

BBSR-
Online-Publikation
53/2024

OpEn Farming

Ganzheitliche Optimierung des Energiesystems Vertical
Farming durch Integration in Kreislaufwirtschaft

von

Prof. Dr. Thomas Hamacher
Seyedeh Nashmin Elyasi
Smajil Halilovic
Heinrich Kleeberger
Dr. Petra Liedl
Prof. Dr. Heike Susanne Mempel
Sabine Wittmann
Jasper den Besten
Vivek Jadhav

OpEn Farming

Ganzheitliche Optimierung des Energiesystems Vertical Farming durch
Integration in Kreislaufwirtschaft

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.28

Projektlaufzeit: 11.2022 bis 12.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Verena Kluth
verena.kluth@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)
Prof. Dr. Thomas Hamacher (Projektleitung)

Seyedeh Nashmin Elyasi
nashmin.elyasi@tum.de

Smajil Halilovic
smajil.halilovic@tum.de

Heinrich Kleeberger
hkleee@tum.de

Dr. Petra Liedl
petra.liedl@oth-regensburg.de

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Technik im Gartenbau und Qualitätsmanagement
Prof. Dr. Heike Susanne Mempel

Sabine Wittmann
sabine.wittmann@hswt.de

HAS University, The Netherlands
Jasper den Besten
denbestenadvies@gmail.com

Precede, Singapur
Vivek Jadhav
vivek.jadhav@precede.com.sg

Redaktion

Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)

Stand

Januar 2024

Gestaltung

Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)

Bildnachweis

Titelbild: University of Arkansas System Division of Agriculture (Arkansas Agricultural Experiment Station, 80 Acre Farms)
Heinrich Kleeberger: S. 19, 20, 24
Sabine Wittmann: S. 28

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Hamacher, Thomas; Elyasi, Seyedeh Nashmin; Halilovic, Smajil; Kleeberger, Heinrich; Liedl, Petra; Mempel, Heike Susanne; Wittmann, Sabine; den Besten, Jasper; Jadhav, Vivek, 2024: OpEn Farming: Ganzheitliche Optimierung des Energiesystems Vertical Farming durch Integration in Kreislaufwirtschaft. BBSR-Online-Publikation 53/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
Einführung	10
Themenfeld	10
Untersuchungsgegenstand	10
Problemstellung	11
Stand der Forschung	11
Forschungslücke	11
Zielstellung	12
Konkrete Projektziele	12
Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	12
Forschungsdesign	14
Arbeitshypothesen	14
Methodischer Ansatz	14
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	15
Arbeitspakete und Meilensteine	15
Projektverlauf	17
Schwerpunkt Beleuchtung und Klimatisierung	17
Optimierungsebene 1 (Pflanzenebene)	18
<i>Beleuchtung</i>	19
<i>Klimatisierung</i>	24
Optimierungsebene 2 (Systemdesign-Ebene)	27
<i>Experimente zum Salatanbau</i>	27
Schwerpunkt Gebäudekonzept	29
Nicht-automatisierte Farm	29
Automatisierte Farm	31
Energietechnische Gebäudesimulation und -optimierung	33
Lebenszyklusanalyse von Vertical Farming	39
Umweltauswirkungen von Vertical Farming: Status quo	39
Lebenszyklus-Auswirkungsbewertung (Status quo)	40
Kreislaufwirtschaft im Kontext des Vertical Farming (Literatur)	45
Umweltkompromisse des Vertical Farming mit Gewächshäusern und Freilandanbau	45
Ökobilanz der „BrightBox“ in Venlo (Niederlande)	46
Szenarioanalyse: Strombeschaffung	50
Beschreibung und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	56
Fazit	58
Weiterer Forschungsbedarf	59
Mitwirkende	60
Literaturverzeichnis	61
Abbildungsverzeichnis	64

Tabellenverzeichnis

66

Anlagen

67

Kurzfassung

Vertical Farming (VF) erlaubt die Produktion von Lebensmitteln mit einer ganzjährig gleichbleibenden Qualität in einem hoch technisierten Umfeld nahe am Verbraucher. Es hat das Potential, v.a. in Ballungszentren eine Schlüsseltechnologie zu werden, um eine nachhaltige Ernährungssicherung in Zeiten von urbanem Bevölkerungswachstum, Klimawandel und Wasserknappheit sicherzustellen. Die Vorteile liegen in der Witterungsunabhängigkeit, den kontrollierten Bedingungen mit optimiertem Wasser- und Düngemiteleinsatz sowie der mehrfachen Ausnutzung der Bodenfläche. Die Lichtnutzungs-Energieeffizienz (MJ/kg Trockengewicht) ist auch den effizientesten Gewächshäusern überlegen. Allerdings werden VF-Konzepte bezogen auf eine nachhaltige Produktionsweise kontrovers diskutiert. Der Energiebedarf und die Kosten für Beleuchtung u. Klimatisierung können nicht mit traditioneller Landwirtschaft bzw. mit Gewächshäusern konkurrieren. Hohe Investitions- und Betriebskosten stehen einer Umsetzung in großem Maßstab entgegen. Die Umweltauswirkungen sind durch den hohen Energieverbrauch und bei herkömmlicher Energieversorgung zu groß.

Im Forschungsprojekt wird VF als ganzheitliches System betrachtet mit dem Ziel, ein optimiertes Gebäude-, Technik- sowie Energiekonzept zu entwickeln, das die Synergien mit der Produktion von Lebensmitteln aufzeigt und die Umweltauswirkungen so weit möglich reduziert. Basierend auf einem Gebäudemodell für VF wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die thermodynamischen Interaktionen zwischen Pflanze und Gebäude detailliert darstellt und in allen Produktionsstufen die Parameter Licht, Temperierung, Lüftung, Bewässerung und Nährstoffe energetisch bewertet. Ziel war es, Synergien zu erkennen und das Gesamtsystem VF energetisch zu optimieren. Dies erfolgt auf Basis realer Daten der Indoor Farmen der Partner und unter Berücksichtigung der optimalen Verhältnisse für die Pflanzen. VF kann nur dann nachhaltig sein, wenn der hohe Energieverbrauch gesenkt, die Versorgung mit regenerativer Energie erfolgt und die Integration in eine geschlossene Kreislaufwirtschaft gelingt.

Zentrale Forschungsfragen waren:

- Wieweit lässt sich durch einen optimierten Gebäudeentwurf und die Aktivierung von Synergieeffekten zwischen den Einzelparametern der Energiebedarf von VF reduzieren? Randbedingungen sind dabei ein hoher Ertrag sowie ökonomische Vorgaben.
- Können durch eine geschlossene Kreislaufwirtschaft die Treibhausgase so weit gesenkt werden, dass VF das Potential eines nachhaltigen Systems zur urbanen Lebensmittelproduktion hat?

Um diese zentralen Forschungsfragen zu beantworten, wurden im Rahmen des Projekts verschiedene neue Ansätze entwickelt und angewendet. Diese Ansätze lassen sich in drei Analyse- und Optimierungsbereiche einteilen:

- Pflanzenebene,
- Systemdesign-Ebene (VF Gebäude) und
- Ebene des integrierten Systems

Auf der Pflanzenebene wurden neue Ansätze zur Optimierung von Beleuchtungs- und Klimatisierungssystemen entwickelt, um ideale Wachstumsbedingungen für Pflanzen zu schaffen. Dies bedeutet, dass die Pflanzen optimale Lichtverhältnisse und Klimaparameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt vorfinden müssen. Darüber hinaus ist es wichtig, einheitliche Bedingungen für alle Pflanzen in einem Anbaugbiet zu schaffen, um den gleichen Ertrag und die gleiche Qualität der Pflanzen zu erzielen.

Auf der Ebene des Systemdesigns wurden die Systemkomponenten optimiert, um den Energiebedarf (Kosten) zu minimieren und gleichzeitig den Ertrag zu maximieren. Dazu wurde ein neuartiger Optimierungsansatz entwickelt und genutzt, um die vorhandene Flexibilität der Pflanzen in Bezug auf die Umweltbedingungen auszunutzen. Darüber hinaus wurden in diesem Bereich optimierte Gebäudekonzepte, wie z.B. die Auswahl

von Materialien und Wandstärken, entwickelt, um den Gesamtenergiebedarf zu reduzieren. So konnte beispielsweise gezeigt werden, wie Synergien zwischen Anbauflächen und Büroflächen zur Reduktion des Energieverbrauchs einem VF-System genutzt werden können.

Auf der Ebene des integrierten Systems wurden externe Faktoren und Systeme für die Optimierung des VF-Systems betrachtet. Dazu gehören insbesondere Verbindungen zu anderen Systemen, wie sie in Modellen der Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden, sowie weitere Faktoren wie Strompreis oder Strommix.

Schließlich wurde eine Ökobilanz (LCA) im Kontext VF durchgeführt, wofür ein vierstufiger Prozess verfolgt wurde:

1. Der Status quo der Umweltbelastungen durch VF wurde durch Literaturrecherche ermittelt;
2. Die Ökobilanz wurde für eine reale Fallstudie im niederländischen Venlo durchgeführt;
3. Die Umweltauswirkungen des VF wurden mit einer Ökobilanz für Gewächshaus und Freiland verglichen;
4. Das Szenario der Kreislaufwirtschaft und die damit verbundenen Umweltauswirkungen wurden im Zusammenhang mit VF bewertet.

Abstract

Vertical farming (VF) allows the production of food with a consistent quality throughout the year and close to the consumer. It has the potential to become a key technology, especially in urban areas, to ensure sustainable food security in times of urban population growth, climate change and water scarcity. The advantages are weather independence, controlled conditions with optimized water and fertilizer use, and multiple utilization of the land area. Light use energy efficiency (MJ/kg dry weight) is superior to even the most efficient greenhouses. However, Vertical Farming concepts are controversial in terms of sustainable production. The energy demand and the costs for lighting and air conditioning cannot compete with traditional agriculture or greenhouses. High investment and operating costs stand in the way of large-scale implementation. The environmental impact is high due to the high energy consumption and conventional energy supply.

In the research project, Vertical Farming is considered as a holistic system with the aim of developing an optimized building, technology as well as energy concept that shows the synergies with the production of food and reduces the environmental impact as far as possible. Based on a building model for Vertical Farming, a simulation model has been developed, which shows in detail the thermodynamic interactions between plant and building and evaluates energetically the parameters light, tempering, ventilation, irrigation and nutrients in all production stages. The aim was to identify synergies between them and to optimize the overall VF system in terms of energy. This is done on the basis of real data from the partners' indoor farms and taking into account the optimal conditions for the plants. VF can only be sustainable if the high energy consumption is reduced, renewable energy is supplied and integration into a circular economy is successful.

Central research questions are:

- To what extent can an optimized building design and the activation of synergy effects between the individual parameters reduce the energy demand of VF? Boundary conditions are a high yield as well as economic constraints.
- Can a circular economy reduce greenhouse gases to the point where VF has the potential to be a sustainable system for urban food production?

To answer these two central research questions, several new approaches have been developed and applied within the project. These approaches can be divided into three levels of analysis and optimization:

- Plant level,
- System design level (VF building), and
- Integrated system level.

At the plant level, new approaches have been developed to optimize lighting and air conditioning systems to provide ideal growing conditions for plants. This means ensuring that plants have optimal lighting conditions and climate parameters such as air temperature, humidity, air velocity, and CO₂ levels. In addition, it is important to create uniform conditions for all plants in a cultivation area in order to achieve the same yield and quality of the plants.

At the system design level, system components are optimized to minimize energy demand (cost) while maximizing yield. Therefore, a novel optimization approach is developed and used to exploit the existing flexibility of the plants with respect to environmental conditions. In addition, optimized building concepts, such as the selection of materials and wall thicknesses, are developed at this level to reduce the overall energy demand. For example, it has been shown that synergies between cultivation areas and office spaces in a VF system can be used to reduce energy requirements.

At the integrated system level, external factors and systems are considered for the optimization of the Vertical Farming system. These include, in particular, combinations with other systems, as considered in the circular economy models, as well as factors such as the electricity market price or the energy mix.

Finally, Life cycle assessment (LCA) is implemented in the context of Vertical Farming for which a four-step process was followed:

1. The status quo of the environmental burdens of Vertical Farming was identified by literature review;
2. LCA was implemented for a real case study in Netherlands Venlo;
3. Environmental impacts of Vertical Farming were compared with LCA implementation for greenhouse and Open field;
4. Circular economy scenario and its associated environmental impacts was evaluated in the context of Vertical Farming.

Einführung

Themenfeld

Die Bereitstellung von ausreichend Nahrungsmitteln für eine ständig wachsende Bevölkerung ist schon immer ein wichtiges Thema gewesen, insbesondere wenn es darum geht, den Nahrungsmittelbedarf der künftigen Generation zu sichern. In der Tat wächst die Weltbevölkerung schnell, und damit steigt auch der Druck auf die verfügbaren natürlichen Ressourcen (Orsini et al. 2020). So führt beispielsweise die zunehmende Verstädterung dazu, dass immer weniger landwirtschaftliche Flächen zur Verfügung stehen (Chen et al. 2018). Gleichzeitig verschärft Wassermangel und die Verfügbarkeit von Mineraldünger das Problem der Nahrungsmittelknappheit für die zukünftige Bevölkerung (Sardans und Peñuelas 2015). Um dieses Problem anzugehen, hat sich der landwirtschaftliche Sektor dramatisch verändert. Für die Steigerung des Ertrags wurden erhebliche Verbesserungen vorgenommen. So hat beispielsweise die automatisierte und hochtechnisierte Mechanisierung der Landwirtschaft die Produktionsrate auf den landwirtschaftlichen Flächen bis zu einem gewissen Grad verbessert. Bei den derzeitigen technologischen Entwicklungen ist jedoch eine Vervielfachung der Flächenproduktivität in offenen Landwirtschaftsbetrieben mit konventionellen Anbaumethoden nicht zu erreichen. Dementsprechend wird eine erhebliche Steigerung der Produktausbeute nur möglich sein, wenn entweder die landwirtschaftliche Fläche vergrößert oder die dritte vertikale Dimension erschlossen wird (Martin und Molin 2018).

Die Nutzung der dritten Dimension in der Landwirtschaft bedeutet, dass Pflanzen übereinandergestapelt werden, um die Produktivität auf der gleichen Fläche zu vervielfachen. Bei dieser Form der Landwirtschaft, die als vertikale Landwirtschaft (**Vertical Farming - VF**) oder Pflanzenfabrik bezeichnet wird, erfolgt die Pflanzenproduktion in einem geschlossenen System, in dem die Umweltfaktoren (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Licht und CO₂) vollständig kontrolliert werden (Toyoki Kozai und Genhua Niu 2016). Abgesehen von der höheren Produktivität könnte die vertikale Landwirtschaft die Transportentfernung zwischen dem Bauernhof und dem Einzelhandelsmarkt erheblich verringern, da sie in der Regel in städtischen Gebieten aufgebaut wird und die Verbraucher somit Zugang zu landwirtschaftlichen Erzeugnissen in ihrer Nähe haben. Darüber hinaus könnte der Anbau landwirtschaftlicher Erzeugnisse in einer kontrollierten und geschützten Umgebung den Verbrauch von Düngemitteln und den Einsatz von Pestiziden verringern (Pennisi et al. 2019; Kozai et al. 2019).

Im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft erfordert der Aufbau einer neuen vertikalen Farm jedoch eine Reihe von vorgelagerten Prozessen, um optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum zu schaffen. Zum Beispiel gibt es eine Reihe von Materialien, die für den Aufbau einer neuen vertikalen Farm verwendet werden sollten, darunter Beton, Stahl und Kunststoff für das Hauptfundament, die Gestelle und die Anzuchtschalen. Außerdem wird während des Anbauzyklus eine große Menge an Energie benötigt, um eine vollständig kontrollierte Umgebung in Bezug auf Beleuchtung und Klimabedingungen zu schaffen. Daher ist die Ermittlung der Umweltauswirkungen einer vertikalen Farm über ihre gesamte Lieferkette hinweg von größter Bedeutung, um ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu anderen Methoden der Lebensmittelproduktion zu bestimmen.

Untersuchungsgegenstand

VF-Konzepte werden kontrovers diskutiert, da der Energiebedarf und die Kosten für Beleuchtung und Klimatisierung derzeit noch nicht mit traditioneller Landwirtschaft bzw. Gewächshäusern konkurrieren können. Die Idee des Forschungsprojekts bestand darin, VF als ganzheitliches System zu betrachten und dafür ein optimiertes Gebäude-, Technik- und Energiekonzept zu entwickeln, das die Synergien mit der Lebensmittelproduktion ausnutzt und die Umweltauswirkungen sowie den Energiebedarf so weit wie möglich reduziert.

Problemstellung

Stand der Forschung

VF hat das Potential, in urbanen Gebieten einen großen Beitrag zu einer Lebensmittelversorgung zu leisten, die gegenüber herkömmlichen Anbaumethoden ökologische, soziale und ökonomische Vorteile bietet (Specht et al. 2014). Vogel (2008) nennt VF die „high tech answer to local Food movements“. Ziel ist es, gesunde und lokal erzeugte Produkte anzubieten, die für alle erschwinglich sind (Miller 2011). Genannte energetische Vorteile sind die Schonung von Ressourcen, die Erhöhung der Ressourceneffizienz sowie die Verringerung der Transportwege (Specht et al. 2014). Allerdings ist VF nicht per se nachhaltig. Dazu ist es notwendig, lokale Ressourcen zu nutzen, die Produktion energetisch zu optimieren, neue Marktstrukturen zu etablieren und die soziale Dimension zu integrieren (Specht et al. 2014).

VF ist ein relativ neues Konzept zur Lebensmittelproduktion. Die Anzahl an veröffentlichten Artikeln zur Integration von VF in den städtischen Kontext ist begrenzt, was eine umfassende Studie darlegt (Kalantari et al. 2017). Hingegen gewinnt die nachhaltige Lebensmittelproduktion vor Ort in Städten sowohl in der Wissenschaft als auch in der Umsetzung zunehmend Beachtung (Bohn and Viljoen 2012; Despommier 2013). VF wird etwa in China, Holland, Südkorea, Japan, Kanada, Italien, USA, Singapur, den Vereinigten Arabischen Emiraten, und England im realen Maßstab umgesetzt (Sivamani et al. 2013).

Die Beschreibung des Stands der Forschung konzentriert sich im Folgenden auf ökologische Aspekte. Ökonomische und soziale Gesichtspunkte wurden nicht vertieft betrachtet. Der letzte Absatz zeigt in einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation den Forschungsstand bei der Abbildung von thermodynamischen Vorgängen an der Pflanze in Interaktion mit dem Gebäude, vorrangig in Gewächshäusern.

Forschungslücke

VF erlaubt die Produktion von Lebensmitteln mit einer ganzjährig gleichbleibenden Qualität in einem hoch technisierten Umfeld nahe am Verbraucher. VF hat das Potential v.a. in Ballungszentren eine Schlüsseltechnologie zu werden, um eine nachhaltige Ernährungssicherung in Zeiten von urbanem Bevölkerungswachstum, Klimawandel und Wasserknappheit sicherzustellen. Die Vorteile liegen in der Witterungsunabhängigkeit, den kontrollierten Bedingungen mit optimiertem Wasser- u. Düngemiteleinsatz sowie der mehrfachen Ausnutzung der Bodenfläche. Die Lichtnutzungs-Energieeffizienz (MJ/kg Trockengewicht) ist auch den effizientesten Gewächshäusern überlegen. Allerdings werden VF-Konzepte bezogen auf eine nachhaltige Produktionsweise kontrovers diskutiert. Der Energiebedarf und die Kosten für Beleuchtung und Klimatisierung können nicht mit traditioneller Landwirtschaft bzw. mit Gewächshäusern konkurrieren. Hohe Investitions- und Betriebskosten stehen einer Umsetzung von VF in großem Maßstab entgegen. Die Umweltauswirkungen sind durch den hohen Energieverbrauch und bei herkömmlicher Energieversorgung zu groß. Bisherige Forschung untersucht lediglich die energetische Optimierung von Einzelkomponenten, ohne Validierung dieser durch reale Messergebnisse.

Zielstellung

Ziel des Forschungsprojekts war es, ein optimiertes Gebäude-, Technik- und Energiekonzept zu entwickeln, das VF als ganzheitliches System betrachtet. Diese optimierten Konzepte können die potenziellen Synergien mit der Lebensmittelproduktion nutzen und somit den Energiebedarf und die Umweltauswirkungen des VF-Systems minimieren.

Konkrete Projektziele

Nachfolgend werden die Projektziele und die Indikatoren zur Überprüfung dieser genannt:

Ziel A: Energetische Optimierung von VF als urbane Lebensmittelproduktion

- Entwicklung eines skalierbaren Gebäudeentwurfs mit entsprechender Materialauswahl
- Ganzheitliche Abbildung von VF als energetisches System und für eine relevante Größenskala in einem thermisch-energetischen Simulationsmodell
- Validierung des Simulationsmodells mit den Indoor Farms BrightBox (high-tech) und Precede (low-tech)
- Optimierung der Einzelkomponenten, insbesondere Licht, Lüftung, Entfeuchtung, Temperierung und Wassernutzung unter Berücksichtigung verschiedener Kultivierungssysteme
- Aktivierung von Synergien durch integrierte Steuerungskonzepte
- Systemoptimierung durch kontinuierliche Rückkopplung von Erkenntnissen aus der Praxis

Ziel B: Reduktion der Umweltauswirkungen von VF

- Untersuchung der Integration in eine heterogene Struktur auf Quartiersebene (z.B. CleanTechCampus) und in eine Kreislaufwirtschaft (z.B. Biogas BHKW)
- Vergleich des Treibhauspotentials eines Produkts (z.B. Salat) aus VF, einem typ. Gewächshaus und Freilandanbau durch eine Lebenszyklusanalyse

Ziel C: Übertragbarkeit der Ergebnisse

- Aufbereitung der Ergebnisse des ganzheitlichen Ansatzes in einem Leitfaden

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Das Projekt leistet einen wichtigen Impuls für urbane Nachhaltigkeit im Hinblick auf Klimaschutz, Energie- und Ressourceneffizienz, indem es den innovativen Ansatz des VF ganzheitlich untersucht und mit der Fachöffentlichkeit diskutiert. Eine nachhaltige Lebensmittelversorgung wird in der Diskussion von urbaner Nachhaltigkeit eine immer zentralere Rolle spielen. Städte verbrauchen mehr als zwei Drittel der gesamten Energie und sind weltweit für mehr als 70 % der CO₂-Emissionen verantwortlich (UN 2010). Daher können Städte eine Führungsrolle bei der Dekarbonisierung durch die Reduktion von CO₂ Emissionen übernehmen. Nachhaltige Lösungen für die Bereiche Ernährung, Wasser, Energie und Transport als integrierte Bestandteile von Städten sind nötig, um den Anforderungen des Klimawandels zu begegnen. Im Bereich der Lebensmittelproduktion werden neben einer Anpassung der Kulturführung technische Maßnahmen wie beispielsweise der geschützte Anbau angeführt. Die konsequente Fortführung des technologischen Fortschritts ist die innerstädtische Produktion von lokal erzeugten frischen Lebensmitteln in vertikalen und hydroponisch versorgten Indoor-Farmen

zu sehen. VF muss äußerst produktiv sein, um mit konventionellen Anbaumethoden konkurrieren zu können. Die Optimierung von VF als Gesamtsystem ist eine technologische Aufgabe, die momentan nicht in Deutschland bearbeitet wird. Deshalb muss es das Ziel sein, den Anschluss an internationale Forschung in diesem Bereich nicht zu verlieren bzw. eine führende Rolle bei dieser wichtigen Technologie einzunehmen. VF hat das Potential, ein neuer Tätigkeitsbereich für die Bauindustrie zu werden. Ein Export von Systemen in Schwellenländer könnte dann VF in Regionen bringen, die am meisten vom Klimawandel betroffen sind und deren Bevölkerung kaum Zugang zu frischen Lebensmitteln hat. Für Industrieländer hingegen rücken soziale Aspekte in den Vordergrund (Interaktion Produzent und Verbraucher, Wissenstransfer Ernährung).

Forschungsdesign

Um die zuvor beschriebenen Projektziele zu erreichen und bestimmte Forschungslücken zu schließen, war es wichtig, neue Ansätze zu entwickeln und anzuwenden. In diesem Kapitel beschreiben wir den methodischen Teil des Projekts.

Arbeitshypothesen

Um entsprechende Systeme gegenüber konventionellen Produktionsverfahren wettbewerbsfähig zu gestalten und die CO₂-Bilanz zu verbessern, sind innovative Gebäudekonzepte für VF zu entwickeln. Diese müssen als Zielfunktion die Optimierung der Wechselwirkung zwischen Pflanzenwachstum und Gebäude haben und das Technikkonzept als Gesamtsystem so darauf abstimmen, dass Synergien zwischen den Einzelkomponenten Licht, Temperierung, Lüftung und Entfeuchtung realisiert werden. Zur Reduktion der THG-Emissionen und Umweltauswirkungen von VF ist eine Energieversorgung durch regenerative Energiequellen notwendig sowie die Einbindung in eine Kreislaufwirtschaft durch Einbettung von VF in Quartiere.

Methodischer Ansatz

Der Transformationsprozess in der Lebensmittelproduktion verlangt nach einem neuen Forschungsansatz, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen und die Lebensmittelversorgung für eine zunehmend urbane Bevölkerung zu gewährleisten. Das Projekt untersuchte daher VF als ganzheitliches System, um so den Weg hin zu einem Paradigmenwechsel im Lebensmittelbereich zu ebnen.

Zur Energieoptimierung des Gesamtsystems VF wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Entwicklung eines skalierbaren CAD-Gebäudemodells für VF als Grundlage für die energetische Optimierung und der Lebenszyklusanalyse
- Abbildung des Gebäudekonzepts in thermisch-energetischen Simulationsmodellen:
 - Detaillierte Abbildung der thermodynamischen Vorgänge an Pflanzen (z.B.: Salat, Pak Choi, Basilikum)
 - Analyse der Parameter Licht u. Beleuchtung, Luftbehandlung (Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten), Wasser, Strom, Versorgung mit CO₂ zur Aktivierung von Synergieeffekten
 - Einbezug des Außenklimas durch Definition von Bereichen hinsichtlich Temperatur, Feuchte und Sonneneinstrahlung
- Reduzierung des Energieverbrauchs des Gesamtsystems durch mathematische Optimierung
- Validierung der Simulationsergebnisse mit Daten der BrightBox, Venlo (high-tech) und von Precede, Singapur (low-tech).

Die Umweltauswirkungen des in der VF produzierten Salats wurden in einer LCA ermittelt. Dabei wird auch der Einfluss von unterschiedlichen Gebäudekonzepten (wie z.B. Materialwahl) untersucht. Verschiedene Szenarien der Energieversorgung werden abgebildet, um die Synergien durch bspw. die Integration der Farm in eine heterogene Struktur (wie dem CleanTechCampus) und in eine Kreislaufwirtschaft (wie Biogas BHKW) zu berücksichtigen. Anschließend wird für diese Szenarien des Gebäudeentwurfs und der Betriebsphase eine Sachbilanz erstellt. Die Umweltauswirkungen werden in einer Wirkungsbilanz abgeschätzt, in welcher Transportwege und Ressourceneffizienz bzgl. Wasser, Energie, Land u. Düngemitteln untersucht wurden.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Die Munich School of Engineering (**MSE**) der Technischen Universität München (TUM) war der Hauptantragsteller des Forschungsprojekts und für die Projektkoordination sowie die Bearbeitung der gebäudebezogenen Aufgaben (CAD-Gebäudemodell, die thermisch-energetische Gebäudesimulation) verantwortlich. Die MSE ist ein Integrative Research Institute der TUM mit diversen Forschungsschwerpunkten, wie z.B. Energiesysteme, Energiemodelle, Micro- und Smart-Grids, und organische Solarzellen.

Der Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (**ENS**) an der TUM hat einen Schwerpunkt in der Energiemodellierung und ist verantwortlich für die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse einschließlich einer Wirkungsbilanz von VF im Vergleich zum Gewächshausanbau und zum konventionellen Anbau. Die Integration von VF in eine Kreislaufwirtschaft und die Einbindung in ein Quartier wird ebenso vom Lehrstuhl ENS untersucht, inkl. der energetischen Optimierung des Gesamtsystems VF.

Prof. H. Mempel, Fakultät für Gartenbau an der Hochschule Weihenstephan Triesdorf (**HSWT**), hat ihren Forschungsschwerpunkt im Bereich Gewächshaustechnik und Indoor-Farming. Das Team um Prof. Mempel ist für die Beratung im Forschungsprojekt hinsichtlich physiologischer Vorgänge an Pflanzen, Möglichkeiten und Grenzen der gezielten Beeinflussung von Parametern zur Erhöhung der Erntemenge (z.B. LED Belichtungsstrategien, Temperaturbereiche, CO₂ Gehalt, Bewässerung) zuständig. Verbrauchsdaten zum Ressourcenverbrauch aus den messtechnischen Studien der Indoor Farm, einem Container zu Pflanzenanbau an der HSWT dienen zur Grundlage für die Lebenszyklusbetrachtung.

An dem Projekt waren außerdem zwei industrielle Kooperationspartner beteiligt: 1) BrightBox (**BB**) ist ein Kompetenzzentrum für tageslichtunabhängigen und gestapelten high-tech Gartenbau in Venlo, Niederlande, und 2) Precede Farm (**PP**) ist eine low-tech Indoor Farm in Singapore. Prof. Jasper den Besten ist Ansprechpartner für BrightBox. Er ist Manager der BrightBox und Partner von Precede. In Abstimmung mit seinen Kollegen vor Ort stellte er Ergebnisse des Energiebedarfs der beiden Farmen, aufgeteilt in die einzelnen Verbraucher, zur Validierung der thermisch energetischen Gebäudesimulation bereit. Daneben berät er als Experte zum Thema Indoor-Farming das Team.

Arbeitspakete und Meilensteine

Tabelle 1 beschreibt die Arbeitspakete des Projekts, einschließlich Informationen zu den teilnehmenden Partnern und der für jedes Arbeitspaket geplanten Zeit.

In **Tabelle 2** sind die Meilensteine des Projekts aufgeführt. Es ist zu beachten, dass sich diese Meilensteine von den im Projektantrag genannten unterscheiden. Die Gründe für die Änderungen werden in Kapitel 10 erläutert.

Tabelle 1
Arbeitspakete

AP	Erläuterung	Beteiligte	Dauer in Monaten
1	Bildung Forschungsteam	alle	1
2	CAD-Gebäudemodell	MSE mit HSWT, BB	10
3	Lebenszyklusanalyse LCA Produkt aus typ. Gewächshaus, Freilandanbau	ENS mit HSWT, BB	6
4	Simulationsmodell (Thermodynamik, Fluidmechanik)	MSE mit HSWT, BB	9
5	Validierung Simulationsergebnisse	MSE, BB, PP	5
6	Energetische Optimierung	ENS	6
7	Energiesystem für Vertical Farming	ENS	9
8	Leitfaden	MSE mit ENS, HSWT, BB	3

Tabelle 2
Meilensteine

	Meilenstein
M1	CAD-Model Vertical Farm
M2	LCA Vertical Farm Status Quo
M3	Vergleich LCA Vertical Farm, Freilandanbau, Gewächshaus
M4	Detailliertes Simulationsmodell
M5	Interpretation Validierung
M6	Optimierungstool für Simulation
M7	LCA Optimierte Vertical Farm mit Energiesystem
M8	Dokumentation Guideline

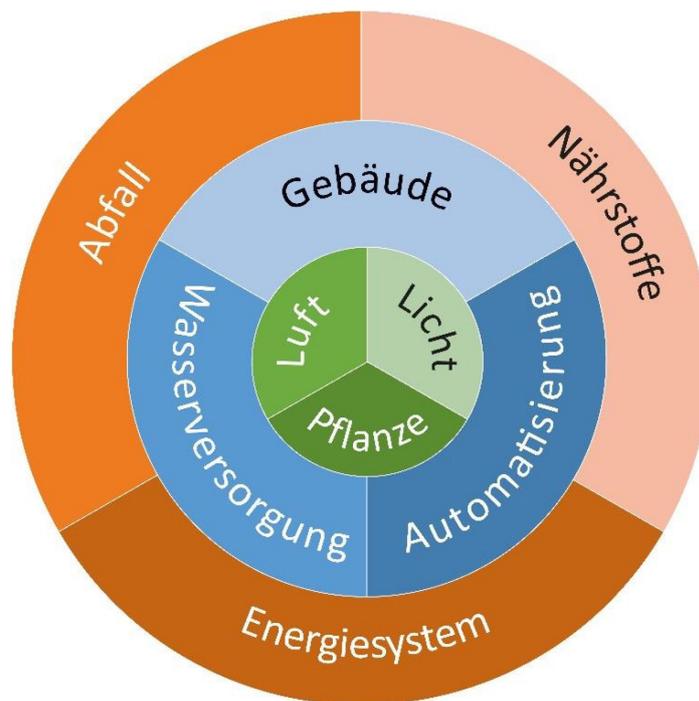
Projektverlauf

Hauptziel des Forschungsprojekts war die ganzheitliche Optimierung des Systems Vertical Farming (VF). Dabei wurden folgende Schwerpunkte untersucht:

- Entwicklung von energetisch optimierten Gebäudekonzepten für VF und Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte
- Ganzheitliche Abbildung von thermodynamischen Vorgängen an der Pflanze sowie der Beleuchtung in der thermischen Gebäudesimulation
- Integration des Gebäudes in ein erweitertes Energiesystem, Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft für das System VF
- Durchführung einer LCA-Optimierung des Gesamtsystems VF

Anhand dieser Aspekte werden in diesem Kapitel die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse dargestellt. **Abbildung 1** zeigt schematisch die Analyse- und Optimierungsebenen im dem Projekt.

Abbildung 1
Analyse- und Optimierungsebenen im Projekt OpEn Farming.



Schwerpunkt Beleuchtung und Klimatisierung

Eines der Hauptziele dieses Projekts war die Senkung des Energiebedarfs von VF-Systemen. In diesem Zusammenhang war es von entscheidender Bedeutung, das Design und den Betrieb dieser Komponenten zu untersuchen und zu verbessern, da Beleuchtung und Klimatisierung erheblich zum Gesamtenergieverbrauch beitragen. Daher wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Optimierungsstrategien entwickelt, um den Energiebedarf zu minimieren und gleichzeitig den Ertrag zu maximieren.

Diese Optimierungsstrategien können für die einzelnen Bereiche unterteilt werden:

1. Pflanzen,
2. Systemdesign,
3. integriertes Systems.

Auf der **Pflanzenebene** werden die Beleuchtungs- und Klimatisierungssysteme so optimiert, dass die Pflanzen ideale Wachstumsbedingungen vorfinden. Das bedeutet, dass die Pflanzen ideale Lichtbedingungen und Klimaparameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt vorfinden. Darüber hinaus ist es wichtig, für alle Pflanzen auf einer Anbaufläche einheitliche Bedingungen zu schaffen, um den gleichen Ertrag und die gleiche Qualität der Pflanzen zu erzielen. Ein bekanntes Problem ist zum Beispiel die ungleiche Lichtverteilung auf den Anbauflächen, z. B. weniger Licht in den Ecken der Anbaufläche.

Auf der **Ebene des Systemdesigns** werden die Systemkomponenten im Hinblick auf Minimierung des Energiebedarfs (Kosten) und gleichzeitiger Maximierung des Ertrags optimiert. Ein ganzheitlicher Optimierungsansatz findet hier Verwendung, um die verfügbare Flexibilität der Pflanzen in Bezug auf die Umweltbedingungen zu nutzen, wie in **Abbildung 2** dargestellt.

Abbildung 2
Ganzheitliche Optimierung auf der Ebene des Systemdesigns



Schließlich werden auf der **Ebene des integrierten Systems** externe Faktoren und Systeme für die Optimierung des Vertical Farming Systems berücksichtigt. Dazu gehört vor allem die Anbindung an andere Systeme, wie sie in Modellen zur Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden, sowie zusätzliche externe Faktoren wie der Strompreis oder Energiemix.

Diese Optimierungsebenen sind nicht unabhängig voneinander, sondern bauen aufeinander auf. Daher ist es sinnvoll, zunächst Optimierungsmethoden für die ersten Ebenen bzw. Bereiche zu entwickeln.

Optimierungsebene 1 (Pflanzenebene)

In der Optimierungsebene 1 wurden die Beleuchtung und die Klimatisierung unter Berücksichtigung folgender Parameter optimiert:

- Beleuchtung (bzw. LED-Optimierung):
 - Beleuchtungsstärke (der optimale Wertebereich, Dauer)
 - LED-Positionierung
 - Lichtfarbe (konstant gehalten)
 - Layout der Regale (Länge, Breite, Höhe)
- Klimatisierung:
 - Positionierung/Anzahl der Lüfter
 - Steuerung der Lüfter
 - Größe der Lüfter

- Layout der Regale (Länge, Breite, Höhe)
- Layout des Raums
- Klimaparameter: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt

Bei der Auslegung des Raums wurden zwei Szenarien unterschieden: ein nicht automatisiertes und ein vollständig automatisiertes System. Diese beiden Arten von Systemen haben unterschiedliche technische Beschränkungen hinsichtlich der Raumgestaltung und müssen daher, wie in Abschnitt „Schwerpunkt Gebäudekonzept“ beschrieben, getrennt betrachtet werden. Außerdem wurden zwei weitere Szenarien für die Optimierung der Klimatisierung ermittelt: ein zentrales und ein dezentrales Lüftungssystem. Ferner müssen verschiedene Zu- und Abluftkombinationen in Betracht gezogen werden, z. B. von oben nach unten, oder von der Seite. Alle diese verschiedenen Szenarien wurden unabhängig voneinander optimiert und miteinander verglichen, um ihre Effizienz zu bewerten.

Beleuchtung

Im Hinblick auf die Lichtoptimierung war einer der ersten Schritte die Entwicklung eines Beleuchtungssimulationstools, welches zur Unterstützung der Optimierungsstrategie eingesetzt werden kann. Die Beleuchtungssimulationen wurden mit der Software DIALux durchgeführt, welche auf Raytracing-Methoden basiert, und mit den Messungen in der VF-Box des ENS (TU München) validiert (**Abbildung 3**).

Abbildung 3
Die VF-Box zur messtechnischen Validierung von Simulationsergebnissen



Ein Vergleich zwischen Simulation und Messung in der VF-Box ist beispielhaft in **Abbildung 4** dargestellt. Außerdem wurde in der ersten Projektphase eine neue Optimierungsmethode für die optimale Steuerung von

LEDs (mit vordefinierter Platzierung) entwickelt. Mit dieser Methode können die LEDs (einzeln oder in Gruppen) so gesteuert werden, dass eine optimale Lichtverteilung auf der Anbaufläche erreicht wird. Die Methode basiert auf dem Prinzip der Licht-Superposition und der quadratischen Programmierung.

Abbildung 4
Simulation der Beleuchtungsstärke und der Messung in der VF-Box.

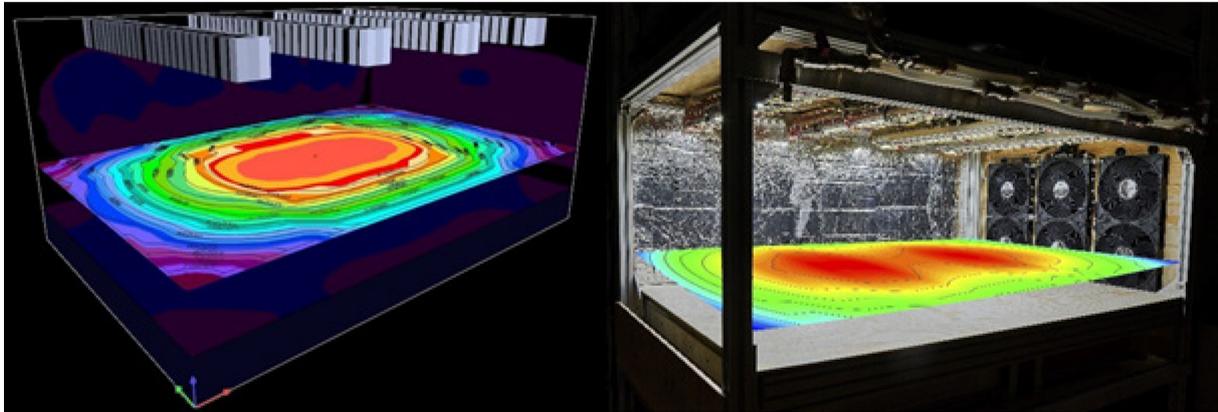
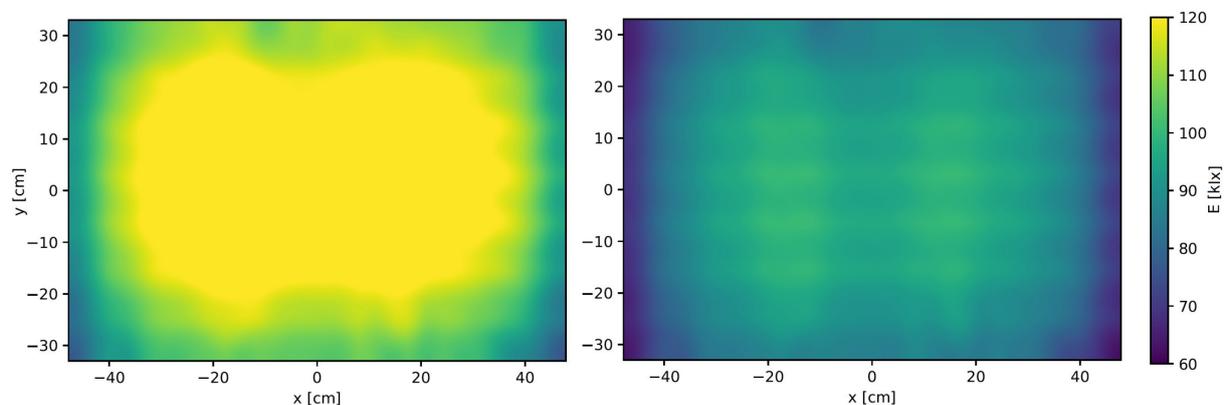


Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein Optimierungsergebnis dieser Methode. Außerdem wurde in der zweiten Projektphase eine neue Methode für die optimale Platzierung und Steuerung von LEDs entwickelt. Diese Methode ist eine Erweiterung der vorherigen und basiert auf der gemischt-ganzzahligen quadratischen Programmierung. Es ist zu betonen, dass die in der Literatur vorhandenen Methoden zur LED-Optimierung für das Vertical Farming limitiert sind, da sie meist auf genetischen Algorithmen beruhen. Daher stellen die neu entwickelten Methoden eine deutliche Verbesserung gegenüber den bisherigen Methoden dar.

Abbildung 5
Lichtverteilung auf Pflanzenebene in VF-Box: nicht optimiert (links) und optimiert mit dem Zielwert von 90.000 lx (rechts)



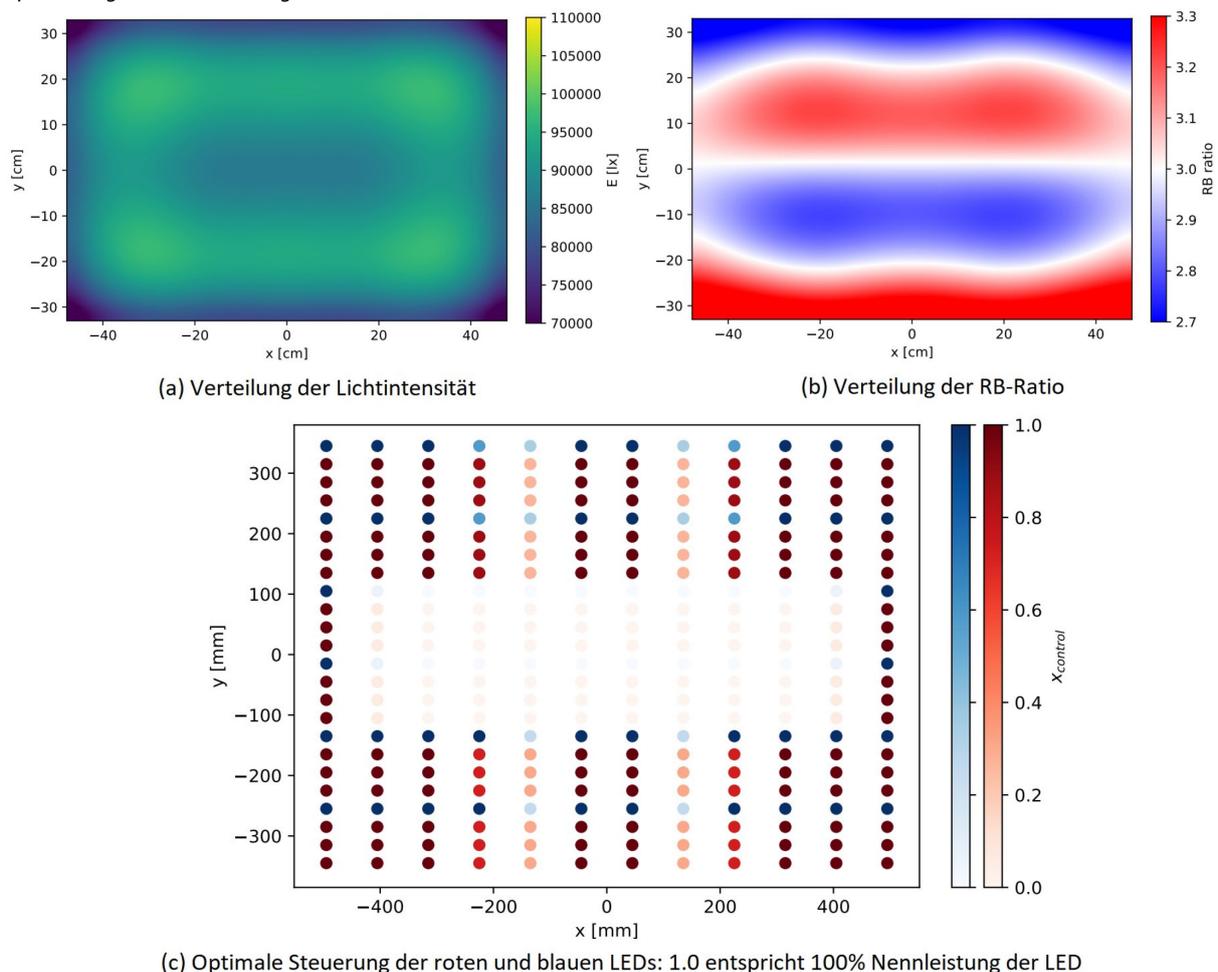
Die erste Version der Methode ermöglicht die individuelle oder gruppierte Steuerung von LEDs, um eine optimale Lichtverteilung, z. B. eine gleichmäßige Verteilung, über die Anbaufläche zu erreichen. Sie befasst sich jedoch nicht mit der Optimierung des Designs des LED-Systems, namentlich der LED-Platzierung. Die erweiterte (zweite) Version der Methode ermöglicht alle drei möglichen Optimierungsszenarien:

1. Optimale Steuerung der LED-Lichtintensität mit einem vordefinierten Design (LED-Platzierung).
2. Optimierung des Designs (LED-Platzierung) mit fester Steuerung (Betrieb) der LEDs.
3. Gleichzeitige Optimierung sowohl des Designs als auch der Steuerung.

Diese neue Methode baut auf den Superpositionsprinzipien des Lichts auf und verwendet eine gemischt-ganzzahlige quadratische Programmierung. Sie stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber bestehenden, in

der Literatur dokumentierten Methoden dar. Darüber hinaus wurde die Methode so erweitert, dass auch verschiedenfarbige LEDs, wie z. B. blaue und rote, berücksichtigt werden können. Durch die optimale Platzierung und Steuerung von blauen und roten LEDs wird eine optimale Lichtverteilung für beide Farben gewährleistet. Der Optimierungsprozess berücksichtigt auch das gewünschte Verhältnis von Rot zu Blau (RB-Ratio), wodurch die RB-Ratio-Verteilung über die Anbaufläche verbessert wird. **Abbildung 6** zeigt Beispiele für die Ergebnisse der neuen Optimierungsmethode. In der Zukunft kann die entwickelte Optimierungsmethode erweitert werden, um alle kostenrelevanten Faktoren einzubeziehen und so eine ökonomische Optimierung des VF-Systems zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass das Beleuchtungssystem so optimiert werden kann, dass der Pflanzenertrag maximiert und der Energieverbrauch gleichzeitig minimiert wird.

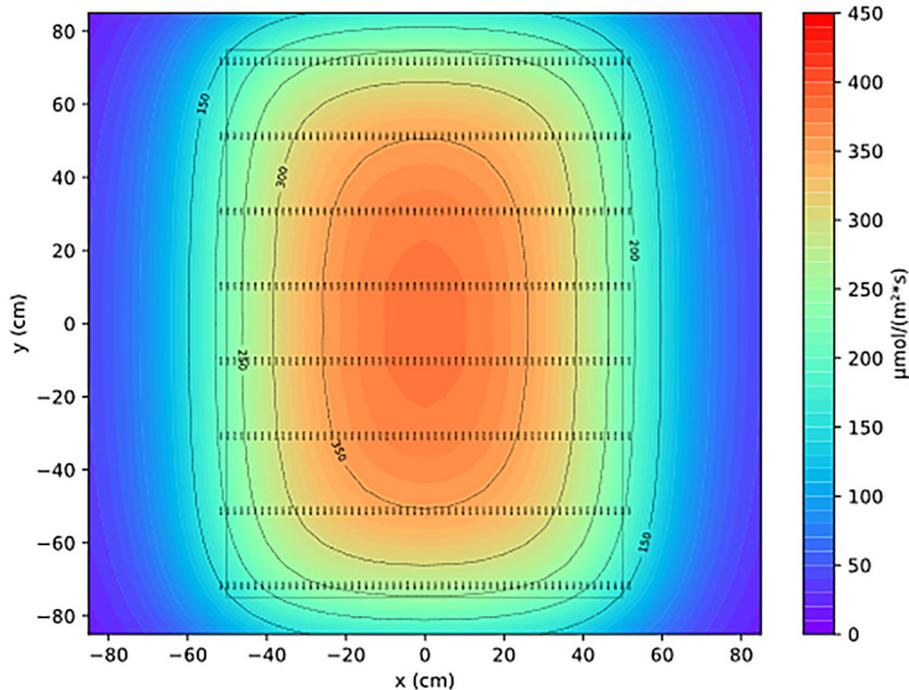
Abbildung 6
Optimierung der LED-Steuerung mit vordefinierten LED-Positionen



Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen neu entwickelten LED-Optimierungsansätzen wurde im Laufe des Projekts noch eine weitere Optimierungsmethode zur optimierten Ausleuchtung der Pflanzfläche erarbeitet. Sie setzt auf dem Ansatz auf, die derzeit bei VF verwendeten stabförmigen LED-Module optimiert zu positionieren und in einem zusätzlichen Schritt die Verteilung der LEDs innerhalb eines Moduls so zu verändern, dass als Gesamtergebnis eine möglichst homogene Belichtung der Pflanzebene entsteht. Das Verfahren beruht auf einem vereinfachtem Ray-Tracing. Dabei wird die zu betrachtende Ebene in Gitterpunkte aufgeteilt. Dann wird die Summe der Belichtungsanteile jeder Lichtquelle auf jeden Gitterpunkt berechnet.

Den Ausgangsstand mit stabförmigen LED-Modulen und einer gleichmäßigen Verteilung der LED-Module zeigt die **Abbildung 7**. Es wird die Belichtung auf die Ebene in $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ dargestellt. Das Rechteck im Bereich von -50 cm bis 50 cm und 75 cm bis -75 cm ist die Pflanzfläche deren Belichtung optimiert werden soll. Von den 8 LED-Modulen sind die einzelnen LED jeweils als Punkte dargestellt. Für die Pflanzfläche wurde eine mittlere Belichtung von $330 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ bestimmt.

Abbildung 7
Belichtungsverteilung auf der Pflanzebene bei stabförmigen LED-Modulen (äquidistante Anordnung)



Da die Belichtung im Randbereich der Pflanzfläche stark abfällt, wurde ein LED-Modul mit einer über der Länge des Moduls ungleichmäßigen LED-Verteilung erarbeitet (siehe **Abbildung 8**).

Bei jedem LED-Modul können 3 LED-Gruppen (blau, rot, grün in der Abbildung) in der Helligkeit gedimmt (1,0 bis ca. 0,2) werden. Wenn man die Modulabstände und die Dimm-Faktoren auf eine gleichmäßige Belichtung hin optimiert, ergibt sich das in **Abbildung 9** dargestellte Ergebnis. Die mittlere Belichtung über der Pflanzfläche beträgt ebenfalls $330 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

Durch die wesentlich homogenere Belichtung ergibt sich eine Verbesserung des Ertrags. Die Höhe dieser Ertragssteigerung kann modelliert oder in einem Wachstumsversuch quantifiziert werden. Dieses Optimierungsverfahren ist derzeit noch in Arbeit. Der Aufbau der optimierten LED-Module und deren Steuerelektronik ist noch nicht abgeschlossen und somit ist die messtechnische Überprüfung der Simulationsergebnisse noch nicht möglich.

Für eine große Vertical Farm bietet dieses Optimierungsverfahren Vorteile. Die LED-Module sind alle identisch und werden in einer (sehr) großen Stückzahl benötigt, was wiederum eine zielgerichtete Fertigung ermöglicht. Die Dimmung der Modul-Gruppen erfolgt in den derzeit gebauten Testmustern mittels einer μ Controller-Schaltung, es sind für den Einbau in eine VF aber auch Module mit fest eingestellten Dimmfaktor realisierbar. Somit sollten die Kosten für ein optimiertes LED-Modul nur unerheblich über dem eines „klassischen“ Modul liegen.

Abbildung 8
Stabförmige LED-Module mit optimierter Anordnung der LEDs und jeweils 3 getrennt dimmbaren Bereichen pro Modul

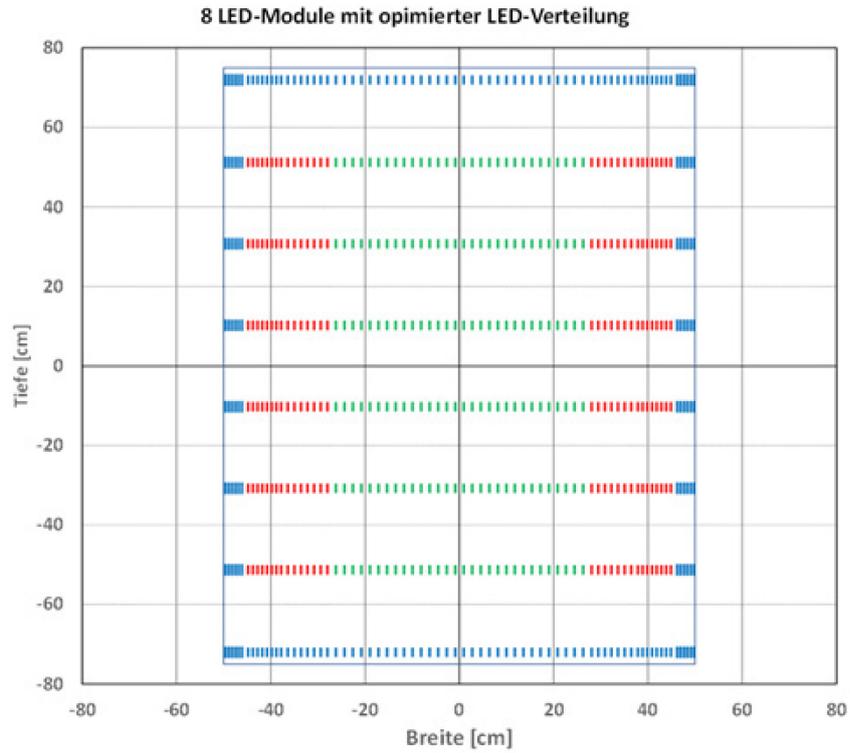


Abbildung 9
Belichtungsverteilung auf Pflanzebene durch die optimierten LED-Module incl. optimierter Dimmung der 3 Modulbereiche

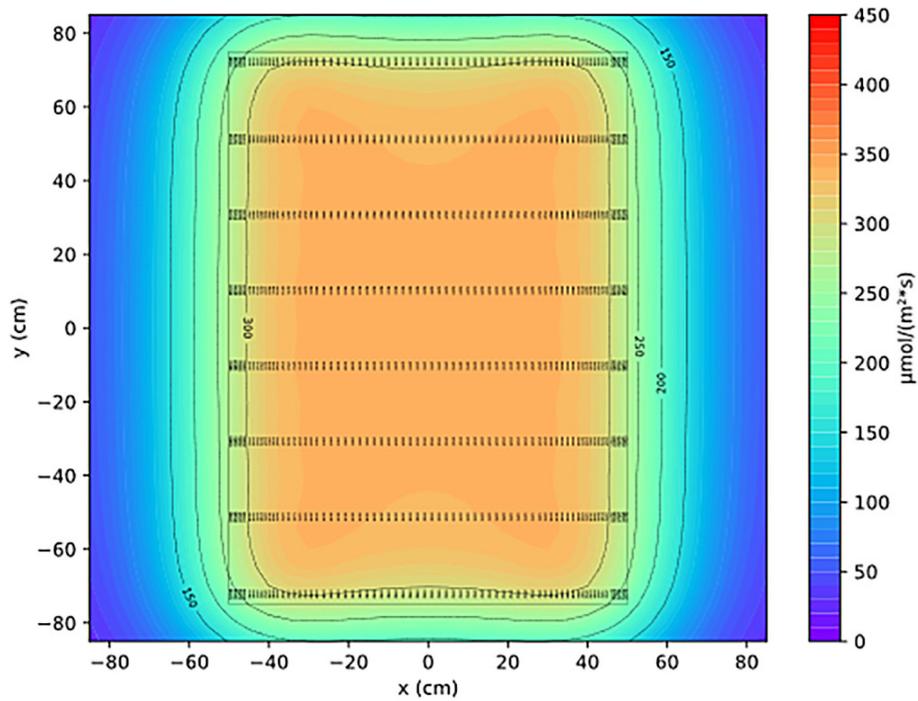


Abbildung 10
Stabförmiges LED-Modul mit optimierter Anordnung der LEDs



Abbildung 10 zeigt eine gefertigte Platine. Sie besteht aus 3 Teilen und ist mit insgesamt 300 LEDs bestückt.

Klimatisierung

Neben Licht und Nährstoffen ist die Belüftung/Klimatisierung ein weiterer wichtiger Parameter für das optimale Wachstum der Pflanzen. In dieser Hinsicht ist der wichtigste Faktor die Luftgeschwindigkeit im Bereich der Blätter der Pflanze. Forschungsstudien haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit um die Blätter das Auftreten von Krankheiten, wie z.B. dem Salatkopfbrand (lettuce tip burn) verhindert. Ein weiteres Ziel für ein optimales Wachstum der Pflanzen ist eine möglichst gleichmäßige Luftgeschwindigkeit und Temperatur innerhalb der Anlage, was aufgrund der Zu- und Abluftkonfiguration, des Widerstands der Pflanzen und der vorhandenen Temperaturgradienten eine Herausforderung darstellt.

Für die Optimierung der Luftparameter, d. h. der Klimatisierung in einem VF-System, sind detaillierte numerische Strömungssimulationen, so genannte Computational Fluid Dynamics (CFD), erforderlich. Daher wurden auf der Grundlage einer Literaturrecherche die besten gängigen Verfahren für solche Simulationen von VF-Systemen ermittelt. In einigen Studien werden Pflanzen nicht als Teil des Simulations-raums betrachtet und ihre Wechselwirkungen mit der Umgebung werden vernachlässigt. Ein besserer und realistischerer Ansatz besteht jedoch darin, Pflanzen in solche CFD-Simulationen einzubeziehen, da sie einen bedeutenden Einfluss auf das Raumklima haben. Dies wurde in einigen neueren Studien berücksichtigt, in denen Pflanzen als eine Schicht poröser Medien dargestellt werden, die einen erhöhten Luftwiderstand aufweist. Außerdem können die Energiebilanzmodelle der Pflanzen in die CFD-Simulationen eingebettet werden, um die Wechselwirkungen der Pflanzen mit der Umgebung zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden daher Simulationsmodelle für die Luftströmung und den Wärmetransport in VF-Systemen entwickelt. Um den Einfluss der Pflanzen auf die Luftbewegung in diesen Simulationen zu berücksichtigen, wird eine Schicht aus porösem Material verwendet, um die Pflanzen darzustellen, wodurch ein erhöhter Luftwiderstand entsteht. Diese Simulationsmodelle wurden mit der Software ANSYS Fluent erstellt und mit Methoden wie Studien zur Gitterabhängigkeit und Skalierung getestet. Angesichts der komplizierten Geometrie eines VF-Systems nimmt die Größe des Modells (Gitter) erheblich zu, was den Einsatz von Hochleistungsrechnern (HPC) erfordert, um ein VF-System in vollem Maßstab effizient zu simulieren. Eine der Aufgaben war es daher, diese Simulationsmodelle für ein HPC-System, den LRZ-Linux-Cluster, anzupassen, welcher Forschenden an der TUM zur Verfügung steht.

Die Klimatisierung in zwei verschiedenen VF-Systemen wurde im Rahmen dieses Projekts untersucht: ein nicht automatisiertes und ein vollautomatisiertes System (siehe Abschnitt **Schwerpunkt Gebäudekonzept**). Der Hauptunterschied zwischen der nicht-automatisierten und der automatisierten Version ist die Breite des Regals (1,3 m vs. 5 m). In **Abbildung 11** sind die Abmessungen und die Hauptkomponenten eines einzelnen Regals des nichtautomatisierten Systems dargestellt. Bei den modellierten Komponenten handelt es sich um die Lüftungsöffnungen (Ein- und Auslässe), die LEDs, den Pflanzenbereich und die Bodenstütze. Im Rahmen dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass die Pflanzen voll ausgewachsen sind und eine Höhe von 0,15 m haben.

Für beide Versionen des VF-Systems wurden verschiedene Zu- und Abluftkonfigurationen mittels CFD-Simulationen analysiert und verglichen. Diese Konfigurationen sind in **Abbildung 12** und **Abbildung 13** für die nicht automatisierte bzw. die vollautomatisierte Version dargestellt. Darüber hinaus wurden auch unterschiedliche Anordnungen der Einlassdüsen (z. B. eine oder zwei Reihen horizontaler Einlässe) bei gleichem Einlassöffnungsquerschnitt und Volumen der einströmenden Luft untersucht.

Abbildung 11
Geometrie und Vorderansicht des simulierten Racks

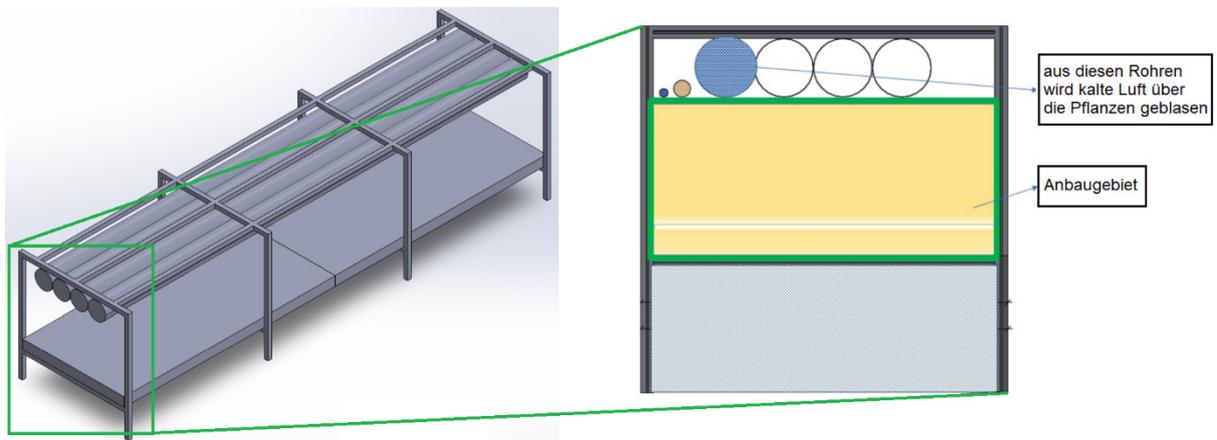


Abbildung 12
Unterschiedliche Konfigurationen des nicht automatisierten VF-Systems

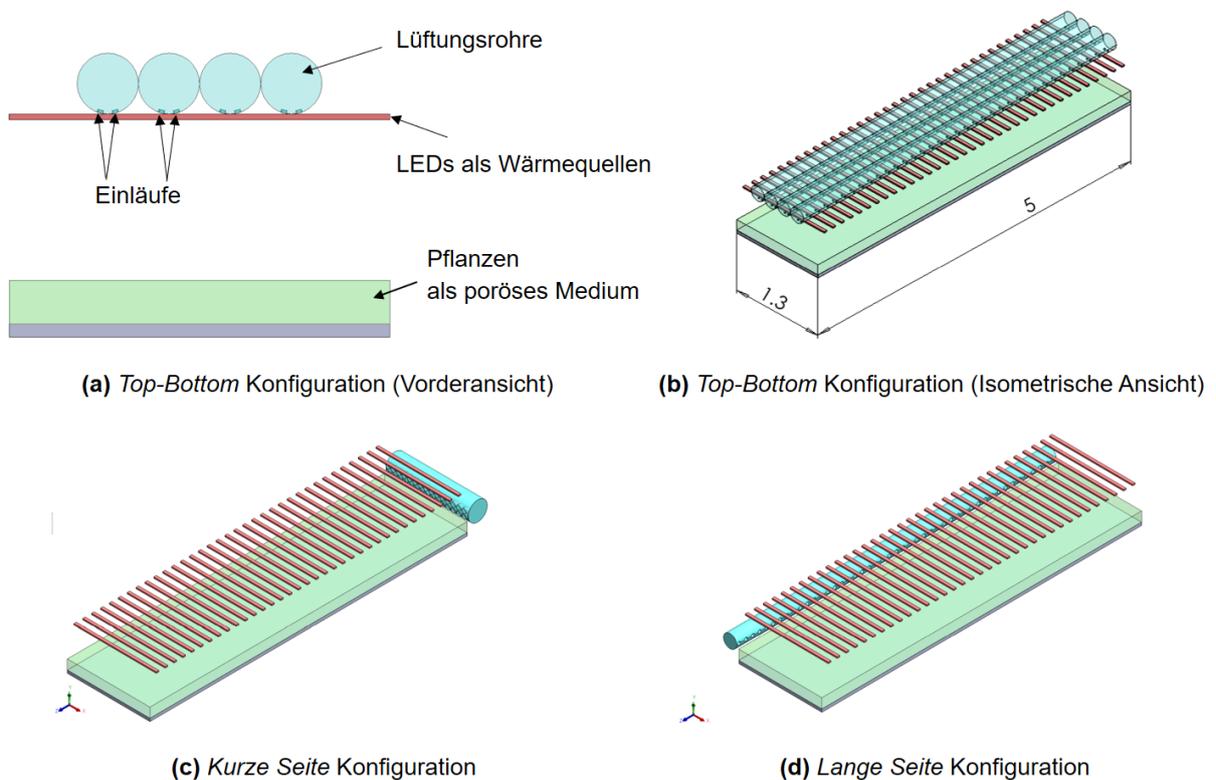


Abbildung 14 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse, die mit den CFD-Simulationsmodellen erzielt wurden. Die detaillierten Simulationsergebnisse und Beschreibungen der Modellierung sind im Rahmen von zwei betreuten Masterarbeiten dokumentiert. Basierend auf diesen Simulationsmodellen können in Zukunft die Luftparameter mit dem verfügbaren Tool ANSYS OptiSLang optimiert werden. Das OptiSLang-Tool basiert auf Modellen reduzierter Ordnung und kann mit den in ANSYS entwickelten CFD-Simulationsmodellen kombiniert werden.

Abbildung 13
 Unterschiedliche Konfigurationen des automatisierten VF-Systems

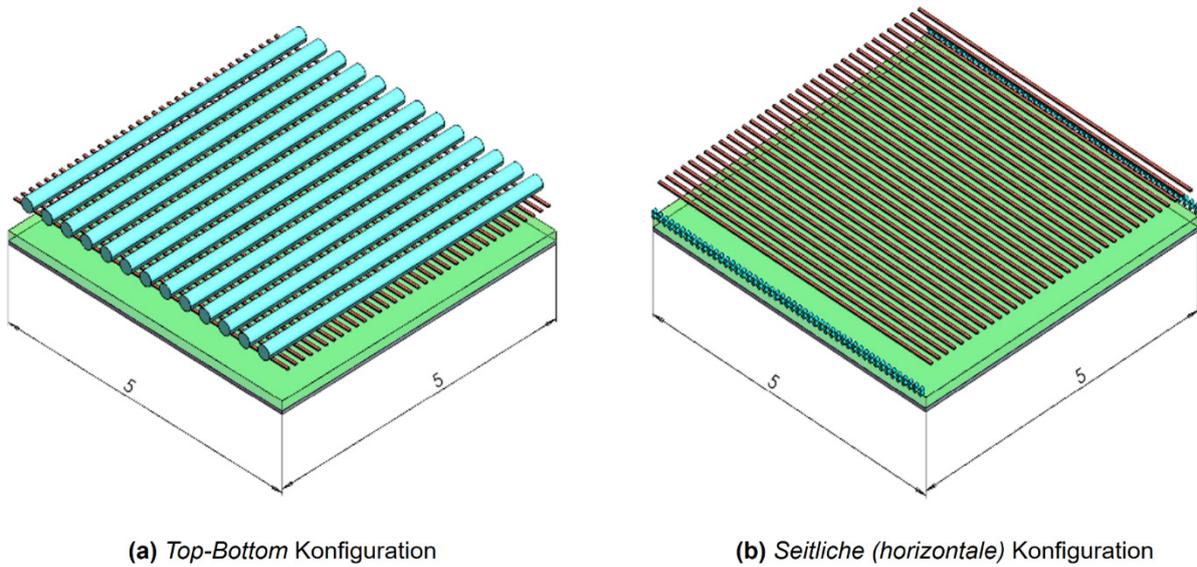
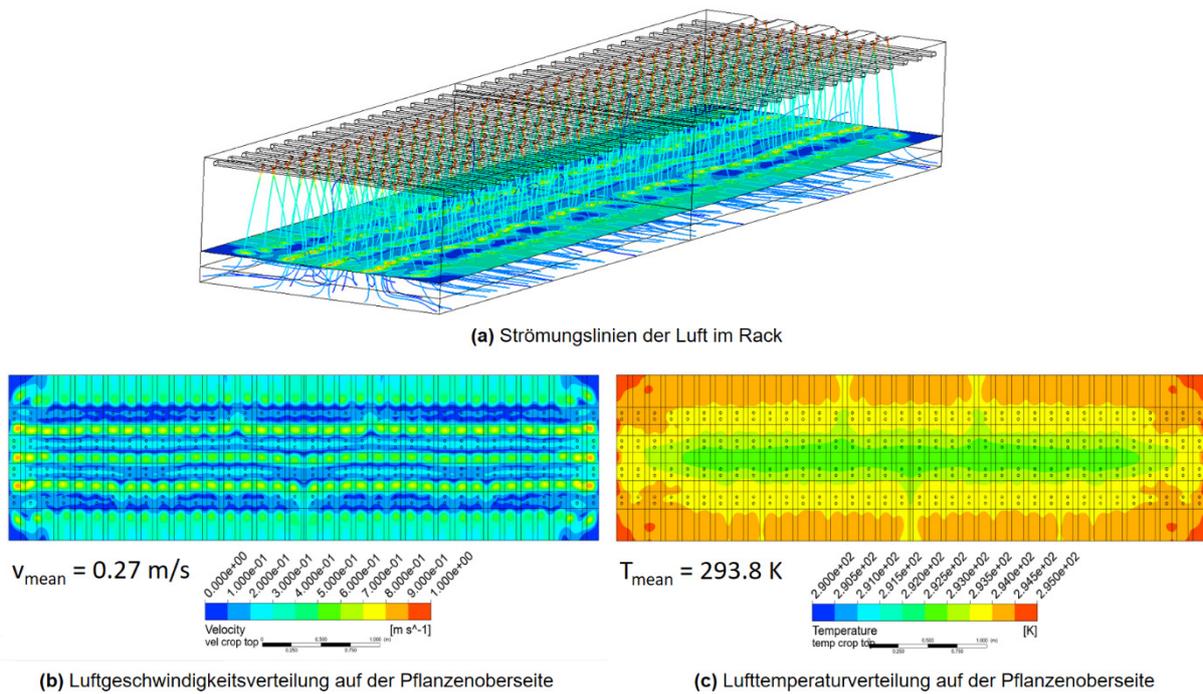


Abbildung 14
 Beispiel für CFD-Simulationsergebnisse für das nicht automatisierte VF-System.



Optimierungsebene 2 (Systemdesign-Ebene)

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, können Beleuchtung und Klimatisierung so optimiert werden, dass ideale Bedingungen für Pflanzen geschaffen werden. Allerdings sollten VF-Systeme ganzheitlich optimiert werden, um ihren Energiebedarf, bzw. Kosten, zu reduzieren und gleichzeitig den Ertrag zu maximieren. Daher sollten die Installations- und Betriebskosten (Energiebedarf) berücksichtigt und mit den idealen Bedingungen für Pflanzen optimal ausbalanciert werden, um dieses Ziel zu erreichen.

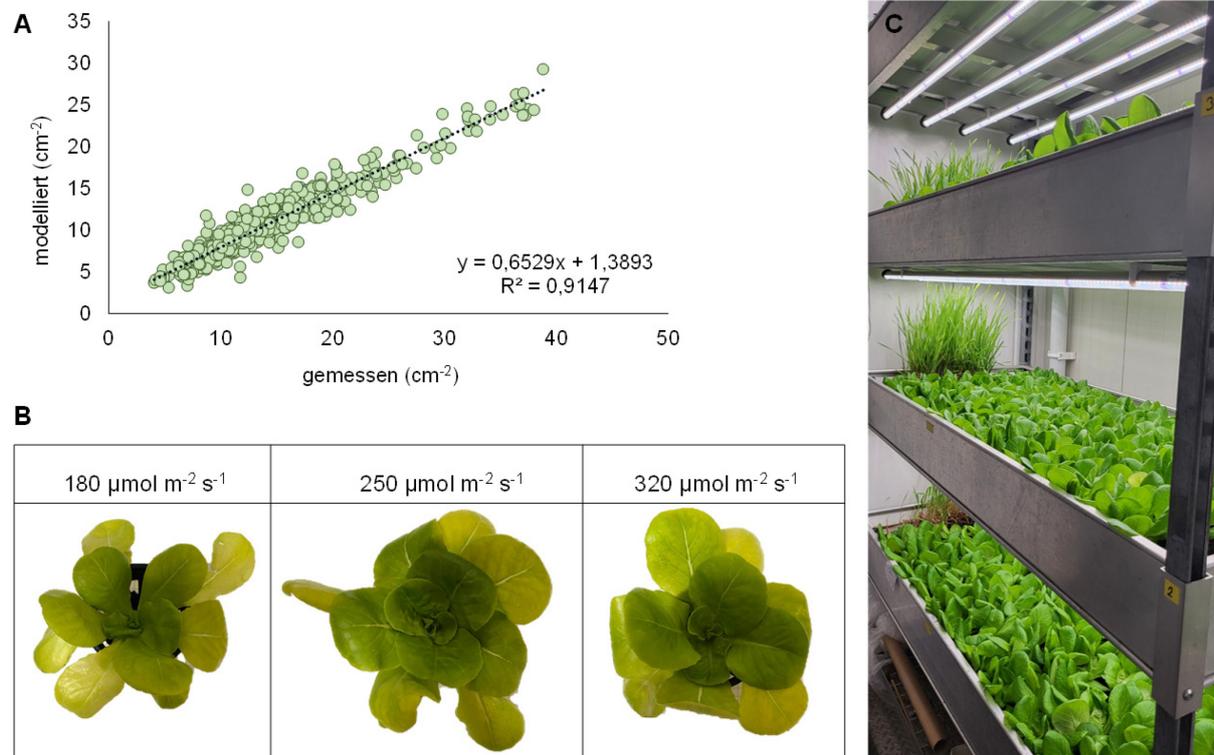
Einige der Methoden aus der Optimierungsebene 1 (vorheriger Abschnitt) können zu diesem Zweck erweitert werden. Beispielsweise können die entwickelten Optimierungsmethoden für die optimale LED-Platzierung (Design) und -Steuerung erweitert werden, indem alle Kostenaspekte integriert werden: die Installationskosten von LEDs, die Betriebskosten von LEDs (basierend auf Strompreis und LED-Effizienz) und der normalisierte Preis für den Verkauf von Endprodukten. In die Optimierungsmethode muss folglich ein Pflanzenwachstumsmodell eingebunden werden, welches den Zusammenhang zwischen Lichtverhältnissen an Pflanzen und deren entsprechendes Wachstum beschreibt. Ähnlich kann dies auch bei der Optimierung der Klimatisierung (CFD-basierte Optimierung) erfolgen, bei der alle Systemauslegungs- und Betriebskosten sowie Beziehungen zwischen den Luftparametern und dem Pflanzenwachstum benötigt werden. Allerdings sind diese Optimierungsmethoden bereits in ihrer ursprünglichen Form in der Optimierungsebene 1 komplex. Außerdem werden die Pflanzenwachstums- und Energiebilanzmodelle üblicherweise mit einem System nichtlinearer Gleichungen dargestellt. Daher wird die Erweiterung der Methoden aus der Optimierungsebene 1 zu hochkomplexen Problemstellungen führen, die ihre Anwendbarkeit einschränken werden.

Um diese Komplexitätsprobleme zu überwinden und das System dennoch ganzheitlich optimieren zu können, soll eine andere Art von Optimierungsmethoden entwickelt werden. Diese basieren auf den sogenannten Sollwerten von Regelgrößen (set point values), wobei das Regelvolumen das gesamte Raumklima ist (z. B. ein Temperaturwert wird für den gesamten Raum angenommen). Dies vereinfacht die Klimasimulationen erheblich und ermöglicht somit die Kombination mit Pflanzenmodellen. Mehrere Studien haben bereits solche transienten HVAC-Simulationen durchgeführt, bei denen Anlagenmodelle mit Gebäudesimulationstools wie EnergyPlus oder TRNSYS kombiniert werden. Diese Studien berücksichtigen jedoch keine Optimierung des Systems, sondern nur Simulationen zur Bewertung der Effizienz eines vordefinierten Systems. Daher werden die Möglichkeiten zur Verbesserung (Optimierung) des Systemdesigns nicht untersucht. Außerdem konzentrieren sich die meisten dieser Studien auf Gewächshäuser und nicht auf VF-Systeme. Innerhalb dieses Projektes wurde ein neues Optimierungsverfahren auf Basis von Sollwertsimulationen entwickelt, das eine ganzheitliche Optimierung von VF-Systemen ermöglicht (siehe Abschnitt **Energetechnische Gebäudesimulation und -optimierung**). Zu diesem Zweck wurden ein geeignetes Pflanzenwachstumsmodell und passende Software identifiziert. Um das Pflanzenwachstumsmodell zu validieren, hat der Projektpartner HSWT auch eine Reihe von Salatanbauversuchen durchgeführt (siehe folgender Abschnitt).

Experimente zum Salatanbau

Für die Modellierung des pflanzlichen Wachstums wurden experimentelle Daten in der Container Vertical Farm an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf erhoben. Dabei lag der Fokus auf der Veränderung im pflanzlichen Wachstum sowie der notwendigen Kulturzeit in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Lichtintensität. Als Modellpflanze wurde Kopfsalat (*Lactuca sativa* var. *Capitata* 'Treslia') aufgrund der hohen Verfügbarkeit von wissenschaftlichen Vergleichsdaten ausgewählt. In einem mehrlagigen geschlossenen Kultursystem wurden drei Kulturreihen mit den Lufttemperaturen 18 °C, 23 °C und 27 °C über einen Zeitraum von maximal 5 Wochen durchgeführt. Drei Lichtvarianten mit variierender Lichtintensität von 180 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 250 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ und 320 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ wurden untersucht. Im Kulturverlauf wurden morphologische Daten zur Pflanzenhöhe, der Blattfläche, der Blattanzahl sowie der Frischmasse und Trockenmasse wöchentlich erhoben. Darüber hinaus erfolgten wöchentliche physiologische Messungen zur Photosynthese- und Transpirationsaktivität der Salatpflanzen. Die Kulturdauer orientierte sich pro Temperaturvariante an das Erreichen einer Pflanzenfrischmasse von 50 g. Mit den erfassten Daten wurde ein Blattflächenmodell der Salatsorte erstellt (**Abbildung 15**).

Abbildung 15
Blattflächenmodell (A), Morphologie der Modellpflanze nach 14 Tagen Kultur-dauer bei 23 °C (B), experimenteller Aufbau im mehrlagigen Kultursystem (C)



Quelle: Sabine Wittmann (HSWT)

Schwerpunkt Gebäudekonzept

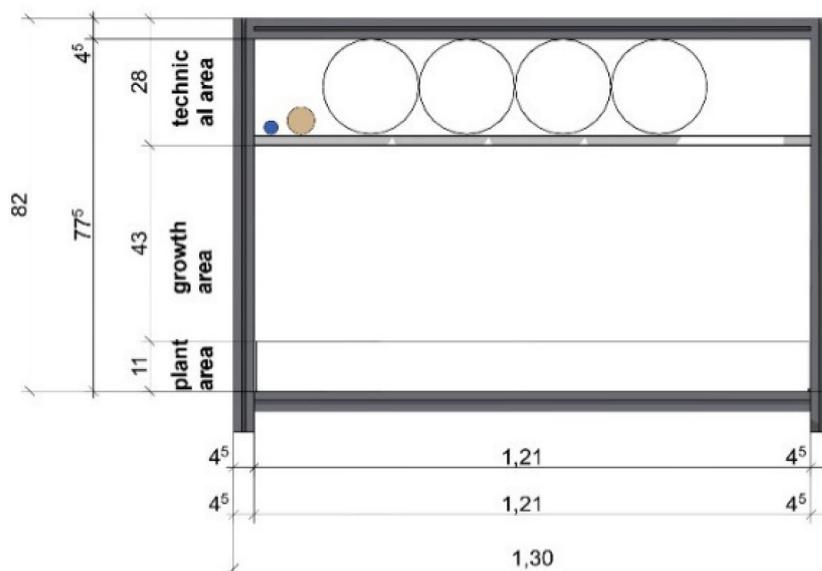
Im Projekt wurden Gebäudekonzepte für vertikale Farmen entwickelt, die energetisch für den jeweiligen Standort optimiert und wirtschaftlich attraktiv sind. Dabei wurden Gebäudekonzepte für eine automatisierte und nicht-automatisierte Farm entwickelt. Diese unterscheiden sich in der Dimension der Regale, der Höhe der Geschoße sowie der Anzahl der erforderlichen Flure. Ausgehend von einer Basis-Regaleinheit wurde diese skaliert, um eine Netto-Anbaufläche von 1.000 m² zu erreichen. Dies entspricht der Größe der Farm, die die LWG bauen wird und kann eine Kleinstadt von ca. 30.000 Einwohnern ganzjährig mit Salat versorgen.

Nicht-automatisierte Farm

Im Folgenden wird die Entwicklung der nicht-automatisierten Farm dargestellt. Das Basis-Modul hat die Aspekte Belichtung und Lüftung im oberen und die Pflanzebene im unteren Bereich. Der Abstand Pflanz- zu technischer Ebene beträgt mindestens 43 cm, um eine stabile Klimazone bei den Pflanzen zu ermöglichen. Um die Ernte der Pflanzschalen (normierte Größen 40 cm x 60 cm bzw. 60 cm x 120 cm) und eine gute Erreichbarkeit auch der Pflanzen in der Mitte des Regals zu ermöglichen, ergibt sich eine Breite von 1,21 m (siehe **Abbildung 16**). Die Höhe des Regals ergibt sich aus der Anleiterbarkeit und wird auf 4 Ebenen, also 3,28 m festgesetzt. Die Bewässerung erfolgt im Ebbe-Flut-System, d.h. die in Hydroponik-Substrat eingesetzten Pflanzen werden in festgelegten Intervallen mit Nährstofflösung geflutet. Ein Basis-Modul mit 5 m Länge verfügt über eine Anbaufläche von 6 m². Die Materialien werden in der Lebenszyklusanalyse untersucht. In **Abbildung 17** ist ein Stockwerk des Pflanzenraumes der Vertikal Farm mit 5 Regalen dargestellt. Bei einer Regallänge von 10 m und 4 Pflanzebenen hat das Stockwerk somit eine Anbaufläche von 240 m².

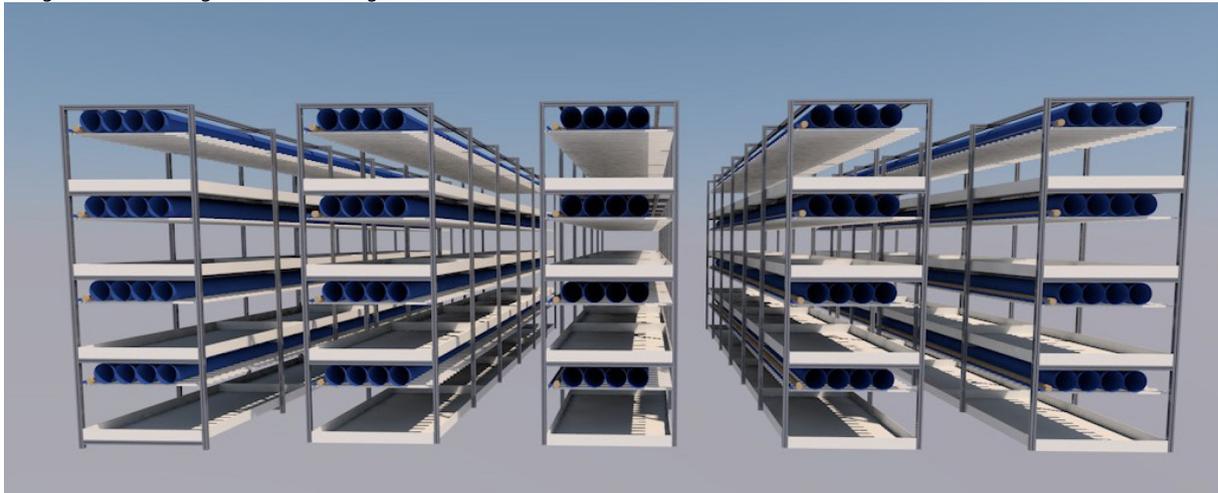
Abbildung 16

Schnitt des Basis-Regalmoduls mit 5 m Länge für 6 m² Anbaufläche mit den Ebenen Lüftung und Licht sowie Pflanze und Bewässerung.



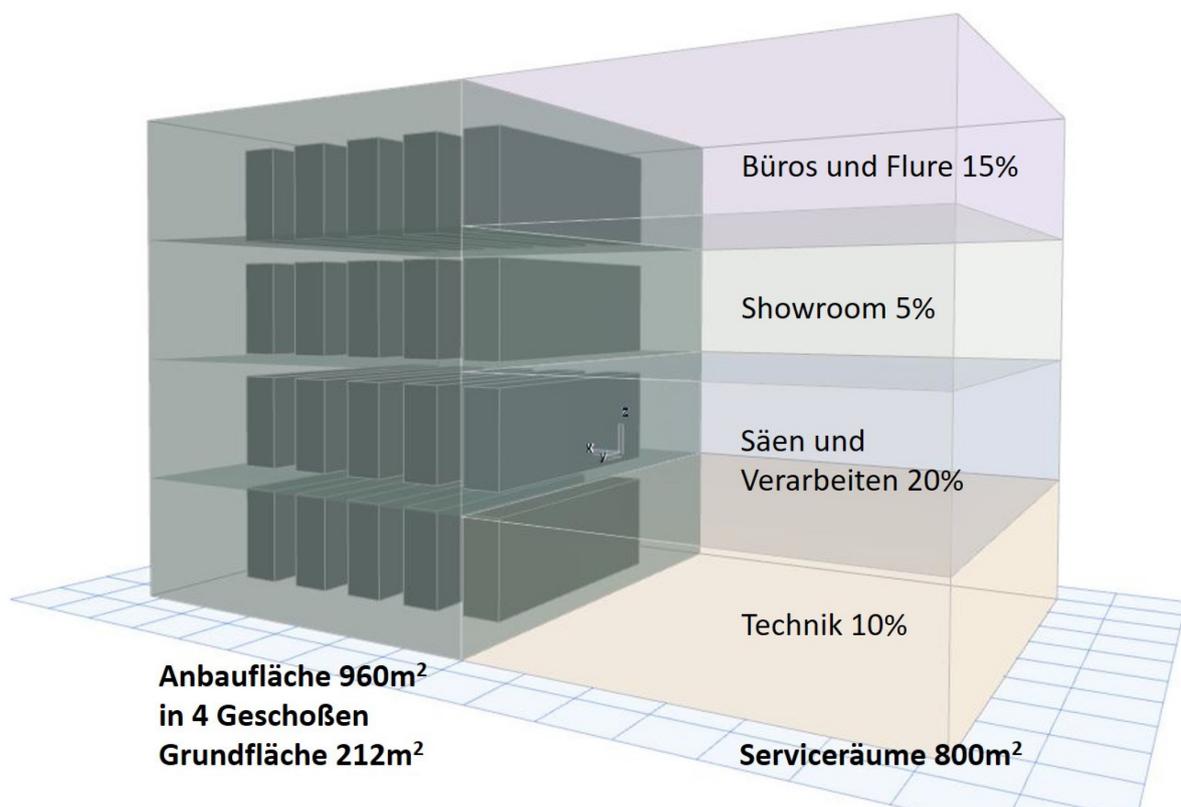
Quelle: Sophie Grabowski

Abbildung 17
5 Regale mit 10 m Länge auf 4 Ebenen ergeben 240 m² Anbaufläche.



Die Abstände der Regale zueinander und zu den Wänden ergeben sich aus der Arbeitsstättenrichtlinie und den Anforderungen des Brandschutzes. Für eine Farm sind neben der Anbaufläche für die Pflanzen etwa die gleich großen Flächen für Anzuchtträume, Büros, Serviceräume und Räume für die Öffentlichkeit erforderlich. Somit ergeben sich für eine Farm von 960 m² Anbaufläche Fläche ein Bedarf von ca. 800 m² für die o.g. Bereiche (**Abbildung 18**).

Abbildung 18
Konzept für eine Vertical Farm mit 960 m² Anbaufläche auf 4 Geschoßen. Die Grundfläche der Vertical Farm beträgt 212 m². Die Größe der Anbaufläche ist in etwa auch für die Servicebereiche erforderlich.



Quelle: Sophie Grabowski

Automatisierte Farm

Der Agrarsektor wird zunehmend automatisiert, insbesondere im Fall von Vertical Farming. Es wird erwartet, dass beispielsweise Überwachungssysteme in großem Umfang eingesetzt werden, um optimales Pflanzenwachstum zu gewährleisten (Al-Kodmany 2018). Daher wurde in diesem Projekt auch ein Konzept für eine automatisierte Vertical Farm untersucht und entwickelt. Dieser Abschnitt stellt das entwickelte Konzept für eine vollautomatisierte Alternative zu dem zuvor beschriebenen manuellen Prototyp vor. Das bedeutet eine Vertical Farm mit einer vollständig kontrollierten Umgebung sowie automatischer Aussaat, Pflege und Ernte. Der erste Schritt in der Konzeptentwicklung bestand darin, relevante Informationen zum Bau von vollautomatischen NFT (Nutrient Film Technique) Vertical Farmen zu erhalten. Dies stellte jedoch eine Herausforderung dar, da die Hersteller sehr zurückhaltend mit der Herausgabe relevanter Unterlagen sind und es auch keine Literatur zu diesem Thema gibt. Die NFT-Systeme mit mobil bzw. automatisch bewegten Rinnen, die während der Projektausflüge in Dinkelsbühl, Nürnberg und Emsbüren besichtigt wurden, dienten als Vorbilder für die Entwicklung der automatisierten Version. Zusätzlich dienten die automatischen Systeme StackGrow von iFarm (iFarm 2023), Viemose DGS von Viemose (Viemose 2023) und Vera von Netled (Netled 2023) als Modelle für die Implementierung dieser Systeme in den Mehrlagen. Grundrisse von vollautomatisierten vertikalen Farmen werden nicht veröffentlicht und es sind keine Informationen über die Flächen verfügbar. Ein Hochskalieren und Vergleich zu manuellen oder anderen automatisierten vertikalen Farmen sind daher nicht möglich.

Das vorgeschlagene Design basiert auf ebenerdigen, einschichtigen automatisierten Gartenbauprinzipien und auf frei im Internet verfügbaren Darstellungen von Mehrlagen-Vertikal Farmen. Im CAD-Modell ist das Gestell mit mobilen Rinnen konzipiert, während automatisierte Fördersysteme zum Pflanzen, Schneiden und Waschen von Tablett von der Konstruktionsaufgabe ausgeschlossen sind. Die folgenden Komponenten und Funktionen einer automatisierten NFT-Vertical Farm wurden identifiziert (siehe **Abbildung 19**):

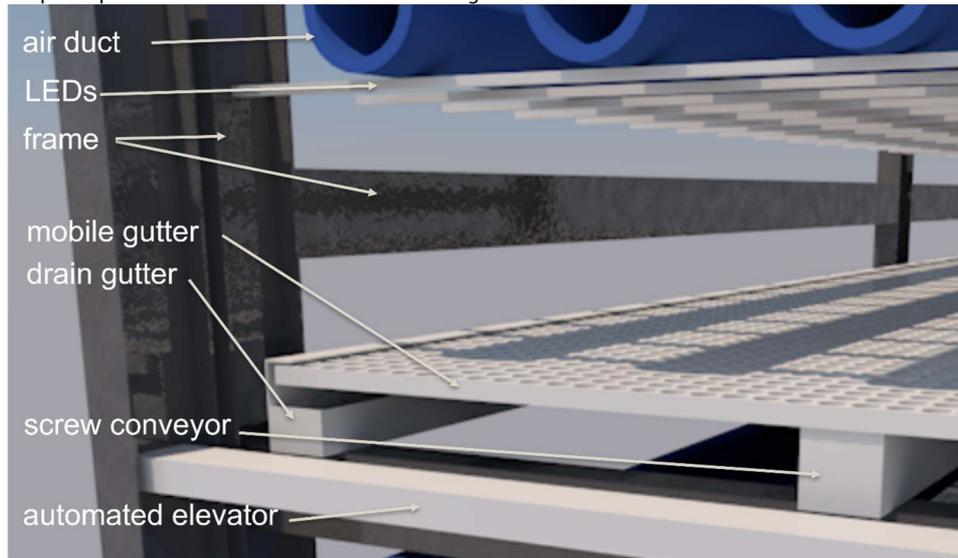
- Struktur/Rahmen: Traglasten, Halten von Komponenten
- Automatischer Aufzug: Anheben der Rinnen auf die richtige Ebene
- Mobile Rinnen: Halten der Pflanzen
- NFT-System: Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen
- Abflussrinne: Ablassen überschüssiger Nährlösung, Wasserkreislauf
- Schneckenförderer: Transport der Rinnen von einer Wachstumsphase zur nächsten
- LEDs: Versorgung der Pflanzen mit Licht
- Luftkanäle: Versorgung der Pflanzen mit Luft, Abtransport von Wärme

Weitere Komponenten (nicht in der Planung enthalten):

- Kameras: Überwachung des Pflanzenwachstums, Erkennung von Problemen
- Sensoren: Überwachung des Klimas, Bestandteil des Klimasteuerungssystems

In den online analysierten automatisierten vertikalen Farmen wurden keine Lüftungsrohre integriert. Dies kann jedoch bei größeren Anbauflächen (Regalen) zu Problemen führen. Daher wurden in der automatisierten Version Lüftungsrohre berücksichtigt. Ein 3D-Modell eines automatisierten VF-Systems wurde anhand der identifizierten Komponenten erstellt (siehe **Abbildung 20**). Das System hat drei Ebenen und ist 5,00 m hoch. Der Bereich der mobilen Rinnen ist 10,00 m mal 5,00 m groß.

Abbildung 19
Hauptkomponenten eines automatisierten Anbauregals.



Quelle: Sophie Grabowski (Masterarbeit)

Abbildung 20
Entwickeltes 3D-Modell der automatisierten Version des Vertical Farming Anbauregals.



Quelle: Sophie Grabowski (Masterarbeit)

Energetechnische Gebäudesimulation und -optimierung

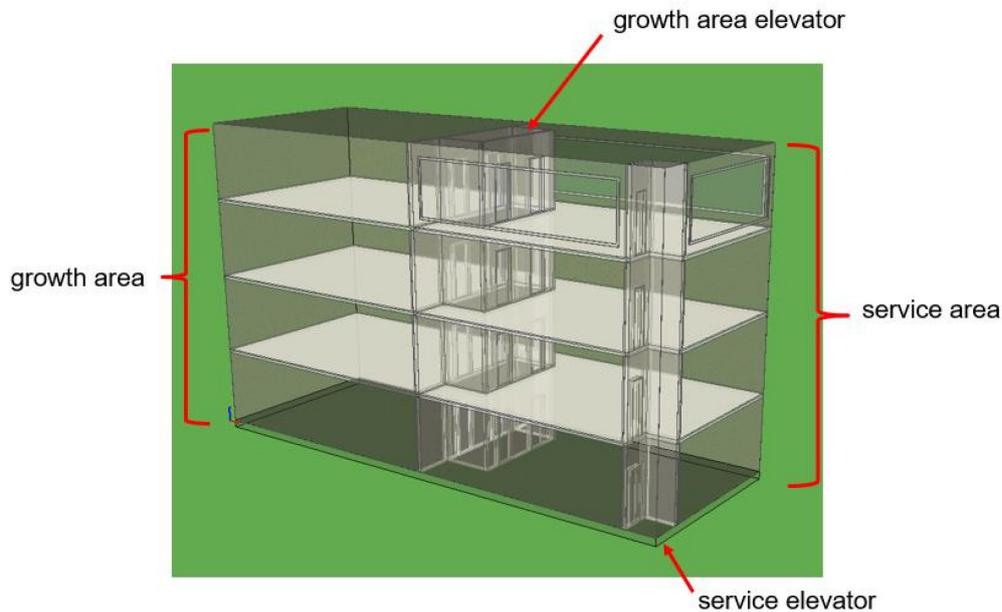
Im Rahmen des Projekts wurde ein Gebäudesimulationsmodell entwickelt, um den Energieverbrauch der vertikalen Farm, in der Salat angebaut wird, im Zusammenhang mit gebäudebezogenen Aspekten zu analysieren. Mit Hilfe einer Simulationssoftware kann dieses Gebäudemodell die typischen Systemkomponenten einer vertikalen Farm und deren Energieverbrauch simulieren. Bei der verwendeten Software handelt es sich um IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE), die eine neue Generation von Simulationswerkzeugen darstellt und neue Standards für die betriebliche Optimierung von Gebäuden setzt (EQUA 2011). Das Gebäude, die Anlagentechnik und deren Steuerung werden präzise abgebildet, um einen minimalen Energieverbrauch bei maximalem Komfort für die Gebäudenutzer zu gewährleisten.

Für eine realistische Simulation einer vertikalen Farm ist es wichtig, die Auswirkungen der Pflanzen auf die Umgebungsbedingungen (z. B. durch Transpiration) in den Anbauzonen und damit auf den Betrieb der technischen Anlagen zu berücksichtigen. Daher wurde ein Energiebilanzmodell für Pflanzen in das entwickelte Energiesimulationsmodell von VF integriert, um diese Einflüsse zu berücksichtigen. Die erforderlichen Parameter des Gebäudesimulationsmodells werden aus der einschlägigen Literatur entnommen und anschließend wird ein Basisszenario entwickelt, bei welchem der Betrieb der Gebäudekomponenten die für das Pflanzenwachstum erforderlichen Bedingungen erfüllt. Dieses Basismodell wurde mit Referenzwerten aus anderen vertikalen Farmen verglichen und verifiziert. In der zweiten Phase wurde das Basismodell dann verwendet, um den Energiebedarf durch den Vergleich von Szenarien zu optimieren oder Veränderungen bei Systemkomponenten zu analysieren. Die Aspekte, die zur Reduzierung des Energiebedarfs analysiert wurden, sind der Beleuchtungsplan, die Baumaterialien und die Ausrichtung der Gebäude sowie die Regelstrategien.

Das simulierte VF-Gebäude ist jenes, welches zuvor für das nicht automatisierte Farmkonzept entwickelt wurde (siehe Abbildung 18). Der Standort der Farm befindet sich im Stadtgebiet von München und die Klimadaten sind in der Simulationssoftware verfügbar. Die Energiesimulationssoftware verfügt über Daten, die sich auf München, speziell München (Riem), beziehen. Die ASHRAE-Wetterdatei ist die Grundlage für die Entwicklung der Klimadaten innerhalb der Software. Die Deckenhöhe ist für jedes Stockwerk auf 5 m festgelegt. Die Übersicht über das grundlegende Layout der Farm ist in **Abbildung 21** dargestellt. Der Aufzug für den Anbaubereich und der Serviceaufzug sind am Verwaltungsteil der Farm platziert, um den verfügbaren Anbaubereich zu maximieren. Da es sich um eine vertikale Farm handelt, deren Klima vollständig kontrolliert wird, sind im Anbaubereich keine Fenster und Öffnungen vorgesehen. Dadurch soll der externe Einfluss der Sonneneinstrahlung minimiert werden, obwohl es eine thermische Wechselwirkung mit den Wänden der Farm gibt. Dies ermöglicht eine vollständige Kontrolle der internen klimatischen Bedingungen der Farm, unabhängig von den äußeren Faktoren.

Die Auslegung von Anlagen zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HVAC) von Innenräumen und Gebäuden basiert auf einer Kühl- und Heizlastberechnung. Die hier verwendeten Ansätze wurden aus den Normen VDI 2078, die in ihrer Berechnung der DIN V-18599 ähnlich sind, sowie den ASHRAE Normen übernommen. Der Kühl- bzw. Heizbedarf wird durch drei wesentliche Einflussfaktoren bestimmt: die Außenklimabedingungen, die Gebäudestruktur und die Nutzung der Haustechnik, die zu verschiedenen Wärmequellen und -senken führt. Dabei sind für das Außenklima die Temperatur, die Sonneneinstrahlung, die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit von Bedeutung. Das Gebäude wird bestimmt durch die innere Anordnung der Räume, die U-Werte der Wände (bestimmen den Wärmedurchgangskoeffizienten), die Verglasung, die thermische Masse und das Volumen. Interne Lasten sind Wärmeeintrag durch Personen, Beleuchtung und Abwärme von elektrischen Geräten. Vor allem in vertikalen Farmen spielen die Beleuchtung und der Wärmeaustausch der Pflanzen eine entscheidende Rolle für die internen Lasten (Graamans et al. 2017). Die Summe aller Wärmegewinne und -verluste ergibt eine Last, die durch das System ausgeglichen werden muss.

Abbildung 21
Layout der betrachteten vertikalen Farm.



Quelle: ProPENS Bericht

Wie bereits erwähnt, ist für eine genaue Schätzung des Energiebedarfs einer vertikalen Farm die Integration eines Energiebilanzmodells für Pflanzen entscheidend. Es ist wichtig, die Parameter und Variablen zur Berechnung des Wärme-, Transpirations- und Strahlungsaustauschs der Pflanze mit der Umgebung korrekt zu bestimmen (Graamans et al. 2020). Es gibt mehrere Methoden zur Berechnung dieser energetischen Wechselwirkungen. Das in dieser Studie verwendete Energiebilanzmodell für Pflanzen basiert auf dem "Big-Leaf"-Modell (Katsoulas and Stanghellini 2019), einem in der Literatur weit verbreiteten Ansatz.

Gebäude-Parameter

Im Folgenden wurden die wichtigen Gebäudeparameter erörtert, die die energetische Wechselwirkung zwischen dem Gebäude selbst und der Umgebung beeinflussen. Die Gebäudekonstruktion definiert die Grenze zwischen der äußeren Umgebung und den inneren Bedingungen. Da das Ziel darin bestand, den Einfluss der äußeren Umgebung auf den Betrieb zu minimieren, ist die Gebäudekonstruktion ein kritischer Parameter, der analysiert werden muss. Obwohl es hierzu viele Parameter gibt, wie z. B. den solaren Wärmegewinn und den solaren Transmissionsgrad, ist die Wärmeleitfähigkeit (U) die zentrale Größe, die hier kritisch analysiert wurde.

Da der Anbaubereich ohne Fensteröffnung konzipiert ist, ist die Wärmeleitfähigkeit der Haupteinfluss des Außenklimas auf das Innenklima. Die Außenwände sind die wichtigste Schnittstelle zwischen der äußeren Umgebung und dem Innenklima, wie in **Abbildung 22** dargestellt. Für das Ausgangsszenario (Basisszenario) wurden diese Wände mit einem niedrigeren U -Wert berücksichtigt, um das Verhalten des Systems zu verstehen. Es wurde eine Standardbetonwand (150 mm + 80 mm) mit einem U -Wert von $0,2236 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gewählt.

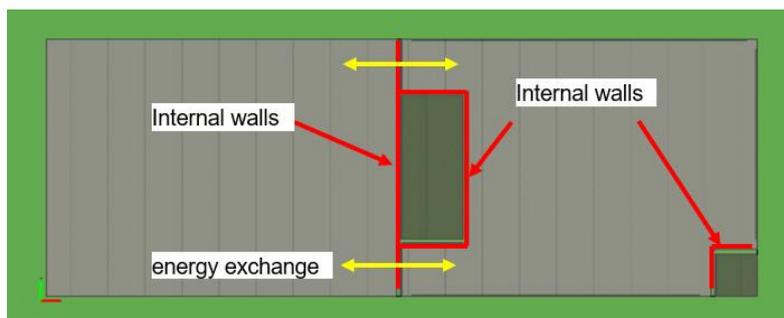
Abbildung 22
Außenwände der vertikalen Farm, Perspektive von oben.



Quelle: ProPENS Bericht

Innenwände (**Abbildung 23**) sind wichtig für das Verständnis der Synergie und des Energieaustauschs zwischen dem Wachstumsbereich und dem Bürobereich. Für das Basisszenario wurde eine Innenwand mit Dämmung gewählt. Es wurden Standard-Whiteboard-Trennwände mit einer Dicke von 0,36 m und einem U-Wert von $0,2999 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ verwendet.

Abbildung 23
Innenwände der vertikalen Farm, Einzelgeschoss, Perspektive von oben.



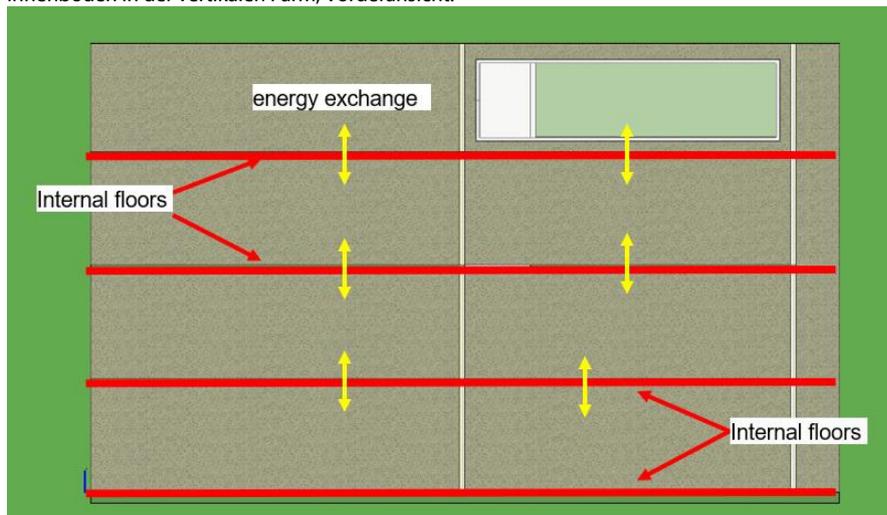
Quelle: ProPENS Bericht

Innenböden (**Abbildung 24**) ermöglichen den Energieaustausch zwischen den Ebenen und sind somit ein weiterer wichtiger Synergieparameter. Dies beeinflusst die Energiebilanz innerhalb des Anbaubereichs selbst und des Bürobereichs. Für das Basisszenario wurde der Standard Betonboden (150 mm) gewählt. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit betrug $2,385 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei einer Dicke von 0,175 m.

Das Dach hat die gleiche Wirkung wie die Außenwand, allerdings mit einem erhöhten Effekt der solaren Gewinne aufgrund der vorhandenen Strahlung. Die Gewinne stehen in direktem Zusammenhang mit der Intensität der Sonneneinstrahlung, da wir aufgrund der Lage des Gebäudes in der gemäßigten Zone das ganze Jahr über eine mittlere Strahlungsintensität haben. Für das Basisszenario wurde ein Standarddachmaterial aus Betonbalken mit einem U-Wert von $0,172 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und einer Dicke von 0,2 m gewählt.

Das Erdreich (Kellerwände zum Erdreich hin, Bodenplatte zum Erdreich hin) ist ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Analyse des Wärmeverlusts eines Gebäudes und hängt mit der Änderung des Feuchtigkeitsgehalts oder der Art des Bodens zusammen. Man kann den Boden als eine Isolierschicht betrachten, deren Wärmedurchgangswerte hauptsächlich vom Feuchtigkeitsgehalt, der Luftkapazität und der Zusammensetzung abhängen (Hans Janssen 2004). Die für die Bodeninteraktion relevanten Gebäudeparameter sind in **Tabelle 3** zusammengefasst. Bei IDA ICE sind die Bodentemperaturen in den Klimadaten enthalten. Für die Berechnung der Wärmeverluste durch die Kellerwände und das Erdgeschoss wurde das Modell ISO 13370 gewählt.

Abbildung 24
Innenböden in der vertikalen Farm, Vorderansicht.



Quelle: ProPENS Bericht

Tabelle 3
Definition der Parameter für Kellerwand und Boden

Bauteil	Material	U (W/m ² *K)	Dicke (m)
Kellerwand	Verputzte l/w Betonwand 250	0,5372	0,270
Bodenplatte zum Erdreich	Betonboden	0,2358	0,256

Solare Gewinne sind ein wichtiger Parameter, der einen Anstieg der Oberflächentemperaturen von Außenflächen verursacht. IDA ICE bietet eine umfassende Analyse der Ausrichtung des Gebäudes und der Berücksichtigung von Verschattung. Die 0-Grad-Ausrichtung liegt vor, wenn das definierte Koordinatensystem des Gebäudes nach Norden zeigt. Die solaren Schwankungen werden erfasst und entsprechend berechnet. Im Basisszenario beträgt die Ausrichtung des Gebäudes 0 Grad. Anschließend wurde die beste Ausrichtung des Gebäudes im Hinblick auf den Energieverbrauch ermittelt.

Modell Ergebnisse

Wenn die Simulation in IDA ICE ausgeführt wird, ist es wichtig, die Zielfunktion zu definieren. Die Anlagen werden dann so gesteuert bzw. betrieben, damit diese Funktion minimal wird. In unserem Fall war das Ziel die Minimierung des Energieverbrauchs des Gebäudes. Neben der Zielfunktion gibt es auch Einschränkungen bei den Steuerungsparametern, welche erfüllt werden müssen, um optimale Wachstumsbedingungen für den Salat zu erhalten. **Tabelle 4** fasst die wichtigsten Parameter für das Anbaugesamt zusammen, die aus (Carotti et al. 2021) entnommen sind. Diese Parameter werden während des gesamten Simulationszeitraums im erforderlichen Bereich gehalten. Die Ergebnisse von IDA ICE werden in Kühlung, Heizung und Energie aufgeteilt. Im Basisszenario entfallen 73 % des Gesamtenergiebedarfs auf die Beleuchtung der Wachstumsboxen, 21 % auf elektrische Kühlung und HLK-Hilfseinrichtungen. Die restlichen paar Prozent verteilen sich auf andere Geräte und Heizung.

Tabelle 4
Schlüsselparameter für den Anbaubereich

	Parameter des Anbaus-Bereichs	Min	Max
1	Temperatur (°C)	18	26
2	Relative Luftfeuchtigkeit (%)	35	80
3	CO ₂ -Konzentration (ppm)	1000	1300

Nach der Simulation im Basisszenario wurden Trendanalysen und Optimierungen durchgeführt, um die besten Werte für die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Wände und die beste Ausrichtung für das Gebäude zu ermitteln. Die Wärmeleitfähigkeitsanalyse wurde für Außenwände, Innenböden, Innenwände und das Dach durchgeführt. Die Analyse für die Verglasung der Fenster wurde nicht berücksichtigt, da es sich nur um einen kleinen Bereich handelt, dessen Wirkung minimal ist. Alle Szenarien wurden unter Berücksichtigung der Erfüllung der wichtigsten Pflanzenwachstumsparameter simuliert.

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse der Optimierungsszenarien, d.h. der Parameteranalysen, zusammen. Die gesamte Analyse wird in chronologischer Reihenfolge durchgeführt, d.h. der beste Fall (Gebäudeentwurf) aus dem vorherigen Szenario, in dem verschiedene Werte eines bestimmten Parameters verglichen werden, wird in das nächste Szenario übernommen, in dem ein anderer Parameter analysiert wird. Auf diese Weise werden am Schluss optimale Werte für alle verschiedenen Parameter kombiniert.

Tabelle 5
Ergebnisse der Optimierungsszenarien

Szenario	Gesamtenergie pro Anbaufläche (kWh/m ²)	Reduzierung (kWh/m ²)	Reduzierung (%)	Kommentar
Basisfall	1229,47	-	-	-
Optimierter Fall I	1201,14	28,33	2,30	Basisfall mit optimiertem Wert der Zulufttemperatur und Umsetzung des Nachtbeleuchtungsplans
Optimierter Fall II	1192,44	37,03	3,01	Optimierter Fall I mit den besten U-Werten aus Einzelanalysen
Finaler optimierter Fall	1192,18	37,29	3,03	Optimierter Fall II mit bester Gebäudeorientierung

Einige Schlussfolgerungen konnten aus der durchgeführten Analyse und den erzielten Ergebnissen abgeleitet werden:

- Der Wachstumsbereich erzeugt viel überschüssige Wärme, was an der hohen Kühlleistung zu erkennen ist.
- Die Kopplung eines anderen Systems (Bereichs) zur Nutzung dieser überschüssigen Wärme ist ein geeigneter Weg, um den Energiebedarf insgesamt zu senken und die Synergieeffekte zu nutzen. In unserem Fall war dies der Büroraum.
- Niedrigere U-Werte führten zu einem geringeren Energiebedarf, da die überschüssige Wärme nach außen abgeleitet werden konnte. Dies gilt nur, wenn unsere äußere Umgebung niedrigere Temperaturen aufwies. Hätten wir ein heißeres Klima, wäre dies nicht der Fall. Abhängig von der erzeugten Wärme können wir die günstigen Außentemperaturen abschätzen und über den optimalen Standort des Betriebs entscheiden. Auch wenn der Standort vorgegeben ist, kann man auf der Grundlage des Außenklimas die optimalen U-Werte für diesen bestimmten Standort abschätzen.
- Aufgrund der niedrigeren U-Werte kann bei Außenwänden auf eine Dämmung verzichtet werden, was die Baukosten senken würde.
- Um Synergien zwischen verschiedenen Gebäudezonen zu nutzen, müssen die Innenwände so wärmeleitend wie möglich sein, damit die Wärme aus dem Anbaubereich in die Büroräume übertragen werden kann.

Lebenszyklusanalyse von Vertical Farming

Die Identifizierung der Umweltauswirkungen einer Vertical Farm entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist von größter Bedeutung, um ihre Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu anderen Methoden der Lebensmittelproduktion zu ermitteln. Lebenszyklus-Analyse (LCA) ist ein Standardwerkzeug zur Quantifizierung der Umwelteinflüsse von Produkten und Dienstleistungen, indem die Input-Output-Flüsse in allen Lebenszyklusphasen erfasst werden. Obwohl bereits einige Anstrengungen unternommen wurden, den ökologischen Fußabdruck einer Vertical Farm mittels LCA zu quantifizieren, zeigen vorhandene Studien sehr unterschiedliche Werte und stellen daher die Umweltauswirkungen von Vertical Farming für politische Entscheidungsträger nicht vollständig überzeugend dar. Daher wurden in diesem Projekt mehrere Schritte unternommen, um die Umweltauswirkungen von Vertical Farming zu untersuchen. Zuerst wurden die für Vertical Farming relevanten LCA-Studien systematisch analysiert und die Ergebnisse mit anderen herkömmlichen Anbaumethoden (Gewächshäuser und Freilandanbau) verglichen. Darüber hinaus wurde die Vertical Farm „BrightBox“ in Venlo (Niederlande) mittels LCA untersucht, um ein aktuelles LCA-Modell für dieses Arbeitsgebiet zu entwickeln. Schließlich wurde identifiziert, wie es möglich ist, die Umweltauswirkungen von Vertical Farming durch die Implementierung von Szenarioanalysen und die Entwicklung von Strategien für die Kreislaufwirtschaft zu reduzieren. Alle Phasen dieser LCA-Studie werden im Folgenden erläutert.

Umweltauswirkungen von Vertical Farming: Status quo

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine systematische Überprüfung durchgeführt, um einen Benchmark für die Umweltauswirkungen von Vertical Farming zu identifizieren. Die Analyse wurde durch mehrere Metaanalysen ergänzt, um die LCA-Ergebnisse aus vorherigen Arbeiten zu harmonisieren. Es wurden weltweit zehn Studien durchgeführt, um die Auswirkungen von Vertical Farming auf die Umwelt zu bewerten. **Tabelle 12 (Anhang A)** fasst die bisherigen Arbeiten in Bezug auf:

- Produkt,
- Standort,
- Designtyp,
- funktionale Einheit,
- Modellierungssoftware,
- Systemgrenze,
- Bewässerungssystem,
- Belichtungssystem,
- Belichtungsperiode,
- Ertrag,
- Methode der Lebenszyklusauswirkungsbewertung und
- bewertete Umweltindikatoren

zusammen. Es gibt verschiedene funktionale Einheiten (FU), nach denen LCA-Studien durchgeführt wurden. Dementsprechend sollten für einen fairen Vergleich die LCA-Ergebnisse für eine gemeinsame FU harmonisiert werden. Dazu wurden zunächst alle:

- bewerteten Umweltindikatoren, einschließlich der globalen Erwärmung,
- Eutrophierung,
- Ökotoxizität,
- Landnutzung,

- Wasserverbrauch,
- Knappheit fossiler Ressourcen,
- Versauerung,
- Ressourcenknappheit und
- menschliche Toxizität

für die FU von 1 kg frischem Kopfsalat als Basisszenario (d.h., „business as usual“) angepasst. Später wurde die Metaanalyse durch die Bewertung der Auswirkungen alternativer Szenarien auf die Umweltauswirkungen von Vertical Farming ergänzt. Die bisher untersuchten alternativen Szenarien sind die Nutzung verschiedener Quellen erneuerbarer Energien (z.B. Off-/On-Grid-Photovoltaik, Windenergie, Kernenergie und Wasserkraft), die Verlängerung der Lebensdauer der Infrastruktur, die Implementierung effizienterer Energieerzeugungstechnologien und Kreislaufwirtschaftsmodelle (z.B. Nutzung von Abfallströmen als Wachstumsmedium, Einsatz von Bio-Dünger, Energieintegration mit dem Gebäude und Verkauf von Produkten an den lokalen Großhandel).

Lebenszyklus-Auswirkungsbewertung (Status quo)

Abhängig von der Methode zur Lebenszyklus-Auswirkungsbewertung (d.h., CML, IPPC, ILCD 2011, Environmental Footprint und Recipe) wurden in vorherigen Arbeiten verschiedene Umweltindikatoren ausgewählt. Da Vertical Farming in den Bereich der landwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten fällt, wurden in den vorherigen Arbeiten Umweltschadenskategorien, die für landwirtschaftliche Aktivitäten relevant sind, quantifiziert. Für die in der aktuellen Arbeit durchgeführte Meta-Analyse wurden Auswirkungskategorien wie

- globale Erwärmung (Indikator: kg CO₂-Äquivalente),
- Wasserverbrauch (Indikator: m³ Wasser),
- Knappheit fossiler Ressourcen (Indikator: MJ-Äquivalente) und
- Süßwassereutrophierung (Indikator: kg P-Äquivalente)

normalisiert und verglichen (**Tabelle 6**).

Wie in Tabelle 6 angegeben, gibt es unterschiedliche Werte für die Auswirkungen der globalen Erwärmung durch Vertical Farming. In der Harmonisierungsanalyse variieren die Werte zwischen 0,39 kg und 25 kg CO₂-Äq pro kg frisches Produkt, abhängig von der Lichtquelle und deren Eigenschaften, dem Strommix und der täglichen Belichtungszeit. Wenn beispielsweise keine künstliche Beleuchtung für vertikal gestapelte Ebenen vorhanden ist, wäre der CO₂-Fußabdruck 0,39 kg CO₂-Äq pro kg frischem Kopfsalat. Andererseits führt die künstliche Beleuchtung zu einem CO₂-Fußabdruck von 1,44 kg bis 25 kg CO₂-Äq pro kg frischem Kopfsalat. Für einen besseren Vergleich wurde **Abbildung 25** erstellt, um die Wechselwirkung mit der Belichtungszeit pro Tag, dem Strommix und dem damit verbundenen CO₂-Fußabdruck zu bewerten. Wie in Tabelle 6 angegeben, führen ein höherer Stromverbrauch und ein kohlenstoffintensiverer Strommix zu einem höheren CO₂-Fußabdruck für Vertical Farming. Der höchste Wert von 25 kg CO₂ pro kg frischem Produkt wurde von (Kikuchi et al. 2018) für eine Vertical Farm in Japan berechnet. Dies lag an dem hohen Anteil von Strom aus fossilen Energieträgern im japanischen Strommix. Obwohl die tägliche Belichtungszeit dieser Vertical Farm niedriger ist als in den anderen untersuchten Studien, führte die Verwendung von Leuchtstofflampen anstelle von LEDs zu einem höheren Stromverbrauch.

Der zweithöchste CO₂-Fußabdruck wurde von (Mujkic und Andakudi Kesavan 2020) berechnet, bei dem eine tägliche Belichtungszeit von 16 Stunden mit LEDs für eine Vertical Farm in kleinem Maßstab an der Wand vorgesehen war. Für die LCA-Analyse wurde der schwedische Strommix mit einem CO₂-Fußabdruck (CF) von 0,48 kg CO₂-Äq ausgewählt. Diese Studie zeigte jedoch höhere Umweltauswirkungen im Vergleich zu anderen Fallstudien für Schweden. Dies könnte auf Skalierungseffekte zurückzuführen sein, da Vertical Farmen mit an der Wand montierter Beleuchtung eine wesentlich geringere Produktivität im Vergleich zu horizontalen Mehretagensystemen haben.

Tabelle 6

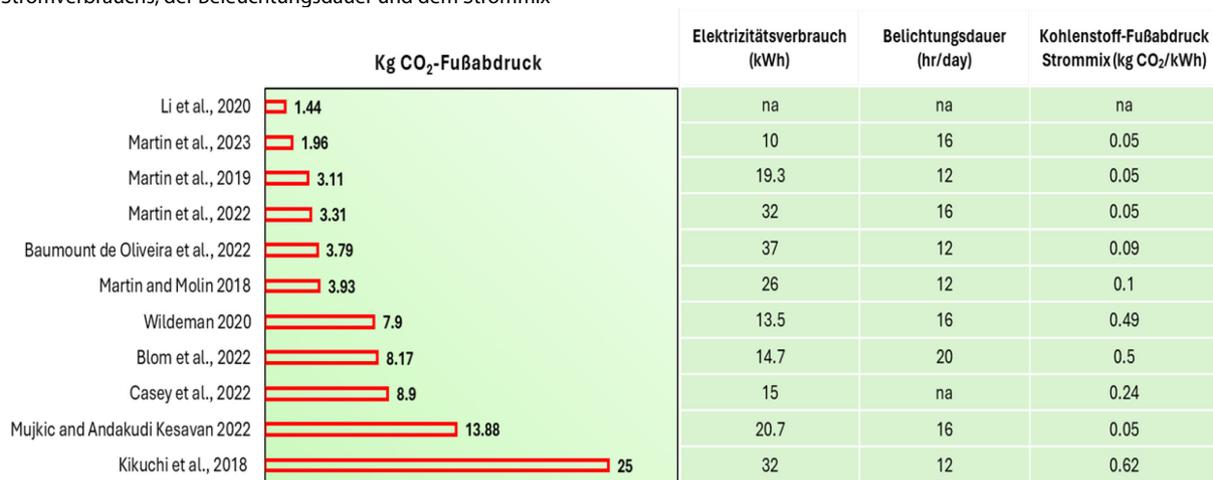
Die quantifizierten Werte der am häufigsten untersuchten Umweltauswirkungskategorien in den verfügbaren LCA-Studien.

Studien	Globale Erwärmung (kg CO ₂ eq)	Wasserverbrauch (m ³)	Verbrauch fossiler Ressourcen (MJ _{eq})	Süßwasser Eutrophierung (kg P _{eq})	Landverbrauch (m ²)
(Mujkic and Andakudi Kesavan 2020)	13,88	0,2		0,006	
(Blom et al. 2022)	8,17				
(Kikuchi et al. 2018)	25,00	0,04			
(Li et al. 2020)	1,44	0,02			
(Wildeman 2020)	7,90	0,02		0,018	427,92
(Martin and Molin 2018)	3,93	-			
(Romeo et al. 2018)	0,39	0,03		0,001	
(Martin et al. 2019)	3,11				
(Martin et al. 2022)	3,31	77,47			
(Casey et al. 2022)	8,90	23	183	0,004	
(Martin et al. 2023)	1,96	4,60	148	0,001	1213,80

Die VF-Studien mit der dritthöchsten Kohlenstoffintensität stammen von (Blom et al. 2022b; Casey et al. 2022; Wildeman 2020), bei denen der CF im Bereich von 7,90 bis 8,90 kg CO₂ lag. Diese Studien wurden für Großbritannien, die Niederlande und die USA durchgeführt. Abhängig von der Datenbankversion und ihrer zeitlichen Kompatibilität existieren unterschiedliche Strommixe für die bewerteten Länder. In der Zwischenzeit haben Studien von (Martin und Molin 2018); (Martin et al. 2019); und (Martin et al. 2022) einen CF von 3,11 bis 3,93 kg CO₂ pro kg frischem Produkt errechnet, wenn der schwedische und der nordische Strommix berücksichtigt werden. In einer sehr aktuellen Studie von (Martin et al. 2023) wurde jedoch ein sehr niedriger CF von 1,96 kg CO₂-Äq für 1 kg essbaren Pflanzenteil (dies entspricht 1,96 kg CO₂-Äq pro kg frischer Kopfsalat) ermittelt, der auf den geringen Stromverbrauch von 9,92 kWh pro kg frischem Kopfsalat und die niedrige Kohlenstoffintensität des schwedischen Strommixes zurückzuführen ist.

Abbildung 25

Quantifizierte Werte für die Auswirkungen von Vertical Farming auf die globale Erwärmung und ihre Abhängigkeit von der Menge des Stromverbrauchs, der Beleuchtungsdauer und dem Strommix



Flächenverbrauch

Mit dem Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen Entwicklung in Landwirtschaft und Industrie nimmt die Verfügbarkeit von nutzbarer Fläche ab. Der Flächenverbrauch, als Summe der Flächenbelegung und -umwandlung, kann nicht nur den Zugang zu Land beeinflussen, sondern auch negative Auswirkungen auf den Klimawandel, die Artenvielfalt und das Ökosystem haben. Es wird oft behauptet, dass Vertical Farming in der Anbauphase einen sehr geringen Einfluss auf die Landnutzung hat. Laut den Zielen der Lebenszyklusanalyse (LCA) können jedoch Umweltauswirkungen in einer weiter gefassten Grenze bestimmt werden, einschließlich der vorgelagerten Prozesse, der Nutzungsphase und des Lebensendes ("cradle to grave"-Systemgrenze).

Je nach angewandter Methode zur Lebenszyklus-Auswirkungsbewertung (LCIAM), kann die Landnutzung mit verschiedenen Indikatoren gemessen werden (z.B. m² pro Jahr Ertragsäquivalent, m², Pt). In Recipe zeigt beispielsweise m² pro Jahr Ertragsäquivalent den Verlust von Kulturpflanzenarten auf einem bestimmten Land an, wobei der Indikator der lokalen Artenvielfalt in spezifischen Landbedeckungen berücksichtigt wird. In EF wurde die LANCA-Methode zur Messung der Auswirkungen auf die Landnutzung ausgewählt, bei der fünf verschiedene Belegungs- und Umwandlungsströme mit dem Indikator „Punkt“ (pt) erfasst werden. In den Studien von (Wildeman 2020) und Martin et al. (2023), in denen EF zur Messung des Land-Fußabdrucks verwendet wurde und ein Umrechnungsfaktor von 1 Punkt = 40,46 m² Fläche angesetzt wurde, ist der tatsächliche Land-Fußabdruck viel höher als behauptet. Im Vergleich zu anderen Arten von landwirtschaftlichen Systemen ist die Landnutzung von Vertical Farming, wie von Wildeman (2020) angegeben, viel höher als bei anderen landwirtschaftlichen Produktionssystemen. Das Ergebnis einer geringen Landnutzung von Vertical Farming in diversen Studien liegt in der Methode begründet, da sich diese lediglich auf den Ertrag bezieht und nicht auf den gesamten Land-Fußabdruck aus Sicht der LCA. Die hohen Erträge und die Belegung von außergewöhnlich kleinen städtischen Flächen unterstützen jedoch die Entstehung von Vertical Farmen innerhalb von Städten. Hinsichtlich der vorgelagerten Landbelegung und -umwandlung zur Erzeugung des benötigten Stroms der Vertical Farm hat VF jedoch im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Methoden höhere Auswirkungen auf die Landnutzung. Aus dieser Sicht hat der Strommix eines Landes erhebliche Auswirkungen auf die Kategorie „Auswirkungen auf die Landnutzung“.

Wasser-Fußabdruck

Der Agrarsektor hat immer großen Druck auf Wasserquellen ausgeübt. Der Anteil dieses Sektors an der Nutzung der Wasserressourcen beträgt 70 %. Hydroponische Systeme in Vertical Farmen steigern die Wassereffizienz erheblich, dank ihres geschlossenen Wasserkreislaufs, in dem Luftentfeuchter das gesamte verdunstete

Wasser auffangen und es wieder in das System zurückführen. Dies führt zu einer hohen Wassereffizienz und keinem Düngemittelabfluss, der zur Kontaminierung der Umwelt führen könnte. Obwohl die Wassereffizienz von Vertical Farming viel höher ist als die von Freilandanbau (200- bis 1000-mal höher), sollte der gesamte Wasser-Fußabdruck mit der LCA-Methodik berechnet werden.

Aus der Sicht der LCA belasten die Infrastruktur von Vertical Farmen, LEDs und der hohe Stromverbrauch für die Belichtung die Kategorie des Wasser-Fußabdrucks erheblich und der gesamte Wasser-Fußabdruck könnte deutlich ansteigen. Wie in Tabelle 6 angegeben, wurden die Wasser-Fußabdrücke nicht innerhalb eines bestimmten Bereichs berechnet, da in den vorherigen Studien verschiedene Strommixe berücksichtigt wurden. Daher hängt der Vergleich des Wasser-Fußabdrucks einer Vertical Farm mit anderen landwirtschaftlichen Systemen stark von der geografischen Systemgrenze ab. Beispielsweise ist laut einer in Oklahoma durchgeführten Studie der Wasser-Fußabdruck von Vertical Farming niedriger als der von Freilandanbau, was die potenzielle Entwicklung von Vertical Farming in Oklahoma bei hohen Wasserknappheitsraten erhöht (Wildeman 2020).

Abbau fossiler Ressourcen

Vertical Farming ist energieintensiv aufgrund des hohen Energieverbrauchs für Beleuchtung und Klimatisierung. Laut bestehenden Studien liegt der Energieverbrauch in jenen Vertical Farmen, die mit künstlicher Pflanzenbelichtung ausgestattet sind, bei 10 bis 32 kWh pro kg frischem Kopfsalat, abhängig von der täglichen Belichtungszeit und der Produktivität. Daher trägt der hohe Energieverbrauch stark zu den meisten Umweltschäden bei, einschließlich dem Abbau fossiler Ressourcen. Obwohl der Strommix eine Schlüsselrolle bei der Menge der negativen Auswirkungen spielt, die von Vertical Farmen auf den Abbau fossiler Ressourcen ausgehen, belasten die vorgelagerten Auswirkungen im Zusammenhang mit der Strominfrastruktur und den Gebäuden und Geräten der Vertical Farm diese Schadenskategorie weiterhin stark. Daher wird der quantifizierte Wert für den Abbau fossiler Ressourcen im Bereich von 143 bis 180 MJ pro kg frischem Kopfsalat angegeben, einschließlich aller vor- und nachgelagerten Auswirkungen des Anbaus in kontrollierten Umweltsystemen mit dem höchsten Anteil an künstlicher Belichtung der Pflanzen.

Eutrophierung

Der Eutrophierungseinfluss des Vertical Farming ist bemerkenswert niedrig, wie bereits erwähnt wurde. Da diese Systeme oft in einem geschlossenen Kreislauf arbeiten, wird das Risiko des Nährstoffaustritts in natürliche Gewässer erheblich reduziert. Darüber hinaus bedeutet der effizientere Einsatz von Wasser und Nährstoffen, dass die Auswirkungen pro Produkt in Bezug auf die Eutrophierung geringer sind als bei traditionellen landwirtschaftlichen Systemen wie Freiland- und sogar Gewächshäusern. Die Ergebnisse, die im Bereich von 0,001 bis 0,02 im Hinblick auf den P_{eq} -Indikator für die Eutrophierung von Süßwasser liegen, unterstreichen diesen Punkt.

Rolle der Erneuerbaren Energien

Die Umweltauswirkungen des Vertical Farming hängen aufgrund der hohen Energieintensität stark von der genutzten Energiequelle ab. Der Übergang von fossilen Stromerzeugern hin zu erneuerbaren Energien könnte einen tiefgreifenden Einfluss auf die Verringerung des CO₂-Fußabdrucks und anderer Umweltauswirkungen des Vertical Farming haben.

Die Daten von Wildeman (2020) und Li et al. (2020) zeigen, dass ein Wechsel zu erneuerbaren Energien die Auswirkungen auf die globale Erwärmung, die Landnutzung und den Wasserverbrauch erheblich verringern kann. Der Grad dieser Verbesserungen ist abhängig vom Ausgangsstrommix und den gewählten erneuerbaren Quellen (**Tabelle 7**).

Für Länder wie Schweden, in denen das Stromsystem bereits relativ sauber ist, bietet der Übergang zu vollständig erneuerbaren Quellen wie Windkraft moderate zusätzliche Vorteile. Es ist jedoch interessant, dass der Ersatz des schwedischen Strommixes durch Solarstrom vor Ort den Einfluss auf die globale Erwärmung leicht erhöhen könnte.

Tabelle 7

Die Auswirkungen alternativer Stromquellen auf die Umweltleistung der Vertical Farming.

Alternative Stromquelle	Basisfall Szenario	GWl	FE	LU	WU	RD	Reference
Erneuerbare							
Kernenergie	US Strommix	-98%	-13%	-44%	48%	Na	(Wildeman 2020)
Windkraft	US Strommix	-97%	-14%	-67%	-96%	NA	(Wildeman 2020)
Windkraft	Schwedischer Strommix	-18%	29%	-74%	-68%	-75%	(Martin et al. 2023)
Sonnenenergie	US Strommix	-92%	-9%	-63%	-79%	NA	(Wildeman 2020)
Sonnenenergie (onsite)	Schwedischer Strommix	3%	9%	na	-7%	9%	(Martin et al. 2023)
Sonnenenergie (onsite)	Schwedischer Strommix	5%	19%	na	-13%	19%	(Martin et al. 2022)
Wind- und Wasserkraft	Schwedischer Strommix	-20%	-36%	-87%	36%	-77%	(Martin et al. 2023)
Sonnenenergie (onsite)	Singapore Strommix	-40%	na	na	na	na	(Li et al. 2020)
Andere Strommixe							
Schwedischer Strommix	Nordischer Strommix	14%	-18%	-19%	181%	27%	(Martin et al. 2023)
Nordischer Strommix	Schwedischer Strommix	-40%	na	na	na	na	(Martin and Molin 2018a)

GWl: Globale Erwärmung

FE: Süßwassereutrophierung

LU: Landverbrauch

WU: Wasserverbrauch

RD: Verbrauch fossiler Ressourcen

Integration in die Lebensmittelversorgungskette (Literatur)

Die hohe Abhängigkeit von Elektrizität deutet auch darauf hin, dass Vertical Farming gut für die Integration in intelligente Netze geeignet sein könnte und sogar als Netzstabilisator fungieren könnte, wenn es mit fortschrittlichen Energiespeicherlösungen ausgestattet wäre. Da erneuerbare Energiequellen weiterhin ins Netz integriert werden, könnten vertikale Farmen ihren Energieverbrauch dynamisch anpassen, um Schwankungen in der erneuerbaren Energieproduktion aufzunehmen.

Darüber hinaus erhöht die Nutzung erneuerbarer Energiequellen die allgemeine Nachhaltigkeit des vertikalen Landbaus, was wiederum seine potenzielle Integration in nachhaltige Lebensmittelversorgungsketten erhöht. Da die Verbraucher zunehmend nachhaltigere Lebensmitteloptionen fordern, könnte Vertical Farming, angetrieben durch erneuerbare Energien, eine attraktive Lösung darstellen.

Die Wahl der Energiequelle ist entscheidend für die Umweltleistung von Vertical Farming. Da diese Systeme weiterentwickelt werden und erneuerbare Energien immer häufiger werden, ist eine allgemeine Verbesserung der Nachhaltigkeit des Vertical Farming wahrscheinlich, was zu einer praktikableren und umweltfreundlicheren Option für die Lebensmittelproduktion führt.

Kreislaufwirtschaft im Kontext des Vertical Farming (Literatur)

In den vorherigen Abschnitten wurden die Umweltauswirkungen des Vertical Farming systematisch anhand der vorhandenen Literatur untersucht. Die bisherigen Ausführungen haben Vertical Farming Szenarien mit linearen Ansätzen betrachtet. Die rasche Ausbreitung der Kreislaufwirtschaft in verschiedenen Industriezweigen fördert jedoch die Integration des Vertical Farming in städtische Umgebungen. Innerhalb der Lieferkette des Vertical Farming könnte die Kreislaufwirtschaft (CE) durch Energieintegration mit anderen Industriezweigen, die Verwendung von Rest- und Abfallströmen als Wachstumsmedium und Dünger sowie den Vertrieb des Produkts am Produktionsort entwickelt werden. In diesem Kontext wurde das Potenzial zur Reduzierung der Umweltauswirkungen des Vertical Farming durch die Entwicklung von CE-Ansätzen aus den verfügbaren Studien bewertet.

Umweltkompromisse des Vertical Farming mit Gewächshäusern und Freilandanbau

In diesem Abschnitt wird die Klimaauswirkung des Vertical Farming mit anderen Arten landwirtschaftlicher Modelle verglichen, die auf der Literaturübersicht für den Freilandanbau und Gewächshäuser basieren. Obwohl Freiland- und Gewächshauslandwirtschaft die dominanten Anbauformen sind, gibt es nicht viele LCA-Studien, welche die Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit diesen landwirtschaftlichen Aktivitäten quantifizieren. Die meisten der vorhandenen Studien enthalten jedoch Klimaauswirkungen als die häufigste Umweltschadenskategorie. Daher wurden die Studien von (Barla et al. 2020), (Blom et al. 2022a), (Goldstein et al. 2016), (Rothwell et al. 2016) und (Bartzas et al. 2015) ausgewählt, um den CF des vertikalen Landbaus mit Gewächshäusern und Freiland zu vergleichen (**Tabelle 8**).

Kurz gesagt, die Auswahl der besten landwirtschaftlichen Praxis hängt vom Ort des Anbaus ab. Tatsächlich sollte das Umweltprofil verschiedener landwirtschaftlicher Methoden unter Berücksichtigung der Klimabedingungen, der Ressourcenverfügbarkeit und der Vermarktung des Produkts bewertet werden. Zum Beispiel ist für skandinavische Länder wie Schweden, in denen Gemüse aus anderen Ländern importiert wird, die vertikale Option eine praktikable Möglichkeit, um große Transporte zu vermeiden. Andererseits könnte in ariden Klimazonen, in denen der Stress auf die Wasserressourcen sehr hoch ist, der vertikale Landbau eingesetzt werden, um die Nahrungsmittelnachfrage der Region sicherzustellen und die Wasserressourcen effizient zu nutzen, da hydroponische Systeme im vertikalen Landbau die Wassernutzungseffizienz aufgrund ihres geschlossenen Wasserkreislaufs erheblich steigern. Dies führt zu hoher Wassereffizienz und keinem Düngemittelabfluss, der Wasserströme kontaminiert.

Tabelle 8
LCA-Studien zur Salatproduktion in Gewächshäusern und im Freiland.

Gewächshaus	Standort	Systemgrenzen	Energieintensive Klimatisierung	Carbon footprint (kg CO ₂ eq)
(Rothwell et al. 2016)	Australien	Cradle to shelf	na	0,5
(Bartzas et al. 2015)	Italien/Spanien	Cradle to gate	na	0,23
(Goldstein et al. 2016)	USA/Boston	Cradle to shelf	Heizung	2,15
(Barla et al. 2020)	Griechenland	Cradle to shelf	Heizung	2,17-3,54
(Blom et al. 2022a)	Niederlande	Cradle to grave	Solarheizung	0,75-1,45
Freiland-Anbau				
(Rothwell et al. 2016)	Australien/Victoria	Cradle to shelf	na	0,48
(Bartzas et al. 2015)	Italien	Cradle to gate	na	0,24
(Goldstein et al. 2016)	USA/Boston	Cradle to shelf	na	0,23
(Blom et al. 2022a)	Niederlande	Cradle to grave	na	0,49

Ökobilanz der „BrightBox“ in Venlo (Niederlande)

Um ein Basis-Modell für die Ökobilanz des Vertical Farming zu erstellen, wurde im Rahmen des Projekts eine Fallstudie ausgewählt. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der ausgewählten Fallstudie sowie der Implementierung von LCA-Regeln unter Einhaltung der ISO-Normen gegeben.

Die Fallstudie, die für die LCA-Studie der Vertical Farming ausgewählt wurde, ist „BrightBox“ in Venlo in den Niederlanden. Dieses forschungsbasierte Kompetenzzentrum für den mehrschichtigen Anbau bei Tageslicht wendet Experimente an, um die ideale Wachstumsformel (d.h. Licht, Luft, Temperatur, Ernährung, Wasser und Substrat) für den Anbau von Pflanzen im Kontext von Vertical Farming zu bestimmen. In dieser nicht kommerziellen vertikalen Farm wird Salat (*Lactuca sativa*) auf einer Grundfläche von insgesamt 194 m² produziert, davon sind 105 m² Grundfläche Produktionsfläche (12,8 m x 8,11 m mit fünf Pflanzebenen) und 89 m² Grundfläche Forschungszellen (zwei Forschungszellen von 6,4 m x 6,92 m und 4 m Höhe). In der Produktionszelle befinden sich vier Regale mit jeweils einer Länge von 6 m für fünf Kultivierungsschichten. Die Konstruktion enthält Rolltische, Luftansaugrohre, ein Bewässerungssystem und Pflanzpaletten (100 Paletten). Jede Forschungszelle enthält zwei Gestelle (jeweils 4,8 m lang) für drei Kultivierungsschichten. In die Forschungszellen passen die gleichen Komponenten wie in den Produktionsbereich, nur die Anzahl der Pflanzpaletten (hier: 24) unterscheidet sich.

Definition von Ziel und Umfang

Diese Studie wurde durchgeführt, um die Umweltleistung einer Vertical Farm anhand einer realen Fallstudie zu quantifizieren. Die Ergebnisse sollen den entsprechenden Organisationen auch bei Einschätzung helfen, wie die Umweltbelastung durch Vertical Farming durch alternative Szenarien und den Übergang von der linearen Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft reduziert werden könnte. Darüber hinaus wurden ökologische Zielkonflikte zwischen Vertical Farming und konventionellen Anbaumethoden (d. h. Freiland und Gewächshaus) identifiziert, indem die LCA-Ergebnisse mit anderen LCA-Studien über Gewächshäuser und Freilandanbau verglichen wurden.

Die Identifizierung der Systemgrenzen trägt dazu bei, die Tiefe der Studie und die Ein-/Ausschlussphasen des Lebenszyklus von Produkten zu verstehen. In der vorliegenden Studie wurde die Systemgrenze „Cradle to Gate“ gewählt, welche die vorgelagerten Prozesse zur Rohstoff- und Energiegewinnung bis hin zum Transport des Produkts in den Einzelhandel umfasst, wodurch die Abfallbehandlung vorläufig von der Studie ausgeschlossen wird. Alle Daten in dieser Studie wurden für die FU von 1 kg Frischprodukt (*Lactuca sativa*) von „BrightBox“ zur Verfügung gestellt und gesammelt. Rahmendaten, einschließlich der Infrastruktur, des Energie- und Materialeinsatzes, wurden direkt aus der Fallstudie gewonnen, indem ein Fragebogen bereitgestellt und eine wöchentliche Diskussion über die Validität der Daten durchgeführt wurde. Fehlende Daten wurden aus der Fachliteratur ergänzt. Später wurde „Simapro 3.9“ als LCA-Modellierungssoftware und die „ecoinvent“-Datenbank für die Hintergrunddaten der vorgelagerten Prozesse für Energie, Infrastruktur und Materialien verwendet.

Lebenszyklus-Inventar (LCI)

Die Phase der Lebenszyklusinventur bildet die Grundlage für jede LCA-Studie, die später auf die Umweltauswirkungen übertragen und quantifiziert werden kann. Dies sollte durch die Abbildung der Input- und Output-Flüsse eines Produktsystems erfolgen. Im Falle von Vertical Farming umfasst das Lebenszyklusinventar alle Materialien, Energie und Transporte, die innerhalb der Systemgrenze beteiligt sind.

Wie dargelegt, kann die Systemgrenze in drei Stufen unterteilt werden:

- In der ersten Stufe, der sogenannten Upstream-Produktion, werden Material und Energie erzeugt.
- In der zweiten Stufe, der „Produktionsphase“, werden Energie und Material für Infrastruktur und Betrieb eingesetzt, die sich beide innerhalb der Produktionsphase befinden. Die Prozesse in dieser Phase sind Gebäude, Anbaufläche, Pflanzenbelichtung, Bewässerungssystem, Heizung-Lüftung-Klima (HLK), Beleuchtung des Gebäudes und Nährstoffversorgung. Außerdem ist für einige der Materialien wie Nährstoffe, Samen und Kohlendioxid ein regelmäßiger Transport in einem bestimmten Zeitrahmen erforderlich. Der Transport von Betriebsmaterial wird dementsprechend in diese Stufe einbezogen.
- In der dritten Phase einer Vertical Farm werden, nach einem Wachstum von ca. 7 Wochen, die Pflanzen geerntet, verpackt und in den Einzelhandel transportiert. Diese Phase des Lebenszyklus wird als Herunterladen bezeichnet.

Die fallspezifischen Rahmendaten wurden auf der Grundlage der Beobachtung vor Ort, den Antworten in dem selbstentwickelten Fragebogen, der Verwendung des Handbuchs von „BrightBox“ und der Literaturrecherche gesammelt. Die Erfassung des Lebenszyklusinventars erfolgte iterativ und die Daten wurden durch die Beratung des Fachspezialisten Jasper den Besten, als einer der Mitarbeiter dieses Forschungsprojekts, aktualisiert. Hintergrunddaten zur stofflichen und energetischen Aufbereitung wurden aus der ecoinvent-Datenbank ausgewählt. Es ist wichtig zu beachten, dass einige Daten für Hintergrundprozesse möglicherweise nicht genau mit den Datensätzen übereinstimmen. Es ist jedoch möglich, einen dort verfügbaren Proxy zu verwenden.

Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus

Das Lebenszyklusinventar sollte in Umweltwirkungskategorien übersetzt werden, indem in der LCA-Software vordefinierte Methoden zur Ökobilanzierung implementiert werden. LCI-Methoden werden im Allgemeinen in Mittelpunkt- und Endpunktansätze eingeteilt. Jede dieser Methoden enthält einen bestimmten Detaillierungsgrad. In der Mitte der Auswirkungen werden einzelne Umweltprobleme berücksichtigt, indem die äquivalenten Emissionen von Stoffen dargestellt werden. Zum Beispiel:

Treibhauspotenzial (Global warming potential in kg CO₂ eq) und Versauerung (Acidification in kg SO₂ eq) sind zwei Beispiele für mittlere Wirkungskategorien, die in kg Kohlendioxidäquivalent beziehungsweise kg Schwefeldioxidäquivalent quantifiziert werden.

Es gibt verschiedene Kategorien von Lebenszyklusausswirkungen, die der Ökobilanz eine umfassende Quantifizierung der Umweltschäden ermöglichen. Es ist jedoch wichtig zu berücksichtigen, dass die verfügbaren LCIA-Methoden (Life Cycle Impact Assessment Methoden) standortspezifisch sind, da die LCIA-Entwickler seit langem die Bedeutung des räumlichen Faktors der Umweltauswirkungen erkannt haben. So wurden standortspezifische Charakterisierungsfaktoren entwickelt, die räumliche Inputs aus Bereichen wie Klimatologie, Geologie, Hydrologie, Ökologie, Humangeographie und Umwelttechnik umfassen. Daher gibt es unter den bestehenden LCIAMs sowohl europäische als auch außereuropäische Methoden, wobei die meisten von ihnen europäisch sind. So sind beispielsweise die **ILCD-** oder **ReCiPe-Methode** europäische Modelle, während die **TRACILCIA-Methode** auf nordamerikanische Verhältnisse angewendet werden kann.

In dieser Studie wurde eine, auf europäische Verhältnisse zugeschnittene LCIA-Methode ausgewählt, welche 17 Wirkungsindikatoren enthält:

- Klimawandel (kg CO₂ eq),
- Erschöpfung der fossilen Ressourcen (kg Öl eq),
- Süßwasserökotoxizität (kg 1,4-DCB eq),
- Süßwassereutrophierung (kg Phosphor eq),
- Humantoxizität (1,4-Dichlorbenzol; kg 1,4-DCB eq),
- ionisierende Strahlung (kg U235 eq),
- maritime Ökotoxizität (1,4-Dichlorbenzol; kg 1,4-DCB eq),
- maritime Eutrophierung (kg Stickstoff eq),
- Metallverarmung (kg Eisen eq),
- Ozonabbau (Trichlorfluormethan; kg CFC-11 eq),
- Feinstaubbildung (kg PM10 eq),
- photochemische Oxidantien-Bildung (kg NMVOC eq),
- terrestrische Versauerung (kg SO₂ eq),
- terrestrische Ökotoxizität (1,4-Dichlorbenzol; kg 1,4-DCB eq),
- Landnutzung (m² Anbauflächen eq) und
- Wasserverarmung (m³ Wasser eq).

Obwohl es wichtig ist, alle genannten Wirkungskategorien methodisch zu quantifizieren und zu analysieren, ist es für präzise Ergebnisse erforderlich, die für die untersuchten Lieferketten relevantesten Umweltschadenskategorien zu berücksichtigen.

Im Bereich VF sollten die für die landwirtschaftliche Produktion relevantesten Wirkungskategorien berücksichtigt werden. In dieser tragen N_2O , CO_2 und CH_4 sowie Feinstaub über einen Zeitraum von 100 Jahren am meisten zur globalen Erwärmung bei.

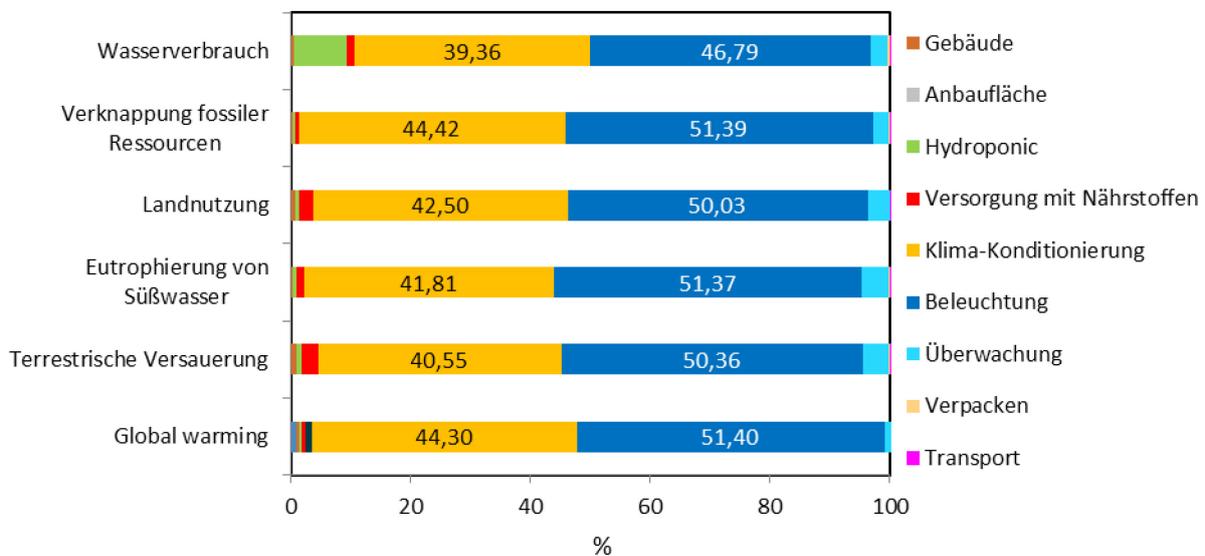
Darüber hinaus nimmt die landwirtschaftlich nutzbare Fläche drastisch ab, was sich in der weltweiten Abnahme der zur Verfügung stehenden Fläche um 33 % in den letzten 40 Jahren widerspiegelt. Dies zeigt, wie wichtig die Quantifizierung und Interpretation der Flächennutzung für landwirtschaftliche Lieferketten ist. Ebenso ist der Agrarsektor einer der Hauptverursacher des weltweiten Wasserverbrauchs. Entsprechend ist ein quantifizierter Wert für diese Schadenskategorie notwendig. Andere stark betroffene Kategorien in Verbindung mit landwirtschaftlichen Aktivitäten sind die Versauerung bzw. die Eutrophierung des Bodens, die sich aus der Ablagerung von Schwefeldioxid und Ammoniak sowie dem übermäßigen Einsatz von Phosphor- und Stickstoffdüngern ergeben. Schließlich hat der Agrarsektor schon immer die Verfügbarkeit von Ressourcen stark belastet, was auf den hohen Verbrauch fossiler Brennstoffe in den verschiedenen Phasen der Lieferkette zurückzuführen ist. Diese Auswirkungen könnten unter dem Oberbegriff der Ressourcenverfügbarkeit als "**fossile Ressourcenknappheit**" bewertet werden.

Tabelle 9 zeigt das Ergebnis des ersten Durchlaufs des LCA-Modells für „BrightBox“ in diesem Projekt. Demzufolge entspricht die globale Erwärmung 9,5 kg CO_2 Äquivalent pro kg und Jahr Frischprodukt bei einem Stromverbrauch von 14,5 kWh pro kg und Jahr Frischprodukt, der aus dem niederländischen Strommix gedeckt wird. Wie aus **Abbildung 26** hervorgeht, entfallen in allen untersuchten Umweltschadenskategorien mehr als 85 % der Umweltbelastungen auf die Pflanzenbelichtung und Klimatisierung und dem damit verbunden hohen Stromverbrauch. Daher könnte die Optimierung der Umweltleistung im vertikalen Landbau entweder durch eine Verringerung des Stromverbrauchs oder durch die Verwendung umweltfreundlicher Stromquellen erreicht werden. Im folgenden Abschnitt wurde daher der Einfluss der Strombeschaffung auf den Klimawandel beim vertikalen Landbau durch Szenarioanalysen untersucht.

Tabelle 9
Ergebnisse der Lebenszyklus-Folgenabschätzung für „BrightBox“ (Bezugseinheit: 1 kg Frischprodukt im Jahr)

Kategorie Auswirkungen	Einheit	Betrag
Globale Erwärmung	kg CO_2 eq	9,49
Terrestrische Versauerung	kg SO_2 eq	0,013
Eutrophierung von Süßwasser	kg Phosphor _{eq}	0,0004
Landnutzung (Getreideanbau)	m^2a crop _{eq}	0,15
Verknappung fossiler Ressourcen	kg Öl	2,73
Wasserverbrauch	m^3	0,061

Abbildung 26
Beiträge der Prozesse an den Umweltkategorien.



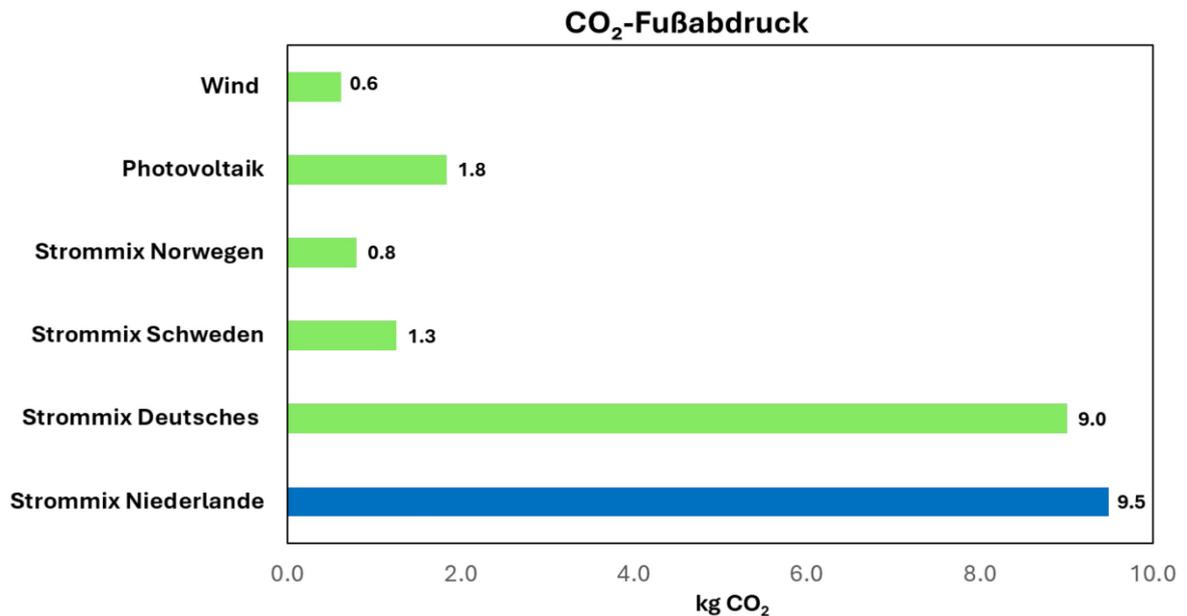
Szenarioanalyse: Strombeschaffung

In der aktuellen Arbeit ergibt die Analyse von Vertical Farming einen sehr hohen Beitrag zur globalen Erwärmung. Wie jedoch bereits erwähnt, spielt die Ausprägung des Stromsystems eine wichtige Rolle für die Umweltbilanz von Vertical Farming. Unter Berücksichtigung dieses Faktors wurde die Auswirkung der Stromversorgung durch Szenarioanalysen bewertet. Dazu wurde der Strommix der Niederlande mit den folgenden Optionen verändert:

- ES 1: 100% Stromversorgung aus Windenergie
- ES 2: 100% Stromversorgung aus Photovoltaik
- ES 3: „Strommix Schweden“ entspr. "ecoinvent 3.9.1"
- ES 4: „Strommix nordische Länder“ entspr. "ecoinvent 3.9.1"
- ES 5: „Aktueller Strommix Deutschland“ entspr. "ecoinvent 3.9.1"

Wie in **Abbildung 27** dargestellt, hat die Strombeschaffung große Auswirkungen auf den Gesamtkohlenstoff-Fußabdruck des vertikalen Landbaus. Die Umstellung vom niederländischen Strommix auf weniger kohlenstoffintensive Strommixe führt zu einer signifikanten Reduktion des CO₂-Fußabdrucks. Beispielsweise hat der Anbau von Kopfsalat in einer vertikalen Farm mit Windenergieversorgung eine sehr geringe Klimaauswirkung von 0,6 kg CO₂ pro kg frischem Kopfsalat. Ebenso führte der Wechsel vom niederländischen Strommix zur Photovoltaik zu einer Reduktion um 81 % der Klimaauswirkung von in einer vertikalen Farm angebautem Kopfsalat. Dies verdeutlicht, dass in Ländern mit saubereren Strommischen der Anbau von Kopfsalat ein vielversprechender Ansatz wäre, um große Entfernungen von Kühltransport zu vermeiden. Zum Beispiel könnten in Schweden und Norwegen, wo die Strommixe sehr kohlenstoffarm sind, die Kohlenstoff-Fußabdrücke der Kopfsalatproduktion in vertikalen Farmen jeweils 0,8 bis 1,3 kg CO₂ pro kg frischem Kopfsalat betragen, was deutlich niedriger ist als in Deutschland und den Niederlanden (9 bis 9,5 kg CO₂ pro kg frischem Kopfsalat).

Abbildung 27
Vergleich der Auswirkung der Stromversorgung auf die Umweltleistung von Vertikal Farming.



Vergleich der Umweltleistung von BrightBox mit konventionellem Landbau

Wie zuvor angegeben, wurden die Auswirkungen des Klimawandels konventioneller Landbaumethoden (Gewächshaus- und Freilandanbau) auf den Anbau von Salat durch Literaturstudien untersucht. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Studien, welche die wichtigsten Umweltschadenskategorien verschiedener Landbaumethoden untersuchen, wurden in diesem Projekt drei weitere Szenarien entwickelt, um die Umweltleistung von Vertical Farming im Vergleich zu bodenbasiertem und hydroponischem Gewächshausanbau zu vergleichen. Drei Szenarien für Freilandanbau, hydroponische Gewächshäuser und bodenbasierte Gewächshäuser wurden gemäß den LCA-Modellen entwickelt, die in einer kürzlich durchgeführten Studie von Blom et al. 2022 bereitgestellt wurden. **Abbildung 28** fasst die wichtigsten Merkmale der für die Modellierung ausgewählten Farmen zusammen. Das Lebenszyklusinventar wurde teilweise aus den Schätzungen von Blom et al. 2022 und zusätzlich verfügbaren Ressourcen übernommen.

Abbildung 28
Konfigurationen der konventionellen Landwirtschaftsszenarien

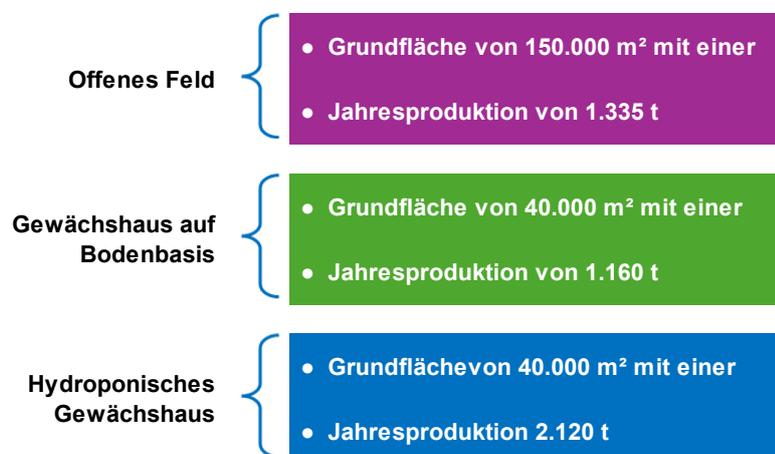


Tabelle 10 stellt die Umweltauswirkungen verschiedener Landbaumethoden (Freiland, bodenbasiertes Gewächshaus und hydroponisches Gewächshaus) aufgeschlüsselt nach den untersuchten Umweltschadenskategorien dar. **Abbildung 29** ist die grafische Darstellung der in Tabelle 10 präsentierten Ergebnisse. Wie dargestellt, hat der Anbau von Salat in einer Vertical Farm in den Niederlanden unter aktuellen Rahmenbedingungen deutlich größere Umweltbelastungen im Vergleich zu anderen Landbaumethoden. Tatsächlich führte der hohe Energieverbrauch beim Vertical Farming in allen untersuchten Szenarien zu schlechteren Umweltauswirkungen, welche sich aus den durch die Stromerzeugung verursachten Umweltbelastungen ergeben.

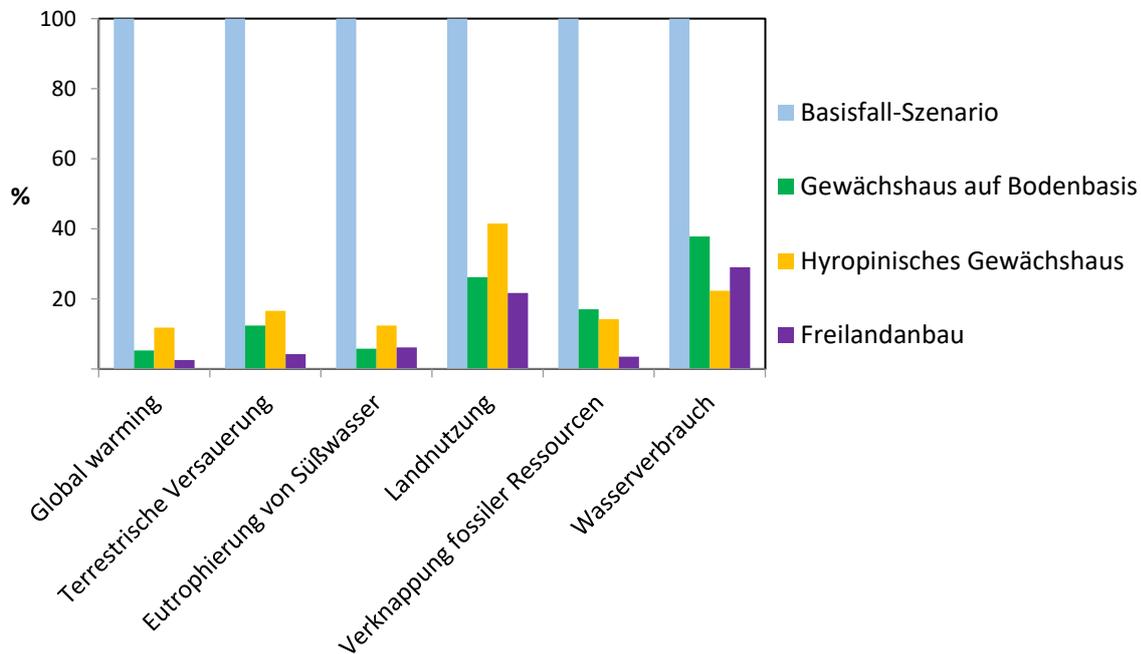
Ebenso hat die künstliche Pflanzenbelichtung in hydroponischen Vertical Farmen im Vergleich zu bodenbasierten Gewächshäusern und Freilandanbau zu größeren Umweltauswirkungen geführt. Obwohl der Düngerverbrauch bei bodenbasierten Anbaumethoden höher ist, ist bei jeder Anbaumethode, bei der ein höherer Strombedarf für die Klimatisierung besteht, die Umweltauswirkungen durch die Stromerzeugung entsprechend hoch.

Tabelle 10

Quantifizierte Ergebnisse der Umweltauswirkungen von Freiland- und bodenbasiertem Gewächshausanbau sowie hydroponischem Gewächshaus.

Kategorie Auswirkungen	Einheit	Freiland Anbau	Gewächshaus auf Bodenbasis	Hydroponisches Gewächshaus
Globale Erwärmung	kg CO ₂ eq	0,23	0,49	1,11
Terrestrische Versauerung	kg SO ₂ eq	0,0005	0,0015	0,002
Eutrophierung von Süßwasser	kg Phosphor eq	0,000049	0,00012	0,0002
Landnutzung (Getreideanbau)	m ² a crop eq	0,053	0,042	0,061
Verknappung fossiler Ressourcen	kg Öl	0,095	0,46	0,38
Wasserverbrauch	m ³	0,017	0,02	0,013

Abbildung 29
Umweltauswirkungen des Anbaus von Salat in vier Landwirtschaftsszenarien



Auswirkungen des Transports auf den CO₂-Fußabdruck des Salatbaus in Vertical Farmen im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden

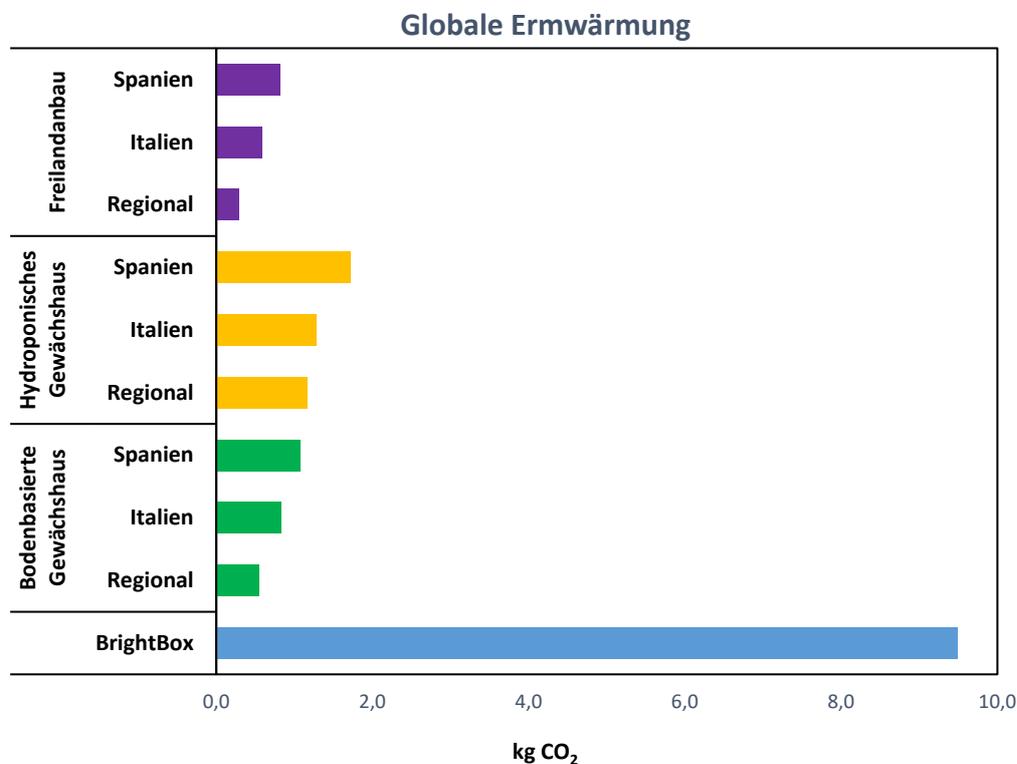
Im Fall von Venlo (Niederlande), das in dieser Studie untersucht wurde, beträgt die durchschnittliche Entfernung zwischen konventionellen Anbaumethoden und dem Salat-Einzelhandelsmarkt nur 20 km. In großen Städten ist die durchschnittliche Entfernung von konventionellen Anbaumethoden zum Salat-Einzelhandelsmarkt jedoch deutlich größer. Außerdem muss Salat zu verschiedenen Zeiten aus anderen Ländern importiert werden, was einen gekühlten Überlandtransport erforderlich macht. Daher wurden in dieser Studie Transportszenarien entwickelt, um die Auswirkungen des Transports auf die Umweltbilanzen verschiedener Anbaumethoden zu bewerten. Für größere Transportdistanzen auf regionaler Ebene wurde eine durchschnittliche Entfernung von 300 km gewählt. Im Falle der Niederlande als Nettoimporteure von Salat sind die Hauptländer, aus denen Salat importiert wird, Italien und Spanien mit gekühlten Transportdistanzen von 1.300 km bzw. 2.000 km.

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Szenarioanalyse für den Transport des importierten Salats aus zwei Anbauregionen (d.h. aus Spanien und Italien) sowie ein regionales Szenario, das auf den untersuchten konventionellen Anbau angewendet wurde. In allen Fällen ist der vertikale Anbau gegenüber konventioneller Landwirtschaft in puncto CO₂-Intensität schlechter, wenn man die geografischen Grenzen der Niederlande und den aktuellen Stand von VF bei BrightBox berücksichtigt. Dies zeigt nochmal die Auswirkungen der hohen Kohlenstoffintensität des niederländischen Strommixes, welche die Klimaauswirkungen von in vertikalen Farmen angebautem Salat verschlechtert.

Dennoch könnte der Anbau von Salat in vertikalen Farmen in Schweden oder Norwegen umweltfreundlicher sein als ein Import aus Spanien oder Italien. Zum Beispiel liegt der Kohlenstoff-Fußabdruck für den Anbau von Salat in Spanien mit anschließendem Transport nach Skandinavien zwischen 0,82 und 1,71 kg CO₂ pro kg frischem Salat, während der einer vertikalen Farm in Schweden bei 0,8 kg pro kg frischem Salat liegt. Dies zeigt, dass vertikaler Anbau eine praktikable Option sein könnte, mit einem umweltfreundlicheren Strommix und in Regionen mit hoher Salatnachfrage, um gekühlten Überlandtransport zu vermeiden und frische Produkte lokal

anzubieten. Daher hängt die Sinnhaftigkeit dieser Anbaumethode von regionalen Gegebenheiten und der Wettbewerbssituation ab.

Abbildung 30
Auswirkungen von Transportszenarien auf die globale Erwärmung bei der Lieferung von Salat an Einzelhandelsmärkte



Kreislaufwirtschaft im Kontext von Vertical Farming

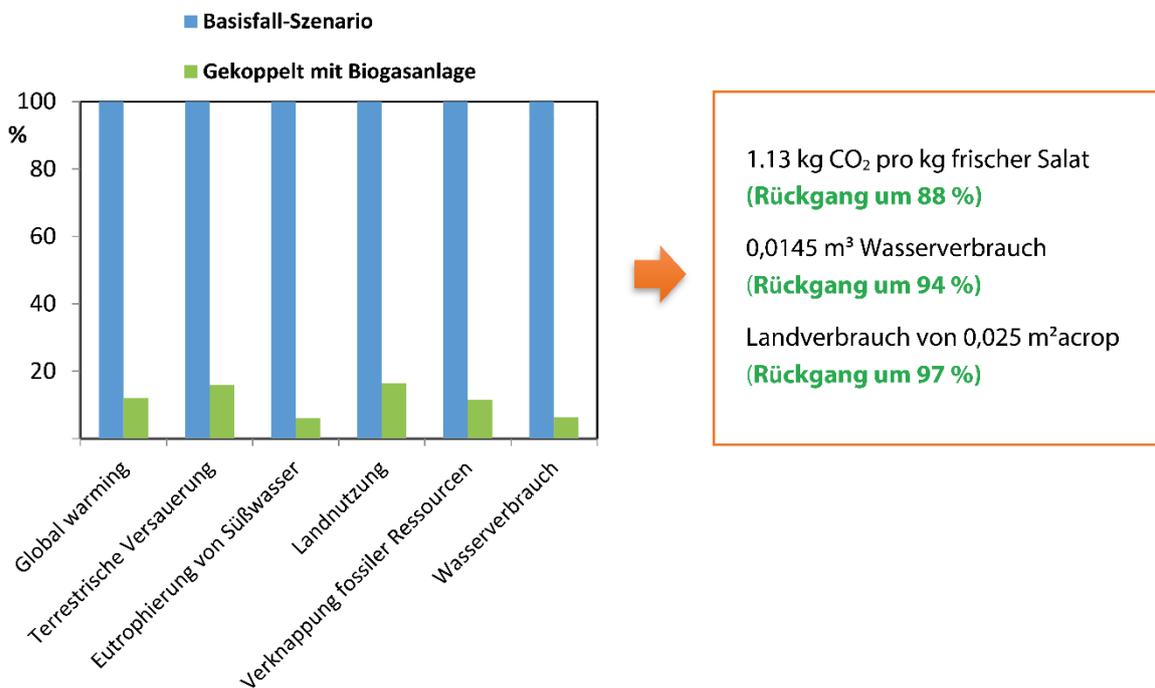
Da Vertical Farming in städtischen Umgebungen weit verbreitet ist, könnte die potenzielle Symbiose zwischen Nährstoffen und Energie, die aus städtischem Abfall gewonnen werden, die Kreislaufwirtschaft im Kontext von Vertical Farming fördern. Deshalb kann die Integration von abfallbasierten Biogasanlagen mit Vertical Farming ausreichend Dünger, erneuerbaren Strom und biogenes CO₂ für Vertical Farming bereitstellen. Um die Auswirkungen der Kopplung einer Biogasanlage mit der Vertical Farm auf die Umweltschadenskategorien zu untersuchen, wurden allgemeine Informationen über eine abfallbasierte Biogasanlage in der Nähe von BrightBox für die weitere LCA-Modellierung und -Analyse ermittelt. Die Fallstudie ist die Attero-Biogasanlage in der Gemeinde Venlo. Diese Biogasanlage verarbeitet den organischen Anteil des städtischen Abfalls, um Energie und Bio-Dünger zu produzieren. Auch wird eine Membran-Biogasaufbereitungstechnologie implementiert, um Biogas in Biomethan von Erdgasqualität aufzubereiten, wobei aus CO₂ gewonnenes Biogas weiter gespeichert und für andere Zwecke verwendet werden kann. Ein vereinfachtes Prozessflussdiagramm für dieses Kreislaufwirtschaftsszenario wird in **Abbildung 31** dargestellt. Wie angegeben, werden Vertical Farms mit CO₂-Bioenergie und Dünger aus der Biogasanlage versorgt. Das Lebenszyklusinventar wurde gemäß allgemeinen Daten für organische Abfall-Biogasanlagen und Literatur ermittelt. Auch die Spezifikationen von Bio-Dünger und Biogas wurden der Webseite der Anlage entnommen, um die erforderliche Menge an Dünger zu bestimmen, um den Nährstoffbedarf von hydroponischen Vertical Farms zu erfüllen.

Abbildung 31
Vereinfachtes Prozessflussdiagramm einer mit einer Biogasanlage gekoppelten Vertical Farm



Abbildung 32 vergleicht die Umwelleistung des Basisfallszenarios mit einer Kombination aus Vertical Farm und Biogasanlage. Demnach werden bedeutende Umweltverbesserungen erzielt, wenn Vertical Farmen von Energie, Nährstoffen und aus CO₂-abgeleiteten Abfällen profitieren. Aufgrund der niedrigen Hintergrundemissionen von aus Biogas erzeugter Elektrizität, wird ein erheblicher Teil der Umweltbelastung durch Vertical Farming gemildert. Beispielsweise hat der Anbau von Salat in der Vertical Farm im Szenario der Kreislaufwirtschaft einen niedrigen Klimawandel-Einfluss von 1,13 kg CO₂ pro kg frischem Salat. In ähnlich Weise reduzieren sich auch andere negative Umwelteinflüsse, z. B. der Wasserverbrauch oder die Landnutzung (siehe Abbildung 28).

Abbildung 32
Vergleich der Umweltauswirkungen des Basisfallszenarios mit dem entwickelten Szenario einer Kreislaufwirtschaft (Vertical Farm gekoppelt mit einer Biogasanlage in Venlo-Niederlande)



Beschreibung und Begründung von Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Die ursprünglich genehmigte Projektlaufzeit beträgt 2 Jahre, sie endet Ende Oktober 2023. Am 7.9.2022 hat Prof. Thomas Hamacher eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um 6 Monate auf April 2024 bei Frau Verena Kluth angefragt. Folgende Gründe wurden dabei angegeben:

- Die ganze Stelle, die für LCA vorgesehen wurde, konnte am 01.08.2022 besetzt werden. Leider hat sich der Einstellungsprozess für unsere Mitarbeiterin Nashmin Elyasi aus dem Iran über ein dreiviertel Jahr hingezogen. Somit bleiben uns Gelder für 9 Monate für eine Stelle (November 2021 bis Ende Juli 2022).
- Die andere Stelle (je eine halbe Stelle für 2 Mitarbeiter) haben wir von November bis Dezember 2021 bzw. November 2021 bis Ende März 2023 anderweitig finanziert, somit bleiben uns Gelder für 3 Monate für eine Stelle übrig.
- Die nicht angeforderten Gelder für insgesamt 12 Personenmonate würden uns somit die kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate für 2 Stellen erlauben, was einem Abgabetermin April 2023 entsprechen würde.

Am 13.9.2022 sicherte uns Frau Verena Kluth zu, dass es möglich sei, den Abgabetermin, um maximal 6 Monate auf Ende April 2024 zu verlängern. Dies allerdings nur unter der Bedingung, dass wir zusichern können, alle Mittel zum Ende der Projektlaufzeit, also Oktober 2023, abrufen zu können.

Somit ergibt sich der aktualisierte Zeitplan in **Tabelle 11**. An den Arbeitspaketen selbst gab es keine Änderungen, lediglich am Zeitraum der Bearbeitung.

Tabelle 11
Aktualisierter Projekt-Zeitplan

	Meilenstein	Zeitplan Antrag	Zeitplan aktualisiert
M1	CAD-Model Vertical Farm	Oktober 22	April 23
M2	LCA Gewächshaus	November 22	April 23
M3	LCA Freilandanbau	November 22	Mai 23
M4	Detailliertes Simulationsmodell	November 22	Mai 23
M5	Interpretation Validierung	April 23	Oktober 23
M6	Optimierungstool für Simulation	August 23	November 23
M7	LCA Vertical Farm mit Energiesystem	September 23	März 24
M8	Dokumentation Guideline	Oktober 23	April 24

Die Reihenfolge der zu bearbeitende LCA-Bereiche musste aufgrund fehlender Daten geändert werden. Die sich daraus ergebende Projekt-Zeitplan ist in **Tabelle 12** dargestellt.

Tabelle 12
Aktualisierter Projekt-Zeitplan und Änderungen bei der LCA

	Meilenstein	Zeitplan Antrag	Zeitplan aktualisiert
M1	CAD-Model Vertical Farm	Oktober 22	April 23
M2	LCA Vertical Farm Status Quo	November 22	April 23
M3	Vergleich LCA Vertical Farm, Freilandanbau, Gewächshaus	November 22	Juli 23
M4	Detailliertes Simulationsmodell	November 22	Juli 23
M5	Interpretation Validierung	April 23	Oktober 23
M6	Optimierungstool für Simulation	August 23	November 23
M7	LCA Vertical Farm mit Energiesystem	September 23	März 24
M8	Dokumentation Guideline	Oktober 23	April 24

Fazit

Das Hauptziel des Forschungsprojekts war es, ein optimiertes Gebäude-, Technik- sowie Energiekonzept für Vertical-Farming-Systeme zu entwickeln, um den Energiebedarf und die Umweltauswirkungen der Lebensmittelproduktion in solchen Systemen zu minimieren. Vertical Farming kann nur dann nachhaltig sein, wenn der hohe Energieverbrauch reduziert werden kann, erneuerbare Energie verwendet wird und die Integration in eine Kreislaufwirtschaft gelingt. Daher wurde untersucht, wie ein optimiertes Gebäudedesign und dessen optimierte Komponenten, insbesondere Beleuchtung und Klimatisierung, den Energiebedarf von VF-Systemen reduzieren können. Außerdem wurde analysiert, ob eine Kreislaufwirtschaft die Emissionen von Treibhausgasen ausreichend reduzieren kann, dass VF das Potenzial hat, ein nachhaltiges System für die städtische Lebensmittelproduktion zu sein.

Zur Beantwortung dieser beiden zentralen Forschungsfragen wurden im Rahmen des Projekts mehrere neue Ansätze entwickelt und erfolgreich angewandt. Diese Ansätze lassen sich in drei Analyse- und Optimierungsebenen einteilen:

- Pflanzenebene,
- Systemdesign-Ebene (VF Gebäude) und
- Ebene des integrierten Systems.

Auf der Pflanzenebene wurden neue Ansätze zur Optimierung von Beleuchtungs- und Klimatisierungsanlagen entwickelt, um ideale Wachstumsbedingungen für Pflanzen zu schaffen. Dies bedeutet, dass die Pflanzen optimale Lichtbedingungen und Klimaparameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt vorfinden. Darüber hinaus können die hier entwickelten Ansätze genutzt werden, um einheitliche Bedingungen für alle Pflanzen in einem Anbaubereich zu schaffen. Damit kann der gleiche Ertrag und die gleiche Qualität der Pflanzen erzielt werden.

Auf der Systemdesign-Ebene werden die Systemkomponenten optimiert, um den Energiebedarf zu minimieren und gleichzeitig den Ertrag zu maximieren. Daher wurden auf dieser Ebene optimierte Gebäudekonzepte, wie z. B. die Auswahl von Materialien und Wanddicken, entwickelt, um den Gesamtenergiebedarf zu senken. Dabei wurden Synergien zwischen Anbauflächen und Büroräumen deutlich, die in einem VF-System genutzt werden können, um den Energiebedarf zu reduzieren.

Auf der Ebene des integrierten Systems wurden externe Faktoren und Systeme für die Optimierung von Vertical-Farming-Systemen berücksichtigt. Dazu gehören insbesondere Kombinationen mit anderen Systemen, wie sie in den Kreislaufwirtschaftsmodellen berücksichtigt werden, sowie Faktoren wie der Strommix. Um einen Richtwert für die Umweltleistung der vertikalen Landwirtschaft zu ermitteln, wurden die Ergebnisse aus der Literatur für eine einzelne funktionale Einheit von 1 kg frischem Blattgemüse aufbereitet und ausgewertet. Die Analyse zeigt die Auswirkungen von VF auf die globale Erwärmung. Die ermittelten Werte variieren zwischen 1,44 kg CO₂ und 25 kg CO₂ pro 1 kg Frischprodukt, je nach Energieverbrauch und Strommix. Um die Umweltbelastungen einer realen VF-Fallstudie zu quantifizieren und die Ergebnisse mit denen aus der Literatur zu vergleichen, wurde eine Ökobilanz für BrightBox (Niederlande) als operative Fallstudie durchgeführt. In dieser LCA-Studie beläuft sich die Auswirkung des VF auf die globale Erwärmung auf 9,49 kg CO₂/kg Frischprodukt, bei einem damit verbundenen Stromverbrauch von 15 kWh, bewertet mit dem derzeitigen Strommix in den Niederlanden. Wird dieselbe VF jedoch mit dem schwedischen oder dem nordischen Strommix versorgt, sinkt der CO₂-Fußabdruck auf 0,8 bzw. 1,3 kg CO₂/kg Frischprodukt. Die größte Verringerung des CO₂-Fußabdrucks wird erreicht, wenn der Energiebedarf der vertikalen Farm mit Windenergie gedeckt wird.

Vergleicht man die Umweltverträglichkeit der vertikalen Farm mit der von Gewächshäusern oder Freilandanbau, so zeigen sich mit dem niederländischen Strommix in den meisten Umweltschadens-Kategorien höhere Auswirkungen durch VF. Wenn Strom aus erneuerbaren Energien verfügbar ist, kann das mit VF produzierte Gemüse mit konventionellen Anbaumethoden konkurrieren und Kühltransporte auf dem Landweg vermei-

den. Darüber hinaus könnte die Integration von VF mit städtischen Reststoffen eine Strategie für den Übergang von einer linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft sein. Die Integration von abfallbasierten Biogasanlagen mit vertikalen Farmen könnte diese mit ausreichend Nährstoffen, CO₂-Zusätzen und Energie versorgen. Dadurch konnten in diesem untersuchten Szenario alle Umweltbelastungen um 84 % bis 97 % reduziert werden.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Umweltverträglichkeit von VF stark von der Höhe des Energieverbrauchs und der Energiebeschaffung abhängt. In Gebieten mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien oder einer möglichen Integration der vertikalen Landwirtschaft mit städtischen Reststoffen könnte VF eine praktikable Option sein, um Umweltvorteile zu erzielen, indem die Abholzung von Wäldern und der Transport auf dem Landweg vermieden und gleichzeitig der Selbstversorgungsindex von Blattgemüse erhöht wird.

Weiterer Forschungsbedarf

Die im Rahmen dieses Projekts erzielten Ergebnisse, einschließlich der neu entwickelten Methoden und Konzepte, bilden eine wertvolle Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten zu Vertical-Farming-Systemen. Einige der möglichen zukünftigen Erweiterungen der vorgestellten Arbeiten sind im Folgenden beschrieben:

- **Beleuchtung und Klimatisierung:** Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Methoden zur Analyse und Optimierung der Beleuchtung und Klimatisierung in Vertical-Farming-Systemen entwickelt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Schaffung idealer Wachstumsbedingungen für die Pflanzen und damit auf der Maximierung des Ertrags. Die Kostenaspekte wurden jedoch nicht direkt berücksichtigt, so dass einer der ersten zukünftigen Schritte darin bestehen würde, alle relevanten Kosten in die Optimierungsverfahren einzubeziehen, um auch den wirtschaftlichen Nutzen zu quantifizieren.
- **Experimentelle Validierung:** Obwohl im Rahmen des Projekts eine gewisse Validierung der Simulationsmethoden durchgeführt wurde (z. B. für Lichtsimulationen), besteht noch Bedarf an weiteren experimentellen Tests und Validierungen der vorgeschlagenen Methoden. Dies gilt insbesondere für die entwickelten CFD-Simulationsmodelle, die für die Lüftungsanalyse und -optimierung verwendet werden.
- **Die Bewertung der Nachhaltigkeit von VF** erfordert weitere Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit und der sozialen Indikatoren. Die Ökobilanz könnte für die soziale und wirtschaftliche Analyse weiter ausgebaut werden. Anschließend sollte eine multikriterielle Analyse durchgeführt werden, um den besten Fahrplan für eine nachhaltige Entwicklung von VF innerhalb des Lebensmittelsektors zu ermitteln.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Thomas Hamacher (TU München)

Seyedeh Nashmin Elyasi (TU München)

Smajil Halilovic (TU München)

Heinrich Kleeberger (TU München)

Dr. Petra Liedl (TU München)

Prof. Dr. Heike Susanne Mempel (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Weihenstephan)

Sabine Wittmann (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Weihenstephan)

Jasper den Besten (HAS University, The Netherlands)

Vivek Jadhav (Precede, Singapur)

Weitere Mitwirkende

Annalena Daniels (TU München)

Michael Fink (TU München)

Studierende

Vincent Kammerl (Masterarbeit - ENS)

Sophie Grabowski (Masterarbeit – MSE, ENS)

Stefan Tischler (Masterarbeit - ENS)

Manas Kulkarni (Projektpraktikum an der ENS – ProPENS)

Sai Pranay Padakanti (Projektpraktikum an der ENS – ProPENS)

Georg Sibbel (Projektpraktikum an der ENS – ProPENS)

Ashank Agrawal (Masterarbeit - ENS)

Anand Parmar (Masterarbeit - ENS)

Hristiyan Vasilev (Masterarbeit - ENS)

Fabian Karman (Forschungspraxis – ENS)

Literaturverzeichnis

Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 24.

Barla, Sofia-Anna; Salachas, Georgios; Abeliotis, Konstadinos (2020): Assessment of the greenhouse gas emissions from aeroponic lettuce cultivation in Greece. In *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 5, pp. 1–7. Bartzas, Georgios; Zaharaki, Dimitra; Komnitsas, Kostas (2015): Life cycle assessment of open field and greenhouse cultivation of lettuce and barley. In *Information Processing in Agriculture* 2 (3-4), pp. 191–207.

Blom, T.; Jenkins, A.; Pulselli, R. M.; van den Dobbelen, AAF (2022a): The embodied carbon emissions of lettuce production in Vertical Farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. In *Journal of Cleaner Production* 377, p. 134443.

Blom, T.; Jenkins, A.; Pulselli, R. M.; van den Dobbelen, AAF (2022b): The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. In *Journal of Cleaner Production* 377, p. 134443.

Bohn, K., & Viljoen, A. (2012): CPUL: Continuous Productive Urban Landscape. In *Manzar: The Iranian Scientific Journal of Landscape*, 4(20)

Carotti, L., Graamans, L., Puksic, F., Butturini, M., Meinen, E., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. (2021): Plant factories are heating up: Hunting for the best combination of light intensity, air temperature and root-zone temperature in lettuce production. In *Frontiers in plant science*, 11, 592171.

Casey, Leanne; Freeman, Ben; Francis, Kurt; Brychkova, Galina; McKeown, Peter; Spillane, Charles et al. (2022): Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. In *Journal of Cleaner Production* 369, p. 133214. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133214.

Chen, Bin; Han, M. Y.; Peng, Kun; Zhou, S. L.; Shao, Ling; Wu, X. F. et al. (2018): Global land-water nexus: Agricultural land and freshwater use embodied in worldwide supply chains. In *Science of the Total Environment* 613, pp. 931–943.

Despommier, D. (2013): Farming up the city: The rise of urban vertical farms. In *Trends in biotechnology*, 31(7), 388-389.

EQUA (2011): IDA Indoor Climate and Energy: Das Simulations- und Planungstool der nächsten Generation. Available online at <https://www.equa.se/images/building/IDA-ICE---Experte.pdf>

Goldstein, Benjamin; Hauschild, Michael; Fernández, John; Birkved, Morten (2016): Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. In *Journal of Cleaner Production* 135, pp. 984–994.

Graamans, L., Tenpierik, M., van den Dobbelen, A., & Stanghellini, C. (2020): Plant factories: Reducing energy demand at high internal heat loads through façade design. In *Applied Energy*, 262, 114544. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114544>

Graamans, L., van den Dobbelen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017): Plant factories; crop transpiration and energy balance. In *Agricultural Systems*, 153, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>

Hans Janssen, J. C. (2004): The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. In *Building and Environment*, 39(7), 825-836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.004>

iFarm (2023): iFarm StackGrow Vertical Farming Automation Technology. Available online at <https://ifarm.fi/technologies/stack-grow>

Jeswani, Harish Kumar; Azapagic, Adisa (2011): Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. In *Journal of Cleaner Production* 19 (12), pp. 1288–1299. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.04.003.

Kalantari, F., Mohd Tahir, O., Mahmoudi Lahijani, A., & Kalantari, S. (2017): A review of vertical farming technology: A guide for implementation of building integrated agriculture in cities. In *Advanced engineering forum* (24), pp. 76-91. Trans Tech Publications Ltd.

Katsoulas, N.; Stanghellini, C. (2019): Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. In *Agronomy*, 9(7), 392. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070392>

Kikuchi, Yasunori; Kanematsu, Yuichiro; Yoshikawa, Naoki; Okubo, Tatsuya; Takagaki, Michiko (2018): Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan. In *Journal of Cleaner Production* 186, pp. 703–717. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.110.

Kozai, Toyoki; Amagai, Yumiko; Hayashi, Eri (2019): Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs): From greenhouses to vertical farms. In : *Achieving sustainable greenhouse cultivation: Burleigh Dodds Science Publishing*, pp. 177–202.

Li, Lanyu; Li, Xian; Chong, Clive; Wang, Chi-Hwa; Wang, Xiaonan (2020): A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems. In *Journal of Cleaner Production* 268, p. 121928. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121928.

Martin, Michael; Elnour, Mugahid; Siñol, Aina Cabrero (2023): Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm. In *Sustainable Production and Consumption* 40, pp. 182–193. DOI: 10.1016/j.spc.2023.06.020.

Martin, Michael; Molin, Elvira (2018): Assessing the energy and environmental performance of vertical hydroponic farming: IVL Svenska Miljöinstitutet.

Martin, Michael; Poulikidou, Sofia; Molin, Elvira (2019): Exploring the Environmental Performance of Urban Symbiosis for Vertical Hydroponic Farming. In *Sustainability* 11 (23), p. 6724. DOI: 10.3390/su11236724.

Martin, Michael; Weidner, Till; Gullström, Charlie (2022): Estimating the Potential of Building Integration and Regional Synergies to Improve the Environmental Performance of Urban Vertical Farming. In *Front. Sustain. Food Syst.* 6, Article 849304, p. 109. DOI: 10.3389/fsufs.2022.849304

Miller, A. (2011): Scaling up or selling out? A critical appraisal of current developments in vertical farming (Doctoral dissertation, Carleton University).

Mujkic, Selma; Andakudi Kesavan, Kaushik Narasimhan (2020): Life Cycle Assessment of Lettuce Production Systems : A Case Study Performed at Hollbium. Available online at <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1463291>.

Netled (2023): New Brand Vera -for turn key vertical farm published. Available online at <https://netled.fi/new-brand-vera-for-turn-key-vertical-farm-published/>

Orsini, F.; Pennisi, G.; Zulfiqar, F.; Gianquinto, G. (2020): Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). In *Eur.J.Hortic.Sci.* 85 (5), pp. 297–309. DOI: 10.17660/eJHS.2020/85.5.1.

Pennisi, Giuseppina; Orsini, Francesco; Blasioli, Sonia; Cellini, Antonio; Crepaldi, Andrea; Braschi, Ilaria et al. (2019): Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. In *Scientific Reports* 9 (1), p. 14127. DOI: 10.1038/s41598-019-50783-z.

- Romeo, Daina; Vea, Eldbjørg Blikra; Thomsen, Marianne (2018): Environmental Impacts of Urban Hydroponics in Europe: A Case Study in Lyon. In *Procedia CIRP* 69, pp. 540–545. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.048.
- Rothwell, Alison; Ridoutt, Brad; Page, Girija; Bellotti, William (2016): Environmental performance of local food: trade-offs and implications for climate resilience in a developed city. In *Journal of Cleaner Production* 114, pp. 420–430.
- Sardans, Jordi; Peñuelas, Josep (2015): Potassium: a neglected nutrient in global change. In *Global Ecology and Biogeography* 24 (3), pp. 261–275.
- Sivamani, S., Bae, N., & Cho, Y. (2013): A smart service model based on ubiquitous sensor networks using vertical farm ontology. In *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(12), 161495.
- Specht, K., et al. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. In *Agriculture and human values*, 31, 33-51.
- Toyoki Kozai; Genhua Niu (2016): Chapter 4 - Plant Factory as a Resource-Efficient Closed Plant Production System. In Toyoki Kozai, Genhua Niu, Michiko Takagaki (Eds.): *Plant Factory*. San Diego: Academic Press, pp. 69–90. Available online at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128017753000044>.
- UN (2010): UNFCCC: Framework Convention on Climate Change. Available online at <https://unfccc.int/resource/docs/2010/awglca12/eng/14.pdf>
- Viemose (2023): VERTICAL FARMING: Für weniger Arbeits- und Transportaufwand sowie weniger Energie-, Wasser- und Flächenverbrauch. Available online at <https://viemose-dgs.dk/de/vertical-farming-de/>
- Vogel, G. (2008): Upending the Traditional Farm. In *Science* 319, 752-753. DOI:10.1126/science.319.5864.752
- Wildeman, Rob (2020): Vertical Farming: A Future Perspective or a Mere conceptual Idea. In *University of Twente: Enschede, The Netherlands*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Analyse- und Optimierungsebenen im Projekt OpEn Farming.	17
Abbildung 2	Ganzheitliche Optimierung auf der Ebene des Systemdesigns	18
Abbildung 3	Die VF-Box zur messtechnischen Validierung von Simulationsergebnissen	19
Abbildung 4	Simulation der Beleuchtungsstärke und der Messung in der VF-Box.	20
Abbildung 5	Lichtverteilung auf Pflanzenebene in VF-Box: nicht optimiert (links) und optimiert mit dem Zielwert von 90.000 lx (rechts)	20
Abbildung 6	Optimierung der LED-Steuerung mit vordefinierten LED-Positionen	21
Abbildung 7	Belichtungsverteilung auf der Pflanzebene bei stabförmigen LED-Modulen (äquidistante Anordnung)	22
Abbildung 8	Stabförmige LED-Module mit optimierter Anordnung der LEDs und jeweils 3 getrennt dimmbaren Bereichen pro Modul	23
Abbildung 9	Belichtungsverteilung auf Pflanzebene durch die optimierten LED-Module incl. optimierter Dimmung der 3 Modulbereiche	23
Abbildung 10	Stabförmiges LED-Modul mit optimierter Anordnung der LEDs	24
Abbildung 11	Geometrie und Vorderansicht des simulierten Racks	25
Abbildung 12	Unterschiedliche Konfigurationen des nicht automatisierten VF-Systems	25
Abbildung 13	Unterschiedliche Konfigurationen des automatisierten VF-Systems	26
Abbildung 14	Beispiel für CFD-Simulationsergebnisse für das nicht automatisierte VF-System.	26
Abbildung 15	Blattflächenmodell (A), Morphologie der Modellpflanze nach 14 Tagen Kultur-dauer bei 23 °C (B), experimenteller Aufbau im mehrlagigen Kultursystem (C)	28
Abbildung 16	Schnitt des Basis-Regalmoduls mit 5 m Länge für 6 m ² Anbaufläche mit den Ebenen Lüftung und Licht sowie Pflanze und Bewässerung.	29
Abbildung 17	5 Regale mit 10 m Länge auf 4 Ebenen ergeben 240 m ² Anbaufläche.	30
Abbildung 18	Konzept für eine Vertical Farm mit 960 m ² Anbaufläche auf 4 Geschoßen. Die Grundfläche der Vertical Farm beträgt 212 m ² . Die Größe der Anbaufläche ist in etwa auch für die Servicebereiche erforderlich.	30
Abbildung 19	Hauptkomponenten eines automatisierten Anbauregals.	32
Abbildung 20	Entwickeltes 3D-Modell der automatisierten Version des Vertical Farming Anbauregals.	32
Abbildung 21	Layout der betrachteten vertikalen Farm.	34
Abbildung 22	Außenwände der vertikalen Farm, Perspektive von oben.	35
Abbildung 23	Innenwände der vertikalen Farm, Einzelgeschoss, Perspektive von oben.	35
Abbildung 24	Innenböden in der vertikalen Farm, Vorderansicht.	36
Abbildung 25	Quantifizierte Werte für die Auswirkungen von Vertical Farming auf die globale Erwärmung und ihre Abhängigkeit von der Menge des Stromverbrauchs, der Beleuchtungsdauer und dem Strommix	42
Abbildung 26	Beiträge der Prozesse an den Umweltkategorien.	50

Abbildung 27	Vergleich der Auswirkung der Stromversorgung auf die Umweltleistung von Vertikal Farming.	51
Abbildung 28	Konfigurationen der konventionellen Landwirtschaftsszenarien	51
Abbildung 29	Umweltauswirkungen des Anbaus von Salat in vier Landwirtschaftsszenarien	53
Abbildung 30	Auswirkungen von Transportszenarien auf die globale Erwärmung bei der Lieferung von Salat an Einzelhandelsmärkte	54
Abbildung 31	Vereinfachtes Prozessflussdiagramm einer mit einer Biogasanlage gekoppelten Vertical Farm	55
Abbildung 32	Vergleich der Umweltauswirkungen des Basisfallszenarios mit dem entwickelten Szenario einer Kreislaufwirtschaft (Vertical Farm gekoppelt mit einer Biogasanlage in Venlo-Niederlande)	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Arbeitspakete	16
Tabelle 2	Meilensteine	16
Tabelle 3	Definition der Parameter für Kellerwand und Boden	36
Tabelle 4	Schlüsselparameter für den Anbaubereich	37
Tabelle 5	Ergebnisse der Optimierungsszenarien	37
Tabelle 6	Die quantifizierten Werte der am häufigsten untersuchten Umweltauswirkungskategorien in den verfügbaren LCA-Studien.	41
Tabelle 7	Die Auswirkungen alternativer Stromquellen auf die Umweltleistung der Vertical Farming.	44
Tabelle 8	LCA-Studien zur Salatproduktion in Gewächshäusern und im Freiland.	46
Tabelle 9	Ergebnisse der Lebenszyklus-Folgenabschätzung für „BrightBox“ (Bezugseinheit: 1 kg Frischprodukt im Jahr)	49
Tabelle 10	Quantifizierte Ergebnisse der Umweltauswirkungen von Freiland- und bodenbasiertem Gewächshausanbau sowie hydroponischem Gewächshaus.	52
Tabelle 11	Aktualisierter Projekt-Zeitplan	56
Tabelle 12	Aktualisierter Projekt-Zeitplan und Änderungen bei der LCA	57
Tabelle 13	Übersicht über bisherige LCA-Studien zum Vertical Farming	68

Anlagen

- Anhang A: Übersicht über bisherige LCA-Studien zum Vertical Farming

Anhang A: Übersicht über bisherige LCA-Studien zum Vertical Farming

Tabelle 13
Übersicht über bisherige LCA-Studien zum Vertical Farming

Spezifikationen der Studie	(Mujkic and Andakudi Kesavan 2020)	(Blom et al. 2022)	(Kikuchi et al. 2018)	(Li et al. 2020)	(Romeo et al. 2018)	(Wildeman 2020)	(Martin and Molin 2018)	(Martin et al. 2019)	(Martin and Molin 2021)	(Casey et al. 2022)	(Martin et al. 2023)
Produkt	Salat	Salat und Basilikum	Salat	Blattgemüse ¹	Blattgrün und Kraut	Eisbergsalat	Basilikum	Basilikum	Blattgrün und Kraut	Salat	Salat
Ort	Schweden	Niederlande	Japan	Singapur	Frankreich	USA	Schweden	Schweden	Schweden	Großbritannien	Sweden
Art der vertikalen Farm	Entwürfe an der Wand	Horizontal gestapelt	Horizontal gestapelt	Horizontal gestapelt	-	Horizontal gestapelt	Horizontal gestapelt	Horizontal gestapelt	Horizontal gestapelt	-	Grüne Wände
Bewässerungssystem	Hydroponic-NFT	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic-NFT	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic	Hydroponic-NFT
Beleuchtungssystem und Belichtungszeit pro Tag	LED - 16 hr	LED - 20 hr	Leuchtstoffröhren - 12 hr	NA	Sonnenlicht	LED - 16 hr	LED - 12 hr	LED - 12 hr	LED - 16 hr	LED - NA	LED - hr
Ertrag pro Jahr	26,43 kg	6618 kg	55000 kg	NA	2575 kg	29209 t	1500-1800 kg	1500-1800 kg	5550 kg	NA	520 t
Funktionseinheit	1 Schleife	1 kg Frischprodukt	1t Salat	1 kg Blattgemüse	1 kg Blattgemüse	1 kg trockener Salat ³	1) 1 Fertigtopf; 2) kg Trockenmasse pro m ²	Jahresproduktion von 6000 Pflanzen	1) 185000 Pflanzen 2) 1 kg essbarer Teil der Pflanze	1 kg frischer Salat	1 kg essbarer Salat
Software	Simapro	NA	-	NA	Simapro	Gabi	Open LCA	Open LCA	Open LCA v. 1.10.3	Open LCA v. 1.10.3	Open LCA v. 1.10.3
Vergleichende LCA	Gewächshäuser und Freiland	Offenes Feld	Gartenbau und VF mit Sonnenlicht	Freilandlandwirtschaft und Gewächshaus	Offenes Feld	Freiland und Gewächshaus	Freiland und Gewächshaus	Urbane Symbiose	Regionale Synergien	Freiland	Freiland
Systemgrenze	Von der Wiege bis zur Bahre	Von der Wiege bis zur Bahre	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zur Bahre	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zum Tor	Von der Wiege bis zur Bahre
Methode der Lebenszyklus-Folgenabschätzung	Recipe 2016-Midpoint	IPCC	LC-LIME	Summe der Kohlenstoff-, Wasser- und Land-Fußabdrücke ³		Recipe., EF ⁴ 2.0	CML Baseline, Recipe	CML Baseline 2014	ILCD 2011 midpoint	EF 2.0	EF 3.0

1. Salat, Spinat, Kohl, Brokkoli, Ca Xin, Nai Bai, Xian Cai, und Kang Kong.

2. Trockenmasse von 8.5%.

3. Für den CO₂-Fußabdruck wurde die Kohlenstofffixierung in den Pflanzen in den Berechnungen berücksichtigt.

4. Environmental Footprint.

Spezifikationen der Studie	(Mujkic and Andakudi Kesavan 2020)	(Blom et al. 2022)	(Kikuchi et al. 2018)	(Li et al. 2020)	(Romeo et al. 2018)	(Wildeman 2020)	(Martin and Molin 2018)	(Martin et al. 2019)	(Martin and Molin 2021)	(Casey et al. 2022)	(Martin et al. 2023)
Umweltindikatoren											
Globale Erwärmung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eutrophierung								✓	✓		
Eutrophierung des Süßwassers	✓				✓	✓				✓	✓
Eutrophierung der Meere	✓				✓	✓				✓	
Süßwasser-Ökotoxizität					✓					✓	✓
Landnutzung	✓		✓	✓	✓	✓					
Wassernutzung	✓		✓	✓		✓					
Verknappung fossiler Ressourcen	✓					✓				✓	✓
Eutrophierung des Bodens											✓
Versauerung des Bodens	✓					✓					
Verknappung mineralischer Ressourcen	✓					✓					✓
Versauerung								✓	✓	✓	✓
Toxizität für den Menschen								✓			
Erschöpfung der abiotischen Ressourcen								✓			
Energieverbrauch							✓				
Ressourcenerschöpfung					✓				✓		
Erschöpfung der Wasserressourcen									✓		