

Bienenphysik

Auf der Suche nach dem guten Stockklima

Bernhard Heuvel, Oktober 2013

Grunddaten

Beute

Bei der hier berechneten Beute handelt es sich um eine Warrébeute mit zwei Zargen (übliche Überwinterungskonfiguration) mit einem Metaldeckel, Innendeckel, zwei Zargen und einem offenen Boden. Zwischen Außen- und Innendeckel ist eine Dämmung angebracht.

Die Abmessungen der Innenseite einer Zarge ist: 30 x 30 x 20 cm (B x T x H). Das Holz der Seitenwand ist 2,5 cm stark.

Folgende Wärmedurchgangskoeffizienten ($W/(m^2 \cdot K)$) der Beutenteile wurden mit Hilfe des Werkzeuges u-wert.net ermittelt.¹

| | U-Wert, Φ $W/(m^2 \cdot K)$ | Fläche A in m^2 |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Φ Dach | 0,69 | 0,09 |
| Φ Seitenwände, ohne/mit Dämmung | 0,44/59,62 | 0,48 |
| Φ Boden (offen) | 2,21 | 0,09 |
| | | Gesamtfläche innen: 0,66 m^2 |

Bienen

Der Bien hat eine Dauerheizleistung von 20 W. (20 Ws/J) Das entspricht 0,00000555556 kWh. Pro Sekunde verbraucht eine einzelne Biene 0,000000018 kWh um auf 40°C zu kommen.² Rein rechnerisch werden nur 308 Bienen für 20 Watt Leistung benötigt – die aber natürlich abgelöst werden müssen.

Klima

Für den Sommer sind 26°C [299 Kelvin] Außentemperatur und für den Winter -10°C [263 K]. Außentemperatur als Rechengrundlage herangezogen. Zur Vereinfachung werden 100 % rel. Luftfeuchtigkeit der Außenluft angenommen. Der Kohlenstoffdioxid der Außenluft wird mit 0,55 g/kg tr. Luft angenommen.

Als Arbeitsvorlage der nachfolgenden Berechnungen diente die Anleitung „Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in geschlossenen Ställen“ der Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft e.V.³

1 <http://www.u-wert.net>

2 http://www.hobos.de/fileadmin/Presse/greenfacts_Honigbiene.pdf

3 <http://www.ael-online.de/inhalt/fachinfo/download/heft17.pdf>

Wärmebilanz

Im Idealfall ist die Wärmebilanz des Bienenstockes ausgeglichen – der durch die Bienen (in der Dauerheizleistung) erzeugte und zugeführte Wärmestrom ist gleich der an die Umgebung des Bienenstockes abgeführte Wärmestrom.

$$\Phi_{zu} = \Phi_{ab} \text{ Idealfall einer ausgeglichenen Wärmebilanz.}$$

Bedeutet: Bei einer Dauerheizleistung des Biens von 20 Watt beträgt der abgeleitete Wärmestrom ebenfalls 20 Watt.

Alles darüber hinausgehende würde eine vermehrte Heizleistung und damit Kraftaufwand des Biens bedeuten. Ein Mehrverbrauch des eingelagerten Winterfutters geht damit auch einher.

Der Bienenstock ist unbeheizt – die Bienen sind die einzige Wärmequelle. Daher:

$$\Phi_{zu} = \Phi_{Bienen} = 20 \text{ W}$$

Der abgeführte Wärmestrom geht im Bienenstock auf mindestens zwei Wegen vonstatten – einmal über die Belüftung (Lüftungswärmestrom) und einmal über die Hülle des Bienenstockes (Transmissionswärmestrom). Daher:

$$\Phi_{ab} = \Phi_L + \Phi_T$$

Wobei sich der gesamte Transmissionswärmestrom aus den Teiltransmissionswärmeströmen durch die Hüllflächen, bestehend aus Deckel, Seitenwänden und Boden zusammensetzt.

$$\Phi_T = \Phi_{Deckel} + \Phi_{Seitenwände} + \Phi_{Boden}$$

Sprich: Die Wärme geht über die ein- und ausgeatmete Luft und über die Wände verloren.

Berechnung des Lüftungswärmestromes im Winter

Nach den Vorgaben der oben genannten Anleitung, werden für den Bienenstock die Wasserdampf- und die Kohlendioxidbilanz genutzt, um den Luftmassenstrom zu berechnen. Der größere Wert der beiden Berechnungen (Wasserdampf vs. Kohlendioxid) geht dann in die Berechnung des Lüftungswärmestromes ein.

Luftmassenstrom nach Wasserdampfbilanz

Erstaunlicherweise fand sich bei einer ersten Recherche keine Literatur, die Auskunft über die Menge des von der Wintertraube ausgestoßenen Wasserdampfes geben könnte. So bleibt nicht viel anderes übrig, als den entstehenden Wasserdampf selbst herzuleiten. Hier wurde ein Verbrauch an Winterfutter pro Stunde bei -10°C Außentemperatur $\delta_{aeWinter}$ herangezogen, der bei 5,76 g/h liegt. Die Nebenrechnung dazu findet sich ganz unten. Circa 20 % des Winterfutters besteht aus Wasser, das nach der Verstoffwechslung die bei -10°C Außentemperatur fest sitzende Wintertraube verlassen muß.

Daraus ergibt sich der Wasserdampfmassenstrom des Bien: (im Winter)

$$\dot{x}_{\text{Bien}} = 5,76 \text{ g/h} * 0,2 = 1,152 \text{ g/h}$$

Laut Anleitung errechnet sich der Luftmassenstrom nach Wasserdampfbilanz, indem der Wasserdampfmassenstrom des Bien durch den Wert der Subtraktion von Wasserdampfgehalt der Stockluft x_i und den Wasserdampfgehalt der Außenluft x_a . (In g/kg tr. Luft.)

Luftmassenstrom nach Wasserdampfbilanz

$$\dot{m}_x = \frac{\dot{x}_{\text{Bien}} 1,152 \text{ g/h}}{x_i 29,64 - x_a 1,62 \text{ g/kg tr. Luft}} = \frac{1,152 \text{ g/h}}{28,02 \text{ g/kg tr. Luft}} \approx 0,041113 \text{ kg tr. Luft/h}$$

Die Werte x_i und x_a sind der Tabelle 13 der Anleitung entnommen. Der Wert x_i wurde noch mit 0,8 multipliziert, da im Bienenstock 80 % rel. Luftfeuchte angenommen werden, der Wert aus der Tabelle ist gültig für 100 % rel. Luftfeuchte. Aus 37,05 g/kg tr. Luft (bei 35°C) wurden so 29,64.

Der errechnete Luftmassenstrom nach Wasserdampfbilanz von 0,041113 kg tr. Luft/h entspricht einen benötigten Luftaustausch von etwa 31 Liter pro Stunde.

Das Volumen wird errechnet, indem der errechnete Luftmassenstrom durch die Luftdichte bei -10°C, die laut Tabelle bei 1,32 kg/m³ liegt, geteilt wird. Das ergibt das folgende Volumen:

$$\dot{V} = \frac{0,041113 \text{ kg tr. Luft/h}}{1,32 \text{ kg/m}^3} \approx 0,031146 \text{ m}^3/\text{h} \approx 31 \text{ Liter/h}$$

Laut der Anleitung ist der errechnete Wert wie erwartet kleiner, als es der sonst für die Luftthygiene üblicherweise veranschlagte Luftwechselfaktor von 1,8-3 verlangt. Eine Warré-Beute mit zwei Zargen hat etwa 36 Liter Gesamtvolumen. Das 1,8- bis 3-fache einer Luftwechselrate würde man erwarten, also 65-108 Liter pro Stunde. (Wobei vom Gesamtvolumen die Waben und Bienen abgezogen werden müßten.)

Luftmassenstrom nach Kohlendioxidbilanz

Der zweite Ansatz ist über die Kohlendioxidbilanz. Glücklicherweise ist die CO₂-Abgabe einer Biene im Ruhezustand aus Studien bekannt und mit 5,4 Nanoliter s⁻¹ angegeben.⁴ Das ergibt 324 nl/min und 19.440 nl/h. Bei einer angenommenen Wintertraube aus 10.000 Bienen ergibt sich hier eine stündliche Abgabe von 0,1944 l/h. Da 1 Liter CO₂ 1,96 g wiegen, wird eine Masse von 0,38102 g/h ausgeatmet.

Die Formel wurde daraufhin mit diesem Wert besetzt. Die Außenluft hat einen festgesetzten Wert für den Kohlenstoffdioxidgehalt und der zulässige Gehalt für die Stallluft kann auch nur gültig für den Bienenstock sein. So ergibt sich folgende Rechnung für den...

Luftmassenstrom nach Kohlendioxidbilanz

$$m_{\text{KBeute}} = \frac{0,38192 \text{ g/h}}{5,0 - 0,55 \text{ g/kg Luft}} = 0,38102 \frac{\text{g/h}}{4,45} \text{ g/kg Luft} \approx 0,08562 \text{ kg Luft/h}$$

Daraus errechnen wir wieder das Volumen über die Luftdichte bei -10°C und kommen so auf:

$$\dot{V} = \frac{0,0862 \text{ kg Luft/h}}{1,32 \text{ kg/m}^3} \approx 0,06486 \text{ m}^3/\text{h} \approx 65 \text{ Liter pro Stunde}$$

Mit diesem Wert kommen wir der weiter oben gestellten Forderung nach einem Luftwechsel mit einem Volumen von 65-108 Litern pro Stunde schon sehr nahe!

Da der Wert des Luftmassenstroms nach Kohlendioxidbilanz höher ist, als der Wert des Luftmassenstroms nach Wasserdampfbilanz, verwenden wir ihn zur nachfolgenden Berechnung des Lüftungswärmestromes.

Lüftungswärmestrom im Winter

Der Lüftungswärmestrom wird berechnet, indem der oben berechnete Luftmassenstrom multipliziert wird mit der spezifische Wärmekapazität trockener Luft und dem Delta der Außen- und Innentemperatur in Kelvin. (308 K - 263 K = 45 K)

Lüftungswärmestrom nach Luftmassenstrom Wasserdampf

$$\Phi_{\text{Lwd}} = 0,16445 \text{ kg tr. Luft/h} * 0,28 \text{ Wh/K kg tr. Luft} * 45 \text{ K} \approx 2 \text{ W}$$

Lüftungswärmestrom nach Luftmassenstrom Kohlendioxid

$$\Phi_{\text{Lwd}} = 0,08562 \text{ kg tr. Luft/h} * 0,28 \text{ Wh/K kg tr. Luft} * 45 \text{ K} \approx 1 \text{ W}$$

Der Lüftungswärmestrom fordert vom Bien also eine Leistung von 1-2 Watt bei einer Außentemperatur von -10°C.

4 Respiration of resting honeybees, Helmut Kovac,^a Anton Stabentheiner,^a Stefan K. Hetz,^b Markus Petz,^a and Karl Crailsheim, J Insect Physiol. 2007 December; 53(12): 1250–1261.

Berechnung des Transmissionswärmestromes im Winter

Der Wert des Transmissionswärmestromes setzt sich aus der Summe der Bauteile der Beute ab, die spezifische Wärmedurchgangskoeffizienten und Flächen aufweisen. Hier zur Wiederholung die anfangs eingestellte Tabelle.

| | U-Wert, Φ W/(m ² *K | Fläche A in m ² |
|---|-------------------------------------|----------------------------|
| Φ Dach | 0,69 | 0,09 |
| Φ Seitenwände, ohne/mit Dämmung | 0,44/59,62 | 0,48 |
| Φ Boden (offen) | 2,21 | 0,09 |
| Gesamtfläche innen: 0,66 m ² | | |

Es gilt also die Teiltransmissionswärmeströme zu berechnen und dann zusammenzuführen. Dabei wird für jedes Teil der U-Wert mit der Fläche und dem Delta der Außen- und Innentemperatur multipliziert. Es wird von einer Winteraußentemperatur -10°C ausgegangen.

Berechnung Dach (gedämmt)

$$\Phi_{Dach} = 0,69 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) * 0,09 * 45 \text{ K} \approx 2,8 \text{ Watt}$$

Berechnung Seitenwände (gedämmt)

$$\Phi_{Seitenwände} = 0,44 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) * 0,48 * 45 \text{ K} \approx 9,5 \text{ Watt}$$

Berechnung Seitenwände (ungedämmt)

$$\Phi_{Seitenwände} = 2,76 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) * 0,48 * 45 \text{ K} \approx 59,6 \text{ Watt}$$

Berechnung Boden (hoher Boden, offen)

$$\Phi_{Boden} = 2,21 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) * 0,09 * 45 \text{ K} \approx 8,95 \text{ Watt}$$

Übersicht Transmissionswärmestrom

| | Fläche A in m ² | Watt |
|--------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Φ Dach | 0,09 | 2,8 |
| Φ Seitenwände, ohne/mit Dämmung | 0,48 | 59,6/9,5 |
| Φ Boden (offen) | 0,09 | 8,95 |
| Gesamt | 0,66 m ² | 21,25 Watt/14,17 |

Bereits aus der Teiltransmissionswärmeströmen ergibt sich, daß bei -10°C die Komfortzone des Biens verlassen wurde, da die Gesamttransmissionswärmeströmung mit ~21 Watt schon über den angesetzten 20 Watt Leistung liegen. Vor allem, wenn die Seitenwände mit der größten Fläche ungedämmt bleiben. Ohne Dämmung ist auch eine Tauwasserbildung an den Innenseiten der Beute zu erwarten. Des Weiteren zeigt sich, daß der offene Boden trotz vergleichsweise kleiner Fläche dem Bien eine hohe Leistung abverlangt.

Gesamtwärmestrombetrachtung und Wärmebilanz

Nachdem sowohl Lüftungswärmestrom und Transmissionswärmestrom feststehen, können sie zu einer Gesamtbetrachtung zusammengezogen werden. Nochmal: hier für den Fall der Wintertraube und bei -10°C Außentemperaturen berechnet.

$$\Phi_{\text{Bienenstock}} = \Phi_{\text{Tges}} 21,25 \text{ W} + \Phi_{\text{L}} 1,07 \text{ W} = 22,32 \text{ Watt}$$

Der Wärmeabfluß liegt mit 22,32 Watt also über der Dauerheizleistung des Bien, er muß bei dieser Konstellation mehr Leistung erbringen und kann das – da über der Dauerheizleistung liegend – vermutlich nicht dauerhaft. Hier ist also nachzubessern, sinnvollerweise über eine Dämmung der Seitenflächen und des Bodens.

Mit ungedämmten Seitenwänden liegt der Gesamtwärmestrom bei knapp 61 Watt! Hier muß der Bien das Dreifache der Dauerheizleistung aufbringen. Eine zusätzliche Belastung für den Bien. Solange genug Bienen und genug Honig vorhanden sind und es nicht allzu-viele Tage mit unter -10°C sind, wird er es wohl schaffen – aber zu welchem Preis?!

Honig und Wärme

Ein Milligramm Honig enthält 12,77 Joule. Eine Dauerheizleistung von 20 Watt bedeutet, daß in jeder Sekunde 20 Watt geleistet werden, also 20 Wattsekunden oder: 20 Joule. Das sind rund 1,6 mg oder 0,0016 g Honig in jeder Sekunde, die dafür vom Bien benötigt werden. Wohlbemerkt bei einer gedämmten Beute und einer Außentemperatur von -10°C .

0,0016g /Sekunde
0,096g /Minute
5,760g /Stunde
138g /Tag
967,68g /Woche
3.870g /Monat

Bei -10°C an 30 Tagen bräuchten die Bienen bei 20 Watt Dauerheizleistung ca. 4 kg Honig/Winterfutter im Monat. Zum Glück sind unsere Winter nicht ganz so hart und die richtig kalten Frosttage beschränken sich auf wenige Tage oder Wochen.

Bei $+5^{\circ}\text{C}$ verringert sich die Temperaturamplitude außen/innen und damit die K-Zahl in der Formel bei der Berechnung der Transmissionswärmeströme.

| $+5^{\circ}\text{C}$ | Fläche A in m^2 | Watt |
|---------------------------------|--------------------------|------------|
| Φ Dach | 0,09 | 1,863 |
| Φ Seitenwände, mit Dämmung | 0,48 | 6,336 |
| Φ Boden (offen) | 0,09 | 5,967 |
| Gesamt | 0,66 m^2 | 14,17 Watt |

Der Futtermittelverbrauch senkt sich bei diesen Außentemperaturen ($+5^{\circ}\text{C}$) auf ~ 2,9 kg pro Monat. Und bei diesen Temperaturen befindet sich der Bien auch voll in der Komfortzone (mit Dämmung an den Seiten). Ohne Dämmung muß er immer noch ~ 40 Watt leisten.

Und nun?

Die Berechnungen zeigen ganz deutlich, daß eine vernünftig ausgeführte Dämmung den Bienen dabei hilft, in der Komfortzone ihrer Dauerheizleistung von 20 Watt zu bleiben. Leben statt Überleben.

Offen sind für mich die Fragen der richtigen Belüftungsart. Wie tausche ich die errechneten 65 Liter Luft pro Stunde auf die günstigste Weise? Der offene Boden ist für mich ein großes Loch, in dem viel Wärme verloren geht, trotz vergleichsweise kleiner Fläche zur Gesamtfläche. Ein stetiger aber langsamer Strom an Luft? Querlüftung?

Das Wachs der Waben wird den Bienen wie eine Wärmeflasche helfen, denn es stellt eine Art Latentwärmespeicher dar.⁵ Jeder, der den Finger mal in den Futterkranz im Winter gesteckt hat, weiß, wie warm der Honig dort, direkt über den Bienen ist. Aber es zögert den Wärmestrom nur hinaus und verhindert ihn nicht ganz. Doch was taugt es als Dämm- oder Isoliermaterial?

Die richtige Lüftung aber, die will noch errechnet werden. Das nächste Projekt!

5 <http://de.wikipedia.org/wiki/Latentw%C3%A4rmespeicher>