



"Dieses Projekt wurde im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 101000801 gefördert."



Thermochemical Fluids in Greenhouse Farming

SCHULUNGSHANDBUCH

KOORDINATOR



Verzichtserklärung

Bei der Verbreitung der Ergebnisse muss angegeben werden, dass sie nur die Meinung des Autors wiedergibt und dass die Agentur und die Europäische Kommission nicht für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen verantwortlich sind.

Inhalt

1. Einleitung	4
1.1. Konsortium	4
1.2. Projektskizzen.....	4
1.3. Begriff	5
1.4. Anwendung für Gewächshäuser	6
1.5. Anwendung für den Trocknungsprozess bei der Lebensmittelzubereitung	7
1.6. Regeneration des TCF.....	7
1.7. In TheGreefa verwendete Flüssigkeiten.....	8
2. Demonstration der TheGreefa-Technologien	9
2.1. Demonstrator in der Schweiz	13
2.2. Demonstrator in Tunesien	21
3. Simulationen und Optimierung – Fallstudien	30
3.1. Fallstudien	30
3.2. Fallstudie 1 – Unbeheiztes Gewächshaus vom Typ Almería	35
3.3. Case Study 2 – Unbeheizte mehrfeldrige Gewächshäuser in Spanien	37
3.4. Fallstudie 3 – Beheizte mehrgespannte Gewächshäuser in Spanien.....	38
3.5. Case-Studie 4 – Unbeheiztes Mehrspanngewächshaus in Italien.....	40
3.6. Fallstudie 5 – Beheizte mehrfeldrige High-Tech-Gewächshäuser in Italien	41
3.7. Schlussfolgerungen	43
4. TheGreefa - Auswirkungen auf Umwelt und Wirtschaft	44
4.1. Auswirkungen auf die Umwelt	44
4.2. Wirtschaftliche Bedeutung.....	54
4.3. Schlussfolgerungen	58
5. Soziale Aspekte und Richtlinien	60
5.1. Europäischer strategischer Rahmen für die Landwirtschaft.....	60
5.2. Europäischer Rechtsrahmen im Energiebereich	61
5.3. Europäischer Rechtsrahmen für Wasser	61
5.4. Europäischer Rechtsrahmen für Chemikalien.....	62
5.5. Schlussfolgerungen	63
References	64
TheGreefa Partner und weitere Beteiligte	65

1. Einleitung

Dieses Dokument stellt die Struktur und die Ergebnisse des Projekts Thermochemical Fluids in Greenhouse Farming “TheGreefa” (Horizon 2020 R&I Programme, Call LC-FNR-06-2020, Grant Agreement no. 101000801) vor und gibt einen Überblick über die wichtigsten Phasen und Ergebnisse.

1.1. Konsortium

TheGreefa ist ein Forschungs- und Innovationsprojekt, das von der Europäischen Kommission gefördert und von 12 Partnern aus 7 Ländern realisiert wurde (Abb. 1). Das Konsortium, ein Team aus Forschungseinrichtungen, KMU, landwirtschaftlichen Betrieben und Rechtsexperten wurde gebildet, um ein ausgewogenes Verhältnis von Fähigkeiten und Fachwissen für die Entwicklung einer kostengünstigen und innovativen Technologie zu gewährleisten, die den Einsatz fossiler Energie in der Landwirtschaft erheblich reduzieren wird.

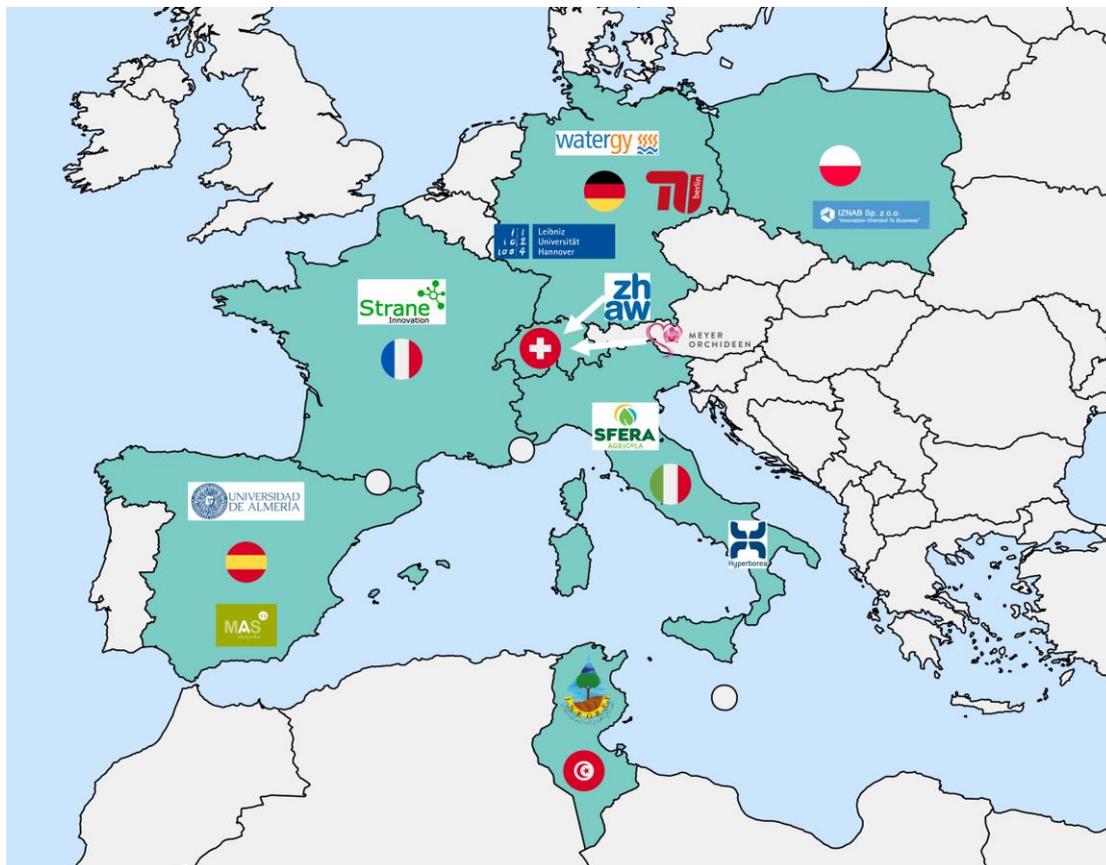


Abbildung 1. Partner des TheGreefa-Konsortiums.

1.2. Projektskizzen

Gegenstand des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung einer kostengünstigen und innovativen Technologie, die den Einsatz fossiler Energie in der Landwirtschaft deutlich reduzieren wird.

Die von TheGreefa vorgeschlagenen Lösungen stehen in direktem Einklang mit den Hauptzielen der EU, die Nutzung erneuerbarer Energien in der Landwirtschaft zu erhöhen, wobei Gewächshäuser immer mehr an Bedeutung gewinnen. In den entwickelten Ländern betrifft eine hohe Lebensqualität vor allem die Ernährung, die frisch, gesund und abwechslungsreich sein soll. Oft sind lange Transportwege notwendig, denn der Transport von frischem Obst und Gemüse verursacht

einen hohen CO₂-Ausstoß und einen erheblichen ökologischen Fußabdruck der Lebensmittel. Einkommensschwache Regionen mit ungünstigen Bedingungen für Kulturen des Intensivanbaus können sich den Import von Nahrungsmitteln nicht leisten. In beiden Fällen stellen Gewächshäuser mit nachhaltiger Klimatisierung, Feuchteregulierung, Wasserrückgewinnung und Trocknung von Lebensmitteln die richtige Lösung dar entsprechend der Anforderungen von TheGreefa.

1.3. Begriff

Der Fokus von TheGreefa liegt auf Anwendungen für Gewächshäuser und Trocknungsprozesse. Die Gewächshaustechnologie umfasst Anwendungen für die Klimatisierung von Gewächshäusern, einschließlich Heizung, Kühlung und Luftfeuchtigkeitsregelung. Die vorgeschlagene Technologie verwendet flüssige Trockenmittel, sogenannte "Thermo-Chemical Fluids" (TCF). Typische TCFs sind Salzlösungen auf Basis von Natriumhydroxid oder Magnesiumchlorid. Der gemeinsame Effekt bei allen Anwendungen sind die hygroskopischen Eigenschaften des TCF, die die Aufnahme von Wasserdampf aus der Luft ermöglichen und somit auch fühlbare Wärme freisetzen, die aus der im Dampf gespeicherten latenten Wärme gewandelt wird. Um eine Annäherung an den Prozess zu geben:

- 1 Tonne Luftfeuchtigkeit, die in den TCF aufgenommen wird, entsprechend der Energie des Phasenwechsels, setzt 680 kWh Wärme frei (rechter Teil von Abbildung 2). Die Feuchtigkeit wird dann zu flüssigem Wasser kondensiert.
- Durch die Aufnahme von Wasser wird das TCF verdünnt. Wenn das TCF bis zu einem gewissen Grad verdünnt ist, kann der Prozess nicht fortgesetzt werden und das TCF muss regeneriert werden. Das aufgenommene Wasser muss wieder ausgetrieben werden.
- Für die Rekonzentration (Regeneration) ist die gleiche Energiemenge, die durch den Absorptionsprozess freigesetzt wird, wieder in das System einzubringen, wiederum ca. 680 kWh pro Tonne verdampftes Wasser. Temperaturen unter 60 °C der Wärmequelle sind für den Regenerationsprozess weitgehend ausreichend, die genaue Temperatur hängt vom Phasengleichgewicht des Druckdampfes zwischen dem TCF und der Umgebungsluft ab.

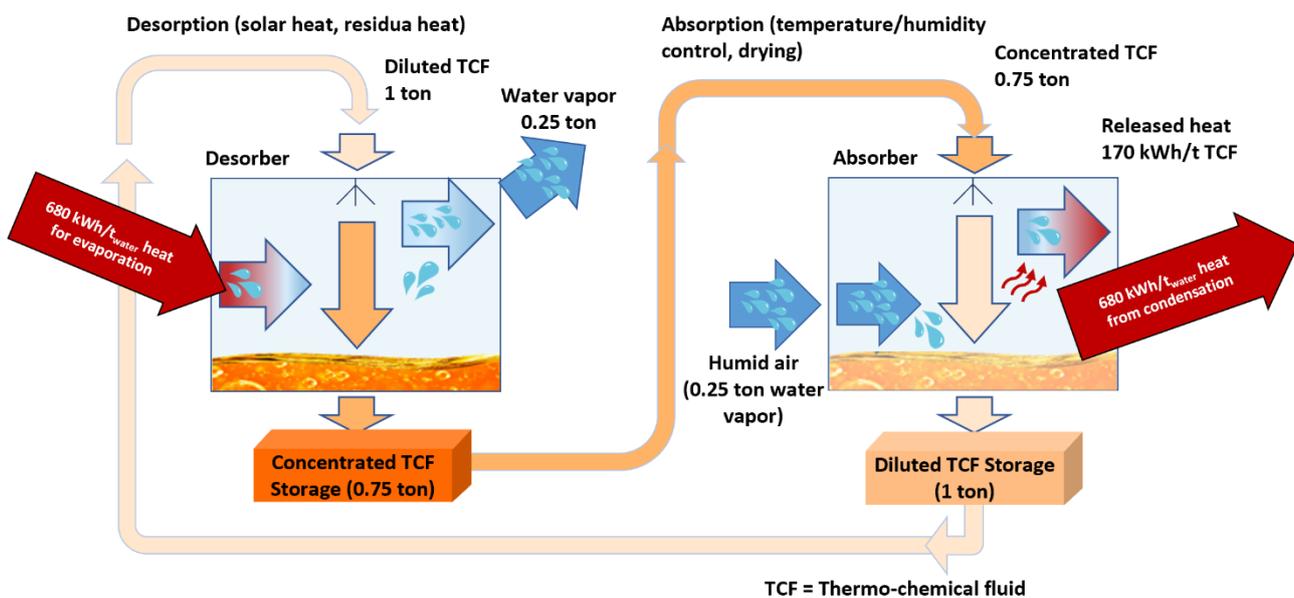


Abbildung 2. TheGreefa-Konzept.

Das Wasser kann in Form von Wasserdampf, der von der trockenen Luft aufgenommen wird, freigesetzt werden (linker Teil von Abbildung 2) oder es kondensiert und kann als reines Wasser zurückgewonnen werden.

Das verdünnte TCF kann in Zeiträumen regeneriert und gespeichert werden, in denen die Wärme zur Verfügung steht, zum Beispiel an sonnigen Tagen mit Hilfe von Sonnenenergie oder durch Abwärme. Das konzentrierte TCF kann in einfachen Kunststoffbehältern (z.B. IBC-Tanks für kleine Anwendungen) so lange wie nötig gelagert werden, z.B. als saisonale Speicherung. Die zeitliche und räumliche Verschiebung zwischen dem Regenerationsprozess und dem effektiven Einsatz des TCF ist der große Vorteil der innovativen Lösung im Vergleich zu bestehenden Sorptionsverfahren auf Basis von Feststoffen, wie sie etwa in Sorptions-Drehrädern verwendet werden.

Im Regenerationsmodus kann das Verfahren mit einem Befeuchtungs- und (Verdunstungs-) Kühleffekt als Zusatzleistung betrieben werden.

1.4. Anwendung für Gewächshäuser

Die Gewächshausbeheizung ist der wichtigste Kostenfaktor für das Gewächshausgeschäft in Mitteleuropa. TheGreefa kann in diesen Regionen erfolgreich eingesetzt werden, wodurch der Primärenergieaufwand für die Heizung deutlich reduziert wird.

Diese Anwendung wird in Abbildung 3 unten erläutert, in der die Energie- und Wasserflüsse eines Standardgewächshauses (links) mit einem Gewächshaus verglichen werden, in dem die vorgeschlagene Technologie installiert ist (rechts).

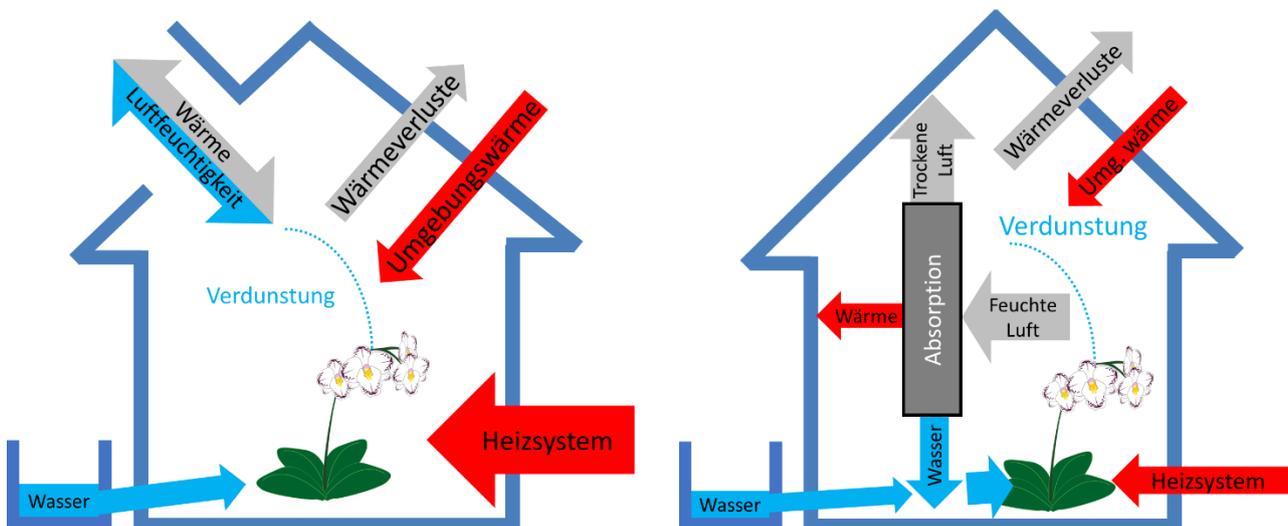


Abbildung 3. Anwendung der Technologien in Gewächshäusern – Standardgewächshaus (links) und die vorgeschlagene Technologie (rechts).

Der Gesamtenergieverbrauch (rote Pfeile) wird stark reduziert: Auf der einen Seite wird der Wärmeverlust für die Lüftung nahezu auf null gesetzt, da die Luft umgewälzt und die Feuchtigkeit durch den TCF abgeführt wird. Auf der anderen Seite wird durch den Absorptionsprozess Wärme freigesetzt.

Die Technologie besteht aus einem offenen Gegenstrom-Wärme- und Massenaustauscher (Absorber), der die Luft unter Verwendung von TCF durch Absorption entfeuchtet und erwärmt, bzw. zur Kühlung abführt. Das aufgenommene Wasser kann als reines Wasser zurückgewonnen werden.

Die thermische Wärme kann saisonal in Form von konzentriertem TCF gespeichert werden. Es findet eine zeit- und ortsversetzte Rückgewinnung der thermischen Wärme statt.

1.5. Anwendung für den Trocknungsprozess bei der Lebensmittelzubereitung

Das Verfahren eignet sich auch sehr gut für die Trocknung von landwirtschaftlichen Gütern wie Kräutern und Früchten, die unabhängig von Witterungsbedingungen sofort nach der Ernte getrocknet werden müssen.

Diese Anwendung wird in Abbildung 4 erläutert. Die Luft wird in einem Absorber im Gegenstrom mit einer konzentrierten TCF getrocknet, aber nicht unbedingt erhitzt, da die Hitze die Blätter/Gemüse schädigen und deren Qualität beeinträchtigen könnte. In einem geschlossenen Kreislauf wird die freigesetzte trockene Luft dann in die Trockenkammer geführt, wo die Feuchtigkeit des Gemüses aufgenommen werden kann. Das verdünnte TCF kann dann ohne Wärmeverlust gespeichert und regeneriert werden, wenn erneuerbare Wärme (z.B. Solarwärme) zur Verfügung steht. Im Vergleich zu den modernen Anlagen mit Kompressionsluftentfeuchern beschränkt sich bei einem Sorptionstrockner der elektrische Energieverbrauch auf den Betrieb von Ventilatoren und Flüssigkeitspumpen, während die benötigte Wärmeenergie vollständig durch eine Niedertemperatur-Wärmequelle bereitgestellt werden kann, die z.B. erneuerbar sein kann (Solarwärme, Abwärme). Nach dem Regenerationsprozess kann die bereitgestellte Energie auch in Form von konzentriertem TCF verlustfrei gespeichert werden.

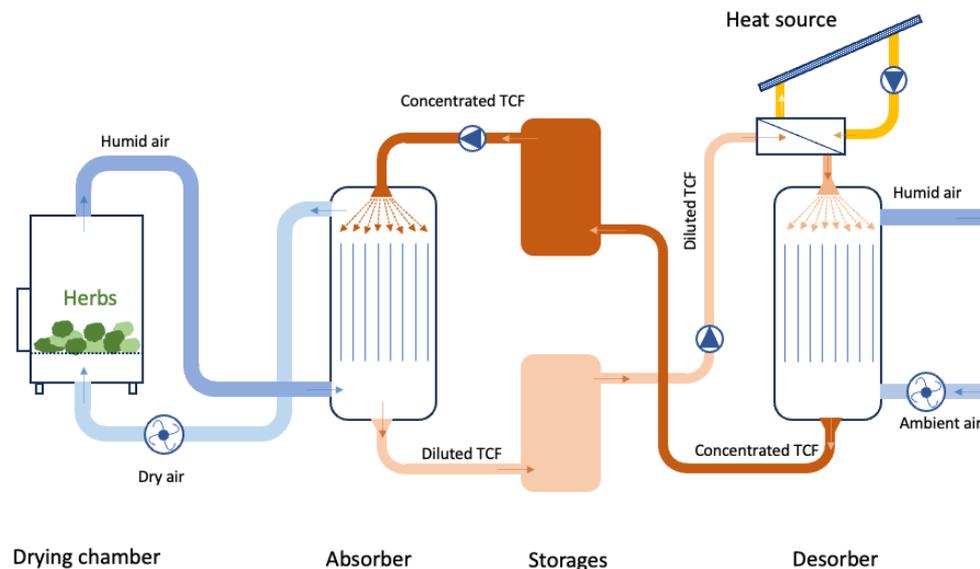


Abbildung 4. Trocknungsprozess mit dem Absorber und Desorber.

1.6. Regeneration des TCF

Nach der Absorption hat die thermochemische Flüssigkeit den Sättigungspunkt erreicht und ist dann für die Trocknung/Entfeuchtung nicht mehr verwendbar. Das TCF muss regeneriert werden, um das absorbierte Wasser freizusetzen. Die Regeneration ist der entgegengesetzte Prozess der Absorption. Das TCF wird in Kontakt mit trockener Luft gebracht und Teile des Wassers aus der TCF-Lösung werden in die Luft verdampft, die durch das Gerät strömt. Um den Prozess zu forcieren, ist in der Regel eine niedrige Temperatur ausreichend, um die Lufttemperatur zu erhöhen und damit die relative Luftfeuchtigkeit zu verringern. Das Temperaturniveau hängt vom Dampfdruckgleichgewicht zwischen Luft und TCF ab, in jedem Fall liegt es unter 60 °C. Im Winter

liegt die Temperatur durch den geringen Wasseranteil der Außenluft deutlich darunter. Die "Wärme" wird während dieses Prozesses im TCF in Form von thermochemischem Potential (konzentriertes TCF) gespeichert.

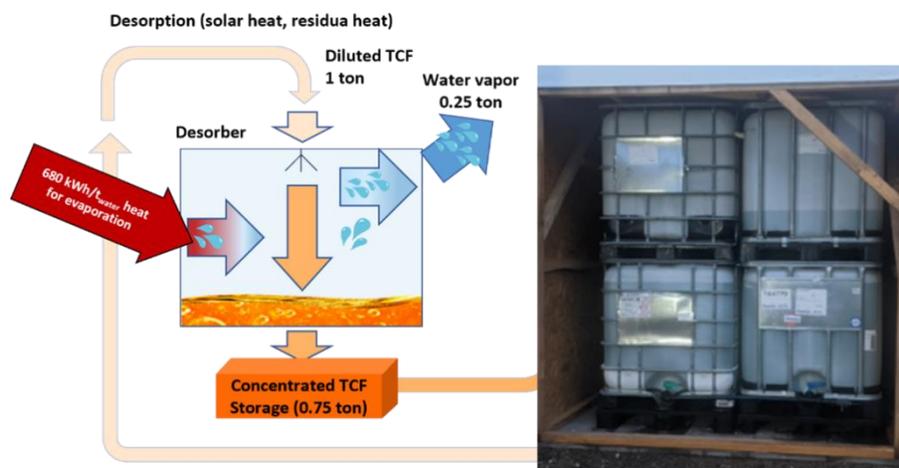


Abbildung 5. TCF-Regeneration.

Die Absorption und Desorption kann in der gleichen Absorptionskollonne (kurz "Absorber" genannt) in verschiedenen Zeiträumen stattfinden. Das Dampfdruckgleichgewicht zwischen Luft und TCF bestimmt, in welche Richtung das Wasser/die Feuchtigkeit wandert, also in die Flüssigkeit oder aus ihr heraus.

1.7. In TheGreefa verwendete Flüssigkeiten

Die in diesem Projekt verwendeten thermochemischen Fluide sind $MgCl_2$ und $NaOH$.

$MgCl_2$ wird nicht sehr häufig in Trocknungsprozessen verwendet, da seine Hygroskopische Eigenschaft viel geringer ist als die etwa von $LiBr$ oder $LiCl$. $MgCl_2$ -Lösungen können die relative Luftfeuchtigkeit bei Umgebungstemperatur (20 °C) auf 30 % senken, jedoch nicht darunter. Die für die Anwendung im Gewächshaus erforderliche Luftfeuchtigkeit liegt jedoch im Bereich von 40-70%, was bedeutet, dass die Hygroskopizität von $MgCl_2$ ausreichend ist.

Der Vorteil von $MgCl_2$ ist seine hohe Verfügbarkeit, da es Teil des Meerwassers mit einer Konzentration im Meerwasser von 1 kg/m^3 ist, und die sehr niedrigen Kosten von ca. 100 €/m^3 .

$NaOH$ wird für die Trocknung verwendet. Das $MgCl_2$ ist aufgrund seiner geringen Hygroskopizität hier nicht geeignet. Für die Trocknung der Biomasse muss die Luftfeuchte am Absorberauslass auf ca. 10 % reduziert werden. Dies ist mit $NaOH$ möglich, dessen Verfügbarkeit ebenfalls hoch ist und die Kosten ausreichend niedrig sind. Eine Grenze für die Verwendung von $NaOH$ ist seine Reaktion mit dem in der Luft enthaltenen CO_2 . Diese Reaktion hat keinen wesentlichen Einfluss auf den Trocknungsprozess, da die Luft in einer geschlossenen Absorber-Trockenkammer umgewälzt wird und so jeweils nur eine sehr geringe Menge an CO_2 bindet.

Diese beiden thermochemischen Flüssigkeiten sind unbedenklich: $MgCl_2$ ist ein Beiprodukt bei der Gewinnung von Kochsolt, während $NaOH$ etwa als Zutat für die Zubereitung von Speisen verwendet wird.

2. Demonstration der TheGreefa-Technologien

Wie bereits in Abschnitt 1.3 vorgestellt, verwendet TheGreefa flüssige Trockenmittel, sogenannte Thermo-Chemical Fluids (TCF). Typische TCFs sind Salzlösungen auf Basis von Natriumhydroxid oder Magnesiumchlorid. Der gemeinsame Effekt bei allen Anwendungen sind die hygroskopischen Eigenschaften des TCF, die die Aufnahme von Wasserdampf aus der Luft ermöglichen und somit auch fühlbare Wärme freisetzen, die aus der im Dampf gespeicherten latenten Wärme umgewandelt wird. Um eine Annäherung an den Prozess zu geben:

- 1 Tonne Luftfeuchtigkeit, die im Gewächshaus absorbiert wird, setzt beim Phasenwechsel 680 kWh Wärme frei. Die Feuchtigkeit (Dampf) wird zu flüssigem Wasser. Der Effekt ist, dass das Gewächshaus gleichzeitig beheizt und entfeuchtet wird
- Durch die Aufnahme von Wasser wird das TCF verdünnt. Wenn das TCF bis zu einem gewissen Grad verdünnt ist, kann der Prozess nicht fortgesetzt werden und das TCF muss regeneriert werden. Das aufgenommene Wasser muss wieder ausgetrieben werden.
- Der verdünnte TCF kann über einen langen Zeitraum ohne Verluste gelagert werden, der verdünnte TCF wird regeneriert, wenn Wärme zur Verfügung steht.
- Wenn Wärme verfügbar ist, z. B. an sonnigen Tagen oder wenn Restwärme zur Verfügung steht, wird der verdünnte TCF zur Regeneration transportiert, die sich am selben Ort des Gewächshauses oder auch an einem anderen Ort befinden kann (linker Teil von Abbildung 6 unten), da es während des Transports keine Verluste gibt. Es wird keine thermische Energie gespeichert, sondern das Potenzial, thermische Energie freizusetzen.
- Für die Rekonzentrierung (Regeneration) soll die gleiche Energiemenge, die durch den Absorptionsprozess freigesetzt wird, wieder in das System eingebracht werden, wiederum ca. 680 kWh/Tonne verdampftes Wasser. Temperaturen unter 60 °C der Wärmequelle sind für den Regenerationsprozess weitgehend ausreichend, die genaue Temperatur hängt vom Phasengleichgewicht des Druckdampfes zwischen dem TCF und der Umgebungsluft ab.
- Das Wasser kann in Form von Wasserdampf freigesetzt werden, der von der trockenen Luft aufgenommen wird, oder es kann kondensiert und als reines Wasser zurückgewonnen werden (zentraler Teil von Abbildung 6).
- Das konzentrierte TCF kann so lange gelagert werden, wie es notwendig ist, und auch über einen langen Zeitraum.

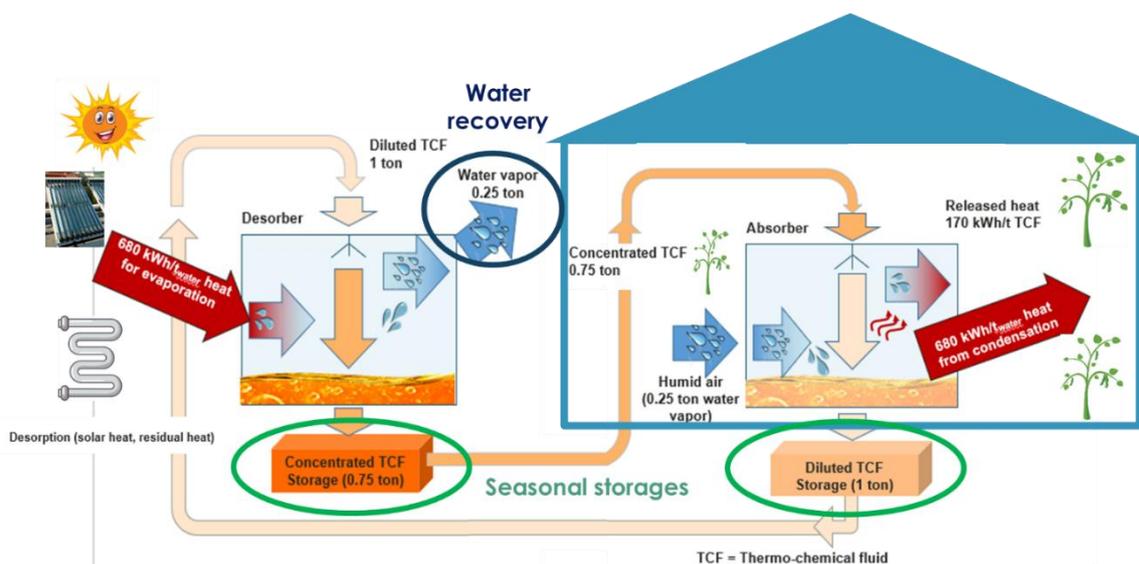


Abbildung 6. Fluid's Loop für Gewächshäuser.

TheGreefa wird in kontinentalen Klimaregionen verwendet, um Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Gewächshäusern zu regulieren. Durch den Einsatz von TheGreefa kann der Energiebedarf für die Heizung reduziert werden, was sich in diesen Regionen erheblich auf die Gesamtbilanz auswirkt. Durch die interne Kontrolle der Luftfeuchtigkeit entfällt der Luftwechsel mit trockener und kälterer Außenluft. Somit werden Wärmeverluste nach außen reduziert. Zusätzlich wird durch den Absorptionsprozess weitere Wärme freigesetzt, wodurch der Energiebedarf für die Beheizung weiter sinkt. In Abbildung 7 ist auf der linken Seite ein traditionelles Gewächshaus und auf der rechten Seite das Gewächshaus TheGreefa dargestellt. Der Regenerationsprozess findet außerhalb des Gewächshauses statt, und die feuchte Luft wird dann an die Atmosphäre abgegeben. Im kontinentalen Bereich ist es nicht erforderlich, Wasser zurückzugewinnen.

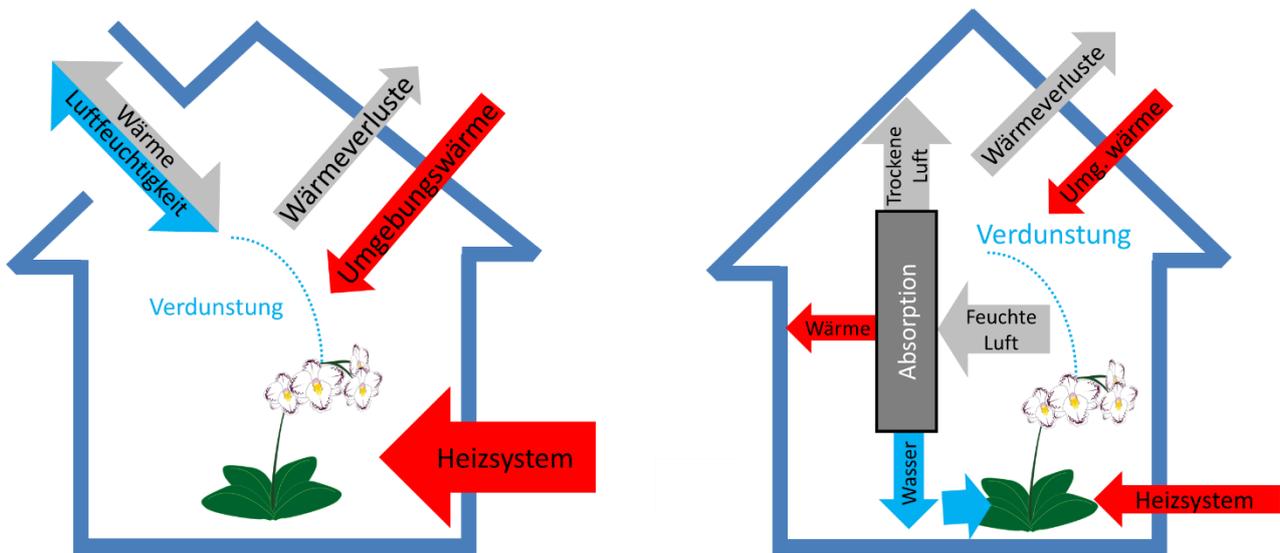


Abbildung 7. TheGreefa-Anwendung im Vergleich zum Standard-Gewächshaus.

Absorber

Der Absorber ist ein sehr einfaches Bauteil. Es handelt sich um einen Kunststoff-Luftwäscher, der durch Füllkörper bestückt ist. Kunststoff ist wegen des hohen Korrosionsgrades des TCF (Salzlösung) notwendig.

Die Luft strömt von unten nach oben, das TCF von oben nach unten. Die Packung erhöht die Kontaktfläche und die Kontaktzeit zwischen Luft und TCF.



Abbildung 8. Füllkörper unterschiedlicher Größen.

Um einen hohen Absorptionsgrad zu gewährleisten, ist eine minimale Verweilzeit der beiden Flüssigkeiten im Absorber erforderlich. Dies geschieht durch die Einstellung einer ausreichenden Luftgeschwindigkeit und einer minimalen TCF-Strömungsdichte.

Im Schweizer Demonstrator beträgt die Verweilzeit 1,5 Sekunden und es werden zwei Werte festgelegt: 1 m/s für die Luftgeschwindigkeit (leerer Absorber) und $12 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ für die TCF-Strömungsdichte. Dieser Bemessungsparameter ergibt einen Durchmesser von

0,4 m und eine aktive Höhe von 1,3 m. Die aktive Höhe ist der Teil des Absorbers, in der es zu einem Kontakt zwischen Luft und TCF kommt.

Der einfache Aufbau ist in Abbildung 9 dargestellt: Links kommt in der Anlage der ZHAW ein transparenter Prototyp zum Einsatz. Der "weiße" Teil wird durch die Packung gefüllt und ist die aktive Höhe. Rechts ist der Absorber zu sehen, der im Schweizer Demonstrator installiert ist.



Abbildung 9. Transparenter Absorber im ZHAW-Labor (links) und der im Schweizer Demonstrator installierte Absorber (rechts).

Absorber: Komponenten

Der Absorber besteht aus verschiedenen Teilen, die in Abbildung 10 durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet sind:

Gelb: Der TCF-Verteiler stellt sicher, dass das TCF im gesamten Abschnitt des Absorbers homogen verteilt wird; Blau: Aktiver Teil / Füllkörper: Dieser Teil ist mit kleinen Füllkörpern gefüllt. Hier findet der Absorptionsprozess statt; Rot: die schwimmende Packung verhindert die Bildung von Aerosolen im Wäscher; Lila: Der Sumpf sammelt den aus dem aktiven Teil kommenden TCF auf. Dieser wird von hier aus wieder in den Absorber gepumpt. Grün: Der Demister verhindert, dass der Flüssigkeitstropfen den Absorber verlässt.

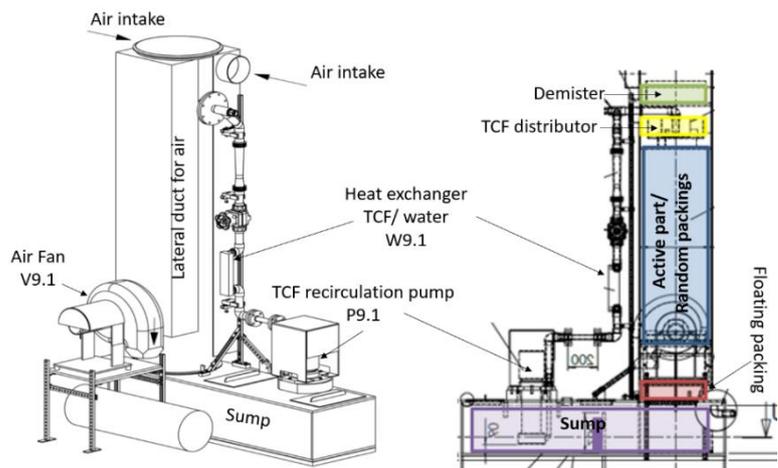


Abbildung 10. Absorberkomponenten.

Die Luft wird über ein Gebläse in den Absorber gesaugt. Der Lüfter (V9.1) befindet sich an der Abluftseite. Der Absorber arbeitet unterhalb des Umgebungsdrucks. Diese Lösung verhindert das Austreten von unbehandelter Luft aus dem Absorber.

Auf der TCF-Seite wird der TCF durch die Umwälzpumpe (Tauchkreislumpumpe - P9.1) aus dem Sumpf abgesaugt und über den Plattenwärmetauscher (W9.1) in den Absorberkopf gepumpt, wo er durch einen Flüssigkeitsverteiler gleichmäßig über die Packung verteilt wird.

Der Wäscher steht komplett im Sumpf und hat am Boden Auslauföffnungen für die Salzlösung. Dieser Siphon trennt die Luft im Wäscher von der Atmosphäre im Auffangbehälter, so dass er atmosphärisch offen zur Gewächshausumgebung betrieben werden kann. Zwischen dem Wäscher und der Lösungsumwälzpumpe befindet sich ein Überlauf im Vorratsbehälter, der für einen gleichmäßigen Durchfluss sorgt und somit das Auftreten einer heterogenen TCF-Konzentrationsverteilung verhindert.

Alle Teile des Absorbers, die mit dem TCF in Berührung kommen, bestehen aus Polypropylen oder Polyvinylchlorid. Der Wärmetauscher ist auf der Lösungsseite mit einem Kunststoff (Parylene) beschichtet.

Absorber: Regelung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit wird durch die TCF-Konzentration gesteuert, während die Lufttemperatur durch die TCF-Temperatur gesteuert wird.

Die Konzentration von TCF im Absorber muss auf einem bestimmten Prozentsatz gehalten werden, um den Absorptionsprozess zu ermöglichen. Nur so ist es möglich, die Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus zu kontrollieren. Ein zu stark verdünnter TCF kann die Luftfeuchtigkeit nicht mehr kontrollieren.

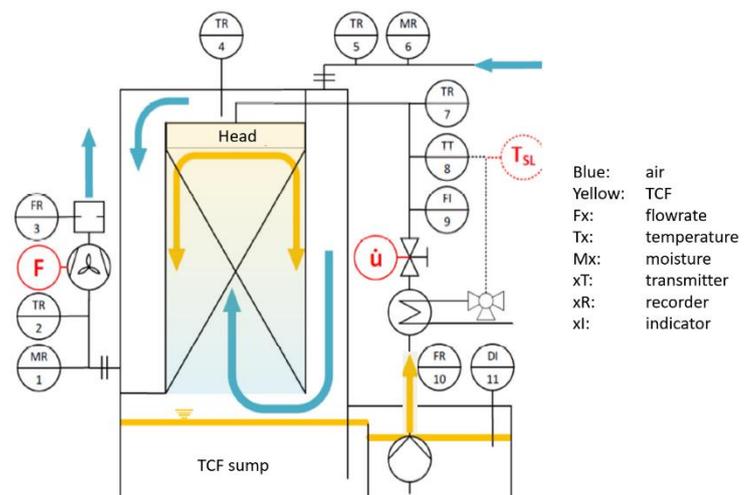


Abbildung 11. Absorber: Regelung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit.

Der Prozess zur Feuchteregelung wird als Batch-Prozess ausgeführt. Sobald der Messpunkt MR1 eine zu hohe Luftfeuchtigkeit anzeigt, wird der TCF-Sumpf entleert und mit konzentriertem TCF aufgefüllt.

Die Lufttemperatur wird am Absorberauslass (TR 2) gemessen. Liegt die Temperatur außerhalb des geforderten Bereichs, z. B. zu niedrig oder zu hoch, wird der TCF in dem in Abbildung 11 gezeigten Wärmetauscher erhitzt oder abgekühlt. Im Schweizer Gewächshaus handelt es sich bei dem Wärmetauscher um einen TCF/Wasser-Wärmetauscher.

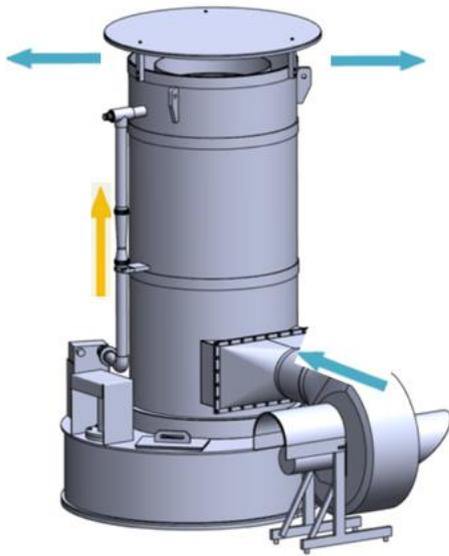


Abbildung 12. Modell Desorber.

Desorber: Regeneration

Der Desorber wird zur Regeneration des verdünnten TCF verwendet. Die resultierende Lösung wird auch als Konzentrat bezeichnet)

Der Desorber hat die gleiche Bauweise wie der Absorber, wird aber unter Überdruck betrieben. Der Lüfter befindet sich am Lufteintritt. Die Luft tritt direkt von unten in den Desorber ein und verlässt ihn oben.

Der Wärmetauscher wird verwendet, um den für den Desorptionsprozess erforderlichen Energieeintrag zu liefern.

Die Temperatur im Desorber für den Regenerationsprozess (z. B. Verdampfungsprozess des im TCF enthaltenen Wassers und dessen Aufnahme durch die Luft) beeinflusst die Geschwindigkeit, die

erforderlich ist, um die erforderliche Konzentration des TCF zu erreichen.

Der Betrieb des Desorbers ist ebenfalls ein Batch-Prozess. Der Desorbersumpf ist zunächst leer. Für die Regeneration wird es mit verdünntem TCF aufgefüllt, das durch den Desorber aus dem Sumpf und letztlich wieder zurück in den Sumpf zurückgeführt wird. Basierend auf der Dichtemessung und der Lösungstemperatur wird die Konzentration des TCF bestimmt. Wenn die maximale TCF-Konzentration erreicht ist (im Schweizer Demonstrator 32 %), wird der Desorptionsprozess beendet und das konzentrierte TCF wird aus dem Desorbersumpf in den konzentrierten TCF-Speicher gepumpt.

Weitere Einzelheiten finden Sie auf der Webseite von Cordis oder auf der Webseite von TheGreefa unter Download/Publikationen, im Dokument "Konzept für ein vollautomatisches System und im Betriebshandbuch".

Hier die Links:

Cordis: <https://cordis.europa.eu/project/id/101000801/results/>

TheGreefa: https://thegreefa.eu/wp-content/uploads/2024/06/THEGREEFA_D1.3-Control-system-and-operating-manual.pdf

2.1. Demonstrator in der Schweiz

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Schweizer Demonstrator des TheGreefa-Projekts. Der Schweizer Demonstrator ist ein 600 m² großes Gewächshaus in der Nähe von Zürich. Es wurde speziell für die Kultivierung von Orchideen entwickelt. Die Pflanzen werden nicht direkt auf den Boden gestellt, sondern auf Tischen, wie in Abbildung 13 kultiviert.



Abbildung 13. Pflanztische im Schweizer Demonstrator. In Grün ist der Absorber markiert.

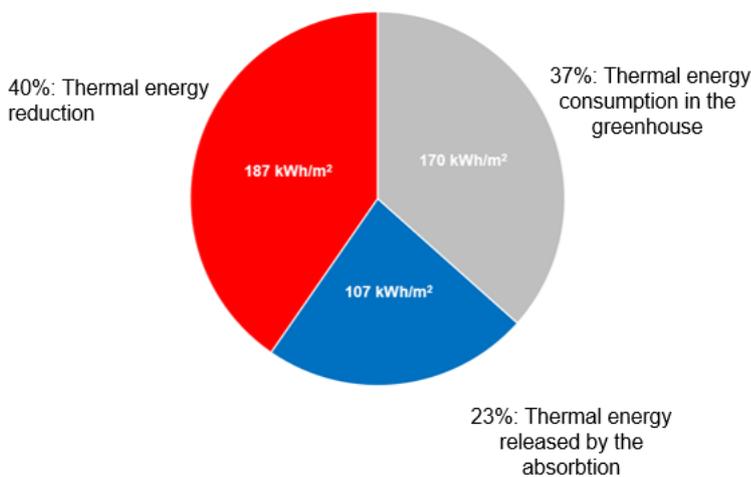


Abbildung 14. Jährliche thermische Energiebilanz im Schweizer Demonstrator.

Energiebilanz im Schweizer Demonstrator

Basierend auf Daten, die über mehr als ein Jahr gemessen und interpoliert wurden, wurden die Energieeinsparungen berechnet, die die TheGreefa-Technologie in den Schweizer Gewächshäusern erbracht hat. Die 100 % im Tortendiagramm (Abbildung 14) stellen die Wärmeenergie dar, die im Gewächshaus ohne TheGreefa benötigt worden wäre. Der rote Teil zeigt die Energieeinsparung an, die

TheGreefa durch die Feuchtigkeitskontrolle auf der Grundlage der Absorption einspart, anstatt warme und feuchte Luft nach außen abzugeben. Der blaue Teil stellt die thermische Energie dar, die während des Absorptionsprozesses freigesetzt wird. Dieser blaue Teil ist die Energie, die zum Heizen des Gewächshauses benötigt wird. Diese muss aber nicht vom Gewächshausbetreiber bereitgestellt werden. Es ist die Energie, die für die Regeneration des TCF benötigt wird, zum Beispiel in Form von Niedertemperatur-Wärmeenergie, die sonst ungenutzt bleiben würde.

Das Merkmal von TheGreefa ist, dass die Verfügbarkeit dieser Energie nicht mit der Nutzung in Zeit und Raum zusammenfallen muss. Diese Energie kann über lange Zeiträume ohne Energieverlust in Form von konzentriertem TCF gespeichert werden, wobei das Potenzial zur Freisetzung von thermischer Energie anstelle von thermischer Energie erhalten bleibt. Das graue Segment in der Abbildung ist schließlich die Wärmeenergie, die vom Gewächshausbetreiber bereitgestellt werden muss.

Für den Stromverbrauch ist die Situation jedoch umgekehrt: Der Gewächshausbetreiber muss diesen Anteil tatsächlich bereitstellen.

Umgekehrt sieht es jedoch aus, wenn man den Stromverbrauch betrachtet. Wie in Abbildung 15 gezeigt, steigt der Stromverbrauch mit der Installation von TheGreefa um ca. 24 %. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die mechanisch aktiven Komponenten, wie z. B. Pumpen und Lüfter, die im

TheGreefa-Demonstrator installiert wurden, nicht speziell für deren elektrische Leistung optimiert wurden. Darüber hinaus stand bei der Konstruktion von Luftkanälen und Wärmetauschern die thermische Leistung im Vordergrund, was zu erheblichen, hohen Druckverlusten führte. Daher besteht ein weiteres Potenzial, diesen Mehrverbrauch durch Optimierungsschritte zu reduzieren.

Betrachtet man die Gesamtenergiebilanz im Schweizer Gewächshaus, so zeigt sich, dass elektrische Energie im Vergleich zur thermischen Energie einen geringeren Einfluss hat. Wenn wir die für die Regeneration verwendete Energie ausschließen – sei es, weil sie getrennt vom Gewächshausbetreiber verwaltet wird oder weil sie anderweitig ungenutzt bleibt –, übersteigt die Gesamtenergieeinsparung 50 %. Auch unter Berücksichtigung der Regenerationsenergie lassen sich noch erhebliche Einsparungen von etwa 35 % erzielen.

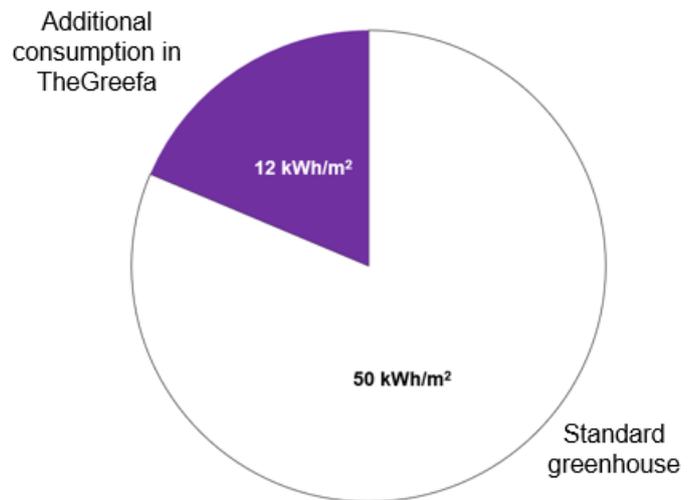


Abbildung 15. Jährlicher Stromverbrauch im Schweizer Demonstrator.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Energiebilanz im Schweizer Gewächshaus.

	TheGreefa kWh/m ² Jahr	W/o TheGreefa kWh/m ² Jahr
Wärmeenergie	155	464
Elektroenergie	62	50
Gesamt	217	514
Energie zur Regeneration (Niedertemperatur-Wärme)	107	
Gesamt inkl. Regeneration	324	514

TCF-Ergebnisse

Basierend auf den Messdaten von konzentriertem TCF, die im Demonstrator (blaue Linie in Abbildung 16) verwendet wurden, wurde die Produktion von konzentriertem TCF (grüne Linie in Abbildung 16) unter Verwendung von warmem Wasser aus der Wärmequelle simuliert, das in thermischen Solarmodulen in der Nähe des Gewächshauses erzeugt wird. Für das Schweizer Gewächshaus werden ca. 100 m² Solartermiemodule benötigt, was etwa einem Sechstel der Fläche des Gewächshauses entspricht. Interessanterweise findet die Regeneration von TCF das ganze Jahr über statt, da sie von der Temperaturdifferenz zwischen der Luft und dem TCF abhängt und nicht von der absoluten Temperatur. In den kälteren Monaten ist die Produktion aufgrund kürzerer Tage und erhöhter Wolkendecke leicht rückläufig.

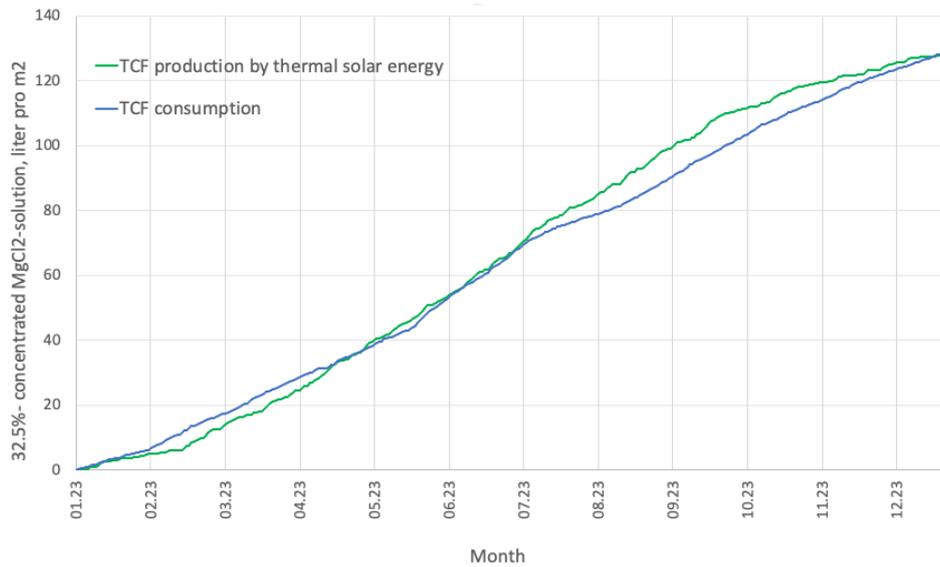


Abbildung 16. TCF ($MgCl_2$) Resorption und Regeneration.

Basierend auf der Menge und dem Verwendungsmuster des verwendeten und regenerierten TCF wurde die erforderliche Mindestgröße für die TCF-Speicherung bestimmt (Abbildung 17). Es wird nur eine Lagereinheit benötigt, da die unterschiedlichen Dichten von konzentriertem und verdünntem TCF eine Vermischung verhindern. In der kalten Jahreszeit ist der TCF-Verbrauch hoch und die Regeneration etwas geringer; Bis zum Ende dieser Saison (März) ist der Speicher vollständig mit verdünntem TCF belegt. Umgekehrt ist der Speicher am Ende der warmen Jahreszeit aufgrund entgegengesetzter Bedingungen vollständig mit konzentriertem TCF gefüllt. Das benötigte Lagervolumen beträgt ca. 175 Liter pro Quadratmeter Gewächshausfläche.

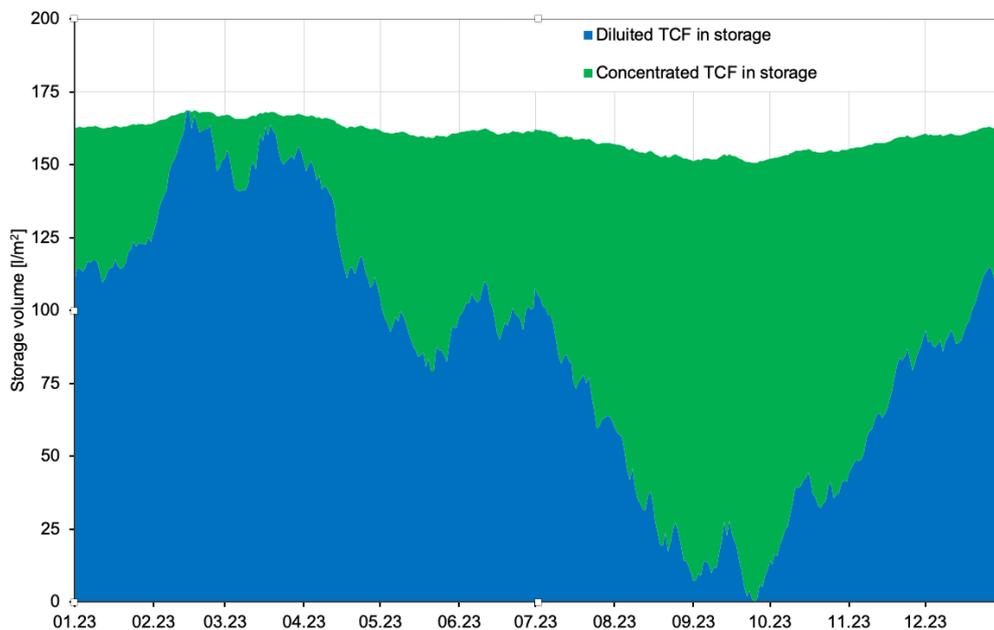


Abbildung 17. Lagervolumen.

Trocknung von Lebensmitteln

Der Trocknungsprozess ist dem Verfahren zur Kontrolle der Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Gewächshaus sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass in diesem Fall der Ansatz darin besteht, die Luft ohne Temperaturregelung zu entfeuchten

Diese Anwendung wird in Abbildung 18 erläutert. Die Luft wird in einem Absorber im Gegenstrom mit einem konzentrierten TCF getrocknet, aber nicht unbedingt erhitzt, da die Hitze die Blätter bzw. Die Früchte schädigen und deren Qualität beeinträchtigen könnte. Die Konfiguration des Absorbers kann die gleiche sein wie die des im Gewächshaus verwendeten Absorbers. In einem geschlossenen Kreislauf wird die freigesetzte trockene Luft dann in die Trockenkammer eingebracht, wo die Feuchtigkeit des Gemüses aufgenommen werden kann.

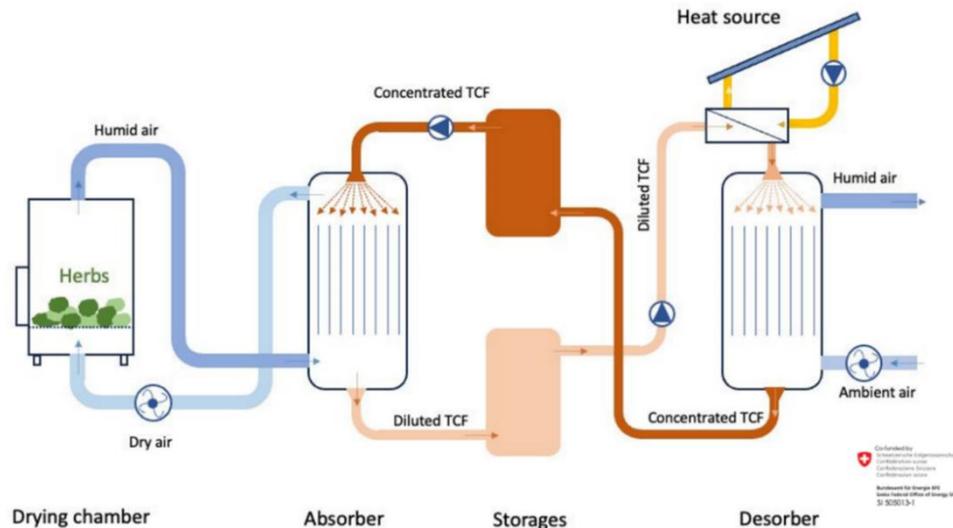


Abbildung 18. Trocknungsprozess mit dem Absorber und Desorber.

Das verdünnte TCF kann dann ohne Wärmeverlust gespeichert und regeneriert werden, sobald wieder erneuerbare Wärme (z.B. Solarwärme) zur Verfügung steht. Im Vergleich zu modernen Anlagen mit Kompressionsluftentfeuchtern beschränkt sich der elektrische Energieverbrauch in einem Sorptionstrockner auf den Betrieb von Ventilatoren und Flüssigkeitspumpen, während die benötigte Wärmeenergie vollständig durch eine Niedertemperatur-Wärmequelle bereitgestellt werden kann, im Idealfall vollständig auf Basis erneuerbarer Quellen. Nach dem Regenerationsprozess kann die bereitgestellte Energie auch wiederum verlustfrei gespeichert werden.

TCF-Auswahl

Die Wahl des TCF für die Verwendung in der Trocknungsanlage unterscheidet sich von der im Gewächshaus.

Abbildung 20 zeigt die Gleichgewichtslinie zwischen verschiedenen TCFs und feuchter Luft. Die gestrichelten Linien stellen Luft mit unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit dar. Die Schnittpunkte zwischen den Löslichkeitslinien der TCFs und denen der Luft geben die minimale Luftfeuchtigkeit an, die bei einer bestimmten Temperatur erreicht werden kann. Bei 20 °C mit einer $MgCl_2$ -Lösung sinkt beispielsweise der maximale Entfeuchtungsgrad nicht unter 35%. $MgCl_2$ wurde im Gewächshaus wegen seiner Verfügbarkeit und geringen Kosten ausgewählt, aber seine Hygroskopizität ist begrenzt. Bei 20 °C kann die Luftfeuchtigkeit nicht unter 35 % RH gesenkt werden. Während diese Luftfeuchtigkeit für den Pflanzenbau nicht akzeptabel ist, da sie zu niedrig ist, ist sie für einen Trocknungsprozess zu hoch. Eine teure Alternative könnten LiBr- oder LiCl-Lösungen sein.

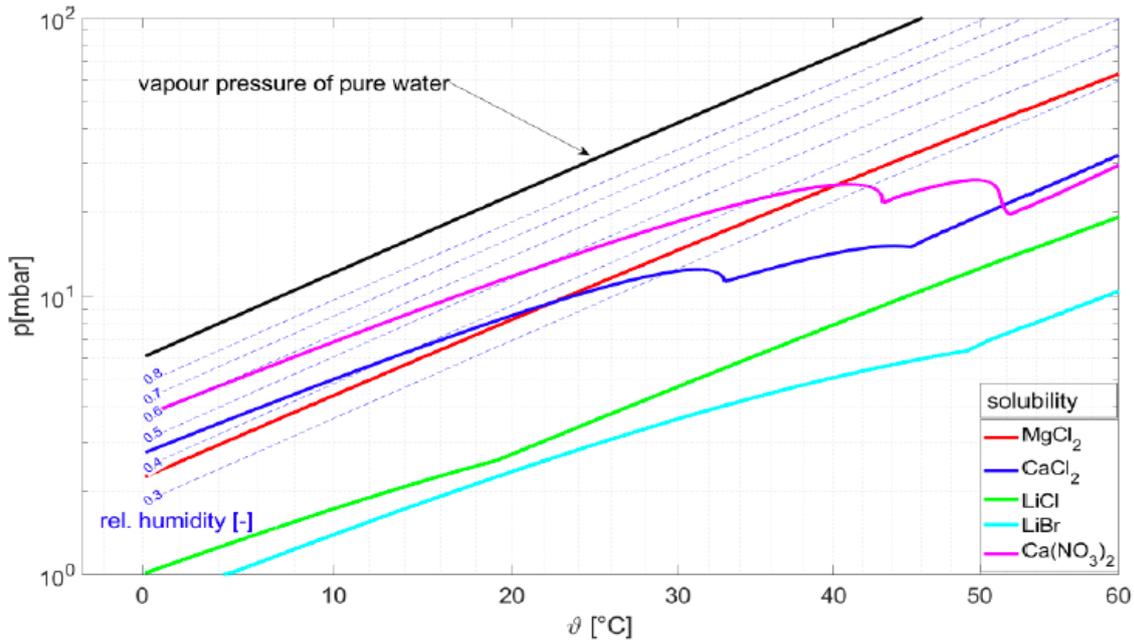


Abbildung 20. Vergleich verschiedener TCFs.



Abbildung 19. Innenraum des Trockners mit getrockneten Kräutern

Tabelle 2. Verschiedene TCFs wurden für den Trocknungsprozess getestet.

Salt (TCF)	Chemical compounds	Air humidity at the equilibrium, 20°C
Caesium fluoride	CsF	3.38 %rH
Lithium bromide	LiBr	6.61 %rH
Zinc bromide	ZnBr ₂	7.94 %rH
Sodium hydroxide	NaOH	8.91 %rH
Potassium hydroxide	KOH	9.32 %rH
Lithium chloride	LiCl	11.31 %rH
Calcium bromide	CaBr ₂	16.50 %rH

Für den Trocknungsprozess wollten wir ein TCF mit besseren hygroskopischen Eigenschaften als MgCl₂ finden und testen, aber zu erschwinglichen Kosten. Darüber hinaus musste es sich um ein TCF handeln, das mit der Lebensmittelindustrie kompatibel ist. Die Eigenschaften der verschiedenen TCFs wurden in Tabelle 2 analysiert, und die Wahl fiel auf NaOH, das beim Backen weit verbreitet ist und diese Anforderungen erfüllt.

Ein Problem, das bei der Verwendung von NaOH auftreten kann, ist seine Reaktivität mit dem in der Luft vorhandenen CO₂. Bei dieser Reaktion bilden sich Karbonate, die ausfallen, so dass der Niederschlag entfernt und das umgesetzte NaOH wieder aufgefüllt werden muss. Das Problem kann minimiert, wenn nicht sogar beseitigt werden, indem die Luft in einem geschlossenen Kreislauf umgewälzt wird. In Abbildung 21 ist das CO₂, das während des Regenerationsprozesses mit NaOH reagiert, blau dargestellt. Die Regeneration erfolgte in der ZHAW-Anlage als offener Kreislauf, wobei laufend neue Umgebungsluft zugeführt wurde. In diesem Fall ist eine kontinuierliche Nachfüllung von NaOH erforderlich.

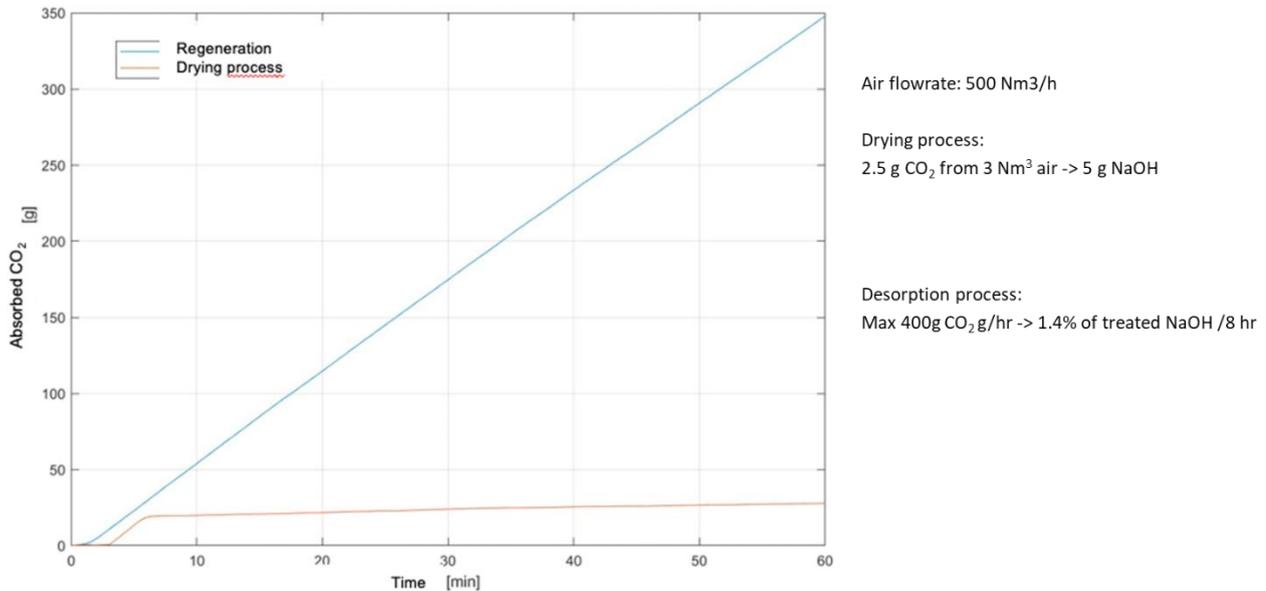


Abbildung 21. CO₂-Reaktion mit NaOH.

Zur Entfeuchtung der Luft (Trocknungsprozess) Im Absorber wird die Luft kontinuierlich umgewälzt. Wie die rote Linie zeigt, reagiert das CO₂ zunächst nur mit dem NaOH; Sobald sein Spiegel unter die Reaktionsschwelle fällt, wird er nicht mehr entfernt. NaOH muss nicht nachgefüllt werden. Die gebildeten Karbonate fallen in NaOH-Lösung aus und können am Ende des Trocknungszyklus entfernt werden.

Prozessoptimierung

Die in den Labortests verwendete TCF-Konzentration betrug 50 % zu Beginn des Trocknungsprozesses und 44 % am Ende. Es wurde während des gesamten Trocknungsprozesses nie ausgetauscht.

Die Absorptionskraft war also am Anfang höher als am Ende. In der Endphase ist es jedoch schwieriger, den fast getrockneten Kräutern die restliche Feuchtigkeit zu entziehen.

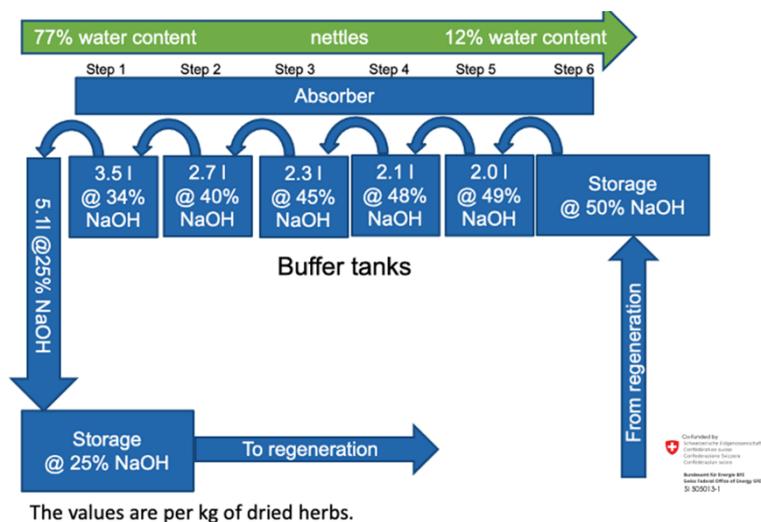


Abbildung 22. Vorgeschlagenes Konzept für den Trocknungsprozess.

Eine hohe Konzentration von TCF ist zu Beginn des Trocknungsprozesses nicht unbedingt erforderlich, während sie in der Endphase unerlässlich ist. Aus diesem Grund wird das in Abbildung 22 dargestellte Konzept vorgeschlagen. Der Prozess beginnt mit einem verdünnten TCF, der dann in den folgenden Phasen durch zunehmend konzentrierteres TCF ersetzt wird. Dies kann erreicht werden, indem der TCF aus dem letzten Schritt einer Kräutercharge in einem früheren Schritt der nächsten Charge wiederverwendet wird. Erst wenn der

TCF so verdünnt ist, dass es nicht mehr resorbiert werden kann, wird er zur Regeneration oder in den Tank mit verdünntem TCF geleitet.

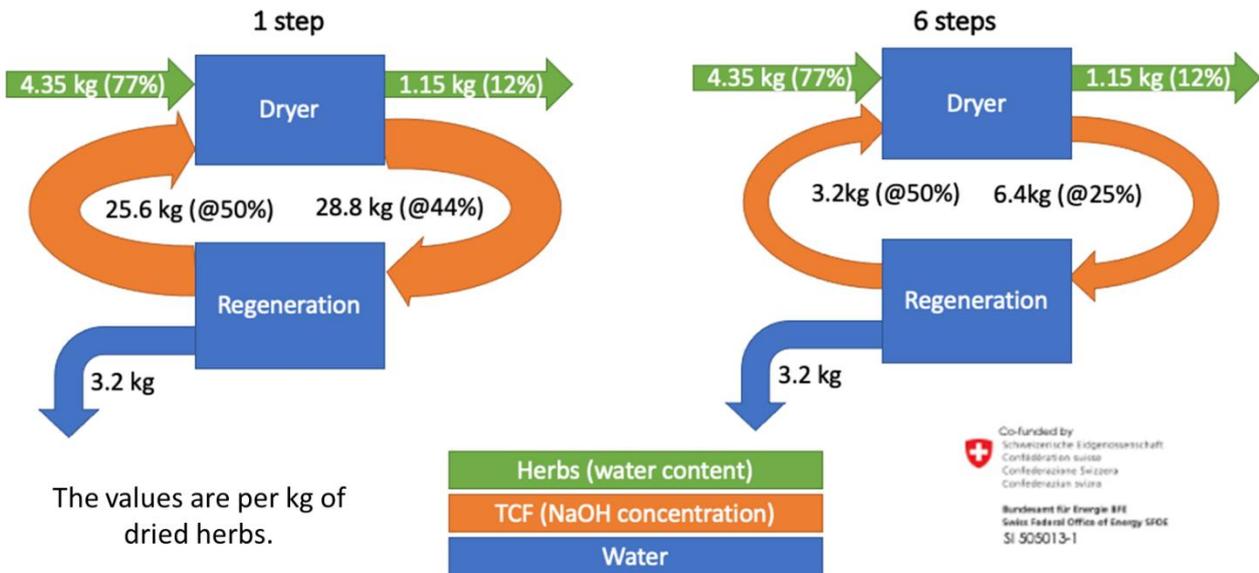


Abbildung 23. Volumenreduzierung im Stufenprozess.

Mit Hilfe eines schrittweisen Prozesses ist es möglich, das für den Speicher erforderliche Volumen zu reduzieren, wie in Abbildung 23 dargestellt. Die für die Regeneration erforderliche Energie bleibt die gleiche wie die Menge des zu verdampfenden Wassers.

Energievergleich

Der spezifische Energieverbrauch einer ganzen Anlage, einschließlich der Regeneration des TCF, wurde geschätzt und mit der realen Anlage verglichen. In der Abbildung in Abbildung 24 stellen die blauen Pfeile die elektrische Energie und die roten Pfeile die thermische Energie dar.

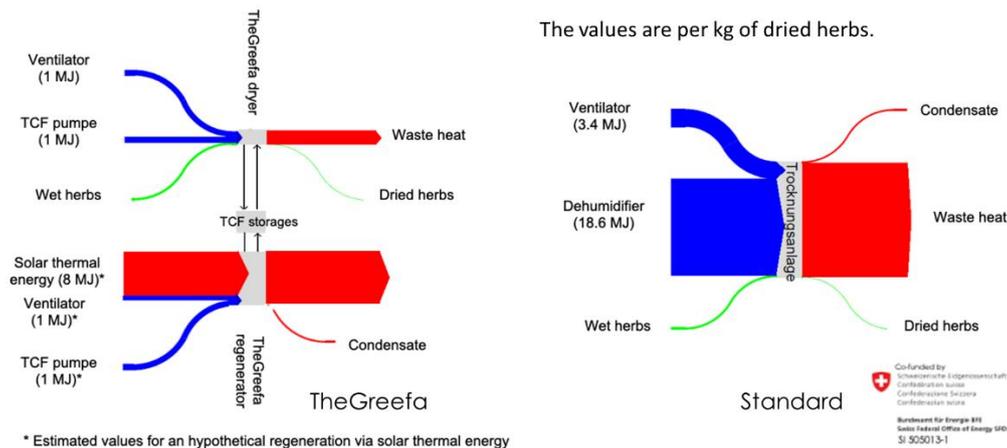


Abbildung 24. Energievergleich zwischen dem TheGreefa-Trocknungsprozess und der Standardtrocknung.

Wenn man bedenkt, dass bei der Regeneration thermische Energie verwendet wird, die sonst nicht genutzt wird (insb. kostenlose Energie), ist der spezifische Energiebedarf von TheGreefa deutlich geringer als bei der herkömmlichen Trocknung mit einem Luftentfeuchter. Es ist wichtig zu betonen, dass der große Vorteil von TheGreefa nicht nur darin besteht, dass der Prozess weniger Energie

benötigt als eine herkömmliche Anlage, sondern auch, dass die benötigte thermische Energie vom Trocknungsprozess entkoppelt ist.

Diese Wärmeenergie kann vollständig aus erneuerbarer Energie oder Niedertemperatur-Abwärme gewonnen werden, die sonst ungenutzt bleiben würde. Darüber hinaus kann TCF thermische Energie indirekt über einen langen Zeitraum speichern, ohne dass es zu Energieverlusten kommt.

2.2. Demonstrator in Tunesien

Das Hauptziel dieses Pilotprojekts im Demonstrationsgewächshaus in Tunesien ist die Untersuchung eines Klimasystems für ein geschlossenes Gewächshaus auf Basis Thermochemischer Sorptionsflüssigkeiten (TCF). Die Untersuchung konzentriert sich auf die Bewertung der Effizienz des Systems zur Schaffung eines ausgewogenen und kontrollierten Klimas unter den klimatischen Bedingungen Tunesiens. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Möglichkeit der Wasserrückgewinnung durch kombinierte Verdunstung und Kondensation. Da durch den solaren Eintrag hohe Wärmemengen entstehen, die in konventionellen Gewächshäusern über die Außenlüftung abgeführt werden, wird ein neuartiges Kühlsystem mit Wärmeabgabe über die Außenfläche erprobt. Das neue Design zielt darauf ab, eine viel größere Oberfläche für die Wärmeabfuhr bereitzustellen. Gleichzeitig wird die Sammlung von Tröpfchen durch die stärkere Neigung der Folie, insbesondere in der oberen Ebene des Tunneldaches, verbessert. Das Gewächshaus wurde hierfür in einer Ziehharmonikaform ausgebildet, die eine um 70% vergrößerte Außenfläche bereitstellt.

Im System basiert auf drei unterschiedlichen Punkten:

1. Die Regeneration des TCF erfolgt während der Nacht mit tagsüber gespeicherter Wärme.
 - Hierdurch kann der Absorber zeitlich versetzt auch als Regenerator eingesetzt werden.
 - Die thermische Wärmespeicherung erfolgt tagsüber in einem großen Speichertank bei Wärmeabgabe bei Nacht (passive Sammlung von Nachtkälte).
 - Es besteht zudem die Möglichkeit einer verbesserten Regeneration mit zusätzlichen Wärmequellen (kostengünstige Solarkollektoren aus Kunststoff, ggf. Restwärme aus CSP).
2. Anreicherung von CO₂ in der geschlossenen Atmosphäre (1000 – 2000 ppm):
 - Hierdurch wird eine deutlich verbesserte Photosyntheseleistung und entsprechend erhöhter Ertrag erreicht für den Fall, dass auch andere Wachstumsfaktoren wie etwa Wasser und Nährstoffe optimal bereitgestellt werden.
 - Eine verbesserte Wärmeakzeptanz der Pflanzen kann durch ausreichende CO₂-Zufuhr (auch bei geschlossenen Spaltöffnungen infolge von Wärme- und/oder Wasserstress) erreicht werden. Durch erhöhte optimale Wachstumstemperaturen wird auch der Aufwand für Kühlmaßnahmen indirekt verringert.
3. Wasserrückgewinnung durch kombinierte Evapo-Kondensation:
 - Wasser wird während des Tages aus der Luftfeuchtigkeit in das TCF geführt.

- Das Wasser aus dem TCF (verdünnte Lösung) wird während der Nacht mit gespeicherter Wärme aus dem Vortag wieder verdunstet (regeneriert) und an die Gewächshausluft abgegeben.
- Hierbei entsteht Kondensation von Wasser an der Innenfläche der Folie,
- Entfernung von Wassertropfen durch modifizierte Dachform, die eine ausreichende Neigung zum Entfernen und Sammeln von Tropfen bietet,
- Wärmeabfuhr durch modifizierte ("Zick-Zack") Dachform für eine größere Gesamtoberfläche bei der Wärmeabfuhr.

Hauptkomponenten des Systems

Die Hauptkomponenten der Pilotanlage in Tunesien sind:

- Das Gewächshaus mit der modifizierten Außenhülle,
- Zwei Absorbereinheiten mit leicht unterschiedlicher Größe, die entweder einzeln oder parallel betrieben werden,
- Der Absorptionskreislauf mit thermo-chemischen und thermischen Speichervorrichtungen, Pumpen und Verbindungsrohren,
- Der Luftkreislauf zwischen Absorber und Gewächshaus,
- Das Steuerungssystem mit Sensor/Aktuatorensystem.

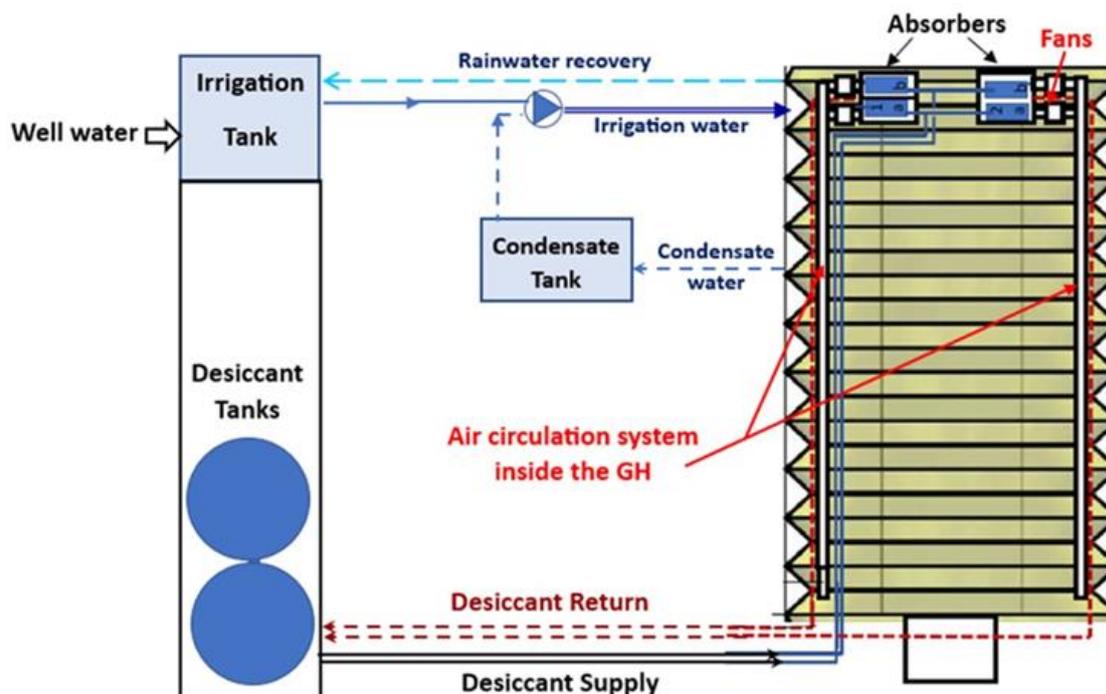


Abbildung 25. Schema des Systems.

Die neue Konstruktion zielt darauf ab, eine wesentlich größere Oberfläche für die Wärmeabfuhr zu erhalten. Gleichzeitig wird die Tropfenabscheidung durch die stärkere Neigung der Folie verbessert, insbesondere in der oberen Ebene des Tunnels.

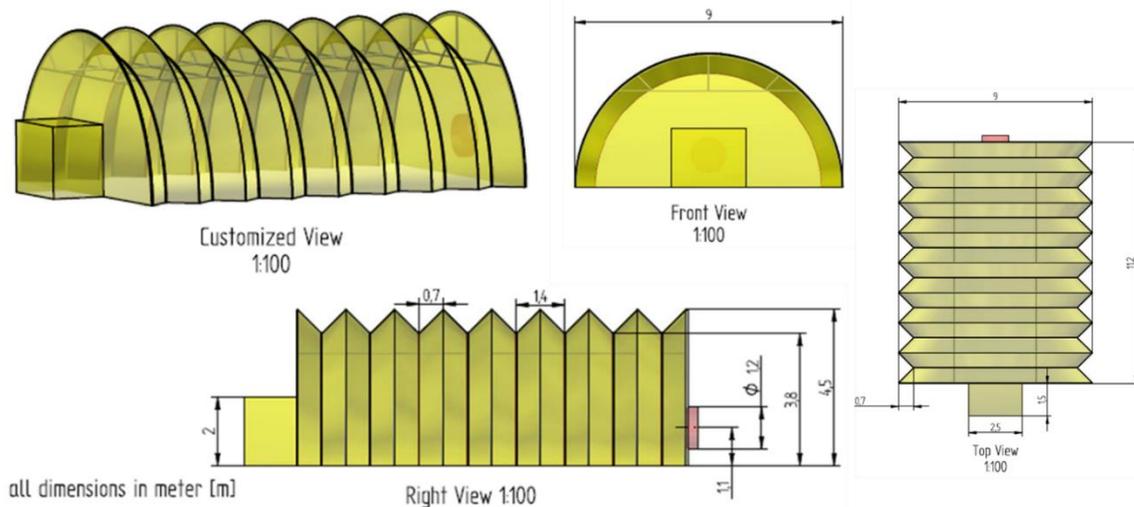


Abbildung 26. Technische Spezifikationen der Gewächshauskonstruktion (Zick-Zack-Form).



Abbildung 27. Das Geschlossene Gewächshaus mit 100 m² Grundfläche (oben) und mit einem 1 m³ Tank für Regen- und Kondenswassersammlung (unten).

Bei dem in Abbildung 27 dargestellten Wassertank handelt es sich um einen kombinierten Tank, der sowohl Regenwasser vom Dach des Gewächshauses als auch kondensierte Wassertröpfchen von der Innenfläche der Gewächshausfolie auffängt.

Konstruktion des Absorbers

Der Absorber ist der Hauptbestandteil des Klimasystems und sorgt für die Zirkulation der Solelösung im Gegenstrom zur aus dem Gewächshaus angesaugten Luft.

Diese Zirkulation ermöglicht die Regulierung sowohl der Lufttemperatur als auch der Luftfeuchtigkeit. Hierfür wird latente Wärme in fühlbare Wärme umwandelt und über den Solestrom an den Speicher abgegeben. Zudem wird Luftfeuchtigkeit absorbiert.

Hierdurch sinkt die relative Feuchte im Gewächshaus und die Pflanzen können mehr Wasser verdunsten und somit die eigene Kühlleistung erhöhen.



Abbildung 28. Der im tunesischen Demonstrator installierte Absorber (links) und die innere Struktur des Absorbers zur Verteilung des TCF auf der Kontaktoberfläche (rechts).

Hergestellt wurde der Absorber von der Arbeitsgruppe der Technischen Universität Berlin (TUB) Konzipiert wurde das Gerät von der Watergy GmbH.

Erste Tests des Absorber-Prototyps lieferten klare Hinweise auf Defizite in der Flüssigkeitsverteilung. Die Infrarot-Analyse (IR) (Abbildung 29) zeigte, dass die Wärmeabgabe im laufenden Prozess aufgrund unterschiedlicher Durchflussraten in der Mitte (geringer Durchfluss) und im Umfang (hoher Durchfluss) ungleich ist. Durch die Verwendung einer farbigen Flüssigkeit wurden ebenfalls Probleme der ungleichen Verteilung aufgezeigt. Die ungleichmäßige Verteilung der Luft im Boden des Absorbers wurde durch Nebelanalyse nachgewiesen. Die Luft wurde hauptsächlich aus einem Bereich in der Nähe des Lufteintritts nach oben geleitet, da die Absorberelemente an der Unterseite dicht angeordnet waren.

Die bei den Versuchen aufgezeigten Defizite führten zu einer Neukonzipierung der Absorber.

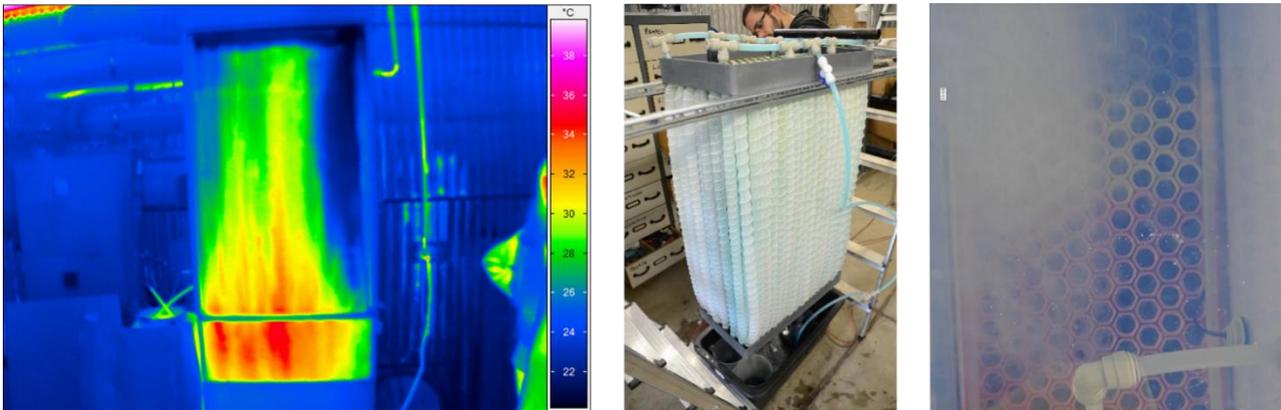


Abbildung 29 IR-Analyse (links), Analyse von farbigen Flüssigkeiten (Mitte) und Nebelanalyse (rechts).

Ein neues Design sieht insbesondere eine verbesserte Ausführung der Soleverteilerelemente mit abnehmendem Durchmesser nach unten vor, so dass Luft in den inneren Bereich des Volumens eindringen kann.



Abbildung 30. Das Absorberdesign mit 3D-gedruckter sechseckiger Innenstruktur.

Das neue Design des Verteilerelements zielt auf eine dezentrale Flüssigkeitszufuhr zwischen den sechseckigen Öffnungen ab. Ein zentraler Einlass auf der Unterseite (vgl. Abb. 30) ist mit einem System von internen Kanälen im gedruckten Teil verbunden, wodurch die Flüssigkeit zu zahlreichen, dezentral verteilten Öffnungen geleitet wird. Hierdurch werden alle Oberflächenelemente mit der gleichen Solemenge beschickt.

Das Design ist optimiert für einen hohen Volumenstrom (20l/min, Entnahme von ~20 kW Wärme bei $\Delta T=5K$). Die Optimierung ermöglicht einen ausgeglichenen Durchfluss der Lösung.

Untersuchungen zu lokal verfügbarem TCF aus einer Tunesischen Saline

Das Sorptionspotenzial einer von der Sallina Sfax (Mare Alb) zur Verfügung gestellten Solelösung wurde unter Gewächshausklimabedingungen getestet. Die Funktionsweise der Absorbervorrichtung des Systems basiert auf den hygroskopischen Eigenschaften des verwendeten TCF, bei dem es sich um eine Solelösung aus Magnesiumchloridlösung ($MgCl_2$) mit Bestandteilen von Magnesiumsulfat handelt. Es wurden Messungen für die Luft in einem Container mit Solelösung im Vergleich zu Wasser durchgeführt, um die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit zu messen.

Labormessungen ergaben die folgende Zusammensetzung der Sole:

- Dichte: 1.350 g/l
- Magnesium Mg: 112,65 g/l,
- Sulfat SO_4 : 34,09 g/l,
- Sonstige Bestandteile (Cl, Ca, K...): 428 g/l.
- Wasser.



Abbildung 31. Messung mit 2 Flaschen.

Die Messungen der relativen Gleichgewichtsfeuchte (ERH) wurden im Januar 2022 nach der Methode der gesättigten Salzlösung durchgeführt, bei der eine Probe der Solelösung in einen verschlossenen Behälter gegeben und die relative Luftfeuchtigkeit der Luft in Kontakt mit dem TCF gemessen wird. Wenn die Luft ein Gleichgewicht mit der Sole erreicht, entspricht ihre relative Luftfeuchtigkeit dem ERH des Trockenmittels.

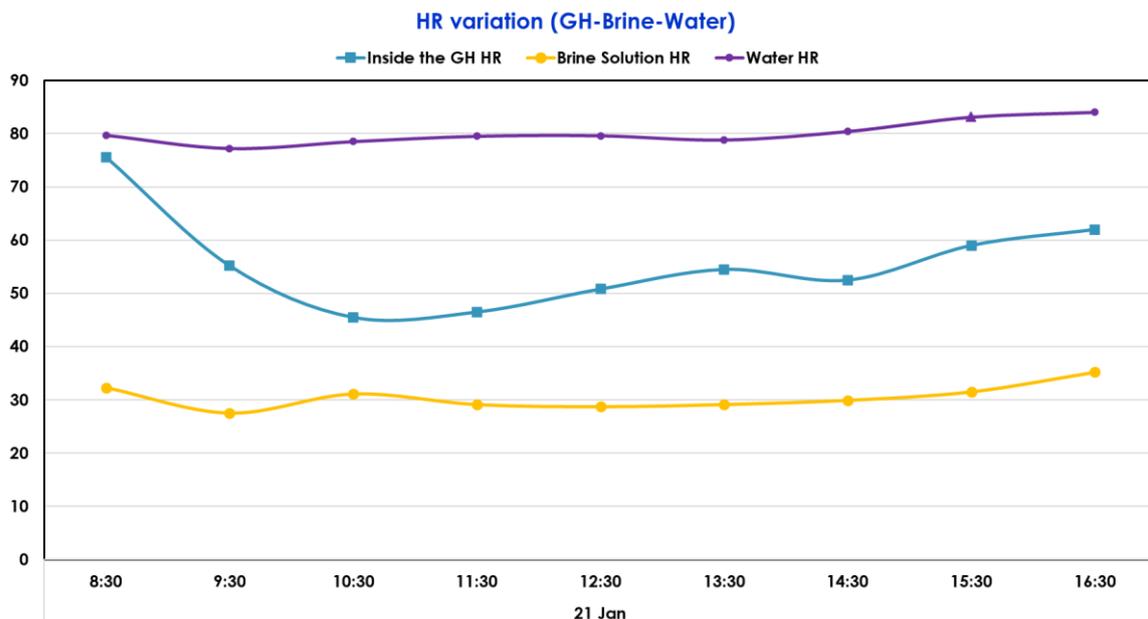


Abbildung 32. Trocknungsleistung der Solelösung (gelb) im Vergleich zu Wasser (Lila) (21.01.2022)

Die gemessenen Werte von ERH entsprechen der etablierten Literatur, die sich auf einen ERH-Wert von $32,78 \pm 0,16$ % für reine gesättigte $MgCl_2$ -Lösung bei 25 °C bezieht.

Die gelbe Kurve in Abbildung 32 zeigt das Trockenmittel, das sich bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit befindet. Die violette Kurve zeigt die relative Luftfeuchtigkeit in dem anderen

Behälter, der nur Wasser enthält. Man kann dort sehen, dass es eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit hat, da die Luft über dem Wasser natürlich nahezu gesättigt ist. Die blaue Linie zeigt die relative Luftfeuchtigkeit der Gewächshauluft, welche die beiden Behälter umgibt.

Absorptionszirkulation im System

In der untersuchten Anlage wurden zwei miteinander verbundene Lagertanks mit einem Gesamtvolumen von 15 m³ der Solelösung verwendet. Die Lagertanks sind über zwei Pumpen und eine hydraulische Anlage mit den Absorbern verbunden. Die Absorber wurden auf Ständern montiert, die über den Speichertanks gelagert sind, um die Rückführung der TCF-Lösung durch Schwerkraft zu ermöglichen und somit die Komplexität der Steuerung des Systems zu reduzieren.

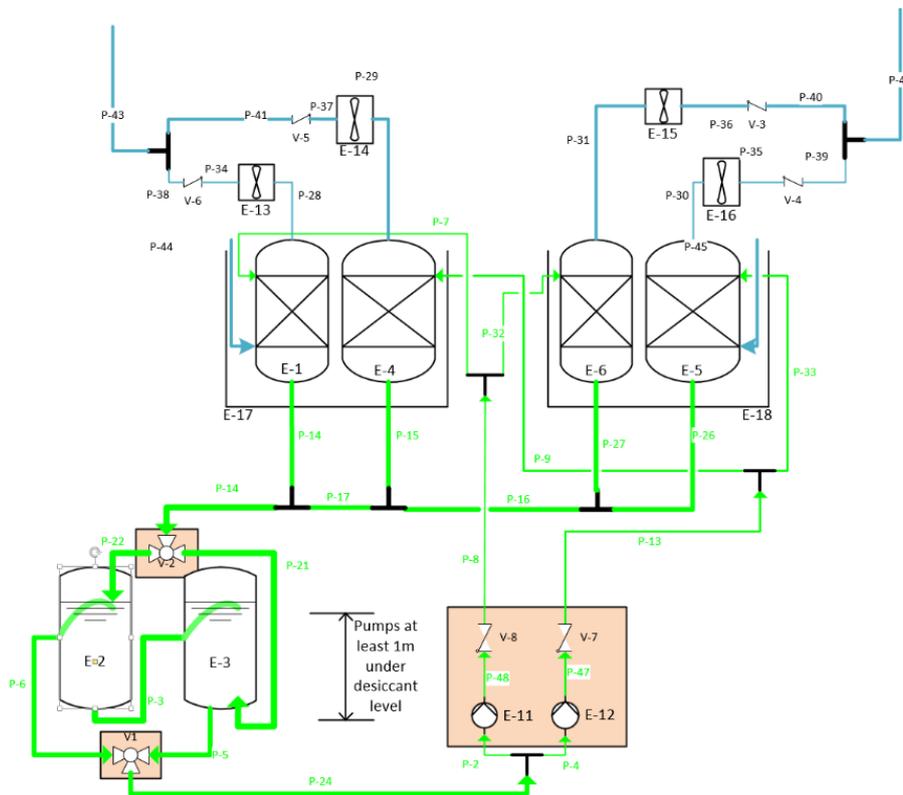


Abbildung 33. Installation der Lagertanks und Anschluss der Komponenten des Adsorptionssystems.



Abbildung 34. Pumpen und Elektroventile am Speichertank.

Luftverteilung im Gewächshaus

Die Luft wird aus der Dachebene angesaugt und durch den Absorber geleitet. Nach dem thermischen Wärmeaustausch und dem Entfeuchtungs- bzw. Befeuchtungsprozess wird die aufbereitete Luft auf Höhe der Pflanzen in das Gewächshaus geführt.



Abbildung 35. Installation der Absorbergeräte und des Luftzirkulationssystems im Gewächshaus (Ventilatoren + Luftkanäle).

Abbildung 35. zeigt die Absorber, die sich im hinteren Teil des Gewächshauses befinden, und die Luftverteilungsrohre an den Seiten (linkes Foto). Auf dem rechten Foto ist der eingebaute Absorber zu sehen.

Steuerungssystem

Ein Steuerungscomputer überwacht und reguliert die Komponenten der Klimatisierung. Die Steuerung des Betriebs des Absorptionssystems erfolgt in drei Stufen im Tag- und Nachtmodus. Der erste Modus wird von nur einer Pumpe betrieben. Der zweite Modus wird von der zweiten größeren Pumpe betrieben. Im dritten Modus laufen beide Pumpen parallel.

Das implementierte Monitoring ermöglicht die Durchführung folgender Messungen:

- Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit der Luft,
- Temperatur und Durchflussmenge des Trockenmittels,
- CO₂-Konzentration,
- der Trockenmittelfüllstand in den Speicherbehältern.

Anhand der überwachten Daten ist es möglich, die Energiebilanz und den Wirkungsgrad des Systems zu berechnen.



Abbildung 36. Installation des Schaltkastens, der Sensoren und des Datenerfassungssystems.

Schlussfolgerungen

Zum Betrieb des Demonstrators werden im Folgenden einige Schlussfolgerungen und Erkenntnisse vorgestellt:

- Ein hohes Maß an Luftdichtheit im Gewächshaus ist erforderlich, um Kondensationsbedingungen zu erreichen.
- Eine fehlerfreundliche Notlüftung ist erforderlich, muss aber auch das Konzept der Dichtheit unterstützen.
- Die Installation der Absorber sollte im Gewächshaus erfolgen (nicht außerhalb).
- Das innovative Absorberdesign war erfolgreich bei der Reduzierung der Komplexität und der Kosten.
- 3D-gedruckte Teile erfordern hochwertige, hitzebeständige Kunststoffe und einen Sonnenschutz.
- Das Speichervolumen ist teuer und hydraulische Verbindungen sind fehleranfällig.
- Die Verwendung von TCF erfordert hohe Aufmerksamkeit in Bezug auf Korrosivität, Leckagen, Entsorgung bzw. Recycling.

Es werden unterschiedliche Maßnahmen für die Weiterentwicklung des Systems empfohlen:

- Die Verwendung von Phasenwechselmaterial (PCM) für die Wärmespeicherung ermöglicht potenziell eine Reduzierung der Trockenmittelmenge um 50-90%.
- Die Integration von PCM direkt in den Absorber kann auch die Pumpkosten um 50-90% senken, was auch zu einer leichten Reduzierung des Belüftungsbedarfs (~30%) führt.
- Ein kostengünstiges PCM für den Schmelzpunkt bei ca. 30°C sollte identifiziert werden. Die Verwendung etwa von recyceltem Frittierfett oder Natriumcarbonat könnte in Betracht gezogen werden.
- Eine weitere Vereinfachung der Zick-Zack-Bauweise ist möglich. Hierdurch wird die Konstruktion dann letztlich nicht viel teurer als die bestehender Tunnelgewächshäuser

- Weitere Forschungsaktivitäten in diesem ambitionierten Forschungsfeld sind aufgrund guter, erster Ergebnisse unbedingt empfehlenswert, auch insbesondere aufgrund fehlender Alternativen zur Bewältigung der Wasserkrise
- In jüngster Zeit gibt es zahlreiche Aktivitäten in der Gebäudeklimatisierung mit flüssigen Trockenmitteln. Start-up-Unternehmen wie "Blue Frontier" (finanziert von Bill Gates) und "7AC" sind aktuelle Multi-Millionen-Investitionen. In diesem Bereich der Forschung herrscht demnach ein hoher Wettbewerb, nicht nur im Segment der Gewächshäuser.

3. Simulationen und Optimierung – Fallstudien

3.1. Fallstudien

Die Hauptziele der Fallstudien sind die Analyse unterschiedlicher Randbedingungen in Bezug auf zwei repräsentative europäische Klimaregionen, die im Projekt ausgewählt wurden.

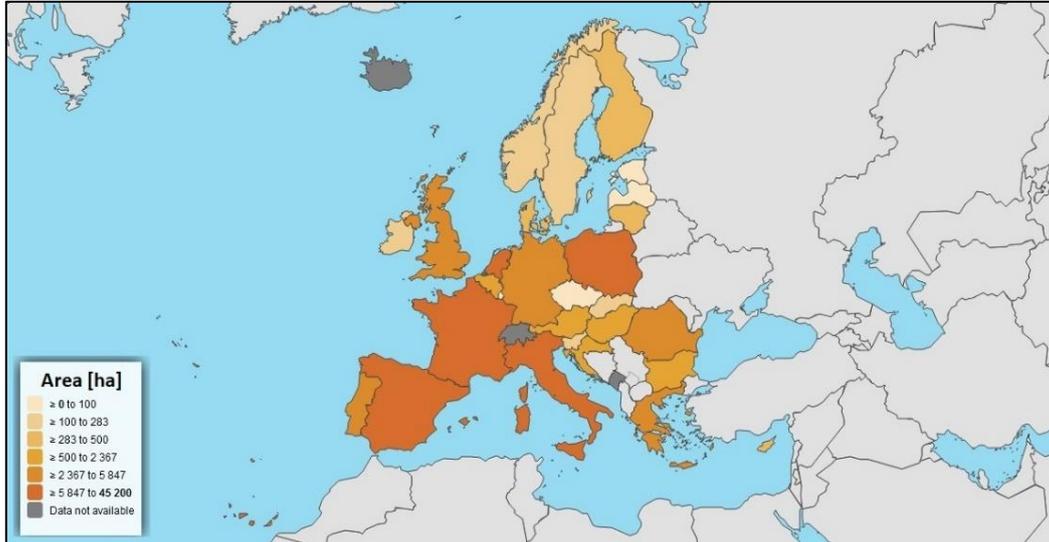


Abbildung 37. Verbreitung von Gewächshäusern in den Ländern der Europäischen Union EU-27 (EUROSTAT, 2023a).

Spanien, mit dem größten Ausbau von Gartenbaugewächshäusern in Europa, wurde als vorrangiges Untersuchungsgebiet genannt. Im Jahr 2023 betrug die Fläche 77 923 ha.



Abbildung 38. Karte der spanischen Regionen mit unterschiedlichen Oberflächen von Gewächshäusern.

Italien, mit einer robusten Gewächshausindustrie, wurde in der vorangegangenen Marktbewertung (D3.1) als ein potenzieller, erster Markt für TheGreefa identifiziert. Hier betrug die Fläche der Gewächshäuser im Jahr 2023 35.229 ha.

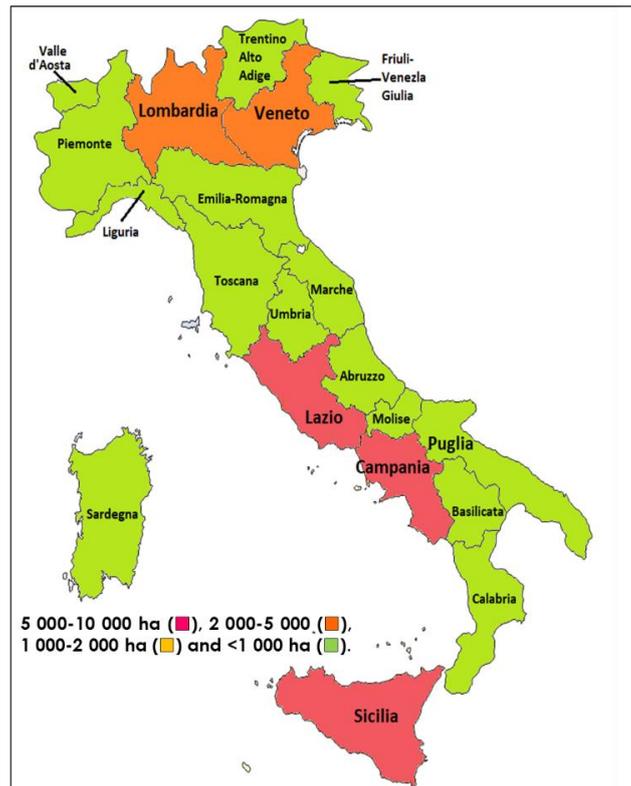


Abbildung 39. Karte der italienischen Regionen mit unterschiedlichen Flächenanteilen von Gewächshäusern.

Der Umfang der Analyse umfasste drei Fallstudien, die zunächst für Almería (Spanien) ausgewählt wurden:

- Unbeheiztes Gewächshaus vom Typ Almería, passiv belüftet.
- Unbeheiztes Mehrgliedriges Gewächshaus mit Klimaregulation
- Mehrfeldrige Gewächshäuser, die mit Erdgas beheizt werden.

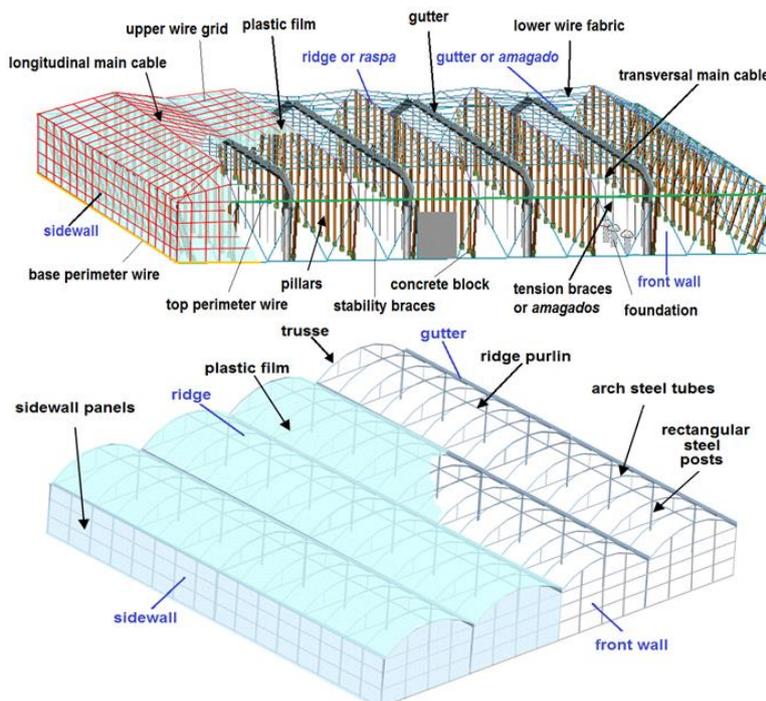


Abbildung 40. Einfaches Gewächshaus vom Typ Almeria mit Struktur "raspa y amagado" (oben) und High-Tech-Gewächshaus mit mehrgespannter Struktur (unten).

Im Gewächshaus vom Typ Almería der Universität Almería wurden zwei Tomatenkulturen analysiert, die in der Saison 2017/18 und in der aktuellen Saison 2023/24 entwickelt wurden. Während der Entwicklung des TheGreefa-Projekts wurden mehrere Alternativen von Kulturkombinationen in unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern angebaut: Gurke-Tomate, Gurke-Paprika und Tomate-Zucchini.



Abbildung 41. Die wichtigsten Kulturpflanzen, die in Almería und in den mehrgespannten Gewächshäusern der Universität von Almería analysiert wurden.

In Italien wurden zwei Fallstudien für die Tomatenproduktion ausgewählt:

- Unbeheiztes mehrspanniges Gewächshaus.
- Mehrfeldgewächshäuser, die mit Erdgas, Öl und Holzhackschnitzeln beheizt werden.



Abbildung 42. "Kirsch"-Tomatenernte in unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern (links) und beheiztem Mehrfeldgewächshaus (rechts).

Informationsquellen

- Die **technisch-produktive Charakterisierung der Gewächshäuser von Almería** wurde durch eine Umfrage durchgeführt, die im Jahr **2022** von der **Andalusischen Genossenschaft AFE** unter 222 Mitgliedern durchgeführt wurde, die **610 Gewächshäuser (1,4 % der Gesamtfläche in Almería)** abdeckten.
- Die **Produktionskosten der Gewächshäuser in Almería** für die Saison **2021-22** und **2022-23** wurden für **unbeheizte Gewächshäuser vom Typ Almería** für sieben verschiedene Alternativen von Anbauzyklen analysiert, basierend auf den Daten des **Observatoriums für Preise und Märkte** des Ministeriums für Landwirtschaft, Viehzucht, Fischerei und nachhaltige Entwicklung der **Regierung von Andalusien – JA**.

- In den Saisons **2020-21, 2021-22, 2022-23** und **2023-24** wurden die **Produktionskosten, der Verbrauch von Energie, Wasser, Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln** für **unbeheizte Gewächshäuser vom Typ Almería** und **mehrfeldrige Gewächshäuser der Universität Almería** für den **Anbau von Tomaten, Paprika und Gurken** gemessen.
- Die **Kosten für die Tomatenproduktion** von **unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern** in **Italien** wurden anhand staatlicher Daten (**Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare - ISMEA**) ermittelt. Der **Energie- und Wasserverbrauch** wurde von **Sfera Agricola** in einem kommerziellen **beheizten Mehrfeldgewächshaus** gemessen, wobei die damit verbundenen Produktionskosten geschätzt wurden.
- Es wurde eine **Lebenszyklus-Folgenabschätzung (LCIA)** entwickelt, in der die wichtigsten Umweltauswirkungsfaktoren für die **fünf Fallstudien** unter Verwendung des **Umweltsimulationsmodells EXCEL EUPHOROS** geschätzt wurden.

In der Fallstudie wurden die wichtigsten klimatischen Parameter analysiert, die die Entwicklung von Gewächshauskulturen beeinflussen. Die Installation eines Klimatisierungssystems mit thermochemischen Flüssigkeiten kann dazu beitragen, eine angemessene Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufrechtzuerhalten, CO₂ aus der Außenumgebung aufzunehmen und eine größere Homogenität dieser Klimaparameter zu erreichen. Bei der Auslegung des Luftverteilungssystems muss ein Strahlungsverlust auf der Pflanzenebene durch Verschattung vermieden werden.

Analysierte klimatische Bedingungen für den Anbau von Gewächshäusern:

- Angemessene Luft-, Blatt- und Bodentemperaturen.
- Moderate relative Luftfeuchtigkeit, um Kondensation oder Wasserstress zu vermeiden.
 - Hoher Gehalt an photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR).
 - Die CO₂-Konzentration der Luft im Außenbereich beträgt 420 ppm.
 - Einheitlichkeit der verschiedenen Klimaparameter.

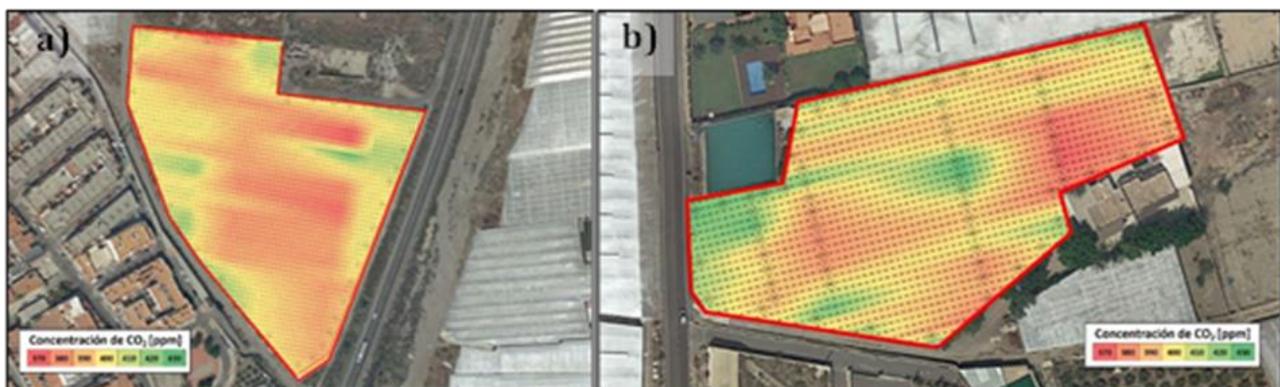


Abbildung 43. Verteilung von CO₂ in den Solargewächshäusern von Almería vom Typ "raspa y amagado" oder einfach (a) und "parral plano" oder elementar (b).

Obwohl es mehrere Möglichkeiten für eine effektive Klimatisierung in Gewächshäusern gibt, erfordern aktive Systeme einen hohen Energieverbrauch und passive Systeme sind oft durch äußere Wetterbedingungen eingeschränkt. Der Einsatz von thermochemischen Flüssigkeiten könnte als Ergänzung zu anderen Systemen eingesetzt werden, um den Energieverbrauch zu senken.

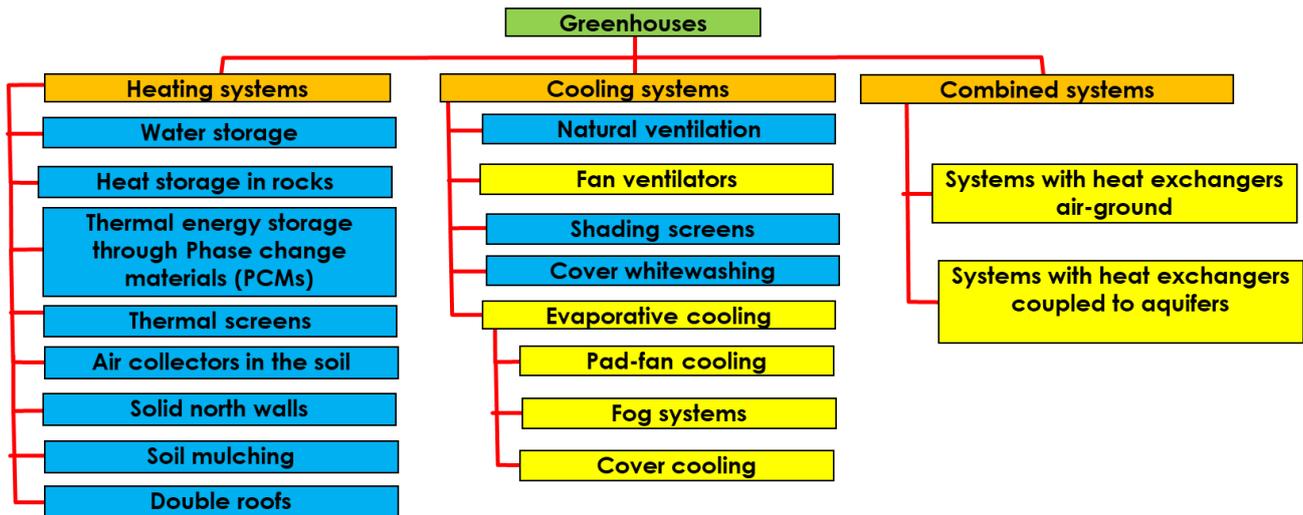


Abbildung 44. Klassifizierung verschiedener Klimatisierungssysteme für Gewächshäuser - passive Methoden (blau markiert).

Der Energieverbrauch in Gewächshäusern wird durch den Heizbedarf beeinflusst. In unbeheizten Gewächshäusern schwankt der Verbrauch zwischen 30 und 100 GJ/ha, während in beheizten Gewächshäusern der Energiebedarf 20 000 GJ/ha übersteigen kann.

Tabelle 3. Energieverbrauch der Gewächshauslandwirtschaft in einigen europäischen Ländern (mehrere Studien).

Country	Greenhouse area (ha)	Energy (GJ/ha)		Total energy		Gas emission	
		Heating	Electricity	(GJ/ha)	(kWh/m ²)	(toe/ha) ^b	(tCO ₂ eq/ha) ^c
Spain	77 923	81 – 16 272	2.8	84 – 17 784	2.3 – 158	2.0 – 332.0	13.6 – 1 277
Italy	35 229	11.8 – 9 450	13.5 – 65.6	62 – 14 616	1.7 – 406	3.0 – 349	11.6 – 1 344
Netherland	10 636	10 303 – 14 990	1 300	11 603 – 22 689	325 – 630	277 – 365	1 389 – 1 820
France	9 813	180 – 11 412	158 – 5 976	6 156 – 11 412	171 – 317	45 – 273	354 – 1 049
Greece	5 100	56 – 8 138	1.1	57 – 8 550	1.6 – 237	1.4 – 204	9 – 786
Germany	3 199	12 612 – 13 000	-	3 981 – 16 308	111 – 453	302 – 390	1 163 – 1 499
Portugal	1 010	2 174 – 6 768	-	273 – 11 556	7.6	6.5	25
Total/Average	120 930	39 020 571	3 871 189	1 562	155	1 717	48

^a 1 GWh = 8.60x10⁵ Mtoe - Mega tonne oil equivalent (Krey et al., 2014).

^b Using a factor emission of CO₂ for heat production of 0.331 tCO₂eq/MWh (Krey et al., 2014).

Während in Spanien die Fläche der geschützten Kulturen in den letzten sieben Jahren um bis zu 18,7 % gestiegen ist, ist die Fläche der Gewächshäuser in Italien sehr stabil geblieben.

Tabelle 4. Gewächshaus- und Gemüseanbaufläche in den verschiedenen Regionen Spaniens und Italiens. Evolution of surface of greenhouses in different regions of Spain (MAPA, 2024).

Year	Andalucía	Murcia	Canary Islands	Spain
2016	48 509	6 235	6 744	65 674
2020	55 138	6 491	5 491	71 783
2023	61 099	6 449	5 495	77 923

+18.7%

Evolution of greenhouse surface in different regions of Italy (ISTAT, 2024).

Year	Lazio	Campania	Sicilia	Veneto	Lombardia	Italy
2016	7 845	10 332	7 676	3 360	2 076	35 574
2020	9 001	9 994	7 121	3 285	1 949	35 574
2023	7 629	7 523	7 029	3 748	3 642	35 229

-0.9%

Die Preise für Gartenbauprodukte variieren je nach Wetterbedingungen in Europa oder durch Faktoren, die das Marketing beeinflussen (COVID, Ukraine-Krieg). Die höchsten Preise wurden 2023

sowohl in Spanien als auch in Italien erzielt. Im Allgemeinen sind die Verkaufspreise in Italien zwischen 15 und 20 % höher.

Tabelle 5. Durchschnittspreis [€/kg], den Landwirte in Spanien und Italien in den letzten Saisons für die Gewächshausproduktion erzielt haben (JA, 2024a; ISMEA, 2024a).

Country	Spain				Italy			
Crops	2016/17	2018/19	2020/21	2022/23	2017	2019	2021	2023
Standard tomato	0.66	0.61	0.60	0.94	0.93	0.83	0.93	1.21
Cherry tomato	1.28	1.12	1.23	1.56	1.57	1.12	1.21	1.64
Pepper	0.91	0.77	0.84	1.23	0.74	0.88	1.00	1.51
Cucumber	0.70	0.53	0.57	0.95	0.42	0.48	0.54	0.74
Watermelon	0.35	0.30	0.31	0.40	0.21	0.34	0.25	0.48
Zucchini	0.68	0.54	0.50	0.67	0.93	0.97	1.12	1.16
Melon	0.41	0.48	0.40	0.49	0.52	0.65	0.61	1.05
Eggplant	0.73	0.60	0.55	0.74	0.63	0.71	0.86	1.02
Bean	1.69	1.83	1.63	2.26	1.84	1.63	2.90	0.80
Average	0.63	0.65	0.63	0.90	0.76	0.78	0.86	1.05

Für jede der fünf ausgewählten Fallstudien wurden die Produktionskosten, der Wasser- und Energieverbrauch sowie deren Umweltauswirkungen analysiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse für jeden der fünf analysierten Fälle dargestellt.

3.2. Fallstudie 1 – Unbeheiztes Gewächshaus vom Typ Almería

Der erste analysierte Fall ist die Gewächshäuser vom Typ Almería, die in Spanien mehr als 70 % ausmachen. Die Investitionskosten betragen 15-20 €/m².

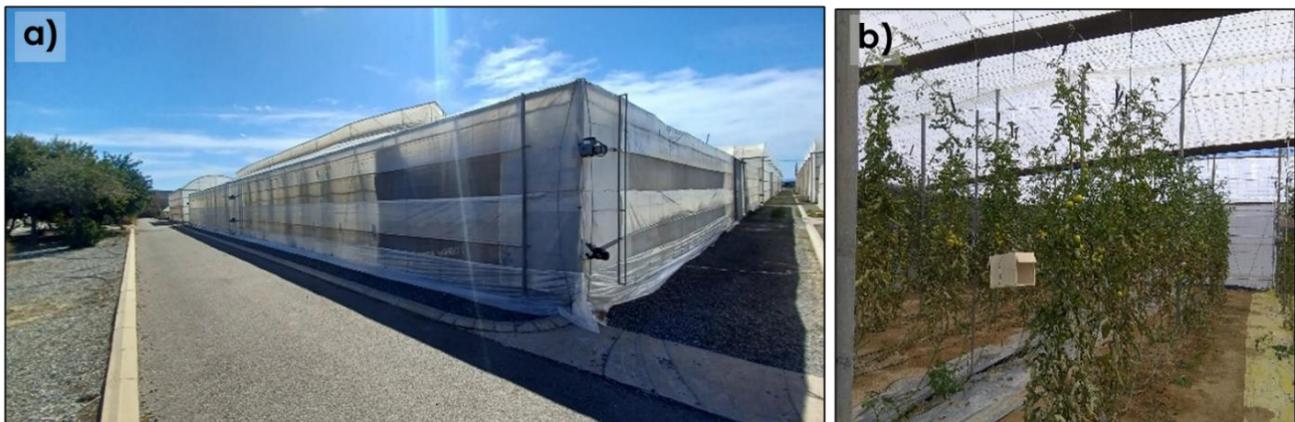


Abbildung 45. Gewächshaus vom Typ Almería (a) und Tomatenernte im Inneren (b) in der Versuchsstation UAL-ANECOOP in Almería (Spanien).

Diese Gewächshäuser erreichen Produktivitätswerte von normalerweise weniger als 15 kg/m² und Produktionskosten von 0,7 bis 1,0 €/kg. Abhängig von den Preisen des jeweiligen Jahres können die Landwirte einen Gewinn von bis zu 50.000 €/ha erzielen oder Verluste erleiden.

Tabelle 6. Gemessene Produktionskosten für Tomaten, die in den Saisons 2017/18 (Kosten aktualisiert auf die Saison 2022/23) und 2023/24 in einem Gewächshaus vom Typ Almería angebaut wurden, das sich in der Universität für Versuchsbetrieb von Almería-ANECOOP befindet.

Greenhouse type	Almería-type in "Raspa y amagado"			
Farm area [m ²]	28 152		Greenhouse surface [m ²]	
			1 917	
Commercial type	On vine or branch		Tomato Pears	
Cycle length [days]	225		194	
Type of soil	Sand mulching		Coconut fiber substrate	
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	10.8		6.6	
Type of cost	€/ha			
Supplies	24 823		19 127	
Transport	2 181		1 153	
Labour	30 675		24 206	
Contracted external services	1 224		508	
Total variable or direct costs, C _v [€/ha]	58 903		44 994	
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	17.8	17 070	18.4
			17 743	20 995
Total fixed or indirect costs C _f [€/ha]				
Total cost [€/ha]			76 645	
Unitary cost [€/kg]			0.71	
Average price A _p [€/kg]			1.03	
Total value crop [€/m ²]			11.12	
Production value P_v [€/ha]			111 240	
Annual operating income I _y [€/ha]			34 595	
			-3 879	

Diese Gewächshäuser sind diejenigen, die den geringsten Energieverbrauch benötigen, vor allem im Bewässerungssystem und beim Öffnen und Schließen der Fenster (wenn sie motorisiert sind). Der elektrische Energieverbrauch variiert zwischen 1 und 1,5 kWh/m² und der Wasserverbrauch zwischen 15 und 75 l/m².

Tabelle 7. Energy and water consumption measured in the experimental unheated Almería-type greenhouse of the University of Almería.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Energy consumption				
Electricity price [€/kWh]	0.145	0.159	0.143	0.132
Electricity for ventilation [kWh/m ²]	0.398	0.379	0.452	0.230
Total electricity [kWh/m ²]	1.194	1.064	1.442	0.924
Electrical consumption [GJ/ha]	43.0	38.3	51.9	33.3
Water consumption				
Water consumption [m ³ /ha]	2 185	5 242	4 854	2 945
Water price [€/m ³]	0.54	0.76	1.06	1.23
Water requirements [m ³ /t]	14.3	63.5	73.8	61.6

In diesen Gewächshäusern werden die geringsten Umweltauswirkungen erreicht. Die Struktur des Gewächshauses und das Bewässerungssystem haben die größte Wirkung. Die berechneten Werte für die beiden Tomatenkulturen, die in den UAL-Gewächshäusern angebaut wurden, sind mit Emissionen zwischen 95 und 280 kg CO₂ eq/t ähnlich wie die veröffentlichten Werten.

Tabelle 8. Gesamtumweltfaktoren, die durch das Simulationsmodell EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) für Tomatenkulturen in unbeheizten Gewächshäusern vom Typ Almería der Universität Almería (UAL) bereitgestellt und von Martin-Gorriz et al., 2011 (MG) und von García Martínez, 2019 (GM) nach Funktionseinheit (1 Tonne marktfähige Tomaten) berechnet wurden).

Crops	UAL 2017-18	UAL 2023-24	MG 2011	GM 2019
Yield [kg m ⁻²]	10.80	6.61	5.13	10.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	1.66	2.00	0.01	0.79
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.05	1.20	1.75	0.68
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.35	0.42	2.70	0.25
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	208.79	248.18	276.8	94.4
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.05	0.06	-	0.03
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	4 346	5 210	2 242	1 725
Water consumption [m ³ /tn]	30.17	33.86	38.00	44.80

3.3. Case Study 2 – Unbeheizte mehrfeldrige Gewächshäuser in Spanien

Unbeheizte mehrfeldrige Gewächshäuser machen etwa 2 % der Gewächshausfläche in Spanien aus. Die Kosten für diese Art von Gewächshaus variieren zwischen 25 und 38 €/m².



Abbildung 46. Unbeheiztes Mehrfeldgewächshaus (a) und Tomatenernte im Inneren (b) in der UAL-ANECOOP-Versuchsstation in Almería (Spanien).

In diesen Gewächshäusern können je nach Kombination der Kulturen Produktionen von mehr als 15 kg/m² erzielt werden. Die Produktionskosten variieren zwischen 0,5 und 1,5 €/kg, was 50-100 Tausend €/ha entspricht. Höhere Investitionskosten erschweren es, Gewinne zu erzielen, wenn die Produkte zum Durchschnittspreis verkauft werden. Normalerweise erzielen Landwirte mit dieser Art von Gewächshäusern tendenziell bessere Verkaufspreise durch direkte Verträge mit Vertriebsunternehmen.

Tabelle 9. Produktionskosten in den Saisons 2020/21 - 2023/24 von Kulturen, die in den unbeheizten mehrfeldrigen Versuchsgewächshäusern auf dem Versuchsbauernhof UAL-ANECOOP angebaut werden.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Greenhouse surface [m ²]	1 080	1 080	1 080	2 970
Days of crop	259	247	294	174
Marketable yield, Y _C [kg/m ²]	15.3	8.25	6.58	4.78
Supplies	26 791	24 323	36 802	17 163
Transport	5 096	3 654	8 303	2 307
Labour	27 161	26 232	34 147	18 141
External services	1 640	147	677	508
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]	60 688	54 357	79 929	38 119
Total investement cost, C _I [€/m ²]	34.0	35.8	37.6	22.9
Amortization costs, C _A =C _I /N _Y [€/ha]	19 374	20 558	21 566	13 172
Total fixed or indirect costs, C _F [€/ha]	20 014	22 018	22 699	15 816
Total cost, T _C [€/ha]	80 702	76 375	102 628	53 936
Unitary cost, U _C =T _C /Y _C [€/kg]	0.53	0.93	1.56	1.13
Average price, A _P [€/kg]	0.58	0.81	1.35	1.14
Total value crop, P _V =A _P ·Y _C [€/m ²]	8.89	6.68	8.87	5.45
Revenue of production, P _V =A _P ·Y _C [€/ha]	88 896	66 752	88 733	54 492
Annual operating income, I _V =P _V -T _C [€/ha]	8 194	-9 623	-13 895	556

Der elektrische Energieverbrauch ist ähnlich wie beim Almería-Typ und variiert zwischen 1 und 1,5 kWh/m² und der Wasserverbrauch variiert zwischen 15 und 75 l/m².

Tabelle 10. Energie- und Wasserverbrauch gemessen in experimentellen unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern der Universität Almería.

Crops	Tomato 2022-23	Tomato 2023-24
Energy consumption		
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.132
Ventilation electrical consumption [kWh/m ²]	0.350	0.411
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.576	1.053
Electrical consumption [GJ/ha]	56.7	37.9
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	3 258	2 238
Water price [€/m ³]	1.06	1.23
Water requirements [m ³ /t]	30.2	33.9

Was den Almería-Typ betrifft, so haben die Struktur des Gewächshauses und das Bewässerungssystem die größte Wirkung. Infolge des verstärkten Einsatzes von Metall beim Bau des Gewächshauses sind die Auswirkungen mit Emissionen zwischen 150 und 1000 kg CO₂ eq/t im Allgemeinen höher als im ersten Fall.

Tabelle 11. Gesamtfaktoren der Umweltauswirkungen, die mit dem Simulationsmodell EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) für Tomatenkulturen in unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern der Universität Almería (UAL) bereitgestellt und von Martínez-Blanco et al., 2011 (MB) und Torrellas et al., 2012 (TR) nach Funktionseinheit (1 Tonne marktfähige Tomaten).

Crops	UAL 2020-21	UAL 2022-23	UAL 2023-24	MB 2011	TR 2012
Yield [kg m ⁻²]	6.19	5.73	4.78	15.90	16.50
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	7.92	7.60	6.63	1.06	1.26
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	6.54	5.95	5.31	0.94	0.92
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.71	3.40	3.01	0.35	0.50
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	998.88	979.70	851.55	153.0	197.8
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.41	0.35	0.31	0.03	0.03
CED - Cummulative energy demand [MJ/tn]	19 678	18 888	16 560	2 554	3 067
Water consumption [m ³ /tn]	16.85	64.28	61.61	39.11	28.78

3.4. Fallstudie 3 – Beheizte mehrgespannte Gewächshäuser in Spanien

Der letzte Fall, der zur Charakterisierung spanischer Gewächshäuser ausgewählt wurde, sind die beheizten Mehrfeldgewächshäuser, die weniger als 2% der Gewächshäuser Spaniens ausmachen. Die Kosten für diese Art von Gewächshaus variieren zwischen 45-58 €/m².



Abbildung 47. Beheiztes Mehrfeldgewächshaus mit doppelter Abdeckung (a) und Tomatenernte innen (b) der Firma Natural Growers in Almería.

Der Einsatz von Heizungen ermöglicht eine Steigerung der Produktivität auf über 20 kg/m². Die höchsten Produktionskosten entfallen mit rund 40 % auf Erdgas zum Heizen. Abhängig von den Preisen für Kraftstoff und Gemüse können die Landwirte Geld verdienen oder verlieren. Wie im vorherigen Fall ist es normal, dass bei Berücksichtigung des durchschnittlichen Verkaufspreises Verluste erzielt werden. Die Landwirte schließen in der Regel direkt Verträge mit Supermarktketten ab, um einen Gewinn zu erzielen.

Tabelle 12. Aktualisierung der Produktionskosten auf die Saison 2022/23 der Kulturen, die 2013/14 in drei beheizten Mehrfeldgewächshäusern der Firma Natural Growers in Almería angebaut wurden.

Greenhouse type	Plastic multispans with inflated double cover		
Farm area [m ²]	158 140		
Greenhouse surface [m ²]	35 200	11 600	7 200
Crops	Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Cycle length [days]	280	308	308
Average marketable yield Y_{CS} [kg/m ²]	20.98	8.21	19.79
Type of cost	Subtype of cost		
	€/ha		
Supplies	107 762	110 164	111 041
Energy for heating	72 792	72 792	72 792
Transport	2 713	1 781	3 896
Labour	39 829	45 168	45 814
External services	1 147	520	1 722
Total variable or direct costs C_V [€/ha]	151 451	157 633	162 473
Investment cost [€/m ²]	52.8	Amortization [€/ha]	27 646
Total fixed or indirect costs C_F [€/ha]	31 210	31 768	30 480
Total cost, T_C [€/ha]	182 661	189 401	192 953
Unitary cost, $U_C=T_C/Y_C$ [€/kg]	0.87	2.31	0.98
Average price, A_p [€/kg]	0.88	1.66	0.97
Total value crop, $P_V=A_p \cdot Y_C$ [€/m ²]	18.40	13.63	19.16
Revenue of production, $P_V=A_p \cdot Y_C$ [€/ha]	184 048	136 341	191 648
Annual operating income, $I_V=P_V-T_C$ [€/ha]	1 387	-53 059	-1 305

Der Einsatz von Heizung erhöht den Energieverbrauch auf über 120 kWh/m². Der Wasserverbrauch kann auch aufgrund der stärkeren Transpiration des Ernteguts mit Werten von 60-150 l/kg steigen.

Tabelle 13. Der Energie- und Wasserverbrauch wird in drei beheizten Mehrkuppelgewächshäusern der Firma Natural Growers in Almería gemessen, deren Preise auf die Saison 2022/23 aktualisiert wurden.

Crop	Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.143	0.143
Consumption in ventilation [kWh/m ²]	0.242	0.242	0.242
Total electrical consumption [kWh/m ²]	2.800	2.800	2.800
Electrical consumption [GJ/ha]	100.8	100.8	100.8
Natural gas price [€/m ³]	0.607	0.607	0.607
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	11.99	11.99	11.99
Heating energy consumption [kWh/m ²]	128.7	128.7	128.7
Heating energy consumption [GJ/ha]	4632	4632	4632
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	19 198	11 982	11 982
Water price [€/m ³]	0.75	0.75	0.75
Water requirements [L/kg] or [m ³ /t]	91.5	145.9	60.5

Durch den Einsatz von Heizungen steigen auch die Emissionen deutlich auf Werte von 900-3500 kg CO₂ eq/t.

Tabelle 14. Gesamtfaktoren der Umweltauswirkungen, die durch das Umweltsimulationsmodell EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) für die Kulturen bereitgestellt wurden, die in drei beheizten Mehrfeldgewächshäusern der Firma Natural Growers (NG) in Almería mit ökologischem Anbau (ohne Einsatz von Insektiziden oder Fungiziden) angebaut und von Pérez Neira et al., 2018 (PN) für Tomatenkulturen nach Funktionseinheit (1 Tonne marktfähige Tomaten) angebaut wurden).

Crops	Cucumber	T. Cherry	T. Branch	PN 2018
Yield [kg m ⁻²]	20.98	8.21	19.79	15.30
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.83	30.35	12.59	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.45	3.78	1.57	-
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.17	0.90	0.23	-
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 389.7	3 568.9	1 481.2	920.0
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.11	0.28	0.11	-
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	24 927	63 967	26 544	13 140
Water consumption [m ³ /tn]	91.51	145.94	60.55	-

3.5. Case-Studie 4 – Unbeheiztes Mehrspanngewächshaus in Italien

Der erste Fall, der in Italien ausgewählt wurde, sind mehrfeldrige Gewächshäuser ohne Heizung. Die Kosten variieren zwischen 20-80 €/m².



Abbildung 48. Unbeheiztes Mehrfeldgewächshaus (a) und Tomatenernte innen (b) in Italien (COSER, 2024; De Marinis, 2023).

In diesen Gewächshäusern ist die Produktion nicht sehr hoch, so dass sich viele Landwirte für hochwertige Pflanzen wie Kirschtomaten entscheiden. Wie im Falle Spaniens müssen die Landwirte aufgrund der hohen Investitionen höhere Verkaufspreise als der Durchschnitt erzielen, um Verluste zu vermeiden.

Tabelle 15. Geschätzte Produktionskosten für Tomaten "Cherry", die in kommerziellen unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern in Italien in der Saison 2022/23 angebaut werden (ISMEA, 2024 a-c).

Greenhouse type	Multispan		
Farm area [m ²]	100 000	Greenhouse surface [m ²]	10 000
Farm type	Average of commercial	Location	Ragusa (Italy)
Crop specifications			
Commercial type	Cherry	Crop type	Grafted
Cycle	6 months	Cycle length	180 days
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]			5.55
Type of cost	€/ha		
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]			40 550
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	25.5	22 462
Total fixed or indirect costs C _F [€/ha]			10 303
Total cost [€/ha]			108 331
Unitary cost [€/kg]			1.96
Average price A _P [€/kg]			1.60
Total value crop [€/m ²]			8.83
Production value P _V [€/ha]			88 331
Annual operating income I _V [€/ha]			-20 000

Energie und Wasserverbrauch sind ähnlich wie bei unbeheizten, mehrspannigen Gewächshäusern in Spanien. Die Wasserkosten sind mit ca. 0,25 €/m³ jedoch viel niedriger als in Almería (0,75-1,25 €/m³).

Tabelle 16. Geschätzter Energie- und Wasserverbrauch für gewerbliche unbeheizte Mehrfeldgewächshäuser in Italien für die Saison 2022/23.

Energy consumption		Source
Electricity price [€/kWh]	0.210	ARERA (2023)
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.9	Estimated from ISMEA (2024 a)
Electrical consumption [GJ/ha]	67	Calculated
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	4 570	Bacci et al. (2005)
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC, 2024
Water requirements [m ³ /t]	82.7	Calculated

Die Metallstruktur von mehrgespannten Gewächshäusern erzeugt Emissionen zwischen 750-1200 kg CO₂ eq/t.

Tabelle 17. Gesamtumweltwirkungsfaktoren, die durch das Umweltsimulationsmodell EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) für Tomaten "Kirsche" bereitgestellt wurden, die in unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern in Italien angebaut wurden, und berechnet von Cellura et al., 2012 (CL) nach Funktionseinheit (1 Tonne marktfähige Tomaten).

Crops	Tomato "Cherry" 2022-23	CL - Tomato	CL – Tomato "Cherry"
Yield [kg m ⁻²]	5.53	-	-
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	5.73	-	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	4.71	5.70	9.80
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.52	2.10	3.70
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	868.8	740.0	1 245.9
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.21	0.30	0.50
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	14 141	16 200	23 000
Water consumption [m ³ /tn]	82.64	88.90	77.70

3.6. Fallstudie 5 – Beheizte mehrfeldrige High-Tech-Gewächshäuser in Italien

Der letzte ausgewählte Fall entspricht beheizten Gewächshäusern in Italien mit einem hohen Technologieniveau bei Klimatisierungssystemen. Die Kosten für diese Gewächshäuser sind mit Werten von 70-160 €/m² am höchsten.



Abbildung 49. Beheiztes Mehrfeldgewächshaus (a) und Tomatenernte im Substrat mit Heizungsrohren (b) von Sfera Agricola in Italien.

In diesen Gewächshäusern machen die Energiekosten für die Heizung zwischen 20 und 40 % der Gesamtkosten aus. Die Heizung ermöglicht eine Produktionssteigerung von über 50 kg/m². Das wirtschaftliche Risiko ist stark erhöht, so dass sowohl Gewinne als auch Verluste viel größer sein können als in unbeheizten Gewächshäusern.

Tabelle 18. Schätzung der Produktionskosten von Tomaten "Kirsche", die in kommerziellen High-Tech-Mehrfeldgewächshäusern in Italien angebaut und in den Saisons 2013/14 mit Erdgas beheizt (Kosten von Battistel, 2014 aktualisiert auf die Saison 2022/23) und in den Saisons 2022/23 mit Diesel und Holzpellets beheizt wurden (Energie gemessen von Sfera Agricola).

Greenhouse type	Heated multispan high-tech	
Greenhouse surface [m ²]	50 000	119 232
Cycle length [days]	320	343
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	50.0	15.0
Type of cost	€/ha	
Supplies	365 387	117 094
Heating energy consumption - gas	245 000	0
Heating energy consumption - diesel fuel	0	36 068
Heating energy consumption - wood	0	47 325
Transport	11 275	3 383
Labour	149 940	44 982
External services	47 200	0
Total variable or direct costs, C _v [€/ha]	573 802	165 459
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	
	74.8	46 607
Total fixed or indirect costs C _f [€/ha]	42 000	26 000
Total cost [€/ha]	662 409	238 066
Unitary cost [€/kg]	1.32	1.59
Average price A _p [€/kg]	1.65	1.65
Total value crop [€/m ²]	82.7	24.8
Production value P _v [€/ha]	826 500	247 950
Annual operating income I _y [€/ha]	164 091	9 884

Der Energieverbrauch für die Heizung ist in diesen Gewächshäusern viel höher, zwischen 9000 und 13000 GJ/ha als in Almería, wo ein gemäßigteres Klima herrscht.

Tabelle 19. Geschätzter Energie- und Wasserverbrauch für ein kommerzielles mehrfeldriges High-Tech-Gewächshaus, das mit Erdgas beheizt und in einem mit Diesel und Holzpellets beheizten Gewächshaus (von Sfera Agricola) in Italien für die Saison 2022/23 gemessen wird.

Heating energy source	Natural gas	References	Diesel and wood pellets
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.276	ARERA (2023)	0.210
Total electrical consumption [kWh/m ²]	15.0	Battistel (2014)	11.4
Electrical consumption [GJ/ha]	540	Calculated	410
Natural gas price [€/m ³]	0.980	ARERA (2023)	-
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	25.0	Battistel (2014)	-
Diesel fuel price [€/m ³]	-	-	1.050
Diesel fuel consumption [L/m ²]	-	-	3.44
Wood price [€/tons]	-	-	75.0
Wood consumption [kg/m ²]	-	-	63.1
Heating energy consumption [kWh/m ²]	270.8	Calculated	350.9
Heating energy consumption [GJ/ha]	9 747	Calculated	12 631
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	10 000	Battistel (2014)	300
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC (2024)	0.25
Water requirements [m ³ /t]	20.0	Calculated	2.0

Diese Gewächshäuser verursachen höhere Emissionen von rund 1400 kg CO₂ eq/t.

Tabelle 20. Gesamte Umweltwirkungsfaktoren, die durch das Umweltsimulationsmodell EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) für "Kirschtomaten" bereitgestellt werden, die in kommerziellen mehrfeldrigen High-Tech-Gewächshäusern angebaut werden, die mit Erdgas beheizt und mit Diesel und Holzpellets beheizt werden, in Italien für die Saison 2022/23 nach Funktionseinheit (1 Tonne marktfähige Tomaten).

Heating source	Natural gas	Diesel and wood pellets
Yield [kg m ⁻²]	50.00	15.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.79	9.72
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	2.50	5.16
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	1.16	2.01
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 444.0	1 415.6
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.15	0.24
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	25 552	24 120
Water consumption [m ³ /tn]	20.00	2.00

3.7. Schlussfolgerungen

In beheizten Gewächshäusern in Spanien und Italien könnten thermochemische Flüssigkeiten verwendet werden, um die Heizkosten zu senken und ihre Umweltauswirkungen zu verringern.

Das auf thermochemischen Flüssigkeiten basierende Klimatisierungssystem könnte in unbeheizten Mehrfeldgewächshäusern zur Kühlung und Feuchtigkeitsregelung eingesetzt werden.

Die mittleren und großen Unternehmen (20-50 ha) sind in Spanien am geeignetsten für die Einführung dieser Art von Technologie.

Die konsultierten Landwirte gaben an, dass sie eine Investition von 5 000-15 000 €/ha mit einer Rentabilität von 2-10 Jahren tätigen würden.

4. TheGreefa - Auswirkungen auf Umwelt und Wirtschaft

Der Abschnitt des TheGreefa-Schulungshandbuchs konzentriert sich auf die Präsentation der Ergebnisse der Analyse der ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen im Zusammenhang mit der Implementierung der TheGreefa-Technologie in Gewächshäusern. Die wichtigste Technologie, die analysiert wird, ist das Raumklimaregelungssystem für Gewächshausanwendungen.

4.1. Auswirkungen auf die Umwelt

Im Projekt TheGreefa wurden die potenziellen Umweltvorteile im Zusammenhang mit der Implementierung der TheGreefa-Technologie in Gewächshäusern in der Lebenszyklusanalyse identifiziert, die im Rahmen des Arbeitspakets 3 des Projekts durchgeführt wurde, wobei der Schwerpunkt auf der Bewertung der entwickelten Technologien lag.

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit den Prinzipien und dem Rahmen für LCA durchgeführt, die in der internationalen Norm für LCA, ISO 14040 und ISO 14044, definiert sind.

Es wurden Daten von TheGreefa-Demonstratoren und Fallstudien gesammelt, die in Bezug auf Energie, Wasser, Verbrauch fossiler Brennstoffe und Produktion der Gewächshäuser analysiert wurden, um die Umweltauswirkungen vor und nach der Implementierung des TheGreefa-Systems auf der Grundlage von realen Daten (Demonstratoren) oder Simulationen (Fallstudien) zu vergleichen. Die LCA-Studie ermöglicht es, die langfristige Gesamteffizienz der TheGreefa-Technologie zu analysieren und darzustellen, wie sie sich positiv auf die Umwelt und die Menschen auswirken kann.

Die Ökobilanz wurde auf der Grundlage von realen Daten aus TheGreefa-Gewächshäusern durchgeführt, die sich in der mittleren kontinentalen Klimazone (Schweiz) und in der mediterranen Klimazone (Italien, Toskana) befinden.

LCA-Methodik

Es gibt vier verschiedene Schritte in einer LCA-Studie, die in den genannten ISO-Normen beschrieben sind.

Die erste ist die Definition des Ziels und des Umfangs der Studie, um sicherzustellen, dass die Ökobilanz konsistent durchgeführt wird.

- Die Ökobilanz modelliert den Lebenszyklus eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems. Ein Modell ist eine Vereinfachung einer komplexen Realität, und wie bei allen Vereinfachungen bedeutet dies, dass die Realität in irgendeiner Weise verzerrt wird. Die Herausforderung für einen LCA-Praktiker besteht darin, sicherzustellen, dass die Vereinfachungen und Verzerrungen die Ergebnisse nicht zu sehr beeinflussen. Der beste Weg, dies zu tun, besteht darin, das Ziel und den Umfang der LCA-Studie sorgfältig zu definieren.

Dann können wir zum 2. Schritt übergehen, der Bestandsanalyse der Extraktionen und Emissionen.

- Bei der Bestandsanalyse werden alle Umweltein- und -austräge betrachtet, die mit einem Produkt oder einer Dienstleistung verbunden sind. Ein Beispiel für einen Umwelteintrag – etwas, das aus der Umwelt entnommen wird, um es in den Lebenszyklus des Produkts zu

stecken – ist der Einsatz von Rohstoffen und Energie. Zu den Umweltauswirkungen, die durch den Lebenszyklus des Produkts in die Umwelt abgegeben werden, gehören die Emission von Schadstoffen und die Abfallströme. Zusammen ergeben sie ein vollständiges Bild des Lebenszyklus des Produkts oder des Prozesses.

Nachdem die Bestandsaufnahme abgeschlossen ist, können wir zum Schritt der Lebenszyklusfolgenabschätzung übergehen.

- In der Ökobilanz (LCIA) werden die Schlussfolgerungen gezogen, die es ermöglichen, bessere unternehmerische Entscheidungen zu treffen. Die Umweltauswirkungen werden nach dem klassifiziert und bewertet, was für ein Unternehmen am wichtigsten ist und in Umweltbegriffe wie die globale Erwärmung oder die menschliche Gesundheit übersetzt. Die wichtigste Entscheidung, die getroffen werden muss, ist, wie integriert die Ergebnisse sein sollen. Es besteht die Möglichkeit, eine einzelne Punktzahl zu erstellen, um zu zeigen, wie nachhaltig das Produkt ist, oder um zu sehen, ob das Design die CO₂-Emissionen und andere Faktoren des Klimawandels verbessert. Dies hängt in der Regel von der Art der Zielgruppe ab, die angesprochen werden soll, und von der Fähigkeit der Zuhörer, detaillierte Ergebnisse zu verstehen.

Als letzter – 4. Schritt müssen wir die im vorherigen Schritt erzielten Ergebnisse interpretieren.

- Während der Interpretationsphase wird überprüft, ob die Schlussfolgerungen gut begründet sind. Die Norm ISO 14044 beschreibt mehrere Prüfungen, um zu testen, ob die Schlussfolgerungen durch die Daten und die verwendeten Verfahren angemessen gestützt werden.

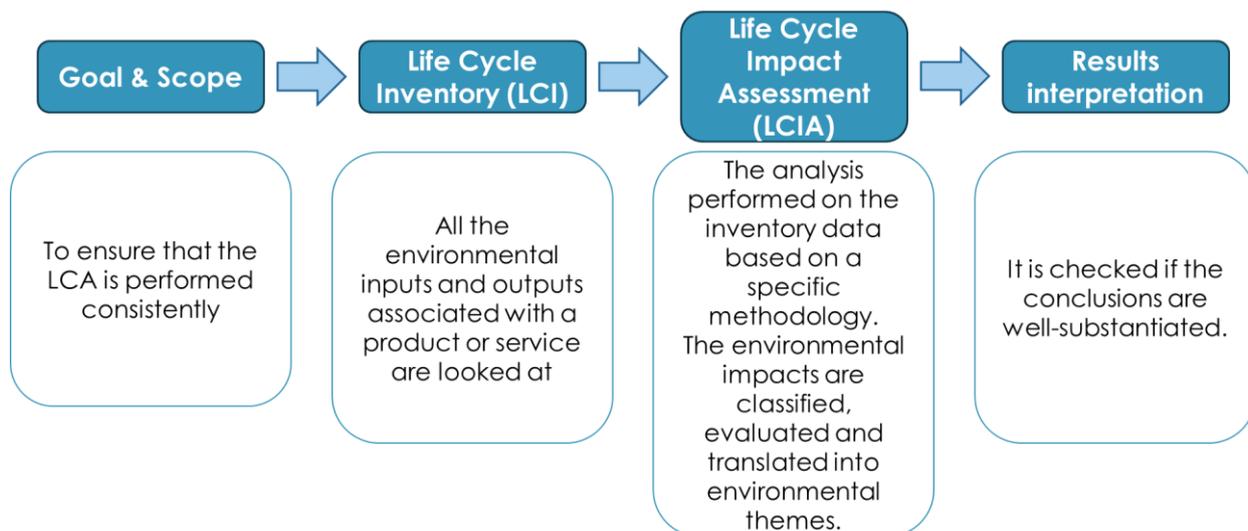


Abbildung 50. Vier Schritte zur Durchführung einer Ökobilanz.

Für das TheGreefa-Projekt bestand das Ziel der LCA-Studie darin, die Umweltauswirkungen zu analysieren und zu vergleichen, die sich aus 15 Jahren Betrieb der Gewächshäuser ergeben, wobei das Gewächshaus vor und nach der Implementierung des TheGreefa-Klimakontrollsystems berücksichtigt wurde.

LCA boundaries		Life cycle stages	Life cycle stage designation and description	
Cradle to cradle (C2C)	Cradle to gate	Product stage	A1	Raw material extraction and processing, processing of secondary material input
			A2	Transport to the manufacturer
			A3	Manufacturing
	Cradle to gate	Installation process stage	A4	Transport to the Building site
			A5	Installation into the Building site
	Gate to grave	Use stage – information modules related to the Product/Material	B1	Use or application of the installed product
			B2	Maintenance
			B3	Repair
			B4	Replacement
			B5	Refurbishment
Gate to grave	Use stage – information modules related to the operation of the Customer site	B6	Operational energy use	
		B7	Operational water use	
Gate to grave	End-of-life stage	C1	Deconstruction, demolition	
		C2	Transport to waste processing	
		C3	Waste processing for reuse, recovery and/or recycling (3R)	
		C4	Disposal	
Benefits and loads beyond the system boundary		D	Reuse, recovery and/or recycling (3R) potentials	

Abbildung 51. Lebenszyklusphasen eines Produkts oder einer Dienstleistung.

Dann müssen die Grenzen der Analyse definiert werden. In der Tabelle sind die Grenzen einschließlich aller Lebenszyklusphasen des Produkts oder der Dienstleistung dargestellt. Von der Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung, Nutzung, Demontage, bis hin zur Endlagerung bzw. Verwertung der Materialien.

In der Analyse wird für jedes Gewächshaus die Betriebsdauer von 15 Jahren für 1 ha Fläche des Gewächshauses untersucht. Daher wird nur die Betriebsphase des Lebenszyklus berücksichtigt, um die Auswirkungen zu identifizieren und zu vergleichen. Die Unterschiede beziehen sich auf den Energie- und Brennstoffverbrauch der Energiesysteme der Gewächshäuser während ihres Betriebs.

Für die Durchführung der Analyse wurde die Software SimaPro verwendet.

Wirkungskategorien

Die ISO-Normen definieren die spezifischen Kategorien von Auswirkungen, die die Umweltbelastungen beschreiben. Die wichtigsten Wirkungskategorien, die in der Ökobilanz berücksichtigt werden, sind:

- **Abiotisches Belastungspotenzial** – bezieht sich auf den Verbrauch nicht-biologischer Ressourcen wie fossiler Brennstoffe, Mineralien, Metalle, Wasser usw. Es zeigt den Rückgang dieser Ressourcen an. Die Kategorie wird in Einheiten MJ für fossile Brennstoffe und in kg Antimonäquivalent (Sb) für andere Mineralien ausgedrückt.
- **Klimawandel / Globales Erwärmungspotenzial** – definiert als die Änderung der globalen Temperatur, die durch den Treibhauseffekt verursacht wird, den die Freisetzung von "Treibhausgasen" durch menschliche Aktivitäten verursacht.
- **Ozonschichtabbaupotenzial** – Abbau der stratosphärischen Ozonschicht durch anthropogene Emissionen von ozonabbauenden Stoffen. Es kann zu einer Zunahme der ultravioletten UV-B-Strahlung und der Anzahl der Fälle von Hautkrankheiten führen.
- **Toxizitätspotenzial für den Menschen** – ein berechneter Index, der den potenziellen Schaden einer Einheit von Chemikalien widerspiegelt, die in die Umwelt freigesetzt werden, und er basiert sowohl auf der inhärenten Toxizität einer Verbindung als auch auf ihrer potenziellen Dosis. Diese Nebenprodukte, vor allem Arsen, Natriumdichromat und

Fluorwasserstoff, werden zum größten Teil durch die Stromerzeugung aus fossilen Quellen verursacht.

- **Aquatisches Ökotoxizitätspotenzial für Süßwasser** – die toxischen Auswirkungen von Chemikalien auf Ökosysteme, in diesem Fall im Süßwasser, die zum Verlust der biologischen Vielfalt und/oder zum Aussterben von Arten führen.
- **Aquatisches Ökotoxizitätspotenzial im Meer** – die toxischen Auswirkungen von Chemikalien auf die Ökosysteme mariner Stauseen, die zum Verlust der biologischen Vielfalt und/oder zum Aussterben von Arten führen.
- **Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial** – die toxischen Auswirkungen chemischer Stoffe auf Landökosysteme, die zum Verlust der biologischen Vielfalt und/oder zum Aussterben von Arten führen.
- **Photochemisches Oxidationspotenzial** (Photochemisches Ozonbildungspotenzial) – definiert das Potenzial für die Entstehung der Art von Smog, die durch die Einwirkung von Sonnenlicht, Hitze und flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) und Stickoxiden (NO_x) entsteht.
- **Versauerungspotenzial** – Senkung des pH-Werts aufgrund der versauernden Wirkung anthropogener Emissionen. Es steht im Zusammenhang mit den Emissionen von Gasen wie NH_3 , NO_x und SO_x , die sich mit Wasser in der Atmosphäre vermischen und sauren Regen verursachen, der den Säuregehalt von Wasser und Bodensystemen erhöht.
- **Eutrophierungspotenzial** – definiert das Potenzial für die Akkumulation von Nährstoffen in aquatischen Systemen. Die Wirkungsindikatoren sind die Erhöhung der Stickstoff- und Phosphorkonzentration und die Bildung von Biomasse (z.B. Algen).

Ökobilanz – Schweizer Gewächshaus

Das Meyer Orchideen-Gewächshaus ist der TheGreefa-Demonstrator, in dem das System im realen Maßstab implementiert und in Betrieb ist. Im Gewächshaus der Meyer Orchideen AG in der Schweiz, in der Nähe des Flughafens Zürich, wurde die Feuchtigkeitsregelung, das Heizen und Kühlen von TheGreefa in einem System durch einen einzigen Prozess demonstriert.



Abbildung 52. Meyer Orchideen Gewächshaus.

Das Gewächshaus in der Analyse hat eine Fläche von 600 m^2 , auf der 9 Klimalanlagen (Absorber) mit einer Leistung von jeweils 8 kW als Wärme-/Kühlleistung installiert sind, die jeweils ca. 50 m^2 Pflanzfläche versorgen.



Abbildung 53. Die Absorbereinheit (links) und die Pflanzische (rechts) im Gewächshaus in der Schweiz.

Das im Projekt verwendete TCF ist $MgCl_2$. Alle 9 Systeme werden von einem Desorber bedient, der außerhalb des Gewächshauses installiert ist. Die Energiesysteme sind in das erneuerbare System des Gewächshauses integriert, einschließlich Holzkessel, Grundwasser-Wärmepumpe, Photovoltaik-Paneele und Brunnenwasser.

Solarenergie wird für die TCF-Regeneration genutzt und Pufferspeicher werden installiert, um verdünntes und konzentriertes TCF zu speichern.

Die für die Umweltbewertung gesammelten Daten sollten es ermöglichen, die Auswirkungen wie Umweltauswirkungen oder Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zwischen dem 600 m² großen Gewächshaus, das ohne TheGreefa-System betrieben wird, und dem System, das in einem Zeitraum von 15 Jahren implementiert wurde, zu vergleichen. Die Analyse wurde für eine Referenzeinheit von 1 ha des analysierten Gewächshauses durchgeführt. Daher mussten die gesammelten Eingaben für 1 ha Fläche und den geplanten Zeitraum neu berechnet werden.

Der Schwerpunkt lag auf Eingaben, die einen Vergleich der Energieeffizienz des Gewächshauses unter Berücksichtigung des verbrauchten Stroms, Wassers und der Kraftstoffe ermöglichen. Der größte Teil des Wassers im Gewächshaus wird in einem geschlossenen Kreislauf verwendet oder aus Regenfällen zurückgewonnen. Wasser, das für den Kühlprozess benötigt wird, wurde in die Analyse einbezogen.

In Tabelle 21 in der Folie sind die ersten Daten der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften dargestellt, mit deren Hilfe das IZNAB weitere Berechnungen durchgeführt hat, wie z.B. die Bestimmung der Gewichtsmenge von Treibstoffen, die Anzahl der Transporte. Diese Daten waren für die Analyse mit der SimaPro-Software notwendig. Neben der SimaPro-Datenbank wurde bei der Analyse auch die Ecoinvent-Datenbank verwendet, um die notwendigen Ein- und Ausgänge in den technologischen Prozessen des Gewächshauslebenszyklus bereitzustellen

Tabelle 21. Energie- und Treibstoffverbrauchsdaten aus dem Schweizer Gewächshaus.

	1 season for 600 m ² greenhouse		1 season for 1 ha greenhouse	
	Standard greenhouse	TheGreefa system	Standard greenhouse	TheGreefa system
Electricity consumption (pumps, fans and heat pump)	43 178.69 kWh	39 945.54 kWh	719 645 kWh	665 792 kWh
Oil consumption	1 350 kWh	320 kWh	22 500 kWh	5 333 kWh
Wood consumption	228 150 kWh	54 080 kWh	3 802 500 kWh	901 333 kWh
Water consumption	0 m ³	23 m ³	0 m ³	383.3 m ³

Ökobilanz – Italienisches Gewächshaus

Der nächste Fall ist das italienische Gewächshaussystem von Sfera Agricola, das das High-Tech-System und eine der neuen Methoden für eine qualitativ hochwertige landwirtschaftliche Produktion darstellt. Es führt eine Fallstudie mit Wasserrückgewinnung und Energieeffizienz in Gewächshäusern durch. Das Gewächshaus befindet sich in der südlichen Toskana in Italien.

Die Fallstudie der Firma Sfera stellt ein ideales Beispiel für die Herausforderungen einer intensiven und qualitativ hochwertigen mediterranen Landwirtschaft dar, insbesondere in den wichtigen Herausforderungsbereichen Wasser- und Energieeffizienz. Das Gewächshaus spielte die Rolle einer Fallstudie im Rahmen des TheGreefa-Projekts. Ziel der Fallstudien ist es, die im Laufe des Jahres gesammelten Daten in Abhängigkeit von den klimatischen Schwankungen und den kulturellen Bedürfnissen des Gewächshauses zu analysieren, um den besten Designbedarf zu definieren, um die Energiekosten weiter zu senken und die Qualität und Produktivität zu verbessern.

Die für die Umweltprüfung gesammelten Daten sind Ergebnisse von Simulationen, die von den TheGreefa-Projektpartnern durchgeführt wurden. Die Daten beziehen sich auf eine volle Betriebsaison auf einer Gewächshausfläche von 1 ha.



Abbildung 54. Das Gewächshaus von Sfera Agricola – Dachsystem (oben links), Rohrleitungsheizung (oben rechts) und die Tomatenpflanzen mit Sensoren (unten).

Die Wärme im Gewächshaus wird mit Holz- und Ölkesseln versorgt. Das System hat eine Leistung von 7 000 kW. Die wichtigsten Holzarten, die als Brennstoffe verwendet werden, sind Tanne, Kiefer, Steineiche und Kastanie. Der Ölverbrauch liegt bei ca. 600 l/h. Das Heizsystem verbraucht etwa 28 % des vom Gewächshaus verbrauchten Stroms, hauptsächlich für Zusatzgeräte wie Pumpen.

Tabelle 22. Energie- und Kraftstoffverbrauchsdaten, die im italienischen Gewächshaus gesammelt wurden.

	Standard system	TheGreefa
Heating season	1 year for 1 ha greenhouse	
Electricity	90 330 kWh	99 363 kWh
Oil	34 350 l	27 480 l
Wood	631 t	505 t

Ökobilanz

Die beiden oben genannten Gewächshäuser wurden unter Berücksichtigung von zwei Szenarien bewertet:

- Szenario 1_Existing Gewächshaus (vor der Modernisierung). Die Lebenszyklusanalyse für das Gewächshaus wurde vor der Implementierung des TheGreefa-Systems durchgeführt.
- Szenario 2_Retrofitted Gewächshaus (nach der Modernisierung). Die Lebenszyklusanalyse für das Gewächshaus wurde nach der Implementierung des TheGreefa-Systems durchgeführt.

Schweizer Gewächshaus

Zunächst werden die Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung für das Schweizer Gewächshaus vorgestellt. Bei der Durchführung der LCA-Berechnung unter Verwendung der CML-IA-Baseline-Methodik werden die Ergebnisse für die wichtigsten Wirkungskategorien angegeben. In jeder Kategorie sind die positiven Auswirkungen der Implementierung des TheGreefa-Systems im Gewächshaus zu beobachten – niedriger oder höher. Die Reduzierung der Auswirkungen beim Betrieb des TheGreefa-Systems kann zwischen 37 % und 76 % liegen.

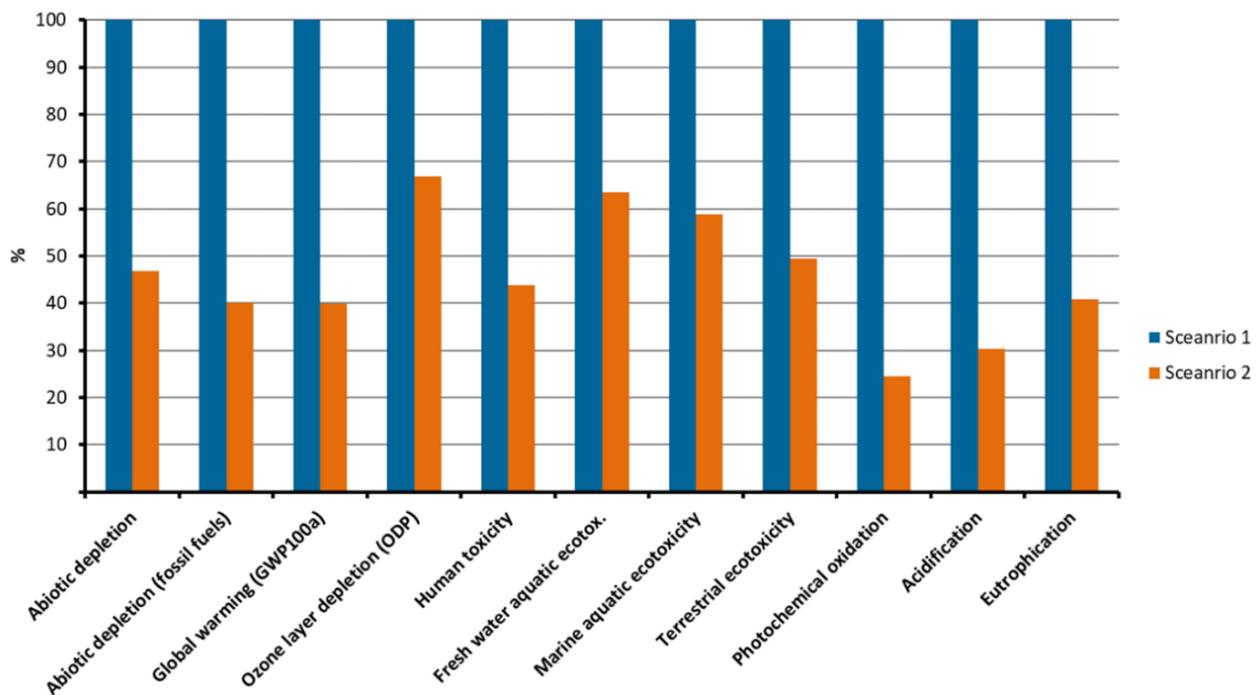


Abbildung 55. Umweltbewertung: Schweizer Demonstrator – Szenario 1 & Szenario 2 im Vergleich (SimaPro 8.3.0). Methode: CML-IA Baseline V3.04 / EU25 / Charakterisierung für Wirkungskategorien.

Zur besseren Darstellung wurde eine weitere Analyse unter Verwendung der europäischen ReCiPe-Endpunkt-Methodik durchgeführt. Es stellt die Auswirkungen dar, die in 3 Hauptfaktoren gruppiert sind – menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcennutzung.

Basierend auf den erzielten Ergebnissen können 15 Jahre Betrieb des TheGreefa-Systems im Schweizer Gewächshaus zu einer Reduktion der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit um

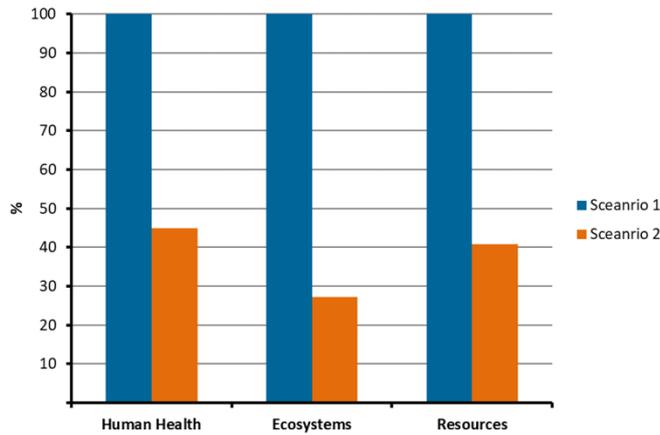


Abbildung 56. Vergleich der Belastungsuntersuchung: Schweizer Gewächshaus - Szenario 1 & Szenario 2. Methode: ReCiPe Endpoint (E) V. 1.13 / Europe ReCiPe E/A

Kategorie des Treibhauspotenzials, ausgedrückt in Kilogramm CO₂-Äquivalent. In Bezug auf CO₂ wird die TheGreefa-Technologie in den 15 Jahren eine Einsparung von 2 680 Tonnen CO₂-Emissionen auf 1 ha Gewächshaus ermöglichen. In Prozent ausgedrückt ergibt sich eine Reduzierung des Treibhauspotenzials um etwa 60 %. Die Masse an CO₂ und der prozentuale Anteil sollen aber auch deutlich machen, was ein intensiver industrieller Gewächshausanbau ist.

ca. 55%, einer Reduktion von 60% auf verwendete Ressourcen und einer Reduktion von ca. 73% der Auswirkungen auf Ökosysteme führen.

Die verglichenen Betriebsphasen für beide Szenarien und ihre Umweltauswirkungen werden hauptsächlich von der im Gewächshaus verbrauchten Energie in verschiedenen Formen – Strom und Wärme – dominiert.

Eine weitere Möglichkeit, die Vorteile für die Umwelt darzustellen, ist die Analyse der

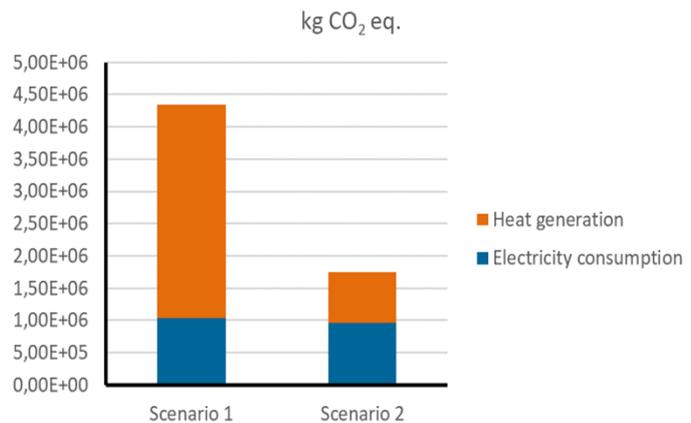


Abbildung 57. Global Warming Potenzial (GWP) des Schweizer Gewächshauses in den beiden Szenarien

Italienisches Gewächshaus

Kommen wir nun zum italienischen Fall, bei dem die CML-IA-Basismethodik verwendet wird, ähnlich wie beim Schweizer Demonstrator, können in jeder Kategorie die positiven Auswirkungen der Implementierung des TheGreefa-Systems im Gewächshaus auch für die italienische Fallstudie beobachtet werden. Im italienischen Gewächshaus ist die Verringerung der Auswirkungen jedoch in der Grafik weniger sichtbar, da die Verringerung in jeder Kategorie zwischen 10 und 20 % liegt.

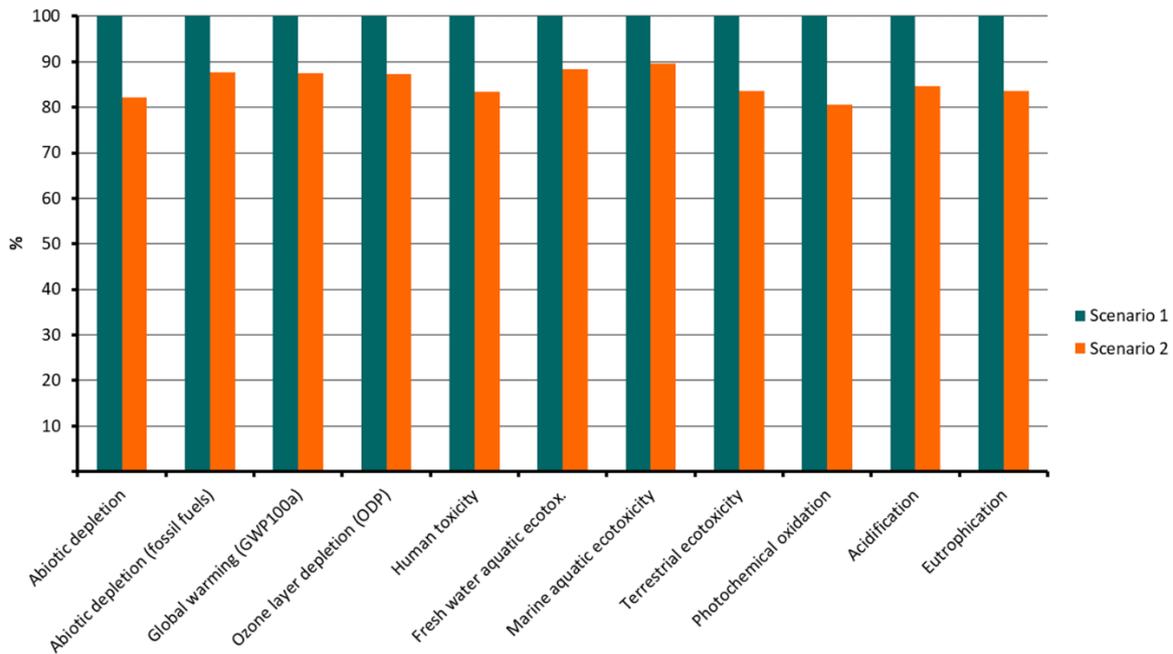


Abbildung 58. Umweltbewertung: Italienische Fallstudie – Szenario 1 und Szenario 2 im Vergleich (SimaPro 8.3.0). Methode: CML-IA Baseline V3.04 / EU25.

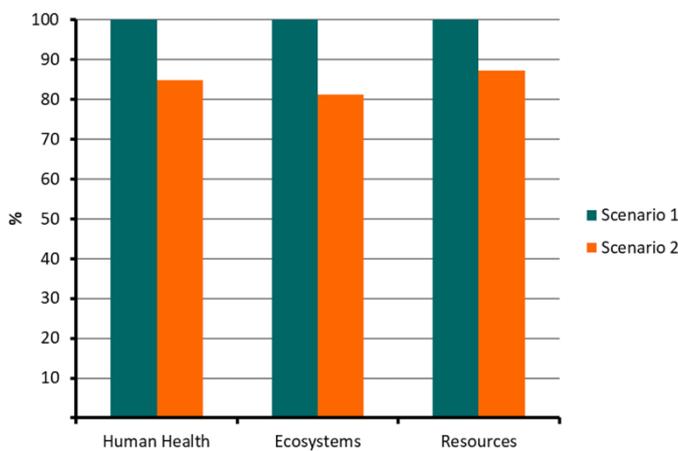


Abbildung 59. Vergleich der Schadensuntersuchung: italienische Fallstudie – Szenario 1 und 2. Methode: ReCiPe Endpoom (E) V. 1.13 / Europe ReCiPe E/A

Unter Verwendung der europäischen ReCiPe-Endpunkt-Methodik können 15 Jahre Betrieb des TheGreefa-Systems im italienischen Gewächshaus zu einer Verringerung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit um ca. 15 %, einer Verringerung um 13 % im Falle einer Erschöpfung der Ressourcen und einer Verringerung der Auswirkungen auf die Ökosysteme um ca. 19 % führen.

Auch in diesem Fall werden die Umweltauswirkungen hauptsächlich von der im Gewächshaus verbrauchten Energie in verschiedenen Formen – Strom und Wärme – dominiert.

In Bezug auf die CO₂-Einsparung wird die TheGreefa-Technologie es ermöglichen, in 15 Jahren Betriebszeit über 362 Tonnen CO₂-Emissionen von 1 ha des Gewächshauses einzusparen. Prozentual ergibt sich eine Reduzierung des Treibhauspotenzials um fast 13 %.

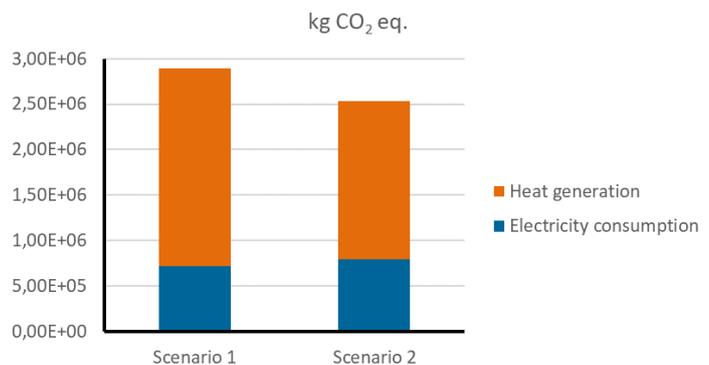


Abbildung 60. Global Warming Potenzial (GWP) der italienischen Fallstudie in beiden Szenarien.

4.2. Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftlichen Auswirkungen von TheGreefa wurden im Rahmen der technoökonomischen Bewertung des Raumklimakontrollsystems analysiert. Die Studie wurde in engem Zusammenhang mit der in Abschnitt 4.1 dargelegten Umweltprüfung durchgeführt. In der Wirtschaftsstudie wurden die gleichen Daten über den Energieverbrauch und die in den Gewächshäusern TheGreefa verbrauchten Brennstoffe verwendet, wobei zusätzlich auch Informationen über die Kosten im Zusammenhang mit Energie und Brennstoffen berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse der Studie sollten eine Schätzung des möglichen Zeitraums der Rentabilität der Investition für die Implementierung des TheGreefa-Systems sowie angemessene Kosten des Systems selbst sein, das eine akzeptable Kapitalrendite bietet. Ein weiteres Ergebnis der Analyse ist die Bewertung der Rentabilität der Implementierung des Systems in Gewächshäusern in verschiedenen Klimazonen.

Die Durchführung von Berechnungen für ein Gewächshaus für zwei Szenarien führt zu jährlichen Kosteneinsparungen eines Gewächshauses, wenn der Gewächshausbetrieb mit und ohne TheGreefa-System verglichen wird. Um die Gewächshäuser des Projekts zu vergleichen, wurden die gesammelten Daten für den Vergleich von 1 ha Fläche der Gewächshäuser verarbeitet.

Die Datenerhebung war für einen TheGreefa-Demonstrator – das Gewächshaus von Meyer Orchideen in der Schweiz – und eine Fallstudie – das Tomatengewächshaus von Sfera Agricola in Italien – verfügbar.

Kosteninputs für die wirtschaftliche Bewertung

Die für die Studie verwendeten Umweltdaten wurden bereits im vorherigen Abschnitt vorgestellt. Hier wurden die Kostendaten gesammelt.

Schweizer Gewächshaus

Die Wärmeenergie für das Gewächshaus wird von einem externen Unternehmen geliefert. Der Gewächshausbesitzer zahlt die Preise für die gelieferte Energie wie folgt: 96 €/MWh Wärme aus Öl und 45,12 €/MWh Wärme aus Holz. Die Stromkosten betragen 197,76 €/MWh.

Die für die Evaluierung gesammelten Daten sollten es ermöglichen, die wirtschaftlichen Auswirkungen zwischen dem 600 m² großen Gewächshaus, das ohne TheGreefa-System betrieben wird, und dem System, das in einer langfristigen Betriebsperiode implementiert wird, zu vergleichen. Die Analyse wurde sowohl für das 600 m² als auch für eine Referenzeinheit von 1 ha des analysierten Gewächshauses durchgeführt. Daher mussten die gesammelten Eingaben für 1 ha Fläche neu berechnet werden.

Die Investitionskosten für die Implementierung des Systems TheGreefa im Schweizer Gewächshaus beliefen sich auf 153 600 €. Wenn man diese Kosten in die Material- und Arbeitskosten aufschlüsselt, wird das Verhältnis auf 50/50 geschätzt. In der Schweiz betragen die in der Studie verwendeten Arbeitskosten 120 €/Stunde. Die Investitionskosten entsprechen der Implementierung des Systems in einem 600 m² großen Gewächshaus.

Tabelle 23. Saisonaler Input für das Schweizer Gewächshaus – 600 m².

	Standard Gewächshaus	Kosten	TheGreefa system	Kosten
Stromverbrauch (Pumpen, Ventilatoren und Wärmepumpe)	43,18 MWh	€8 539,02	39,95 MWh	€7 900,03
Ölverbrauch	1,35 MWh	€129,60	0,32 MWh	€30,72
Holzverbrauch	228,15 MWh	€10 294,13	54,08 MWh	€2 440,09

 Tabelle 24. Kosten für die Implementierung des Systems TheGreefa im 600 m² großen Schweizer Gewächshaus.

Materialkosten	€76 800,00
Arbeitskosten	€76 800,00
Gesamtinvestitionskosten	€153 600,00

Um die Ergebnisse der Studie mit dem 1 ha großen italienischen Gewächshaus vergleichen zu können, wurden wie bereits erwähnt, die Kosten und der Verbrauch von Energie und Brennstoffen für 1 Hektar berechnet. Dann belaufen sich die Investitionskosten auf 2 560 000 EUR.

Tabelle 25. Saisonaler Input für das Schweizer Gewächshaus – 1 ha.

	Standard Gewächshaus	Kosten	TheGreefa system	Kosten
Stromverbrauch (Pumpen, Ventilatoren und Wärmepumpe)	719,65 MWh	€142 317,98	665,79 MWh	€131 666,63
Ölverbrauch	22,50 MWh	€2 160,00	5,33 MWh	€511,68
Holzverbrauch	3 802,50 MWh	€171 568,80	901,33 MWh	€40 668,01

Tabelle 26. Geschätzte Kosten für die Implementierung des Systems TheGreefa im 1 Hektar großen Schweizer Gewächshaus.

Materialkosten	€1 280 000,00
Arbeitskosten	€1 280 000,00
Gesamtinvestitionskosten	€2 560 000,00

Italienisches Gewächshaus

Die Wärme im Gewächshaus wird durch Holz- und Ölkessel geliefert. Das System hat eine Leistung von 7 000 kW. Die wichtigsten Holzarten, die als Brennstoffe verwendet werden, sind Tanne, Kiefer, Steineiche und Kastanie. Der Ölverbrauch liegt bei ca. 600 l/h. Das Heizsystem verbraucht etwa 28 % des vom Gewächshaus verbrauchten Stroms, hauptsächlich für Zusatzgeräte wie Pumpen. Die Stückkosten für Energie und Brennstoffe, die von Sfera bereitgestellt werden, betragen: 0,22 € pro

1 kWh Strom, 1,05 € pro 1 l Öl und 75 € pro 1 t Holz. Die geschätzten jährlichen Kosten für den Transport von Kraftstoffen belaufen sich auf 5 000 EUR.

Tabelle 27. Saisonaler Input für das italienische Gewächshaus – 1 ha.

	Standard System	Kosten	TheGreefa System	Kosten
Elektrizität	90 330 kWh	€19 872.60	99 363 kWh	€21 859.86
Öl	34 350 l	€36 067.50	27 480 l	€28 854.00
Holz	631 t	€47 325.00	505 t	€37 860.00

Die Investitionskosten wurden auf der Grundlage der Kosten im Schweizer Gewächshaus geschätzt. Es wurde das gleiche Verhältnis von Material- und Arbeitskosten verwendet. Was die Arbeitskosten betrifft, so sind sie in Italien im Vergleich zur Schweiz günstiger und kosten 40 €/Stunde. Die Investitionskosten für ein 1 ha großes Schweizer Gewächshaus in Höhe von 2 560 000 € wurden als Berechnungsgrundlage herangezogen. Die Arbeitskosten betragen rund 426 600 EUR. Einschließlich des Materials beläuft sich der Gesamtwert der Investitionskosten für das italienische Gewächshaus auf 1 706 600 EUR.

Tabelle 28. Geschätzte Kosten für die Implementierung des Systems TheGreefa in einem italienischen Gewächshaus von 1 ha.

Materialkosten	€1 280 000.00
Arbeitskosten	€426 000.00
Gesamtinvestitionskosten	€1 706 600.00

Technoökonomische Bewertung

Um die technoökonomische Bewertung der Implementierung des TheGreefa-Systems durchführen zu können, wurden die beiden Gewächshäuser in zwei Szenarien analysiert:

- Standardsystem – Der Gewächshausbetrieb vor der Implementierung des TheGreefa-Systems.
- TheGreefa-System – Der Gewächshausbetrieb mit dem implementierten TheGreefa-Klimatisierungssystem.

Schweizer Gewächshaus

Die Simulation der Rentabilität des Investitionszeitraums wurde unter Berücksichtigung der jährlichen Kosten für den Betrieb des Gewächshauses (Energiesysteme) mit dem Standardsystem und mit dem TheGreefa-System berechnet. Die berechnete jährliche Kosteneinsparung beträgt 8 591,91 €. Auf der Grundlage der Simulation und unter Berücksichtigung der Investitionskosten von 153 600 EUR beträgt die Rentabilität des Investitionszeitraums 18 Jahre. Eine solche Zeitspanne ist akzeptabel und wird sowohl vom Eigentümer des Meyer-Gewächshauses als auch vom Schweizer Bundesamt für Energie, das an der Demonstration des Schweizer Gewächshauses mitwirkt, erwartet.

Der erzielte Zeitraum der Kapitalrendite ist für den Gewächshausbesitzer akzeptabel. In der Marktstudie des TheGreefa-Projekts wurde jedoch festgestellt, dass die am meisten erwartete und

akzeptable Zeit für die meisten Gewächshäuser 7-10 Jahre beträgt. In Abbildung 61 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt, wobei die Werte anderer Investitionskosten und deren Rentabilität der Investitionszeiträume überprüft wurden.



Abbildung 61. Simulation der Rentabilität der Investitionsdauer für unterschiedliche Investitionskosten – 600 m² Schweizer Gewächshaus.

Ziel ist es, herauszufinden, wie hoch die Investitionskosten sein sollten, um die erwähnte Spanne der erwarteten Zeit für die Anlagerendite zu erreichen. Der Anfangswert beträgt 153 600 € für einen Zeitraum von 18 Jahren. Durch eine Begrenzung der Kosten auf 110 000 EUR kann die Kapitalrendite in 13 Jahren erreicht werden. Allerdings wird die erwartete Zeit von 10 Jahren nur erreicht, wenn die Kosten fast doppelt so hoch sind wie der ursprüngliche Wert (85 000 EUR).

Zu Vergleichszwecken wurde die Simulation auch für 1 ha Schweizer Gewächshaus durchgeführt. Die geschätzten Investitionskosten für einen solchen Fall belaufen sich auf 2 560 000 EUR. In diesem Fall beträgt die Rentabilität der Investitionsdauer ebenfalls 18 Jahre.

Italienisches Gewächshaus

Die Simulation der Rentabilität des Investitionszeitraums wurde unter Berücksichtigung der jährlichen Kosten für den Betrieb des Gewächshauses (Energiesysteme) mit dem Standardsystem und mit dem TheGreefa-System berechnet. Die berechnete jährliche Kosteneinsparung beträgt 14 691,24 €. Auf der Grundlage der Simulation und unter Berücksichtigung der Investitionskosten von 1 706 600 EUR ergibt sich die Rentabilität des Investitionszeitraums über 100 Jahre. Ein so langer Zeitraum ist völlig inakzeptabel und im wirklichen Leben unerreichbar. Die lange Periode ist auf die verhältnismäßig geringen Kosteneinsparungen im Vergleich zu dem zuvor analysierten Schweizer Gewächshaus zurückzuführen. Im Falle des Raumklimaregelungssystems für Gewächshäuser im Projekt TheGreefa zielt es darauf ab, die Wärmeverluste zu reduzieren und den Strom- und Brennstoffverbrauch für die Bereitstellung des Wärmebedarfs des Gewächshauses zu reduzieren. Je höher der Wärmebedarf des Gewächshauses ist, desto höher sind die Einsparungen, die sich aus der Systemimplementierung ergeben. Bei der Analyse von Schweizer und italienischen Gewächshäusern wurde festgestellt, dass der Wärmebedarf des italienischen Gehäuses um 10 % niedriger ist als des schweizerischen Gehäuses. Der Unterschied entsteht durch die Lage in verschiedenen Klimazonen. Der Anteil ist auch sichtbar, wenn man die Kosteneinsparungen

vergleicht. Für 1 ha Gewächshaus in der Schweiz beträgt die Kosteneinsparung 143 200,46 € pro Jahr, während sie für 1 ha italienisches Gewächshaus nur 14 691,24 € beträgt.

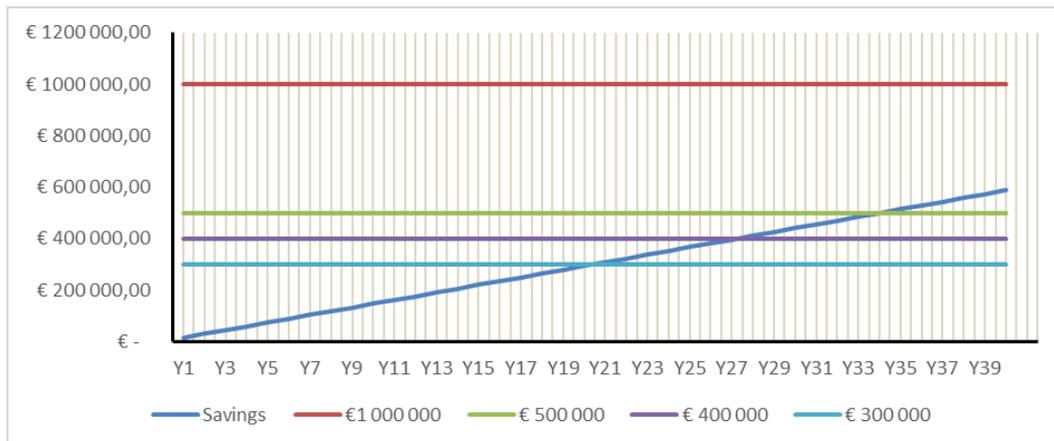


Abbildung 62. Simulation der Rentabilität des Investitionszeitraums für unterschiedliche Investitionskosten – 1 ha italienisches Gewächshaus.

Die Simulation wurde auch durchgeführt, um zu sehen, wie hoch die Kosten des Systems sein sollten, um einen vergleichbaren Return of Investment-Zeitraum wie das Schweizer Gewächshaus zu erzielen. Die in Abbildung 62 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der Zeitraum der Investition nur dann 21 Jahre beträgt, wenn die Kosten für die Implementierung des Systems 300 000 EUR betragen. Derzeit ist es jedoch nicht möglich, solche Kosten für ein Gewächshaus von 1 ha zu erreichen.

4.3. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorgestellten Lebenszyklusanalyse (LCA) haben gezeigt, dass der Einsatz der neuen TheGreefa-Technologie in Gewächshäusern zu einer sichtbaren Verringerung der Umweltauswirkungen des Gewächshausbetriebs beiträgt. Das Heizen, Kühlen und die Feuchteregelung sind sehr energieintensive Prozesse im Gewächshausbetrieb. Die Wärmeerzeugung und der Stromverbrauch sind für den Großteil der Umweltbelastungen verantwortlich. Daher ist die Umsetzung von Verbesserungen in diesen Aspekten die richtige Entscheidung, die dazu beitragen kann, die EU-Klimaziele durch eine Reduzierung des Verbrauchs von Strom und natürlichen Ressourcen zu erreichen.

Neben geringeren Treibhausgasemissionen (CO₂-Einsparungen) sind nicht die einzigen Vorteile der Implementierung des TheGreefa-Systems. Sie sind verantwortlich für den Klimawandel. Es gibt aber auch andere Aspekte, bei denen TheGreefa langfristig Verbesserungen bringt. Durch eine starke Reduzierung von Faktoren wie Humantoxizität oder photochemischem Oxidationspotenzial kann der Einsatz des neuen Systems zu einer Verringerung der negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit um 20 % bis über 50 % führen.

Der Verbrauch von Ressourcen wie Holz und Öl oder sogar Erdgas ist geringer, kann aber weiter gesenkt werden, wenn mehr erneuerbare Energiequellen in die Energiesysteme der Gewächshäuser integriert werden – Wärmepumpen, Geothermie und andere.

Die technoökonomische Evaluierung lieferte vielversprechende Ergebnisse im Falle des Schweizer Gewächshauses des Projekts TheGreefa, das sich im mittellkontinentalen Klima befindet. Die Investitionskosten für die Implementierung der Projekttechnologie ergeben eine geschätzte

Rentabilität der Investitionsdauer von 18 Jahren. Wenn die Kosten für die Implementierung des TheGreefa-Systems fast halb niedriger wären (85 000 € für 600 m² Gewächshaus und 1 416 000 € für 1 ha Gewächshaus), könnte dies zu einer Rentabilität der Investition von 10 Jahren oder weniger führen.

Was das italienische Gewächshaus betrifft, so hat die Studie gezeigt, dass das TheGreefa-System mit seinen derzeitigen Kosten keine akzeptable Amortisationszeit bieten kann. Der Wärmebedarf im Gewächshaus ist zu gering, um die Kosteneinsparungen zu verursachen, die die Kosten für die Implementierung des neuen Systems decken können.

Da das TheGreefa-System noch nicht bereit ist, als Produkt auf den Markt zu kommen, besteht immer noch eine Chance, und es wird versucht, die Kosten des Systems zu senken. Es sollte auch in Erwägung gezogen werden, mögliche Einschränkungen in Bezug auf die Anforderungen der Gewächshäuser, in denen das System implementiert werden könnte, zu analysieren. Zunächst sollte der Wärmebedarf des Gewächshauses analysiert werden. Die Studie des Schweizer Gewächshauses kann dann als Grundlage für die Klassifizierung möglicher Umsetzungsoptionen verwendet werden.

5. Soziale Aspekte und Richtlinien

Unter Berücksichtigung des Anwendungsbereichs und der Vorteile der im Projekt vorgeschlagenen Technologie müssen die Politikempfehlungen auf der Überprüfung von fünf grundlegenden Bereichen basieren: Landwirtschaft, Energie, Wasser, Chemikalien und Lebensmittelsicherheit. In dieser Präsentation werden wir die wichtigsten strategischen und regulatorischen Dokumente in jedem dieser Bereiche auf europäischer Ebene sehen und dann auf dieser Grundlage einige politische Empfehlungen identifizieren, die unserer Meinung nach den Einsatz der vorgeschlagenen Technologie erleichtern könnten.

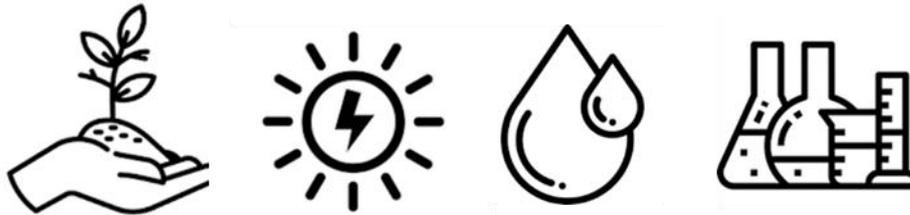


Abbildung 63. Wichtigste Bereiche für die Überprüfung der Politik – Landwirtschaft, Energie, Wasser und Chemikalien.

5.1. Europäischer strategischer Rahmen für die Landwirtschaft

Der Klimawandel und die Umweltzerstörung sind eine existenzielle Bedrohung für Europa und die Welt. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, zielt der europäische Grüne Deal darauf ab, die EU in eine moderne, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft umzuwandeln, die sicherstellt, dass bis 2050 keine Nettotreibhausgasemissionen mehr ausgestoßen werden, das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt ist und keine Menschen und kein Ort zurückgelassen werden.

Die Strategie "Vom Hof auf den Tisch" ist das Herzstück des europäischen Grünen Deals, der darauf abzielt, Lebensmittelsysteme fair, gesund und umweltfreundlich zu gestalten. Es fördert ein nachhaltigeres Lebensmittelsystem und es gehört zu seinen Hauptzielen, dass genügend Lebensmittel erschwinglich und nahrhaft sind, ohne die Grenzen des Planeten zu überschreiten.

Es wird ein Vorschlag für einen Rechtsrahmen für nachhaltige Lebensmittelsysteme vorgelegt, um die Umsetzung der Strategie und die Entwicklung einer nachhaltigen Lebensmittelpolitik zu unterstützen.

Die GAP 2023-27 ist am 1. Januar 2023 in Kraft getreten. Die genehmigten Pläne sollen einen wesentlichen Beitrag zu den Zielen des europäischen Grünen Deals, der Strategie "Vom Hof auf den Tisch" und der Biodiversitätsstrategie leisten, indem sie die Modernisierung der Landwirtschaft durch die Entwicklung nachhaltigerer landwirtschaftlicher Verfahren bei gleichzeitigem Schutz der Natur und der Bekämpfung des Klimawandels ermöglichen.

Zu den Instrumenten, mit denen nachhaltige landwirtschaftliche Verfahren in der gesamten EU weiter gefördert werden, gehört die Konditionalität, die flächenbezogene und tierbezogene GAP-Zahlungen an eine Reihe von Verpflichtungen knüpft. Darüber hinaus werden die neuen Öko-Regelungen eingeführt, mit denen Landwirte dafür belohnt werden sollen, dass sie bei der Umsetzung nachhaltiger landwirtschaftlicher Verfahren weiter vorgehen. Zu diesen Praktiken könnte die Umsetzung umweltfreundlicher Produktionssysteme wie Agrarökologie, Agroforstwirtschaft und ökologischer Landbau gehören. Der Rahmen für die Entwicklung des ländlichen Raums umfasst auch Verpflichtungen zum Umwelt- und Klimamanagement, die darauf

abzielen, Landwirte und andere Begünstigte dafür zu entschädigen, dass sie sich freiwillig zur Umsetzung nachhaltiger Verfahren verpflichten.

5.2. Europäischer Rechtsrahmen im Energiebereich

Mit der Richtlinie 2023/1791 werden die Ambitionen der EU in Bezug auf die Energieeffizienz deutlich angehoben und die EU-Länder verpflichtet, gemeinsam eine zusätzliche Senkung des Energieverbrauchs um 11,7 % bis 2030 im Vergleich zu den Projektionen des Referenzszenarios 2020 sicherzustellen.

Außerdem erhält der Grundsatz "Energieeffizienz an erster Stelle" zum ersten Mal Rechtsbestand, so dass er von den EU-Ländern bei allen einschlägigen politischen und wichtigen Investitionsentscheidungen im Energie- und Nichtenergiesektor berücksichtigt werden muss. Das ehrgeizigere Ziel erfordert in der Tat eine stärkere Förderung kostenwirksamer Energieeffizienzmaßnahmen in allen Bereichen des Energiesystems und in allen relevanten Sektoren, in denen sich die Tätigkeit auf die Energienachfrage auswirkt, wie z. B. in der Landwirtschaft.

Darüber hinaus müssen die EU-Länder im Rahmen dieser überarbeiteten Richtlinie ein angemessenes Kompetenzniveau für Fachleute im Bereich der Energieeffizienz sicherstellen, sie an die Marktbedürfnisse anpassen und klarere und strengere Anforderungen an die erforderlichen Kompetenzen durchsetzen. Dazu gehören Energiedienstleister, Energieauditoren, Energiemanager und Installateure.

Mit der Verordnung (EU) 2017/1369 wird ein Rahmen für energieverbrauchsrelevante Produkte oder Systeme festgelegt, die in Verkehr gebracht oder in Betrieb genommen werden. Sie sieht ihre Kennzeichnung und die Bereitstellung von Standardinformationen über die Energieeffizienz, den Verbrauch von Energie und anderen Ressourcen während des Gebrauchs sowie zusätzliche Informationen vor, damit die Kunden effizientere Produkte wählen können, um ihren Energieverbrauch zu senken. In Artikel 7 Absatz 2 des Gesetzes ist festgelegt, dass die Mitgliedstaaten, wenn sie Anreize für ein Produkt schaffen, die höchsten Energieeffizienzklassen anstreben.

Mit der neuen Richtlinie über erneuerbare Energien wird der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch der EU bis 2030 auf 42,5 % erhöht, mit einer zusätzlichen indikativen Aufstockung um 2,5 %, damit das Ziel von 45 % erreicht werden kann. Jeder Mitgliedstaat wird zu diesem gemeinsamen Ziel beitragen.

Zu erwähnen ist schließlich die Empfehlung der Europäischen Kommission vom 14. März 2023 zur Energiespeicherung – Grundlage für ein dekarbonisiertes und sicheres Energiesystem in der EU (2023/C 103/01), die eine Liste von Empfehlungen enthält, um einen stärkeren Einsatz von Energiespeichern zu gewährleisten.

5.3. Europäischer Rechtsrahmen für Wasser

In der Wasserrahmenrichtlinie wird anerkannt, dass die Gewässer in der Gemeinschaft durch die ständig wachsende Nachfrage zunehmend unter Druck geraten und dass der Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung der Gewässer stärker in die Politikbereiche der Gemeinschaft wie die

Landwirtschaft integriert werden müssen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren fördert sie eine nachhaltige Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes der verfügbaren Wasserressourcen.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist der hydrologische Planungsprozess von entscheidender Bedeutung, der auf der integrierten Planung des Wasserressourcenmanagements nach Einzugsgebieten oder hydrographischen Bezirken basiert. Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass für jede Flussgebietseinheit, die vollständig in ihrem Hoheitsgebiet liegt, ein Bewirtschaftungsplan für die Einzugsgebiete erstellt wird, und er muss die Erreichung der Umweltziele für die Wasserkörper und die mit ihnen verbundenen Ökosysteme unter Berücksichtigung der Nachfrage der verschiedenen Wassernutzungen sowohl in ausreichender Menge als auch in ausreichender Qualität in Einklang bringen.

Außerdem muss ein Maßnahmenprogramm aufgestellt werden, um die Umweltziele zu erreichen, und die Mitgliedstaaten können darin Maßnahmen zur Nachfragesteuerung vorsehen, unter anderem die Förderung einer angepassten landwirtschaftlichen Produktion, wie z. B. wasserarme Kulturen in den von Dürre betroffenen Gebieten

Auf der anderen Seite müssen wir uns auf die Wirtschafts- und Finanzregelung für Wasser beziehen, die auf dem in der WRRL verankerten Grundsatz der Kostendeckung beruht (= die Kosten für Investitionen, die von der öffentlichen Hand getätigt werden, um die Bereitstellung von Wasser durch den Einzelnen zu ermöglichen, werden durch die Zahlung für die Nutzung des Wassers durch die verschiedenen Endverbraucher gedeckt). Die Anwendung dieses Grundsatzes muss in einer Weise erfolgen, die die effiziente Nutzung des Wassers fördert und trägt daher zu den verfolgten Umweltzielen bei, indem die verschiedenen Verwendungszwecke im Einklang mit dem Verursacherprinzip und zumindest unter Berücksichtigung der Versorgungs-, landwirtschaftlichen und industriellen Nutzungen einen angemessenen Beitrag leisten. Nach diesem Grundsatz müssen die zuständigen öffentlichen Verwaltungen Mechanismen für die Kostenabwälzung einrichten, zu denen in der Regel Prämien für die landwirtschaftliche Nutzung gehören, wenn die Anwendung der guten landwirtschaftlichen Praxis nachgewiesen wird.

5.4. Europäischer Rechtsrahmen für Chemikalien

Die REACH- und CLP-Verordnungen betreffen alle Unternehmen, die im Rahmen ihrer industriellen oder beruflichen Tätigkeit Chemikalien verwenden (nachgeschaltete Anwender), nicht nur diejenigen, die Chemikalien herstellen oder importieren.

Nach diesen Vorschriften ist Magnesiumchlorid ein Gemisch, das nicht als gefährlich eingestuft ist, aber wir können die folgenden Hauptverpflichtungen für die Verwendung von Magnesiumchlorid im professionellen Gewächshausanbau identifizieren:

- Das Gemisch nur in Übereinstimmung mit den Risikokontrollmaßnahmen zu verwenden, die mit den von der Lieferkette erhaltenen Informationen bereitgestellt werden
- Um sicherzustellen, dass die Arbeitnehmer angemessene Informationen über das Gemisch erhalten

5.5. Schlussfolgerungen

Wie wir durch die von uns durchgeführte Analyse überprüfen konnten, ist die vorgeschlagene Technologie eng mit den strategischen Empfehlungen und den Vorschriften abgestimmt, die die vom Projekt betroffenen Bereiche regeln.

Nichtsdestotrotz können wir die folgenden politischen Empfehlungen identifizieren, um den Einsatz der im Projekt vorgeschlagenen Technologie zu erleichtern:

1. Um sicherzustellen, dass Fachleute, die sich mit Energieeffizienz befassen, die vorgeschlagene Technologie kennen und die Vorteile verstehen, die sie in Bezug auf die Energieeffizienz bietet, im Einklang mit dem neuen Mandat der Richtlinie (EU) 2023/1791 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über Energieeffizienz, um ein angemessenes Kompetenzniveau für Fachleute im Zusammenhang mit Energieeffizienz zu gewährleisten.
2. Den Erlass eines delegierten Rechtsakts durch die Kommission gemäß Artikel 17 der Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2017 zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung zur Ergänzung dieser Verordnung durch die Festlegung detaillierter Anforderungen an die Kennzeichnung der vorgeschlagenen Technologie, damit die Mitgliedstaaten gemäß Artikel 7.2 Anreize dafür schaffen können.
3. In den von Dürre betroffenen Flussgebietsgebieten Einbeziehung der Mitgliedstaaten in das Maßnahmenprogramm zur Förderung von Kulturen, die wenig Wasser benötigen.
4. Berücksichtigung der vorgeschlagenen Technologie durch die zuständigen Behörden als gute landwirtschaftliche Praxis, die einen Bonus im wirtschaftlichen und finanziellen Wasserhaushalt verdient.
5. Schulung der Arbeiter in der sicheren Anwendung von Magnesiumchlorid.

References

Website und Soziale Networks



<https://thegreefa.eu>



<https://x.com/TheGreefa>



<https://www.linkedin.com/company/thegreefa/>



<https://www.youtube.com/@thegreefaprojekt>



https://zenodo.org/communities/thegreefa_h2020_project/



https://explore.openaire.eu/search/project?projectId=corda_h2020::0172da9ca5a679fbb4d0a5f045bd5029

TheGreefa Partner und weitere Beteiligte

Zürich University
of Applied Sciences



School of
Engineering

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering

ZHAW

**Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften – Institut
für Energiesysteme und Fluidtechnik**

Serena Danesi – Projekt Koordinatorin

serena.danesi@zhaw.ch

Raphael Baumann

baap@zhaw.ch



WATERGY

Watergy GmbH

Martin Buchholz

martin.buchholz@watergy.de



TUB

Technische Universität Berlin

Reiner Buchholz

reiner.buchholz@tu-berlin.de



INRGREF

**National research Institute of rural engineering, Water and
Forests**

Thameur Chaibi

thameurchaibi@gmail.com

Meriem Soussi

soussi.meriem@gmail.com



SFERA

Sfera società agricola srl

Claudio La Carbonara

claudio.lacarbonara@sferaagricola.it



Hyperborea

HYPERBOREA

Hyperborea Srl

Norma Zanetti

n.zanetti@hyperborea.com

**MEYER*****Meyer Orchideen AG***

Hanspeter Meyer

hanspeter.meyer@swissorchid.ch**STRANE*****STRANE INNOVATION SA***

Raphaël Hercelin

raphael.hercelin@strane-innovation.com

Nathalie Vallee

nathalie.vallee@strane-innovation.com**IZNAB*****IZNAB SPOLKA Z OGRANICZONA ODPOWIEDZIALNOSCIA***

Jakub Pluta

jakub.pluta@iznab.pl**UAL*****Universidad de Almería***

Francisco Domingo Molina Aiz

fmolina@ual.es**MAS*****Moragues and Scade Abogados***

Juan Luis Moragues

jlm@mas-abogados.com

Begoña Benito

bbg@grupomas.net**LUH*****Leibniz Universität Hannover***

Philipp Geyer

philipp.geyer@iek.uni-hannover.de



www.thegreefa.eu



"Dieses Projekt wurde im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 101000801 gefördert."