevage conventionnels.

Grâce au préchauffage de l'air extérieur, les trappes de sortie vers les jardins d'hiver peuvent rester ouvertes en permanence à partir du 22ème jour, ce qui permet aux animaux de sortir à l'air libre pendant 43% du temps au lieu d'environ 9%. De plus, il est possible de ventiler plus fort dans la deuxième partie de la rotation, ce qui permet de réduire nettement l'humidité de l'air et la concentration de CO₂ dans le poulailler. Le fait que la qualité de la litière était meilleure se reflète également dans le très faible nombre des lésions des coussinets plantaires.

Les besoins restants en chauffage sont couverts par une pompe à chaleur air/eau qui alimente le chauffage au sol sur toute la surface et des radiateurs à tubes en spirale installés le long des murs. Une installation photovoltaïque (57 kWp) permet de produire l'énergie électrique nécessaire à la pompe à chaleur, à la ventilation, à la récupération de chaleur et aux équipements du bâtiment d'élevage. Comme la consommation de la pompe à chaleur et du laveur d'air a été plus élevée que prévu et que le rendement de l'installation PV a été inférieur aux attentes, 57% de la consommation a été effectivement couverte pendant la période évaluée. Il est encore possible d'optimiser le laveur et la gestion du climat afin de réduire encore la consommation.

Le projet a non seulement permis de démontrer la fonctionnalité d'un nouveau concept, mais aussi d'obtenir des bases de conception et de dimensionnement importantes pour la prochaine génération de poulaillers neutres en énergie. Deux autres projets de concepts de poulaillers multipliables sont déjà prévus.



Summary

In modern broiler houses, the chickens grow to their final weight over a period of around 35 days. During this period, the houses are heated to an initial temperature of 34°C which is then gradually reduced to 22°C by the end of the production cycle. The houses must also be actively ventilated to remove moisture and CO₂. The correspondingly large heating requirement is today mostly covered by so-called gas cannons using propane gas as fuel.

Within the scope of the demonstration project, the novel house concept "BTSplus" was implemented for the first time, with the aim of realizing a CO₂-free and energy-neutral poultry house and at the same time improving animal well-being.

To reduce the heating demand and in consideration of future requirements to reduce ammonia emissions, the stable was implemented with an air scrubber to recover waste heat from the exhaust air. The recovered heat is used to preheat the supply air to two winter gardens, from where the air then enters the stable. Together with improved thermal insulation, this has reduced heating demand by 48% compared to conventional broiler houses.

Thanks to the preheating of the outside air, the exit flaps into the winter gardens can remain open continuously from the 22nd day, which means that the animals had access to fresh air for 43% of the time instead of around 9%. In addition, ventilation can be increased in the second half of the cycle, which results in a significantly lower humidity and CO₂ concentration in the stable. The fact that the quality of the litter was better is also reflected in the very low number of footpad lesions.

The remaining heating demand is covered by an air-to-water heat pump, which feeds the full floor heating system and spiral pipe heaters installed on the walls. A PV system (57 kWp) generates the electrical energy required for the heat pump, ventilation, heat recovery and barn equipment. Since the consumption for the heat pump and the scrubber turned out to be higher than expected and the yield of the PV system was below expectations, 57% of the consumption was effectively covered in the evaluated period. Optimizations are still possible in the scrubber and climate management to further reduce consumption.

The project not only demonstrated the functionality of a new concept, but also provided important concept and design fundamentals for the next generation of energy-neutral poultry houses. Two further projects for multipliable barn concepts are already planned.



Take-home messages

- Die Realisierung CO₂-freier und energieneutraler Geflügelställe ist technisch machbar, die Umsetzung ist bei den aktuellen Energiepreisen nur mit einer gleichzeitigen finanziellen Förderung wirtschaftlich.
- Die Nutzung eines Wäschers zur Rückgewinnung von Abwärme aus der Abluft ist praktikabel und ermöglichte eine Einsparung von 48% des Heizwärmebedarfes. Dieses System birgt grosses Synergiepotenzial in Zusammenhang mit der Reduktion der Ammoniakemissionen.
- Durch die Vorwärmung der Zuluft zu den Wintergärten können diese erheblich länger zur Verfügung gestellt werden und werden durch die Tiere rege genutzt. Damit sinkt auch die Belegungsdichte von 13 auf 11 Tiere pro Quadratmeter, was ebenfalls positiv zum Tierwohl beiträgt.
- Durch das Projekt wurden wichtige Auslegungsgrundlagen für die nächste Generation von Geflügelställen geschaffen und Ansätze für die weitere Reduktion des Energieverbrauches und die Optimierung des Klimamanagements abgeleitet.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2 Motivation des Projektes	10
1.3 Projektziele	11
2 Anlagebeschrieb.....	12
2.1 Stallkonzept	12
2.2 Die einzelnen Phasen eines Produktionszyklus	13
2.2.1 Vorheizphase.....	13
2.2.2 Heizphase.....	13
2.2.3 Entfeuchtungsphase.....	14
2.2.4 Kühlung durch Lüftung	14
2.2.5 Aktive Kühlung.....	14
2.3 Gebäudehülle inkl. Wintergarten	14
2.3.1 Konstruktiver Aufbau	14
2.3.2 Vorgaben Minergie-A (Minergie-Pilot)	15
2.3.3 Wärmeverluste über die Gebäudehülle	15
2.3.4 Luftdichtheit	16
2.4 Lüftungsleistung	16
2.5 Wärmerückgewinnung	17
2.5.1 Anforderungen an die Wärmerückgewinnung	17
2.5.2 Wahl des WRG-System / Geprüfte Alternativen	17
2.5.3 Beurteilung des WRG-Systems durch externen Fachexperten	19
2.5.4 Auslegung der WRG.....	20
2.6 Heizung über Wärmepumpe (WP)	21
2.7 Stromproduktion	22
2.8 Energieflussdiagramm	22
3 Vorgehen und Methode.....	23
3.1 Vorgehen	23
3.2 Messkonzept.....	23
4 Ergebnisse und Diskussion	25



4.1	Betrachtungszeitraum Auswertungen	25
4.2	Elektrischer Energieverbrauch	25
4.2.1	Aufteilung Energieverbrauch	25
4.2.2	Ertrag/Eigenverbrauch PV-Anlage	27
4.3	Lüftung	29
4.3.1	Aufteilung Luftmengen	29
4.3.2	Energieverbrauch Ventilatoren	30
4.3.3	CO ₂ -Konzentration und Luftfeuchtigkeit im Stall	32
4.4	Aufteilung Wärmeverluste / Einfluss Wärmedämmung	35
4.5	Wärmerückgewinnung	37
4.5.1	Vorkonditionierung Aussenluft im Wintergarten	37
4.5.2	Wärmedeckung WRG	37
4.5.3	Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung	38
4.5.4	Betriebsverhalten des Wäschers als Wärmetauscher	39
4.6	Wärmepumpe	41
4.6.1	Leistungszahl (COP)	41
4.6.2	Aufteilung Wärmebedarf Aufheizbetrieb	42
4.7	Bewertung Energieverbrauch	43
4.7.1	Vergleich Bell-Benchmark	43
4.7.2	Vergleich Anforderungen Minergie-A	46
4.7.3	Vergleich Projekt Hellsau (2019)	47
4.8	Tierwohl	49
4.9	Wirtschaftlichkeit	51
5	Schlussfolgerung und Fazit	54
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	55
7	Kommunikation	55



Abkürzungsverzeichnis

ABL	Abluft
AUL	Aussenluft
BTS	Besonders tierfreundliche Stallhaltung
FOL	Fortluft
GK	Gaskanone
kg _{LG}	Kilogramm Lebendgewicht
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
S/W-WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
WiGa	Wintergarten
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
ZUL	Zuluft



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die bisher bei der Bell Schweiz realisierten Pouletställe erfüllen sowohl die Anforderungen an die Wärmedämmung (Tabelle 1) als auch die Anforderungen an die Lüftung und Heizung von beheizten Geflügelställen gemäss dem gültigen Energiegesetz (EnFK, 2018). Bis anhin haben sich Wärmerückgewinnungsanlagen und der Einsatz von nicht fossilen Energieträger aus betrieblichen und finanziellen Gründen nicht bewährt. Energiepolitisch werden die heute gültigen Anforderungen als nicht ausreichend eingestuft. Dabei stehen die CO₂-Emissionen verursacht durch den Einsatz fossiler Energieträger im Fokus.

Bauteil	U-Wert [W/(m ² K)]
Dach	0.24
Aussenwand	0.30
Fenster	1.60 (Glas 1.2 W/(m ² K))
Auslaufklappen zu Wintergarten	1.50
Türen	2.00
Tore (Türen > 6.0 m ²)	2.00
Innenwände gegen unbeheizte Räume	0.30
Boden gegen Erdreich <i>mit</i> Fussbodenheizung	0.28 (Sockeldämmung erforderlich)

Tabelle 1: Anforderungen an die Bauteile gemäss dem gültigen Energiegesetz.

Die Bell Schweiz AG will mit diesem Projekt die energieschonende Umsetzung der tierfreundlichen Stallhaltung für die Pouletproduktion herleiten. Die Themenfelder (a) Energieeffizienz und (b) Ressourceneffizienz werden aktiv bearbeitet, innovative Lösungen zur Verbesserung der beiden Themenfelder aufgezeigt, sowie zugleich das Tierwohl erhöht.

1.2 Motivation des Projektes

Mit dem Konzept BTSplus will Bell die bewährte Schweizer BTS-Haltung weiterentwickeln und einen Beitrag für eine energieeffizientere, CO₂-neutrale Geflügelproduktion in der Schweiz leisten.

Der BTSplus-Geflügelstall passt perfekt in die Nachhaltigkeitsstrategie der Bell Schweiz. Bell will die Lebensmittelproduktion möglichst nachhaltig gestalten und die vorgelagerten Bereiche der Tierproduktion mit einbeziehen. Die Geflügelproduktion eignet sich hierzu hervorragend, weil Bell da einen integrierten Ansatz verfolgt und unter anderem mit standardisierten Stallbaukonzepten arbeitet. Diese entwickelt Bell mit den Landwirten kontinuierlich weiter.



1.3 Projektziele

Die jährlichen CO₂-Emissionen von 33 Tonnen sollen vollständig vermieden werden.

Der elektrische Strom, welcher der Stall verbraucht, wird durch die Photovoltaik-Anlage produziert.

Mit der Abwärme sollen die beiden Wintergärten auf >10°C aufgeheizt werden, damit diese den Tieren ab der dritten Alterswoche während 24h am Tag zur Verfügung stehen.

Der Geflügelstall soll nach Minergie-A zertifiziert werden.

2 Anlagebescrieb

2.1 Stallkonzept

Der Stall ist in einen aktiv beheizbaren Innenstall und zwei beidseitig vorgelagerte Wintergräten aufgeteilt. Über zwei stirnseitig angeordnete Wärmetauscher wird die frische Aussenluft mit Abwärme aus der Abluft vorgewärmt und in die Wintergärten eingeblasen. Von den Wintergärten gelangt die vorgewärmte Aussenluft anschliessend über in der Wand eingebaute Luftventile in den Innenstall.

Zwei ebenfalls stirnseitig angeordnete Ventilatoren fördern die Stallabluft über einen Luftwäscher und erzeugen dabei einen Unterdruck im Innenstall, welcher für die Nachströmung der Luft vom Wintergarten sorgt. Im Wäscher gibt die Abluft Wärme an das Waschwasser ab, welche über einen Wasserkreislauf zu den Zuluftwärmetauschern der beiden Wintergärten transportiert wird. Zusätzlich verfügt der Stall über 11 Dachventilatoren, welche im Sommer mit sehr grossen Luftraten ein Überhitzen des Stalles verhindern.

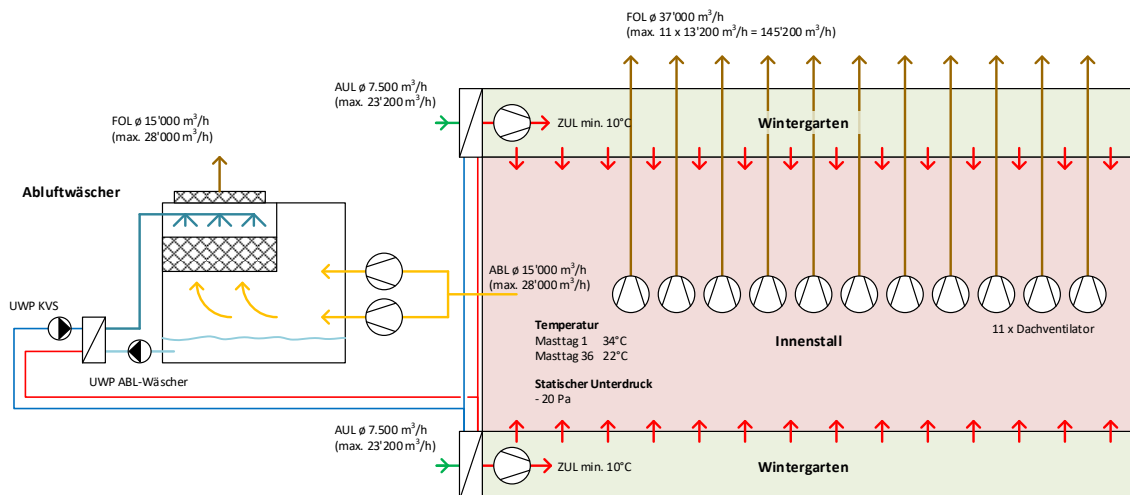


Abbildung 1: Schematische Darstellung Lüftungssystem

Wird im Innenstall die gewünschte Temperatur trotz Vorwärmung der Aussenluft nicht erreicht, kann dieser Bereich über längsseitig angeordnete Spiralrohrheizungen und eine vollflächige Bodenheizung zusätzlich geheizt werden.

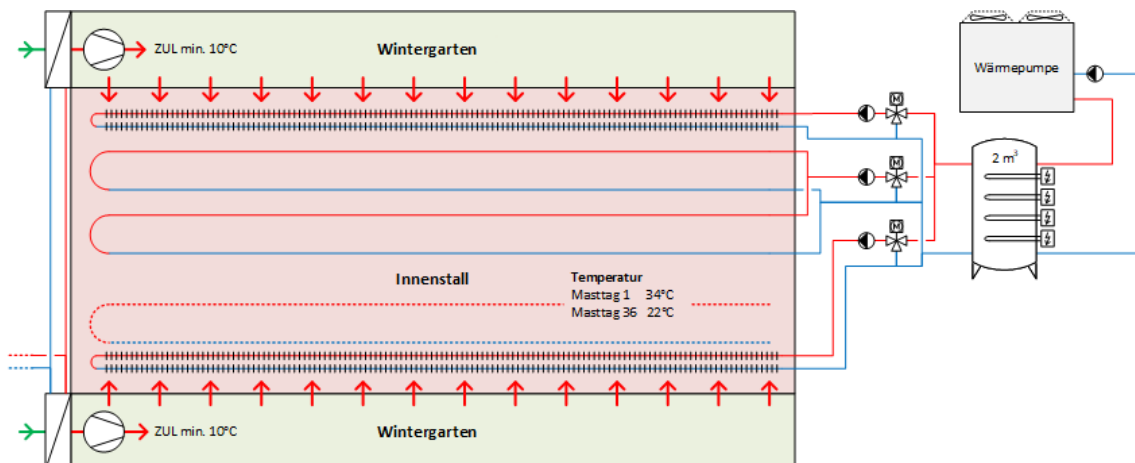


Abbildung 2: Schematische Darstellung Heizsystem



2.2 Die einzelnen Phasen eines Produktionszyklus

Die Klimaführung in Pouletställen ist primär durch die Anforderungen der Tiere an Temperatur und Luftqualität vorgegeben. Während eines 35-tägigen Zyklus nimmt das Körpergewicht der Hühner von anfänglich 40 g auf über 2'000 g zu. Entsprechend ändern sich Temperaturanforderungen und der Lüftungsbedarf kontinuierlich.

Nebst Temperatur und Luftqualität hat auch die Qualität der Einstreu einen wesentlichen Einfluss auf das Wohlbefinden der Tiere und damit auf das Produktionsergebnis. Feuchte Einstreu kann zu Läsionen und Drucknekrosen an Füßen, Sprunggelenken oder Brust führen. Bei der Klimaführung im Stall ist deshalb auch darauf zu achten, dass die Einstreu während dem gesamten Produktionszyklus trocken bleibt. Die wichtigste Stellgrösse ist hier die relative Luftfeuchtigkeit im Stall.

Die Bell Schweiz AG stellt den Geflügelproduzenten eine Empfehlung für den zeitlichen Verlauf von Temperatur und Feuchte gemäss Abbildung 3 zur Verfügung. Die CO₂-Konzentration wird auf einen Maximalwert von 3'000 ppm geregelt, welcher aber nur bei Heizsystemen mit Direktfeuerung im Stall relevant wird. Andernfalls bestimmen Feuchtigkeit und Temperatur den Lüftungsbedarf.

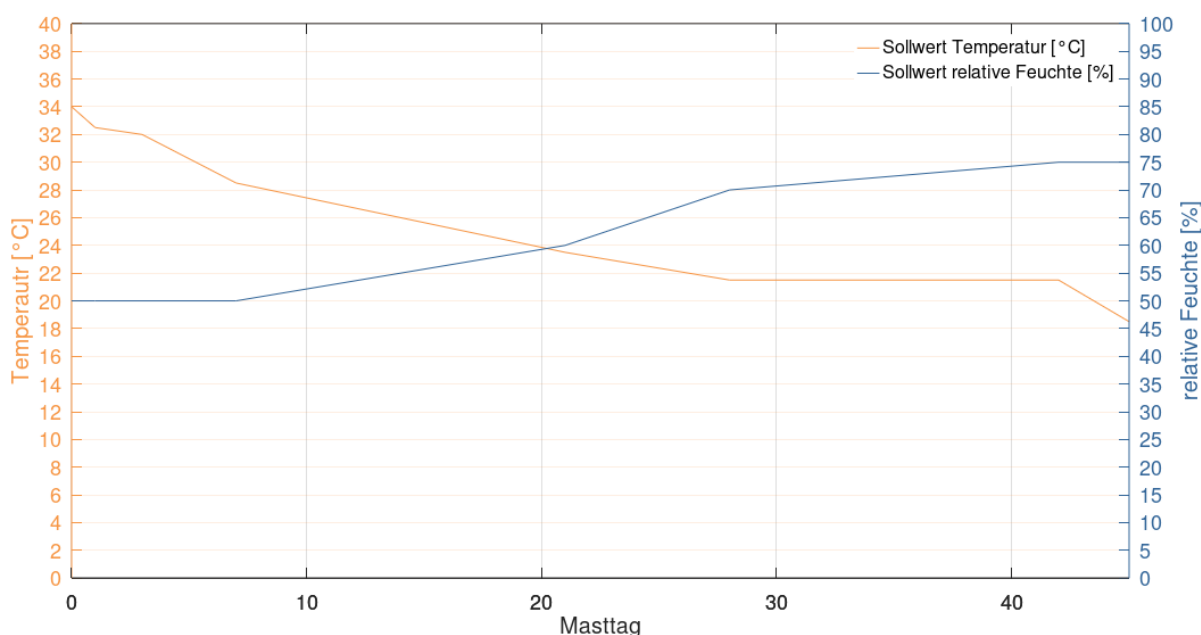


Abbildung 3: Richtwerte für den Verlauf von Temperatur- und Feuchte im Pouletstall

2.2.1 Vorheizphase

Um die Bildung von Kondensat an kalten Oberflächen, speziell am Boden, zu verhindern, wird der Stall rund drei Tage vor der Einstallung vorgeheizt. Es wird darauf geachtet, dass der Boden vor dem Einstreuen eine Temperatur von mindestens 25°C erreicht. Spätestens 24h vor Ankunft der Küken muss eine Lufttemperatur von 32...34°C erreicht sein.

2.2.2 Heizphase

Bis zum 7. Lebenstag liegt die Stalltemperatur bei mehr als 30°C, welche nahezu das ganze Jahr hindurch deutlich über der Umgebungstemperatur liegt. Durch die Gebäudehülle und den stetig zunehmenden Luftwechsel entstehen Wärmeverluste, welche durch die Körperwärme der noch kleinen Küken nicht kompensiert werden können. Um die Stalltemperatur auf dem gewünschten Niveau zu halten, muss aktiv geheizt werden.



2.2.3 Entfeuchtungsphase

Mit zunehmendem Gewicht der Tiere fällt im Stall immer mehr Wasserdampf an, einerseits aus der Atmung der Tiere selbst und andererseits durch Verdunstung aus ihrem Kot. Um die gewünschte Luftfeuchtigkeit einzuhalten, muss folglich immer stärker gelüftet werden. In konventionellen Ställen reicht die Körperwärme der Tiere ab einer Aussentemperatur von 10°C aus, um die Wärmeverluste auszugleichen. Bei tieferen Temperaturen muss weiterhin aktiv geheizt werden

In dieser Phase entsteht der überwiegende Anteil der Wärmeverluste durch die Lüftung. Durch eine ausreichend dimensionierte Wärmerückgewinnung kann die aktive Heizung vollständig substituiert werden.

2.2.4 Kühlung durch Lüftung

In der Endphase des Umtriebs wird die Stalltemperatur auf 22...23°C abgesenkt. Die Tiere geben zu diesem Zeitpunkt so viel Wärme ab, dass der Stall durch verstärktes Lüften gekühlt werden muss.

Der maximale Volumenstrom der Abluftventilatoren wird so ausgelegt, dass die Stalltemperatur durch sehr starkes Lüften auch an heißen Tagen auf maximal 2 Kelvin über der Aussentemperatur begrenzt werden kann.

2.2.5 Aktive Kühlung

Um einen zu starken Anstieg der Stalltemperatur an Hitzetagen zu vermeiden, verfügen einige Ställe über adiabate Kühlsysteme. Dabei wird Wasser unter hohem Druck in die Zuluft zerstäubt. Während die kleinen Wassertropfen verdunsten, entziehen sie der umgebenden Luft Wärmeenergie und kühlen diese dadurch um bis zu 8 Kelvin ab.

2.3 Gebäudehülle inkl. Wintergarten

2.3.1 Konstruktiver Aufbau

Die tragende Struktur des Geflügelstalles ist mit Trägern aus Brettschichtholz und Stützen aus Stahl realisiert. Für das Dach und die Wände des Innenstalles werden Sandwichelemente aus PIR-Hartschaum mit einer Deckschicht aus **Stahl** eingesetzt.



Abbildung 4: Foto Innenstall



Die Aussenwände der Wintergärten bestehen aus einer Holzkonstruktion mit 2-fach verglasten Fenstern und Schiebern aus Polycarbonat-Stegplatten.



Abbildung 5: Foto Wintergarten Südseite mit Aussenwand (linkes Bild) und Wand zum Innenstall (rechtes Bild)

2.3.2 Vorgaben Minergie-A (Minergie-Pilot)

Für das Demonstrationsprojekt wurde eine Zertifizierung nach Minergie-A angestrebt. Die entsprechenden Anforderungen wurden durch die Minergie Zertifizierungsstelle definiert und umfassen unter anderem eine positive Jahresenergiebilanz und die Einhaltung des Grenzwertes für den Heizwärmebedarf gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN).

Die Qualität der Gebäudehülle ist vor allem bezüglich des Heizwärmebedarfes relevant. Im Rahmen der Pilot-Zertifizierung wurde durch die Zertifizierungsstelle die SIA-Gebäudekategorie «Industrie» als Referenz definiert. Der Nachweis hat mit einem Systemnachweis nach SIA380/1:2016 bei Standard-Luftwechsel entsprechend der Gebäudekategorie zu erfolgen.

	Einheit	Anforderung	Projektwert
Heizwärmebedarf	kWh/m ²	49.0	46.0

Tabelle 2: Anforderung Heizwärmebedarf Minergie-A

2.3.3 Wärmeverluste über die Gebäudehülle

Die Wärmeverluste über die Gebäudehülle sind vor allem während der Aufheizphase und der ersten Hälfte des Produktionszyklus relevant. In der zweiten Hälfte des Produktionszyklus besteht hingegen meist ein Wärmeüberschuss, wodurch eine starke Wärmedämmung dort keine weitere Energieeinsparung bewirkt. Da bei konventionellen Ställen 60...70% des Heizwärmebedarfes durch die Lüftung verursacht werden, hatte die Verbesserung der Wärmedämmung bei der energetischen Optimierung bisher keine hohe Priorität.



Weil die Minergie-Anforderungen ambitionierter sind als die aktuellen kantonalen Vorschriften für Geflügelställe, wurde der Grenzwert beim ersten Systemnachweis für die Standard-Konstruktion nicht erreicht. Basierend auf den Berechnungsergebnissen wurde entschieden, für die Dachkonstruktion Sandwichelemente mit einer Stärke von 185 mm statt den üblichen 140 mm zu verwenden. Mit neu $0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegt der U-Wert des Daches damit 33% unter der kantonalen Vorgabe von $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Zusätzlich wurde der Übergang vom Dach zur Wand konstruktiv angepasst, um Wärmebrücken zu vermeiden.

2.3.4 Luftdichtheit

Bezüglich der Luftdichtheit wurde durch die Minergie-Zertifizierungsstelle ein Grenzwert von $q_{E50} \leq 1.0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ definiert. Zur Überprüfung der Luftdichtheit ist ein Messkonzept zu erstellen und die Einhaltung des Grenzwertes anhand einer Messung nachzuweisen.

Die Dichtheit der Gebäudehülle hängt in hohem Masse von der Genauigkeit bei der Montage ab. So mussten beispielsweise alle Fugen zwischen den einzelnen Sandwichelementen minutiös mit einem Dichtungsband verschlossen werden. Dies ist beim Bau von Ställen eher unüblich, weshalb die Monteure nochmals speziell darauf sensibilisiert wurden. Zusätzlich haben die Bauherren die Ausführung regelmässig persönlich überprüft.

Zitat Samuel Guggisberg: «Gut gemeint ist nicht gut gemacht!»

Eine besondere Herausforderung stellen die Aussenschieber im Wintergarten dar (vgl. Abbildung 5, links). Aufgrund ihrer Anordnung werden diese bei Unterdruck von ihrem Rahmen abgehoben, wodurch sich die Wirkung der Dichtung vermindert. Umgekehrt verbessert sich die Dichtwirkung bei Überdruck.

Wie die Messergebnisse in Tabelle 3 zeigen, wurde der Grenzwert von $1.0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ folglich bei Unterdruck nicht erreicht, bei Überdruck wurde er hingegen unterschritten. Da während dem Betrieb der Wärmerückgewinnung im Wintergarten immer ein leichter Überdruck herrscht, wurde bei der Beurteilung die Messung bei Überdruck stärker gewichtet.

Messergebnisse bei 50 Pa	Einheit	Zielwert	Unterdruck	Überdruck
Leckagestrom q_{50}	m^3/h	3'375	4'344	3'207
Luftwechselrate n_{50}	1/h	0.52	0.67	0.50
Luftdurchlässigkeit q_{E50}	$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$	1.00	1.29	0.95

Tabelle 3: Messergebnisse Luftdichtheitsmessung (Blower-Door-Test)

2.4 Lüftungsleistung

Der Volumenstrom der Abluft (ABL) ist die wichtigste Stellgrösse zur Regelung des Stallklimas.

Abhängig vom aktuellen Wärmebedarf wird die Abluft primär über den Abluftwäscher geführt, wo Abwärme zur Vorwärmung der Aussenluft (AUL) zurückgewonnen wird. Sekundär wird bei Wärmeüberschuss die Wärme direkt über die Dachventilatoren an die Umgebung abgeführt.

Der Volumenstrom des Abluftwäschers ist auf $28'000 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt. Dieser Wert ist zur Abfuhr von Feuchtigkeit und CO_2 immer ausreichend und wird nur überschritten, wenn der Stall bei Wärmeüberschuss gekühlt werden muss. Bei aktiver Wärmerückgewinnung kann somit immer 100% der Abluft genutzt werden. Die 11 Dachventilatoren liefern gemeinsam einen maximalen Volumenstrom von



145'200 m³/h. Dieser maximale Volumenstrom ist ausschliesslich zur Kühlung bei hohen Aussentemperaturen erforderlich.

Zu Beginn des Produktionszyklus wird die gesamte Abluft über den Abluftwäscher geführt. Im Laufe des Produktionszyklus nimmt die Wärmeabgabe der Tiere stetig zu und es wird immer weniger Wärme zur Vorwärmung der Aussenluft benötigt. Der Abluftvolumenstrom wird entsprechend sukzessive vom Abluftwäscher auf die Dachventilatoren verlagert.

Die Zuluft (ZUL) zum Innenstall verfügt über keine Ventilatoren, sondern strömt aufgrund des durch die Abluftventilatoren erzeugten Unterdruckes über Luftventile vom Wintergarten nach. Die Stellung der variablen Ventile ist so auf die Abluftventilatoren abgestimmt, dass im Innenstall immer ein Unterdruck von rund 20 Pa entsteht. Durch diese Druckdifferenz wird die Luft in den Ventilen beschleunigt was für eine gute Durchmischung der Luft im Innenstall sorgt.

Bei Aussentemperaturen unter 10°C wird die Aussenluft (AUL) über zwei Lamellenrohrwärmetauscher vorgewärmt und in den Wintergarten geblasen. Die Ventilatoren dienen dazu, den Druckverlust des Wärmetauschers zu kompensieren und im Wintergarten einen leichten Überdruck zu erzeugen. Damit wird sichergestellt, dass keine kalte Aussenluft direkt in den Wintergarten strömt.

2.5 Wärmerückgewinnung

2.5.1 Anforderungen an die Wärmerückgewinnung

Die Bell Schweiz AG hat vor der Entwicklung des Projektes in Zimmerwald bereits mehrere WRG-Systeme evaluiert und teilweise bei eigenen Produzenten erprobt. Bisher konnte kein System die hygienischen Anforderungen erfüllen.

Für das Projekt Zimmerwald wurden folgende Anforderungen an die WRG abgeleitet:

- Material muss für Einsatz in korrosiver Umgebung geeignet sein (Ammoniak)
- Wärmetauscher muss einfach zu reinigen sein, um die strengen Hygienevorgaben zu erfüllen
- Wärmetauscher muss für Dauerbetrieb mit stark staubbelasteter Abluft geeignet sein
- Stabiler Betrieb ohne signifikanten Effizienzverlust bis zum Ende des Umtriebes
- Gleichmässige Verteilung der vorgewärmten Zuluft muss gewährleistet sein

2.5.2 Wahl des WRG-System / Geprüfte Alternativen

Bereits sehr früh wurde entschieden, dass die Wärmerückgewinnung als Kreislaufverbundsystem ausgeführt werden soll. Im Gegensatz zu Luft/Luft-Wärmetauscher hat dieses Konzept den grossen Vorteil, dass die Geometrien von Zu- und Abluftwärmetauscher weitgehend unabhängig festgelegt werden können. Zusätzlich können die Wärmetauscher örtlich getrennt installiert und durch die räumliche Trennung des Zu- und Abluftstromes die Lufthygiene stark verbessert werden.

An den Zuluftwärmetauscher werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Entsprechend fiel die Wahl rasch auf einen Lamellenrohrwärmetauscher mit Kupferrohren und Aluminiumlamellen, wie sie in der Lüftungstechnik üblich sind. Anspruchsvoller hat sich hingegen die gleichmässige Verteilung der Zuluft gestaltet. Luftkanäle sind bezüglich Hygiene kritisch oder müssen aufwändig gereinigt werden. Verschiedenste Varianten wurden diskutiert und schlussendlich die Idee entwickelt, die Luft über geschlossene Wintergärten zu verteilen. Diese Neuerung hat in Folge das gesamte Stallkonzept massgebend geprägt.



Abbildung 6: Foto Zuluftwärmetauscher Aussenansicht (links) / Innenansicht (rechts)

Die grösste Herausforderung stellte die Auswahl eines geeigneten Abluftwärmetauschers dar. Zu Beginn der Konzept-Phase lag der Fokus auf Glatrohrwärmetauschern mit quer angeströmten Kunststoffrohren. Diese Bauform hat den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades, besonders bei hohen Ablufttemperaturen am Anfang des Produktionszyklus. Ohne eine vorgängige Filterung der Stallabluft würde der Wärmetauscher allerdings rasch an Wirkungsgrad verlieren und im schlimmsten Fall verstopfen.

Zu diesem Zweck wurde ein neu für Geflügelställe entwickeltes Filtersystem mit Trockenfiltern und periodischer Druckluft-Abreinigung eines etablierten Herstellers evaluiert. Die Praxiserfahrungen bei den ersten Kunden haben allerdings gezeigt, dass die spezifizierten Volumenströme bei Verschmutzung nicht mehr eingehalten werden konnten und das System generell einen sehr hohen Druckverlust verursacht.

Erschwerend kommt hinzu, dass die WRG beim BTSplus-Stall noch länger in Betrieb sein muss als bei einem konventionellen Konzept und damit durch den Abluftwärmetauscher noch höhere Staubbelastungen toleriert werden müssen. Der längere Betrieb der WRG begründet sich dadurch, dass die Zuluft zu den Wintergärten immer auf mindestens 10°C vorgewärmt werden soll. Die maximale Leistung der WRG wird somit erst am 28. Lebenstag erreicht.

Die Toleranz gegenüber der hohen Staubbelastung gegen Ende des Umtriebes war somit das zentrale Kriterium für die Auswahl des Abluftwärmetauschers, welches durch einen Wäscher am besten erfüllt werden konnte. Zudem würden neue Ställe in naher Zukunft sowieso mit einem Wäscher ausgerüstet werden müssen um die Ammoniak-Emissionen zu reduzieren. Während Installation und Betrieb eines Ammoniakwäschers für die Produzenten nur einen Mehraufwand bedeuten, entsteht durch die gleichzeitige Nutzung als Wärmerückgewinnung ein wirtschaftlicher Nutzen.

Zusammengefasst weist ein Luftwäscher folgende Vorteile auf:

- die Abluft muss nicht gefiltert werden
- keine Abnahme des Wirkungsgrades aufgrund von Verschmutzung
- keine Gefahr von Vereisung
- mögliche Doppelnutzung zum Auswaschen von Ammoniak



Der grösste Nachteil des Wäscher ist, dass die Temperatur der zurückgewonnenen Wärme höchstens die Feuchtkugeltemperatur der Abluft erreichen kann. Mit dem vorgegebenen Stallklima liegt diese Temperatur anfäng 9 Kelvin und gegen Ende des Produktionszyklus noch 5 Kelvin unterhalb der eigentlichen Ablufttemperatur. Dieser Effekt konnte durch eine grosszügige Auslegung des Zuluftwärmetauschers teilweise kompensiert werden.

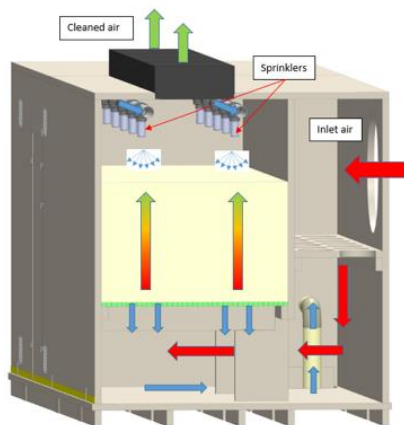


Abbildung 7: Schematische Darstellung (links) und Foto (rechts) des Abluftwäschers. (Quelle: inno-plussystem.com)

2.5.3 Beurteilung des WRG-Systems durch externen Fachexperten

Im Rahmen der Minergie-Zertifizierung wurde Prof. Dr. Rüdiger Külpmann von der Hochschule Luzern – Technik & Architektur durch die Zertifizierungsstelle mit der Prüfung des WRG-Konzepts beauftragt.

Plausibilitätsprüfung:

«Das Konzept, bestehend aus Abluft-Wäscher und Kreislaufverbund-System für die Zulufterwärmung wird als funktionstüchtig und mit Blick auf die hohen Luftbelastungen bei der Geflügelmast als innovativ angesehen.

Gründe sind, dass die ABL-Reinigung über eine lange Mastperiode mittels Luftwäscher gereinigt wird und die daraus gewonnene Abwärme mithilfe von Hochleistungs-Wärmetauschern der Zuluft zugeführt wird. Es minimieren sich dadurch im Vergleich zu einem konventionellen System mit Platten- oder Röhrenwärmetauschern die ABL-Reinigungs- und Einfrierschutzaufwendungen.»

Energetische Prüfung:

«Aus den gemachten Vergleichsrechnungen geht hervor, dass das KVS-Wäscher-System zwar einen geringeren Wärmerückgewinn und geringeren ETV-Wert hat als ein übliches Platten-WRG-System. Es muss aber vermutet werden, dass sich die Annahmen für das Platten-WRG-System durch die hohen Staubgehalte in der Abluft und die schnelle Vereisungsgefahr im Winter praktisch selten realisieren lassen. Das KVS-Wäscher-System wird hingegen gegen Verschmutzungen und Vereisungsgefahren Prinzip bedingt als betriebsstabiler angesehen.»

Empfehlung:

«Das System ist grundsätzlich zu befürworten und sollte als Minergie-Konzept anerkannt werden.»

«Für das System sollte ein umfangreiches Monitoring durchgeführt werden. Dabei sind die Verläufe der Rückwärmzahl und des ETV-Wertes zu ermitteln und über den Mastperioden von mindestens einem Jahr darzustellen mit der Absicht, das Langzeitverhalten des Systems feststellen zu können.»



2.5.4 Auslegung der WRG

Anhand einer Klimasimulation ermittelte die Firma SKOV die höchste Wärmeleistung der WRG für den 28. Lebenstag. Die Temperaturen und Volumenströme für diesen Tag, sowie die gem. Simulation ermittelte Wärmeleistung bilden die Grundlage für die Auslegung des Wäschers und der beiden Wärmetauscher zur Erwärmung der Zuluft. Die Wichtigsten Daten sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 ersichtlich.

Wäscher	Einheit	Luft	Wasser
Volumenstrom	m ³ /h	25'300	34
Eintritt	°C (% r.F.)	22.0 (70%)	7.2
Austritt	°C (% r.F.)	18.8 (100%)	11.0
Wärmeleistung	kW	150	

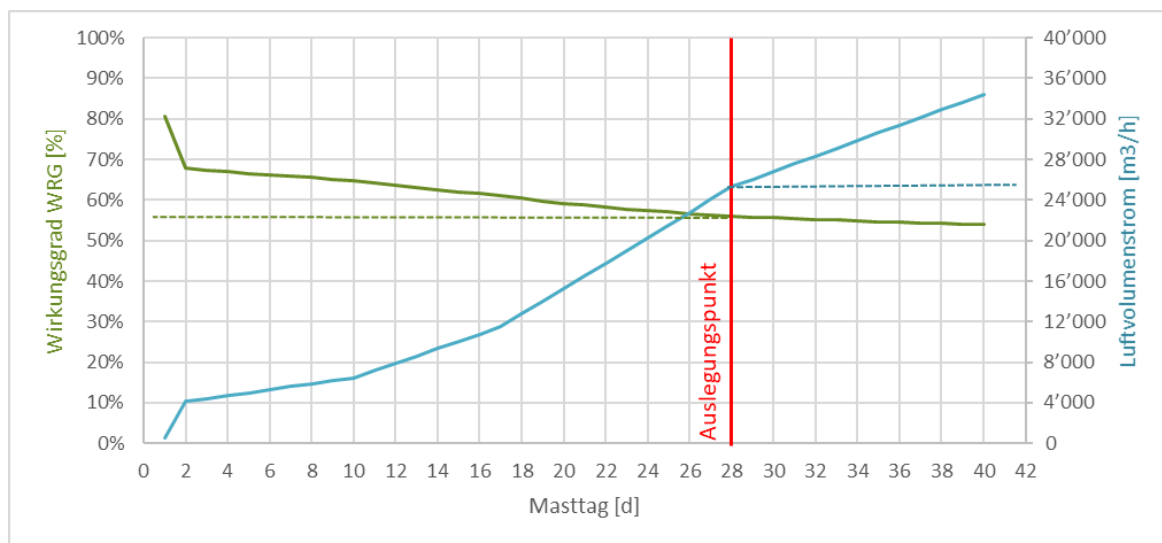
Tabelle 4: Spezifikation Wäscher

Wärmetauscher Zuluft	Einheit	Luft	Glykol (30%)
Volumenstrom	m ³ /h	2x 12'650	
Eintritt	°C	-10.0	10.0
Austritt	°C	8.0	6.2
Wärmeleistung	kW	150	

Tabelle 5: Spezifikation Wärmetauscher Zuluft

Im Auslegungspunkt ergibt sich ein Temperaturreckgewinnungsgrad von 56%, was im Vergleich zu Lüftungssystemen in der Gebäudetechnik eher tief ist. Aufgrund der grossen Abwärme der Tiere ist dieser Wirkungsgrad aber ausreichend, um die gewünschte Stalltemperatur im Auslegungspunkt allein mit der WRG aufrecht zu erhalten.

Es wird erwartet, dass der Wirkungsgrad bei kleineren Volumenströmen in den früheren Phasen des Produktionszyklus höher ausfällt. Der erwartete Verlauf ist in Abbildung 8 dargestellt.





2.6 Heizung über Wärmepumpe (WP)

Zum Aufheizen des Pouletstalles vor der Einstallung und in den ersten Tagen des Produktionszyklus ist zusätzlich zur Wärmerückgewinnung weiterhin ein Wärmeerzeuger erforderlich.

Gemäss Simulation von SKOV tritt der maximale Leistungsbedarf für diesen Wärmeerzeuger jeweils am 7. Lebenstag auf, wenn bereits gelüftet werden muss, die Tiere selbst aber noch wenig Wärme abgeben. Für eine Umgebungstemperatur von -10°C wurde ein Leistungsbedarf 67 kW berechnet.

Aufgrund der geringen Volllaststunden dieses zusätzlichen Wärmeerzeugers und den lokalen Gegebenheiten fiel die Wahl auf eine Luft/Wasser-Wärmepumpe. Die ausgewählte Wärmepumpe vom Typ Carrier 61AF-105B verfügt über eine nominale Heizleistung von 102 kW (A7/W45). Bei einer Umgebungstemperatur von -10°C und einer Vorlauftemperatur von 52°C beträgt die Heizleistung 54 kW. Damit wird der Spitzenlastfall nur zu 80% abgedeckt. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fall eintritt, ist allerdings sehr gering. Für den äussersten Notfall sind im Energiespeicher elektrische Heizregister verbaut.

Die Wärmeabgabe erfolgt ausschliesslich im Innenstall durch die vollflächige Bodenheizung mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 35°C und je eine Spiralrohrheizung entlang der Aussenwände mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 52°C .



Abbildung 9: Luft/Wasser-WP Carrier 61AF-105B



Abbildung 10: Spiralrohrheizung



2.7 Stromproduktion

Zur Eigenstromerzeugung wurde eine Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 57 kWp installiert. Gemäss Simulation beträgt der spezifische Jahresertrag 1'180 kWh/kWp, was einen absoluten Jahresertrag von 67'300 kWh ergibt. Die Anlage wurde nicht grösser ausgelegt, da der Schattenwurf vom nahegelegenen Wald den Ertrag im unteren Bereich des Daches verringert. Der produzierte Überschuss wird mit erster Priorität auf dem Betrieb Guggisberg direkt verbraucht oder andernfalls ins Netz zurückgespeist.



Abbildung 11: Foto PV-Anlage

2.8 Energieflussdiagramm

Zur Ermittlung des Energieverbrauches wurden in der Planungsphase alle relevanten Wärmeströme auf Stundenbasis simuliert und die Werte über ein ganzes Jahr kumuliert. Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgte anhand der effektiven Verbräuche von Ställen gleicher Grösse.

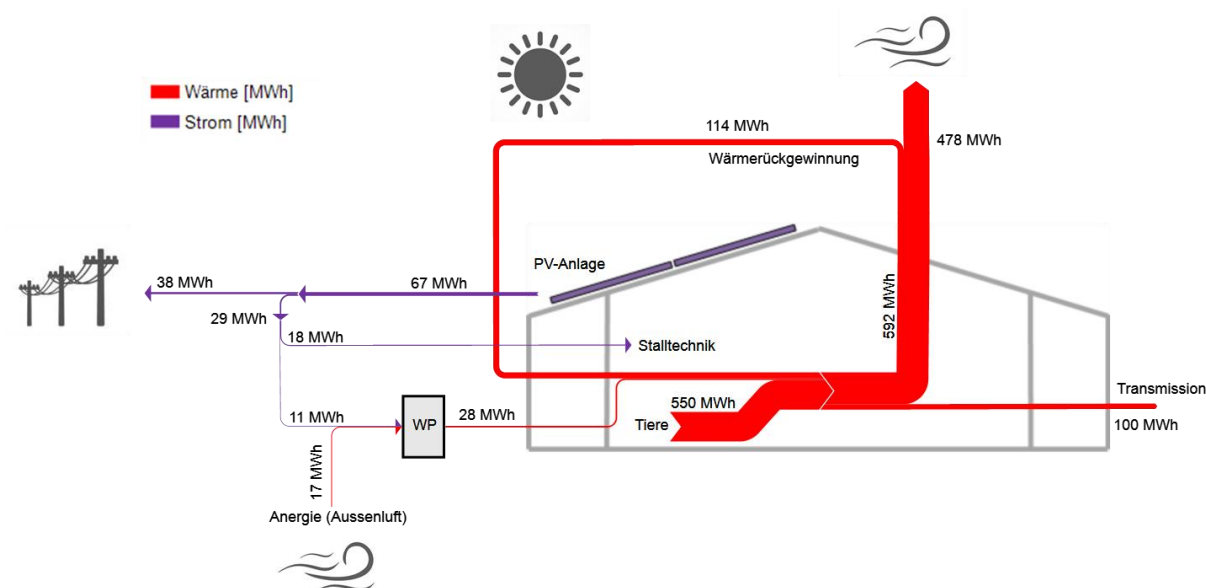


Abbildung 12: Sankey-Diagramm Wärme und Elektrizität



3 Vorgehen und Methode

3.1 Vorgehen

Der Pouletstall wurde unter der Leitung der Bell Schweiz AG geplant und realisiert. Das Gebäude wurde durch die Krieger AG erstellt, die gesamte Technik inkl. Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe durch die SKOV A/S geliefert und installiert. Die erste Einstellung erfolgte am 10. Juli 2020.

Da es sich bei der Klimatisierung um ein neues Konzept handelt, waren während der ersten beiden Umtriebe noch diverse Optimierungen erforderlich. Für die Auswertungen in vorliegendem Bericht wurden deshalb die Umtriebe 3 bis 10 im Zeitraum vom 30.09.2020 bis zum 01.09.2021 betrachtet.

3.2 Messkonzept

Das Messkonzept wurde grundsätzlich so aufgebaut, dass für den Pouletstall die Luft-, Wasser- und Wärmebilanz mit einer maximalen Auflösung von 10 Minuten berechnet werden kann. Dazu müssen Volumenstrom, Temperatur und Feuchtigkeit der Luft am Ein- und Austritt des Stalles gemessen und aufgezeichnet werden. Zur genaueren Analyse des Betriebsverhaltens einzelner Teilsysteme wurden weitere Sensoren ergänzt. So wird beispielsweise die Wärmeleistung der beiden Spiralrohrheizungen und der Bodenheizung separat gemessen und die grössten Elektroverbraucher verfügen ebenfalls über individuelle Zähler. Nachfolgend sind alle gemessenen Parameter aufgelistet, welche zur Auswertung zur Verfügung stehen.

Elektrische Energie zur Berechnung der Jahresenergiebilanz:

- Hauptzähler Netz-Anschluss (bidirektional)
- PV-Anlage

Elektrische Energie der Hauptverbraucher:

- Wärmepumpe
- E-Heizungen (Notheizung)
- Wäscher (Pumpen, Steuerung)
- Ventilatoren Wäscher (Abluft)
- Ventilatoren Wintergarten (Zuluft)
- Ventilatoren Dach (Abluft)
- Stalleinrichtungen (Fütterung, Licht usw.)

Wärmeenergie:

- Bodenheizung
- Spiralrohrheizung Nordseite
- Spiralrohrheizung Südseite
- Wärmerückgewinnung (Kreislaufverbundsystem)



Volumenstrom:

- Abluft Wäscher Rekonstruktion aus Klappenstellung und Druckabfall an Klappe
- Abluft Dachventilatoren Rekonstruktion aus Klappenstellung und Druckabfall an Klappe
- Zuluft Wintergarten Rekonstruktion aus Drehzahl und Druckdifferenz am Ventilator

Relative Feuchtigkeit:

- Aussenluft
- Stallluft (Innenstall)
- Zuluft Wintergarten Nord
- Zuluft Wintergarten Süd

Temperatur:

- Aussenluft
- Stallluft (Innenstall)
- Fortluft Wäscher
- Zuluft Wintergarten Nord
- Zuluft Wintergarten Süd
- Raumlufte Wintergarten Nord Vorne
- Prozesswasser Wäscher im Bottich
- Prozesswasser Wäscher Rücklauf vom Wärmetauscher zum Kreislaufverbundsystem
- Kreislaufverbundsystem Vor- & Rücklauf (Rücklauf für Wärmetauscher Nord/Süd separat)
- Spiralrohrheizungen Vor- & Rücklauf
- Bodenheizung Vor- & Rücklauf

Luftqualität:

- CO₂-Konzentration Stallluft (Innenstall)

Druck:

- Druckdifferenz Innenstall zu Umgebung
- Druckdifferenz Wintergarten Nord/Süd zu Umgebung

Produktions-Parameter (Tageswerte):

- Anzahl und Gewicht der Tiere
- Futter- und Wasserverbrauch



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Betrachtungszeitraum Auswertungen

Als Grundlage für die Auswertungen in diesem Kapitel wurden die Messdaten von acht vollständigen Produktionsumtrieben zwischen dem 30.09.2020 und dem 01.09.2021 herangezogen. Der Betrachtungszeitraum beträgt 336 Tage und entspricht damit 92% eines vollen Kalenderjahres. Dies wirkt sich primär beim Ertrag der PV-Anlage aus, da mit September 2021 ein Monat mit vergleichsweise hohem Ertrag nicht berücksichtigt wird.

Utrieb Nr.	Start Leer- / Aufheizphase	Einstellung	Vorausstellung	Ausstellung	Dauer Utrieb [d]	Ø Aussentemp. [°C]
U3	30.09.2020	06.10.2020	04.11.2020	10.11.2020	35	9.2
U4	10.11.2020	17.11.2020	16.12.2020	22.12.2020	35	3.4
U5	22.12.2020	31.12.2020	-	04.02.2021	35	1.2
U6	04.02.2021	10.02.2021	11.03.2021	18.03.2021	36	4.4
U7	18.03.2021	24.03.2021	22.04.2021	28.04.2021	35	6.9
U8	28.04.2021	04.05.2021	02.06.2021	08.06.2021	35	12.1
U9	08.06.2021	14.06.2021	13.07.2021	19.07.2021	35	18.5
U10	19.07.2021	28.07.2021	26.08.2021	01.09.2021	35	18.2

Tabelle 6: Umtriebe im Betrachtungszeitraum

4.2 Elektrischer Energieverbrauch

4.2.1 Aufteilung Energieverbrauch

Für den Betrieb des Geflügelstalls wird ausschliesslich elektrische Energie benötigt. Die zwei grössten Einzelverbraucher sind die Wärmepumpe und der Abluftwäscher, welche gemeinsam 74% des gesamten Energieverbrauches ausmachen und damit die gesamte benötigte Heizwärme bereitstellen. Weitere 13% des Gesamtverbrauches gehen zu Lasten der Lüftungsventilatoren, während die Stall-einrichtungen inkl. Beleuchtung nur rund 12% ausmachen.

Der gemessene elektrische Energieverbrauch der Wärmepumpe (25 kW) beinhaltet die Wärmepumpe selbst, sowie den Stromverbrauch der Umwälzpumpe zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher. Das verwendete Standardgerät regelt die Speichertemperatur anhand eines internen Temperatursensors. Dies hat den Nachteil, dass für eine korrekte Messung die Umwälzpumpe immer in Betrieb sein muss. Durch die Anpassung der Parameter konnte die Laufzeit der Umwälzpumpe bereits reduziert werden. Optimal wäre hier die Verwendung eines externen Sensors direkt im Pufferspeicher.



Im Pufferspeicher der Wärmepumpe sind 4 Elektro-Heizregister mit einer Anschlussleistung von je 9 kW installiert, welche als Redundanz im Falle einer Störung der Wärmepumpe vorgesehen sind. Auch während dem kältesten Umtrieb (U5) wurden diese nicht benötigt. Während Umtrieb 7 (U7) kamen sie kurz zum Einsatz, als der Betrieb der Wärmepumpe für Anpassungsarbeiten unterbrochen werden musste.

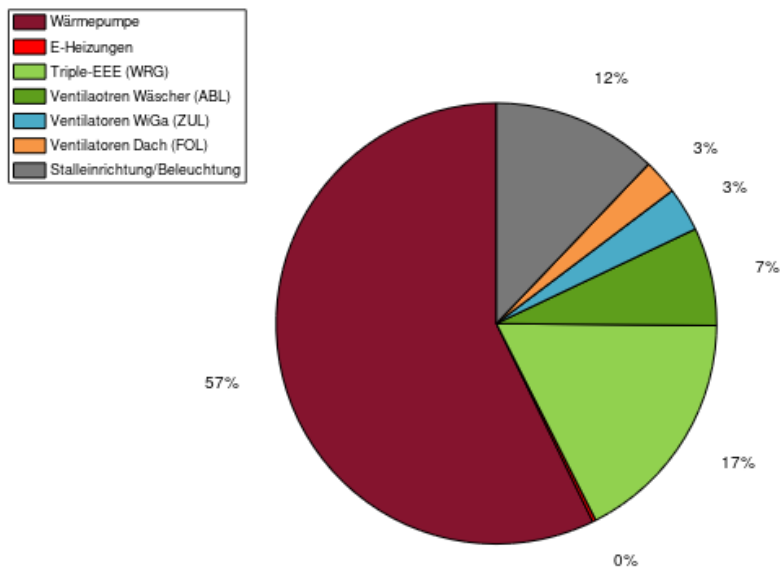


Abbildung 13: Verbrauchsaufteilung elektrische Energie (Kuchendiagramm)

Beim Abluftwäscher wird die elektrische Energie primär durch die Wäscherpumpe (2.2 kW) und die Umwälzpumpe des Kreislaufverbundsystems (1.5 kW) verbraucht. Zusätzlich wird die Steuerung inkl. Sensoren und Aktoren (Magnetventile) über den gleichen Zähler gemessen. Der Energieverbrauch der Wäscherpumpe ist besonders hoch, da diese im Gegensatz zur geregelten Umwälzpumpe im Kreislaufverbundsystems (KVS) immer bei Nennvolumenstrom betrieben wird, um einer Verschmutzung des Wärmetauschers vorzubeugen. Zwischenzeitlich führt der Lieferant auch die Wäscherpumpe geregelt aus, wobei der Verschmutzung des Wärmetauschers durch periodisches «Hochfahren» der Pumpe entgegengewirkt wird. Diese Option wird voraussichtlich nachgerüstet, dennoch stellt der Energieverbrauch der Wäscherpumpe einen Nachteil dieses Systems dar.

Die Ventilatoren des Wäschers (2x 668 W), der beiden Zuluftwärmetauscher (2x 808 W) und die Dachventilatoren (11x 534 W) werden separat gemessen. Beim Verbrauch dominieren die Wäscher-ventilatoren, da diese die höchste Betriebszeit aufweisen und den erhöhten Druckverlust über den Wäscher überwinden müssen. Durch die Zuluftventilatoren zu den Wintergärten (WRG) und die Dach-ventilatoren wurden ähnlich grosse Gesamtvolumen gefördert (vgl. Tabelle 9), die Druckverluste über die Zuluftwärmetauscher und die Kamine sind jedoch deutlich geringer.

Die restlichen Verbraucher wie Beleuchtung, Fütterung, Klimacomputer usw. werden über den Zähler «Stalleinrichtungen» gemessen.



	Wärmepumpe [kWh]	E-Heizungen [kWh]	Wäscher [kWh]	Ventilatoren Wäscher [kWh]	Ventilatoren WiGa [kWh]	Ventilatoren Dach [kWh]	Stalleinrichtung [kWh]	Total [kWh]
U3	6'920	0	1'959	626	432	166	1'130	11'233
U4	7'590	0	2'163	654	300	77	1'195	11'979
U5	8'537	0	2'624	616	251	79	1'462	13'569
U6	6'462	4	2'239	713	445	105	1'321	11'289
U7	4'610	197	1'950	842	404	127	1'198	9'328
U8	5'187	0	1'438	779	246	378	1'146	9'174
U9	2'630	0	741	695	256	640	1'052	6'014
U10	3'927	0	828	845	261	490	1'225	7'576
Total	45'863	201	13'942	5'770	2'595	2'062	9'729	80'162

Tabelle 7: Verbrauchsaufteilung elektrische Energie

4.2.2 Ertrag/Eigenverbrauch PV-Anlage

Zur Eigenstromerzeugung wurde eine PV-Anlage mit einer Leistung von 57 kWp installiert. Deren Ertrag lag allerdings im Winter und während der Übergangszeit unter den Erwartungswerten gemäss Simulation. Es wird vermutet, dass die Beschattung durch den angrenzenden Wald in der Simulation nicht ausreichend gewichtet wurde und allenfalls Schnee über längere Zeit auf den relativ flach angeordneten Modulen liegen bleibt.

Da der Energieverbrauch gleichzeitig noch deutlich über dem Zielwert liegt, wurde der Verbrauch erst zu 57% abgedeckt.

	Verbrauch Elektrizität [kWh]	Ertrag PV-Anlage [kWh]	Eigenverbrauch PV [kWh]	Eigenverbrauch PV [%]
U3	11'233	2'588	1'789	69%
U4	11'979	432	207	48%
U5	13'569	296	200	68%
U6	11'289	2'465	1'358	55%
U7	9'328	9'010	2'327	26%
U8	9'174	9'475	3'440	36%
U9	6'014	10'728	2'424	23%
U10	7'576	10'687	2'819	26%
Total	80'162	45'681	14'565	32%

Tabelle 8: Ertrag/Eigenverbrauch PV-Anlage



Wie in Abbildung 14 ersichtlich, kann der erzeugte PV-Strom in den Wintermonaten meist direkt verbraucht werden, während die hohen Spitzenleistungen im Sommer (Abbildung 15) ins Netz zurückgespeist werden müssen. Mit dem resultierenden Eigenverbrauchsanteil von 32% wurde der Erwartungswert von 26.4% übertroffen. Nach Optimierung des Verbrauches dürfte sich dieser Anteil allerdings wieder etwas reduzieren.

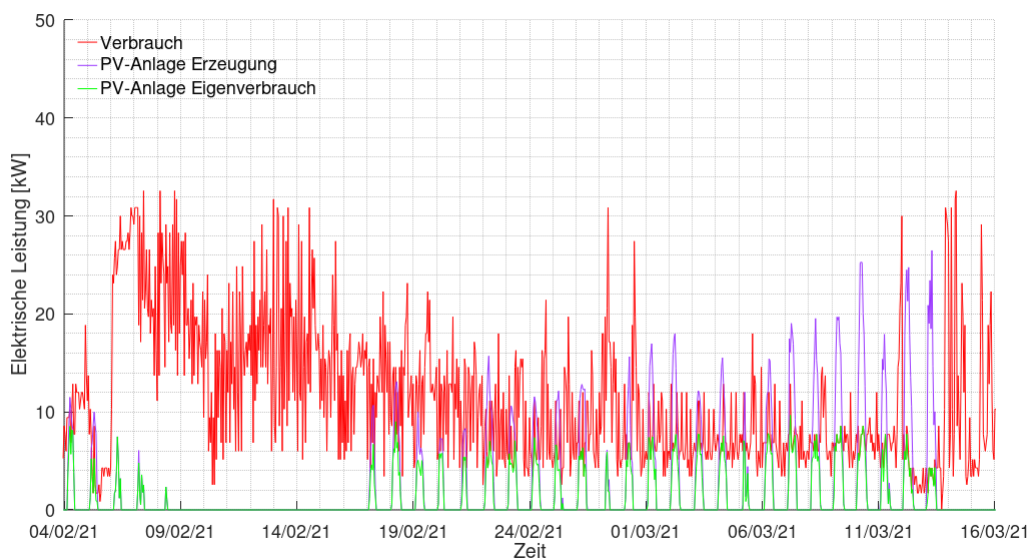


Abbildung 14: Vergleich Verbrauch Elektrizität / Ertrag PV-Anlage (Umtrieb 6, Feb./Mrz. 2021)

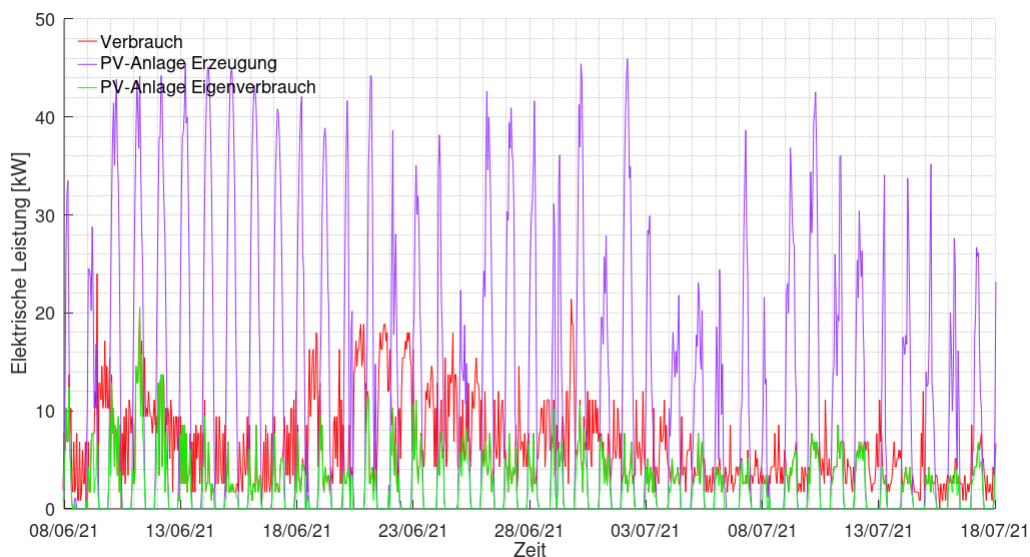


Abbildung 15: Vergleich Verbrauch Elektrizität / Ertrag PV-Anlage (Umtrieb 9, Jun./Jul. 2021)



4.3 Lüftung

4.3.1 Aufteilung Luftmengen

Die Abluft kann entweder zur Wärmerückgewinnung über den Wäscher oder direkt über die Dachventilatoren abgeführt werden. Der Wäscher wurde auf einen Volumenstrom von 25'300 m³/h ausgelegt, damit die gesamte Abluft immer zur Wärmerückgewinnung genutzt werden kann, solange Heizbedarf besteht (vgl. Abbildung 16). Die Dachventilatoren werden nur eingeschaltet, wenn der Stall gekühlt werden muss, was primär im Sommer der Fall ist (vgl. Abbildung 17).

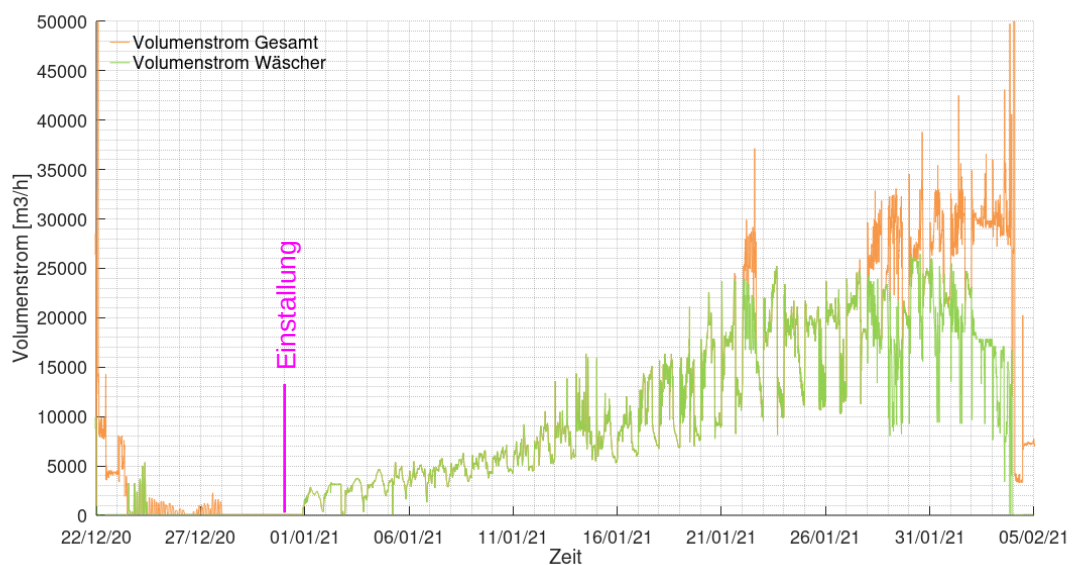


Abbildung 16: Volumenstrom Abluft gesamt und über Wäscher (Umtrieb 5, Jan. 2021)

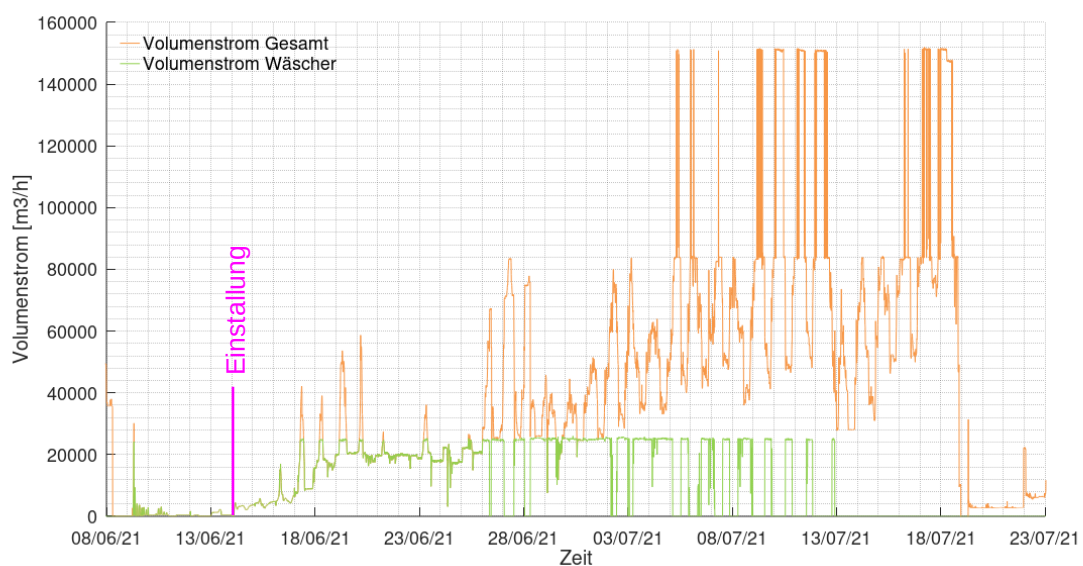


Abbildung 17: Volumenstrom Abluft gesamt und über Wäscher (Umtrieb 9, Jun./Jul. 2021)



Wie in Tabelle 9 ersichtlich, liegt der Anteil der Abluft über den Wäscher bei tiefen Aussentemperaturen (U4 / U5 / U6) im Bereich von 70...80%, während es im Sommer (U9 / U10) noch um die 30% sind.

	Ø Aussentemperatur [°C]	Volumen über WRG [m³]	Volumen über Dach [m³]	Anteil über WRG [%]
U3	9.2	10'181'713	8'393'278	54.8%
U4	3.4	10'911'410	2'755'787	79.8%
U5	1.2	9'317'771	2'103'992	81.6%
U6	4.4	11'372'203	4'401'082	72.1%
U7	6.9	12'894'729	5'611'041	69.7%
U8	12.1	11'770'133	17'285'653	40.5%
U9	18.5	11'065'947	29'736'148	27.1%
U10	18.2	13'508'291	23'916'418	36.1%
Total	9.2	91'022'197	94'203'400	49.1%

Tabelle 9: Aufteilung Luftmenge über Wäscher/Dach

4.3.2 Energieverbrauch Ventilatoren

Wie in Abbildung 13 zu sehen, stellen die zwei Abluftventilatoren des Wäschers, mit einer Nennleistung von je 668 W den drittgrössten Energieverbraucher dar.

Der spezifische Energieverbrauch ist mit durchschnittlich 63.4 Wh/1'000 m³ (vgl. Tabelle 10) deutlich höher als erwartet. Wie sich im Betrieb herausgestellt hat, kommt es bei ausgeschaltetem Wäscher trotz Klappen zu einer unerwünschten Rückströmung vom Wäscher in den Pouletstall. Um dies zu vermeiden, mussten die Ventilatoren bisher auch bei ausgeschaltetem Wäscher auf minimaler Drehzahl betrieben werden, was sich negativ auf den spezifischen Energieverbrauch ausgewirkt hat.

	Volumen [m³]	Elektrizität [kWh]	spez. Verbrauch [Wh/1'000 m³]
U3	10'181'713	626	61.5
U4	10'911'410	654	59.9
U5	9'317'771	616	66.1
U6	11'372'203	713	62.7
U7	12'894'729	842	65.3
U8	11'770'133	779	66.2
U9	11'065'947	695	62.8
U10	13'508'291	845	62.6
Total	91'022'197	5'770	63.4

Tabelle 10: Volumen & spezifischer Energieverbrauch Abluftventilatoren Wäscher



Als Optimierungsmassnahme wurde bereits die Nachrüstung einer Abdeckung angedacht, mit der die Abluftkanäle zum Wäscher dicht verschlossen werden können, wenn der Wäscher nicht benötigt wird.

Bei den Zuluftventilatoren zum Wintergarten liegt der spezifische Verbrauch mit 24.5 Wh/1'000 m³ trotz Wärmetauscher deutlich tiefer (vgl. Tabelle 11), da diese auf einen sehr niedrigen Druckverlust von ca. 20 Pa ausgelegt wurden. Dennoch stellt der Energieverbrauch dieser Ventilatoren einen Mehrverbrauch gegenüber konventionellen Stallkonzepten dar.

	Volumen [m ³]	Elektrizität [kWh]	spez. Verbrauch [Wh/1'000 m ³]
U3	15'814'186	432	27.3
U4	13'745'734	300	21.8
U5	12'403'416	251	20.2
U6	16'703'972	445	26.6
U7	13'459'454	404	30.0
U8	10'747'446	246	22.9
U9	11'917'971	256	21.5
U10	11'114'310	261	23.5
Total	105'906'489	2'595	24.5

Tabelle 11: Volumen & spezifischer Energieverbrauch Zuluftventilatoren Wintergarten

Die Dachventilatoren weisen mit 21.9 Wh/1'000 m³ Erwartungsgemäss den geringsten spezifischen Verbrauch auf (Tabelle 12), da es in den Abluftkaminen abgesehen von der Klappe keine Einbauten gibt.

	Volumen [m ³]	Elektrizität [kWh]	spez. Verbrauch [Wh/1'000 m ³]
U3	8'393'278	166	19.8
U4	2'755'787	77	27.9
U5	2'103'992	79	37.5
U6	4'401'082	105	23.9
U7	5'611'041	127	22.6
U8	17'285'653	378	21.9
U9	29'736'148	640	21.5
U10	23'916'418	490	20.5
Total	94'203'400	2'062	21.9

Tabelle 12: Volumen & spezifischer Energieverbrauch Abluftventilatoren Dach



In Tabelle 13 ist der Verbrauch aller Ventilatoren zusammengefasst, für den spezifischen Energieverbrauch der gesamten Lüftung ergibt sich ein Wert von 56.3 Wh/1'000 m³.

	Volumen Fortluft [m ³]	Elektrizität alle Ventilatoren [kWh]	spez. Verbrauch [Wh/1000 m ³]
U3	18'574'991	1'224	65.9
U4	13'667'197	1'031	75.4
U5	11'421'763	946	82.8
U6	15'773'285	1'263	80.1
U7	18'505'771	1'373	74.2
U8	29'055'786	1'403	48.3
U9	40'802'095	1'591	39.0
U10	37'424'710	1'596	42.6
Total	185'225'596	10'427	56.3

Tabelle 13: Volumen & spezifischer Energieverbrauch Lüftung gesamt

4.3.3 CO₂-Konzentration und Luftfeuchtigkeit im Stall

Die Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration werden über die Lüftung geregelt, wobei bei modernen Ställen ohne CO₂-Eintrag durch das Heizsystem meist die Einhaltung der vorgegebenen Luftfeuchtigkeit der treibende Faktor ist. In ihrem Leitfaden gibt Bell Richtwerte für die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit des Lebensstages der Tiere vor. Bei der CO₂-Konzentration gilt ein Maximalwert von 3'000 ppm.

Anhand der im Stall gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit und der CO₂-Konzentration zeigt sich, dass bei diesem Stall deutlich stärker gelüftet wurde als dies in konventionellen Ställen der Fall ist.

Wie Abbildung 18 zeigt, wurde in der zweiten Hälfte des Umtriebes eine relative Feuchtigkeit weit unter den vorgegebenen Richtwerten gefahren. Der entsprechend hohe Luftwechsel widerspiegelt sich auch in der CO₂-Konzentration (Abbildung 19), welche im gleichen Zeitraum bei 2'000 ppm und tiefer liegt. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass die Durchmischung der Stallluft mit der Unterdrucklüftung nicht mehr korrekt funktioniert, sobald die Schieber zum Wintergarten dauerhaft geöffnet bleiben. Um die Qualität der Einstreu trotzdem zu gewährleisten wurde deutlich tiefere Luftfeuchtigkeiten gefahren.

Ein wichtiger Zusatznutzen der Wärmerückgewinnung ist, dass in der zweiten Hälfte des Umtriebes ohne zusätzlichen Heizbedarf höhere Luftwechsel gefahren werden können, was sich positiv auf die Qualität der Einstreu auswirkt. Aktuell wurden die Sollwert der rel. Luftfeuchtigkeit allerdings manuell nachgeführt, was dazu geführt hat, dass gegen ende der Umtriebe so stark gelüftet wurde, dass durch die Klimasteuerung mehrfach mit der Wärmepumpe nachgeheizt wurde um den Sollwert für die Stalltemperatur einzuhalten. Die Steuerung soll so ergänzt werden, dass gerade nur so viel gelüftet wird, dass die Wärmepumpe nicht gestartet wird.

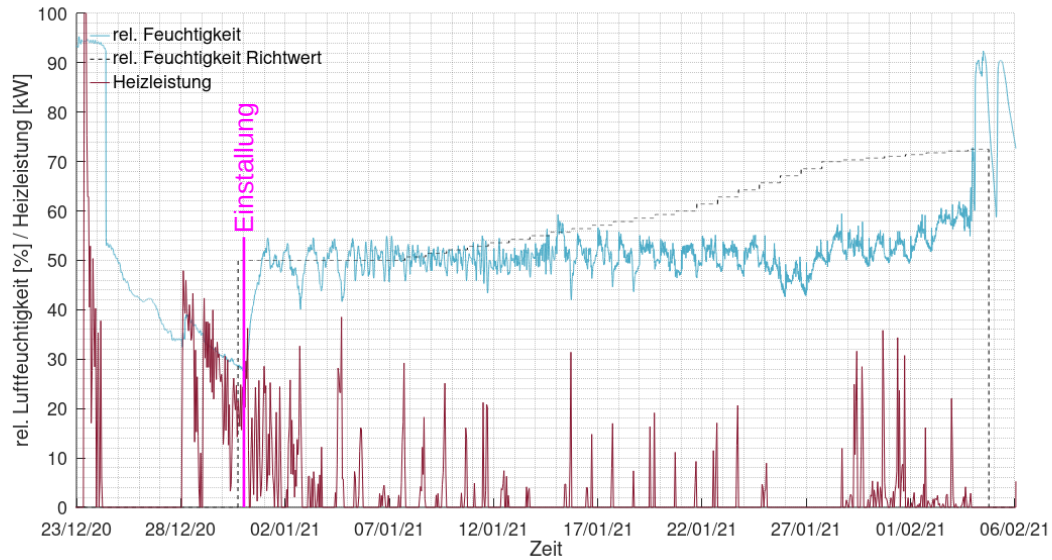


Abbildung 18: Verlauf relative Luftfeuchtigkeit Innenstall im Vergleich zu Richtwert (Umtrieb 5, Jan. 2021)

Die CO₂-Konzentration ist ein Indikator dafür, wie stark gelüftet wird. Die hohen Luftraten gegen Ende des Umtriebes widerspiegeln sich auch in Abbildung 19.

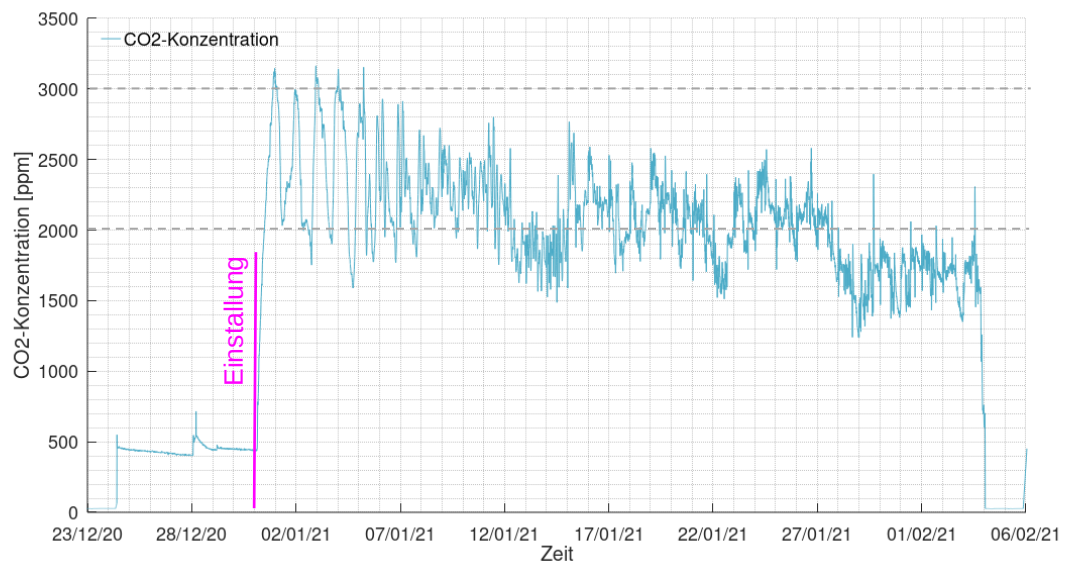


Abbildung 19: Verlauf CO₂-Konzentration im Pouletstall während (Umtrieb 5, Jan. 2021)



Tabelle 14 zeigt die Mittelwerte für Aussentemperatur, CO₂-Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit im Stall für jeden Umtrieb im Betrachtungszeitraum.

	Ø Aussentemperatur [°C]	Ø CO ₂ -Konzentration [ppm]	Ø rel. Luftfeuchtigkeit [%rF]
U3	9.2	1'671	53.2
U4	3.4	2'078	49.9
U5	1.2	2'055	51.1
U6	4.4	1'944	49.8
U7	6.9	1'790	48.0
U8	12.1	1'376	52.7
U9	18.5	1'098	61.9
U10	18.2	1'063	60.5
Ø	9.2	1'634	53.4

Tabelle 14: CO₂-Konzentration und relative Feuchte nach Umtrieben



4.4 Aufteilung Wärmeverluste / Einfluss Wärmedämmung

Die Wärmeverluste entstehen im Geflügelstall einerseits durch Transmission durch die Gebäudehülle und andererseits durch den Luftaustausch mit der Umgebung. Die Transmissionsverluste wurden hier über die spezifische Leistung von 672 W/K (nur Transmission) und der Temperaturdifferenz zur Umgebung berechnet, die Lüftungsverluste analog über den Abluftvolumenstrom und die Temperaturdifferenz.

Während der Aufheizphase und in den ersten 1...2 Tagen des Umtriebes ist der Luftwechsel sehr gering, so dass die Transmissionsverluste überwiegen, anschliessend dominieren rasch die Lüftungsverluste. Dies ist in Abbildung 20 am Beispiel von Umtrieb 5 dargestellt.

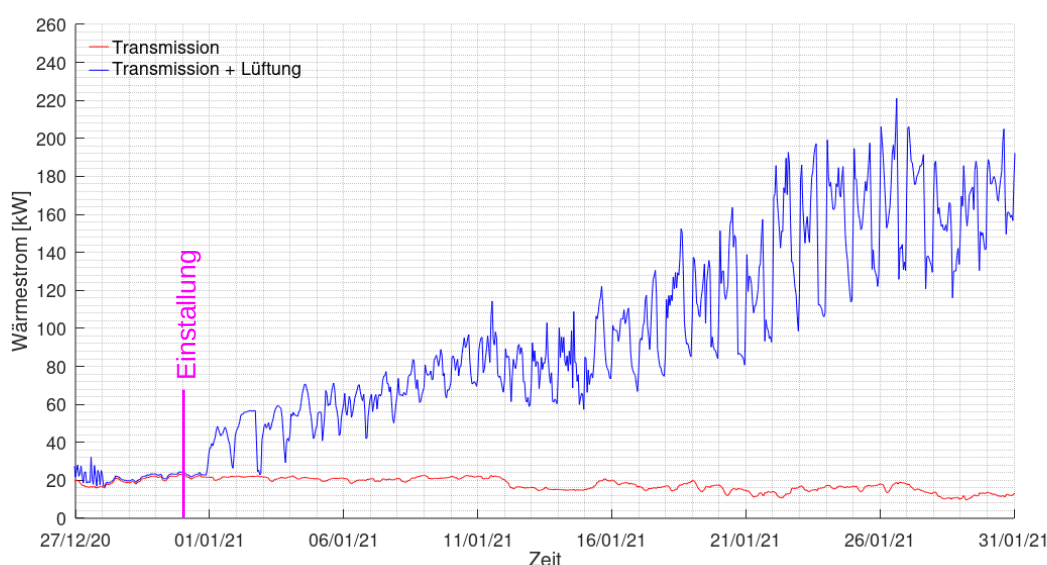


Abbildung 20: Transmissions- und Lüftungsverluste (Umtrieb 5, Jan. 2021)

Der Vergleich in Tabelle 15 zeigt, dass die Transmissionsverluste über den gesamten Betrachtungszeitraum rund 12% der gesamten Wärmeverluste ausmachen.

	Wärmeverluste Total [kWh]	Wärmeverluste Transmission [kWh]	Wärmeverluste Lüftung [kWh]	Anteil Transmis- sion [%]
U3	100'926	11'113	89'813	11%
U4	114'715	15'582	99'133	14%
U5	96'478	17'561	78'917	18%
U6	106'587	13'902	92'685	13%
U7	101'114	11'914	89'201	12%
U8	86'695	8'907	77'789	10%
U9	84'540	4'863	79'677	6%
U10	74'550	5'263	69'287	7%
Total	765'604	89'103	676'502	12%

Tabelle 15: Aufteilung Wärmeverluste Transmission/Lüftung



Um die Minergie-Vorgaben an den Heizwärmebedarf einzuhalten, wurde eine stärkere Dämmung eingesetzt, wodurch die spezifische Leistung bei den Transmissionsverlusten von der konventionellen Lösung mit 826 W/K auf 672 W/K reduziert wurde. Berechnet man die Transmissionsverluste mit 826 W/K ergeben sich über den Betrachtungszeitraum Verluste von 109'522 kWh, was rund 20'000 kWh bzw. 23% höher ist.

Da die Transmissionsverluste in der zweiten Hälfte des Umtriebes meist durch die Wärmerückgewinnung abgedeckt werden, hätten die zusätzlichen Verluste nur teilweise zu einem zusätzlichen Heizbedarf für die Wärmepumpe geführt (vgl. Abbildung 21). Berücksichtigt man die zusätzlichen Wärmeverluste nur dann, wenn mit der Wärmepumpe aktiv geheizt wurde, wäre die mit der WP erzeugte Wärme um 12'600 kWh höher ausgefallen.

Durch die zusätzliche Dämmung müssen somit jährlich 12'600 kWh weniger Heizwärme erzeugt werden. Bei einem mittleren COP von 2.5 entspricht dies einer Einsparung von 5'000 kWh elektrischer Energie.

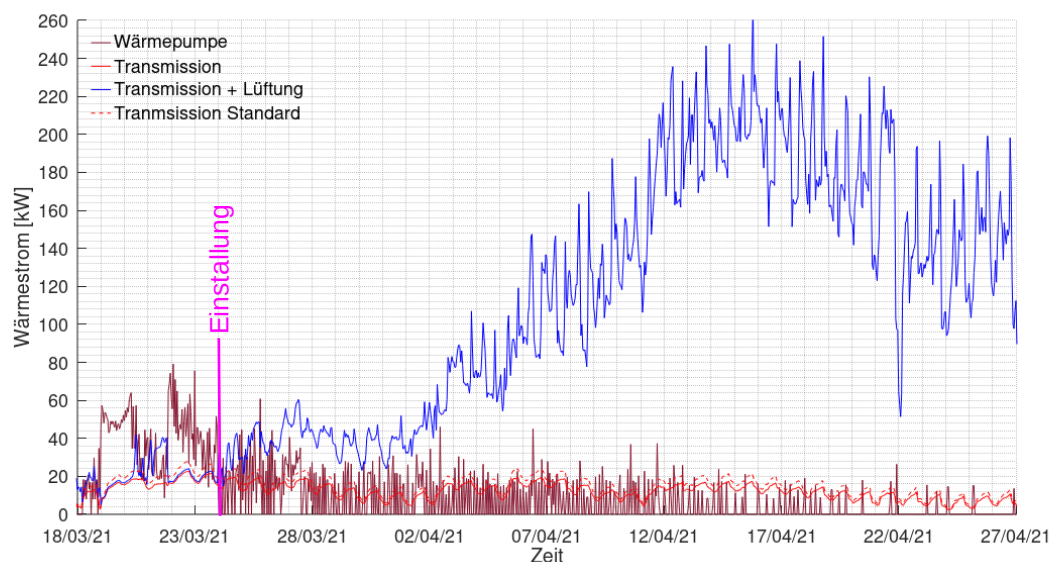


Abbildung 21: Deckung Transmissionsverluste mit WP (Umtrieb 7, Apr. 2021)



4.5 Wärmerückgewinnung

4.5.1 Vorkonditionierung Aussenluft im Wintergarten

Durch die Wärmerückgewinnung wird die gesamte Aussenluft vor dem Eintritt in den Wintergarten auf 8...15°C vorgewärmt. Dadurch liegt die Temperatur im Wintergarten auch während dem kältesten Umtrieb (U5) nahezu immer über 10°C, sobald die Lüftung in Betrieb ist.

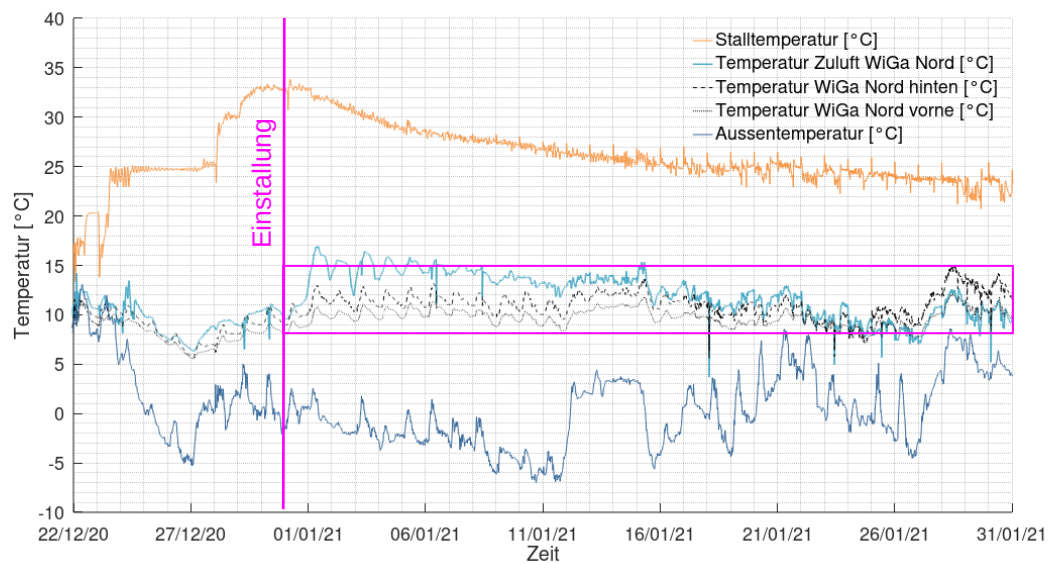


Abbildung 22: Temperaturen Wintergarten im Verlauf von Umtrieb 5 (Jan. 2021)

4.5.2 Wärmedeckung WRG

Mit der ganzjährigen Vorwärmung der Aussenluft auf >10°C verringert sich der Bedarf für die aktive Beheizung des Innenstalls erheblich. Der Hauptteil der Heizwärme wird während dem Vorheizen und in den ersten ca. 5 Lebenstagen aufgewendet.

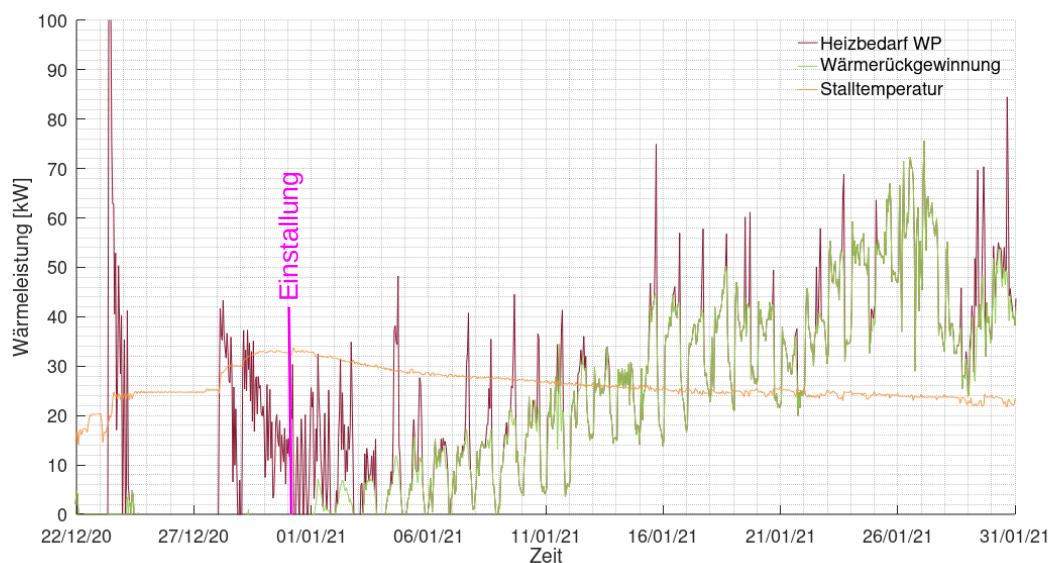


Abbildung 23: Wärmedeckung durch WRG/WP im Verlauf von Umtrieb 5 (Jan. 2021)



In Tabelle 16 sind die von der WP und WRG erzeugte Wärme für jeden Umtrieb aufgeführt. Bei tiefen Aussentemperaturen (U4, U5 & U6) wird der Wärmebedarf zu 55...68% durch die WRG abgedeckt, im Sommer (U9 & U10) liegt der Anteil der WRG hingegen mit 21...25% deutlich tiefer.

	Wärme WP (Rek.) [kWh]	Wärme WRG [kWh]	Wärme gesamt [kWh]	Anteil WRG [%]
U3	18'969	16'752	35'721	47%
U4	17'296	35'972	53'269	68%
U5	17'700	21'660	39'360	55%
U6	14'371	24'330	38'701	63%
U7	10'603	14'093	24'696	57%
U8	14'579	7'880	22'459	35%
U9	8'076	2'159	10'234	21%
U10	12'231	4'089	16'320	25%
Total	113'826	126'933	240'760	53%

Tabelle 16: Wärmedeckung Anteile WRG/WP nach Umtrieben

4.5.3 Wirkungsgrad Wärmerückgewinnung

Eine aussagekräftige Beurteilung des Wirkungsgrades ist nur in den Phasen des Umtriebes möglich, in denen die Wärmerückgewinnung bei maximaler Leistung betrieben wird. Dies ist gegeben, solange auch ein Bedarf der aktiven Heizung besteht. Sobald in der zweiten Hälfte des Umtriebes ein Wärmeüberschuss besteht, wird die Leistung der Wärmerückgewinnung teilweise begrenzt, was sich in der Auswertung als geringer Wirkungsgrad widerspiegelt.

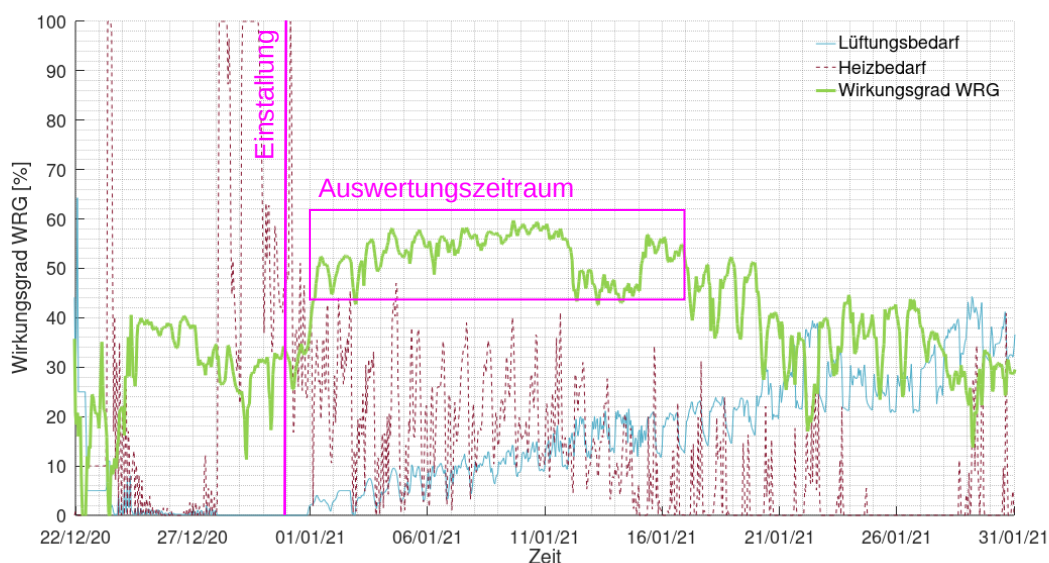


Abbildung 24: Wirkungsgrad WRG im Verlauf von Umtrieb 5 (Jan. 2021)



Da die anfänglich Heizphase je nach Jahreszeit unterschiedlich lang ist, wurden die Zeiträume für die Auswertung des Wirkungsgrades für jeden Umtrieb individuell ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 aufgeführt. Für die Umtriebe im Sommer (U9 & U10) wurde der Wert manuell aus der Grafik gelesen, da die WRG nur sporadisch aktiv ist.

	Ø Aussentemperatur [°C]	Ausgewertete Le-benstage [d]	Durchschnittlicher Wirkungsgrad [%]
U3	9.2	2...15	39%
U4	3.4	2...18	46%
U5	1.2	2...17	53%
U6	4.4	2...11	47%
U7	6.9	2...6	41%
U8	12.1	2...4	41%
U9	18.5	manuell	(ca. 15%)
U10	18.2	manuell	(ca. 20%)
Ø	9.2		38%

Tabelle 17: Mittlerer Wirkungsgrad WRG nach Umtrieb

4.5.4 Betriebsverhalten des Wäschers als Wärmetauscher

Die Auswertung in Tabelle 17 zeigt, dass der Wirkungsgrad der WRG bei tiefen Aussentemperaturen am höchsten ist und mit steigender Aussentemperatur abnimmt. Dieser tiefe Wirkungsgrad ist der Grund, weshalb im Sommer vergleichsweise viel Heizwärme mit der Wärmepumpe erzeugt werden musste (vgl. Tabelle 16).

Die Ursache für die tiefen Wirkungsgrade bei höheren Aussentemperaturen liegt in der Nutzung eines Wäschers zum Entzug von Wärme aus der Abluft. Im Gegensatz zu Rohrbündel- oder Plattenwärmetauschern kommt beim Wäscher die ungesättigte Abluft aus dem Stall mit dem Waschwasser in direkten Kontakt. Während diesem Kontakt kommt es zu einem thermischen Ausgleich zwischen der Luft und dem Waschwasser. Der Gleichgewichtszustand ist erst erreicht, wenn Luft und Wasser die gleiche Temperatur, die sog. Feuchtkugeltemperatur oder Kühlgrenztemperatur, erreicht haben.

Die Feuchtkugeltemperatur der Luft ist abhängig von deren Temperatur und Feuchtigkeit. Für den 7. Lebenstag wird beispielsweise ein Luftzustand von 28.5°C und 50% rF vorgegeben, was einer Feuchtkugeltemperatur von 20.7°C entspricht. Da das Waschwasser nur auf 20.7°C erwärmt werden kann, ist bei einer Aussentemperatur von 15°C der Wirkungsgrad der WRG schon theoretisch auf 42% begrenzt (vgl. Abbildung 26), während bei einer Aussentemperatur von 0°C ein theoretischer Wirkungsgrad von 73% möglich ist (vgl. Abbildung 25).

Dieser Effekt ist vor allem auch in der Übergangszeit ein Nachteil, wenn aufgrund der hohen Feuchte der Aussenluft stark gelüftet werden muss, die WRG aber nur wenig zur Erwärmung der Aussenluft beitragen kann (vgl. Abbildung 26).

Das System reagiert besonder sensitiv auf erhöhte Luftraten, denn je geringer die Feuchtigkeit der Abluft ist, desto tiefer ist ihre Feuchtkugeltemperatur. Wird also, wie in Abschnitt 4.3.3 diskutiert, stärker gelüftet, steigt dadurch nicht nur der Wärmebedarf, sondern sinkt gleichzeitig auch der



Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung. Um zu verhindern, dass in der Endphase des Zyklus wieder mit der Wärmepumpe geheizt werden muss, soll deshalb in der Regelung in Zukunft eine entsprechende Begrenzung der Luftmenge vorgesehen werden.

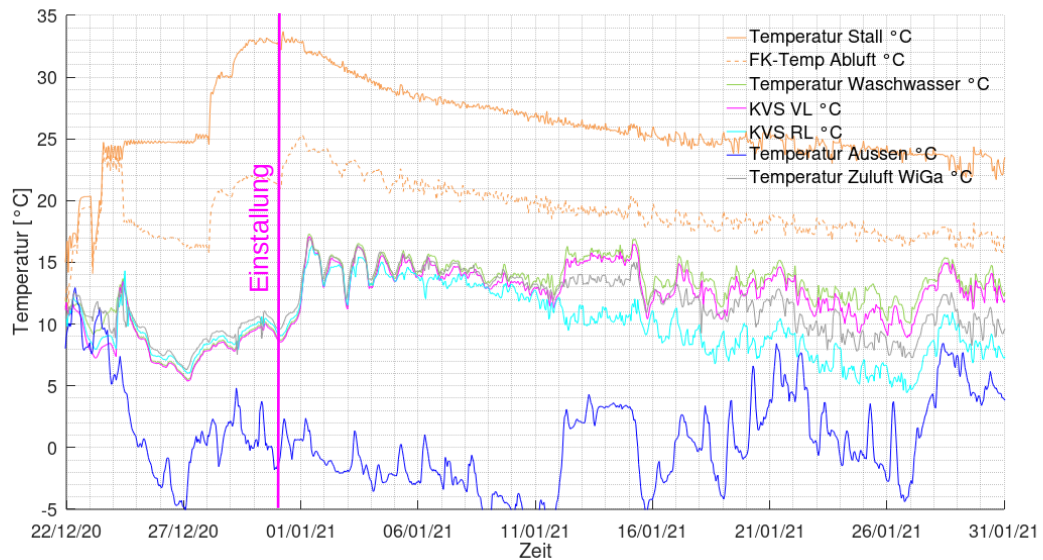


Abbildung 25: Temperaturverläufe Wärmerückgewinnung Umtrieb 5 (Jan. 2021)

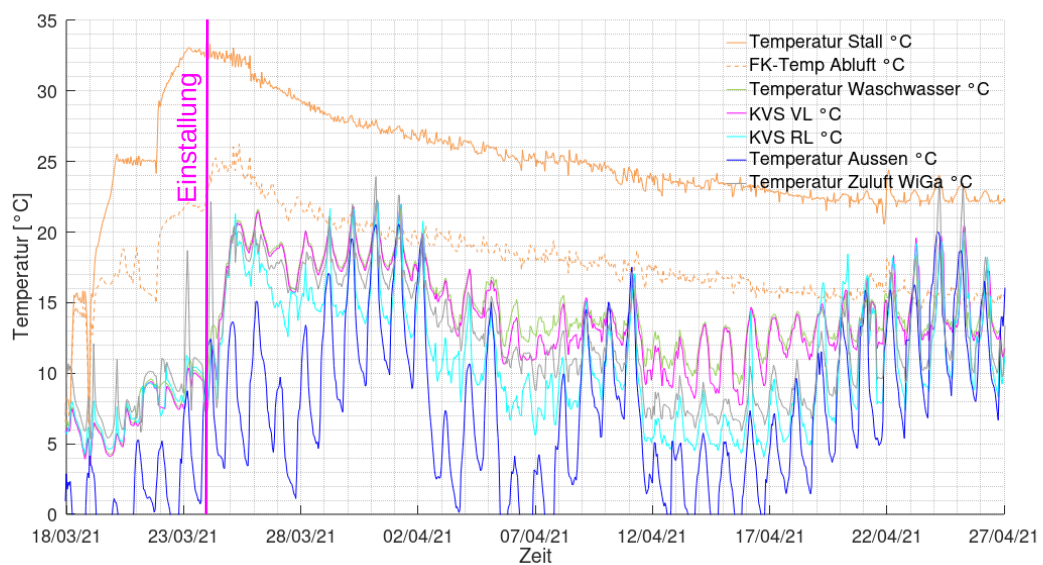


Abbildung 26: Temperaturverläufe Wärmerückgewinnung Umtrieb 7 (Apr. 2021)



4.6 Wärmepumpe

4.6.1 Leistungszahl (COP)

Grundsätzlich kann die effektive Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe aus dem gemessenen Wärmeverbrauch der drei Heizkreise und dem gemessenen elektrischen Energieverbrauch berechnet werden. Da aber die anfänglich eingebauten Wärmezähler zu gross dimensioniert waren, wurde bis zum Umtrieb 9 ein zu geringer Wärmeverbrauch gemessen.

Für die Auswertung in diesem Bericht wurde deshalb die durch die Wärmepumpe erzeugte Wärme aus dem gemessenen elektrischen Energieverbrauch und der Temperaturabhängigen Leistungszahl (COP) gemäss Herstellerangaben rekonstruiert (Rek.). Aus dieser Berechnung ergibt sich für den Betrachtungszeitraum eine mittlere Leistungszahl von 2.5 und eine erzeugte Wärmeenergie von rund 114'000 kWh (Tabelle 18).

	Elektrizität WP [kWh]	COP (Rek.) [-]	Wärme WP (Rek.) [kWh]
U3	6'920	2.7	18'969
U4	7'590	2.3	17'296
U5	8'537	2.1	17'700
U6	6'462	2.2	14'371
U7	4'610	2.3	10'603
U8	5'187	2.8	14'579
U9	2'630	3.1	8'076
U10	3'927	3.1	12'231
Total	45'863	2.5	113'826

Tabelle 18: Erzeugte Heizwärme und COP der Wärmepumpe



4.6.2 Aufteilung Wärmebedarf Aufheizbetrieb

Da mit der Wärmerückgewinnung der Heizbedarf während dem Umtrieb stark reduziert wird, gewinnt der Wärmebedarf für die Vorwärmung des Stalles vor dem Umtrieb erheblich an Relevanz. Rund ein Drittel der mit der Wärmepumpe erzeugten Wärme wird während dem Aufheizbetrieb verbraucht.

	Wärme WP (Rek.) [kWh]	Wärme WP (Rek.) Aufheizbetrieb [kWh]	Anteil Aufheizbetrieb [%]
U3	18'969	3'472	18%
U4	17'296	5'493	32%
U5	17'700	6'628	37%
U6	14'371	5'070	35%
U7	10'603	5'083	48%
U8	14'579	4'529	31%
U9	8'076	2'905	36%
U10	12'231	2'348	19%
Total	113'826	35'527	31%

Tabelle 19: Aufteilung Heizwärme Wärmepumpe Aufheizbetrieb

Die detaillierten Messdaten haben gezeigt, dass der Aufheizbetrieb voraussichtlich verkürzt werden kann. Ebenfalls soll erprobt werden, ob der Stall nach der Reinigung nur mit der Bodenheizung bei tieferen Lufttemperaturen getrocknet werden kann, um so die Wärmeverluste weiter zu reduzieren.



4.7 Bewertung Energieverbrauch

4.7.1 Vergleich Bell-Benchmark

Zum direkten Vergleich mit den bestehenden Geflügelställen werden die Verbrauchsdaten der neusten Generation von Geflügelställen vom Typ LPC1100 mit einer Stallfläche von 1100 m² herangezogen. Der Vergleich erfolgt anhand der spezifischen Verbräuche pro Kilogramm Lebendgewicht.

	Fläche [m ²]	Wärmezuf. Total [kWh/kg _{LG}]	Heizwärme GK / WP [kWh/kg _{LG}]	Propan [kWh _u /kg _{LG}]	Elektrizität [kWh/kg _{LG}]	Endenergie [kWh/ kg _{LG}]
Bell-Benchmark	1'100	0.625	0.625	0.625	0.078	0.703
Messung	1'149	0.687	0.325	0	0.229	0.229
		+10%	-48%	-100%	+195%	-67%

Tabelle 20: Vergleich Bell-Benchmark

Dem neuen Stall wurden im Betrachtungszeitraum 10% mehr Wärme zugeführt, was sich durch die höheren Lufraten begründen lässt. Dennoch musste dank der Wärmerückgewinnung durch die Wärmepumpe nur rund halb so viel Heizwärme erzeugt werden als in konventionellen Ställen mit den Gaskanonen (GK). Insgesamt wurde der Endenergieverbrauch des Stalles um 67% reduziert, bzw. mit Berücksichtigung der PV-Anlage um 86%.

Aufgrund der höheren Lufraten waren sowohl die CO₂-Konzentration als auch die Luftfeuchtigkeit deutlich tiefer als in konventionellen Ställen (vgl. Kapitel 4.3.3), was sich positiv auf das Tierwohl auswirkt. Eine quantitative Beurteilung in Bezug auf das Tierwohl findet sich in Kapitel 4.8.

	Produktion Lebendgewicht [kg _{LG}]	Wärme WP (Rek.)+WRG [kWh]	spez. Wärmeverbrauch [kWh/kg _{LG}]
U3	44'912	35'721	0.795
U4	43'373	53'269	1.228
U5	35'382	39'360	1.112
U6	46'494	38'701	0.832
U7	44'996	24'696	0.549
U8	44'074	22'459	0.510
U9	46'669	10'234	0.219
U10	44'429	16'320	0.367
Total	350'329	240'760	0.687

Tabelle 21: Spezifischer Wärmeverbrauch (WP+WRG) pro kg Lebendgewicht nach Umtrieben



	Produktion Lebendgewicht [kg _{LG}]	Wärme WP (Rek.) [kWh]	spez. Energieverbrauch [kWh/kg _{LG}]
U3	44'912	18'969	0.422
U4	43'373	17'296	0.399
U5	35'382	17'700	0.500
U6	46'494	14'371	0.309
U7	44'996	10'603	0.236
U8	44'074	14'579	0.331
U9	46'669	8'076	0.173
U10	44'429	12'231	0.275
Total	350'329	113'826	0.325

Tabelle 22: Spezifische Heizwärme (WP) pro kg Lebendgewicht nach Umtrieben

	Produktion Lebendgewicht [kg _{LG}]	Elektrische Energie [kWh]	spez. Energieverbrauch [kWh/kg _{LG}]
U3	44'912	11'233	0.250
U4	43'373	11'979	0.276
U5	35'382	13'569	0.384
U6	46'494	11'289	0.243
U7	44'996	9'328	0.207
U8	44'074	9'174	0.208
U9	46'669	6'014	0.129
U10	44'429	7'576	0.171
Total	350'329	80'162	0.229

Tabelle 23: Spezifischer Verbrauch Elektrizität pro kg Lebendgewicht nach Umtrieben



Der spezifische Verbrauch an elektrischer Energie ohne Berücksichtigung der Wärmepumpe und des Wäschers liegt mit 0.058 kWh/kg_{LG} um 16% tiefer als bei der Referenz von 0.078 kWh/kg_{LG} beim LPC1100. Dieser Unterschied erklärt sich primär dadurch, dass beim LPC1100 der Stromverbrauch der Gaskanonen enthalten ist.

	Produktion Lebendgewicht [kg _{LG}]	Elektrische Energie (exkl. WP + Wäscher) [kWh]	spez. Energieverbrauch [kWh/kg _{LG}]
U3	44'912	2'354	0.052
U4	43'373	2'226	0.051
U5	35'382	2'408	0.068
U6	46'494	2'584	0.056
U7	44'996	2'571	0.057
U8	44'074	2'549	0.058
U9	46'669	2'643	0.057
U10	44'429	2'821	0.063
Total	350'329	20'156	0.058

Tabelle 24: Spezifischer Verbrauch Elektrizität (exkl. Wärmeerzeugung) pro kg Lebendgewicht nach Umtrieben

Die elektrische Energie zur Wärmeerzeugung umfasst den Verbrauch der Wärmepumpe, der Elektro-Heizregister und des Wäschers und macht rund 74% des gesamten Verbrauches aus.

	Produktion Lebendgewicht [kg _{LG}]	Elektrische Energie Wär- meerzeugung [kWh]	spez. Energieverbrauch [kWh/kg _{LG}]
U3	44'912	8'879	0.20
U4	43'373	9'753	0.22
U5	35'382	11'161	0.32
U6	46'494	8'705	0.19
U7	44'996	6'757	0.15
U8	44'074	6'625	0.15
U9	46'669	3'371	0.07
U10	44'429	4'755	0.11
Total	350'329	60'006	0.17

Tabelle 25: Spezifischer Verbrauch Elektrizität für die Wärmeerzeugung pro kg Lebendgewicht nach Umtrieben



4.7.2 Vergleich Anforderungen Minergie-A

Die Minergie-Anforderungen werden als spezifische Werte pro Quadratmeter Energiebezugsfläche definiert. Im Rahmen der Pilot-Zertifizierung lag der Schwerpunkt auf einer positiven Jahresenergiebilanz und dem spezifischen Heizwärmebedarf. Der Vergleich zwischen Minergie-Anforderungen und effektiven Werten ist in nachfolgender Tabelle ersichtlich.

	Energiebezugsfläche [m ²]	Heizwärmebedarf [kWh/m ²]	Energiebilanz [kWh/m ²]
Anforderung Minergie A	1'149	49.0	> 0
Effektive Werte		46.0	- 30.0

Tabelle 26: Vergleich Anforderungen Minergie-A mit effektiven Werten

Für den Heizwärmebedarf erfolgt der Nachweis rechnerisch nach SIA380/1:2016 bei Standardbedingungen für die Gebäudekategorie «Industrie», ohne Berücksichtigung der Prozesswärme. Die Vorgaben werden dank einer stärkeren Dämmung des Daches eingehalten (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Die Energiebilanz basiert hingegen auf effektiven Messwerten der elektrischen Energie und ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Ertrag der PV-Anlage und dem Verbrauch des Pouletstalls während des Betrachtungszeitraumes. Der negative Wert bedeutet, dass der Stall mehr Energie verbraucht hat als durch die PV-Anlage erzeugt wurde. Zu diesem Ergebnis tragen sowohl ein Mehrverbrauch des Stalls als auch ein Minderertrag der PV-Anlage bei.

Der Ertrag der PV-Anlage lag im Winter und während der Übergangszeit unter den Erwartungswerten gemäss Simulation. Dies lässt vermuten, dass die Beschattung durch den angrenzenden Wald in der Simulation nicht ausreichend gewichtet wurde und allenfalls Schnee über längere Zeit auf den relativ flach angeordneten Modulen liegen bleibt. Zudem erstreckt sich der Betrachtungszeitraum über 11 Monate, wobei mit September 2021 ein Monat mit relativ grossem Ertrag nicht berücksichtigt wird.

Zum Mehrverbrauch des Geflügelstalles hat hauptsächlich ein erhöhter Heizwärmebedarf geführt. Dieser ist aufgrund sehr hoher Luftwechselraten und Einschränkungen der WRG während der Übergangszeit höher ausgefallen als erwartet. Zusätzlich waren auch die Wäscherpumpe und die Abluftventilatoren des Wäschers länger in Betrieb als geplant.

Durch folgende Massnahmen soll der Energieverbrauch weiter reduziert werden:

- Reduktion Wärmeverbrauch in Endphase des Produktionszyklus durch Begrenzung der Lüftung
- Reduktion Wärmeverbrauch während Leerzeit & Aufheizbetrieb
- Drehzahlregelung Wäscherpumpe

Obschon die Energiebilanz während der ersten Betriebsphase noch nicht ausgeglichen war, zeigt das Projekt, dass es absolut realistisch ist, neue Geflügelsäle als Plusenergie-Bauten zu realisieren.

Die zusätzliche Energieeinsparung durch eine verbesserte Wärmedämmung ist im Verhältnis zu den zusätzlichen Investitionskosten moderat und sollte für eine Minergie-Zertifizierung nicht zwingend vorgeschrieben werden. Stattdessen wird vorgeschlagen, den Fokus auf einen geeigneten Grenzwert für den gewichteten Endenergieverbrauch ohne PV-Anlage zu richten. Dies würde es dem Planer erlauben, situativ den kosteneffizientesten Lösungsansatz zur Reduktion des Endenergieverbrauches zu wählen. So könnte beispielsweise in einem Grundwassergebiet eine sehr effiziente Grundwasser-



Wärmepumpe realisiert und im Gegenzug die Dämmung nach den etwas weniger anspruchsvollen Bauteil-Anforderungen gemäss geltendem kantonalem Energiegesetz ausgeführt werden.

Bei der definition des Grenzwertes ist zu beachten, dass in naher Zukunft neue Ställe zur Reduktion der Ammoniak-Emissionen zwingend mit einem Abluftwäscher ausgerüstet werden müssen, was zu einem zusätzlichen Energieverbrauch führt.

4.7.3 Vergleich Projekt Hellsau (2019)

Im Jahr 2019 wurde in Hellsau (BE) ein Geflügelstall mit einem ähnlichen Konzept in Betrieb genommen, welcher nach Minergie-A/P zertifiziert wurde. Da der Stall in Hellsau über eine Fläche von 722 m² und jener in Zimmerwald über 1149 m² verfügt, erfolgt der vergleich anhand der spezifischen Kennzahlen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche. Der Vergleich basiert auf den Angaben aus dem BFE-Schlussbericht vom 10.11.2020 (Projektnummer SI/501885-01).

Sowohl die mittlere Lufttemperatur, als auch Luftfeuchtigkeit liegen nahe beieinander. Einzig die mittlere CO₂-Konzentration lag in Zimmerwald etwas tiefer, was auf einen etwas höheren Luftwechsel hindeutet und sich auch in der Gesamtluftmenge in Tabelle 28 bestätigt.

	Einheit	Proj. Hellsau	Proj. Zimmerwald (Bell)
Mittlere Temperatur	°C	25.0	25.6
Mittlere Luftfeuchtigkeit	%rF	53.0 (Umtrieb 7)	53.4
Mittlere CO ₂ -Konzentration	ppm	1'744	1'634

Tabelle 27: Vergleich Hellsau/Zimmerwald – Stallklima

Der grosse unterschied beim Nennvolumenstrom der Lüftung liegt in den unterschiedlichen Konzepten für die Sommerlüftung, spielt jedoch für den Gesamtenergieverbrauch eine untergeordnete Rolle.

Da die WRG beim Projekt Hellsau im Sommer auch zur Vorkühlung der Aussenluft genutzt wird, fällt der Anteil der Luft, welche über die WRG geführt wird, deutlich höher aus. Diese Nutzung dürfte auch der Grund für die grössere Dimensionierung des Volumenstromes der WRG sein.

	Einheit	Proj. Hellsau	Proj. Zimmerwald (Bell)
Nennvolumenstrom Lüftung	m ³ /(h m ²)	91	151
Nennvolumenstrom WRG	m ³ /(h m ²)	30	24
Luftmenge gesamt	m ³ /m ²	129'636	158'655
Luftmenge über WRG	m ³ /m ²	95'738	76'658
Luftmenge über WRG	%	74%	48%

Tabelle 28: Vergleich Hellsau/Zimmerwald – Luftmengen / Dimensionierung WRG

Bezogen auf die Energiebezugsfläche wurde in beiden Ställen praktisch gleich viel Wärme mit der Wärmepumpe (WP) erzeugt, in Zimmerwald wurden dafür aber rund 52% mehr elektrische Energie verbraucht. Dies begründet sich durch die tiefere mittlere Leistungszahl der Luft/Wasser-WP im Vergleich zur Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister in Hellsau.



	Einheit	Proj. Hellsau (Globogal)	Proj. Zimmerwald (Bell)
WP-System	-	S/W-WP mit Erdregister	L/W-WP
Wärme WP	kWh/m ²	98	99
Elektrizität WP	kWh/m ²	26.2	39.9
mittlerer COP WP	-	3.7	2.5

Tabelle 29: Vergleich Hellsau/Zimmerwald – Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe

In Zimmerwald liegt der spezifische Verbrauch an elektrischer Energie um 55% höher als beim Projekt in Hellsau. Dieser Unterschied erklärt sich je zur Hälfte durch den Mehrverbrauch der Wärmepumpe und den zusätzlichen Verbrauch durch den Wäscher.

	Einheit	Proj. Hellsau	Proj. Zimmerwald (Bell)
Wärmepumpe + E-Heizungen	kWh/m ²	26.2	40.1
WRG (Wäscher)	kWh/m ²	-	12.1
Lüftung	kWh/m ²	4.6	9.1
Stalltechnik	kWh/m ²	14.1	8.5
Total	kWh/m²	44.9	69.8

Tabelle 30: Vergleich Hellsau/Zimmerwald – spezifischer Verbrauch elektrische Energie

Im Vergleich zum Projekt in Hellsau wurde die PV-Anlage in Zimmerwald deutlich kleiner ausgelegt, da der Schattenwurf des nahe gelegenen Waldes den Ertrag im unteren Bereich des Daches deutlich reduzieren würde (vgl. Abbildung 11). Dennoch wurde auch in Zimmerwald eine Verbrauchsabdeckung von > 100% angestrebt, welche im Betrachtungszeitraum aufgrund der höheren Verbräuche noch bei 57% lag. Entsprechende Optimierung sind vorgesehen.

	Einheit	Proj. Hellsau	Proj. Zimmerwald (Bell)
PV-Anlage Leistung	kWp	70	57
PV-Anlage Ertrag	kWh	78'049	45'681
Gesamtverbrauch	kWh	32'433	80'162
Verbrauchsabdeckung	%	241%	57%
Eigenverbrauch (mit Speicher)	kWh	25'325 (30'657)	14'565
Eigenverbrauch (mit Speicher)	%	32% (39%)	32%
Autarkie (mit Speicher)	%	78% (95%)	18%

Tabelle 31: Vergleich Hellsau/Zimmerwald – Ertrag/Eigenverbrauch PV-Anlage



4.8 Tierwohl

Eines der Projektziele war es, die Luft in den beiden Wintergärten ganzjährig mit Abwärme auf $> 10^{\circ}\text{C}$ vorzuwärmen, damit diese den Tieren ab der dritten Alterswoche 24 Stunden am Tag zur Verfügung gestellt werden können. Damit haben die Tiere nicht nur ständig Zugang zu frischer Aussenluft, sondern es steht ihnen insgesamt auch mehr Fläche zur Verfügung. Die Belegungsdichte sinkt dadurch von 13 auf 11 Tiere pro Quadratmeter.

Wie der Vergleich der Auslaufzeiten in Tabelle 32 zeigt, standen die Wintergärten den Tieren durchschnittlich während 43% der Lebenszeit zur Verfügung und wurden auch rege genutzt. Konventionelle Aussenklimabereiche hätten im gleichen Zeitraum nur während 9% der Zeit geöffnet werden müssen.

	Auslaufzeit gem. Verordnung		Auslaufzeit effektiv	
	[h]	[%]	[h]	[%]
U3	66	8%	322	38%
U4	12	1%	322	38%
U5	12	1%	228	27%
U6	18	2%	409	47%
U7	72	9%	264	31%
U8	144	17%	393	47%
U9	156	19%	490	58%
U10	144	17%	490	58%
Total	624	9%	2'918	43%

Tabelle 32: Vergleich effektive Auslaufzeiten BTSplus im Vergleich zu Auslaufzeiten gem. Verordnung Ethoprogramm BTS

Im BTSplus-Konzept sind die Tiere im Wintergarten an der frischen Luft. Dabei ist die vorgewärmte Luft für die Tiere offenbar angenehmer als die mit 8°C relativ kalte Aussenluft. Solange die Vorwärmung aktiv ist, können die Aussenschieber allerdings nicht geöffnet werden, womit die Vorgaben für die Aussenklimabereiche nicht erfüllt würden. Die aktuellen BTS-Haltungsanforderungen sind den Klimabedürfnissen der Tiere anzupassen. Es macht keinen Sinn, dass der Aussenklimabereich vollständig offen sein muss, solange noch Heizenergie zur Trocknung der Einstreu benötigt wird.

Ein messbarer Indikator für das Tierwohl sind die Fussballenveränderungen, welche primär aufgrund feuchter Einstreu entstehen. Im Schlachthof werden alle Tiere mit Fussballenveränderungen erfasst und deren relative Anzahl zusätzlich nach zwei Schweregraden gewichtet.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 33 zeigen, lag der Durchschnittswert für die Fussballenveränderungen beim BTSplus Stall bei 6.8% und somit unter dem Durchschnittswert aller Bell-Betriebe von 7.5%. Bei den Umtrieben U3 und U4 waren die Werte noch sehr hoch, da das Klima-Management in der ersten Kälteperiode nicht optimal war. Ab Umtrieb U5 wurden anschliessend durchgehend sehr niedrige Werte erzielt.



	Fussballenveränderungen (gewichtet) Vorausstellung [%]	Fussballenveränderungen (gewichtet) Ausstellung [%]
U3	12.0%	27.5%
U4	14.0%	39.0%
U5	-	0.0%
U6	0%	0.0%
U7	0%	1.0%
U8	0%	2.0%
U9	2.5%	1.5%
U10	0%	2.0%
Ø	6.8%	

Tabelle 33: Fussballenveränderungen (gewichtet) nach Umtrieb



4.9 Wirtschaftlichkeit

Die Mehrkosten (Tabelle 37) für das BTSplus Konzept gegenüber einem im gleichen Zeitraum gebauten Bell-Benchmark Konzept wurden gemäss der Baukostenabrechnung zusammengestellt und betragen rund CHF 339'392. Die Mehrkosten für die beiden isolierten Wintergärten wurden dabei nicht berücksichtigt, da diese für den Betrieb der WRG nicht notwendig sind. Da es sich um ein erstmals umgesetztes Demoprojekt handelt, gibt es insbesondere für die Wärmerückgewinnung keine Marktpreise.

Die aus den Mehrkosten resultierenden Jahreskosten, wurden unter Berücksichtigung der in Tabelle 34 aufgeführten Nutzungsdauer und einem Kapitalzins von 1% berechnet. Auch der Wartungs- und Unterhaltansatz kann Tabelle 34 entnommen werden.

	Nutzungsdauer [a]	Wartung und Unterhalt [%]
Bauhülle gem. Minergieanforderung	30	1.00%
Wärmerückgewinnung & ABL-Wäscher	10	2.50%
Wärmeerzeugung, 67kW Luft-Wasser WP	10	2.50%
Wärmeverteilung mit Bodenheizung und Rippenrohre	20	1.50%
PV-Anlage 59.50 kWp	20	1.50%

Tabelle 34: Nutzungsdauer der Gebäudehülle und Einrichtungen und der Unterhaltsansatz in Prozent der Investitionskosten

Die Energiepreise (Tabelle 35) entsprechen den gemittelten Energiepreisen für das Jahr 2021.

	Preis [CHF/MWh]
Propangas	117
Elektrizität (Netzbezug)	225
Elektrizität 32% PV / 68% Netz	184
Elektrizität (Netzeinspeisung)	95

Tabelle 35: Energiepreise 2021

Der elektrische Energieverbrauch wird in Kapitel 4.2.1 detailliert erläutert und beträgt 80 MWh/a.

Geht man davon aus, dass zukünftig ein Ammoniakwäscher zum neuen Standard für Neubauten wird, dann wird dies für das Bell-Benchmark Konzept, in der Ausführung mit WRG analog dem BTSplus-Konzept, Mehrkosten von CHF 96'339 verursachen und 17 MWh mehr Strom benötigen. Dies entspricht fast einer Verdoppelung des Stromverbrauchs gegenüber heute.

Gegenüber dem heutigen Bell-Benchmark Konzept inkl. Berücksichtigung eines Ammoniakwäschers, können durch das BTSplus Konzept jährlich CHF 15'818 Energiekosten (Tabelle 36) eingespart werden.



	Energiebedarf [MWh/a]		Energiekosten [CHF/a]	
	BTSplus	Bell-Benchmark + Wäscher	BTSplus	Bell-Benchmark + Wäscher
Heizung (WP, KVS ¹)	49	161	8'994	18'915
Ammoniakwäscher	17	17	3'116	3'808
Tankmiete	-	-	-	800
Lüftung	5	18	857	4'099
Stalleinrichtung	10		1'791	
PV, Einspeisung ins Netz			-2'956	-
Total	80	196	11'803	27'621
Differenz				15'818

Tabelle 36: Vergleich des Energiebedarf und Energiekosten pro Jahr des BTSplus Konzepts vs. Bell-Benchmark + Wäscher

Die zur Erfüllung der Minergievorgaben zusätzlich getätigten Investitionen in die Gebäudedämmung haben CHF 176'185 gekostet. Dank des Förderprogramms des Amts für Umweltkoordination des Kantons Bern von CHF 116'700 konnten diese Zusatzvorgaben überhaupt getätigt werden. Durch die zusätzliche Dämmung kann bei konventionellen Ställen ohne WRG 20'000 kWh/a Heizwärme (vgl. Kapitel 4.4) und somit jährlich CHF 2'344 für Brennstoff eingespart werden. Über die Nutzungsdauer von 30 Jahren, können die restlichen durch die Bauherrschaft erbrachten Mehrkosten von CHF 59'485 (CHF 2'280 / a) eingespart werden.

Die Mehrkosten für die Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpe, Wärmerückgewinnung und der zusätzlichen Wärmetauscherfläche für die Wärmeverteilung sind mit CHF 227'522 immens und erhöhen die jährlichen Produktionskosten um CHF 21'409. Diese Mehrkosten lassen sich durch die Energiekosteneinsparung bei den aktuellen Energiekosten (Tabelle 35) nicht amortisieren. Mit Berücksichtigung der zusätzlichen Unterhaltskosten betragen die jährlichen nicht-amortisierbaren Mehrkosten CHF 19'733.

Würde nur die Wärmerückgewinnung für CHF 96'339 eingebaut, dann würden die jährlichen nicht amortisierbaren Mehrkosten immer noch CHF 6'157 betragen.



	Mehrkosten vs. Bell-Benchmark Konzept [CHF]	Jahreskosten [CHF/a]
Mehrkosten Bauhülle Minergie ²	59'485	2'280
Mehrkosten Lüftung, WRG exkl. Luftwäscher ³	96'339	10'116
Mehrkosten Wärmeerzeugung	81'563	8'564
Mehrkosten Wärmeverteilung	49'619	2'729
PV-Anlage ⁴	52'385	2'881
Wartung/Unterhalt/Servicevertrag		8'981
Total	339'392	35'551
Energiekosteneinsparung geg. Bell-Benchmark		-15'818
Nicht-amortisierbare Mehrkosten		19'733

Tabelle 37: Mehrkosten BTSplus Konzept vs. Bell-Benchmark Konzept und resultierende nicht amortisierbare Mehrkosten (Zins 1%)

² Mehrkosten der Wärmdämmung: CHF 176'185, Minergiebeitrag CHF 116'700

³ Mehrkosten inkl. Wäscher: CHF 192'679, Mehrkosten nur für WRG: CHF 96'339

⁴ PV-Anlage: CHF 72'835, Einmalvergütung (EIV) CHF 20'450



5 Schlussfolgerung und Fazit

Im Rahmen des Demonstrationsprojektes konnten sowohl die Funktionalität als auch das energetische Einsparpotenzial und der positive Betrag zum Tierwohl durch das Stallkonzept BTSplus praktisch nachgewiesen werden.

Die Nutzung eines Wäschers zur Rückgewinnung von Abwärme aus der Stallabluft hat sich als praktikabel erwiesen, obwohl im ersten Betriebsjahr auch gewisse Einschränkungen erkannt wurden. Die getrennte Führung der ZUL und ABL im Kreislaufverbundsystem erfüllt die hohen hygienischen Anforderungen der Bell Schweiz AG. Die Kombination von Ammoniakwäscher und Wärmerückgewinnung ist für künftige Neubauprojekte mit entsprechenden Emissionsvorgaben realistisch und birgt insbesondere bezüglich Investitionskosten grosses Synergiepotenzial.

Ebenfalls erfreulich ist, wie gut die beiden Wintergärten durch die Tiere genutzt wurden. Dank der Vorwärmung der Aussenluft auf mindestens 10°C konnten die Auslaufklappen auch im Winter ab dem 22. Tag, bzw. teilweise sogar ab dem 15. Tag, rund um die Uhr geöffnet bleiben. Damit hatten die Tiere während 43% der Zeit Auslauf, wo dies bei einem konventionellen Aussenklimabereich rund 9% der Zeit gewesen wäre.

Mit der Vorwärmung der Aussenluft über die WRG konnte in der zweiten Hälfte der Produktion mehr gelüftet und entsprechend tiefere Luftfeuchtigkeit im Stall erzielt werden. Dass die Qualität der Einstreu besser war, spiegelt sich in der geringen Zahl der Fussballenveränderungen wider. Die Vorwärmung der Aussenluft ist allerdings nur bei geschlossenen Aussenklappen möglich, wodurch die WRG durch die aktuellen BTS-Haltungsvorgaben in dieser Phase noch etwas eingeschränkt wird.

In Bezug auf den Heizwärmebedarf wurde mit dem BTSplus Konzept im Vergleich zu einem konventionellen Stall der neuesten Generation bisher eine Reduktion von 48% erzielt, womit das ambitionierte Ziel von 80% nicht erreicht wurde. Gründe dafür sind Einschränkungen beim Betrieb des Wäschers, ein unerwartet hoher Heizbedarf für die Vorwärmung und ein energetisch noch nicht optimales Klimamanagement. In allen genannten Bereichen sind noch Optimierungen möglich.

Nebst dem zusätzlichen Stromverbrauch für die Wärmepumpe aufgrund des höheren Heizwärmebedarfes wurde auch durch die Umwälzpumpe und die Abluftventilatoren des Wäschers mehr Stromverbrauch als erwartet. Mit dem gleichzeitigen Minderertrag der PV-Anlage wurde beim Demonstrationsprojekt noch keine positive Energiebilanz erzielt, dies ist für künftige Projekte mit optimiertem Verbrauch und einer entsprechend ausgelegten PV-Anlage aber absolut realistisch.

Das anspruchsvolle Stallklima (Staub, Ammoniak, etc.) und der grosse Luftvolumenstrom, welcher zur Trocknung der Geflügelställe notwendig ist, führt zu hohen Anlagekosten. Speziell der Wäscher mit Kreislaufverbundsystem ist aufgrund der hohen Investitionskosten noch nicht marktreif. Das BTSplus-Konzept kann bei dem bereits sehr tiefen jährlichen Energiekosteneinsparpotential von CHF 15'818 nur mit einer gleichzeitigen finanziellen Förderung wirtschaftlich umgesetzt werden.

Ohne betriebliches Risiko kann die Investition in die Gebäudehülle gem. Minergie-A realisiert werden. Durch die lange Nutzungsdauer und dank der Fördergelder der Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion des Kantons Bern ist dies zumindest für Projekte im Kanton Bern prüfenswert. Die dazu notwendigen Rahmenbedingungen sind mit der Minergie-Zertifizierungsstelle Kanton Bern zu prüfen.

Insgesamt konnte durch das Projekt nicht nur die Funktionalität eines neuen Konzeptes aufgezeigt, sondern auch wichtige Konzept- und Auslegungsgrundlagen für die nächste Generation von energie-neutralen Geflügelställen gewonnen werden.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Bell Schweiz AG hat bereits zwei weitere Pilotprojekte geplant, bei denen multiplizierbare Stallkonzepte für den schweizerischen und österreichischen Markt erprobt werden sollen. Die Geflügelställe der neuen Generation sollen CO₂-neutral beheizt werden und gleichzeitig die künftigen Vorgaben zur Reduktion der Ammoniakemissionen erfüllen. Das in diesem Bericht dokumentierte Demonstrationsprojekt bildet dabei eine wichtige Grundlage für das Konzept und die Auslegung der neuen Systeme.

In Bezug auf den Energieverbrauch werden insbesondere beim Stromverbrauch der Abluftventilatoren zum Wäscher und der Wäscherpumpe Verbesserungen angestrebt. Zudem soll zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Einsatz alternativer Heizsysteme, welche eine hohe Vorlauftemperatur erlauben, wie Holzpellets oder Biogas geprüft werden.

7 Kommunikation

Im BFE-Magazin energieplus vom 27.10.2021 wird das Projekt vorgestellt.