

Schlussbericht, 22. Dezember 2017

Energieoptimierte Gewächshausentfeuchtung

Marktanalyse von Entfeuchtungssystemen für Gewächshäuser

Mit Unterstützung von



Verband Schweizer Gemüseproduzenten
Union maraîchère suisse
Unione svizzera produttori di verdura

Jardin Suisse

Unternehmerverband Gärtner Schweiz
Associazione svizzera imprenditori giardinieri
Association suisse des entreprises horticoles



energieschweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Finanziell unterstützt wurde die Studie durch die Verbände Jardin Suisse (Unternehmerverband Gärtner Schweiz) und VSGP (Verband Schweizer Gemüseproduzenten). Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Autor

Martin Steiger, DM Energieberatung AG, Paradiesstrasse 5, 5600 Brugg

Versions-Nr.	Datum	Verfasser	hauptsächliche Änderungen
1.0	22.12.2017	Martin Steiger	Erstellung
1.1	20.02.2018	Martin Steiger	div. kleine Korrekturen und Anpassungen ohne Änderung am Inhalt

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	2
2	Ausgangslage und Zielsetzung	4
3	Wärme und Feuchtigkeit im Gewächshaus	5
4	Marktanalyse.....	7
4.1	Umfang und Grenzen der Marktanalyse	7
4.2	Wärmepumpen Entfeuchter	8
4.3	Hygroskopische Entfeuchtung.....	11
4.4	Kontrollierte Lüftung	16
4.5	Vergleich der Systeme	23
5	Fazit	26
6	Anhang (Literaturanalyse Agroscope).....	27

1 Management Summary

Die Marktanalyse zu Entfeuchtungssystemen für Gewächshäuser in der Schweiz zeigt auf:

- Erste Installationen erfolgten erst in den letzten drei Jahren.
- Es sind erst auf ca. 10 Betrieben solche Systeme im Einsatz.
- Davon sind acht Anlagen auf grossen Gemüsebaubetrieben im Einsatz oder im Bau.
- Diese Gemüsebaubetriebe bauen die Variante AVS (kontrollierte Lüftungen) ein.
- Die bisher beobachteten Wärme Einsparungen bleiben hinter den Herstellerangaben zurück.

Daher ist aus rein wirtschaftlicher Sicht (Amortisation über Energieeinsparung) eine Investition derzeit nicht sinnvoll. Die parallel durchgeführte Literaturanalyse von Agroscope¹ (Bericht im Anhang) kommt zum selben Schluss. Dieses allgemeine Fazit muss aber relativiert werden:

- Die Datenlage für Entfeuchtungssysteme in Schweizer Gewächshäusern ist grundsätzlich noch klein. Es gab bisher keine systematischen Messungen auf Produktionsbetrieben. Auch wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema sind gemäss Literaturanalyse von Agroscope nicht viele vorhanden.
- Die Gewächshausproduzenten sehen den Hauptvorteil dieser Systeme in erster Linie in einer verbesserten Kulturführung (verbesserter Ertrag und Qualität, weniger Krankheitsdruck). Der erwartete Hauptnutzen liegt nicht in der Energieeinsparung, diese kommt aber klar an zweiter Stelle. Gemäss Literaturanalyse von Agroscope sind bisher keine eindeutigen Vor- oder Nachteile bezüglich Ertrag und Qualität bekannt.
- Die Herstellerangaben beziehen sich häufig auf Beispiele von Betrieben in Ländern, wo intensiver produziert wird und/oder ein kälteres Klima herrscht als in der Schweiz. Häufig sind die Schweizer Gewächshäuser auch auf einem besseren energetischen Stand (Gebäudehülle). Zudem wird in der Schweiz eine verhältnismässig tiefe relative Luftfeuchtigkeit gewählt als Prävention von Pilzkrankheiten, anstatt Pflanzenschutzmittel (Fungizide) einzusetzen. In Praxisbeispielen aus Holland werden die Gemüsekulturen häufig künstlich belichtet, was in der Schweiz bis heute nicht praktiziert wird. Auch dies hat einen Einfluss auf den Nutzen eines Entfeuchtungssystems. Aus all diesen Gründen sind Ergebnisse aus Untersuchungen von Entfeuchtungssystemen auf ausländischen Betrieben nicht ohne weiteres auf die Schweiz übertragbar.
- Die aktuell tiefen Brennstoffpreise erschweren eine Amortisation durch Energieeinsparungen.
- Die Gewächshausproduzenten stimmen mit den Systemlieferanten überein, dass mit dem Einsatz von Entfeuchtungssystemen die Kultivierung angepasst werden muss. Dies hat eine Lernkurve zur Folge, in den ersten Jahren werden die Systeme nicht optimal betrieben.
- Um das Optimum aus einem Entfeuchtungssystem bezüglich Wärmeeinsparung heraus zu holen, müssen auf dem Betrieb das entsprechende Wissen und die Erfahrung beim Personal vorhanden sein bzw. die zeitliche Kapazität, um sich dieses Wissen anzueignen (Stichworte Temperaturintegration, Einsatz Energieschirme, etc.).

¹ *Dehumidification of greenhouses, C. Gilli & S. Eberle, Agroscope, December 2017*

Der nächste Schritt muss nun sein, dass im Rahmen dieser Vorstudie erarbeitete Wissen zu den Entfeuchtungssystemen für die Gewächshausbranche verfügbar zu machen. Obwohl erst wenige Daten vorhanden sind, können erste Empfehlungen für die Betriebe abgeleitet werden:

- Für welche Betriebe eignen sich welche Entfeuchtungssysteme?
- In welchem Bereich liegen realistische Einsparungen von Heizenergie?
- Wie werden diese Systeme aus energetischer Sicht am besten betrieben?

Die energieintensive Entfeuchtung von feuchter Luft ist in einer Vielzahl von Prozessen in verschiedenen Branchen eine Herausforderung. Erkenntnisse aus dem Gewächshausbereich können daher auch wertvollen Input für sektorübergreifende Lösungsansätze bieten.

2 Ausgangslage und Zielsetzung

In geheizten Gewächshäusern geht durch das klassische Entfeuchten durch Öffnen der Energieschirme und der Belüftungsfenster viel Energie in Form von Wärme verloren. Diese Wärme wird heute noch überwiegend mit den fossilen Brennstoffen Heizöl und Erdgas erzeugt. Die Grössenordnung der Verluste durch Lüften bewegt sich je nach Art und Zustand des Gewächshauses, der produzierten Kultur und der Anbauperiode bei rund 10 bis 35% des Wärmebedarfes². Neue Gewächshäuser sind luftdichter als früher und verfügen über eine bessere Gebäudehülle mit weniger Wärmeverlusten. Auch bestehende Gewächshäuser können mit geeigneten Massnahmen die Wärmeverluste über die Gebäudehülle deutlich reduzieren. Die Relevanz der Lüftungsverluste steigt dadurch weiter an. Der jährliche Brennstoffverbrauch aller in Frage kommenden Gewächshäuser in der Schweiz beläuft sich auf rund 460 GWh³. Bei einem angenommenen Wärme-Einsparpotenzial von 10% dank geeigneten Entfeuchtungssystemen in der ganzen Branche beträgt die jährliche Einsparung 46 GWh. Das entspricht einem jährlichen CO₂-Reduktionspotenzial von rund 10'000 Tonnen.

Diese Systeme haben sich bisher auf dem Schweizer Markt nicht durchgesetzt. Gründe sind einerseits die hohen Anschaffungskosten und andererseits fehlen Erfahrungswerte, inwiefern sich die Angaben der System Anbieter bezüglich Energieeinsparung und sonstiger Vor- und Nachteile für Schweizer Verhältnisse übertragen lassen. Zudem muss das Gewächshausunternehmen auch bereit sein, sich auf eine neue Art des Kultivierens einzulassen, die mit dem Einsatz eines Entfeuchtungssystems einhergeht. Auch dies ist ein unternehmerisches Risiko und verzögert tendenziell die Anschaffung einer neuen Technologie. Trotzdem wurden in der Schweiz seit dem Jahr 2015 in einigen Ersatzneubauten von Gewächshäusern solche Systeme integriert. Ob und wieviel Energie tatsächlich dank diesen Systemen eingespart wird, kann heute noch nicht gesagt werden. Gründe:

- Die Ersatzneubauten sind per se (auch wegen verbesserter Gebäudehülle und Klimasteuerung) energieeffizienter als die alten Bauten.
- Mit neuen Gewächshäusern wird tendenziell intensiver kultiviert. Pro eingesetzte Energie wird also mehr Ertrag und/oder eine bessere Qualität erzielt, absolut gesehen aber wenig oder gar keine Energie eingespart
- Der Wärmebedarf einzelner Abteile der Gewächshäuser wird nicht separat gemessen (keine Wärmehähler). Er kann lediglich abgeschätzt werden mit Erfahrungswerten und der Hilfe von Softwaresimulationen und Daten aus dem Klimacomputer. Ein Vergleich von zwei Abteilen, die bis auf ein Entfeuchtungssystem praktisch identisch sind, ist somit nicht möglich.
- Heute werden verschiedene Sorten der gleichen Kultur (Beispiel: Tomaten) in benachbarten Abteilungen (Klimazonen) produziert. Diese haben jeweils andere Anforderungen an das Klima. Dies erschwert ebenfalls einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Abteilen mit und ohne Entfeuchtungssystem, auch wenn sonst alles identisch wäre und die Wärmeverbräuche separat gemessen würden.
- Lernkurve: Die Pioniere in der Schweiz, die solche Systeme bereits einsetzen, sagen selber, dass sie noch in der Lernphase sind und die Systeme noch nicht optimal genutzt werden. Höchste Priorität hat die Gesundheit der Kulturen und ein hoher Ertrag, die Optimierung der Energieeffizienz folgt erst später.

Was derzeit fehlt ist somit eine aussagekräftige Messung der Energieverbräuche, der Qualität und des Ertrages der Kulturen in Gewächshäusern, die abgesehen von der Methode der Entfeuchtung identisch sind. Bevor eine solch aufwändige Messkampagne gestartet wird, sollten zuerst die verfügbaren

² Schätzung von DMEAG auf Basis Literaturdaten, Herleitung siehe Kapitel 3

³ Hochrechnung aus Energie Monitoring aller Gewächshausbetriebe mit EnAW-Mitgliedschaft in der Schweiz durch die DM-Energieberatung AG

Informationen über solche Entfeuchtungssysteme gesammelt werden. Dies ist das Ziel dieser «Vorstudie energieoptimierte Gewächshausentfeuchtung». Sie besteht aus einer Markt- und einer Literaturanalyse. Mit der Literaturanalyse wurden die existierenden Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten zum Thema zusammengetragen⁴. Sie wird durch die Forschungsanstalt Agroscope, Conthey, erstellt. Die Marktanalyse erhebt Daten zu verfügbaren Produkten bezüglich Investitionskosten, Einsatzgebieten und Erfahrungswerten zu Vor- und Nachteilen dieser Systeme.

Damit soll Klarheit geschaffen werden über den effektiven Nutzen dieser neuen Technologien. Bei positivem Ergebnis sollen sie im Markt schneller Fuss fassen können und damit helfen, den Energieverbrauch zu reduzieren sowie die Qualität und den Ertrag der Kulturen zu steigern.

Die Erkenntnisse dieser Vorstudie sollen in einem nächsten Schritt in geeigneter Form dokumentiert werden und der Öffentlichkeit, insbesondere der Gewächshausbranche, zur Verfügung gestellt werden. Dem Gewächshausproduzenten steht damit eine Übersicht verschiedener System zur Verfügung und bietet ihm eine erste Entscheidungsgrundlage für oder gegen die Anschaffung eines Entfeuchtungssystems und welche Technologie am ehesten geeignet ist.

3 Wärme und Feuchtigkeit im Gewächshaus

Die Wärmeströme in einem Gewächshaus sind komplex, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Hauptverluste entstehen jedoch durch die Transmission durch die Gebäudehülle.

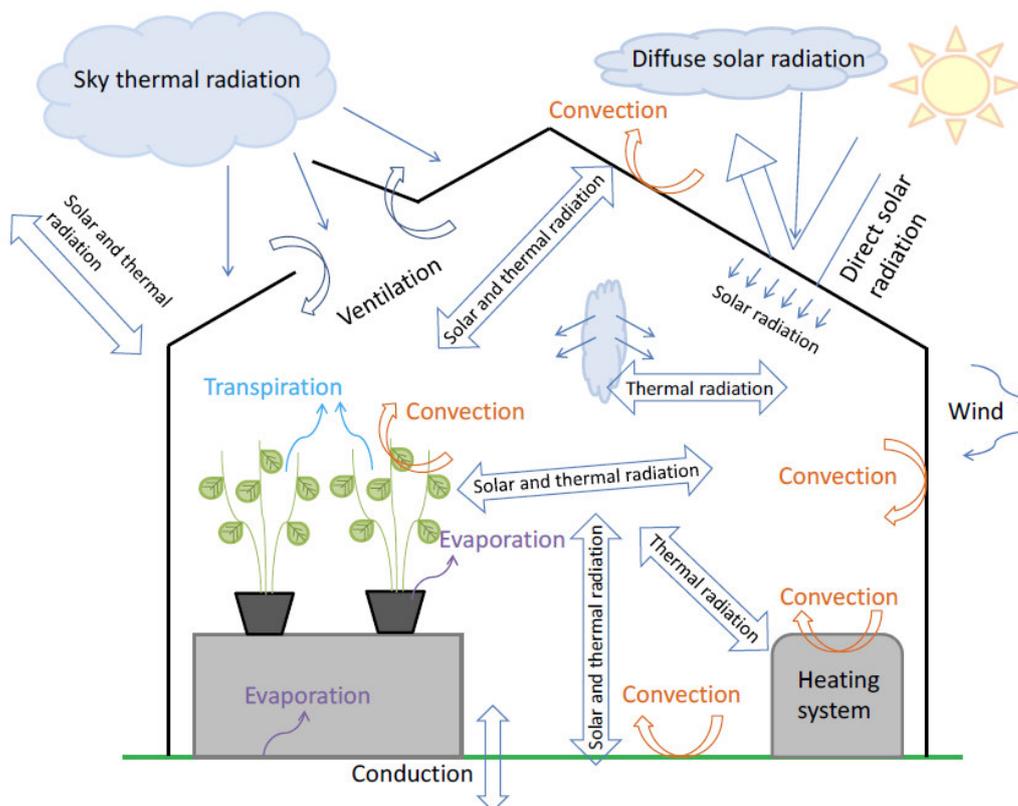


Abbildung 1 Wärmeströme im Gewächshaus [Thermal Energy Use in Greenhouses, K. Maslak, Swedish University of Agricultural Sciences, 2015]

⁴ Dehumidification of greenhouses, C. Gilli & S. Eberle, Agroscope, December 2017

Weiter geht über Konvektion (Luftwechsel) Energie verloren: Die kältere Aussenluft muss im Gewächshaus aufgeheizt werden. Ein natürlicher Luftwechsel findet über Undichtheiten in der Gewächshaushülle statt. Wenn die Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus zu hoch ist, werden zusätzlich die Lüftungsflügel geöffnet. Der Wassereintrag ins Gewächshaus erfolgt grundsätzlich durch die Bewässerung der Kulturen. Dieses Wasser verdampft

a) über feuchte Oberflächen

- feuchter Boden nach Bewässerung (Bodenkulturen)
- feuchtes Substrat nach Bewässerung (Hors-sol)
- feuchte Tisch- und Bodenflächen

b) durch Transpiration der Pflanzen

und gelangt dadurch in die Luft. Die Verdunstung dieses Wassers benötigt viel Energie (rund 700 kWh/m³), die über das Heizsystem – und die Sonne, falls sie scheint – wieder zugeführt werden muss. Diese latente («nicht fühlbare») Wärme in Form von Wasserdampf geht bei jedem Luftwechsel verloren. Daneben gibt es den sensiblen («fühlbaren») Wärmeverlust durch den Austausch von warmer mit kalter Luft. Wie hoch die Anteile der sensiblen und latenten Verluste sind, dazu konnten in der Literatur keine Angaben gefunden werden. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die latenten Anteile nicht vernachlässigt werden dürfen [Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern, KTBL, 2008]. Für den energetischen Vergleich von Entfeuchtungssystemen ist die latente Wärme ein wichtiger Faktor: wenn sie zurückgewonnen werden kann, steht sie für Heizzwecke wieder zur Verfügung.

Beim herkömmlichen Entfeuchten über geöffnete Lüftungsflügel (Abbildung 2) vermischt sich die eindringende, kalte Aussenluft mit der warmen Innenluft (mit Hilfe von Umluft Ventilatoren, Abbildung 3) im Gewächshaus. Ein Teil der warmen Innenluft entweicht dabei nach aussen. Die kalte Aussenluft führt weniger Wasser mit sich (kg Wasser/kg Luft, absolute Feuchtigkeit). Durch das Aufheizen dieser kühleren Mischluft auf den Temperatur-Sollwert im Gewächshaus resultiert eine tiefere relative Luftfeuchtigkeit. Dieser Prozess ist die heutige Art der Entfeuchtung in Gewächshäusern.



Abbildung 2 geöffnete Lüftungsflügel



Abbildung 3 Umluftventilatoren Gewächshaus

Wieviel Prozent des jährlichen Wärmebedarfes die Entfeuchtung mit Aussenluft ausmacht, ist für die Schweizer Gewächshausbranche nicht bekannt. Eine Untersuchung aus Quebec, Kanada⁵ (1998) kommt auf Verluste von 13 – 19%. Eine neuere Studie aus Schweden⁶ (2015) kommt auf 23 – 29%. Dabei haben Kulturen wie Tomaten mit hohen Blattflächen pro Quadratmeter (LAI, leaf area index)

⁵ Halleux, D. de and Gauthier, L. 1998. Energy Consumption Due to Dehumidification of Greenhouses under Northern Latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*

⁶ Thermal Energy Use in Greenhouses, K. Maslak, Swedish University of Agricultural Sciences, 2015

mit entsprechend hohen Transpirationsmengen höheren Lüftungsbedarf. Topfkulturen (Blumen, Kräuter) verdunsten also weniger. Da Zierpflanzen und Kräuter im Allgemeinen (es gibt Ausnahmen) mit tieferen Lufttemperaturen (Bsp. 14°C) kultiviert werden können als Gemüse wie Tomaten, Gurken und Peperoni (Bsp. 20°C), braucht es auch weniger Wasserverdunstung, bis ein kritische relative Luftfeuchtigkeit erreicht ist. Zum Vergleich: Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85% und 14°C enthält ein Kilogramm Luft 8.5 g Wasser. Bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit und 20°C sind es bereits 12.4 g Wasser. Die Zahlen für Quebec und (Süd)Schweden sind nicht 1:1 übertragbar auf die Schweiz. Unterschiede:

- Die Durchschnittstemperaturen in der Schweiz sind höher → Die Verluste über die Gebäudehülle sind daher tiefer, der Anteil der Verluste für das Entfeuchten wird tendenziell grösser.
- Die Gebäudehülle der untersuchten Gewächshäuser in Quebec und Schweden haben einen höheren U-Wert als in der Schweiz (gesetzliche Vorschriften für Warmhäuser⁷) → Die Verluste über die Gebäudehülle in der Schweiz sind daher tiefer, der Anteil der Verluste für das Entfeuchten wird tendenziell grösser. Zudem sind doppelte Energieschirme weit verbreitet, was den mittleren U-Wert nochmals verbessert.
- Über den Einsatz von Fungiziden in Quebec oder Schweden ist nichts bekannt, in der Schweiz wird jedoch auf einen sparsamen Einsatz geachtet. Dazu wird das Klima eher trocken gefahren, da der Krankheitsdruck mit zunehmender Luftfeuchtigkeit zunimmt → es wird vermehrt gelüftet, der Anteil der Verluste für das Entfeuchten wird tendenziell grösser. Dies gilt insbesondere für Bio Betriebe, bei denen der Einsatz von Fungiziden verboten ist.

Der Autor schätzt die prozentualen Lüftungsverluste bei Schweizer Gewächshausbetrieben daher eher noch höher ein, im Bereich 15 - 35%. Bei Bio Betrieben mit hohem Krankheitsdruck sind auch Verluste in der Grössenordnung von 40 - 50% denkbar.

4 Marktanalyse

4.1 Umfang und Grenzen der Marktanalyse

Die Marktanalyse fokussiert auf drei Themen:

1. Beschreibung der verfügbaren Entfeuchtungssysteme für Gewächshäuser
2. Übersicht der Entfeuchtungssysteme, die bereits heute in der Schweiz im Einsatz sind
3. Vergleich dieser verfügbaren Entfeuchtungssysteme

Die Datenerhebung zum Punkt 1 erfolgte durch Umfragen (persönlich, per Mail und telefonisch) in der Gewächshausbranche der Schweiz. Sowohl die Gewächshausproduzenten als auch die grösseren Gewächshausplaner/-bauer wurden befragt. Die Befragung der Produzenten hatte eine hohe Reichweite. Die DM Energieberatung AG betreut im Mandat der EnAW (Energie Agentur der Wirtschaft) seit zehn Jahren die Gewächshausfirmen in der Deutschschweiz und im Tessin bezüglich der Befreiung von der CO₂-Abgabe auf fossilen Brennstoffen. In der Romandie unterstützte Fabio Feduzi (Firma Weinmann-Energies SA), EnAW-Moderator der dortigen Gewächshausbetriebe, die Umfrage. Die Gewächshausproduzenten gaben auch Systeme an, die sie schon selber näher angeschaut oder von denen Sie sie zumindest schon gehört haben. Zusammen mit den Rückmeldungen der Gewächshausplaner ergibt sich dadurch eine für den Schweizer Markt relevante Liste von Entfeuchtungssystemen. Diese Liste wurde ergänzt mit Ergebnissen aus eigenen Recherchen des

⁷ Konferenz Kantonalen Energiefachstellen, Empfehlung EN-7, Beheizte Gewächshäuser, Ausgabe 2003

Autors sowie Erkenntnissen aus der parallel durchgeführten Literaturanalyse von Agroscope (erzielte Wärmeeinsparungen in wissenschaftlichen Versuchen).

Die Recherche fokussierte auf Produkte auf dem Europäischen Markt. Eine globale Recherche hätte den Rahmen der Studie gesprengt. Mit Holland ist aber eine – wenn nicht sogar die - globale, technologisch führende Gewächshaus-Grossmacht in Europa ansässig mit einer guten Vernetzung in die Schweiz. Dadurch ist gewährleistet, dass die betrachteten Technologien Stand der Technik sind.

4.2 Wärmepumpen Entfeuchter

4.2.1 Funktionsweise

Die Entfeuchtung mittels Wärmepumpe wird in vielen Bereichen angewendet und ist eine etablierte Technologie. Sie kommt sowohl in der Industrie für diverse Prozesse zum Einsatz wie auch für die Bautrocknung und die Klimatisierung von Gebäuden. Die Entfeuchtung der Luft wird über Kondensation an einer kalten Oberfläche erreicht (Abbildung 4). Die Gewächshaus Luft wird mit Ventilatoren durch die Wärmepumpe geleitet. Am Lufteintritt kühlt das kalte Register (Verdampfer) die Luft bis unter den Taupunkt ab, der Wasserdampf kondensiert. Dieses Kondenswasser ist sauber und könnte wieder für die Bewässerung genutzt werden. Die kühle und trockene Luft wird anschliessend im warmen Register (Kondensator) wieder aufgeheizt. Die durch die Kondensation des Wasserdampfes abgegebene Wärme sowie die in Form von Elektrizität eingesetzte Energie für den Kompressor wird dabei ins Gewächshaus abgegeben (bei ca. 25 – 30°C Lufttemperatur). Entfeuchtung bedeutet also gleichzeitig immer auch Wärmeerzeugung. Energetisch interessant ist dabei nur der Anteil aus der latenten Wärme (Kondensation Wasserdampf), dies ist ein Zusatznutzen einer Entfeuchtung mit Kondensation. Ansonsten entspricht eine im Raum aufgestellte Wärmepumpe (quasi im Umluftbetrieb) einer ineffizienten Elektro-Widerstandsheizung.

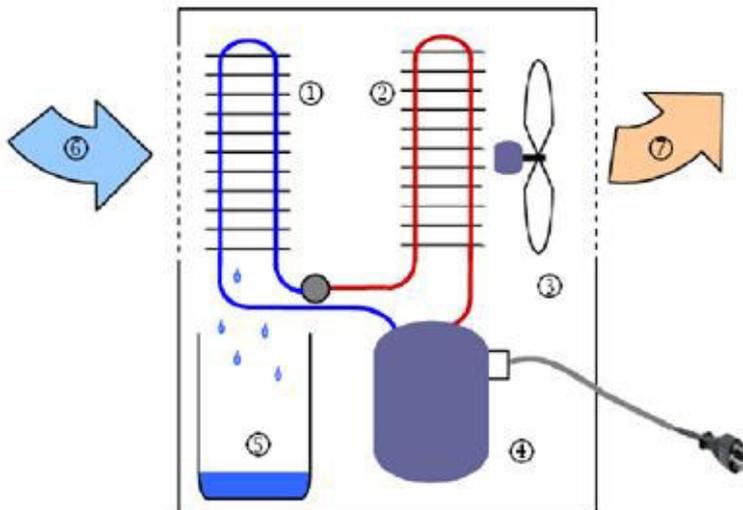


Abbildung 4 Prinzip Wärmepumpen Entfeuchter [Quelle: www.topten.ch/private/adviser/ratgeber-luftentfeuchter]

1. Verdampfer (Abkühlung)
2. Kondensator (Aufheizung)
3. Ventilator
4. Kompressor
5. Wasserbehälter
6. feuchte Luft
7. entfeuchtete Luft

Folgende Abbildungen zeigen Entfeuchter für die Anwendung in Gewächshäusern der Marken Drygair (www.drygair.com) und Giordano Industries (www.caldor.fr) in verschiedenen Gewächshauskulturen:



Abbildung 5 Gemüseproduktion (Drygair)



Abbildung 6 Gemüseproduktion (Giordano)



Abbildung 7 Kräuterproduktion (Drygair)



Abbildung 8 Blumenproduktion (Giordano)

4.2.2 Einsatzgebiete

Tabelle 1 Einsatzgebiete Wärmepumpen Entfeuchter

Aspekt	Kommentar
Infrastruktur: Einsatz in Neubau oder Nachrüstungen in bestehendem Gewächshaus	Beides möglich, Platzbedarf ist derselbe, in Neubau können Nischen oder Aufhängungen bereits in der Planung vorgesehen werden für eine bessere Integration. In bestehenden Gewächshäusern besteht das Risiko, dass die Elektroverteilung angepasst werden muss wegen dem Leistungsbedarf der Entfeuchter.
Betriebsgrösse	Je grösser das Gewächshaus, umso mehr Geräte sind nötig. Die Investitionskosten pro m ² Gewächshaus sind also unabhängig von der Betriebsgrösse. Falls die Geräte an die Klimasteuerung angeschlossen werden sollen, sind für kleinere Betriebe die Kosten relativ gesehen grösser. Dies ist aber nicht zwingend, die Geräte schalten selber ein/aus, abhängig vom Sollwert Luftfeuchtigkeit.
Kulturen	Einsatz für alle Kulturen möglich. Je höher die Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit, umso effizienter ist die Entfeuchtung (Liter Wasser / h bzw. pro kWh Strom). Zudem ergeben sich dadurch auch die höchsten Wärmegewinne (Kondensation latente Wärme). Der Einsatz in Gemüsekulturen wie Gurken und Tomaten dürfte von da her am effizientesten sein. Allerdings sind wegen der hohen Transpiration und der schwierigeren Luftverteilung (hohe Kulturen) mehr Geräte pro Fläche nötig als bei Kräutern oder Blumen.

4.2.3 Kosten & Einsparung

Zur Verbreitung solcher Entfeuchter in Gewächshausbetrieben der Schweiz sind keine genauen Zahlen bekannt. Im Rahmen der Umfrage gab lediglich die Firma Sansonnens FG Frères SA (Schweiz) an, solche Entfeuchter an zwei Zierpflanzenbetriebe verkauft zu haben (Produkt Giordano). Weitere Details zu den Betrieben und effektiv erzielten Energieeinsparungen sind nicht bekannt.

Tabelle 2 Eigenschaften Wärmepumpen Entfeuchter

	Lieferanten/Hersteller	Betriebe Schweiz
Investition	<p>5 – 15 €/m² für die Geräte, exkl. Kosten für allf. Anpassung an Elektroverteilung und Handling des Kondenswassers.</p> <p>Der höhere Preis ist für intensive Gemüsekulturen wie Tomaten, wegen der hohen Entfeuchtungsleistung und der schwierigeren Luftverteilung.</p> <p>Hohe Kulturen mit hoher Transpiration (Tomaten, Gurken):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Drygair: 1 Gerät/1'500 m² - Giordano: 1 Gerät/1'000 m² <p>(Giordano Geräte haben eine kleinere Entfeuchtungsleistung, daher sind mehr Geräte nötig)</p> <p>tiefe Kulturen mit wenig Transpiration (Topfpflanzen, Gurken):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Drygair: 1 Gerät / 5'000 m² 	k. A.
Unterhalt & Service	Keine konkreten Angaben erhalten, Unterhalt und Wartung sei keine nötig. Annahme Autor: regelmässige Reinigung der Filter nötig.	k. A.
Einsparung Wärme	Giordano: bis zu 35% pro Jahr	k. A.

	Lieferanten/Hersteller	Betriebe Schweiz
	Drygair: bis zu 50% pro Jahr	
Mehrverbrauch Elektrizität	Keine genauen Angaben erhalten, Abschätzung Autor: intensive Kulturen (Tomaten etc.): 15 kWh/m ² = entspricht Erhöhung des Strombedarfes des Gewächshauses um Faktor 2 - 3. Topfpflanzen/Kräuter: ca. 5 kWh/m ² = entspricht Erhöhung des Strombedarfes des Gewächshauses um Faktor 1.25 - 2	k. A.
Ertrag & Qualität:	Drygair, Case Study Tomaten: Mehrertrag 25%, weniger Krankheiten, gleichmässige Grösse und Form der Tomaten Drygair, Case Study Basilikum: höherer Ertrag, kürzerer Wachstumszyklus. Bessere Gleichmässigkeit Grösse und Form.	k. A.
Weitere Vor-/Nachteile	Mit einem Split-Gerät (erhältlich bei Drygair) wird der Kondensator ausserhalb des Gewächshauses installiert. Dies ermöglicht nebst der Entfeuchtung auch eine Kühlung des Gewächshauses, was mit den zunehmend heissen Sommern in der Schweiz an Relevanz gewinnt. Dafür entfällt aber die Funktion als Zusatzheizung des Entfeuchters, sofern die Abwärme nicht anderweitig genutzt werden kann (Bsp. Giesswasser vorwärmen). Dank der besseren Feuchtekontrolle sinkt das Risiko für Pilzkrankungen, der Einsatz von Fungiziden sinkt, was zu zusätzlichen Kosteneinsparungen und einer verbesserten Umweltbilanz führt. Das kondensierte Wasser aus dem Entfeuchter kann theoretisch für das Giessen der Pflanzen wiederverwendet werden.	k. A.

4.3 Hygroskopische Entfeuchtung

4.3.1 Funktionsweise

Ein hygroskopischer Stoff hat die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Umgebung (meist in Form von Wasserdampf aus der Luftfeuchtigkeit) zu binden. Daher können solche Stoffe technisch genutzt werden, um Luft zu entfeuchten. Aus der Lüftungstechnik sind Rotationswärmetauscher bekannt. Das Wärmetauscher Rad kann mit einem Sorptionsmittel (hygroskopisch) beschichtet werden. Dadurch kann nicht nur Wärme, sondern auch Luftfeuchtigkeit zurückgewonnen werden. Spezifisch für Gewächshäuser ist gemäss Recherche für diese Studie nur ein Produkt bekannt, dass diese Funktionsweise nutzt. Die Firma Agam Greenhouse Energy Systems Ltd. (i.f. Agam) aus Israel bietet Geräte mit dem Kürzel VLHC (Ventilated Latent Heat Converter) an, siehe Bilder unten.



Abbildung 9 AGAM VLHC (Ansicht vorne)



Abbildung 10 AGAM VLHC (Ansicht seitlich)

Wie beim Wärmepumpen Entfeuchter wird die Gewächshausluft im Umluftbetrieb entfeuchtet. Die feuchte Luft, (1) blauer Pfeil in Abbildung 11, strömt wie in einem Luftwäscher durch das hygroskopische Fluid (Salzlösung) und gibt dabei die Feuchte ab, gleichzeitig wird es abgekühlt. Die Salzlösung wird dabei durch die Kondensation (latente Wärme) erwärmt und verdünnt. In einem weiteren Prozess wird die latente Wärme genutzt, um die entfeuchtete Luft wieder aufzuwärmen.

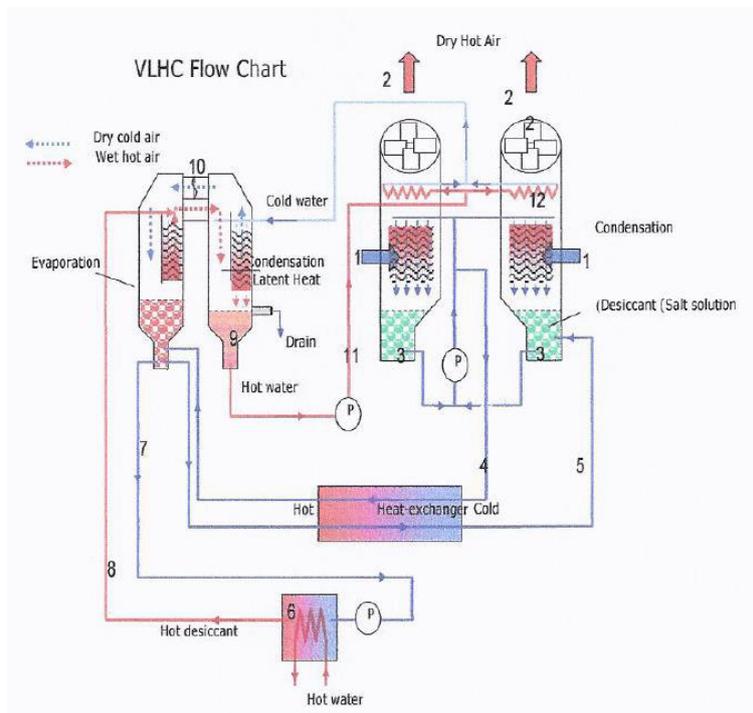


Abbildung 11 Prinzipschema AGAM VLHC

Damit die Salzlösung ihre Entfeuchtungsleistung beibehält, muss sie regeneriert werden, also aufkonzentriert. Dies geschieht kontinuierlich durch Wärmezufuhr (Warmwasseranschluss an Heizungsnetz) über einen Wärmetauscher mit 70 kW ((6) in Abbildung 11). Der Vorlauf vom Heizungsnetz muss dabei mindestens 65°C betragen (Testberichte erwähnen 74°C). Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Prozesse in Abbildung 11 stand leider nicht zur Verfügung. Bei der Regeneration wird das Wasser aus der Salzlösung wieder verdampft (verdunstet), wozu der Anschluss ans Heizungsnetz benötigt wird. Anschliessend wird der Wasserdampf erneut kondensiert und verlässt

das Gerät über einen Kondensat Abfluss. Die latente Wärme wird also entzogen und an die entfeuchtete Luft abgegeben, bevor sie das Gerät verlässt. Diese Wärmerückgewinnung hilft, Heizenergie einzusparen. Voraussetzung ist aber, dass die Gleichzeitigkeit vom Wärmebedarf und die Regeneration/Entfeuchtung des Gewächshauses gegeben ist.

Während beim Wärmepumpen Entfeuchter die Kondensation über den Einsatz von Elektrizität angetrieben wird, benötigt das System AGAM VLHC Wärme auf relativ hohem Temperaturniveau. Dazu kommen 2.5 kW elektrischer Leistungsbedarf des Gerätes für die Pumpen und Ventilatoren. Um die getrocknete Luft gleichmässig im Gewächshaus zu verteilen, sind Horizontalventilatoren nötig. Diese sind üblicherweise in Gewächshäusern vorhanden.

4.3.2 Einsatzgebiete

Tabelle 3 Einsatzgebiete hygroskopische Entfeuchtung

Aspekt	Kommentar
Infrastruktur: Einsatz in Neubau oder Nachrüstungen in bestehendem Gewächshaus	Beides möglich, Platzbedarf ist derselbe, in Neubau können Nischen oder Aufhängungen bereits in der Planung vorgesehen werden für eine bessere Integration. In bestehenden Gewächshäusern ist die Verlegung zusätzlicher Heizleitungen zu den Geräten sicher aufwändiger als bei einem integrierten Konzept eines Neubaus.
Betriebsgrösse	Je grösser das Gewächshaus, umso mehr Geräte sind nötig. Die Investitionskosten pro m ² Gewächshaus sind also unabhängig von der Betriebsgrösse. Die Kosten für den Anschluss an die Klimasteuerung sind für kleinere Betriebe relativ gesehen grösser.
Kulturen	Einsatz für alle Kulturen möglich. Allerdings sind wegen der hohen Transpiration (Tomaten etc.) mehr Geräte pro Fläche nötig als bei Kräutern oder Blumen. Zudem ist bei hohen Kulturen die gleichmässige Luftverteilung viel schwieriger, wie ein Test in der Schweiz gezeigt hat (Kapitel 4.3.3)

4.3.3 Kosten & Einsparung

Weltweit sind etwa 360 Geräte im Einsatz, davon rund 200 Stück in Europa. In der Schweiz sind gemäss eigener Recherche wie auch gemäss Rückmeldung von AGAM keine Geräte in Betrieb. Anfang 2015 wurden aber auf dem Betrieb Paul & Ruedi Meier in Rütihof AG versuchsweise 4 Geräte für ein Gewächshausabteil mit 5'200 m² installiert. Es wurden Cherrytomaten auf Rinnen (Hors-sol) produziert. Der Wärmeverbrauch vom Abteil mit den Entfeuchtungsgeräten sowie einem Vergleichsabteil ohne Entfeuchtung wurden separat gemessen. Der Versuch wurde nach drei Monaten abgebrochen, da eine homogene Luftverteilung mit zunehmender Höhe der Kulturen nicht mehr erreicht werden konnte. Eine Energieeinsparung konnte aber eindeutig nachgewiesen werden. Die Ergebnisse des Versuches sind in der Tabelle unten zusammengefasst.

Tabelle 4 Eigenschaften hygroskopische Entfeuchtung

	Lieferanten/Hersteller	Test Schweiz (P. & R. Meier)
Investition	<p>Hohe Kulturen mit hoher Transpiration (Bsp. Tomaten):</p> <p>Ca. 27 €/m² für die Geräte, exkl. Kosten für Anschluss an Heizungsnetz und Klimacomputer.</p> <p>Ca. 1 Gerät / 1'000 m²</p> <p>Wegen der hohen Entfeuchtungsleistung und der schwierigeren Luftverteilung sind mehr Geräte nötig.</p> <p>Alle anderen Kulturen:</p> <p>Ca. 18 €/m² für die Geräte, exkl. Kosten für Anschluss an Heizungsnetz und Klimacomputer.</p> <p>Ca. 1 Gerät / 1'500 m²</p>	<p>Zusatzkosten für Anpassung Infrastruktur (Stromleitung, Schaltschrank, Heizregister mit Zuleitung zum Gerät): 30 – 40 kCHF. Ergibt spezifisch ca. 6 – 7 CHF/m²</p> <p>Spezifische Kosten Total:</p> <p>Ca. 35 – 40 CHF /m²</p> <p>Schätzung für andere Kulturen (Autor):</p> <p>Ca. 23 – 27 CHF /m²</p>
Unterhalt & Service	<p>Mit zunehmenden Alter der Geräte erhöhen sich die Kosten für den Ersatz von Verschleissteilen. Im Mittel kann mit 5% der Investitionskosten der Geräte gerechnet werden.</p> <p>Tomaten etc.: ca. 1.9 CHF/m²</p> <p>Andere Kulturen: ca. 1.25 CHF/m²</p>	k. A.
Einsparung Wärme	Typischerweise 40 – 60% Einsparung, mit Beispielen von bis zu 75%.	In den Kalenderwochen 10 – 14 (vor KW 10 war Feuchteabgabe durch Kulturen zu niedrig) wurde im Mittel 25% Wärme eingespart gegenüber dem Vergleichsabteil.
Mehrverbrauch Elektrizität	<p>Schätzung AGAM: 4'000 Betriebsstunden pro Jahr mit el. Leistungsaufnahme von 2.5 kW pro Gerät.</p> <p>intensive Kulturen (Tomaten etc.):</p> <p>2.5 kW * 4000 h / 1'000 m² = 10 kWh/m²</p> <p>10 kWh/m² = entspricht Erhöhung des Strombedarfes des Gewächshauses um Faktor 2.5 – 3</p> <p>Topfpflanzen/Kräuter:</p> <p>2.5 kW * 4000 h / 1'500 m² = 6...7 kWh/m²</p> <p>7 kWh/m² = entspricht Erhöhung des Strombedarfes des Gewächshauses um Faktor 2.5 - 3</p>	k. A.
Ertrag & Qualität:	Case Study Tomaten, Holland: 75% weniger Pilzbefall. Entsprechend höherer Anteil verkaufter Tomaten, keine Angabe zu effektivem Mehrertrag oder reduziertem Ausschuss.	k. A.

	Lieferanten/Hersteller	Test Schweiz (P. & R. Meier)
Weitere Vor-/Nachteile	Dank der besseren Feuchtekontrolle sinkt das Risiko für Pilzkrankungen, der Einsatz von Fungiziden sinkt, was zu zusätzlichen Kosteneinsparungen und einer verbesserten Umweltbilanz führt.	<p><u>Positiv:</u></p> <p>Entfeuchtung der Gewächshausluft funktioniert einwandfrei.</p> <p>sehr gutes, wüchsiges Klima trotz geschlossenem Schirm und Lüftung, zum Teil auch ohne Rohrheizung.</p> <p>Durch das gute Klima war die Pflanze aktiver, schnelleres kultivieren</p> <p><u>Negativ:</u></p> <p>Je grösser die Pflanzen, umso problematischer wurde die Luftverteilung. Trotz zusätzlichen Ventilatoren konnte warme Luft nicht ans andere Ende des Abteils transportiert werden = vertikale Temperatur- und Feuchtverteilung</p> <p>Je milder das Wetter, umso kleiner Einsatz der Rohrheizung. Resultat: kalte und feuchte Luft bleibt in Bodennähe = Die Früchte bleiben kalt und kondensieren, verzögerter Anfang der Ernte und Botrytis.</p> <p>Problem AGAM Gerät: Warme Luft wird nach oben abgeben, mit herkömmlichen Horizontal Ventilatoren erreicht diese Luft nicht den Wurzelbereich der Pflanzen</p> <p>Eignung daher eher für Kräuter und Zierpflanzen.</p>

4.4 Kontrollierte Lüftung

4.4.1 Funktionsweise

In Holland wird intensiv an neuen Konzepten für eine ressourcenschonende Gewächshausproduktion gearbeitet. Diese Ideen sind bekannt als „Het Nieuwe Telen“ oder „Das neue Kultivieren“. Ziele sind halbierte CO₂-Emissionen bei vergleichbarem Ertrag. Konzepte mit ganz- oder halbgeschlossenen Gewächshäusern bringen zwar diese Einsparungen, können sich aber aufgrund der sehr hohen Investitionen nicht durchsetzen. Dazu zählen insbesondere die Kühlung im Sommer mit hohen Spitzenlasten und die saisonale Speicherung von Wärme (Gewächshaus als Solarkollektor) unter dem Gewächshaus in Aquiferen (wasserführende Schicht). Andere Teile dieser Konzepte haben sich jedoch durchgesetzt und haben auch in der Schweiz Einzug gehalten. Dazu gehören vor allem der Einsatz von Energieschirmen (bis vor ein paar Jahren einfache Energieschirme, heute fast überall doppelte), eine dichte Gebäudehülle und die Temperaturintegration (der Pflanze genügt eine korrekte, mittlere Temperatur über 24 Stunden, am Tag sind höhere bzw. nachts tiefere Temperaturen zulässig). Die massgebenden Kulturen und Produktionsart sind Tomaten in Hors-Sol Anbau, der wichtigsten Gemüsekultur. Holländische (und andere) Anbieter haben daher das Entfeuchtungssystem auf diese Anbauweise hin entwickelt, auch wenn damit grundsätzlich auch andere Kulturen und Anbauweisen (Bsp. Bodenkultur, Topfpflanzen auf Tischen) ausgerüstet werden könnten. Dieses Entfeuchtungssystem kann allgemein als AVS – Active Ventilation System – bezeichnet werden. Es lässt sich am besten mit einer kontrollierten Lüftung in Wohn- und Bürogebäuden vergleichen, wie sie heute in der Schweiz häufig in Minergie® Bauten anzutreffen sind. Der Hintergrund ist derselbe: Die Gebäudehülle ist so dicht, dass die Luftfeuchtigkeit schnell hohe Werte erreicht, die für Menschen – oder im Gewächshaus für Pflanzen – keine optimalen Bedingungen darstellen.

Mit einem AVS wird Aussenluft mittels drehzahlgeregelten Ventilatoren kontrolliert ins Gewächshaus gebracht (Abbildung 12). Über Schläuche unter den Rinnen wird die Zuluft gleichmässig im ganzen Gewächshaus verteilt. Die kalte Aussenluft kann wahlweise mit warmer Innenluft (Umluftbetrieb 0 – 100%) gemischt werden. Die Innenluft wird unterhalb des Daches bzw. des Energieschirms abgesaugt. Hier sammelt sich die warme Luft, die bei offenen Energieschirmen zudem an der kalten Dachfläche stärker kondensieren würde und dadurch zusätzlich Energie verliert.

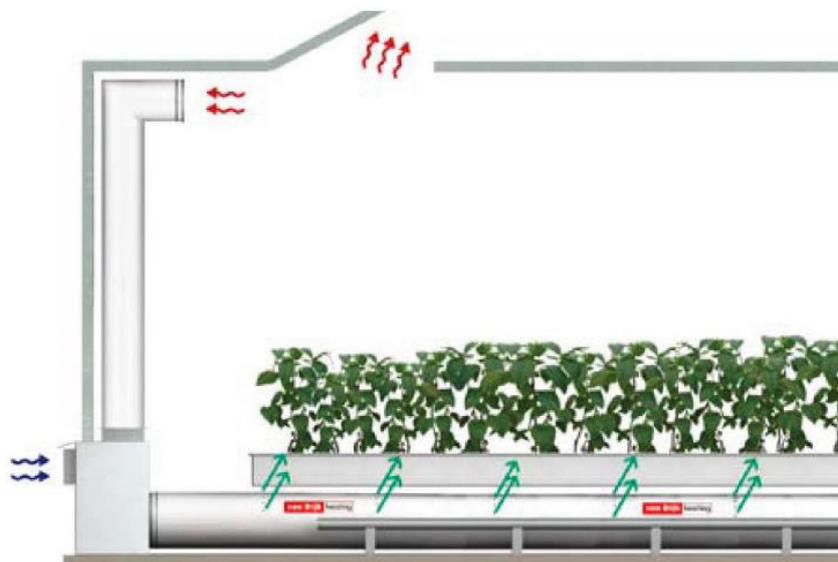


Abbildung 12 AVS von van Dijk heating (ohne Wärmetauscher)

Die Luft kann zusätzlich mit einem Heizregister in der zentralen Einheit «unit» vorgewärmt werden, dass an das Heizsystem des Gewächshauses angeschlossen ist. Dieses System gemäss Abbildung 12 arbeitet mit Überdruck, die Zuluft entweicht durch Undichtheiten in der Gebäudehülle oder indem gezielt der Energieschirm und die Lüftungsflügel geöffnet werden. Die Entfeuchtung findet also grundsätzlich wie bisher mit der Beimischung von kalter Aussenluft statt. Wie kommt eine Energieeinsparung zustande?

- a) Es wird weniger Aussenluft zugeführt für das gleiche Entfeuchtungsergebnis als beim herkömmlichen Lüften. Drehzahlgeregelte Ventilatoren und die Daten aus dem Gewächshauscomputer (Enthalpie der Innen- und Aussenluft) ermöglichen eine genauere Dosierung von Aussenluft.
- b) Die Zuluft fliesst beim AVS von unten nach oben an der Pflanze entlang und entfeuchtet lokal (direkt an der Pflanze) viel besser als wenn die kalte Luft von oben mit Ventilatoren gemischt wird und der ganze Luftraum im Gewächshaus umgewälzt wird. Für den gewünschten Entfeuchtungseffekt wird also weniger Luft umgewälzt.
- c) Durch den Überdruck entsteht ein gleichmässigeres Klima im Gewächshaus. Kalte Bereiche mit entsprechend hoher Luftfeuchtigkeit und grösstem Risiko für Krankheiten müssen nicht mehr bekämpft werden, indem das ganze Gewächshaus aufgeheizt und/oder mehr entfeuchtet wird.
- d) Der wichtigste Energiespareffekt: Energieschirme bleiben länger zu und vermindern in diesem Zustand die Wärmeverluste über die Gebäudehülle massiv.



Abbildung 13 Ansicht von aussen von AVS units
(Quelle: van Dijk heating)



Abbildung 14 Luftschauch unter Rinnen
(Quelle: Ammerlaan Construction)

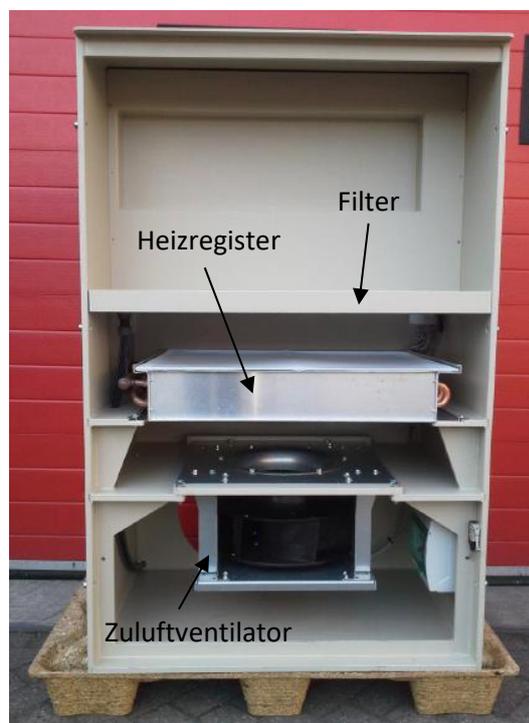


Abbildung 15 Innenansicht AVS unit (Quelle: van Dijk heating)

Als Erweiterung dieses System kann die AVS unit mit einer kontrollierten Abluft inklusive Wärmetauscher (Kunststoff Plattenwärmetauscher) ausgerüstet werden. Somit kann mit Gleichdruck

im Gewächshaus gearbeitet werden bzw. mit einem variablen Überdruck. Dank dem Wärmetauscher kann die Zuluft mit der Wärme der Abluft vorgeheizt werden. Dadurch kann auf ein Heizregister in der AVS unit verzichtet werden, was Kosten spart. Bei tiefen Aussentemperaturen ist auch die Kondensation der Feuchtigkeit in der Abluft möglich, was die Wärmerückgewinnung nochmals verbessert. Wegen des komplexeren Aufbaus (Wärmetauscher, Luftklappen, zusätzlicher Abluftventilator, aufwändigere Steuerung) ist die Lösung mit Wärmetauscher aber insgesamt teurer. Da es sich in erster Linie um eine Energieeffizienz Massnahme handelt, muss sich diese auch durch zusätzliche Wärmeeinsparungen amortisieren.



Abbildung 16 Luftströme in AVS mit Wärmerückgewinnung (Quelle: Ammerlaan Constructions)



Abbildung 17 Ansicht aussen AVS (Quelle: Ammerlaan Constructions)

Das System mit kontrollierter Zu- und Abluft sowie der Möglichkeit zum Umluftbetrieb und Bypass der Wärmerückgewinnung bietet die meisten Möglichkeiten für eine optimale Kultivierung bei gleichzeitiger Wärmeeinsparung. Die Regelung dieses Systems stellt im Vergleich zu den anderen Entfeuchtungssystemen aber auch die höchsten Ansprüche an den Benutzer. In Abbildung 18 bis Abbildung 21 sind verschiedene Betriebszustände abgebildet.

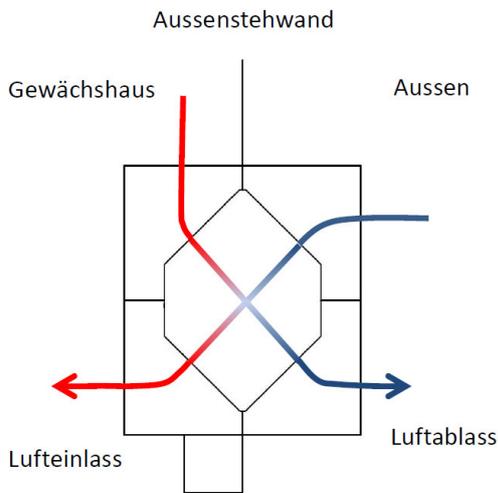


Abbildung 18 Lüftung/Entfeuchtung mit Wärmerückgewinnung bei Heizbedarf (Quelle: van Dijk heating)

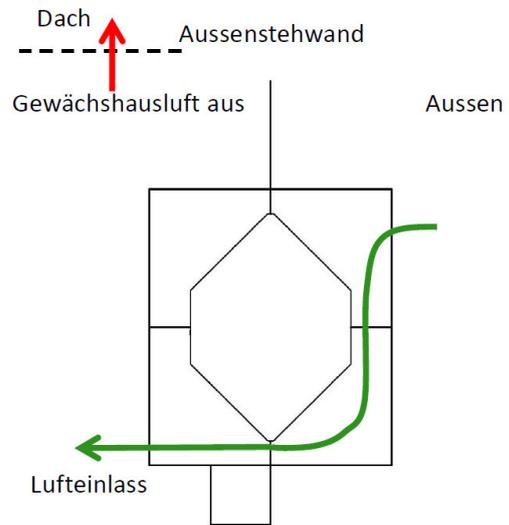


Abbildung 19 Lüftung/Entfeuchtung via Bypass ohne Heizbedarf (Quelle: van Dijk heating)

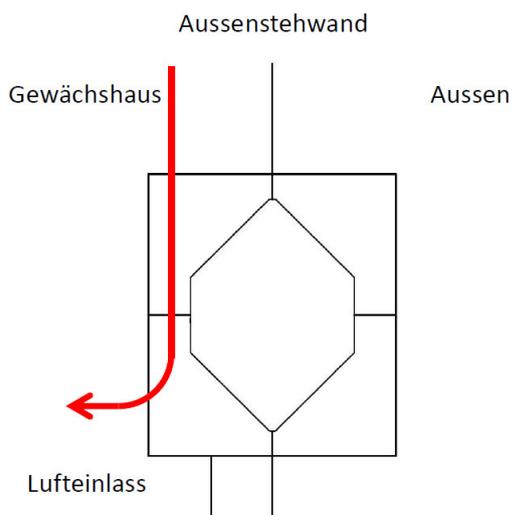


Abbildung 20 Umluftbetrieb (Quelle: van Dijk heating)

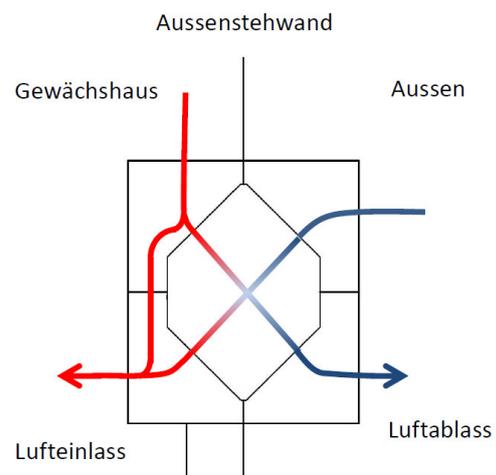


Abbildung 21 Kombination Umluft/Aussenluft/Wärmerückgewinnung (Quelle: van Dijk heating)

4.4.2 Einsatzgebiete

Die AVS werden von den Lieferanten jeweils auf die individuellen Bedingungen des Gewächshausbetriebes (Kultur, Klimazone, etc.) und Bedürfnisse der Kunden (Fokus Kultivierung, Energieeinsparung, einfaches Handling, etc.) ausgelegt. Die Entfeuchtungsleistung kann zum Beispiel durch die Anzahl der units und die Kapazität der Ventilatoren (max. Luftmenge) eingestellt werden.

Tabelle 5 Einsatzgebiete kontrollierte Lüftungen

Aspekt	Kommentar
Infrastruktur: Einsatz in Neubau oder Nachrüstungen in bestehendem Gewächshaus	Grundsätzlich ist auch eine Nachrüstung möglich, sowohl für Glas- oder Folienhäuser. Das Hauptproblem dabei sind bestehende Komponenten der Infrastruktur (Bsp. Heizleitungen), die aufwändig umplatziert werden müssen. Dies muss aber nicht zwingend der Fall sein.
Betriebsgrösse	Je grösser das Gewächshaus, umso mehr Geräte sind nötig. Die Investitionskosten pro m ² Gewächshausfläche sind also unabhängig von der Betriebsgrösse. Die Kosten für den Anschluss an die Klimasteuerung und die Planung sind für kleinere Betriebe relativ gesehen grösser. Gemäss Ammerlaan Construction liegt die typische Gewächshausgrösse bei 3 ha, was für Schweizer Verhältnisse bereits ein grosses Gewächshaus ist.
Kulturen	AVS sind grundsätzlich für Warmkulturen in Hors-Sol Anbauweise entwickelt worden (Tomaten, Gurken, Peperoni). Es wurden aber auch Projekte für einige Blumensorten und Cannabis umgesetzt. Der Luftschlauch für die Luftverteilung kann bei Kultivierung im Boden zwischen den Pflanzen auf dem Boden installiert werden (Nachteil: weniger Platz für Mitarbeiter und Geräte) oder oberhalb der Pflanzen (Nachteil: weniger Licht; trockene Luft verteilt sich schlechter um die Pflanzen).

4.4.3 Kosten & Einsparung

Es wurden insgesamt vier Anbieter solcher Systeme angefragt:

- Van Dijk heating (NL)
- Ammerlaan Construction (NL)
- VB Climate (NL)
- Richel Group (FR)

Eine rechtzeitige Rückmeldung erfolgte von den Firmen Van Dijk heating und Ammerlaan Construction, die beide schon Systeme in der Schweiz umgesetzt haben. Die Firma Richel Group baut gerade erstmals ein solches System in der Schweiz. Die Umfrage konnte erst spät an die Firma geschickt werden, da der Autor erst spät von diesem Bauprojekt und dem Systemlieferanten erfuhr.

- Gewächshausflächen mit Ammerlaan System «Air & Energy» weltweit: 75 ha (750'000 m²)
- Gewächshausflächen mit van Dijk System «AVS» weltweit: 140 ha (1'400'000 m²), davon ca. 95% Tomaten.

Tabelle 6 Übersicht verbrauchte Systeme Schweiz

Firma	Kt.	WRG ¹	System/Lieferant	IBN	Energieschirme	Neubau/ Nachrüstung	Gewächshausfläche [m ²]	Kulturen
1	FR	nein	Activenlo/Horconex (van Dijk heating)	Feb 2015	doppelt	Ersatzneubau Gewächshaus	7'350	Tomaten (Hors-sol)
2	LU	nein	Activenlo/Horconex (van Dijk heating)	Jan 2016	doppelt	Erweiterungsneubau Gewächshaus	8'500	Tomaten (Hors-sol)
3	AG	ja	Air & Energy (Amerlaan Construction)	Mar 2016	doppelt	Ersatzneubau Gewächshaus	10'800	Tomaten (Hors-sol)
4	GE	nein	Activenlo/Horconex (van Dijk heating)	2016	doppelt	Neubau	9'000	Tomaten (Hors-sol)
5	ZH	nein	BOM (van Dijk heating)	Mai 17	doppelt	Ersatzneubau Gewächshaus	46'000	Tomaten (Hors-sol)
6	GE	nein	Activenlo/Horconex (van Dijk heating)	2017	doppelt	Nachrüstung	23'500	Tomaten (Hors-sol)
7	GE	nein	Richel Group	2017	doppelt	Neubau	27'900	Tomaten (Hors-sol)
Total							133'050	

¹ ja = Wärmerückgewinnung über Wärmetauscher, kontrollierte Zu- und Abluft / nein = keine WRG, Überdrucksystem, nur kontrollierte Zuluft

Von total sieben Systemen ist nur eines mit Wärmerückgewinnung ausgerüstet. Mit einer Ausnahme wurden die Entfeuchtungssysteme alle im Rahmen eines Neubaus erstmals eingesetzt. Es handelt sich ausschliesslich um grosse Gemüseproduzenten. Die ausgerüsteten Gewächshausflächen entsprechen nicht der ganzen Betriebsgrösse. Sehr positiv ist der Einsatz von doppelten Energieschirmen, die den Nutzen eines Entfeuchtungssystems maximieren. Der Einbau von doppelten Energieschirmen ist für intensive Gemüsekulturen in der Schweiz aber auch ohne Entfeuchtungssystem aktueller Stand der Technik. Alle Betriebe produzieren Tomaten in Hors-sol Anbauweise. Manche Betriebe gaben an, später auch andere Warmkulturen produzieren zu wollen mit dem System (Bsp. Gurken, Peperoni). Unter diesen Betrieben befindet sich kein Bio Betrieb, obwohl hier die Feuchteproblematik wegen dem Verbot von Fungiziden eine zusätzliche Relevanz hat. Ein grösserer Bio Betrieb, der gerade einen Ersatzneubau realisiert hat, hat bewusst auf ein solches System verzichtet (Erzeugung Erneuerbarer Wärme steht im Vordergrund). Es wurde aber darauf geachtet, dass ein solches System später ohne grossen Aufwand nachgerüstet werden könnte.

Die folgenden Angaben in der Tabelle 7 beziehen sich ausschliesslich auf Systeme für den Anbau in Rinnen (Hors-sol). Die Herstellerangaben stammen von Van Dijk heating und Ammerlaan Construction, die Angaben der Betriebe in der rechten Spalte stammen von drei Betrieben aus Tabelle 6. Es handelt sich um den Betrieb Nr. 3 mit einem System mit WRG sowie um die Betriebe 1 und 2 mit dem van Dijk System ohne WRG. Diese drei Betriebe haben die bisher grösste (bzw. einzige im Fall des WRG-Systems) Erfahrung mit diesen Systemen. Alle Angaben beziehen sich auf den Einsatz in intensiven Warmkulturen (Tomaten Hors-sol).

Tabelle 7 Eigenschaften kontrollierte Lüftungen

	Lieferanten/Hersteller	Betriebe Schweiz
Investition	<p>Material & Installation des AVS, exkl. Anpassung an Klimacomputer, Elektroverteilung.</p> <p>Ohne WRG; Neubau: 6 €/m² (ohne Anschluss ans Heizungsnetz, dieser ist aber zwingend!)</p> <p>Typische Kosten Nachrüstung: 10 €/m²</p> <p>Mit WRG; Neubau: 20 – 25 €/m² (kein Anschluss ans Heizungsnetz nötig!)</p>	<p>Kosten beziehen sich auf Neubauten, keine Nachrüstungen (keine Angaben vorhanden).</p> <p>Ohne WRG, inkl. alles: 20 – 23 CHF/m²</p> <p>mit WRG, inkl. alles: 25 - 30 CHF/m²</p>
Unterhalt & Service	<p>Keine genauen Zahlen bekannt bzw. unter 1% der Investitionskosten. Unterhalt ist lediglich Reinigung der Filter. Schläuche Luftverteilung und Ventilatoren mussten bis jetzt (älteste Anlagen IBN 2012) nicht ersetzt werden.</p>	<p>Mit Schätzungen für Arbeitsaufwand und Rückstellungen für Ersatz der Schläuche und ev. einzelnen Ventilatoren: unter 0.5 CHF/m² pro Jahr</p> <p>Entspricht ca. 1...2% von Investition</p>
Einsparung Wärme	<p>Ohne WRG: 20 – 30%</p> <p>Mit WRG: 30 – 40%</p> <p>Bemerkung: Diese Einsparungen beziehen sich meist auf holländische Verhältnisse. Hier wird häufig auch Kunstlicht eingesetzt, um die Produktion zu steigern. Die grossen Abwärme Mengen der Beleuchtung, die sich unter dem Dach sammelt, können mit einem AVS heruntergeführt werden zur Pflanze, was Heizenergie einspart. In der Schweiz gibt es (noch) keine Tomatenproduzenten mit Beleuchtung. Das ist einer der Gründe, warum sich diese Zahlen nicht 1:1 auf Schweizer Verhältnisse übertragen lassen.</p>	<p>Folgende Zahlen sind Schätzwerte der Betreiber, es wird nirgends die Wärme im Abteil mit Entfeuchtungssystem gemessen.</p> <p>Ohne WRG: 0 - 5%</p> <p>Die Öffnung der Energieschirme erfolgt merkbar später, dies reicht aber nie für eine jährliche Einsparung von bis zu 30% gem. Hersteller.</p> <p>Mit WRG: ca. 10%</p> <p>Es wären wahrscheinlich 20% Einsparung möglich, aber mit erhöhtem Risiko für schlechteren Ertrag & Qualität.</p>
Mehrverbrauch Elektrizität	<p>Für beide Varianten (mit/ohne WRG): 5 – 7 kWh/m²</p>	<p>Keine separate Messung des Stromverbrauches. Die gesamte Verbrauchszunahme vom Betrieb passt aber gut zur Angabe der Hersteller.</p> <p>Bei der Variante mit WRG wird der zusätzliche Strombedarf des Abluftventilators kompensiert durch die nur selten benötigten Horizontalventilatoren unter dem Dach.</p>
Ertrag & Qualität:	<p>Dank sehr guter Klimakontrolle: Gesündere Pflanzen (weniger Pilzkrankungen), gleichmässiges Klima, höherer Ertrag (Tomaten Holland: 12 – 18%), früher erntereif</p>	<p>Rückmeldung aller Betriebe: Positiver Effekt auf gleichmässiges Klima, frühere Erntereife, weniger Druck von Pilzkrankheiten. Pflanzen werden durch vertikalen Luftstrom von unten sehr gut aktiviert.</p> <p>Betrieb mit WRG: Ertragssteigerung geschätzt (noch keine verlässlichen Zahlen): mindestens 10%</p>

	Lieferanten/Hersteller	Betriebe Schweiz
Weitere Vor-/Nachteile		<p>Der Umgang mit dem System erfordert ein hohes Mass an Zeit und Lernbereitschaft. Ansonsten können die Vorteile des Systems nicht ausgenutzt werden oder es schadet im Extremfall mehr als es nützt.</p> <p>Die Erwartungen an die verbesserte Kulturführung werden grundsätzlich erfüllt. Die Einsparungen an Heizenergie bleiben unter den Erwartungen, obwohl schon ursprünglich nur mit der Hälfte der Einsparung gemäss Herstellerangaben gerechnet wurde.</p> <p>Einer der drei Betriebe (ohne WRG) würde es Stand heute nicht wieder einbauen. Ein anderer (ohne WRG) ist insgesamt zufrieden und sieht es als langfristige Investition mit weiterem Potential (Lernkurve). Beide Betriebe sind wegen der bisher fehlenden Energieeinsparung interessiert an Unterstützung in Form von Messkampagnen.</p> <p>Der Betrieb mit WRG-System ist begeistert und würde es sofort wieder machen. Eine Unterstützung von Dritten ist daher nicht nötig.</p>

4.5 Vergleich der Systeme

Ein direkter Vergleich der Systeme ist schwierig, da der erfolgreiche Einsatz stark von der korrekten Auslegung der Anlagen, den lokalen Bedingungen des Gewächshauses und den Ressourcen (Zeit, Lernbereitschaft) des Gewächshauspersonals abhängt. Tabelle 8 und folgende zeigen einen Zusammenzug der Informationen von Herstellern und den verfügbaren Informationen von Schweizer Betrieben. Die Auswahl bildet die Einschätzung des Autors ab. Es wurden wann immer möglich Werte vom realen Betrieb in der Schweiz verwendet. Dieser Erfahrungsschatz ist aufgrund der geringen Verbreitung und der kurzen Nutzungszeit seit der Anschaffung (erst ein volles reguläres Betriebsjahr) noch nicht sehr gross. Insgesamt kann zur Wärmeeinsparung gesagt werden, dass bisherige Erfahrungen aus der Schweiz höchstens die Hälfte der Herstellerangaben erreicht haben. Nach eigenen Aussagen der Betreiber ist die Lernphase aber noch nicht abgeschlossen und daher besteht noch Optimierungspotential. Dies deckt sich mit der Aussage eines AVS Lieferanten, dass in Holland die Betriebe im Schnitt drei Jahre benötigen, bis sie die Kultivierung mit dem AVS im Griff haben. Mit den anderen Entfeuchtungstechnologien dürfte es eine ähnliche Lernkurve geben. Zu Beginn steht die Erzielung eines gleichen oder grösseren Ertrages bzw. einer verbesserten Produktqualität im Vordergrund. Wenn dies gemeistert ist, kann noch gezielt auf zusätzliche Energieeinsparung optimiert werden. In Tabelle 8 wurden daher die bisher erreichten Einsparungen erhöht, um die erwartete Lernkurve abzubilden und nicht mit zu konservativen Werten zu arbeiten. Da für die Wärmepumpen Entfeuchter keine Erfahrungswerte aus einem Schweizer Produktionsbetrieb zur Verfügung stehen, wurden die Werte vom Test von Agroscope (C. Gilli, 2017) als Basis verwendet. Bezüglich Mehrertrag und Qualität sind ebenfalls nur grobe Schätzungen möglich. Für die AVS wurde bisher ein positiver Effekt auf die Kulturen zurückgemeldet. Für den Vergleich wurde jedoch kein höherer Ertrag eingesetzt, auch weil die Literaturstudie von Agroscope keine Belege dafür fand.

Tabelle 8 Übersicht Entfeuchtungssysteme: Einsatzgebiete

System	Prioritäres Einsatzgebiet bez. Luftverteilung	Prioritäres Einsatzgebiet bez. Betriebsgrösse	Prioritäres Einsatzgebiet bez. Neubau/Nachrüstung
WP-Entfeuchter	Tiefe Kulturen (Blumen, Kräuter)	Kleine bis grosse Betriebe	Neubau & Nachrüstung
Hygrosk. Entfeuchtung	Tiefe Kulturen (Blumen, Kräuter)	Kleine bis grosse Betriebe	Neubau & Nachrüstung
AVS ohne WRG	Hohe Kulturen (Tomaten, Gurken)	Mittlere bis grosse Betriebe	Neubau
AVS mit WRG	Hohe Kulturen (Tomaten, Gurken)	Mittlere bis grosse Betriebe	Neubau

Die Einteilung bezüglich prioritärem Einsatzgebiet lässt kleinere Gemüsebetriebe aussen vor. Auch hier könnten WP-Entfeuchter oder die AGAM-Geräte zum Einsatz kommen. Eine bessere Luftverteilung könnte bspw. erreicht werden, wenn an die Abluftöffnung der Geräte ähnliche Schläuche montiert werden wie beim AVS. Dies bedingt aber Rücksprache mit den Lieferanten. Auch eine Kombination mit Vertikalventilatoren könnte helfen, die getrocknete Luft gleichmässig über die ganze Höhe der Pflanzen zu verteilen.

Tabelle 9 Übersicht Entfeuchtungssysteme: jährliche Energiebilanz & Kosten

System	Kultur	Einsparung Wärme	Mehrverbrauch Elektrizität [kWh/m ²]	Spez. Investition [CHF/m ²]	Spez. Unterhalt [CHF/m ²]
WP-Entfeuchter	Blumen, Kräuter.	20%	5	10	0.2 CHF/m ²
Hygrosk. Entfeuchtung	Blumen, Kräuter	35%	6	25	1.25 CHF/m ²
AVS ohne WRG	Tomaten etc.	10%	6	20	0.25 CHF/m ²
AVS mit WRG	Tomaten etc.	20%	6	25	0.3 CHF/m ²

Mit den Zahlen aus Tabelle 9 lässt sich der einfache Payback der Investition berechnen, mit folgenden Parametern:

Wärmepreis (Nutzwärme):	7 Rp./kWh
Stromkosten:	16 Rp./kWh
Wärmeverbrauch ohne Entfeuchtung, Blumen & Kräuter:	160 kWh/m ²
Wärmekosten spezifisch ohne Entfeuchtung, Blumen & Kräuter:	11.2 CHF/m ²
Wärmeverbrauch ohne Entfeuchtung, Tomaten:	220 kWh/m ²
Wärmekosten spezifisch ohne Entfeuchtung, Tomaten:	15.4 CHF/m ²

Tabelle 10 Übersicht Entfeuchtungssysteme: Wirtschaftlichkeit (Nutzwärme 7 Rp./kWh)

System	Kultur	Spez. Investition [CHF/m ²]	Einsparung Wärme [CHF/m ²]	Mehrkosten Elektrizität [CHF/m ²]	Spez. Unterhalt [CHF/m ²]	Einsparung Netto [CHF/m ²]	Payback [a]
WP-Entfeuchter	Blumen, Kräuter.	10	2.2	0.8	0.20	1.24	8.1
Hygrosk. Entfeuchtung	Blumen, Kräuter	25	3.9	1.0	1.25	1.71	14.6
AVS ohne WRG	Tomaten etc.	20	1.5	1.0	0.25	0.33	60.6
AVS mit WRG	Tomaten etc.	25	3.1	1.0	0.30	1.82	13.7

Tabelle 10 zeigt deutlich, dass **allein aus Energiespargründen** nach derzeitigem Kenntnisstand kein Entfeuchtungssystem wirtschaftlich ist. Der Nutzen muss aus zusätzlichen Vorteilen wie Mehrerträgen oder höherer Qualität erzielt werden. Da die Schweizer Gewächshausproduzenten im Vergleich zu Holland mit deutlich weniger Wärmeeinsatz produzieren, macht die Amortisation hierzulande schwieriger. Momentan sind auch die Preise der fossilen Brennstoffe immer noch tief, besonders Erdgas. Erhöht man den Wärmepreis auf 10 Rp./kWh, kommt der Payback für drei der vier Systeme zumindest in einen Bereich, in dem die Investition sicher vor Ende der technischen Lebensdauer (Annahme: min. 10 Jahre) amortisiert wird.

Übersicht Entfeuchtungssysteme: Wirtschaftlichkeit (Nutzwärme 10 Rp./kWh)

System	Kultur	Spez. Investition [CHF/m ²]	Einsparung Wärme [CHF/m ²]	Mehrkosten Elektrizität [CHF/m ²]	Spez. Unterhalt [CHF/m ²]	Einsparung Netto [CHF/m ²]	Payback [a]
WP-Entfeuchter	Blumen, Kräuter.	10	3.2	0.8	0.2	2.2	4.5
Hygrosk. Entfeuchtung	Blumen, Kräuter	25	5.6	1.0	1.3	3.4	7.4
AVS ohne WRG	Tomaten etc.	20	2.2	1.0	0.3	1.0	20.2
AVS mit WRG	Tomaten etc.	25	4.4	1.0	0.3	3.1	8.0

5 Fazit

Der heutige Wissenstand zum effektiven Nutzen von Entfeuchtungssystemen in Gewächshäusern am Produktionsstandort Schweiz ist noch klein. Eine gesicherte Aussage zur erzielbaren Einsparung von Wärmeenergie, wie sie heute beispielsweise für Energieschirme möglich ist, kann derzeit für die Gewächshausproduzenten nicht abgegeben werden. Trotzdem bauen immer mehr Gewächshausbetriebe in der Schweiz solche Systeme ein. Der Treiber ist dabei die erwartete positive Wirkung auf die Kultivierung. Das Gewächshausklima ist homogener und die Pflanzen können sehr gut aktiviert werden. Das Risiko für Krankheiten wird kleiner, die Qualität besser. Wie hoch der daraus erzielte wirtschaftliche Vorteil in Franken ist, kann noch nicht beziffert werden. In einer gesamtheitlichen Betrachtung muss dieser Effekt berücksichtigt werden, gerade weil sich die Investition mit den bis anhin erzielten Energieeinsparungen (Schätzungen!) schlecht amortisieren lässt.

Die grössten Hebel für eine bessere Wirtschaftlichkeit durch Energieeinsparungen sind einerseits höhere Brennstoffpreise – diese lassen sich nicht beeinflussen. Siehe dazu die Tabelle 9 und Tabelle 10 im vorherigen Kapitel. Es ist offen, wie lange diese Preise auf dem aktuell tiefen Niveau bleiben. Andererseits kann jeder Gewächshausbetreiber durch die richtige Systemwahl und den optimalen Betrieb des Entfeuchtungssystems die Energieeinsparung optimieren.

Dazu muss die Branche über das nötige Know-how verfügen und sich idealerweise über Erfahrungen mit bereits installierten Systemen austauschen. Der Wissenstransfer hat daher höchste Priorität.

Die Entfeuchtungssysteme haben einen potentiell hohen Nutzen für Gewächshausbetriebe. Unternehmen, die schon lange systematisch ihre Energieeffizienz verbessern und auch weiterhin müssen (Zielvereinbarung mit dem Bund; Rückerstattung der CO₂-Abgabe), sind auf solche Technologien angewiesen, da sie schon einen grossen Teil ihres Potentials ausgeschöpft haben.

6 Anhang (Literaturanalyse Agroscope)

Dehumidification of greenhouses

Agroscope, Conthey | December 2017

To save energy used for heating, greenhouses are more and more insulated (multiple screens, insulating covers). The drawback of more insulation is an increase of unfavourably high moisture contents. In ordinary greenhouses, humid inside air is replaced with dryer outside air by opening their vents (Kempkes *et al.*, 2017). This humidity control costs energy. With the development of (semi)-closed greenhouses, different systems for dehumidification of the greenhouses have been developed. In this study, the Active Ventilation System (AVS), with or without heat exchange, the thermodynamic dehumidification, the (semi)-closed greenhouse and the hygroscopic dehumidification are discussed and evaluated.

Author:

Céline Gilli

Sandrine Eberle

Humidity is an important factor of greenhouses climate control. It is directly linked with the plants transpiration, which depends on solar radiation, air temperature and humidity in the greenhouse (Stanghellini and Van Meurs, 1989). In greenhouses, humidity is controlled by growers to prevent wetting of the crop. Indeed, wetness favours the occurrence of fungal diseases. To avoid that, the greenhouses are opened to discharge vapour thanks to ventilation. For example, it is estimated that 20% of the energy consumption in Dutch greenhouses is used for humidity management (Stanghellini *et al.*, 2016).

According to Campen (2009), three dehumidification methods can be applied in greenhouses:

- ventilation with outside air,
- condensation on a cold surface (with or without heat recovery),
- absorption by a hygroscopic material.

With the development of (semi)-closed greenhouses, a vast number of alternatives for dehumidification and climate control of greenhouses have been developed (perforated air ducts to bring warm or cold

air in the greenhouse, cooling in the top of the greenhouse, below the crop or both, fogging equipment for cooling purposes, local or central heat exchangers and Air Conditioning Box). It is not easy to compare different systems as several parameters are variable. Dehumidification systems are not tested alone but in a global strategy of energy saving, that means with intensified use of thermal screens, utilisation of temperature integration, high insulation greenhouse covering. Furthermore, several parameters like minimum pipes temperatures, humidity set points, outside air temperature, number of ducts, air circulation capacity have a direct impact on energy consumption and are not always clearly specified.



Dehumidification by Active Ventilation System (AVS)

The dehumidification is done by admission of outside air. This air is mixed with inside air and distributed in the greenhouses by ducts below the gutters. In some installations, a heat exchanger enables to recover energy from the outgoing air. The outside air can also be pre-heated if outside temperatures are too low. According to Kempkes *et al.* (2017), in most installed systems, the air to air heat exchanger is omitted for cost savings.

At least three suppliers propose this kind of system: Horconex (Activenlo), Van Dijk heating and Ammerlaan construction.

Energy savings

As mentioned above, energy savings with AVS only are not clear because of the combination of energy savings strategies and variable parameters.

On their website, Horconex mention energy savings up to 20% by using the Activenlo® greenhouse on its own. On a technical sheet from 2012, Van Dijk heating pointed out an energy saving up to 40%, but thanks to a longer closing time of the vents and a better use of the temperature integration.

In France, three years of trials have been carried out to evaluate a dehumidification system based on forced outside air intake (AVS von Van Dijk heating **with heat exchange**). In 2016, a natural gas energy saving of 12% was achieved compared to the control greenhouse. But the maximal temperature of the vegetation pipe was 55°C in the control and 45°C with AVS. This difference could have had an influence on the amount of gas consumption (Le Quillec *et al.*, 2016)

For Kempkes *et al.* (2017), dehumidification with outside air, without adjusting the use of minimum pipe temperature and minimum ventilator openings, only costs more energy. De Gelder *et al.* (2012a) came to the same conclusions: Forced ventilation itself does not save energy, but the extended use of screens and the fact that screen gaps are not used does.

Influence on crop and yield

Growers often create some energy consumption by entering a minimum pipe temperature to “activate” the crop. With dehumidification systems, fans create some air movement around the crop with a more or less comparable effect as a minimum pipe temperature (Kempkes *et al.*, 2014).

There is very little difference between flowering stages and phenology (growth, vegetative / generative balance, vigour) between a control greenhouse and a greenhouse with AVS-with heat exchange (Le Quillec *et al.* 2015, Le Quillec *et al.*, 2016).

Concerning yield, there are very few references regarding AVS only. Most of the publications refer to (semi)-closed greenhouses. In the study of Le Quillec *et al.* (2016), the yield in the greenhouse with AVS with heat exchange (48 kg/m²) was comparable to the one of the control (48.8 kg/m²). Van Dijk heating refers to better yield thanks to a better CO₂ distribution, a higher concentration of CO₂ and a reduction of diseases.

According to Le Quillec *et al.* (2016), fruit quality (measured in Brix) is not affected by dehumidification.

Phytopathological risk

In a trial comparing a greenhouse with AVS with heat exchange and a control one (Le Quillec *et al.*, 2016), the

presence of botrytis was more important in the greenhouse with AVS. The authors suggest that it may be due to a lower air circulation. For powdery mildew and occurrence of white fly, no difference between the two greenhouses was observed.

Economic aspects

According to Van Dijk (2012), their ventilation system is profitable over a period of 3 to 4 years.

The installation of an active ventilation greenhouse with heat recovery costs about 130 €.m⁻², which is about 10 €.m⁻² more than a conventional greenhouse (Brazeau, 2015). According to this author, compared to the profit envisaged it would take 8 years to make the investment profitable.

Thermodynamic dehumidification

The dehumidification is done thanks to an air to air heat pump. The greenhouse air passes on a cold battery (evaporator), it is cooled and dehumidified by condensation. It is then heated on the hot battery (condenser) before being blown into the greenhouse. Also with this system, several parameters have to be considered, such as presence of ducts below the gutters, condensation capacity, air circulation capacity and power of the installation.

Energy savings

In Ctifl (Carquefou), a trial was carried out with a thermodynamic dehumidifier (absorption power: 3.8 kW, condensation capacity of 3.5 kg of water per hour at 20°C, 80% relative humidity, air circulation capacity of three air renewals per hour). In 2010, an energy saving of 19% was obtained with the dehumidifier (Le Quillec *et al.*, 2010). But in 2011, only 9% of energy saving was achieved (Le Quillec *et al.*, 2011).

In Ctifl (Balandran), a trial was also carried out with two thermodynamic dehumidifiers but without ducts. They were directly placed below the gutters (absorption power: 3.5 kW). In those conditions, an energy saving of 15% was achieved (Grisey, 2013).

In a two years trial, Gilli *et al.* (2017) obtained an average energy saving of 20% with a thermodynamic dehumidifier (rated air flow rate of 2'500 m³ h⁻¹, mini/maxi air flow rate of 2'000/3'000 m³ h⁻¹, 6.6 kg h⁻¹ water evacuated for 20°C/85% RH, installed electric capacity of 4 kW). The trial was conducted in a greenhouse with two screens, temperature integration was used.

Influence on crop and yield

For Gilli *et al.* (2017) and Le Quillec *et al.* (2010), no significant differences in plant growth, yield and fruit quality were measured between the greenhouse with thermodynamic dehumidification and the control.

In 2011, Le Quillec *et al.* mentioned a reduced yield of 5.3% with the thermodynamic dehumidification. This difference was explained by a lack of CO₂ injection in the greenhouse just before the first harvest.

Economical aspects

The economical interest of the installation is not clear. It depends of the technical parameters of the dehumidifier. Grisey (2013) estimates that the return on investment over five years is interesting. For Le Quillec *et al.* (2011), the energy savings achieved only in summer do not allow to consider an interesting return on investment for the thermodynamic dehumidifier. For Gilli *et al.* (2017), a 15% saving is not sufficient to consider such an investment. With 25% energy savings, the time needed for return on investment is estimated at 6 years.

(Semi)-closed greenhouse

Many different technical solutions for greenhouses can be so named. The first generation of (semi)-closed greenhouses aimed at collecting energy in summer to re-use in winter (Opdam *et al.*, 2005). With this type of greenhouses, it is possible to save around 30% of energy for greenhouse heating by harvesting energy in excess in the summer to re-use it later through a heat pump after storage in an aquifer system. (De Zwart and Speetjens, 2013). Despite this, this type of greenhouses didn't spread into the practice. Growers pointed out the costs and the fact that one part of the greenhouse was closed and one part was not. The next generation of (semi)-closed greenhouses cultivation was then developed, with lower investment costs (De Zwart and Speetjens, 2013).

It is based on the intensified use of thermal screens combined with control of humidity, maximising the use of the integration capacity of the crop, growing at high humidity, improved CO₂ supply by reduction of ventilation and the use of cooling combined with a heat pump and an aquifer (De Gelder *et al.*, 2012a).

Next to that, (semi)-closed greenhouses, with a technical corridor for the mixing of the outside and inside air, cooling by pad cooling and reheating by heat exchangers, connected to double distribution ducts under the gutters (for example ActivenloAir of Horconex or Ultra Clima of Kubo) have been developed.

A summary of the advantages of (semi)-closed greenhouses will be described, even if the systems and the climate management can be very different.

Energy savings

In a temperate climate, a (semi)-closed greenhouse can save up to 25-35% fossil energy compared to a conventional greenhouse (de Gelder *et al.*, 2012b). According to Heuvelink *et al.* (2008), a closed greenhouse reduces fossil energy consumption by 30%.

According to Coomans *et al.* (2013), semiclosed systems combining controlled mechanical and natural ventilation with thermal screens resulted in a saving of 13 to 28% of energy without major impacts on production or the indoor climate.

In the Brazeau study (2015), the gas consumption of the semi-closed greenhouse was 16% lower than for the conventional greenhouse. On the other hand, electricity consumption was 130% higher for the semi-closed.

Influence on crop and yield

The benefits for the crop (quality, quantity, etc.) are difficult to assess because they depend on many biological processes (de Zwart, 2007).

Higher yields were reported in (semi)-closed greenhouses compared to conventional greenhouses in several studies, mainly because of a higher CO₂ level that allows more efficient photosynthesis (Brazeau 2015, de Gelder *et al.*, 2012b, Heuvelink *et al.*, 2008, Qian *et al.*, 2009, Qian *et al.*, 2015). Brazeau (2015) observed a higher yield for the semi-closed greenhouse (more than 3.5 kg / m²), which makes it possible to calculate a higher energy efficiency for this type of greenhouse compared to a conventional greenhouse or a greenhouse with AVS with heat recovery. Gelder *et al.* (2012b) noted an increase in yield between 10 and 20% for a (semi)-closed greenhouse. According to Heuvelink *et al.* (2008), a (semi)-closed greenhouse increases production by about 20%. For Qian *et al.* (2009), yields are higher by 10 and 6% for a greenhouse with a cooling capacity of 350 and 150 W.m⁻². In the case of Qian *et al.* (2015), the production is 10 to 20% higher. In the Le Quillec study (2015), the yield of the semi-closed greenhouse is 5% higher than this of the reference greenhouse.

In the Méthot (2016) study, yields were unaffected by the type of greenhouse. The management of the relative humidity in the greenhouse has not been optimal, it remains a challenge. The adaptation of temperatures or the air conditioning system is essential. According to the author, adjusting these parameters would provide better yield than the control greenhouse.

Qian *et al.* (2015) did not record a difference in production when the temperature at the top of the canopy was identical in a semi-closed greenhouse and in the control. The vertical temperature gradient created by this type of greenhouses does not seem to affect growth, development or production.

Méthot (2016) compared the agronomic effects of a semi-closed greenhouse (with a geothermal air conditioning system) and an open greenhouse. The results of yield, quality and phenology did not show any differences between the two greenhouses.

Brazeau (2015) noted lower plant growth for a semi-closed greenhouse compared to a control greenhouse.

According to Qian *et al.* (2012), there is a photosynthetic acclimation of plants with higher CO₂ concentrations; this only when the number of fruits is considerably reduced. The leaf area decreases as the amount of CO₂ increases but also when the number of fruits removed increases. So the amount of dry matter is higher in the semi-closed greenhouse, especially thanks to the higher CO₂ levels.

The quality of fruits and their components seems to be favoured by high CO₂ levels (Dannehl *et al.*, 2012). According to Van Neck (2013), having controlled air movements improves the quality of the harvest. Farneti *et al.* (2013) studied post-harvest fruit quality. It appears that sugar and acid levels are strongly affected by the type of greenhouse (open or semi-closed): the semi-closed greenhouse produces heavier, firmer and less mature fruit (at marketable stage based on colour). The difference in maturity is due to the vertical temperature gradient and the different CO₂ levels between the semi-closed greenhouse and the reference greenhouse.

The temperature gradient, due to the low rate of air change, induces a higher CO₂ level than in a traditional greenhouse, which generates firmer fruits with a larger average size. This is conditional on adapting CO₂ levels and harvesting (Farneti *et al.*, 2013).

Vertical temperature gradient

According to Qian *et al.* (2009), a (semi)-closed greenhouse has a different climate than conventional open greenhouses. Sometimes, the cooling system is placed under the plants, which generates a significant vertical temperature gradient. This gradient will depend on the temperature of the greenhouse and the mixing speed of the air. It will bring higher temperatures after anthesis and lower during ripening, allowing for larger fruits (longer growth period).

Qian *et al.* (2015) tested the effect of the vertical temperature gradient. It seems that the gradient does not affect plant growth or yield. A decrease in the number of fruits developed in the lower part of the canopy is the only effect observed; but there is no effect on the total production of the season. Campen *et al.* (2009) observed that the vertical temperature gradient induces lower temperatures at the height of maturing fruits: this does not affect the quality of production, but allows a longer maturation which increases the number of fruits.

The temperature gradient may be due to the lower rate of air renewal than in a conventional greenhouse, it can also be accentuated by cooling down (Brazeau 2015).

According to Campen *et al.* (2009), a ventilation system under the gutters creates a vertical temperature gradient with colder air near the root system and warmer near the canopy. Heating using air ducts results in lower temperatures in the edges of the greenhouse, which creates a higher risk of botrytis than normal. Coolers suspended above the crop allow for a more homogeneous air, while consuming less energy (no air ducts) but they reduce the amount of incident light.

Phytosanitary risk

The semi-closed greenhouse allows an overpressure, which reduces the pests and diseases entrance and therefore the number of treatments (Brazeau 2015). Indeed, the opening time being greatly reduced, the intrusion of pests or diseases is clearly limited.

Cases of Botrytis infection have been observed in closed greenhouses of different studies (de Gelder *et al.*, 2012b, Heuvelink *et al.*, 2008). This can be avoided by precise control of the humidity level.

Le Quillec *et al.* (2015) suggest the possibility of apical necrosis with air mixing in a semi-closed greenhouse system.

Economical aspects

A semi-closed greenhouse like the Ultra Clima greenhouse would be about 30 €·m⁻² more expensive than a conventional greenhouse, so it should average 150 €·m⁻²; according to the estimated profitability, the investment would be amortized in less than 6 years (Brazeau 2015).

Dehumidification by absorption by a hygroscopic material

Adsorption is a physico-chemical phenomenon causing the fixation of molecules of water vapour on the surface of a hygroscopic media (adsorbent). Hygroscopic media are often highly concentrated salted solutions (bromides, chlorides, etc)

(Campen, 2009). Once this adsorbent is saturated, it must be regenerated to eliminate moisture: This regeneration can be ensured by the passage of heated air.

There are not a lot of studies about this system. According to Campen (2009), the liquids are expensive and may cause severe problems to the environment if a system failure or a leak occurs. For Kempkes *et al.* (2017), the disadvantage of hygroscopic dehumidification is the investment cost of the regeneration set. Ongoing research is investigating alternatives for an efficient brine regeneration.

A hygroscopic dehumidifier (AGAM VLHC 1020) was tested in 2017 at the Ctifl in a semi-closed greenhouse, but only from March 20th. The results are not published yet. In 2018, the system will be tested in winter and spring.

Perspectives

According to Kempkes *et al.* (2017), allowing high humidity is a first step in saving dehumidification costs. For that an efficient humidity control is needed.

For Le Quillec (oral communication), different technologies arise: adiabatic cooling of the water (cooled water feeds the exchanger of an air treatment unit), cyclonic exchanger used in grain dryers.

Conclusions

An overview of the different dehumidification systems is presented in table 1.

- Active Ventilation System (without heat recovery) does not save energy. To save energy, the AVS can be coupled with energy saving strategies such as temperature integration, higher humidity level or minimum pipes temperature.
- Thermodynamic dehumidification enables to save energy but the costs of the investments can lead to no-profitability. The sizing of the installation is essential.
- Dehumidification by absorption by a hygroscopic is also a technology to consider. It seems to be a promising technology but the costs are high and only view experimental experiences in greenhouses are available.
- A lot of research is being carried out on (semi)-closed greenhouses. Different technologies can be used which allow different amounts of energy saving. Higher yields are reported essentially due to higher CO₂ levels

Table 1. Overview of the different dehumidification systems

System	Energy saving	Crop (growth, yield)	Risks	Economical aspects	Constructor
AVS (without heat recovery)	0% to 40% if combined with energy savings strategies	No influence	Botrytis (monitor)	Profitability over 3 - 4 years depending of the reference	Van Dijk heating Horconex, Ammerlaan construction
AVS (with heat recovery)	12%	No influence	Botrytis (monitor)	Profitability over 8 years	
Thermodynamic dehumidification	9 to 20%	No influence	Botrytis (monitor)	Profitability not clear, depending on the installation costs	Giordano Thermetic
(semi)-closed greenhouse	16 to 35%	Higher yield 5 to 20%	Botrytis (monitor)	Variable because different technologies are available	Kubo, Horconex, Richel, Certhon
Hygroscopic adsorption	No information	No information	No information	Costs of the brine regeneration	Agam Greenhouse

References

- Brazeau T., 2015. Impacts et analyse technico-économique de différentes conduites climatiques en tomate hors-sol sous serre. Mémoire, Sciences agricoles.
- Campen J.B., 2009. Dehumidification of greenhouses. Thesis, Wageningen University, 117 p.
- Campen, J. B., F. L. K. Kempkes. 2009. Climatic Evaluation of Semi-Closed Greenhouses. *Acta Horticulturae* 893, pp. 495-502.
- Coomans M., Allaerts K., Wittemans L., Pinxteren D., 2013. Monitoring and energetic performance of two similar semi-closed greenhouse ventilation systems. *Energy Conversion and Management* 76, 128-136.
- Dannehl D., Huber C., Rocksch T., Huyskens-Keil S., Schmidt U., 2012. Interactions between changing climate conditions in a semi-closed greenhouse and plant development, fruit yield, and health-promoting plant compounds of tomatoes. *Scientia Horticulturae* 138, 235-243.
- De Gelder A., Poot E.H., Dieleman J.A., de Zwart H.F., 2012a. A concept for reduced energy demand of greenhouses: the next generation greenhouse cultivation in the Netherlands. *Acta Hort.*, 952: 539-544.
- De Gelder A., Dieleman J. A., Bot G. P. A , L. F. M. Marcelis, 2012b. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 87(3), 193-202.
- De Zwart H.F., 2007. Overall Energy Analysis of (Semi) Closed Greenhouses. *Acta Hort.* 801: 811-818.
- De Zwart H.F., Speetjens B., 2013. De next generation semigesloten kas. Wageningen UR Glastuinbouw, 50 p.
- Farneti B., Schouten R. E., Qian T., Dieleman J. A., Tijssens L. M. M., Woltering E.J., 2013. Greenhouse climate control affects postharvest tomato quality. *Postharvest Biology and Technology* 86: 354-361.
- Gilli C., Camps C., Fleury Y., 2017. Influence of thermodynamic dehumidification on energy consumption, yield and quality of greenhouse tomato crop. *Acta Hort.*, 1170: 509-515.
- Grisey A., 2013. Le projet serre capteur d'énergie, bilan après 5 ans de travaux. *Infos Ctifl* 293, 53-59.
- Heuvelink E., Bakker M., Marcelis L. F. M., Raaphorst M., 2008. Climate and Yield in a Closed Greenhouse, *Acta Hort.* 801: 1083-1092.
- Horconex, 2017. Activenlo® greenhouse. <http://www.horconex.nl/en/Greenhouses/Activenlor-greenhouse> [29.11.2017].
- Kempkes F.L.K., Janse J., Hemming S., 2014. Greenhouse concept with high insulating double glas with coatings and new climate control strategies; from design to results from tomato experiments. *Acta Hort.* 1037: 83-92.
- Kempkes F., de Zwart H.F., Muñoz P., Montero J.I., Baptista F., Giuffrida F., Gilli C., Stepowska A., Stanghellini C., 2017. Heating and dehumidification in production greenhouses at northern latitudes: energy use. *Acta Hort.*, 1164: 445-452.
- Le Quillec S., Lesourd D., Loda D., Louin B., 2010. Economies d'énergie en serre. Déshumidification thermodynamique en culture de tomate hors sol. *Infos Ctifl* 266, 35-40.
- Le Quillec S., Lesourd D., Loda D., Michel C., 2011. Economies d'énergie en serre. Déshumidification thermodynamique en culture de tomate hors sol. *Infos Ctifl* 277, 50-55.
- Le Quillec S., Albert B., Brajeul E., Lesourd D., Loda D., Barette R., 2015. Energie en tomate hors-sol. Les premiers résultats de la nouvelle serre d'expérimentation. *Infos Ctifl* 308, 42-47.
- Le Quillec S., Truffaut V., Brajeul E., Lesourd D., Loda D., Gerondeau I., 2016. Serre semi-fermée et déshumidification. Acquis et perspectives d'évolution. *Infos Ctifl* 326, 39-45.
- Méthot J., 2016. Évaluation du potentiel de croissance et de rendement d'une culture de tomates biologiques cultivées dans une serre climatisée à l'aide d'un système géothermique. Mémoire maîtrise en biologie végétale, Université de Laval.
- Opdam J.J.G., Schoonderbeek G.G., Heller E.M.B., Gelder A., 2005. Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. *Acta Hort.* 691: 517-524.
- Qian T., Dieleman J.A., Elings A., De Gelder A., Marcelis, L.F.M., 2009. Comparison of Climate and Production in Closed, Semi-Closed and Open Greenhouses. *Acta Hort.* 893: 807-814.
- Qian T., Dieleman J.A., Elings A., Marcelis L.F.M., 2012. Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. *Scientia Horticulturae* 145, 1-9.
- Qian T., Dieleman J.A., Elings, De Gelder A., Marcelis L.F.M., 2015. Response of tomato crop growth and development to a vertical temperature gradient in a semi-closed greenhouse. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 90(5), 578-584.
- Stanghellini C., Meurs Van W.T.M., 1989. Crop transpiration: a greenhouse climate control parameter. *Acta Hort.*, 245:384-388.
- Stanghellini C., Baptista F., Eriksson E., Gilli C., Giuffrida F., Kempkes F., Muñoz P., Stepowska A., Montero J.I., 2016. Sensible use of primary energy in organic greenhouse production. *BioGreenhouse COST Action FA 1105*, 54 p.
- Van Dijk heating, 2012. Système de Ventilation Active (SVA) 6.03 FR. Version 1.2.
- Van Neck, W. 2013. Bespaar energie met gecontroleerd telen. *Boerenbond, Management&Techniek* 4, pp. 46-48.