

# **Vertical Farming: Ermittlung der Anforderungsbedingungen zur Entwicklung eines Vertical Farm-Prototyps zur Kulturpflanzenproduktion**

D. Podmirseg, S. Sautter,  
B. Cody, A. Keutgen,  
N. Keutgen, J. Balasch,  
K. Diwold

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**7/2020**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in  
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik  
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Vertical Farming: Ermittlung der Anforderungsbedingungen zur Entwicklung eines Vertical Farm-Prototyps zur Kulturpflanzenproduktion

Univ. Prof. BSc (Hons) CEng MCIBSE Brian Cody,  
Mag.arch.Dr.techn. Daniel Podmirseg, Dipl.-Ing. Sebastian Sautter,  
Dipl.-Ing. Aleksandar Tepavcevic  
Technische Universität Graz, Institut für Gebäude und Energie

Dimitris Sifakis, BA (Hons), Mag.arch.Helmut Holleis  
vertical farm institute, Wien

Univ. Prof. Dipl. Ing. Sc. Agr. Dr. sc. agr. Anna Jadwiga Keutgen,  
Priv.-Doz. Dr. Norbert Keutgen,  
Ass.Prof.Dipl. Ing. Dr. nat. techn. Johannes Balas  
BOKU Wien, Dept. für Nutzpflanzenwissenschaften, Abt. Gartenbau

Dr. Konrad Diwold, Dipl.-Ing. Daniel Hauer, Dr.-Ing. Ralf Mosshammer  
Siemens AG Österreich

Graz, Juni 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	9
1 Einleitung.....	11
1.1 Aufgabenstellung .....	11
1.2 Stand der Technik.....	12
1.3 Verwendete Methoden .....	16
1.3.1 Projektmanagement (AP1) .....	16
1.3.2 Grundlagenermittlung (AP2).....	17
1.3.3 Untersuchung typologischer Lösungen (AP3).....	19
1.3.4 Entwicklung des prototypischen Gebäudekonzepts (AP4).....	19
1.3.5 Ermittlung der Energie- und Stoffströme (AP5).....	20
1.3.6 Bewertung (AP6) .....	21
1.3.7 Simulationsmodell der Vertikalen Farm .....	21
1.3.8 Simulationsmodell Sollwerte .....	24
1.3.9 Zusammenfassung der wichtigsten Sollwerte VF#4.....	35
2 Ergebnisse.....	36
2.1 Untersuchung typologischer Lösungen .....	36
2.1.1 Auswahl eines fiktiven Grundstücks.....	36
2.1.2 Funktions- und Raumprogramm .....	38
2.1.3 Geometrische Grundformen: Die Vertikalen Farmen (#1, #2, #3) .....	38
2.1.4 Auswahl der Typologie .....	39
2.2 Entwicklung des prototypischen Gebäudekonzepts – Die Vertikale Farm VF#4 ....	40
2.2.1 Gebäudeabmessungen .....	40
2.2.2 Zonierung der Anbau- und Produktionsvolumen.....	41
2.2.3 Beschreibung der Produktions- und Anbaumethoden und den ausgewählten Kulturpflanzen .....	42
2.3 Automation einer Vertikalen Farm – regel- und automatisierungstechnische Rahmenbedingungen.....	47
2.3.1 Beleuchtung .....	47
2.3.2 Bewässerung.....	48
2.3.3 Heizung, Lüftung, Klimatechnik (HVAC) .....	49
2.3.4 Prozessautomatisierung im Produktionszyklus der Vertical Farm .....	49

2.3.5	Informationserfassung durch geeignete Informations- und Kommunikations-Technologie.....	50
2.3.6	Systemarchitektur einer Vertikalen Farm .....	51
2.3.7	Sensor Prototyp.....	54
2.4	Quantifizierte Darstellung wesentlicher Energie- und Stoffmengen, systemübergreifende Schnittstellenanalyse .....	56
2.4.1	Quantitative Bewertung der Lastverschiebungspotentiale.....	56
2.5	Ergebnisse der energetischen Gebäudesimulation .....	60
2.5.1	Blackbox - opake Gebäudehülle (Var. 1) .....	62
2.5.2	Zone 2 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2).....	64
2.5.3	Zone 2 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3).....	65
2.5.4	Zone 6 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4).....	67
2.5.5	Zone 6 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5).....	68
2.5.6	Vergleich der Varianten 1-5.....	69
2.6	Gesamtenergiebilanz der Vertikalen Farm VF#4.....	71
2.7	Recherche und Auswertung publizierter Daten hinsichtlich Energie- und Wasserverbrauch.....	74
2.8	Grobe Ermittlung sämtlicher Energie- und Stoffströme der VF#4 .....	76
2.9	Erwartbare ökologische, ökonomische und soziale Chancen und Herausforderungen der Vertikalen Farm .....	78
3	Schlussfolgerungen .....	80
4	Ausblick und Empfehlungen .....	82
5	Verzeichnisse .....	84
5.1	Abbildungsverzeichnis .....	84
5.2	Tabellenverzeichnis .....	86
5.3	Literaturverzeichnis.....	87



# Kurzfassung

## **Ausgangssituation/Motivation**

Das Sondierungsprojekt versteht sich als Vorbereitung für die Entwicklung einer prototypischen Vertikalen Farm für Wien. Der Schwerpunkt des Sondierungsprojektes lag in der Erforschung der Grundlagen, welche notwendig sind, eine Vertikale Farm für das urbane Umfeld im Rahmen eines kooperatives F&E-Projekts zu entwickeln.

## **Inhalte und Zielsetzungen**

Wesentliche pflanzenphysiologische und architekturtypologische Überlegungen, Potenzialanalysen klimatischer Bedingungen, Konzeptionierung nötiger Gebäudetechnik sowie Kommunikations- und Regelungstechnik umfassen die inhaltliche Auseinandersetzung. Basierend auf einem eigens erstellten Kulturpflanzenkatalog wurden Anbaubedingungen ermittelt und damit typologische Grundlagen entwickelt. Darauf aufbauend wurde eine Gebäudetypologie abgeleitet, welche auf deren Energiebedarf untersucht wurde.

## **Methodische Vorgehensweise**

Das multidisziplinäre Konsortium erarbeitete Grundlagen über Desk-research, komparative Studien, digitale Raumstudien und Ermittlung von Sollwerten für die Simulationssoftware. Es reagierte über regelmäßig stattfindende Workshops bzw. Meetings iterativ auf die jeweiligen Forschungsergebnisse der KonsortialpartnerInnen und überführte somit Erkenntnisse daraus in das jeweils folgende Arbeitspaket.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Ein Funktions- und Raumprogramm für eine Vertikale Farm liegt vor und wurde im Detaillierungsgrad eines konzeptuellen Vorentwurfs planerisch entwickelt. Ein Kulturpflanzenkatalog wurde entwickelt und damit eine Ganzjahreskulturfolge für die Vertikale Farm festgelegt. Anforderungsprofile für Gebäudetechnik und Gebäudeautomatisierung wurden erarbeitet. Die Gesamtenergiebilanz bzw. Ergebnisse des Ressourcenverbrauchs inkl. grauer Energie weisen Optimierungspotentiale auf bzw. legen die Komplexität des Simulationsprozesses offen.

## **Ausblick**

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung einer Vertikalen Farm sind gegeben, sowohl auf baurechtlicher als auch auf widmungstechnischer Ebene. Die theoretisch ermittelten Erträge sowie das Flächeneinsparungspotential verglichen mit der traditionellen Landwirtschaft belegen einmal mehr die Effektivität der Flächen- bzw. Raumnutzung.

# **Abstract**

## **Starting point / Motivation**

The exploratory project was intended as preparation for the development of a prototypical vertical farm for Vienna. The focus of the exploratory project was to acquire fundamentals necessary to develop a vertical farm for the urban environment as part of a collaborative R&D-project.

## **Contents and objectives**

Essential plant-physiological and architectural typological considerations, potential analyses of climatic conditions, the conception of necessary building services as well as communication- and control technology covered the content of the discussion. Cultivation conditions were determined based on a specially created catalogue of crop varieties, thereby developing typological foundations for the architectural development. Based on this, a building typology was derived, which was examined for its energy requirements.

## **Methods**

The multidisciplinary consortium developed foundations using desk research, comparative studies, digital spatial studies and determination of target values for the simulation software. The consortium iteratively responded to the respective research results of the consortium partners via regular workshops and / or meetings and thus translates findings into the following work package.

## **Results**

A functional and spatial program for a vertical farm exists and has been developed in the level of detail of a conceptual preliminary design. A catalogue of cultivated plants has been developed, establishing a year-round cultural sequence for the Vertical Farm. Requirement profiles for building technology and building automation were developed. The total energy balance or results of the resource consumption including grey energy point to optimization potential or reveal the complexity of the simulation process.

## **Prospects / Suggestions for future research**

The legal framework for the implementation of a vertical farm is given, on both the building law and site zoning level. The theoretically determined yields as well as the savings potential compared to the traditional agriculture once again prove the effectiveness of land use.

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Projektziel des Sondierungsprojekts *Vertical Farming* ist das Erarbeiten von Grundlagen, welche wesentlich für die Vorbereitung der Entwicklung einer prototypischen Vertikalen Farm in Österreich sind.

Die erwarteten Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes sind die Grundlagen, die sowohl für die Planung und Umsetzung einer prototypischen Vertikalen Farm, als auch für weiterführende Forschungskoooperativen von Relevanz sind. Im weiteren Schritt soll der Forschungsprozess zur Realisierung eines neuen Gebäudetypus, welcher die Lebensmittelproduktion mit Zusatzfunktionen wie beispielsweise Büro- und Wohnungen vereint, erfolgen. Das Forschungskonsortium hat sich für die vorliegende Arbeit folgende Kernfragen als Aufgabe gestellt:

- Welche Kulturpflanzen eignen sich für vertikalisierte Mischkultursysteme?
- Welche pflanzenphysiologischen Rahmenbedingungen haben Auswirkungen auf die Gebäudeform?
- Wie sieht eine konzeptuelle Systemarchitektur eines Automatisierungssystems einer Vertikalen Farm aus?
- Wie sieht das Gebäudetechnikkonzept aus?
- Mit welchem Ressourcenverbrauch ist tatsächlich zu rechnen?
- Wie sieht die Gesamtenergiebilanz einer Vertikalen Farm aus?
- Welche Chancen und Herausforderung können hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Überlegungen skizziert werden?

Dieses Sondierungsprojekt ist getragen von einem multidisziplinären Grundgedanken. Demnach spielen die kommunikativen Schnittstellen zwischen den verschiedenen Forschungseinrichtungen eine bedeutende Rolle.

Das Sondierungsprojekt ist methodisch dahingehend aufgebaut, dass ein möglichst umfassendes Anforderungsprofil erstellt werden kann, welches als Grundlage für ein darauffolgendes Forschungsprojekt dienen soll und als „proof of concept“ definiert wird.

Demnach wird aufbauend auf eine komparative Recherche publizierter Studienergebnisse über Gewächshauskulturpflanzen eine Evaluierung vorgenommen, welche sich vorwiegend auf energetische Einflüsse und Materialströme konzentriert, die sich während der Kulturfolge ergeben.

Geometrische Gebäudegrundformen werden analysiert. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf möglichen Auswirkungen auf den Energiebedarf. Gebäudeform, Trakttiefe oder das A/V-Verhältnis sind von großer Bedeutung. Diese Klassifizierung lässt eine Vorauswahl an Form und Volumen zu, die es ermöglicht, Erschließungskonzepte und Gebäudetechnikkonzepte zu

entwickeln, welche eine tiefere Untersuchung des zu erwartenden Energiebedarfs bzw. die Entwicklung gebäudetechnischer Aspekte zulassen.

Hierbei kommen thermische Gebäudesimulation und Simulationen bezüglich Tageslichtbedarf zum Einsatz. Anforderungsprofile ausgewählter Kulturpflanzen ermöglichen die Ermittlung von zu erwartenden Materialströmen und Landverbrauch und bilden mit den Simulationsergebnissen ein ganzheitliches Bild.

Die Gesamtenergiebilanz einer ins Stadtgefüge eingebundenen Vertikalen Farm ist eines der Hauptleitmotive. Demnach wird die Berechnung der grauen Energie ebenfalls berücksichtigt. Dafür wird ein approximatives Rechenmodell entwickelt, welches die wesentlichen Komponenten der Vertikalen Farm berücksichtigt, die während der Konzeptionierung und Klassifizierung der Gebäudetypologie ermittelt wurden.

Sämtliche Einflussfaktoren (Energie und Material) finden qualitativ Einzug in eine grafische Matrix. Sie wird im Projektverlauf durch zu erwartende quantitative Ergebnisse erweitert.

Schließlich werden, basierend auf Erkenntnissen der verschiedenen Arbeitspakete, ökologische, ökonomische und soziale Chancen und Herausforderungen der Praxis vertikaler Lebensmittelproduktion skizziert.

## 1.2 Stand der Technik

Das Kernstück des Hyperbuildings bildet die Vertikale Farm. Demnach wird das vorliegende Forschungsprojekt auf die Untersuchungen dieser speziellen Lebensmittelproduktionsmethode eingehen.

Seit der Publikation des Manifests von Dickson Despommier<sup>1</sup> wurden bereits zahlreiche Entwürfe für Vertikale Farmen veröffentlicht. Der größte Teil dieser Projekte schließt in der Auseinandersetzung mit den Herausforderungen gestapelter Gewächshäuser bereits auf der Designebene ab. Unter weltweit vielleicht fünfzehn relevanten, gebauten prototypischen Vertikalen Farmen werden nachfolgend bedeutende Projekte herausgehoben:

*Suwon Vertical Farm*, 2009 errichtet, dient als Forschungseinrichtung, staatlich organisiert von Behörden von Südkorea, und spezialisiert sich auf die wissenschaftliche Untersuchung optimaler Lichtfrequenzen und -mengen für verschiedene Nutzpflanzen.

*Skygreens*, Singapur. Seit 2009 produziert das vertikalisierte High-Tech-Gewächshaus erfolgreich frische Blattsalate für die Stadt, welche bis zu 99 % aller Lebensmittel importiert.

---

<sup>1</sup> DESPOMMIER, D: *The Vertical Farm*, New York, St. Martin's Press, 2010

*Vertical Harvest*, eröffnet 2015, in Jackson (Wyoming) USA, eine Vertikale Farm, die einzige derzeitige bekannte Vertikale Farm mit sogenanntem Multikulturen-Anbau. Von besonderer Bedeutung ist die Einbindung der Bevölkerung in Produktion und Vertrieb<sup>2</sup>.

*Plantagon*, Linköping, voraussichtliche Fertigstellung 2018, Schweden, ist für dieses Forschungsprojekt von zentraler Bedeutung, weil sie als erste realisierte Vertikale Farm das vertikale Gewächshaus mit einem Bürogebäude verbindet, es sich dadurch um ein Hybridgebäude und somit als konzeptuelle Vorstufe des Hyperbuildings handelt.

Im Anhang können zusätzliche Informationen zu den erwähnten Vertikalen Farmen sowie weiterführende Links entnommen werden. Die Nähe zur Gewächshaustypologie ist durch die dort zu findende Klassifizierung ersichtlich. Das vorliegende Sondierungsprojekt beabsichtigt, im Unterschied zu den angeführten Beispielen, eine neue Gebäudetypologie zu entwickeln.

Ein Großteil wissenschaftlicher Arbeiten, Dissertationen oder Masterarbeiten über Vertical Farming weisen einen dokumentarischen Charakter über den Stand der Forschung auf. Einige Arbeiten vertiefen die Diskussion im Hinblick auf Potenziale, die Vertical Farming mit der traditionellen Landwirtschaft wettbewerbsfähig machen, beispielsweise durch die Reduktion von Land- und Wasser- oder Energieverbrauch. Letzteres wurde in den vergangenen fünf Jahren speziell am Institut für Gebäude und Energie untersucht und als Dissertation veröffentlicht<sup>3</sup>. Der Abstract der Arbeit kann aus dem e-call („weitere Datei-Anhänge“) entnommen werden.

Die Dissertation beleuchtet den Status quo der globalen Landwirtschaft im Hinblick auf Land- und Energieverbrauch. Weiters wurden Potenziale im Hinblick auf Produktivitätssteigerung der existierenden landwirtschaftlichen Fläche ermittelt, als auch die tatsächliche Biokapazität der Erde für die Lebensmittelproduktion untersucht, um die Frage beantworten zu können, ob die Weiterentwicklung der Gebäudetypologie für eine Vertikale Farm eine wissenschaftliche Berechtigung hat.

Durch diese Untersuchung konnten Potenziale offengelegt werden, welche Parameter zu einer konkurrenzfähigen Koexistenz von Vertical Farming mit der traditionellen Landwirtschaft führen. Der Beitrag Vertikaler Farmen zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Städten kann bedeutend sein, wenn Nutzpflanzen ausgewählt werden, deren Bedürfnisse den vorhandenen klimatischen und Lichtverhältnissen innerhalb der Vertikalen Farm nahekommen. Umgekehrt kann argumentiert werden, wenn die Gebäudetypologie entwickelt und optimiert wird, um die Nutzpflanzen ausreichend mit Tageslicht zu versorgen.

---

<sup>2</sup> Auf die soziale Bedeutung dieses Vertical-Farm-Konzepts wird später genauer eingegangen.

<sup>3</sup> PODMIRSEG D.: „up! Contribution of Vertical Farms to increase the overall Energy Efficiency of Cities“, Eigenverlag. ISBN: 9-783299-043824, 2015

Auf qualitativer Ebene sei hier noch Gordon Graff<sup>4</sup> erwähnt, welcher in seiner Arbeit typologische Komponenten untersucht und die Vertikale Farm als integrativen Teil des urbanen Metabolismus untersucht. Quantitative Zahlen ermittelt Chirantan Banernje<sup>5</sup> mit einer Machbarkeitsstudie, einer feasibility study und Marktanalyse, welche mögliche Kosten einer Vertikalen Farm skizziert, jedoch ohne präziser Nachvollziehbarkeit pflanzenphysiologischer Anbaubedingungen.

Es ist zu beobachten, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft, welche sich mit Vertical Farming auseinandersetzt, in den letzten Jahren stark wächst - auf multidisziplinärer Ebene.

Pflanzenphysiologen, Horticulturists, Biotechnologen, Urbanisten und Architekten widmen sich zunehmend dem Thema. Dennoch kann festgehalten werden, dass die wissenschaftliche Basis noch in den Kinderschuhen steckt. Die stark wachsende Aktivität auf diesem Gebiet verlangt an dieser Stelle, dass die angeführte Liste der wissenschaftlichen Arbeiten als unvollständig erachtet werden muss.

Weiters seien noch Institutionen erwähnt, welche wesentliche Forschungsergebnisse liefern, die für Vertical Farming von zentraler Bedeutung sind:

Die Forschungstätigkeiten der NASA (National Aeronautics and Space Administration) liefern Erkenntnisse für optimierte Materialkreisläufe, effizienten Wasser-, CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Verbrauch sowie über optimale Wachstumsbedingungen durch effiziente Produktion künstlicher Beleuchtung<sup>6</sup>.

Große Aktivität bei der Entwicklung von High-Tech-Gewächshäusern ist in den Niederlanden<sup>7</sup>, Deutschland<sup>8</sup> und den USA<sup>9</sup> zu beobachten. Erfahrungswerte mit dem Einsatz von Kunstlicht im gestapelten Gewächshausanbau als auch mit dem Einsatz alternativer Anbaumethoden (Aeroponics und Hydroponics) sind aus Japan beziehbar<sup>10</sup>.

---

<sup>4</sup> GRAFF, G.: Skyfarming. Master of Architecture, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2015

<sup>5</sup> BANERNJEE, C.: Market Analysis for Terrestrial Application of Advanced Bio-Regenerative Modules: Prospects for Vertical Farming. Masterarbeit, Rheinische Friederichs-Wilhelms-Universität, Hohe Landwirtschaftliche Fakultät, 2012

<sup>6</sup> <https://www.nasa.gov/image-feature/space-farming-yields-a-crop-of-benefits-for-earth>, aufgerufen 31.10.2015

<sup>7</sup> <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/Wageningen-UR-Greenhouse-Horticulture.htm>, aufgerufen 31.10.2015

<sup>8</sup> [http://www.zineg.net/ZINEG\\_E/](http://www.zineg.net/ZINEG_E/), aufgerufen 31.10.2015

<sup>9</sup> <http://ag.arizona.edu/ceac/>, aufgerufen 31.10.2015

<sup>10</sup> Beispielhaft gilt: <http://www.nuvege.com>,  
[http://www.meti.go.jp/english/policy/sme\\_chiiki/planfactory/exam/exam\\_3.html](http://www.meti.go.jp/english/policy/sme_chiiki/planfactory/exam/exam_3.html),  
[http://www.meti.go.jp/english/policy/sme\\_chiiki/planfactory/exam/exam\\_1.html](http://www.meti.go.jp/english/policy/sme_chiiki/planfactory/exam/exam_1.html), aufgerufen 18.11.2015

Die Dissertation „up! Contribution of Vertical Farms to increase the overall Energy Efficiency of Cities“<sup>11</sup> hat verschiedene Gebäudegrundtypen für Vertical Farming verglichen. Ein gleichbleibendes Volumen mit unterschiedlichen Trakttiefen wurde auf dessen Licht- und Energiebedarf analysiert. Durch eine enge Zusammenarbeit mit der Abteilung Gartenbau, Department für Nutzpflanzenwissenschaften der BOKU Wien konnte ein parametrisches Modell erstellt werden, welches alle wesentlichen pflanzenphysiologischen Komponenten einer spezifischen Nutzpflanze, der Tomate, *Lycopersicon Esculentum* (Mill.) berücksichtigt und mit der thermischen Simulation und der Tageslichtsimulation verbindet, um den Gesamtenergiebedarf zu ermitteln. Bedeutend hierbei ist, dass die Tageslichtsimulation, im Unterschied zu herkömmlich benutzten Simulationsprogrammen, nur jene Lichtenergie berücksichtigt, welche für die Photosynthese relevant ist<sup>12</sup>.

Die Dissertation bildet das methodische Grundkonzept des Simulationsmodells, welches für das vorliegende Forschungsprojekt verwendet wird.

Es ist erwähnenswert, dass sich neben der wissenschaftlichen Forschungstätigkeit die Integration von Landwirtschaft in architektonischen und urbanistischen Debatten beobachten lässt. Frühere Konzepte und Projekte von Ebenezer Howard, Frank Lloyd Wright und Le Corbusier sind bekannt und gut dokumentiert. Aktuelle Konzepte über Urban Farming und Vertical Farming finden sich in zahlreichen Arbeiten auf städtebaulicher Ebene<sup>13, 14, 15</sup>, im Rahmen von Smart Cities<sup>16</sup> oder Productive Cities<sup>17, 18</sup> sowie Hyperbuilding Cities<sup>19</sup>.

---

<sup>11</sup> PODMIRSEG D.: „up! Contribution of Vertical Farms to increase the overall Energy Efficiency of Cities“, Eigenverlag. ISBN: 9-783299-043824, 2015

<sup>12</sup> Für die Dissertation wurde ein parametrisches Simulationstool entwickelt, welches anstatt Lux nur Watt (insbesondere W PAR) berücksichtigt. „PAR“ ist die photosynthetisch aktive Strahlung des Sonnenlichts.

<sup>13</sup> VIE: BRA - Vienna-Bratislava-City, urban strategies:  
<http://www.dieangewandte.at/jart/prj3/angewandte/main.jart?rel=en&reserve-mode=active&content-id=1234966513566&Akt-Id=4493>, aufgerufen 31.10.2015

<sup>14</sup> <http://www.braincitylab.org/>, die angewandte, Coop Himmelb(l)au, aufgerufen 31.10.2015

<sup>15</sup> <http://milliardenstadt.at>. University of Technology, Vienna. Project initiator: Lukas Zeilbauer, aufgerufen 29.09.2016

<sup>16</sup> LIM CJ, ED LIU.: Smartcities + Eco-warriors. Oxfordshire (first published), New York. Routledge, 2010

<sup>17</sup> NELSON, N.: Planning the productive city. Available: <http://www.nelsonelson.com/DSA-Nelson-renewable-city-report.pdf>. Delft Technical University, Wageningen University and Research, NL, 2009

<sup>18</sup> <http://www.futurarc.com/index.cfm/competitions/2013-fap/>. Addressing „adaptation of existing building typologies for agriculture (...) urban networks for production [and] distributions (...), aufgerufen 29.09.2016

<sup>19</sup> CODY, B.: Form Follows Energy - Die Zukunft der Energie-Performance, energy2121, Bilder zur Energiezukunft, Klima- und Energiefonds, Vienna, omninum, p. 121 ff., 2014

Abschließend gilt zu erwähnen, dass es explizit um industrielle Lebensmittelproduktion in der Stadt geht und sich Vertical Farming dadurch von „urban agriculture“, „urban farming“ und anderen „urban green“-Projekten abgrenzt, wie beispielsweise funktionale Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen oder Innenraumbegrünungen, welche in der Vergangenheit als Forschungsprojekte, auch unterstützt von der FFG, beleuchtet wurden.

## **1.3 Verwendete Methoden**

Die Arbeitsmethode des vorliegenden Forschungsprojekts legte starken Wert auf einen iterativen Arbeitsprozess, um dem multidisziplinären Ansatz bei der Entwicklung eines konzeptuellen Vorentwurfs für eine Vertikale Farm gerecht zu werden.

Neben der individuellen Grundlagenermittlung fanden in regelmäßigen Abständen sechs gemeinsame Meetings als Ganztagesworkshops rotierend auf den unterschiedlichen Instituten bzw. Firmen statt. Diese wurden über den Sondierungszeitraum mit acht Kurzworkshops zwischen je zwei KonsortialpartnerInnen ergänzt.

### **1.3.1 Projektmanagement (AP1)**

Das Projektmanagement kümmerte sich um Planung, Koordination und Kontrolle sämtlicher Projektaktivitäten zur Erreichung der Projektziele. Das Arbeitspaket erfüllte sämtliche generelle, organisatorische Pflichten und koordinierte die finanziellen, technischen und qualitativen Aspekte des Projektes. Das operative Projektmanagement wurde von der TU Graz geleistet.

Neben dem Aufsetzen eines Zeitplanes für das gesamte Projekt vor Projektstart und Kontrolle der Einhaltung dieses Zeitplanes wurden die Organisation und Abwicklung sämtlicher interdisziplinärer Workshops bzw. Konsortialmeetings und Telekonferenzen erfüllt. Zudem wurden folgende Punkte erfüllt:

- Erstellen der Zwischenberichte in Absprache mit den Arbeitspaket LeiterInnen und rechtzeitige Lieferung aller Berichte an die Förderstelle
- Controlling des Projektplanes. Einfeldern der Berichte, bzw. Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete. Finanzielles Controlling
- Abwicklung der Verhandlungen rund um den Konsortialvertrag, ständiges Überwachen bzw. Sichern der Rechte an geistigem Eigentum und Unterbreiten von Vorschlägen bezüglich Sicherung der zukünftigen geistigen Rechte für alle PartnerInnen
- Überwachung des technischen Projektfortschrittes
- Krisenmanagement

Um eine erfolgreiche Projektumsetzung gewährleisten zu können, wurden folgende Methoden angewandt:

- Bereitstellen von Web basierende Werkzeuge für multiple Autorenschaft (Kontent)
- Tracking des Inputs der jeweiligen PartnerInnen mit Sicherung des geistigen Eigentums



- Interdisziplinärer Workshops bzw. Telekonferenzen mit Protokollierung und Verteilung der Protokolle an alle PartnerInnen
- Niederschwelliger Zugang für alle ProjektpartnerInnen zu aktuellen Projektergebnissen
- Koordination bei außerplanmäßigen Problemen wie Krankheit, Personalwechsel, Streitigkeiten durch Mediation und Kommunikation der Problematik mit den Institutionsleitern.

Die erfüllten Meilensteine umfassten die Meetings aller Projektbeteiligten, Meetings als Projektworkshops, Protokollerstellungen und interne Zwischenberichte. Für die Dissemination und Wissensverbreitung wurden die Projektinhalte an das vfi angeboten, um diese in der Partnerschaft mit dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Transport in einer noch zu planenden Konferenz zum Thema Vertical Farming und urbaner Lebensmittelproduktion öffentlichkeitswirksam zu präsentieren.

### **1.3.2 Grundlagenermittlung (AP2)**

Für die Auswahl geeigneter VF-Kulturpflanzen mit den dazugehörigen Anbau- und Produktionsmethoden wurden über eine komparative Recherche Studienergebnisse unterschiedlicher Indoor-Kulturpflanzen evaluiert. Verschiedene Forschungsergebnisse bezüglich künstlicher Wachstumsfaktoren, insbesondere Licht- Wärme- und Wasserbedarf, wurden dabei miteinander verglichen. Dieser Katalog kann aus dem Anhang entnommen werden. Aus dem Katalog wurde in weiterer Folge bei den Meetings und Workshops der KonsortialpartnerInnen ein Kulturpflanzenkatalog erstellt – geeignet für Vertical Farming.

Um Potentiale bezüglich spezifischer Konstellationen zwischen Nutzpflanzen, Anbaumethoden und Produktionsmethoden ermitteln zu können, wurden Daten aus der Literatur erhoben und mit zu Verfügung stehenden Daten bereits bestehender High-Tech-Gewächshäuser bzw. realisierter und in fortgeschrittenem Planungsstand befindlicher Vertikaler Farmen miteinander verglichen.

Aufbauend auf den Referenzprojekten Skygreens in Singapur, Vertical Harvest in Jackson Wyoming, USA, Paignton Zoo in Devon, Großbritannien und Plantagon in Linköping Schweden wurden eigene Funktions- und Raumprogramme erstellt sowie drei Varianten für vertikale Farmen mit dem gleichen Volumen, jedoch mit unterschiedlichen Traktiefen und daraus resultierenden unterschiedlichen Gebäudehöhen abgeleitet.

Die Festlegung auf spezifische Kulturpflanzen folgte schließlich auf eine größtmögliche Differenzierung untereinander bezüglich ihres Bedarfs an spezifischen Wachstumsbedingungen (priorisierend den Tageslicht- und Temperaturbedarf).

Für die konzeptuelle Entwicklung der Vertikalen Farm verortet in Aspern, Wien, wurde zu Beginn eine Übersicht über den globalen Stand bezüglich vertikaler Farmen erstellt. Bilder, Pläne, Detailpläne und Diagramme wurden über Internetrecherche und in einigen Fällen Zusatzinformationen bzw. Details über Betreiber von Vertikalen Farmen oder in Betrieb stehende Plant Factories (Pflanzenfabriken mit nicht-transparenten geschlossenen Gebäudehüllen) bezogen und in die Grundlagenermittlung integriert.

Die Spezifizierung konzentrierte sich auf bereits bestehende, sich in Betrieb oder Bau befindliche vertikale Farmen bzw. High-Tech-Gewächshäuser (ausgewählte Referenzprojekte Skygreens in Singapur, Vertical Harvest in Jackson Wyoming, USA, Paignton Zoo in Devon, Großbritannien und Plantagon in Linköping Schweden). Für die ausgewählten beispielhaften vertikalen Farmen wurden Gebäudeabmessungen, Anbaumethoden und Produktionsmethoden erhoben sowie Funktions- und Raumprogramme erstellt und untereinander verglichen.

Die Ergebnisse der detaillierten Analyse der oben genannten Referenzgebäude mit Fokus auf das Anbauvolumen wurden als prototypische, konzeptuelle, digitale Raumelemente definiert. Diese 3D-Bibliothek ermöglichte es, Raumstudien durchzuführen, deren Ergebnisse als typologische Voruntersuchungen (VF#1, VF#2, VF#3) weiter behandelt wurden mit dem Ziel, bereits zu Beginn plausible Kombinationen aus Anbau- und Produktionsmethoden und deren Zuweisung von Kulturpflanzen zu erreichen. Pläne, Diagramme und Visualisierungen der Anbauvolumina und der typologischen Studien können dem Anhang entnommen werden.

Die Erhebung und Auswertung der für den weiteren Forschungsprozess wesentlichen Daten wurde iterativ in Diskussionen und Workshops mit den KonsortialpartnerInnen durchgeführt.

Über Desktopresearch, Literaturrecherche und empirische Daten einiger Betreiber von Gewächshäusern bzw. Vertikalen Farmen konnte so ein Katalog geeigneter Indoor-Kulturpflanzen für Mischkultursysteme erstellt werden, welcher dem Anhang entnommen werden kann.

In diesem Forschungsprojekt wird das Mischkultursystem als Anbau unterschiedlicher Kulturpflanzen innerhalb der Systemgrenze der Vertikalen Farm definiert. Die Systemgrenze entspricht folglich jener der Gebäudehülle und hebt sich damit von Definitionen wie dem Demeter-Verfahren oder den Prinzipien der Agroforstwirtschaft ab.

Das Ergebnis der komparativen Recherche über Studienergebnisse unterschiedlicher Gewächshauskulturpflanzen und die Erhebung spezifischer Wachstumsfaktoren (s. 6.2 im Anhang) diente als Grundlage für die Auswahl geeigneter Pflanzenarten und die Zuweisung zu Anbau- und Produktionsmethoden über einen iterativen Prozess zwischen den KonsortialpartnerInnen. Dies führte zur Festlegung folgender Kulturpflanzen, für welche detailliertere Wachstumsbedingungen in Abstimmung mit den dafür möglichen bzw. nötigen Simulationsparametern erarbeitet wurden:

- Vogerlsalat
- Lollo Rosso
- Babyleaf
- Pak Choi
- Speisechrysantheme
- Basilikum
- Endivien
- Erdbeere
- Tomate

### **1.3.3 Untersuchung typologischer Lösungen (AP3)**

Über Desk-Research, kontextbasierte Datenanalyse und ExpertInnenbefragungen wurden bei der räumlichen Entwicklung dreier Typologien kontinuierlich parallel Auswirkungen auf Raumnutzungseffizienz, Konsequenzen auf Ertrag und den Energieverbrauch (insbesondere Heiz- und Beleuchtungsbedarf) untersucht. Weiters wurden Erkenntnisse aus der Grundlagenermittlung und den Erkenntnissen der typologischen Lösungen iterativ über Workshops mit den KonsortialpartnerInnen, sowie über Planspiele und ExpertInnenbefragungen in einen konzeptuellen Vorentwurf überführt.

Die geometrischen Grundformen der drei Gebäudetypologien (VF#1, VF#2, VF#3) ergeben sich aus unterschiedlichen Konstellationen der prototypischen konzeptuellen Raummodelle, abgeleitet von den untersuchten Referenzprojekten (siehe Anhang).

Die Produktionsmethoden, die in den vorgeschlagenen Zonen der Prototypen verwendet wurden, wurden aus den untersuchten Referenzprojekten entlehnt. Diese Gebäudetypologien, jeweils mit dem identen Gebäudevolumen von 11.340 m<sup>3</sup> unterschieden sich hauptsächlich in der Trakttiefe und deren Auswirkungen auf Ausrichtung, Produktionsvolumen und den resultierenden Erschließungskonzepten. Die energetische Voruntersuchung mit reduzierten Simulationsparametern sowie Ertragsabschätzungen berücksichtigten die Wachstumsbedingungen für Salate (Licht, Temperatur, Wasserbedarf) und ließen somit erste Schlüsse für eine Priorisierung dieser drei Varianten für das darauffolgende Arbeitspaket zu.

Alle drei untersuchten, typologisch differierenden Farmen wurden energetisch untersucht. Die notwendigen technischen Gebäudeausrüstungen (TGA) wurden dimensioniert und in Flächen für Technikräume und Schächte in das Raumprogramm integriert. Alle drei Farmen inkl. TGA sind im Grundriss und Schnitt dargestellt und können dem Anhang entnommen werden.

Der iterative Entwicklungsprozess der drei entwickelten typologischen Grundformen führte beim Halbzeitmeeting der KonsortialpartnerInnen zu einer Favorisierung bzw. Priorisierung eines der drei untersuchten Typen einer Vertikalen Farm (VF#2), welche sowohl aus architektonischer, energieplanerischer und pflanzenphysiologischer Perspektive das größte Potential zeigte.

Durch die Festlegung des Typs konnte der Detaillierungsprozess der Planung erhöht, das Simulationsmodell vervollständigt und das Funktions- und Raumprogramm finalisiert werden. In diesem Entwicklungsschritt wurde der Vertikalen Farm der Name VF#4 zugewiesen.

### **1.3.4 Entwicklung des prototypischen Gebäudekonzepts (AP4)**

Erkenntnisse aus AP3, insbesondere den Workshops des Meeting 3 werden nun weiterführend sukzessive in neue Planstände überführt. Hierfür wurden Stakeholder- und ExpertInnenmeetings einberufen. Bezüglich Aspekten der Stadtentwicklung wurden Gespräche mit

- Elisabeth Maschat, MA 18, Flächenwidmungs- und Bebauungsplanung geführt sowie der Sondierung möglicher bestehender Instrumente zur Umsetzung mit

- Denise Schluderbacher Gries und Volkmar Klaus Pammer, MA 21, bzgl. Betrachtungsweisen hinsichtlich Umweltschutz mit
- Christian Härtel, MA 22 und
- Hermann Erich, Projektleitung Seestadt Aspern.

Weiters wurden Termine mit

- Irmgard Eder, MA37 hinsichtlich Brandschutz wahrgenommen sowie eine Vorbesprechung für konstruktive Maßnahmen mit
- Bollinger und Grohmann-Ingenieure.

So konnten konstruktive, brandschutztechnische Überlegungen in den Planstand übernommen werden.

Die ersten Simulationsergebnisse ermöglichten eine Vordimensionierung notwendiger Volumen für die Gebäudetechnik.

Wandaufbauten und bauphysikalische Entscheidungen wurden während des Simulationsprozesses bzw. der vorliegenden Ergebnisse bezüglich Energieverbrauch getroffen und somit die Gebäudehülle kontinuierlich optimiert.

Das Simulationsmodell wurde in dieser Phase im Detail entwickelt und evaluiert. Regelstrategien, die Eingabe pflanzenspezifische Parameter, Variationen der Gebäudehülle sowie der Einsatz von mechanischer und natürlicher Lüftung, Entfeuchtung und Beheizung wurden hinsichtlich der thermischen Performance validiert und optimiert. Die detaillierte Beschreibung des Simulationsmodells befindet sich in Kapitel 1.3.6.

### **1.3.5 Ermittlung der Energie- und Stoffströme (AP5)**

Recherche und Auswertung von Daten bzgl. Energie- und Wasserbedarf von bestehenden vertikalen Farmen und Gewächshäusern dienten zur komparativen Untersuchung der eigenen Berechnungs- und Simulationsergebnisse.

Der Vergleich der Daten von VF#4 mit anderen realisierten oder in sich in Planung befindlichen Vertikalen Farmen gestaltete sich schwierig, da sich Unternehmen mit der Herausgabe von empirischen Daten, allen voran dem Energieverbrauch für Heizung und Beleuchtung als sehr zurückhaltend verhielten. Um dennoch Vergleichszahlen generieren zu können, wurden Daten von Betreibern von High-Tech-Gewächshäuser erhoben und mit den oben genannten Ergebnissen verglichen. Die Daten von den Gewächshäusern Sundrop (Australien), Houwellings Greenhouses (USA) und Zeiler Tomaten (Österreich) ermöglichten somit spezifische Vergleiche mit den eigenen Ergebnissen, hauptsächlich für Ertrag, Bedarf an Tages- bzw. Kunstlicht sowie Wasserverbrauch. Die ausgewählten Referenzprojekte hierzu können aus Anhang entnommen werden.

Das in AP4 entwickelte Simulationsmodell wurde zunächst für Vergleichsrechnungen verwendet. Es wurden alle Pflanzen des Pflanzenkatalogs in der Zone 2 für ein Jahr gerechnet. Die

Resultate ermöglichen einen direkten Vergleich unterschiedlicher Pflanzen in Bezug auf den Energiebedarf. Zudem wurden der Gesamtenergiebedarf der VF#4 berechnet. Die Zonen wurden entsprechend der Anbaumethode und der Pflanzenarten und Kulturfolge berechnet. Alle anderen Gebäudezonen wie Aufzucht, Markt, Büros, Sanitäranlagen, etc. wurden in den Energiebilanzen berücksichtigt.

Die Methodik und Resultate zur Ermittlung des Potentials einer Vertical Farm als verschiebbare Last im Smart Grid werden im Kapitel 2.3 im Detail erläutert.

### 1.3.6 Bewertung (AP6)

Die qualitative und quantitative Bewertung der prototypischen Vertikalen Farm VF#4 erfolgt anhand der typologischen und technischen Erkenntnisse aus AP4 und den Simulationsergebnissen aus AP5.

Dazu wurde die Gesamtenergiebilanz der Vertikalen Farm inkl. der grauen Energie zur Errichtung des Gebäudes und den in AP4 definierten Kulturfolgenkatalog pro Zone berechnet. Ergänzt werden die Daten durch Stoffströme und Ertragsmengen der verwendeten Kulturfolgen und Anbaumethoden.

Resultierend aus den Erkenntnissen werden die Chancen und Herausforderungen hinsichtlich ökologischen, ökonomischen und sozialen Gesichtspunkten beschrieben und die Offenlegung der Potenziale zum Beitrag einer Nachhaltigkeitssteigerung für die urbane Lebensmittelproduktion erarbeitet.

Die Ergebnisse aus AP5 dienen als Grundlagen- und Anforderungskatalog für weiterführende Forschungsprojekte. Dabei können die Ergebnisse der VF#4 als „proof of concept“ definiert werden.

### 1.3.7 Simulationsmodell der Vertikalen Farm

#### 1.3.7.1 Standort, Wetterdaten

Als Standort wurde Wien fixiert. Extremtemperaturen liegen im Winter bei -11,0°C und im Sommer bei +31,1°C. (ASHRAE IWE2 Weather File for WIEN-SCHWECHAT-FLUG. (c) 2011)

	Winter	Summer	
Dry-bulb min	-11.0	17.3	°C
Dry-bulb max	-5.6	31.1	°C
Wet-bulb max	-6.1	20.9	°C
Wind direction	340	160	°
Wind speed	3.1	4.7	m/s
Clear-sky tau_b	0.324	0.393	
optical depth tau_d	2.431	2.249	

Tabelle 1 - Auslegungsbedingungen am Standort – Auszug IDA ICE basierend auf den beschriebenen Wetterdaten (ASHRAE IWE2 Weather File for WIEN-SCHWECHAT-FLUG. (c) 2011)

### 1.3.7.2 Simulationsmodelle

Das Simulationsmodell zur Untersuchung der Performance und Auslegungsparameter sowie der Entwicklung der Regelung ist reduziert auf eine Zone (Vertical Farming Zone 2). Die Untersuchungen im diesem Kapitel 1.3.6.2 beziehen sich auf diesen Teil des Gebäudes. Die Umgebung des Gebäudes sowie die Gesamthülle des Gebäudes sind berücksichtigt (Eigenverschattung). Die Innenscheiben der Zone (Zone 2) sind im Modell opak gerechnet.

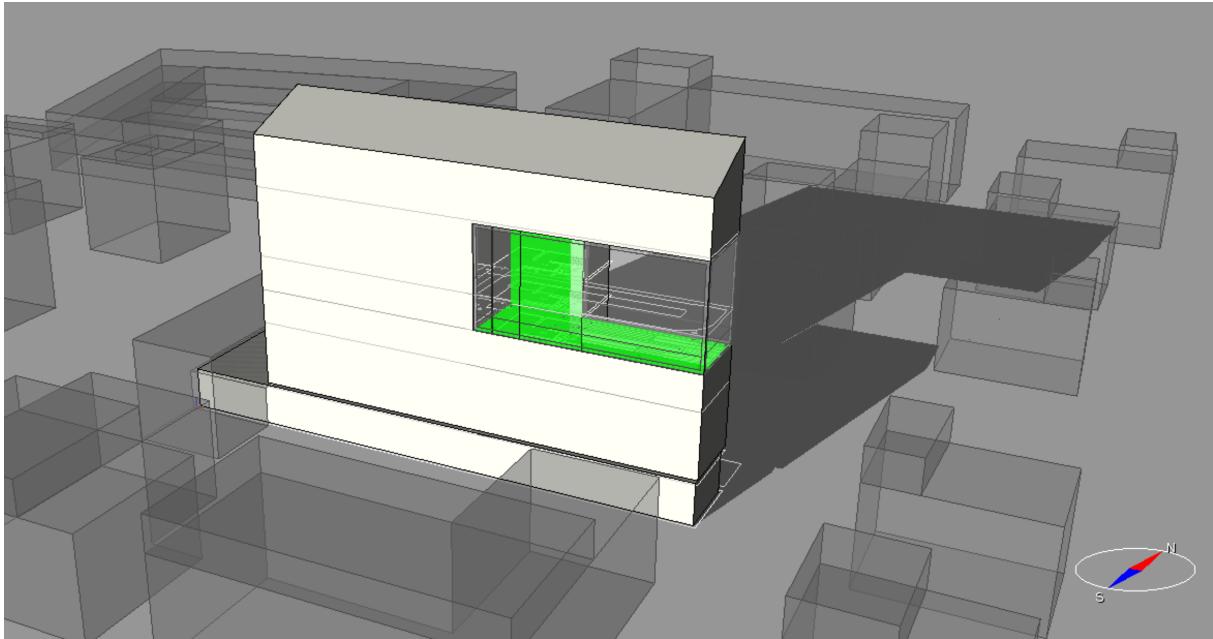


Abbildung 1 - Simulationsmodell mit Zone 2 als Basis für die Untersuchungen

Die Energiebedarfsberechnung wurde anhand der Gewächshauszonen des gesamten Gebäudes berechnet. Die Ergebnisse sind für den besseren Vergleich auf die Quadratmeter Anbaufläche spezifisch umgerechnet.

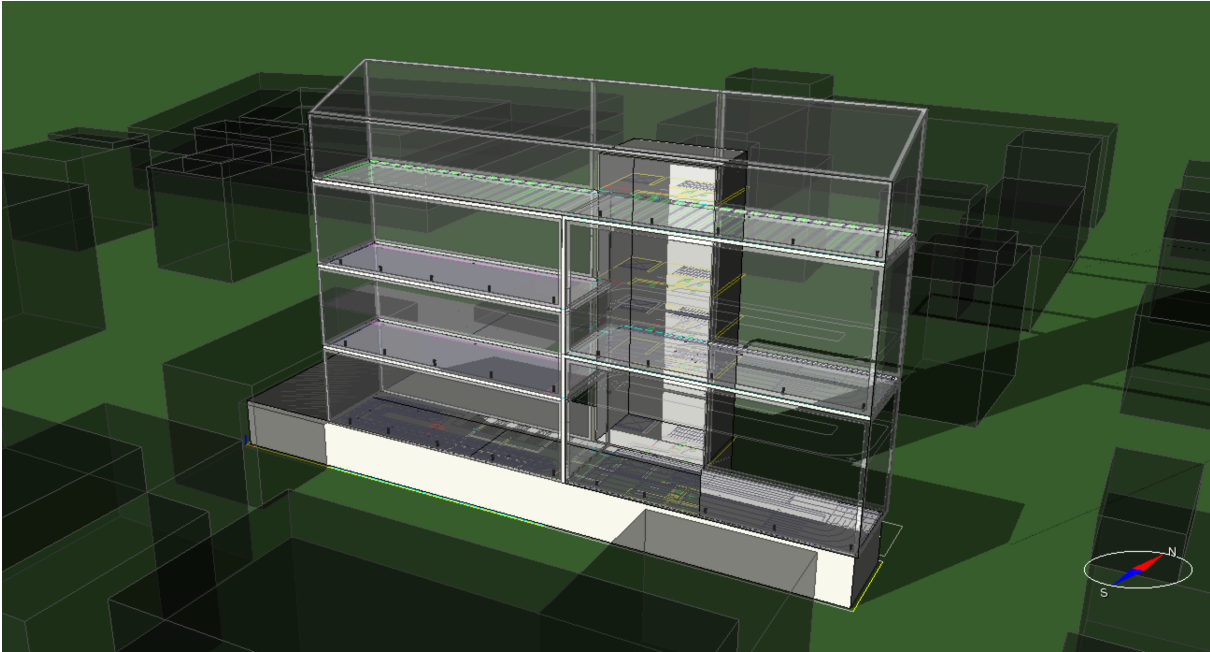


Abbildung 2 - Simulationsmodell mit allen Gewächshauszonen 1-6

### 1.3.7.3 Gebäudevolumen, untersuchte VF Zone

Die Untersuchungen der VF#4 wurde im Detail an einer Zone entwickelt. Dabei wurde die VF2 Zone exemplarisch betrachtet. Die definierten Randbedingungen dienen zur Untersuchung der Performance und Entwicklung der Regelungen für das Licht, die Lüftung und die Screens.

VF	Pflanzen Art	Fläche m <sup>2</sup>	Höhe m	Volumen m <sup>3</sup>	Anbaufläche 1 m <sup>2</sup>	Anbaufläche 2 m <sup>2</sup>	Anbaufläche Summe m <sup>2</sup>	Anbaufläche/Volumen m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
1 EG	Basilikum	186.6	10.95	2043.27	1004	0	1004	0.491369227
2 OG2	Vogerlsalat	186.5	10.95	2042.175	1004	0	1004	0.491632696
3 EG	Pak Choi	185.8	7.2	1337.76	110.4	564.4	674.8	0.504425308
4 OG1	Endivien	185.7	7.2	1337.04	735.54	0	735.54	0.550125651
5 OG3	Lollo rosso	185.6	7.2	1336.32	735.54	0	735.54	0.550422055
6 OG4	Tomaten und Erdbeeren unter der Decke	378	7.2	2721.6	94.18	94.68	188.86	0.069393004
							<b>4342.74</b>	

Tabelle 2 - tabellarische Darstellung der Anbauzonen der VF#4

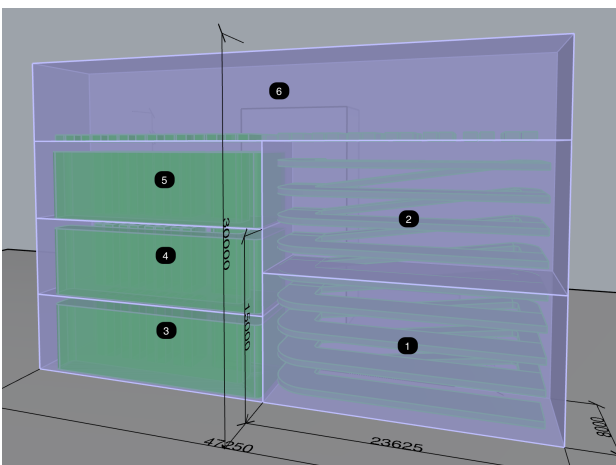


Abbildung 3 - schematische Darstellung mit den nummerierten Anbauzonen der VF#4

### 1.3.7.4 Lage des Gebäudes

Die Gewächshäuser sind nach Süden orientiert (Breitseite des Gebäudes). Die Umgebungsgebäude wurden als 3D Modell integriert. Die Gebäude auf dem Grundstück liegen einem erarbeiteten Masterplan zu Grunde.

### 1.3.8 Simulationsmodell Sollwerte

In diesem Kapitel sind die grundlegenden Sollwerte für das Modell der thermischen Simulationen zusammengestellt.

#### 1.3.8.1 Gebäudehülle: Transparente Flächen

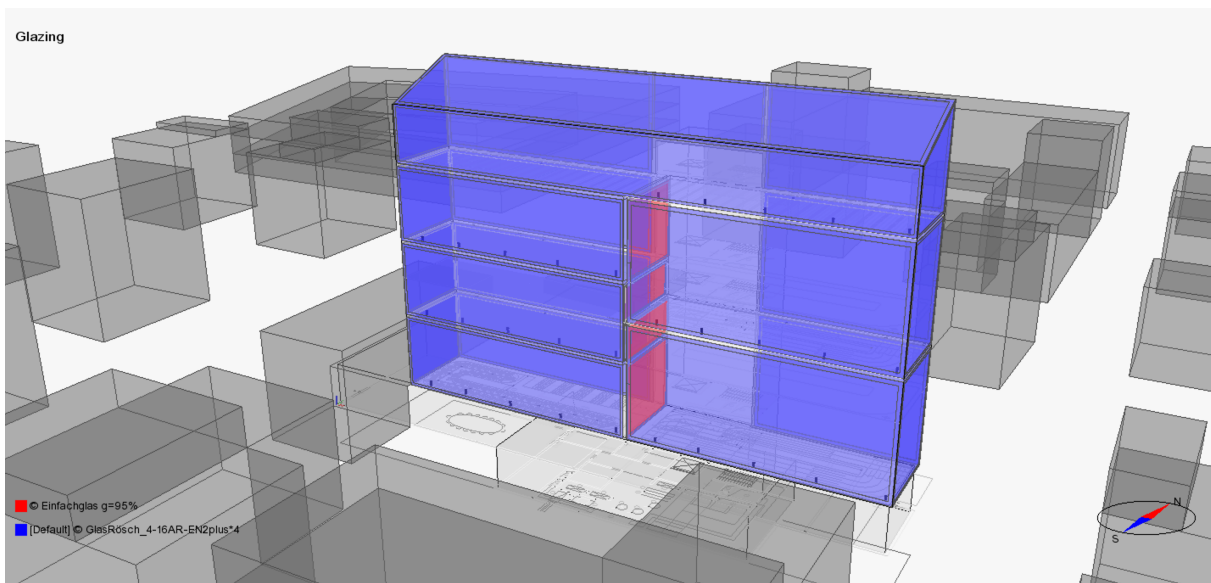


Abbildung 4 - Gebäudehülle: Transparente Flächen

Die Innenverglasung der Zone entspricht der Verglasung „VF window Einfachglas“. Die Außenscheiben entsprechen der Verglasung „GlasTrösch“.

Name	Glazing	g (SHGC)	Visible transmittance	Glazing U, W/(m <sup>2</sup> K)	Frame fract., 0-1	Frame U, W/(m <sup>2</sup> K)
VF Window 2-fach	© Double Clear with Argon (WIN7)	0.769	0.814	2.715	0.1	2
VF window Einfachglas	Einfachglas g=95%	0.95	0.9	5.8	0.1	2
GlasTrösch	4 - 16AR - EN2plus*4	0.64	0.85	1.1	0.1	2

Tabelle 3 - Verglasungen VF#4 (gelbe markierte Scheiben wurden verwendet)

Die Verglasungen wurden mit dem Standard Fenstermodell von IDA ICE berechnet.



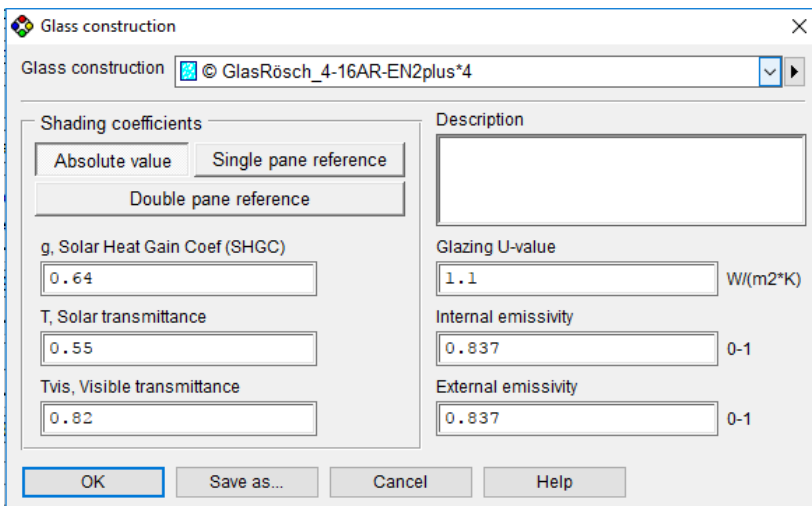


Abbildung 5 - Verglasung Gewächshäuser

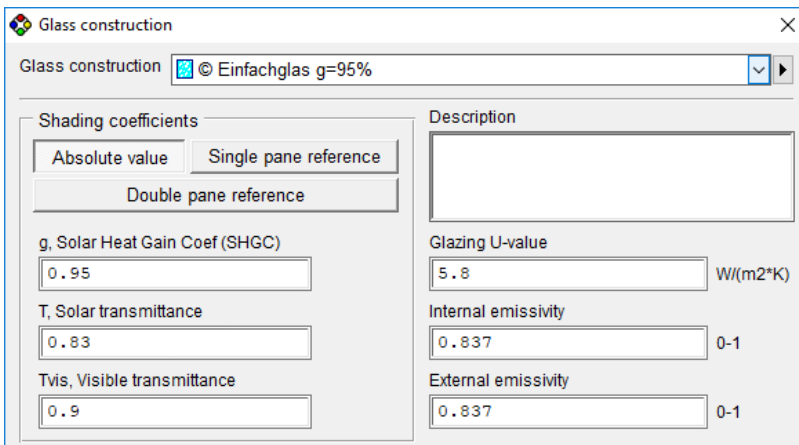


Abbildung 6 - Verglasung Innenscheiben zwischen den Gewächshäusern

### 1.3.8.2 Gebäudehülle: Opake Flächen

Im derzeitigen Modell sind die opaken Flächen lediglich in Form einer Innenwand zum Kern und den Zwischendecken vorhanden. Folgende Tabelle zeigt die bereits definierten Wandaufbauten und deren physikalischen Eigenschaften.

Tabelle 4 - Aufbauten der opaken Gebäudekonstruktion

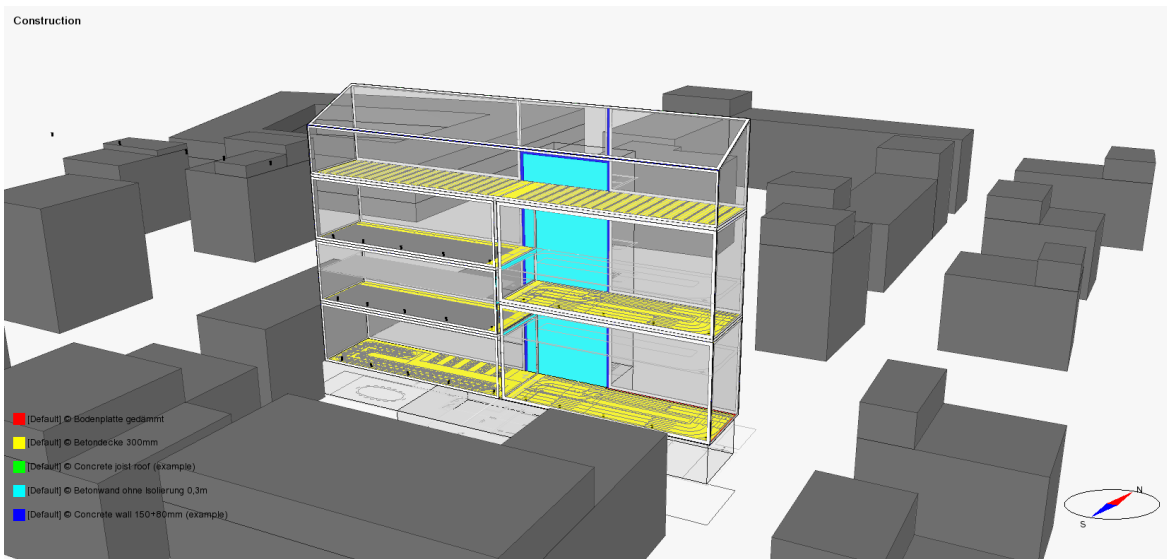


Abbildung 7 - Darstellung der opaken Gebäudekonstruktionen im 3D Modell

### 1.3.8.3 Innere Lasten

Die inneren Lasten der Gewächshäuser beschränken sich auf das künstliche Licht für die Pflanzen und die Verdunstung von Wasser durch die Pflanzen.

### 1.3.8.4 Licht

Im Basismodell wurde in allen Zonen mit den gleichen spezifischen Parametern für die Beleuchtung gerechnet. Die elektrische Anschlussleistung wurde mit  $70 \text{ W/m}^2$  fixiert. Der Wärmeanteil durch Konvektion an den Lampen liegt bei 45 %. Die Leistung ergibt sich unter der Annahme, dass die Lampen ein PPFD von  $150 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  bei maximaler Leistung der Lampen an die Pflanzen abgeben.

Number of units	<input type="text" value="1004"/>
<a href="#">Control strategy</a>	<input type="text" value="LightControlDaySum_150PPFD_update"/>
<a href="#">Schedule</a>	<input type="text" value="© 04-22 täglich"/>
Rated input per unit	<input type="text" value="70"/> W
Luminous efficacy	<input type="text" value="110"/> lm/W
Convective fraction	<input type="text" value="0.45"/> 0-1
<a href="#">Energy meter</a>	<input type="text" value="[Default] Lighting, facility"/>

Abbildung 8 - Lichtparameter der Zone 2 (1.004 m<sup>2</sup> Anbaufläche)

Das künstliche Licht ergänzt das Tageslicht über die äquivalenten lux ( $150 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  entsprechen 7.998 lux) stufenlos. Das Tageslicht wird mit einem Sensor pro Zone gemessen. Die Position des Sensors ist bei allen Zonen mittig, 2,5 m von der Südfassade und 1,4 m unterhalb der Zwischendeckenunterseite positioniert.

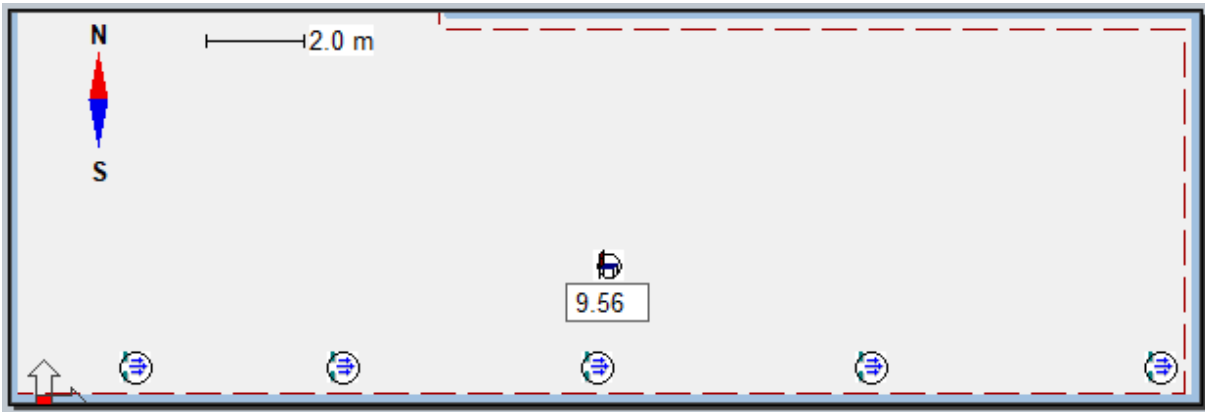


Abbildung 9 - Position des Tageslichtsensors der Zone 2

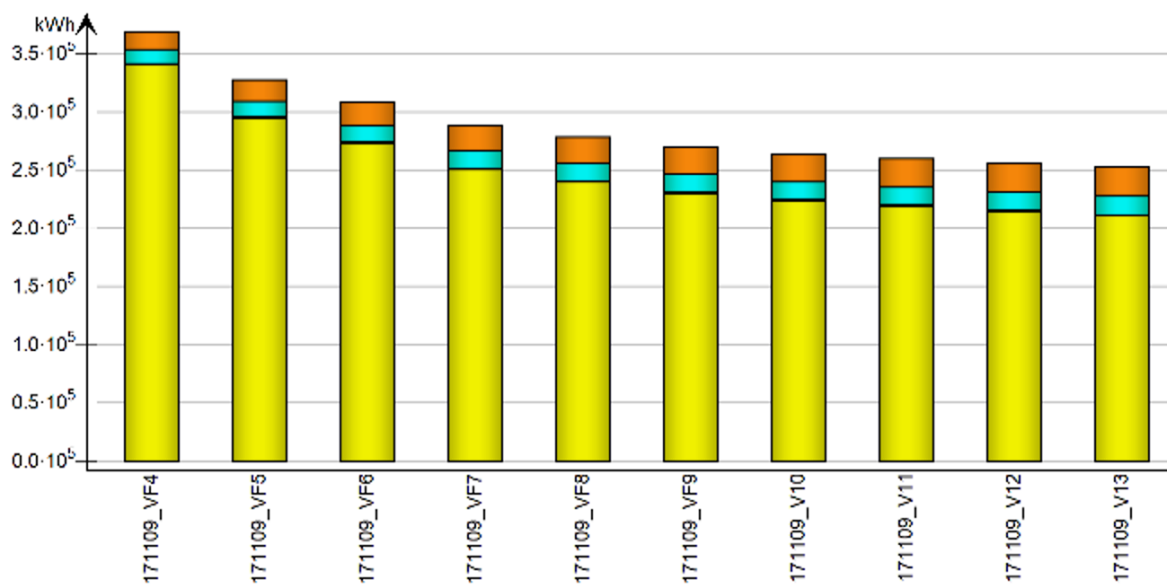


Abbildung 10 - Ermittlung der Position des Lichtsensors durch Simulationsvarianten

Anhand einer Simulationsreihe wurde der notwendige Strombedarf für die künstliche Beleuchtung in Abhängigkeit der Position in der z-Achse des Lichtsensors ermittelt – siehe Abbildung 10. Realistische Werte unter Anbetracht der gestapelten Pflanzen wurden bei einer Sensorposition von 1,4 m unter Decke im Modell ermittelt.

Die Anforderung an das künstliche Licht wird jeden Tag, 365 Tage im Jahr um 04:00 Uhr aktiviert und um 22:00 Uhr deaktiviert.

Die Regelung des Kunstlichtes erfolgt über eine eigens entwickelte Regelstrategie. Das Licht (Kunstlicht und Tageslicht) wird jeden Tag ab Mitternacht integriert. Übersteigt die Lichtmenge (luxh) den Sollwert von  $18 \text{ h} \cdot 150 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s} = 518.270.400 \text{ luxh}$  wird die Anforderung an das künstliche Licht deaktiviert.

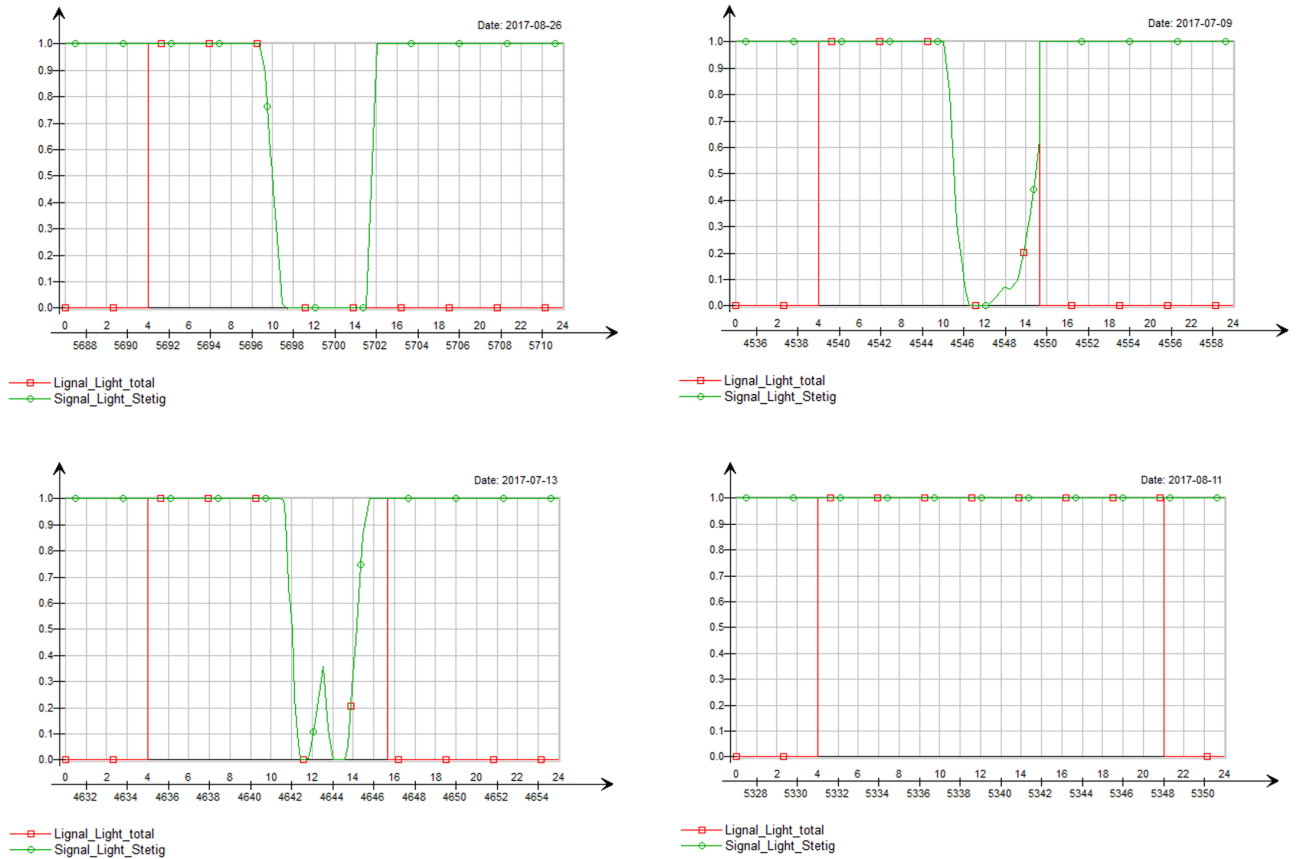


Abbildung 11 - Regelverhalten der Lichtregelung (SumControl)

Abbildung 11 zeigt die Regelstrategie an ausgewählten Tagen im Jahr. Dabei entspricht das rote Signal der Summe aus Tageslicht und künstlichem Licht. Dieses fällt ab sobald die geforderte Tagesgesamtlichtmenge erreicht ist. Das grüne Signal zeigt die Anforderung an das künstliche Licht, dieser fällt auf null ab, wenn ausreichend Tageslicht zur Verfügung steht. Abbildung 12 zeigt das eigens erstellte Regelschema aus der Software IDA ICE (Screenshot).

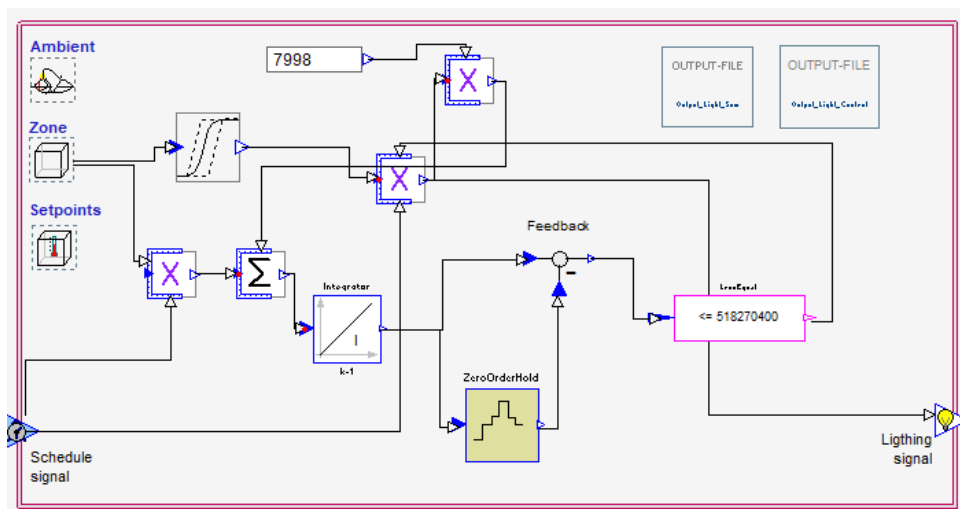


Abbildung 12 - Regelung SumControl

### 1.3.8.5 Pflanzen / Feuchte

Die Pflanzen geben während der Photosynthese Wasser in Form von Verdunstung an die Umgebung ab. Das Wasser wirkt somit auf den Raum als latente Last. Zudem muss das Wasser dem Volumen durch die Lüftung wieder entzogen werden.

Das Wasser wird in Form eines idealisierten Verdunstungsprofils an den Raum abgegeben. Der Wassereintrag wird in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit geregelt. Der Peak liegt bei 100 % Verdunstung und  $17,58 \text{ l/d/m}^2$  über das Tagesprofil. Im Mittel werden  $4,49 \text{ l/d/m}^2$  verdunstet.

Number of units	<input type="text" value="1004"/>
<a href="#">Schedule</a>	Verdunstung_Wasser_VF_hourly
Emitted heat per unit <small>Only this consumes energy</small>	<input type="text" value="0"/> W
Energy carrier	Electricity
<a href="#">Energy meter</a>	[Default] Equipment, tenant
<b>Advanced</b>	
Long wave radiation fraction	<input type="text" value="0.0"/> 0-1
Liquid water emission per unit	<input type="text" value="2.5463E-5"/> kg/s <small>Emitted as water droplets, i.e. the evaporation heat is removed from the air</small>
Dry steam emission per unit	<input type="text" value="0.0"/> kg/s <small>Emitted as water vapor, i.e. the evaporation heat is not removed from the air</small>
CO2 per unit	<input type="text" value="0.0"/> mg/s
Utilization factor	<input type="text" value="1"/> 0-1 <small>Share of heat and other emissions that are deposited in zone</small>

Abbildung 13 - Eingabe der Parameter Verdunstung des Wassers in der Zone 2

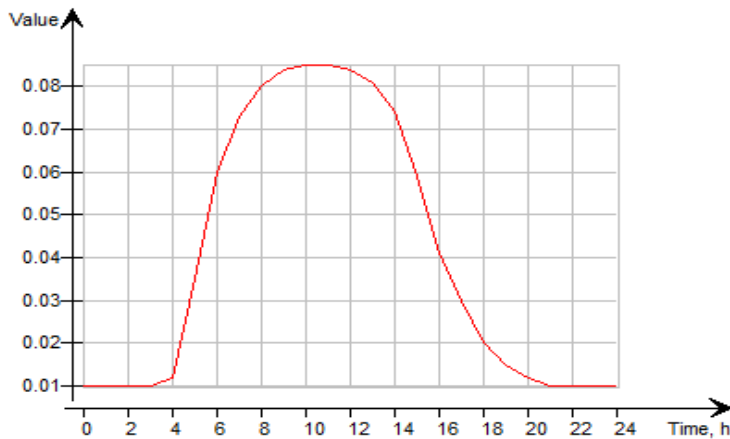


Abbildung 14 - Tagesprofil Verdunstung

Abbildung 14 zeigt den typischen Tagesverlauf der Verdunstung von Pflanzen

### 1.3.8.6 Personen

In den Gewächshäusern sind keine Personen als innere Last definiert. In der Praxis werden sich Personen nur kurz Zeit in den Zonen aufhalten. Die im Modell definierte Person ist nie anwesend und dient lediglich als Position für den Lichtsensor.

### 1.3.8.7 Heizung

Die Beheizung der Gewächshäuser erfolgt über Konvektoren und Wärmeübergabe durch freie Konvektion – dies entspricht einer Rohrheizung. Die Leistung der Heizung richtet sich automatisch nach dem definierten Heizsollwert. Der Sollwert im Heizbetrieb liegt konstant bei 20°C.

The screenshot shows the 'Water Radiator' configuration interface. It is divided into two main sections: 'Simplified model' and 'Design conditions'.

**Simplified model:**

- Design power:** 50000 W
- W/m<sup>2</sup> floor area:** 264.6
- N-value, exponent of power curve (N):** 1.28

**Use manufacturer's data:**

- Device type:** n.a.

**Design conditions:**

- Controller:** Proportional
- Longwave Emissivity:** (empty field)
- Sensor:** Air temperature
- Air temperature at maximum power (Tair):** 20 Deg-C
- Supply temp at maximum power (TliqIn):** 55 Deg-C
- Return temperature at max power (TliqOut):** 45 Deg-C
- Massflow at full power:** 1.194 kg/s

Abbildung 15 - Eingabeparameter der Konvektorheizung pro Zone

### 1.3.8.8 Kühlung

Es wird nur die Zuluft der mechanischen Lüftungsanlage gekühlt. Siehe Zuluft-Temperatur im Kapitel Lüftung.

Der Sollwert im Kühlbetrieb liegt konstant bei 26°C.

### 1.3.8.9 Mechanische Lüftung

Die Lüftung erfolgt, neben der natürlichen Lüftung über die Fenster, über eine mechanische Lüftungsanlage. Die mechanische Lüftung sichert eine Grundlüftung mit WRG insbesondere im Winter.

Der Luftwechsel durch die mechanische Lüftungsanlage liegt konstant bei:  $n = 1,0$  1/h.

Das Lüftungsgerät verfügt über eine WRG mit einem Wirkungsgrad von 85 % und ist durchgehend aktiviert. Das Lüftungsgerät konditioniert die Zuluft über ein Heiz- und ein Kühlregister.

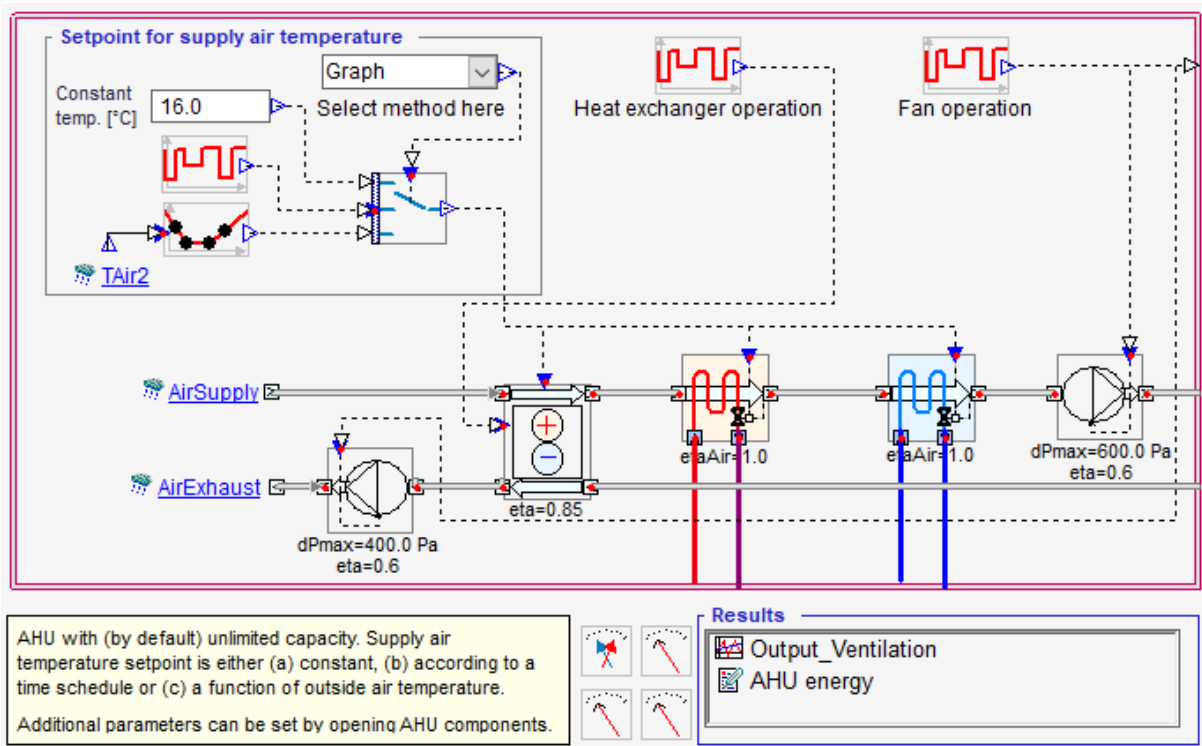


Abbildung 16 - Schema des Lüftungsgeräts

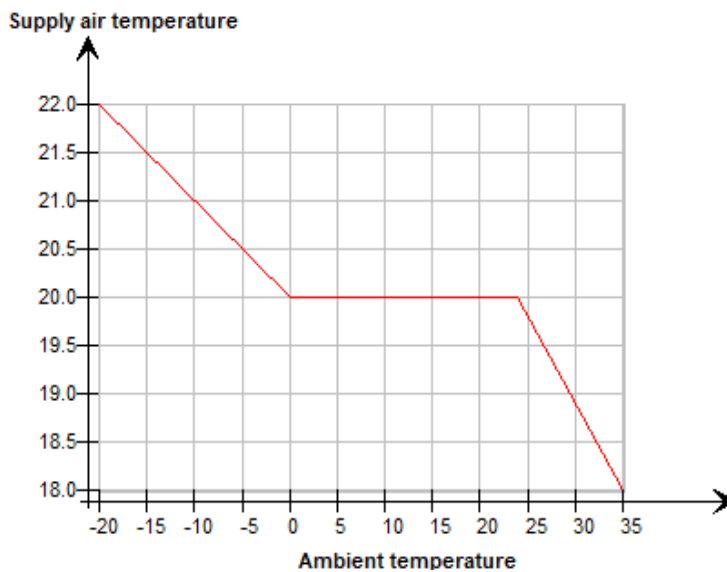


Abbildung 17 - Zulufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Abbildung 17 zeigt die Zulufttemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur. Bei sehr kalten Außentemperaturen steigt die Zulufttemperatur bis auf 22°C. An sehr heißen Tagen im Sommer sinkt die Zulufttemperatur bis auf 18°C.

### 1.3.8.10 Natürliche Lüftung

Das Gewächshaus wird zusätzlich zum mechanischen Luftaustausch über die Fenster gelüftet. Simulationen ergaben, dass jeweils 30 % der Süd- und Nordfassade öffnenbar sein müssen, um

die Temperaturen im Sommer innerhalb eines bestimmten Bereichs halten zu können. Hierzu wurden Simulationsvarianten erstellt.

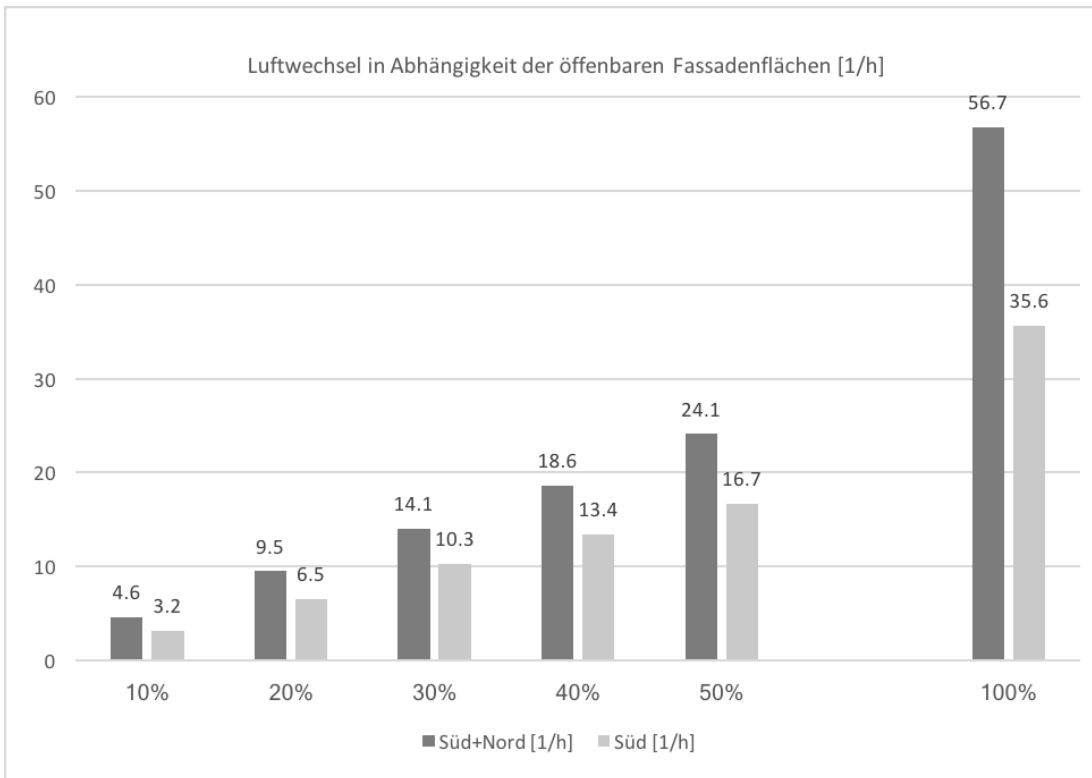


Abbildung 18 - Ermittlung des Luftwechsels beim Öffnen der Süd- und Nord- sowie nur der Süd-Fassade

Mehr öffnbare Fläche hat im Verhältnis zum Aufwand keinen wesentlich höheren Effekt. Eine geringere öffnbare Fläche führt zu einer spürbaren Erhöhung der Lufttemperatur in der Zone.

In der Fassade sind die öffnbaren Fenster über die gesamte Breite jeweils 1 m oben, in der Mitte und unten angeordnet (siehe Schnittpläne). Die Fenster werden als Jalousiefenster ausgeführt.

Der resultierende Luftwechsel bei voll geöffneten Fenstern liegt bei ca.  $n = 14$  1/h.



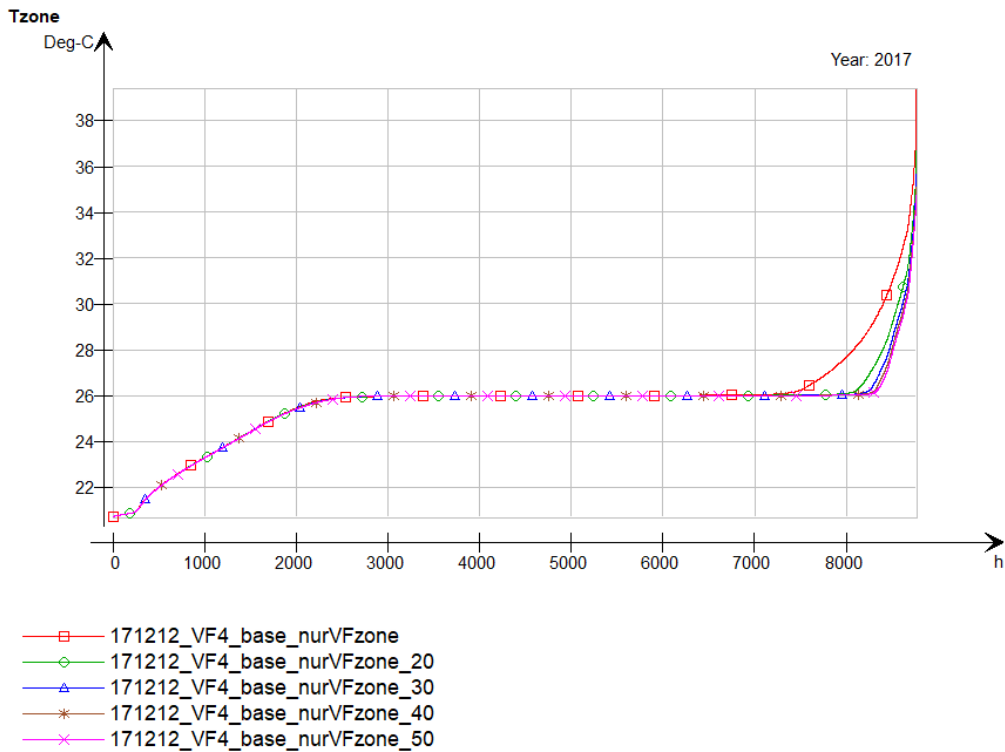


Abbildung 19 -Temperatur in der Zone in Abhängigkeit der prozentuellen Fensteröffnung

Die Regelung öffnet die Fenster, wenn die Außentemperatur kleiner als die maximale Zonentemperatur ist und wenn die Zonentemperatur größer als die Außentemperatur ist (Sommerkühlung).

Untersuchungen der Fensteröffnung in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit haben zu keinen merklichen und sinnvollen Verbesserungen geführt. Denkbar ist eine Notlüftung der Fester bei 95% Luftfeuchtigkeit - allerdings tritt dieser Fall bei oben angewendeter Fensteröffnungsregelung nicht auf.

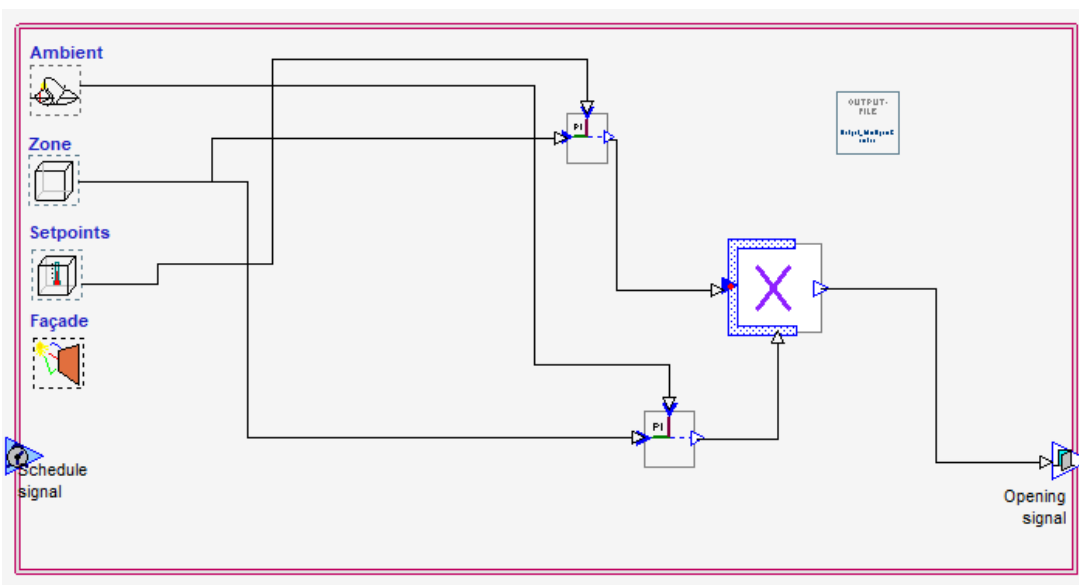


Abbildung 20 - Regelungsschemata der Fensteröffnung

### 1.3.8.11 Verschattung und EnergyScreen

Um die Auswirkungen von Verschattungssystemen und EnergyScreens zu untersuchen, wurde ein innenliegendes Rollo als Verschattung und EnergyScreen modelliert. Die Simulationen ergaben, dass die Auswirkungen der Verschattung zwar spürbar, aber nicht wesentlich relevant sind. Die Energiebedarfsberechnungen wurden ohne Verschattung und EnergyScreen durchgeführt.

### 1.3.8.12 Auslegung TGA

Heiz- und Kühllast

Für das Gesamtmodell wurden zur Auslegung folgende Lasten ermittelt:

Heizlast: 310 kW

Kühllast: 31 kW

Zur Wärmeerzeugung kommt eine Wasser-Wasser Wärmepumpe zum Einsatz. Zur Berechnung des Strombedarfs werden die konservativen Wirkungsgrade von COP = 4 für die Heizung und COP = 3 für die Warmwasserbereitung verwendet. Die Kühlung erfolgt ebenfalls über die WP mit einem COP = 3. Alternativ zum Brunnenwasser können auch Tiefenbohrungen oder Eisspeicher als Energiequelle verwendet werden.

Technische Einbauten wie Verteiler, Pufferspeicher, WP, etc. sind im Grundriss UG dargestellt. (siehe Anhang)

Luftmenge mechanische Lüftung

Die Auslegung der mechanischen Lüftungsanlage erfolgt mit dem Luftwechsel pro Zone von  $n = 1,0$  1/h. Dies entspricht eine Gesamtluftmenge von ca. 10.800 m<sup>3</sup>/h.

Zusätzlich kommt ein Lüftungsgerät für die zusätzlichen Räume wie Markt, Aufzucht, etc. zum Einsatz. Die Luftmenge ist mit 6.000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt.

Die Lüftungsgeräte sind im Keller des Gebäudes untergebracht, Positionen und Kanäle sind im UG Grundriss ersichtlich (siehe Anhang). Die Frischluft- und Fortluftführung erfolgt in einem eigenen Schacht über Dach.

Technikräume

1. Heizzentrale und Lüftungszentrale (Raumgröße: 179,13 m<sup>2</sup>)
2. Elektrik – Elektrozentrale (Raumgröße: 15,20 m<sup>2</sup>)
3. Sprinkler – Sprinklerzentrale (Raumgröße: 9,0m<sup>2</sup>) und Sprinklertank mit 27 m<sup>3</sup>.
4. Fertigation – Wasseraufbereitung für die Pflanzen (Raumgröße: 12,25 m<sup>2</sup>)

		number	B	T	H	area	revision	area total		
			m	m	m	m2		m2		
1	Wasser-Wasser Wärmepumpe	1	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00		
2	Brunnenwasser Wärmetauscher	1	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00		
3	Verteiler Heizung	1	3.00	0.50	3.00	1.50	3.00	4.50		
4	Verteiler Kühlung	1	3.00	0.50	3.00	1.50	3.00	4.50		
5	Pufferspeicher, Ausdehnungsgefäß	3	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	6.00		
6	LZ1 Lüftungsgerät VF	1	9.00	2.00	3.00	18.00	18.00	36.00		
7	LZ2 Lüftungsgerät Markt, Büros	1	4.00	1.00	3.00	4.00	4.00	8.00		
8	Schaltschranke Regelung	3	2.00	0.70	2.00	1.40	2.00	10.20		
9	Schacht FL/FOL	1	3.00	2.25				6.75		
10	Schacht ZUL/ABL VF	1	5.10	1.20				6.12		
11	Schacht Hydraulik, Elektro VF	2	1.70	1.20				2.04		
12	Schacht ZUL/ABL Markt, Büro	1	1.60	0.78				1.25		
13	Schacht Elektro, EG	1	1.60	0.78				1.25		
14	Schacht Elektro VF	1	1.40	0.80				1.12		
								35.00	97.77	132.77 m2
	Bewegungsfläche									46.36 m2
										144.13 m2

Tabelle 5 - Übersicht TGA und Schächte

### 1.3.9 Zusammenfassung der wichtigsten Sollwerte VF#4

- Mechanische Lüftung, 1-facher Luftwechsel permanent, SFP ZUL 2,0 kW/(m<sup>3</sup>/s), SFP ABL 1,25 kW/(m<sup>3</sup>/s)
- Mechanische Lüftung mit Heiz und Kühlregister
- Fensterlüftung Südfassade max. 30%, Nordfassade max. 30%,
- Fensterlüftung Regelung über Zonentemperatur Tzone > 26° > Tamb Keine Kühlung
- Heizung über Konvektor
- Licht mit SumControl
- Sollwert Heizen 20°C, Kühlen 26°C konstant
- Kalte Woche 16. Januar – 22. Januar
- Warme Woche 17. Juli – 23. Juli
- Verdunstung von 4,49 l/d/m<sup>2</sup> regelt über ein typisches Tagesverdunstungsprofil von Pflanzen.

## 2 Ergebnisse

Die folgenden Seiten fassen die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Arbeitspakete 2-6 zusammen. Das Ziel der Untersuchungen, Studien und Simulationen des konzeptuellen Vorentwurfs ist es, Aussagen über die Gesamtenergiebilanz einer Vertikalen Farm für Wien treffen und Chancen und Herausforderungen hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Gesichtspunkte definieren zu können.

### 2.1 Untersuchung typologischer Lösungen

#### 2.1.1 Auswahl eines fiktiven Grundstücks

Bereits vor dem Verfassen des Forschungsantrags fiel das Interesse auf die Verortung des Forschungsprojekts auf die Seestadt Aspern. Das Konsortium sieht in diesem Stadtentwicklungsgebiet großes Potential in der Umsetzung als Demo-Projekt.

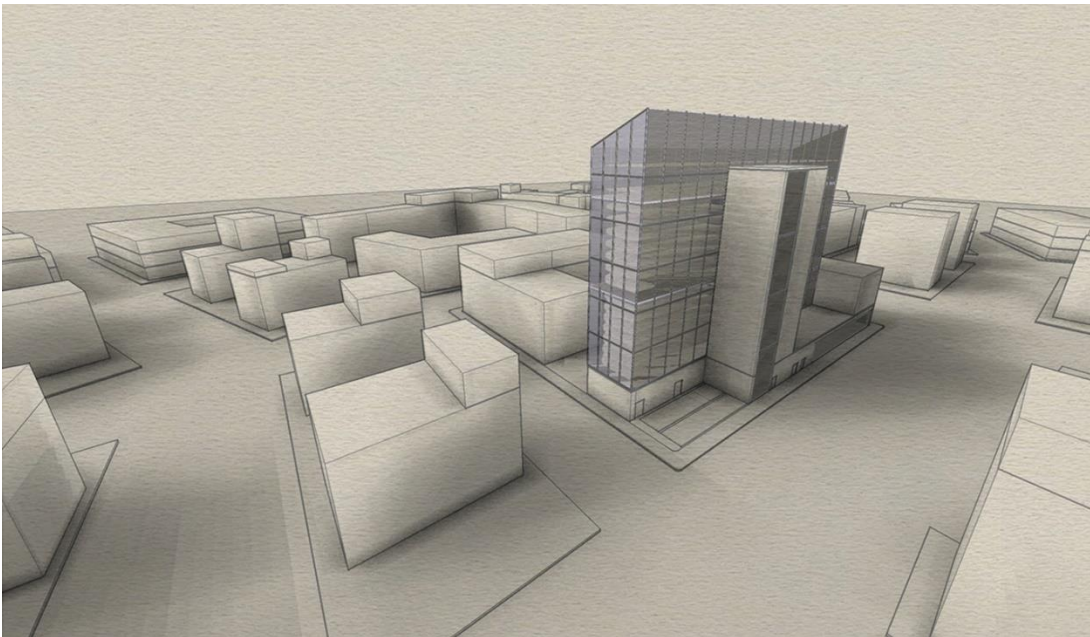


Abbildung 21 - VF#4 mit Randbebauung in der Seestadt Aspern

Um plausible Simulationsergebnisse durch die Integration der Randbebauungen und deren Einfluss auf das verfügbare Tageslicht zu erhalten und konkrete Aussagen bezüglich der Chancen und Herausforderungen der Verortung einer vertikalen Farm innerhalb des Stadtgefüges treffen zu können, wurde ein spezifischer Bauplatz definiert. Dieser wurde nach Kriterien wie Zentralität, Prominenz, Ausrichtung, geplanter Nutzung etc. ausgewählt und der Vorschlag bei einem Stakeholdertreffen diskutiert. Daran nahmen folgende Personen teil:

- Elisabeth Maschat, MA 18
- Denise Schluderbacher Gries, MA 21
- Volkmar Klaus Pammer, MA 21

- Christian Härtel, MA 22
- Hermann Erich, Projektleitung
- Helmut Holleis, vfi,
- Daniel Podmirseg, ige, TU Graz

Wesentliche Vorteile des Standorts können aus dem Stakeholdergespräch zusammengefasst werden:

- Zentrale Lage
- Prominente Lage, um das Leuchtturmprojekt VF in der gesamten Seestadt Aspern sichtbar zu machen
- Ausrichtung der Hauptfassade nach Süden und gleichzeitig Richtung Zentrum der Seestadt
- Kompatibel mit der im Bebauungsplan definierten Nutzung
- Einverständnis der verantwortlichen Stakeholder, dass solch ein Gebäude an dieser Stelle errichtet werden kann



Abbildung 22 - Bauplatz für die VF#4 in der Seestadt Aspern

### 2.1.2 Funktions- und Raumprogramm

Die Grundlagenermittlung sowie die Untersuchungen typologischer Varianten (VF#1, VF#2 und VF#3) führte letztlich zur Festlegung und Weiterentwicklung der VF#2, welche das größte Potential seitens der KonsortialpartnerInnen vermuten ließ.

Aufbauend auf der Analyse der Referenzprojekte (Referenzprojekte Skygreens in Singapur, Vertical Harvest in Jackson Wyoming, USA, Paignton Zoo in Devon, Großbritannien und Plantagon in Linköping Schweden) wurden das Funktions- und Raumprogramm abgeleitet (ersichtlich als Diagramm und 2D- bzw. 3D-Darstellungen im Anhang) und mit den KonsortialpartnerInnen weiter entwickelt. Wesentlich hierbei war die Abschätzung und Dimensionierung zusätzlicher Flächen, welche zusätzlich für die Flächen der Pflanzenproduktion notwendig sind wie Lager, Flächen für Verarbeitung und Anlieferung. Diese sind detailliert als Funktions- und Raumprogramm-Diagramm als auch in planerischer Darstellung im Anhang ersichtlich.

Für VF#4 wurde darauf aufbauend das Funktions- und Raumprogramm weiterentwickelt und damit planerisch in einen konzeptionellen Vorentwurf überführt. Das Gebäude besteht aus den Produktionseinheiten, der linearen Erweiterung der Produktionseinheit für Keimung, Jungpflanzenbereiche, Verarbeitung etc., sowie Personal- und Lagerräume, Technikräume und der horizontalen und vertikalen Erschließung. Das Gewächshaus stellt 66 % des Gesamtvolumens des Gebäudes dar und ist in sechs Zonen unterteilt, in denen Licht, Temperatur und Feuchtigkeit an die spezifischen Wachstumsbedingungen angepasst wurden. Sowohl das Funktions- und Raumprogramm als auch die planerischen Darstellungen der VF#4 können dem Anhang entnommen werden.

### 2.1.3 Geometrische Grundformen: Die Vertikalen Farmen (#1, #2, #3)

Alle nachfolgend beschriebenen Prototypen haben zur Entwicklung von VF#4 geführt. Sie weisen dasselbe Gebäudevolumen auf (11.340 m<sup>3</sup>). Detaillierte Informationen bzw. Pläne, Funktions- und Raumprogramme können dem Anhang entnommen werden.

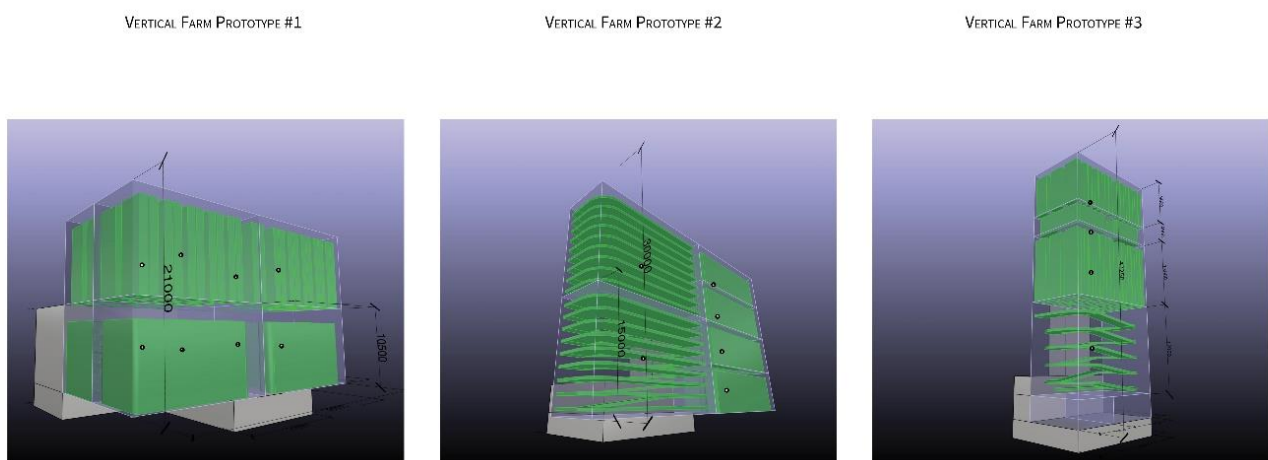


Abbildung 23 - Typologische Lösungen

## **VF#1**

Die in VF#1 implementierte Gebäudetypologie zielte auf ein kleines, kompaktes Gebäude ab. Das Ergebnis war ein Prototyp mit einer Höhe von 21 m und acht gleich großen Gewächshäusern mit den Maßen 18 m (x) x 7,5 (y) x 10,5 m (z).

## **VF#2**

Dieser Prototyp hat sich zu VF#4 entwickelt. Dieser Prototyp maß 47,25 m (x) x 25 m (y) x 30 m (z). Er beherbergt insgesamt sechs Zonen, die wie folgt verteilt sind: Auf der östlichen Hälfte sind vier vertikal gestapelte Zonen mit der gleichen Größe von 23,63 m (x) x 8 m (y) x 7,5 m (z), während auf der Westseite zwei vertikal gestapelte Zonen mit den Maßen 23,63 m (x) x 8 m (y) x 15 m (z) vorhanden sind.

## **VF#3**

VF#3 zielte darauf ab, ein Minimum an Grundfläche zu beanspruchen. Die Abmessungen sind 20 m (x) 17 m (y) x 47,25 m (z) und das Design verbindet vier vertikal gestapelte Zonen mit gleicher Grundfläche (20 m x 12 m), jedoch mit unterschiedlichen Höhen, von 4 m bis 17,5 m.

### **2.1.4 Auswahl der Typologie**

Die typologischen Möglichkeiten VF#1, 2 und 3 wurden hinsichtlich folgender Punkte verglichen:

- Ertrag
- Ausführbarkeit, auch in Hinblick auf Höhenbeschränkungen im städtischen Umfeld
- Flexibilität bei der Variierung des Anbaus verschiedener Pflanzen (Produktionsmethoden)
- Energiebedarf - dabei hat sich gezeigt, dass der Lichtbedarf den größten Unterschied zwischen den typologischen Lösungen darstellte
- Erschließung, kurze Wege zur effektiven Bewirtschaftung der Anbauvolumina
- Erschließung der Gebäudetechnik, insbesondere der Luftversorgung

VF#1 wurde aufgrund der schlechten Tagesbelichtung ausgeschlossen (insbesondere das untere Geschoss; das obere Geschoss ist zwar durch das Glasdach gut belichtet, allerdings ist dieses Volumen nicht stapelbar und so als VF Szenario schlecht geeignet). Zur Erschließung bedarf es einer aufwändigen Unterkellerung. Sie wies die niedrigsten Ergebnisse bezüglich Heizwärmebedarf durch das beste A/V-Verhältnis auf. Allerdings war der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung am höchsten.

VF#2 und VF#3 haben ähnliche Lichtbedarfsergebnisse. Allerdings ist die Erschließung in VF#3 aufgrund der kompakten Bauweise schwieriger. Die VF#2 überzeugt durch Flexibilität hinsichtlich der Installation verschiedener Produktionsmethoden, beste Tageslichtnutzung, Flexibilität hinsichtlich Höhe, gute Erschließung und Bewirtschaftung, ausgeglichenes Verhältnis Höhe zu Grundfläche.

Die beim Meeting 3 angesetzten Workshops haben ergeben, die VF#2 in das AP4 zu überführen. Sämtliche KonsortialpartnerInnen sehen das größte Entwicklungspotential

hinsichtlich Tageslichtausbeute, Energieverbrauch, Optimierung der Produktionsmethoden, Raumausnutzung und pflanzenphysiologischer Rahmenbedingungen.

Ergebnisse der konzeptuellen Dimensionierung und Platzierung horizontaler und vertikaler Erschließungsflächen und -volumen sowie Vordimensionierung notwendiger Volumina für die Gebäudetechnik sind planlich einsehbar und dem Anhang zu entnehmen. Zusätzliche Parameter wie das A/V-Verhältnis, Gebäudetiefe und Gebäudeform, Energiebedarf, Konzeptionierung einer Wachstums- und Ertragsmodellierung (Kulturfolge/Ertragserwartung) sind aus den Dokumenten „Komparative Untersuchung“ zu entnehmen.

## 2.2 Entwicklung des prototypischen Gebäudekonzepts – Die Vertikale Farm VF#4

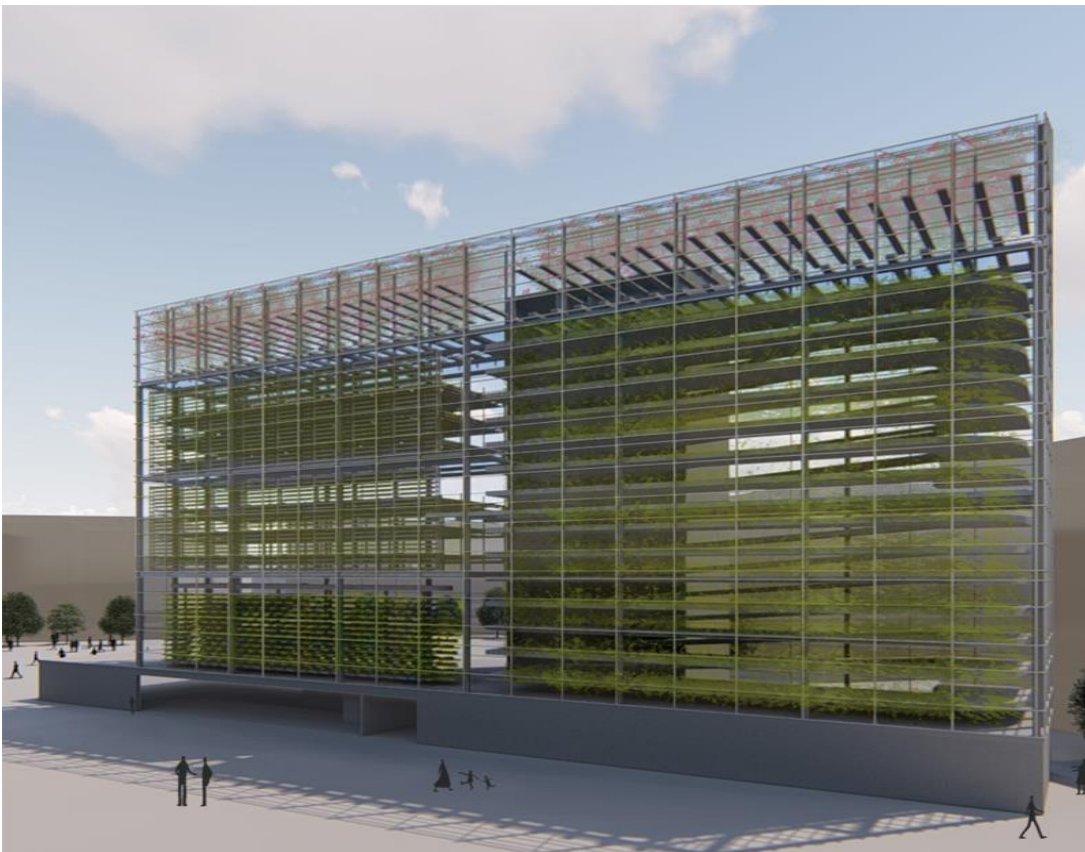


Abbildung 24 - Rendering VF#4

### 2.2.1 Gebäudeabmessungen

Die Grundfläche von VF#4 beträgt 786,24 m<sup>2</sup>, die Gebäudehöhe 36,00 m.



Das Erdgeschoss ist in drei Hauptbereiche unterteilt: das Markt- und Besucherzentrum mit 392,6 m<sup>2</sup>, die Fläche für Mitarbeiter und Büros mit 154,6 m<sup>2</sup> und die Verarbeitungs- und Verpackungsfläche mit 239,04 m<sup>2</sup>. Alle oben genannten Flächen sind Bruttoflächen.

Um die Verteilung des verfügbaren Tageslichts zu über das gesamte Jahr zu optimieren, ist das Gebäude Ost- / West orientiert (8,25 m Trakttiefe). Die Gebäudekante (N-S) beträgt 48,6 m. Die vertikale Erschließung befindet sich auf der Nordseite.

Im Untergeschoss (396,3 m<sup>2</sup>) befinden sich die Haustechnik sowie sämtliche Infrastruktur für die Fertigung und die Sprinkleranlage sowie Lagerräume. Die Geschosshöhe von 4,50 m ist relativ hoch. Dies ergab sich aus den hohen Querschnitten für das Lüftungssystem.

### *Untergeschoss*

Das Untergeschoss ist vom Erdgeschosseingang auf der Nord-Seite zugänglich. Dort sind die Technikräume (ca. 195 m<sup>2</sup>), Langzeitlager für den Gartenbau (50 m<sup>2</sup>), Bewässerungsräume (12,25 m<sup>2</sup>), Personalumkleiden (20,40 m<sup>2</sup>) und Sprinklerräume (18 m<sup>2</sup>) angeordnet. Die Gesamtfläche des Kellers beträgt 396,3 m<sup>2</sup>.

### *Erdgeschoss*

Eine Geschäftsfläche (213,4 m<sup>2</sup>) ermöglicht den Verkauf der in der Vertikalen Farm angebauten Produkte. Sie ist mit einem eigenen Lagerraum (11,1 m<sup>2</sup>) und einem Büro (12,08 m<sup>2</sup>) ergänzt, so dass er bei Bedarf unabhängig von der vertikalen Farm betrieben werden kann. Das Besucherzentrum (110 m<sup>2</sup>) ermöglicht öffentliche bzw. betriebsinterne Veranstaltungen und kann als Konferenzbereich dienen.

Personalbereich - Diese Zone bietet zwei Büros (zusammen 21 m<sup>2</sup>) und einen Aufenthaltsraum (35,6 m<sup>2</sup>) für die BetreiberInnen bzw. MitarbeiterInnen der Vertical Farm.

Verarbeitung, Verpackung, Lieferung – Bereich der linearen Erweiterung der Produktionsvolumen (Zonen). Die Produkte werden über die vertikale Erschließung auf die 0-Ebene gebracht und dort für den Verkauf aufbereitet (94,66 m<sup>2</sup>). Ein Lager für kurzfristige Lagerung ist dort auch angeordnet (30,69 m<sup>2</sup>). Für eine mögliche Auslieferung wird angrenzend an den Verarbeitungsbereich eine Lade- / Parkzone (107,3 m<sup>2</sup>) platziert, welche neben dem Aussaat- und Keimungsraum liegt. Ein zweiter Lagerplatz (22,79 m<sup>2</sup>) ist auf der östlichen Seite des Erdgeschosses für mögliche Anlieferungen (Samen, Substrate, Geräte, NPK-s, etc.) reserviert.

## **2.2.2 Zonierung der Anbau- und Produktionsvolumen**

In VF#4 gibt es sechs Zonen, die jeweils ausgewählte Kulturpflanzen und Produktionsmethoden beinhalten. Die Zoneneinteilung hilft, die Temperatur, Feuchtigkeit und Belüftung des Gewächshauses für die jeweils spezifischen optimalen Wachstumsbedingungen zu regulieren.

Die Zonen 1 und 2 haben eine Höhe von 11,25 m und eine Grundfläche von 201,01 m<sup>2</sup>. In jeder der Zonen nimmt das Produktionsverfahren 122,95 m<sup>2</sup> (Grundfläche) ein, während der Rest von etwa 40 % der Fläche für die Ernte / Manipulation vorgesehen ist.

Die Zonen 3, 4 und 5 haben eine Höhe von 7,5 m und eine Grundfläche von ca. 201,01 m<sup>2</sup>. In Zone 3 nehmen die Produktionsmethoden und der Manipulationsraum jeweils 50 % der Grundfläche ein. Im Fall der Zonen 4 und 5 beträgt die Grundfläche für die Produktionsmethode 135,04 m<sup>2</sup> und die Manipulationsfläche beträgt 67,15 m<sup>2</sup>.

Die Grundfläche der Zone beträgt 402,27 m<sup>2</sup>. Die Grundfläche der Produktionsmethode beträgt 192,16 m<sup>2</sup>, die resultierende Restfläche ist als Manipulationsfläche definiert. Diese Zone hat die Form eines pentagonalen Prismas. Die Dachfläche fällt schräg nach Süden ab. (h max. 9,00 m, h min 5,50 m).

### **2.2.3 Beschreibung der Produktions- und Anbaumethoden und den ausgewählten Kulturpflanzen**

#### **Zone 1**

Zone 1, in der östlichen Hälfte des ersten Stocks gelegen, nützt den von Plantagon entwickelten Conveyor Belt.<sup>20</sup> Die Grundfläche dieser Produktionsmethode beträgt 122,95 m<sup>2</sup> und weist eine Anbaufläche von 795,3 m<sup>2</sup> auf. Der Conveyor Belt hat sieben Ebenen in einem Abstand von 1,5 m. Die Breite des Förderbandes beträgt 1,6 m an den N & W Seiten und 3,3 m in der S und O. Die Bewegung der Pflanzen wird von zwei horizontalen Armen gewährleistet, die der Mittelachse des Riemens folgen und die Töpfe entlang der Strecke schieben. Der erste Arm hat eine Breite von 3,2 m und durchquert den breiteren Teil des Riemens und der zweite Arm hat eine Breite von 1,45 m, wodurch eine nahtlose Abdeckung des dünneren Bereichs des Riemens sichergestellt wird.

Die Zone ist 48 von 52 Wochen im Jahr aktiv. Die saisonale Reinigung erfolgt zweimal im Jahr für jeweils eine Woche. Während der heißesten und kältesten Wochen des Jahres findet kein Anbau statt. Die angebauten Produkte in diesem Bereich sind 50 % Vogerlsalat und 50 % Basilikum (Anteil der Anbaufläche). Die Gesamtleistung beträgt jährlich rund 19,5 Tonnen mit ca. 9,7 t pro Anlagentyp.

#### **Zone 2**

Sie beinhaltet wie Zone 1 den Conveyor Belt mit denselben Abmessungen und befindet sich auf der Zone 1 im dritten Obergeschoss. (Grundfläche des Conveyor Belts ex aequo 122,95 m<sup>2</sup>, Anbaufläche von 795,3 m<sup>2</sup>).

---

<sup>20</sup> Beim 3D-Conveyor Belt handelt es sich um ein dreidimensionales Förderband über die gesamte Gebäudehöhe. Am höchsten Punkt werden die Jungpflanzen eingesetzt, welche über die gesamte Länge ihrer Kulturfolge über das Förderband nach unten auf die 0-Ebene, die Ergeschossebene bewegen, wo sie auch geerntet werden. Die Fördergeschwindigkeit wird der jeweiligen Wachstumszeit angepasst.

Die Zone ist 50 von 52 Wochen im Jahr in Betrieb. Die saisonale Reinigung erfolgt zweimal im Jahr. Die angebauten Produkte in diesem Bereich sind 50 % Babyleaf Salat und 50 % Speisechrysantheme (Anteil der Anbaufläche). Die jährliche Gesamtproduktion liegt bei 19 Tonnen (ca. 5 t Speisechrysantheme und 14 t Salat).

### **Zone 3**

Zone 3 von VF#4 befindet sich in Westausrichtung im ersten OG. Zwei Produktionsmethoden befinden sich darin: Ein horizontal rotierendes Förderband für die optimale Lichtausbeute entlang der Fassade (Grundfläche = 83,91 m<sup>2</sup>) und gestapelte, fixe Racks im Norden mit einer Grundfläche von 17,99 m<sup>2</sup>. Die gesamte Anbaufläche beträgt 789,7 m<sup>2</sup>. Das horizontal rotierende System hat 14 Ebenen in 0,55 m Entfernung mit 132 Schalen pro Ebene. Es gibt zwei Arten von Hydroponic-trays, die abwechselnd (klein neben groß) verwendet werden, um die Lichtverteilung zu optimieren (s. Anhang Vertical Farm Paignton Zoo). Die kleinen Trays ermöglichen den Anbau von 6 x 3 Pflanzen, die großen 14 x 7 Pflanzen pro Tray. Die Anbaufläche eines Schalenpaars beträgt 0,585 m<sup>2</sup> und ergibt eine Anbaufläche von insgesamt 540,54 m<sup>2</sup>.

Das gestapelte System besteht aus fünf Einheiten mit einer Grundfläche von ca. 3,6 m. Jede Einheit hat zehn Ebenen in 0,65 m Entfernung. Die gesamte Anbaufläche für das gestapelte System beträgt 249,16 m<sup>2</sup>.

Beide Produktionsmethoden sind für 50 von 52 Wochen im Jahr aktiv. Die saisonale Reinigung erfolgt zweimal im Jahr. Beide Produktionsmethoden bewirtschaften Pak Choi und produzieren insgesamt 23 Tonnen pro Jahr.

### **Zone 4**

Die Zone 4 befindet sich im dritten Stock der vertikalen Farm (ebenfalls westorientiert) und ist mit acht nebeneinander angeordneten, vertikal rotierenden Karussells ausgestattet (s. hierzu im Anhang Vertical Farm Vertical Harvest in Jackson, Wyoming, USA). Die Zone hat eine Grundfläche von 201,20 m<sup>2</sup>, von denen 135,04 m<sup>2</sup> von den Produktionsmethoden belegt sind und der Rest als Manipulationsfläche vorgesehen ist.

Das vertikal rotierende Karussell ähnelt in der Seitenansicht drei L-förmigen Strukturen, die um 90 Grad gedreht sind, wobei der Bereich vertikal gestapelt und der Südfassade zugewandt ist. Jedes Karussell hat eine Grundfläche von 16,61 m<sup>2</sup> und eine Höhe von 6,85 m. In einem Karussell drehen 25 Rollen 157 Trays mit einer Fläche von je 0,36 m<sup>2</sup> entlang der entfalteten Fläche der Produktionsmethode, um eine gleichmäßige Lichtverteilung, hauptsächlich über die Südfassade, für die Pflanzen zu erzeugen. Die Schalen sind in einem Abstand von 0,4 m befestigt. Die drei Etagen werden jeweils von sechs kleinen und einer großen Rolle in Bewegung versetzt und sind 1,5 m voneinander entfernt, während der vertikale Teil des Karussells zwei Rollen an der Oberseite und zwei an der Unterseite verwendet.

Alle Produktionsmethoden sind für 50 von 52 Wochen im Jahr aktiv. Die saisonale Reinigung erfolgt zweimal im Jahr. Diese Zone wird ausschließlich für den Anbau von Endivie verwendet und produziert jährlich mehr als 13 Tonnen.

### **Zone 5**

Produktionsmethode und Anbaumethode, sowie Abmessungen sind ident mit Zone 4. Sie unterscheidet sich lediglich durch das Produkt. In Zone 5 wird Lollo Rosso während 50 Wochen angebaut mit einem errechneten Ertrag von über 10,5 Tonnen. (siehe Zone 4)

### **Zone 6**

Die letzte Zone der vertikalen Farm nimmt den gesamten 5. Stock ein. Diese Zone hat eine Grundfläche von 402,27 m<sup>2</sup>. Durch die transparente Dachfläche ist diese Zone energetisch mit Gewächshäusern vergleichbar.

In diesem Bereich kommen zwei Produktionsmethoden zum Einsatz. Das Single-Layer-System für die Tomatenproduktion wurde in Abmessungen und Organisation von jenem der obersten Zone der Vertikalen Farm Vertical Harvest von Jackson, Wyoming übernommen (siehe dazu Anhang). Die Dachfläche ist nach Süden hin abfallend und beträgt am höchsten Punkt 5,5 m und am tiefsten 3,5 m.

38 Einzelpflanzkulturen für die Erdbeerproduktion hängen über der Tomatenproduktion in einem Abstand von 0,6 m. Die Gesamtanbaufläche für Erdbeeren beläuft sich auf 108,42 m<sup>2</sup>, die Summe der Anbaufläche von Tomaten und Erdbeeren 192,16 m<sup>2</sup> auf.

Erdbeeren werden über eine Länge von 49 Wochen und Tomaten für 40 Wochen kultiviert. Die Gesamtleistung der Zone beträgt 7 Tonnen Tomaten und ca. eine Tonne Erdbeeren im Jahr.

Detaillierte Zusatzinformationen, sowie das Raum- und Funktionsprogramm und Plandarstellungen können dem Anhang entnommen werden.

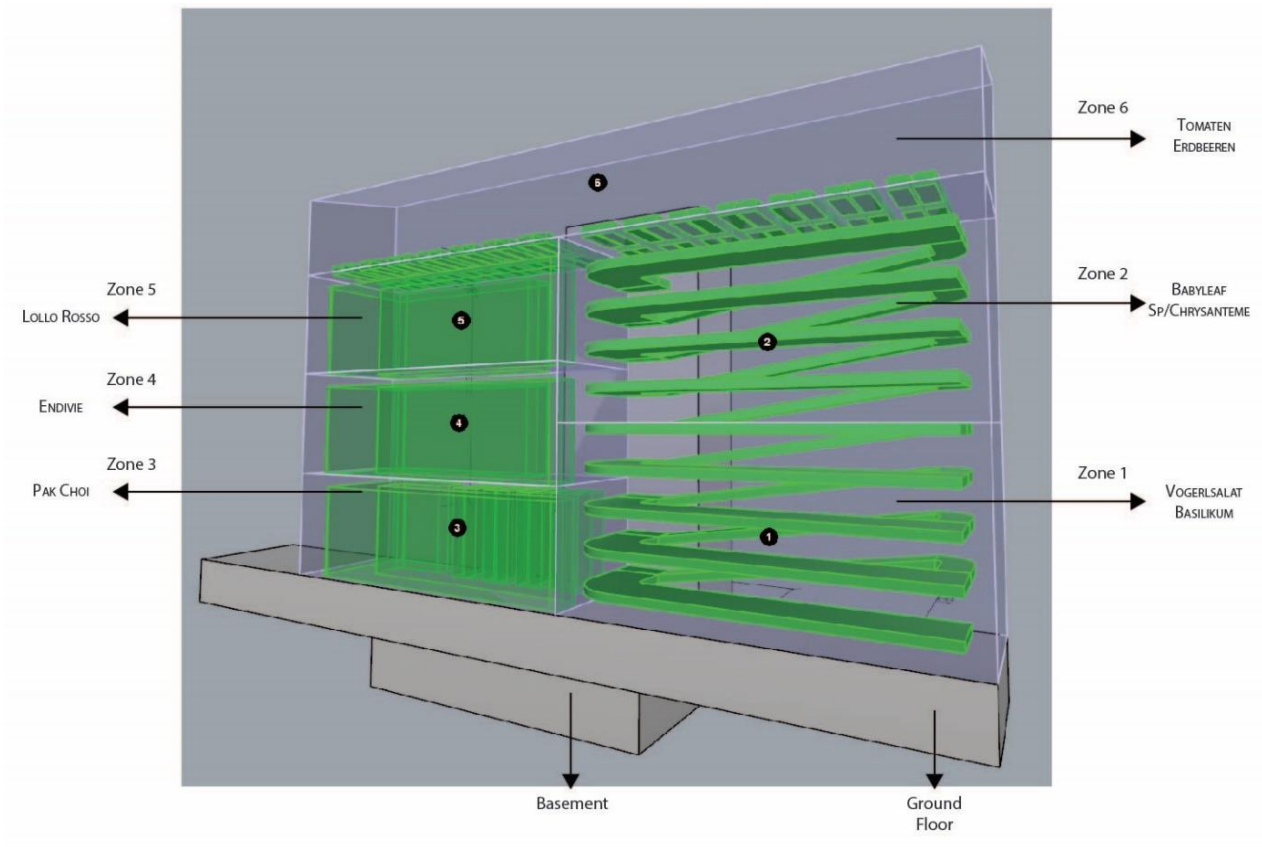


Abbildung 25 - Kulturpflanzen und Zonen der VF#4

					Januar			Februar			März				April				Mai				Juni				Juli				August				September				Oktober				November				Dezember									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
ZONE	PM	KULTURPFLANZE	ANBAU METHODE	ANBAU FLÄCHE (m²)																																																				
1	3DCB	Vogerisalat	HP		[Blue grid representing crop presence]																																																			
	3DCB	Basilikum	EK																																																					
2	3DCB	Babyleaf	HP																																																					
	3DCB	Speisechrysantheme	EK																																																					
3	HR + S-Lay	Pak Choi	HP																																																					
4	VRC	Endivie	HP																																																					
5	VRC	Lollo Rosso	HP																																																					
6	LAY	Tomaten	HP																																																					
	LAY	Erdbeeren	HP																																																					

Farben sind nur der Übersicht wegen, um besser die Präsenz der Pflanzen in den Zonen ablesen zu können. Germination ist abgezogen und kommt in den germination room der VF#4

Tabelle 6 - Auswahl geeigneter Pflanzenarten, Zuweisung Produktionsmethoden und Kulturfolge

Zone Vol (m²)	VF#4 Rev08	Zone	Kulturpflanze	Produktionsmethode	pro Jahr	year round prod			defined crop rot	VOLUME	VOLUME	kg yield/m²	m² cult area
						Brutto Ouput (kg)	Kulturlänge	Output/Woche	Netto Output (kg)	yield/m³	yield/m³		
2261		1	Vogerisalat	Conv Belt	52	22056,32	48	424,16	20359,68	18,01	7,20	2,60	7830,65
			Basilikum	Conv Belt	52	26115,25	52	335,39	17440,02	15,43	20,00	9,00	1937,78
2261		2	Babyleaf	Conv Belt	52	26115,25	48	528,88	25386,00	22,46	13,08	3,48	7294,83
			Speisechrysantheme	Conv Belt	52	26115,25	50	212,08	10604,00	9,38	1,80	1,09	9728,44
1509		3	Pak Choi	HR+S-Lay	52	21145,00	48	575,67	28780,00	38,14	10,20	4,76	6046,22
1509		4	Endivie	VRC	52	14571,92	50	253,51	12675,50	16,80	31,20	18,44	687,39
1509		5	Lollo Rosso	VRC	52	14571,92	50	202,30	10115,05	13,41	25,56	12,92	782,90
2810		6	Tomaten	T-Lay	52	8985,39	40	172,80	6911,84	9,16	8,18	4,60	1502,57
			Erdbeeren	T-Lay	52	935,92	49	18,00	881,92	0,63	1,13	4,64	190,07
11859			Total		468	160612,22	435	2722,77	133154,01	11,23	3,76	6,84	36000,85
786,24	Building footprint							kg/building footprint	169,4				
402,27								kg/gh footprint	331,0				
Quellen:		Angaben laut MASTER DOC											

Tabelle 7 - Ertrag VF#4

WASSERBEDARF SERMITTLUNG					
Wasserbedarf l/m <sup>2</sup> /d	Anbaufläche m <sup>2</sup>	Zone	Wasserbedarf/ Anbaumethode		
			Netto m <sup>3</sup>	Brutto m <sup>3</sup>	Netto (WCR) m <sup>3</sup>
3,8	795,3	1	486,56	1100,06	215,21
3,2	795,3	2	516,63	926,37	288,12
3	795,3	1	467,64	868,47	251,80
3,5	795,3	2	467,64	1013,21	215,83
2,3	789,7	3	661,14	661,14	661,14
1,9	507,02	4	350,66	350,66	350,66
1,9	507,02	5	350,66	350,66	350,66
5	92,16	6	167,73	167,73	167,73
4	97,99	6	142,67	142,67	142,67
			3611,32	5580,96	2643,82
Farm Avg. Water Cons. =			1,92	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> abf./day	
*WCR=with crop rotation					

Tabelle 8 - Wasserbedarfsermittlung

## 2.3 Automation einer Vertikalen Farm – regel- und automatisierungstechnische Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurden geeignete Automatisierungskonzepte für den Einsatz in einer vertikalen Farm ermittelt. Die Ermittlung der Anforderungen erfolgte mittels einer Literaturrecherche im Kontext von Vertikal Farming, Controlled Environmental Agriculture und Plant Factories with Artificial Lighting (PFAL). Die notwendige Automatisierung in einer vertikalen Farm umfasst folgende Bereiche [Kalantari2017, Zeidler2017, Ellingsen2008]:

- Beleuchtung
- Bewässerung
- Heizung, Lüftung, Klimatechnik (HLK)
- Prozessautomatisierung im Produktionszyklus der Vertical Farm
- Informationserfassung durch geeignete Informations- und Kommunikations- Technologie
- Die Ergebnisse der Recherche werden hier nun kurz dargestellt.

### 2.3.1 Beleuchtung

Die Beleuchtung stellt eines der wesentlichsten Teilsysteme einer vertikalen Farm dar. Grundsätzlich kann hier, neben dem natürlichen Licht, auf zwei Technologien zurückgegriffen werden: LED (light emitting diode) bzw. HPS (high-pressure sodium). HPS stellt hierbei eine klassische Lösung dar, wobei derzeit der dezidierte Forschungsfokus auf dem Einsatz von LEDs im Kontext von Vertikal Farming liegt, was sich in aktuellen Publikationen widerspiegelt [Kozai2016].

Studien haben gezeigt, dass der Einsatz von LEDs im Kontext der vertikalen Farm zwar ein höheres Grund-Investment erfordert, aber über lange Zeiträume die kosteneffizientere Lösung darstellt, da durch den Einsatz von LED der beleuchtungsbedingte Energieverbrauch reduziert werden kann [Singh2015]. Da durch LEDs weniger Wärme abgestrahlt wird, ist es möglich, die Lampen näher an den Pflanzen zu platzieren, was zu einer besseren Ausleuchtung der Pflanzen führt. Andererseits bedarf es wegen der geringen Wärmeabstrahlung von LEDs ggf. höherer Einträge durch das Heizungssystem in die Farm (als das bei HPS Beleuchtung der Fall wäre), um die gewünschte Raum/Pflanzen Temperatur zu halten [Dueck2011].

Außerdem bieten LEDs die Möglichkeit, die Verteilung des Lichtspektrums dynamisch an die Wachstumsphase der Pflanze anzupassen, um so den Ertrag und das Wachstum der Pflanze zu optimieren. Dadurch kann die Bestrahlung dezidiert auf Pflanzen und deren Wachstumsphase abgestimmt werden, wobei dies noch Gegenstand derzeitiger Forschung darstellt [Kozai2016].

Gängige LED Systeme bieten die Möglichkeit der Ansteuerung durch in der Gebäudeautomation eingesetzte Kommunikationstechnologien (z.B. KNX, DALi) oder internetfähige Protokolle (z.B. REST, MQTT, AMQP). Daher lassen sich solche Systeme gut in ein Automatisierungssystem einer Vertikalen Farm integrieren.

### **2.3.2 Bewässerung**

Es existieren bereits eine Vielzahl kommerzieller Bewässerungssysteme, welche im Rahmen einer vertikalen Farm Einsatz finden können, wobei sich die Wahl des Bewässerungssystems hinsichtlich der Anbauform der Vertikalen Farm unterscheidet. Im vorliegenden Projekt fiel die Wahl auf ein hydroponisches System, wobei derzeit diverse Formen der hydroponischen Innenraum Bewässerung existieren: Nutrient Film Technique, Wick System, Wasser Kultur, Ebbe und Flut, und Aeroponische Systeme [Liu2014, Kalantari2017].

Hydroponische Bewässerung verzichtet auf den Einsatz von Erde im Kultivierungszyklus. Die Wurzeln der Pflanzen hängen, bzw. stehen in einer Nährlösung oder lagern in einem Medium (bspw. Sand), das von Nährlösung umspült wird, und werden so mit den notwendigen Nährstoffen versorgt. Im Fall der aeroponischen Bewässerung erfolgt die Benetzung der Wurzeln mit einem Nährstoff-Aerosol mithilfe von Zerstäubern [Hubick1982].

Zur Bereitstellung der Nährlösung können kommerziell verfügbare Pumpsysteme verwendet werden (bspw. die Nutri Modellreihe von Priva<sup>21</sup>), welche durch definierte Schnittstellen in die Automatisierung eingebunden werden können. Einen wesentlichen Aspekt stellt im Zuge der Bewässerung die Erfassung des aktuellen Nährstoffgehalts sowie der Wasserfüllstand dar. Diese Information kann durch geeignete Sensorik (elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert) im Mischtank als auch direkt am Pflanzen-Tray erfasst werden [Zeidler2017] und mittels geeigneter Protokolle (siehe Informationserfassung durch geeignete Informations- und Kommunikations- Technologie) an das überlagerte Automatisierungssystem übertragen werden [Hanif2017].

---

<sup>21</sup> <http://www.priva-international.com/de/products/priva-nutri-lijn>



### **2.3.3 Heizung, Lüftung, Klimatechnik (HVAC)**

Geeignete Heizung, Lüftung und Klimatechnik ist erforderlich, um optimale Konditionen für das Pflanzenwachstum zu garantieren, wobei das System einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch der Farm hat. Dabei können kommerziell erhältliche HVAC Systeme zum Einsatz kommen, welche definierte Schnittstellen (bspw. KNX, BACnet) zur Einbindung in das überlagerte Automatisierungssystem anbieten. Wie in den Projekt-Workshops erarbeitet wurde und auch aus der Literaturrecherche hervorgeht [Zeidler2017], muss bei der Auswahl eines HVAC Systems ein spezieller Fokus auf die Entfeuchtung gelegt werden, da der durch die Pflanzen benötigte Feuchtegrad (von ca. 80 %) nicht dem Feuchtegrad in normalen HVAC Anwendungen entspricht. Außerdem kann das HVAC System (unter Anwendung von Wärmepumpen) dazu verwendet werden, um Abwärme (welche durch externen Wärmeeintrag, bzw. die Kühleinheiten der LED-Beleuchtung entstehen) aus den Produktionsräumen anderen Gebäudebereichen zuzuführen. Dadurch lässt sich der Energiebedarf der Farm optimieren [Zeidler2017].

### **2.3.4 Prozessautomatisierung im Produktionszyklus der Vertical Farm**

Robotik und Automatisierung finden im Kontext des automatisierten Indoor-Anbaus immer mehr Einsatz. Für einige initialen Arbeitsvorgänge (z.B. Ansäen und Anpflanzen) sowie abschließende Arbeitsvorgänge des Produktionszyklus (z.B. Produkt-Bewertung, Verpackung und Versand) existieren bereits automatische Lösungsansätze [Henten2006]. Eine Automatisierung ist möglich, da die Pflanzencharakteristika in diesen Stadien gut definiert und einheitlich sind und daher einfache, mechanische Lösungen zum Einsatz kommen können [Giacomelli2007]. Auch die Beförderung der Pflanzen (bspw. durch Fließbandsysteme) kann mit existierenden Lösungen realisiert werden, wobei die optimale Ausgestaltung dieser Lösungen stark von der Topologie der Verticalen Farm und der Anordnung und Konzeption der Anbau Räume beeinflusst wird.

Anders verhält es sich bei Ansätzen zur automatisierten Ernte. Die Herausforderung besteht in diesem Kontext in der Erkennung des Reifegrads und der Qualität der Pflanze/Frucht. In zahlreichen Projekten wurde die automatische Ernte verschiedener High Yield Crops (bspw. Apfel, Tomate, Melanzani, Paprika, Wassermelone) untersucht [Bac2015, Bachche2015]. Die Herausforderung beim automatisierten Erntevorgang liegt zum einen im Erkennen des gewünschten Reifegrads (was bspw. durch Bilderkennungsverfahren gelöst werden kann [Hayashi2000]), zum anderen in der erfolgreichen und schadlosen Ernte der Frucht von der Pflanze (durch geeignete Manipulatoren, Endeffektoren). Die Schwierigkeit der Ernte spiegelt sich auch in der Verwendung der Technologien in den Projekten wieder. Plattformen und Sensoren, welche in den automatischen Erntesystemen eingesetzt wurden, können mehrheitlich mit handelsüblichen Produkten realisiert werden. Allerdings müssen die Manipulatoren und Endeffektoren mehrheitlich nach Maß, hinsichtlich der zu erntenden Frucht, angefertigt werden [Bac2015].

### 2.3.5 Informationserfassung durch geeignete Informations- und Kommunikations-Technologie

Die Erfassung von IST-Zuständen in einer vertikalen Farm stellt einen wesentlichen Faktor für die optimale Steuerung einer vertikalen Farm dar. Zum einen kann über Sensoren die Produkt-Qualität überwacht werden (bspw. der Stress in Tomatenstämmen [Vermeulen2008]), zum anderen können durch Sensoren die Umgebungsvariablen (bspw. Temperatur, Feuchtigkeit, Helligkeit, CO<sub>2</sub>-Gehalt) erfasst werden, um diese Parameter (durch einen Eingriff in das Automatisierungssystem) zu optimieren.

Ein Monitoring-System zur Erfassung der Umgebungsvariablen stellt daher einen integralen Bestandteil einer Vertikalen Farm dar, wobei die Anforderungen an ein solches System nach Anwendungsbereich unterschiedlich sein können:

- Übertragung: zeitnahe / zeitversetzt
- Erfassungsgenauigkeit: Mittelwerte / Momentanwerte
- Erfassungshäufigkeit: (Sekunden, Minuten, Stunden) / ereignisgesteuerter Erfassung

Vor allem die Entwicklungen aus dem Bereich des Internet of Things finden immer mehr Anwendung im Kontext des Vertical Farming [Harper2015, Libelium2016, Goyal2016, Vasisht2017].

Derzeit existieren bereits einige Lösungen, die im Kontext einer Vertikalen Farm Einsatz finden können. So vertreibt Libelium ein Monitoring-Board (Waspote Agriculture 2.0 Board), welches Schnittstellen für eine Vielzahl von Sensoren zur Erfassung von Feuchtigkeit, Temperatur, atmosphärischer Druck, Blattfeuchte und solarer Irradiation bietet und über diverse Protokolle (Bluetooth, LoRa, WiFi ZigBee, RFID) in ein Automationssystem eingebunden werden kann [Libelium2016]. Das Board ist allerdings für den Außeneinsatz konzipiert, was sich auch teilweise in den zur Verfügung stehenden Kommunikationsprotokollen (bspw. LoRa, ZigBee) widerspiegelt. So kann das Board verwendet werden, um bspw. den Weinanbau großflächig zu überwachen. Neben einem Außeneinsatz könnte das Board auch im Kontext einer Vertikalen Farm, bzw. der Überwachung von Glashäusern Anwendung finden, wobei die Stromversorgung und Preis des Boards hier kritische Punkte darstellen. Es ist nicht klar, ob ein batteriebasierter Betrieb des Boards über einen gesamten Produktionszyklus (ca. 12 Wochen) möglich ist, außerdem liegen die Kosten des Boards im dreistelligen Eurobereich, was den großflächigen Einsatz des Boards (bspw. ein Sensor modul pro Pflanzentray) unwahrscheinlich macht.

Ein weiteres Beispiel für eine IoT basierte Agrarwirtschaftslösung stellt die FarmBeats Plattform dar [Vasisht2017]. Ziel der Plattform ist die durchgehende Datenerfassung diverser Sensoren sowie Kameras und Drohnen in großen Agrarbetrieben. Auch bei dieser Lösung liegt der Fokus auf dem Außeneinsatz. Die Sensor-Daten werden in einer IoT Base Station aggregiert (Übertragung via WiFi) und an ein Gateway übermittelt (TV White Spaces). Im Gateway werden die eingehenden Daten gespeichert. Es können lokale Services und Applikationen (bspw.

DataAnalytics, Forecasts etc.) realisiert werden, wobei die einzelnen Applikationen mittels MQTT die im Feld ermittelten Daten beziehen. Gleichzeitig besteht eine Schnittstelle in eine Cloud Umgebung (Microsoft Azure), um einen externen Datenzugang zu ermöglichen und rechenintensive Applikationen (Pflanzenvorschläge, Cross-Farm Analytics) zu realisieren.

Das Projekt OpenAG Projekt – durch das MIT initiiert – [Harper2015] hat unter anderem das Ziel, eine CEA Plattform zu schaffen. Im speziellen ist die Konzeptionierung und Umsetzung so genannter „Personal Food Computers“ geplant, die den hydroponischen Anbau von Gemüse erlauben. Das Projekt zeichnet sich dadurch aus, dass die Plattform (Hardware als auch Software) als Open Source zur Verfügung steht<sup>22</sup>. Das ermöglicht einen einfachen Nachbau des Systems und eine breite Verwendung. Die Messdatenerfassung erfolgt über einen Arduino<sup>23</sup> und wird mittels Sockets an einen Raspberry Pi<sup>24</sup> übermittelt. Auf dem Raspberry Pi werden einzelne Module als Docker-Instanzen realisiert, wobei die Kommunikation auf REST basiert. Wie in den zuvor skizzierten Systemen besteht auch hier eine Schnittstelle Richtung Cloud. Anders als bei Farmbeat und Waspnot, die reine Monitoring Lösungen darstellen, kann in diesem System mittels Aktuatoren, welche über einen Arduino angesteuert werden können, auf das System Eingriff genommen werden (Anpassung der Temperatur, des Lichts). Eine dem „Personal Food Computer“ ähnliche Lösung wird auch in [Goyal2016] skizziert.

### **2.3.6 Systemarchitektur einer Vertikalen Farm**

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 wurde auf Basis der in Arbeitspaket 2 und 3 identifizierten Anforderungen und Automatisierungskonzepte eine IKT-Systemarchitektur für die im Projekt erarbeitete Vertikale Farm entwickelt. Eine Skizze der Systemarchitektur ist in Abbildung 26 dargestellt. Wie in den in AP 3 untersuchten Lösungsansätzen gliedert sich die Architektur in zwei Ebenen: die VF-Ebene und die Cloud Ebene.

---

<sup>22</sup> <https://github.com/openaginitiative>

<sup>23</sup> Open-Source IOT Plattform basierend auf einfach zu nutzender Hardware und Software

<sup>24</sup> Kleiner leistbarer Einplatinencomputer

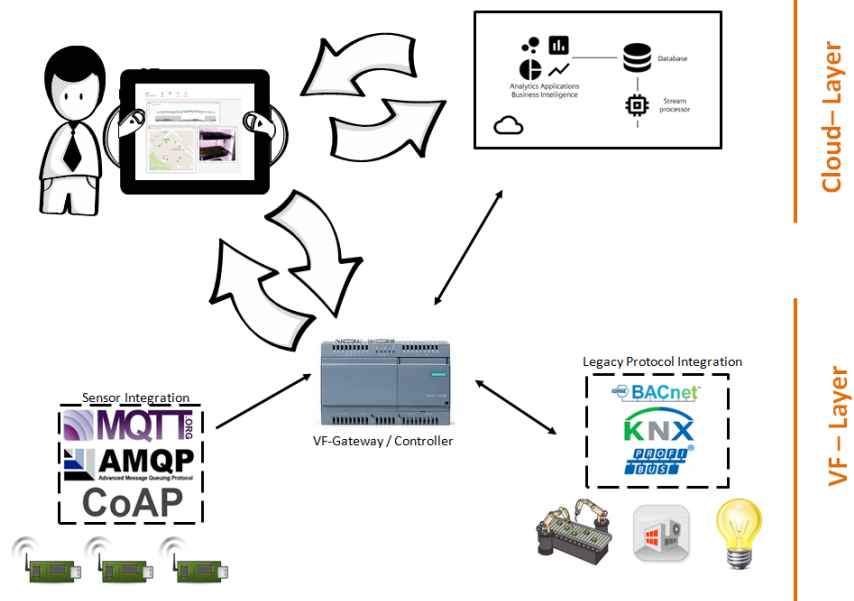


Abbildung 26 - Systemarchitektur Vertikale Farm Automatisierung

In der VF-Ebene erfolgt die Integration der Sensordaten in ein zentrales Gateway. Zur Übermittlung der Daten eignen sich gängige IoT-Protokolle wie MQTT, AMQP oder CoAP auf Basis von WiFi oder eines einfachen Maschennetzwerks. Die Systeme zur Prozessautomation als auch zur Konditionierung der Umgebungsbedingungen werden unter Verwendung der typischen Technologien und Standards (wie BACnet, KNX oder PROFIBUS) in das Gateway eingebunden.

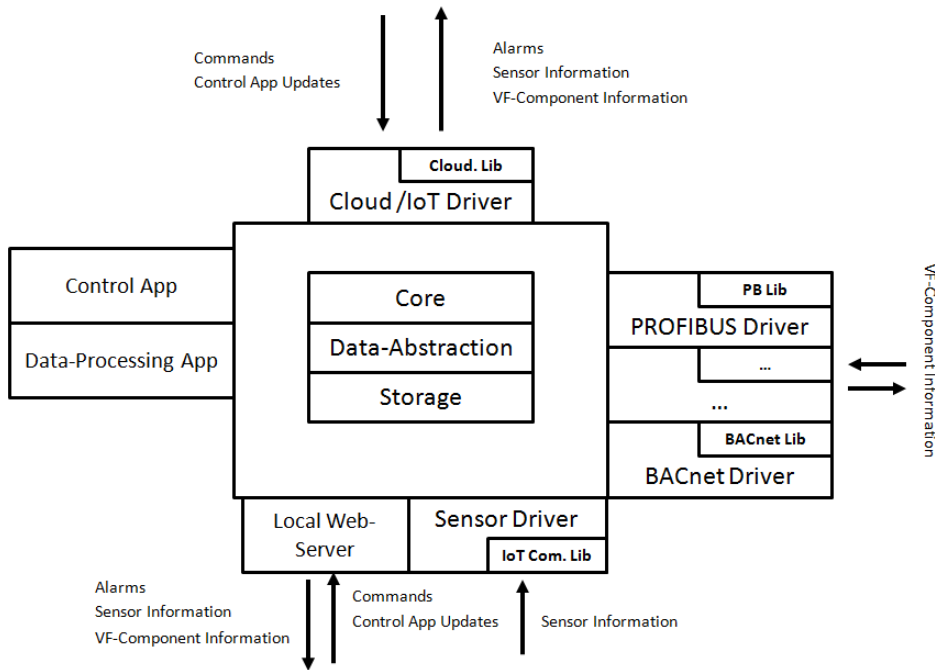


Abbildung 27 - VF-Gateway Architektur

Informationen zu Sensoren und Aktoren werden in einem VF-Gateway aggregiert. Die Architektur des Gateways ist in Abbildung 27 dargestellt. Das Gateway stellt eine Verbindung zwischen Cloud und VF Ebene dar. Es handelt sich um eine einfache Lösung (bspw. IoT-2040) mit geringem Stromverbrauch, eingeschränkter Rechenleistung und kleinem, zentralen Speicher. Das Gateway verfügt über Schnittstellen zu den Sensoren und den unterlagerten Automationssystemen, um aktuelle Messwerte zu empfangen und eine Interaktion mit der Automation zu gewährleisten (bspw. Anpassung der Temperatur des Lichts in Anbaumodulen). Über einen lokalen Webserver kann der VF-Operator den aktuellen Zustand der Farm überprüfen und aktiv in die Automation eingreifen. Die Steuerung der einzelnen Anbauräume erfolgt über eine Control App, welche ebenfalls auf dem Gateway instanziiert ist und durch den Nutzer lokal (via Webserver) oder remote (via Cloud) konfiguriert und parametrieren werden kann.

Die Cloud Ebene dient als Langzeit-Datenspeicher, Online Analyse Tool sowie zur Fernsteuerung der Farm. Alle im Gateway aggregierten Daten von Sensoren und Aktoren werden nach Vorverarbeitung in die Cloud übermittelt. Dort stehen sie einem Nutzer (ähnlich wie lokal mittels Webserver) zur Einsicht und zum Eingriff zur Verfügung. Anhand der eingehenden Daten können Cloud-seitig komplexe Langzeit-Analysen bzgl. der Vertikalen Farm durchgeführt werden bzw. Informationen mehreren Farmen gebündelt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, Updates von Softwareapplikationen auf dem Gateway über die Cloud durchzuführen.

### 2.3.7 Sensor Prototyp

Auf Basis der Inputs der Projekt-Workshops und der Literaturrecherche im Zuge des Arbeitspakets 3 wurde in Arbeitspaket 4 ein einfacher Prototyp eines Sensors für bewegliche Pflanzentrays (wie sie in der entworfenen Vertikalen Farm zum Einsatz kommen sollen) entworfen. Ziel war ein günstiger, Akku betriebener Sensor, welcher an einem Pflanzentray verbaut werden kann und am Tray die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Helligkeit sowie den Füllstand des Trays erfasst, drahtlos an ein Empfangsmodul sendet und einfach in die skizzierte IKT-Systemarchitektur integriert werden kann. Im Rahmen der erarbeiteten Systemarchitektur würden die Daten aus dem Tray mittels BLE (Bluetooth Low Energy) an den CO<sub>2</sub>-Sensor im Anbaumodul erfolgen. Von diesem fest im Raum verbauten Sensor erfolgt die Weiterleitung der Daten an ein Vertical Farming Gateway.

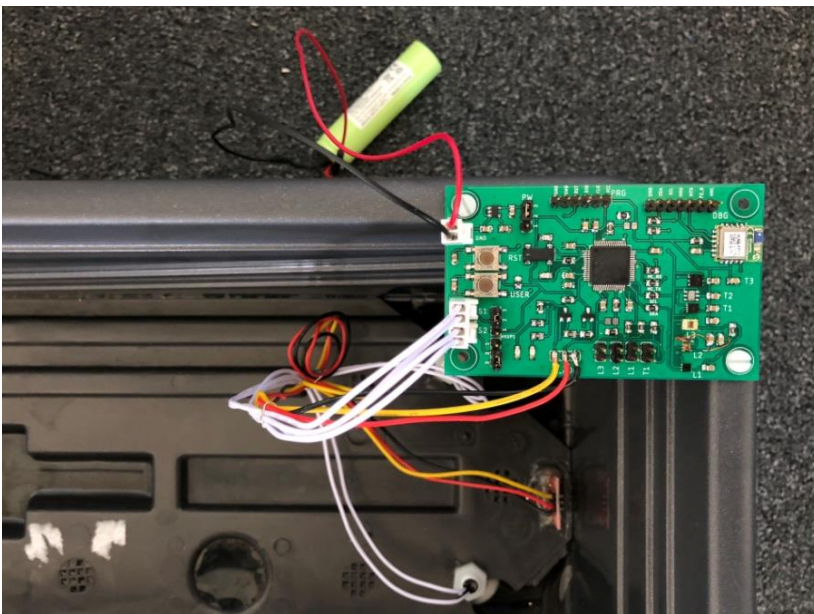


Abbildung 28 - Sensor Prototyp

Der Prototyp besteht aus einem STM32L100 Mikrocontroller, einem RN4871 Bluetooth-Modul (BLE), diversen Sensoren sowie unterstützender Hardware (Taster, LEDs, Debug-Schnittstellen, etc.). Betrieben wird der Sensor von einem 2600 mAh Akku. Bei der Konstruktion und Dimensionierung des Layouts wurde primär auf eine möglichst hohe Flexibilität geachtet. Sämtliche Sensoren können mittels Jumper auf verschiedene Weise mit dem Mikrocontroller und dem Bluetooth-Modul verbunden werden. So kann im weiteren Verlauf auf konkretere Anforderungen hinsichtlich der Sensorausstattung eingegangen werden. Die Hardware wurde außerdem so dimensioniert, dass ein gewünschter Dauerbetrieb von ca. 12 Wochen mit einer Akkuladung (Messungen erfolgen im Minutentakt) realisierbar ist, was dem Lebenszyklus einer Pflanze entspricht.

Der Prototyp umfasst mehrere Typen von Sensoren, um ihre Eignung im Kontext der Datenerfassung zu testen. Die Sensoren sind in Tabelle 9 dargestellt.

Temperatur & Luftfeuchtigkeit	Helligkeit	Wasserfüllstand
SHT35-DIS-B	TSL2561T	Schwimmer: 24.5mm Länge
SHT21	VEML6030	Schwimmer: 34.5 mm Länge
Si7006-A20-IM (getestet aber nicht verbaut)	MAX44009EDT+T	kontinuierlicher Füllstandsensor (Amazon ASIN: B01MD1DQ3D)

Tabelle 9 - Getestete Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserfüllstand

Zu Testzwecken wurde der Sensor an einem herkömmlichen Blumentrog befestigt und mehrere Tage durchgehend getestet (siehe Abbildung 29). Damit konnte die prinzipielle Funktion des konstruierten Sensors gezeigt werden. Eine Einbindung in die in Arbeitspaket 4 spezifizierte Systemarchitektur würde sich sehr einfach realisieren lassen. Auch eine entsprechende Ummantelung des Sensors zum Schutz vor Außeneinwirkung ist nachträglich möglich.



Abbildung 29 - Testaufbau

Da der Prototyp zur Installation und dem Betrieb an einem mobilen Pflanzen-Tray konzeptioniert wurde, erfasst der Sensor derzeit keine CO<sub>2</sub>-Werte, außerdem erfolgt keine PH Wertbestimmung der Nährlösung. Grund hierfür sind die Kosten und der Stromverbrauch solcher Module. Da ein CO<sub>2</sub>-Wert raumweit vorherrscht kann eine CO<sub>2</sub>-Messung mittels eines Sensors im Raum erfolgen, auch ein Batteriebetrieb ist in diesem Kontext nicht notwendig, was eine kontinuierliche Stromversorgung ermöglichen würde. Außerdem kann über diesen Sensor die Aggregation und Weiterleitung der Daten eines Trays an ein zentrales Gateway erfolgen (WiFi und geeignetes

Protokoll wie MQTT oder CoAP). Ähnlich verhält es sich bei der Überwachung des Ph-Werts bzw. der Leitfähigkeit der Nährlösung, diese kann zentral an der Mischpumpe erfolgen.

## 2.4 Quantifizierte Darstellung wesentlicher Energie- und Stoffmengen, systemübergreifende Schnittstellenanalyse

### 2.4.1 Quantitative Bewertung der Lastverschiebungspotentiale

Der zunehmende Anteil an der Erzeugung von elektrischem Strom mittels erneuerbarer Energieträger wie Sonne- und Windkraft setzt die elektrischen Netze immer größer werdender Belastungen aus. Die Volatilität und Dargebotsabhängigkeit von Sonne und Wind verursacht hohe Erzeugungsspitzen und führt in weiterer Folge zu großen Verschiebeströmen im Netz, die eine zunehmende kostenintensive Produktion von Ausgleichsenergie nach sich zieht.

Um die Einbindung erneuerbarer Energieträger dennoch zu forcieren und gleichzeitig das elektrische Netz nicht zu sehr zu belasten, wurde eine spezielle Betriebsweise von Verbrauchern und Lasten entwickelt, welche mit Demand Response (DR) bezeichnet wird und ein gezieltes Beeinflussen auf der Verbraucherseite bedeutet. Im Rahmen des Arbeitspakets 5 wurde untersucht, inwiefern sich eine Vertikale Farm als verschiebbare Last eignet.

Zur Untersuchung wurde ein mathematisches Modell einer vertikalen Farm entwickelt, welches sich aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen thermischen Einflüsse sehr umfangreich gestaltete. Abbildung 30 zeigt dahingehend eine Übersicht, welche Wärmeeinträge und Wärmeverluste innerhalb einer vertikalen Farm auftreten und im Modell berücksichtigt wurden (Details zur Modellierung sind dem internen Projektbericht „Erhebung des Potentials einer vertikalen Farm als verschiebbare Last in einem Smart Grid“ zu entnehmen [Diwold2018]).

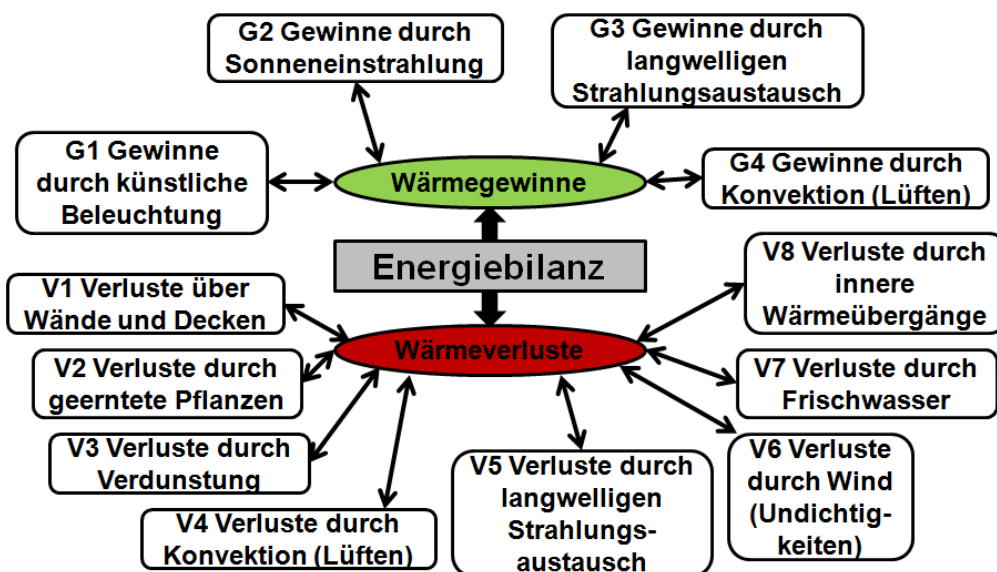


Abbildung 30 - Übersicht über die verschiedenen Gewinne und Verluste an Wärme (eigene Darstellung von Siemens AG)



Für die Modellierung wurde jeder Gewinn  $\dot{Q}_{\text{Gewinn}}$  oder Verlust  $\dot{Q}_{\text{Verlust}}$  an Leistung einzeln betrachtet und mathematisch modelliert. Die Summe der einzelnen Wärmegewinne oder Wärmeverluste stellt im Modell somit jene Leistung dar, die von einer Heizung erbracht oder von einer Klimaanlage abgeführt werden muss.

$$\dot{Q}_{\text{Ges}} = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{Q}_i = \dot{Q}_{\text{Grund}} + \dot{Q}_{\text{Verlust}} - \dot{Q}_{\text{Gewinn}}$$

Auf Basis des in AP 2 entwickelten Kulturpflanzenkatalogs wurde das Modell hinsichtlich einzuhaltender Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Licht) parametrisiert. Bei der Untersuchung ließ sich ein gewisses Band der Umgebungsbedingungen mit maximal, optimal und minimal notwendigen Werten quantifizieren. Dieses Band lässt sich entsprechend für den Betrieb der vertikalen Farm ausnutzen, indem beispielsweise in Schwachlastzeiten im elektrischen Netz die Innentemperatur der Farm bis zum Maximalwert erhöht werden kann. Ebenso lässt sich durch die Kenntnis dieses Bandes durch Zurückfahren der Heizung die Innentemperatur senken, um in Zeiten hohen elektrischen Energiebedarfes den Energieverbrauch zu reduzieren.

Erlaubt man im Inneren der Farm diese unterschiedlichen Temperaturen, ist für jedes Temperieren Energie für den Heiz- bzw. Kühlvorgang aufzuwenden. Der Bedarf an Leistung für diesen Vorgang veränderlicher Temperaturen wird mit Hilfe von  $\dot{Q}_{\text{Grund}}$  beschrieben.

Mithilfe der Daten aus dem in AP 2 entwickelten Pflanzenkatalogs und klimatischen Wetterdaten aus dem Jahr 2016 (Standort Flughafen Wien, Schwechat) sowie den Raumvolumen der Anbau Räume der im Projekt erarbeiteten Vertikalen Farm (Volumen: 1.1340 m<sup>3</sup>, Anbaufläche: 4.342,74 m<sup>2</sup>) wurden Jahres-Simulationen für zwei Pflanzen durchgeführt. Es handelt sich bei den ausgewählten Pflanzen um den gewöhnlichen Feldsalat (im Österreichischen auch unter dem Namen Vogerlsalat bekannt) und die Chili-Pflanze. Diese Pflanzen wurden bewusst aus dem Pflanzenkatalog ausgewählt, da sie diametral unterschiedliche Anforderung an die klimatischen Bedingungen der Farm stellen und somit der saisonale Einfluss bedingt durch das Wetter anhand der angebauten Pflanzen untersucht werden kann. Während der Vogerlsalat eher kühlere Temperaturen um 8°C bevorzugt, liegt die optimale Temperatur für die Chili-Pflanze um 25°C.

Abbildung 31 und Abbildung 32 stellen den stündlichen Leistungsbedarf einer Farm über eine Woche im Mai 2016 bei unterschiedlicher Kultivierung und damit einhergehend unterschiedlichen Temperaturvorgaben exemplarisch dar. Wie aus den Abbildungen ersichtlich, besteht bei dem Betrieb einer Vertikalen Farm abhängig von der Kultivierung durchaus Potential für das Verschieben von Leistung, vor allem durch das Absenken und Anheben der Temperatur im für die Kultur zulässigen Temperaturband.

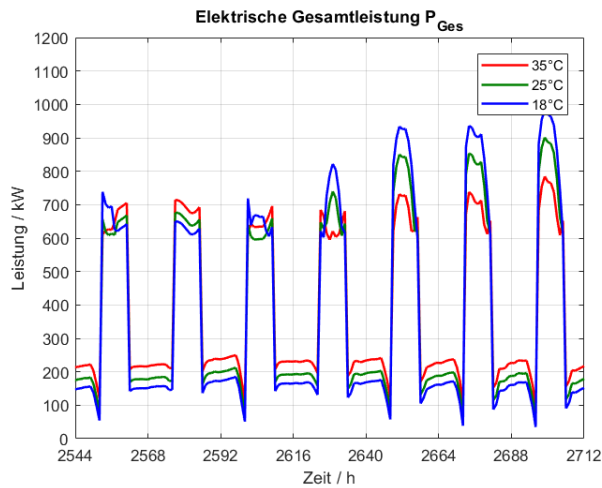


Abbildung 31 - Leistungsaufnahme VF P<sub>Ges</sub>, Bei Kultivierung einer Chili-Pflanze (Zeitraum 16.04 bis 23.04)

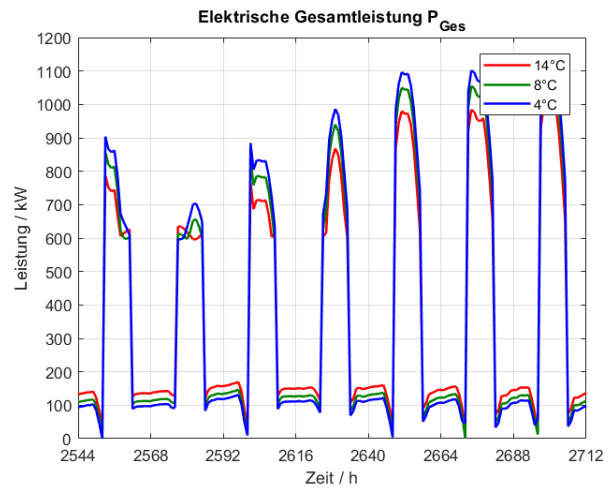


Abbildung 32 - Leistungsaufnahme P<sub>Ges</sub>, Bei Kultivierung des gewöhnlichen Feldsalats (Zeitraum 16.04 bis 23.04)

Unter den Rahmenbedingungen konnte ein maximales Demand Response Lastverschiebungspotential von  $P_{max\_c} = 326,4$  kW für Chili und  $P_{max\_f} = 192,7$  kW für den gemeinen Feldsalat für eine Dauer von einer Stunde ermittelt werden. Im Mittel liegt das Potential bei Chili bei  $P_{mean\_c} = 83,7$  kW und bei dem Feldsalat bei  $P_{mean\_f} = 59$  kW für eine Dauer von einer Stunde.

Die Auswirkungen eines Demand Response Abrufs auf eine Vertikale Farm wurde anhand eines Szenarios getestet. Das Szenario des Abrufs wurde anhand des Verlaufs der Wind und Sonnenenergie in Österreich am 20.07.2017 erstellt (siehe Abbildung 33), wobei der Verbrauch der Farm erhöht wurde, sobald die kumulierte regenerative Erzeugung über 500 MW lag.

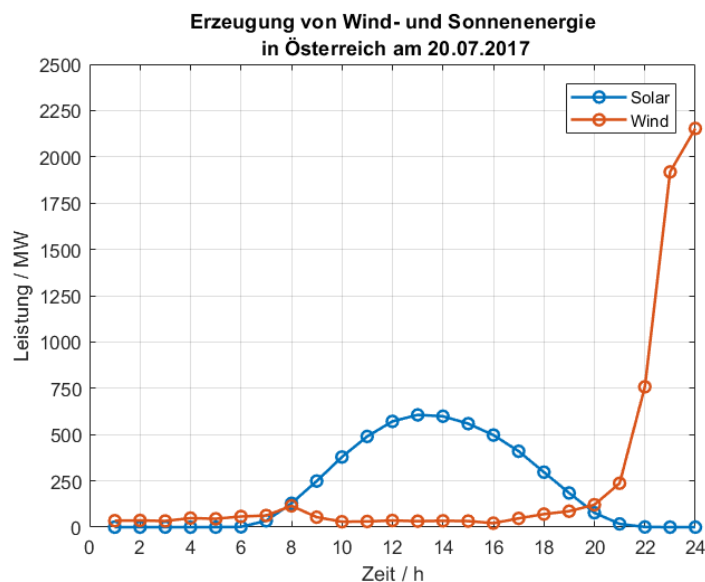


Abbildung 33 - Verlauf regenerativer Energieerzeuger in Österreich am 20.07.2017

Die verwendeten Wetterdaten entsprechen den vorliegenden Daten aus Schwechat für den 20.07.2016. Die Verläufe der vertikalen Farm hinsichtlich der Innenraumtemperatur als auch der

verbrauchten Leistung (bei Kultivierung von Chili und Feldsalat) sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

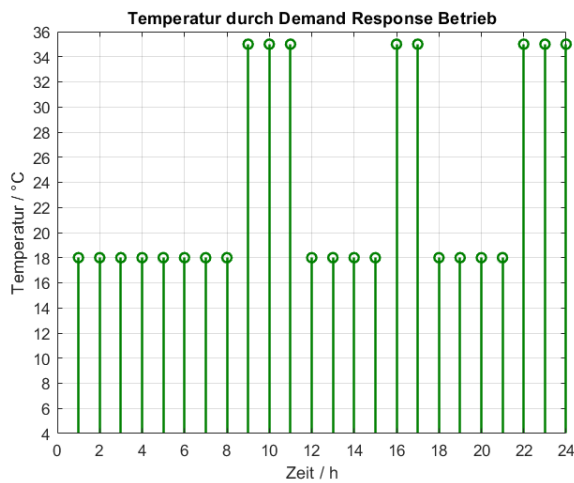


Abbildung 34 - Stündlicher Temperaturverlauf (bei Kultivierung einer Chili-Pflanze) unter Demand Response Abruf (20.07.2015)

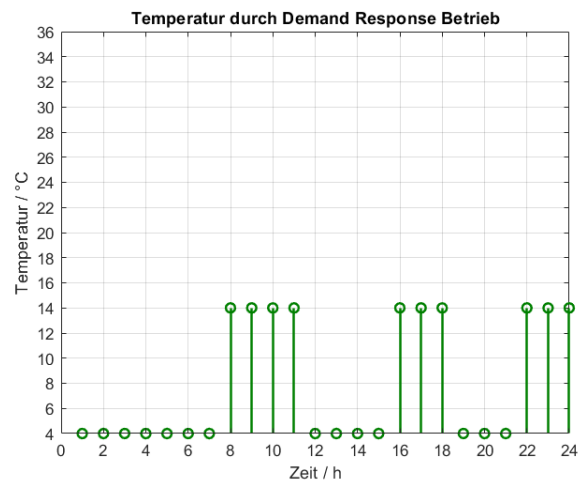


Abbildung 35 - Stündlicher Temperaturverlauf, ( bei Kultivierung von Feldsalat) unter Demand Response Abruf (20.07.2015)

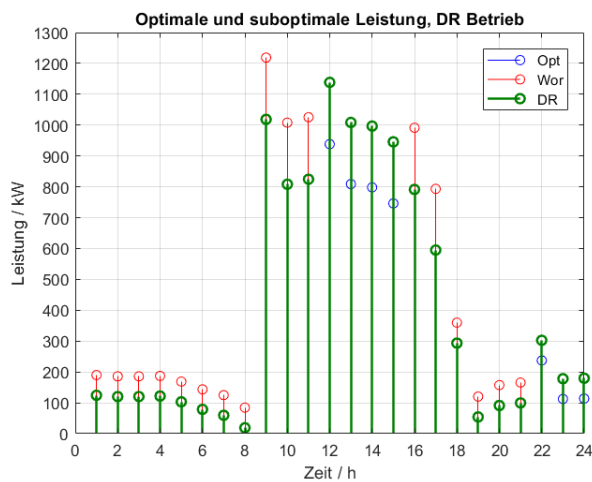


Abbildung 36 - Stündlicher Leistungsverlauf (bei Kultivierung einer Chili-Pflanze) unter Demand Response Abruf (20.07.2015)

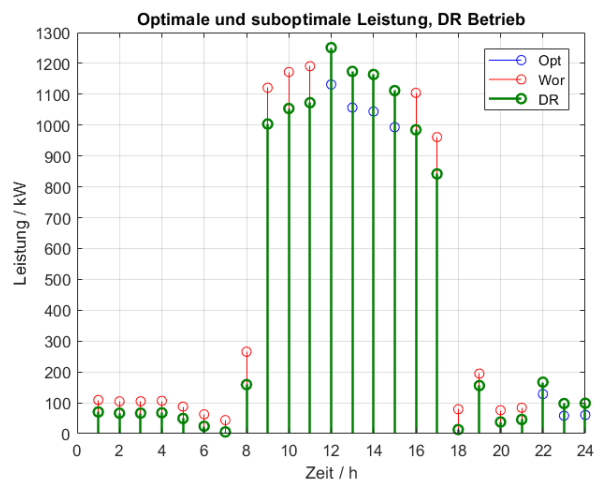


Abbildung 37 - Stündlicher Leistungsverlauf ( bei Kultivierung von Feldsalat) unter Demand Response Abruf (20.07.2015)

Die Mittagsspitze der PV Erzeugung aktiviert den DR Betrieb der Vertikalen Farm und führt zu einer Steigerung des Verbrauchs. Ebenso verhält es sich in der Nacht bedingt durch eine hohe Einspeisung durch Wind. Die Ergebnisse demonstrieren, dass sich eine Vertikale Farm durchaus als regelbare Last im Kontext von Demand Response eignet. Da sich das DR-Potential der beiden Pflanzen stark hinsichtlich der vorherrschenden Außentemperatur unterscheidet (i.e. der Feldsalat zeigt mehr Potential im Winter, während die Chili im Sommer besseres Demand

Response Potential aufweist), sollte eine wie im Projekt angedachte jahreszeitabhängige Rotation von Pflanzen das Demand Response Potential zusätzlich optimieren.

## 2.5 Ergebnisse der energetischen Gebäudesimulation

Nach der Validierung des Simulationsmodells exemplarisch an der Zone 2 der VF#4 wurden Energiebedarfsberechnungen für ausgewählte Pflanzen vorgenommen. Folgende Sollwerte wurden dabei verwendet:

	Photoperiode h	Lichtstärke PPFD	T heat °C	T cool (Win) °C	T max °C	min. rel. Feuchte %	max. rel. Feuchte %	Lichtstärke lx	Sensor Soll Min lx	Sensor Soll Max lx	Lichtmenge/Tag luxh/d	Leistung W/m2	CO2 min ppm	CO2 max ppm
Vogerlsalat	16	100	8	12	14	60	75	5332	5300	5400	307123200	46.67	400.00	800.00
Lollo	16	100	8	16	22	60	75	5332	5300	5400	307123200	46.67	700.00	1200.00
Babyleaf	14	100	8	16	22	60	75	5332	5300	5400	268732800	46.67	700.00	1200.00
Pak Choi	12	125	10	16	24	60	75	6665	6600	6700	287928000	58.33	400.00	800.00
Romana	16	125	10	20	23	60	75	6665	6600	6700	383904000	58.33	700.00	1200.00
Pilzkraut	16	100	12	17	35	75	80	5332	5300	5400	307123200	46.67	400.00	800.00
Speisechrysantheme	16	150	15	20	25	60	75	7998	7900	8000	460684800	70.00	400.00	800.00
Basilikum	16	125	18	22	24	75	80	6665	6600	6700	383904000	58.33	400.00	800.00
Endivien	16	125	20	21	27	60	75	6665	6600	6700	383904000	58.33	400.00	800.00
Erdbeere	18	150	20	22	28	60	75	7998	7900	8000	518270400	70.00	600.00	800.00
Chilli	18	150	20	25	35	60	80	7998	7900	8000	518270400	70.00	600.00	800.00
Tomate	18	150	21	23	26	45	70	7998	7900	8000	518270400	70.00	400.00	800.00

Tabelle 10 - Sollwerte für die Simulation der Wachstumsbedingungen

Repräsentativ für Zonen von vertikalen Farmen (d.h. Zone mit opaker Decke) wurde die Zone 2 der VF#4 für die ausgewählten Pflanzen gerechnet.

Für den Vergleich wurde die Zone 2 zusätzlich als BlackBox gerechnet (keine transparenten Fassaden) und die Zone 6 repräsentativ für Gewächshauszonen mit transparentem Dach. Die beiden Varianten mit transparenter Fassade wurden zusätzlich mit und ohne Kühlung und natürlicher Lüftung gerechnet. Alle Varianten wurden für den gesamten Pflanzenkatalog gerechnet.

Um den Gesamtenergiebedarf der VF#4 zu ermitteln wurden die Zonen 1-6 für die festgelegten Kulturfolgen der Zonen gerechnet. Zusätzlich fließt der Energiebedarf für die anderen Nutzungen des Gebäudes (Markt, Büro, Anzucht, etc.) und die graue Energie in die Berechnung ein.



## Die Simulationsvarianten im Überblick:

<b>Nr.</b>	<b>Zone</b>	<b>Variante</b>	<b>Beschreibung</b>
1	2	Blackbox	monatlicher und jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
2	2	mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung	monatlicher und jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
3	2	ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung	monatlicher und jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
4	6	mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung	monatlicher und jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
5	6	ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung	monatlicher und jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
6	alle	mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung	jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher
7	alle	ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung	jährlicher Energiebedarf gesplittet auf die wesentlichen Energieverbraucher

Abbildung 38 - Simulationsvarianten

Die Simulationsvarianten gliedern sich in drei Gruppen. Die Blackbox steht repräsentativ für Vertikale Farmen ohne Tageslichtnutzung (Indoorfarmen). Dem werden die geschlossenen Vertikalen Farmen ohne natürliche Lüftung über die Fassade mit mechanischer Kühlung den natürlich belüftete Farmen ohne mechanische Kühlung gegenübergestellt.

Um den direkten, energetischen Vergleich zwischen Farmen mit Glasdach und -fassaden und insbesondere vertikale Farmen sichtbar zu machen wurden die Ergebnisse der Zone 2 (ohne Glasdach) der Zone 6 (mit Glasdach) gerechnet.

In den Varianten 6 und 7 wird der Energiebedarf der gesamten VF#4 gerechnet.

### 2.5.1 Blackbox - opake Gebäudehülle (Var. 1)

Die absoluten, spezifischen Ergebnisse des Energiebedarfs der Simulationsvariante „Blackbox“ dienen als direkter Vergleich von Indoor-Farmen und Farmen mit transparenter Gebäudehülle.

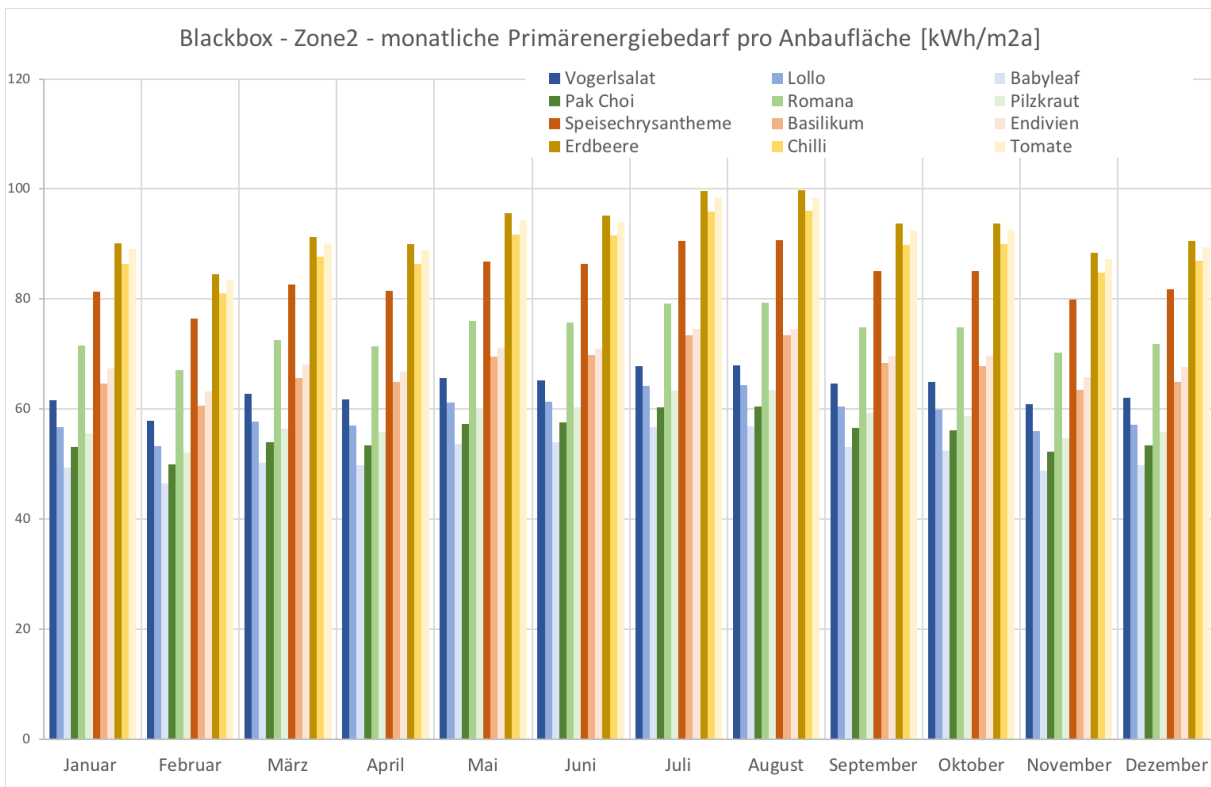


Abbildung 39 - BlackBox Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a (Var 1)

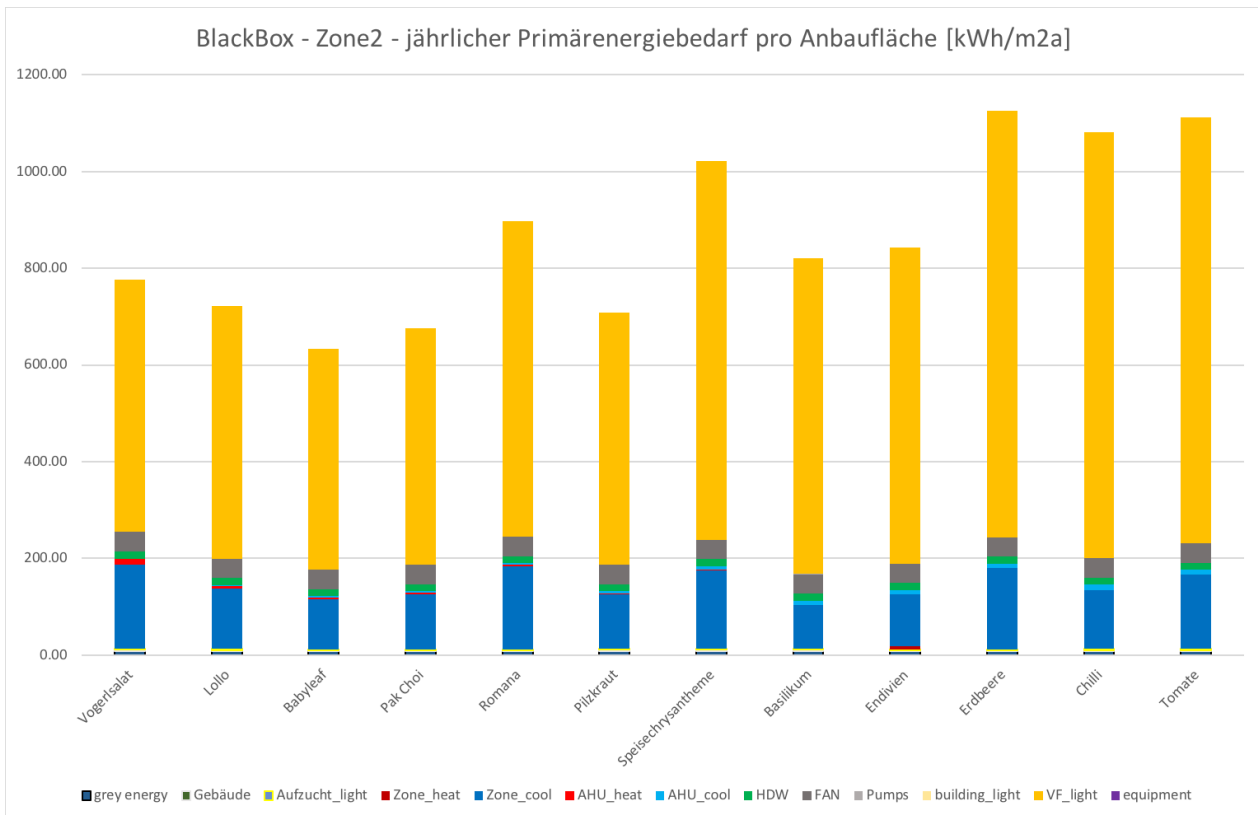


Abbildung 40 - Blackbox Zone 2 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a (Var 2)

## 2.5.2 Zone 2 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2)

Die Ergebnisse der Variante Zone 2 mit Kühlung bilden eine geschlossene Vertikale Farm mit transparenten Fassaden zur Tageslichtnutzung ab. Die Ergebnisse dienen als Vergleich zur angestrebten Variante ohne Kühlung und öffentlicher Fassade und zeigen die direkte Energieersparnis gegenüber der Indoor-Farm (BlackBox) für die untersuchten Pflanzen.

Der Vorteil bei dieser Variante liegt in der Möglichkeit, jede Pflanze in jedem Monat des Jahres anbauen zu können, da neben der Mindesttemperatur im Winter auch die Maximaltemperatur im Sommer auf einem definierten Sollwert gehalten werden kann – siehe hierzu das Diagramm mit den monatlichen Ergebnissen.

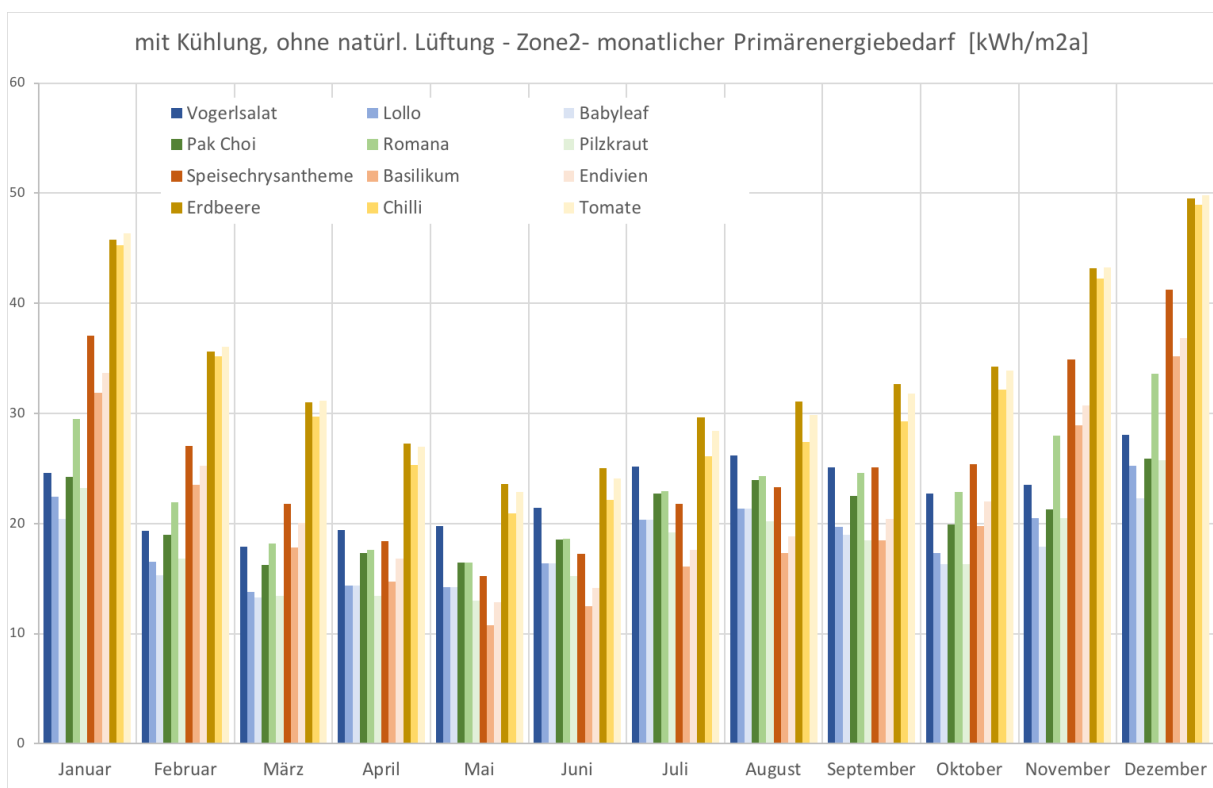


Abbildung 41 - VF#4 Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2)



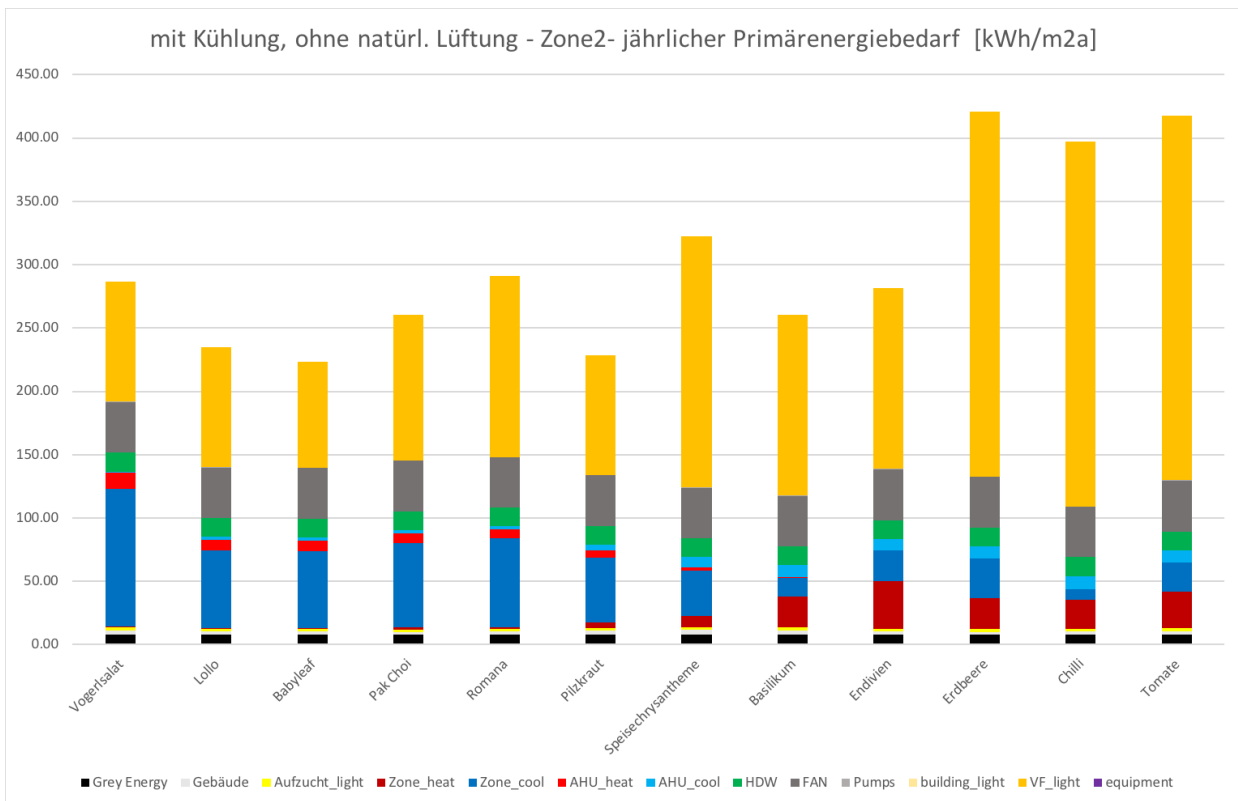


Abbildung 42 - VF#4 Zone 2 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m<sup>2</sup>a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2)

### 2.5.3 Zone 2 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3)

Die Variante 3 zeigt die Simulationsergebnisse der Zone 2 ohne Kühlung aber mit natürlicher Lüftung. Die sommerliche Sollwerttemperatur kann in diesem Fall nicht mehr für alle Pflanzen gehalten werden. Pflanzen, die aufgrund zu hoher Temperaturen nicht angebaut werden können, sind in diesen Monaten im Diagramm nicht mehr enthalten. Bei Verwendung der gezeigten Variante muss also mit den Pflanzen auf die Jahreszeit eingegangen werden. Dies spart Energie und Investitionskosten für die Vollklimatisierung der Gewächshäuser.

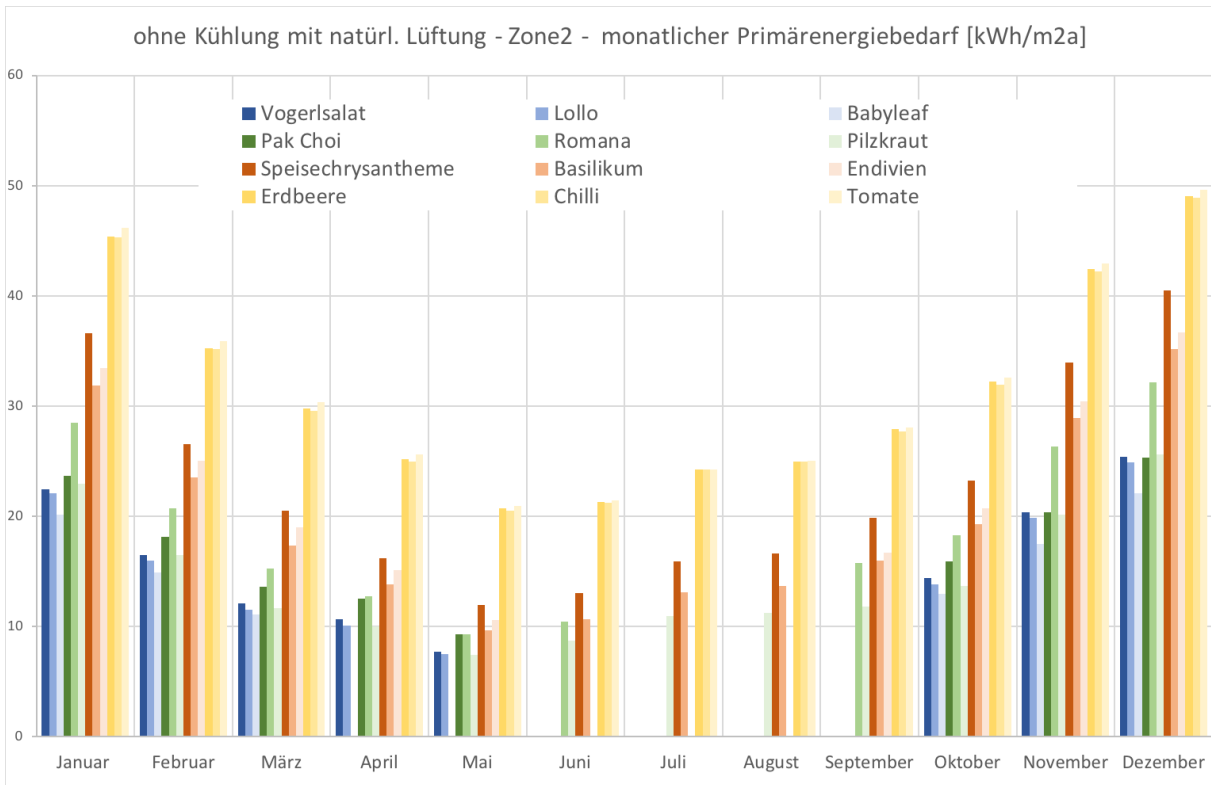


Abbildung 43 - VF#4 Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3)

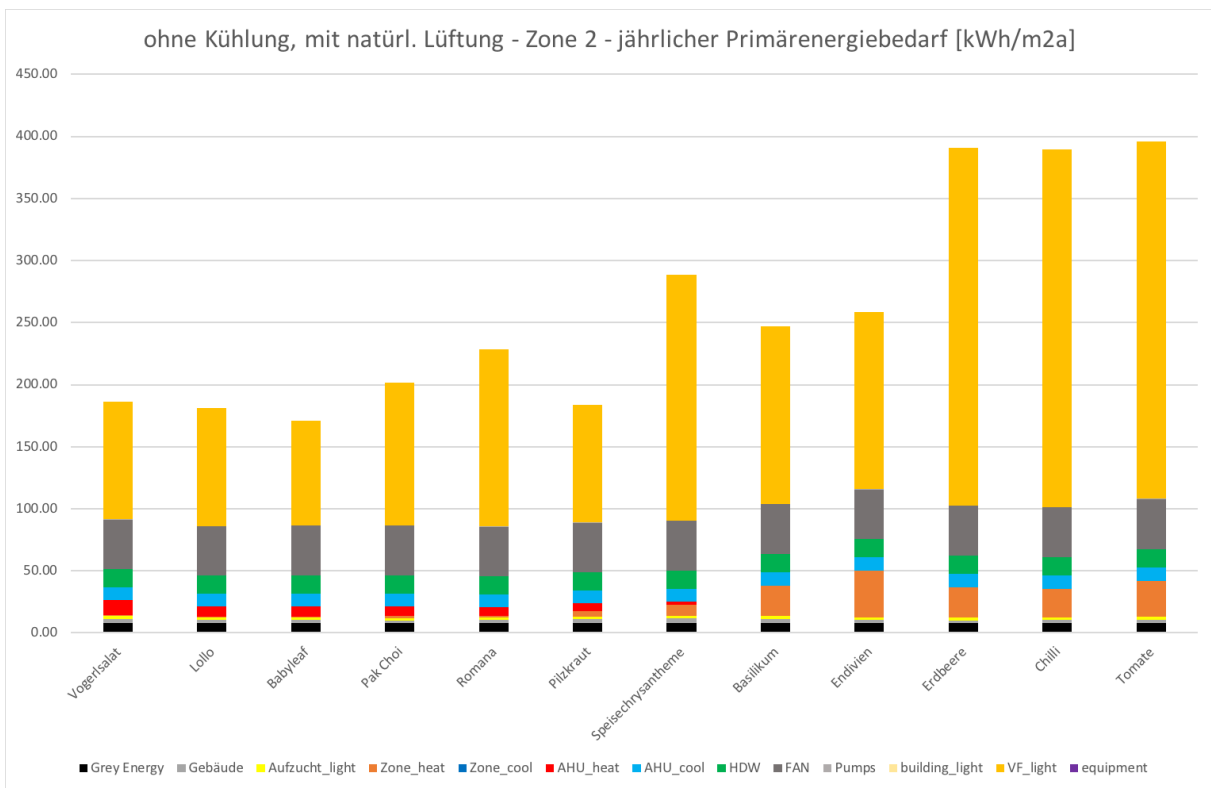


Abbildung 44 - Zone 2 VF#4 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3)

### 2.5.4 Zone 6 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4)

Die Varianten der Zone 6 wurden gerechnet, um einen energetischen Vergleich zwischen einem Gewächshaus mit transparentem Dach und ohne Dach zu erhalten. Der Energieanstieg im Sommer resultiert durch die benötigte Kühlung. Der Strombedarf für die künstliche Belichtung ist durch die sehr gute Tageslichtnutzung im Vergleich sehr gering. Zu beachten ist die Verzerrung der Resultate durch den Bezug der Ergebnisse auf die Anbaufläche, die in der Zone 6 spezifisch geringer als in der Zone 2 ist.

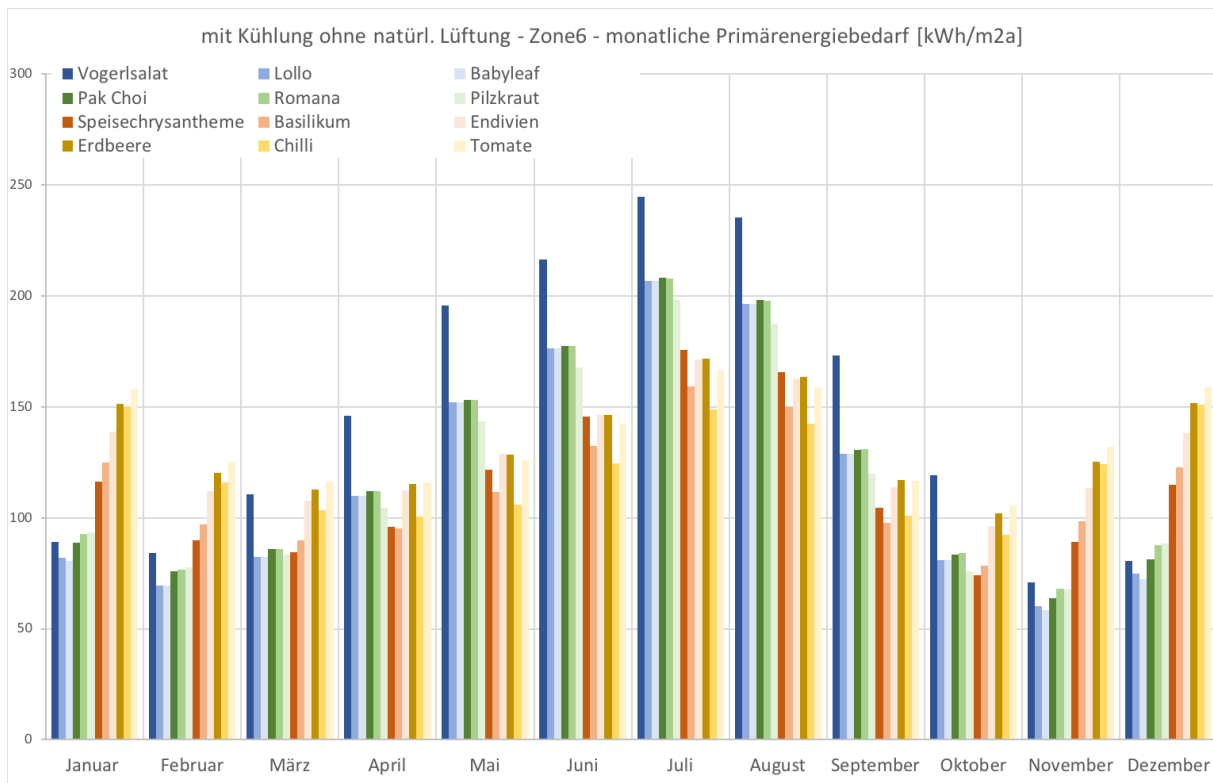


Abbildung 45 - VF#4 Zone 6 - VF#4 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m²a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4)

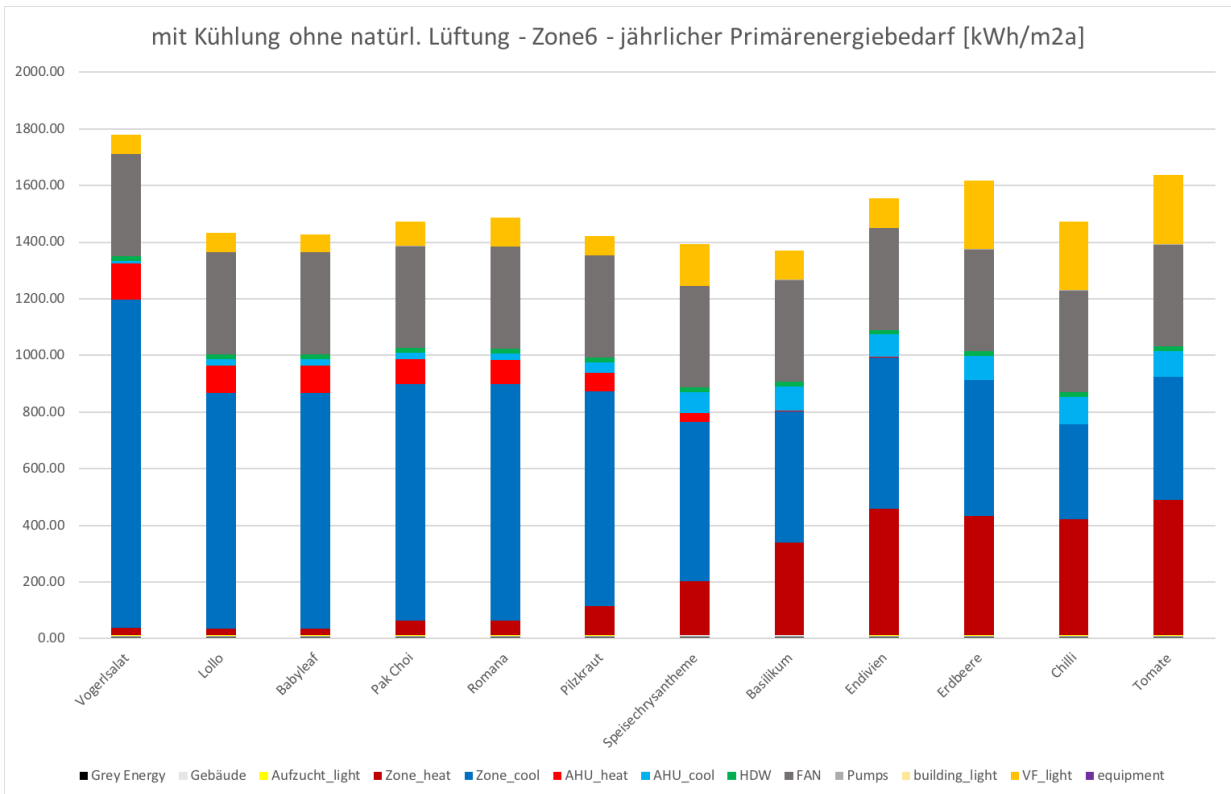


Abbildung 46 - VF#4 Zone 6 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m<sup>2</sup>a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4)

### 2.5.5 Zone 6 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5)

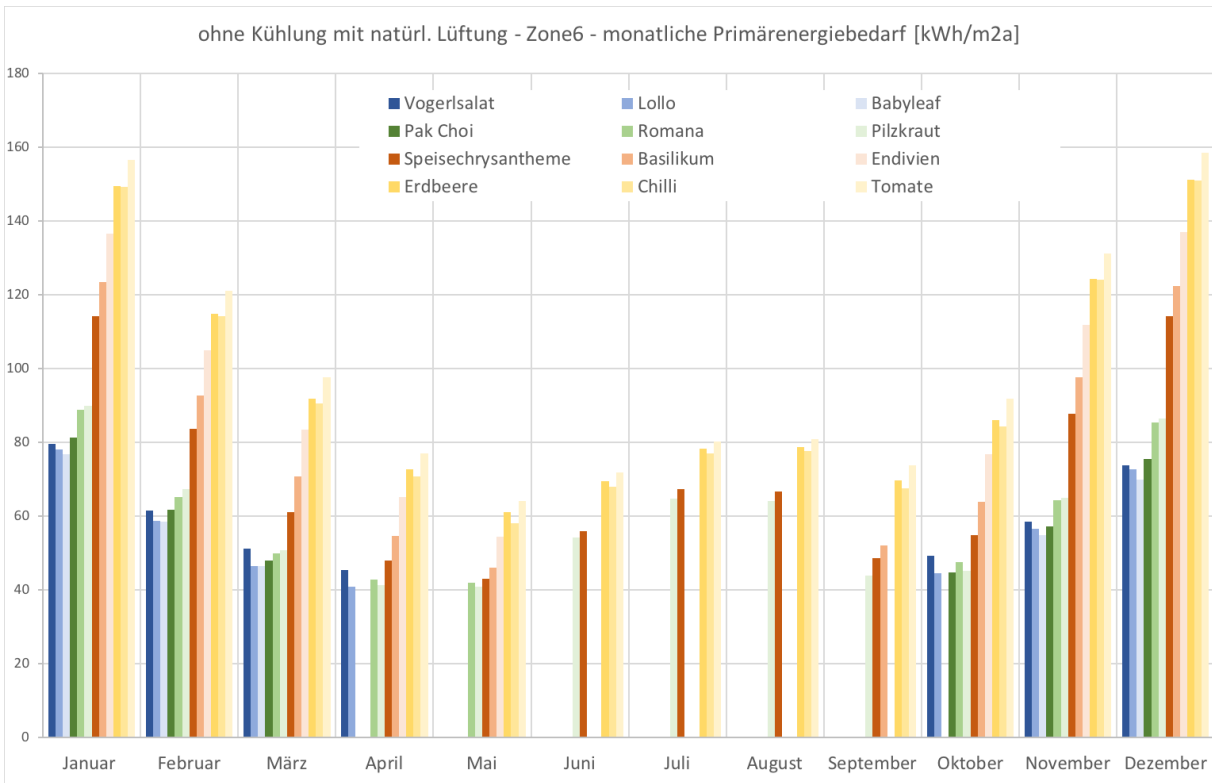


Abbildung 47 - VF#4 Zone 6 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m<sup>2</sup>a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5)

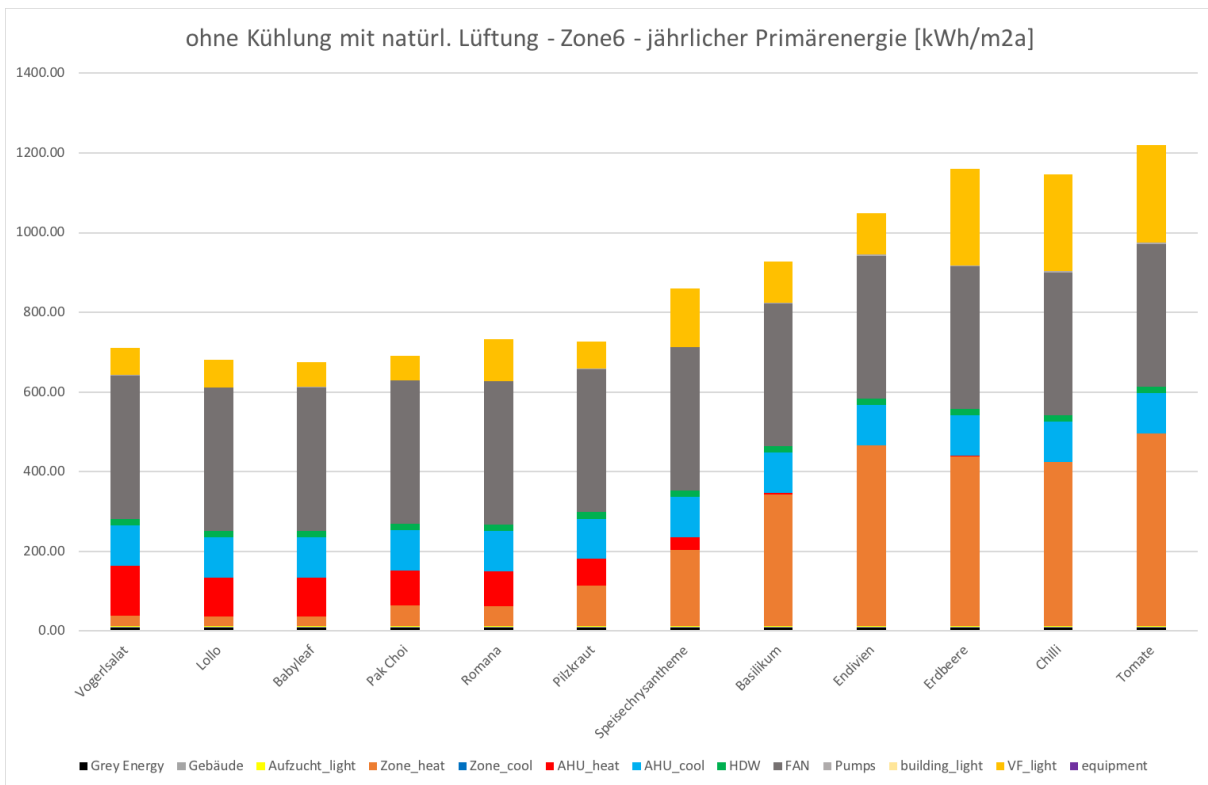


Abbildung 48 - VF#4 Zone 6 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m<sup>2</sup>a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5)

### 2.5.6 Vergleich der Varianten 1-5

Das Einsparpotential an Primärenergie durch die Tageslichtnutzung über die transparente Fassade und die natürliche Lüftung über die öffentbare Fassade liegt je nach Pflanze zwischen 60 % und 75 %.

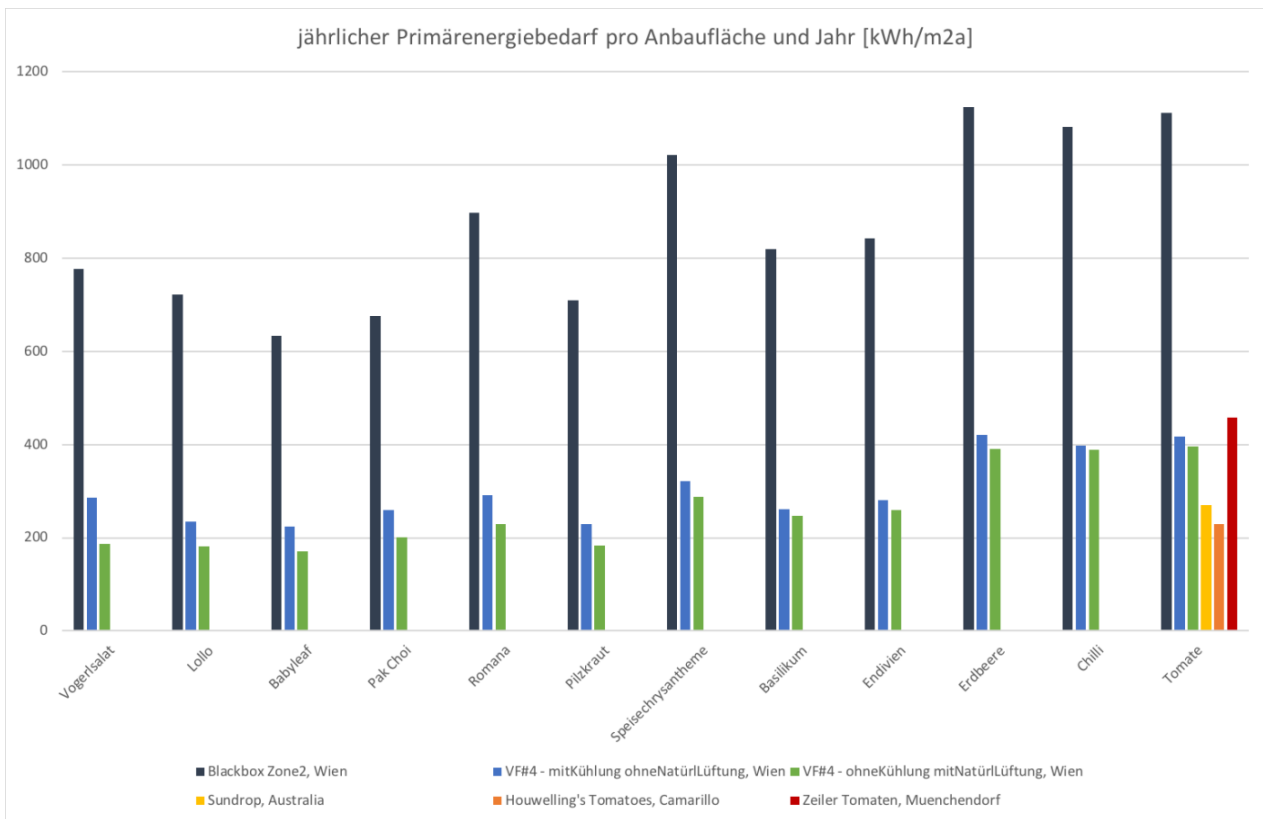


Abbildung 49 - Jährliche Primärenergie pro Anbaufläche

Der direkte Vergleich des Energiebedarfs der untersuchten Varianten mit bestehenden Gewächshäusern zeigt, dass die Vertikale Farm mit transparenten Fassaden energetisch interessant ist (Vergleich Tomaten Zeiler, Wien).

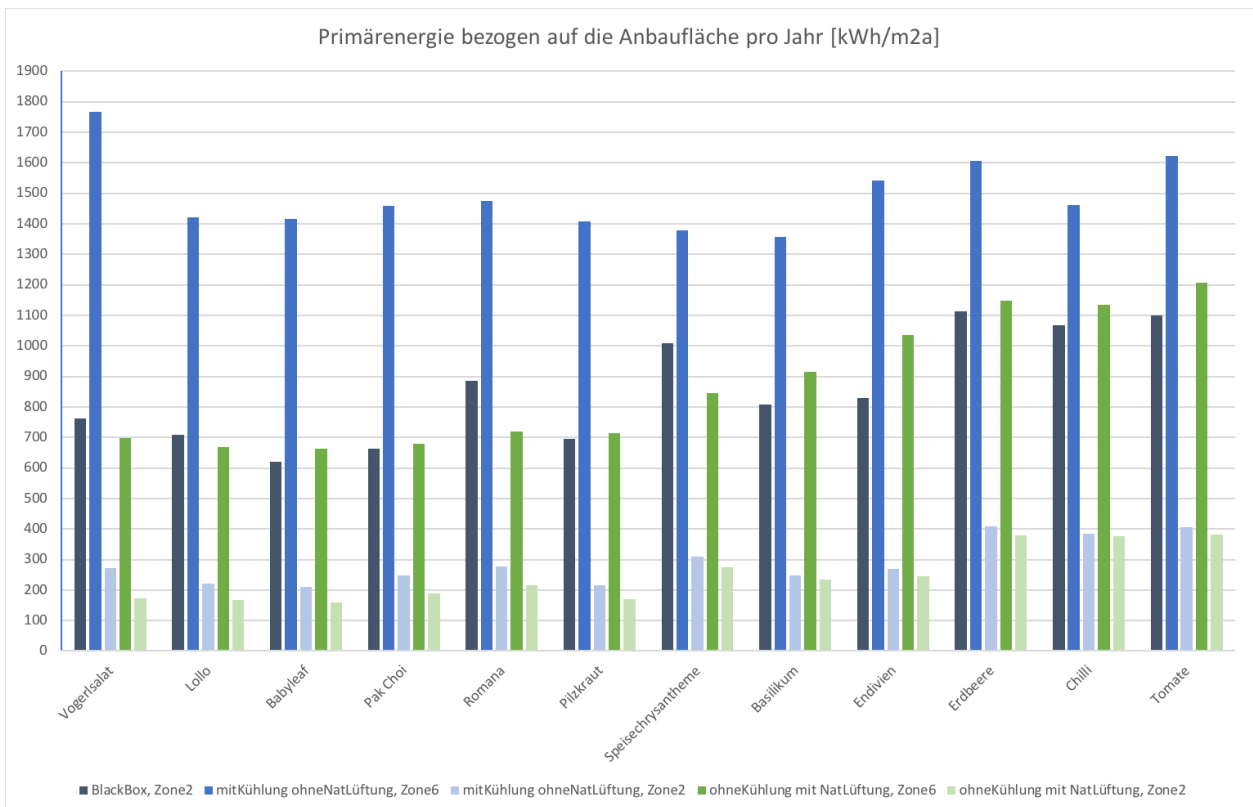


Abbildung 50 - Jährliche Primärenergie bezogen auf die Anbaufläche

Der direkte Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt den erhöhten Primärenergiebedarf der Zone 6 im Vergleich zur Zone 2. Die Varianten mit oder ohne Kühlung im Fall der Zone 2 (repräsentativ für Vertical Farm Zonen) brauchen im Vergleich zur BlackBox und zur Zone 6 (repräsentativ für herkömmliche Gewächshäuser) nur 20-30 % Primärenergie.

Der erhebliche Unterschied des Primärenergiebedarfs zwischen Zone 2 und Zone 6 ist dadurch begründet, dass in der Zone 6 die Anbaufläche wesentlich geringer ist, bezogen auf das Volumen.

## 2.6 Gesamtenergiebilanz der Vertikalen Farm VF#4

Um den Gesamtenergiebedarf der VF#4 zu erhalten, wurden alle Zonen mit den zugeteilten Pflanzen pro Monat, den entsprechenden Sollwerten und alle anderen Räume der VF#4 simuliert. Zusätzlich wurde die graue Energie in die Bilanz integriert.

Die Berechnungen wurden für die Varianten mit Kühlung - ohne natürliche Lüftung und ohne Kühlung – mit natürlicher Lüftung durchgeführt.

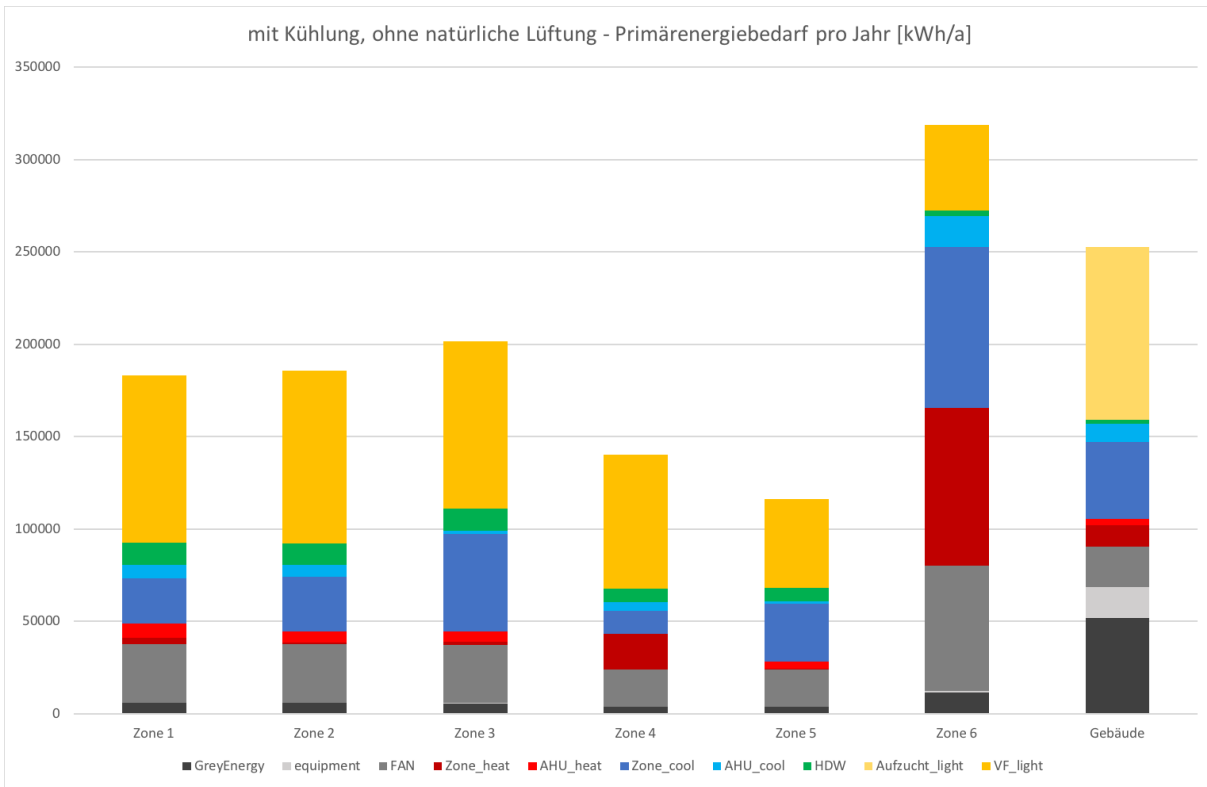


Abbildung 51 - Gesamtenergiebedarf VF#4 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung

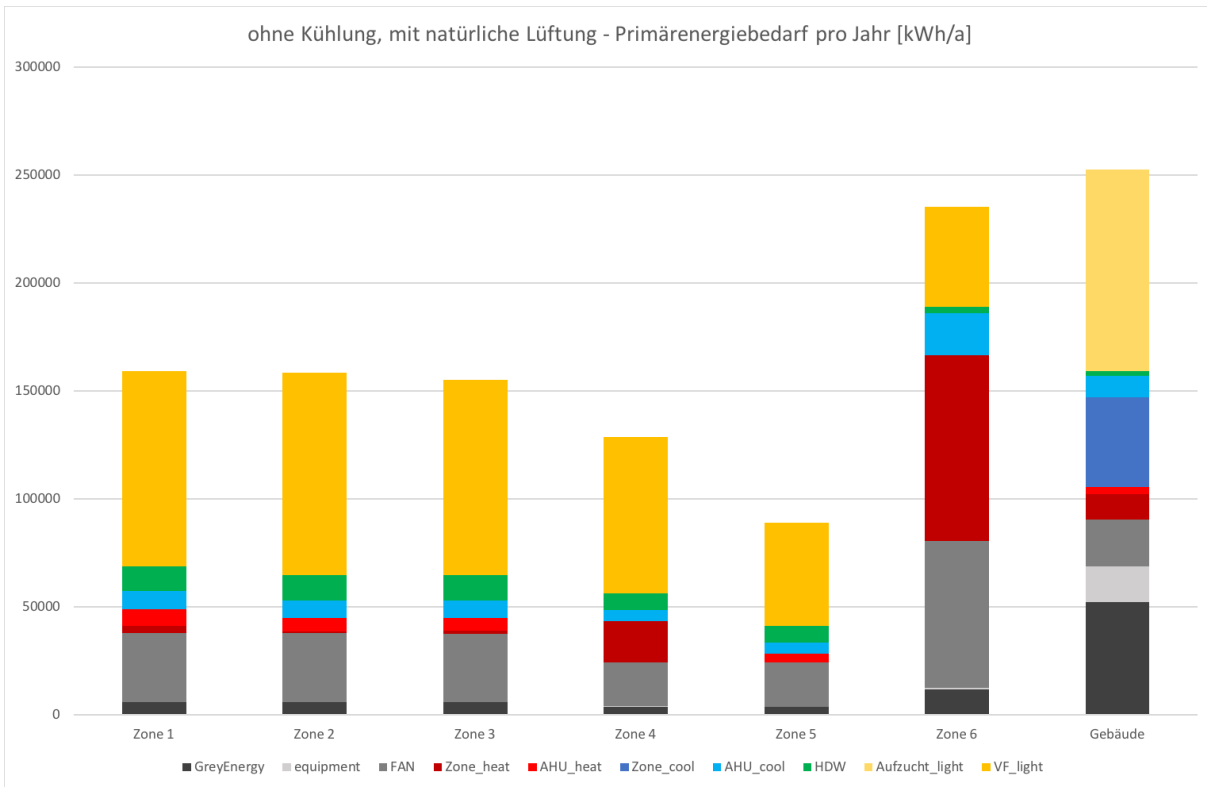


Abbildung 52 - Gesamtenergiebedarf VF#4 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung



Der direkte Vergleich der absoluten Werte zeigt, dass die VF#4 ohne Kühlung und mit natürlicher Lüftung ca. 15 % weniger Primärenergie braucht, als die Variante mit Kühlung und ohne natürliche Lüftung. Starken Einfluss auf dieses Ergebnis hat die Zone 6 mit Glasdach.

Die in Abbildung 53 bezogene Kühlleistung des Balkens „Gebäude“ bezieht sich auf den Energiebedarf in der Erdgeschosszone, sprich für sämtliche Räume, in welchen keine Lebensmittel produziert werden.

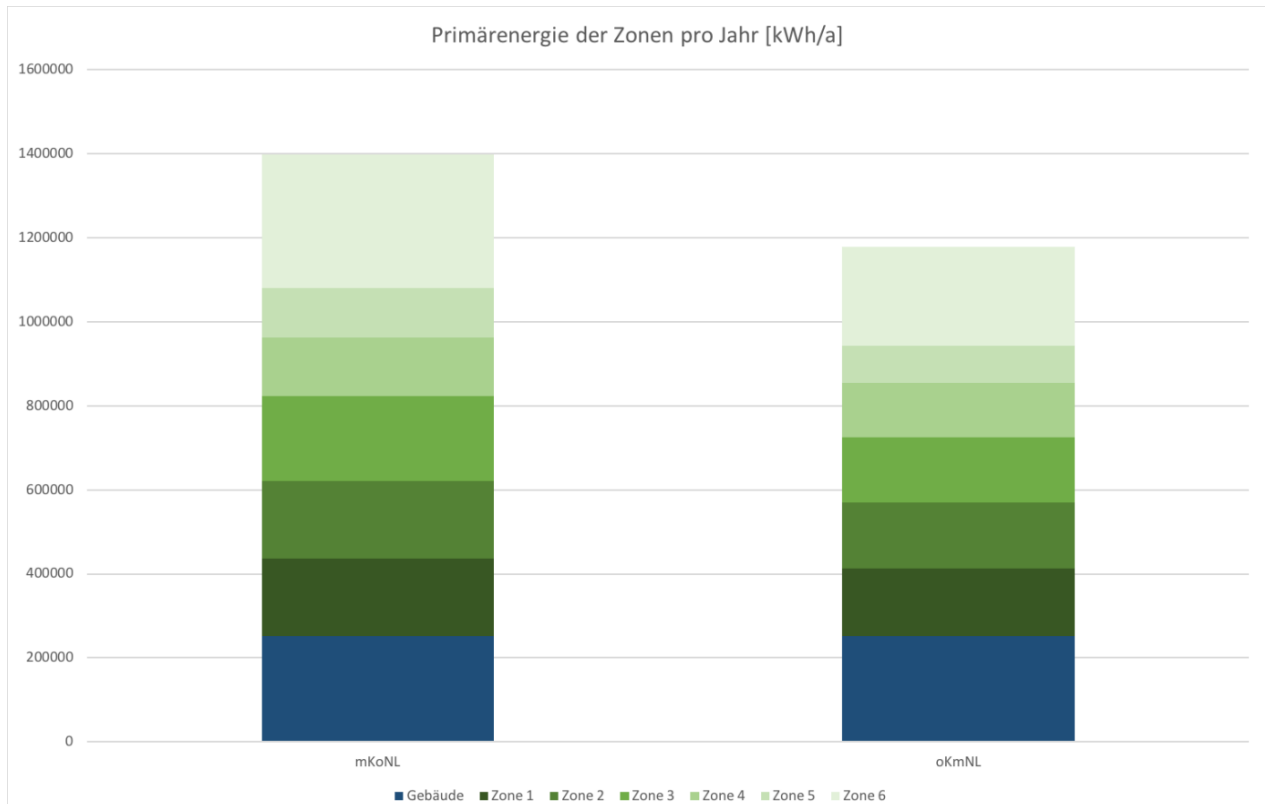


Abbildung 53 - Gesamtenergiebedarf VF#4 – Gegenüberstellung der Varianten

Die Gesamtenergiebilanz von VF#4, inklusive der Zonen und der Zusatzfunktionen liegt somit bei 1,4 GWh inkl. kontrollierter Lüftung und 1,19 GWh mit natürlicher Lüftung.

## 2.7 Recherche und Auswertung publizierter Daten hinsichtlich Energie- und Wasserverbrauch

Die Recherche bezüglich des Energieverbrauchs bereits operativ tätiger, vertikaler Farmen bzw. vergleichbarer High-Tech-Gewächshäuser hat sich als schwierig erwiesen. Dies ist dadurch begründet, dass Informationen über den tatsächlichen Energieverbrauch aus betriebsinternen Gründen nicht oder nur oberflächlich geteilt werden. Diese Erfahrung konnte auch bei Konferenzen, an denen einige KonsortialpartnerInnen in den letzten Jahren teilgenommen hatten, gemacht werden. Um dennoch Vergleichszahlen zu finden und die Ergebnisse bezüglich Energie- und Wasserverbrauch der VF#4 zu erhalten, wurde auf zur Verfügung gestellter Daten von High-Tech-Gewächshäusern zurückgegriffen und mittels unabhängiger Publikationen auf deren Plausibilität überprüft. Drei High-Tech-Gewächshäuser werden im Folgenden genauer beschrieben:

Greenhouse Houweling<sup>25</sup> ist mit einer Grundfläche von 518.000 m<sup>2</sup> mit Abstand die größte Farm der Untersuchung. Es werden auf 500.000 m<sup>2</sup> Fläche Tomaten im Hydroponic Verfahren angebaut. Der jährliche Output liegt bei 48.000 t. Der Energiebedarf dieser Farm ist nur teilweise ermittelbar. Für diese Anlage sind nur technische Angaben zur verwendeten Kraft-Wärme-Kopplung (CHP) vorhanden. Die notwendige Energie wird zu einem beträchtlichen Teil durch eine 20.000 m<sup>2</sup> große, über einem Wasserreservoir angelegte Solaranlage zu Verfügung gestellt.

Greenhouse Sundrop<sup>26 27</sup> ist ein 340.000m<sup>2</sup> großes Gewächshaus mit einer Anbaufläche von 200.000 m<sup>2</sup>, auf der jährlich bis zu 17.000 t Tomaten im Hydroponic Verfahren angebaut werden. Der Rest des Grundstücks wird mit einer 140.000 m<sup>2</sup> großen Fläche für die Energieproduktion genutzt. Auf 51.000 m<sup>2</sup> wurden über 23.000 Spiegel angebracht, die das Licht an einem Punkt auf einem 127 m hohen Solarturm bündeln. Die gewonnene Energie wird zur Desalination des Meerwassers benutzt und produziert täglich über 1.000.000 Liter frisches Wasser für die Produktion. Die restliche Energie wird zum Heizen oder Kühlen und für die Stromversorgung des Gewächshauses verwendet.

Tomaten Zeiler in Münchendorf<sup>28</sup>, Österreich, wurde 2003 gegründet. Dieser Produzent war der erste in Österreich mit einer Tomaten-Ganzjahresproduktion. Heute produziert Zeiler ca. 2.000 t an Tomaten in ca. 11 Monaten. Der Gesamtenergieverbrauch laut eigenen Aussagen liegt bei 0,55 MWh/m<sup>2</sup>/a<sup>29</sup>. Der Großteil davon fällt auf Heizenergie. Anbaumethode ist Hydroponik mit Cocopeat-Substrat.

---

<sup>25</sup> [www.houwelings.com](http://www.houwelings.com)

<sup>26</sup> [www.sundropfarms.com](http://www.sundropfarms.com)

<sup>27</sup> [www.aalborgcsp.com](http://www.aalborgcsp.com)

<sup>28</sup> [www.tomaten.at](http://www.tomaten.at)

<sup>29</sup> [www.tyrolux.eu/referenzen/g%C3%A4rtnerien](http://www.tyrolux.eu/referenzen/g%C3%A4rtnerien)

Greenhouse / Vertical Farm		<b>Sundrop, Australia</b>	<b>Houwelling's Tomatoes, Camarillo</b>	<b>Zeiler Tomaten, Muenchendorf</b>	<b>VF #4</b>
		Warm-summer Medit. climate	Warm-summer Medit. climate	TEMPERATE-continental climate	TEMPERATE-continental climate
<b>Footprint - building</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>340 000,00</b>	<b>518 000,00</b>	<b>65 560,00</b>	<b>786,24</b>
<b>Footprint - greenhouse</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>200 000,00</b>	<b>500 000,00</b>	<b>63 000,00</b>	<b>1 402,39</b>
Anbaumethode	-	Hydroponics	Hydroponics	Hydroponics - cocosubstrate	Hydroponics
<b>Yearly Output</b>	kg/a	17 000 000,00	48 000 000,00	2 000 000,00	185 000,00
<b>Yearly Output / Greenhouse area</b>	kg/m <sup>2</sup> /a	85,00	96,00	31,75	131,92
<b>Yearly Output / Greenhouse Volume</b>	kg/m <sup>3</sup> /a	13,08	12,80	4,88	15,46
<b>Total Energy consumption</b>	MWh/m <sup>2</sup> GH/a	0,29	0,21	0,55	0,45
Total Energy consumption	MWh/m <sup>3</sup> GH/a	0,04	0,04	0,08	0,14
Electricity consumption	MWh/a	3 826,00	9 565,00	4 780,00	292,80
Light consumption	MWh/a	14 314,00	35 785,00	3 830,00	1 164,00
Heat consumption	MWh/a	40 356,00	58 215,00	26 019,00	165,00
<b>Water consumption (for plants)</b>	m <sup>3</sup> /a	450 000,00	1 200 000,00	138 000,00	5 580,96
<b>Water consumption / Total Greenhouse area</b>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /a	2,25	2,40	2,19	1,56

Total Farm Area = 2550,05 m<sup>2</sup>

Abbildung 54 - Energie- und Wasserverbrauch von High-Tech-Gewächshäusern

## 2.8 Grobe Ermittlung sämtlicher Energie- und Stoffströme der VF#4

Für die Skizzierung der Ökobilanz bzw. der grauen Energie wurde auf die Software Autodesk Revit-Erweiterung „one Click LCA“<sup>30</sup> zurückgegriffen. Der Berechnungszeitraum beträgt hierbei 50 Jahre. Demnach ist mit einem Ressourcenverbrauch für Herstellung, Betrieb und Umbauten von 64.770.286 MJ oder 17,9 GWh zu rechnen.

### Life-cycle assessment results

Sector	Global warming kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg PO4e	Ozone depletion potential kg CFC11e	Formation of ozone of lower atmosphere kg Ethenee	Primary energy MJ
A1-A3 Construction Materials	3 737 590,93	10 400,67	1 569,62	0,06	1 216,93	51 300 264,54
A4 Transportation to site	77 023,52	353,88	77,08	0,02	4,37	2 189 171,87
A5 Construction/Installation process	23 061,04	83,42	50,56	0	2,82	430 785,09
B1-B5 Maintenance and material replacement	559 728,31	2 209,57	442,09	0	195,2	7 656 135,83
B6 Energy use	11 236,64	52,34	51,86	0	0,98	456 446,53
B7 Water use	120 000	649,78	328,72	0,01	29,23	2 536 993,14
C1-C4 Deconstruction	12 639,44	79,64	15,12	0	9,16	209 489,93
D External impacts (not included in totals)	-104 335,2	-398,92	-34,14	-0	-59,09	-925 525,47
<b>Total</b>	<b>4 541 279,87</b>	<b>13 829,3</b>	<b>2 535,05</b>	<b>0,1</b>	<b>1 458,7</b>	<b>64 779 286,93</b>
	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph
<b>Results per denominator</b>						
Nettogrundfläche (DIN 277), Germany 770.0 m2	5 897,77	17,96	3,29	0	1,89	84 128,94
Gross Internal Floor Area (IPMS/RICS) 3300.0 m2	1 376,15	4,10	0,77	0	0,44	19 630,09

Abbildung 55 - LCA assessment results

Für dieses Berechnungsmodell wurde auf den Primärenergieverbrauch von recyceltem Stahl und Glas zurückgegriffen. Einer der Hauptfaktoren, die den nachhaltigen Bauprozess beeinflussen, ist die mengenmäßig hohe Verwendung von Glas (1,4 kgCO<sub>2</sub> / kg für recyceltes und 8,4 kgCO<sub>2</sub> / kg für neu hergestelltes Glas). Für die operative Energie und den Instandhaltungsprozess des Betriebes werden weniger als 10 % der gesamten Primärenergie benötigt.

<sup>30</sup> LCA – Lifecycle Assessment

Gebäudemodell für die Erfassung der Grauen Energie und der entsprechenden Treibhausgasemissionen gemäss Merkblatt SIA 2032 Graue Energie in Gebäuden, Anhang D (Korrigenda C1)

Vorstudien / Vorprojekt

Version 2.0, 3. 7. 2013

blau	Eingabefelder			
grün	Auswähllisten	GF	m2	2997
gelb	feste Vorgaben	EBF	m2	2556
braun	übernommene Werte	BTf = Bauteilfläche		
				Geschossfläche
				Energiebezugsfläche

Graue Energie in MJ

Elementgruppe	en	Description	dt	Bezeichnung	Bezugsgrösse	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	pro Einheit		pro Gebäude			pro Geschossfläche			Anteile pro Jahr		
									pro Jahr	Erstellung	Entsorgung	pro Jahr	Erstellung	Entsorgung	pro Jahr	Erstellung		Entsorgung	
B 6.2 / 6.3		Aushub		Aushub	Volumen	m3	4257	ohne Grundwasser	2	140	0	8.514	595.980	0	2,8	198,9	0,0	2,6%	
C 1		Bodenplatte, Fundament		Bodenplatte, Fundament	BTF	m2	786	gedämmt	3	23	1150	200	18.078	903.900	157.200	6,0	301,6	52,5	5,4%
C 2.1A / E 1		Aussenwand unter Terrain		Aussenwand unter Terrain	BTF	m2	637	gedämmt	3	27	1450	120	17.199	923.650	76.440	5,7	308,2	25,5	5,2%
C 4.4 / F1.1		Dach unter Terrain		Dach unter Terrain	BTF	m2	422	gedämmt	3	45	2490	210	18.990	1.050.780	88.620	6,3	350,6	29,6	5,7%
C 2.1B		Aussenwandkonstruktion über Terrain		Aussenwandkonstruktion über Terrain	BTF	m2	1120	Betonwand	2	12	610	96	13.440	683.200	107.520	4,5	228,0	35,9	4,0%
E 2		Aussere Wandbekleidung über Terrain		Aussere Wandbekleidung über Terrain	BTF	m2	1120	Vollverglasung Pfostenriegel	7	66	2600	19	73.920	2.912.000	21.280	24,7	971,6	7,1	22,2%
E 3 / F 2		Fenster		Fenster	BTF	m2	562	= 0 für Vollverglasung; Mittelwert 2-fach / 3-fach	77	2300	17	43.274	1.292.600	9.554	14,4	431,3	3,2	13,0%	
C 2.2 / G 3		Innerwand		Innerwand	GF	m2	2997	Mittelwert tragend und nicht tragend	11	460	47	32.967	1.378.620	140.859	11,0	460,0	47,0	9,9%	
C 4.1 / G 4		Deckenkonstruktion (inkl. Deckenbekleidung)		Deckenkonstruktion (inkl. Deckenbekleidung)	BTF	m2	233	Betondecke	2	13	650	120	3.029	151.450	27.960	1,0	50,5	9,3	0,9%
		Dämmung gegen unbeliebt		Dämmung gegen unbeliebt	BTF	m2	0		5	140	4	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0%	
G 2		Deckenaufbau		Deckenaufbau	BTF	m2	372	Unterkonstruktion und Bodenbelag	3	14	400	29	5.208	148.800	10.788	1,7	49,6	3,6	1,6%
C 4.3		Balkon		Balkon	BTF	m2	0		29	1050	109	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0%	
C 4.4		Dachkonstruktion		Dachkonstruktion	BTF	m2	680	Holzdecke (Flachdach)	3	11	500	32	7.480	340.000	21.780	2,5	113,4	7,3	2,3%
F 1.2 / F 1.3		Dachaufbau		Dachaufbau	BTF	m2	680	gedämmt (Flachdach)	2	35	1000	39	23.800	680.000	26.520	7,9	226,9	8,8	7,2%
D1		Elektroanlage		Elektroanlage	EBF	m2	2556	Büro	3	17	490	11	43.452	1.252.440	28.116	14,5	417,9	9,4	13,1%
		Solarstromanlage		Solarstromanlage	BTF	m2	0	0,1 kWp = 1 m2	93	2800	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0%	
D5		Wärmeanlage		Wärmeanlage	EBF	m2	2556	Wärmeerzeugung und Verteilung	6	150	1	15.336	383.400	2.556	5,1	127,9	0,9	4,6%	
		Erdsonden		Erdsonden	EBF	m2	0		5	200	1	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0%	
		Sonnenkollektoren		Sonnenkollektoren	BTF	mw	0		130	2600	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0%	
D7		Lufttechnische Anlage		Lufttechnische Anlage	bel EBF	m2	7	Büro	3	8	250	0	56	1.750	0	0,0	0,6	0,0	0,0%
D8		Wasseranlage		Wasseranlage	EBF	m2	2556	Büro	3	3	75	0	7.668	191.700	0	2,6	64,0	0,0	2,3%
<b>Total</b>											<b>332411 MJ</b>	<b>12.890.270</b>	<b>719.173</b>	<b>110,9</b>	<b>4301</b>	<b>240</b>	<b>100,0%</b>		
											<b>92336,46 kWh</b>								
											<b>30,81 kWh/m²/a</b>								
											<b>7,52 kWh/m²/a</b>								

Treibhausgasemissionen in kg CO2-Äquivalent

Elementgruppe	en	Description	dt	Bezeichnung	Bezugsgrösse	Einheit	Menge	Ausführungsvariante	pro Einheit		pro Gebäude			pro Geschossfläche			Anteile pro Jahr	
									pro Jahr	Erstellung	Entsorgung	pro Jahr	Erstellung	Entsorgung	pro Jahr	Erstellung		Entsorgung
B 6.2 / 6.3		Aushub		Aushub	Volumen	m3	4257	ohne Grundwasser	0,1	9	0	426	36.313	0	0,14	12,78	0,00	1,8%
C 1		Bodenplatte, Fundament		Bodenplatte, Fundament	BTF	m2	786	gedämmt	1,9	105	11	1.493	82.530	8.646	0,50	27,54	2,88	6,2%
C 2.1A / E 1		Aussenwand unter Terrain		Aussenwand unter Terrain	BTF	m2	637	gedämmt	2,8	133	33	1.784	85.995	21.021	0,60	26,69	7,01	7,4%
C 4.4 / F1.1		Dach unter Terrain		Dach unter Terrain	BTF	m2	422	gedämmt	3,5	150	58	1.477	63.300	24.476	0,49	21,12	8,17	6,2%
C 2.1B		Aussenwandkonstruktion über Terrain		Aussenwandkonstruktion über Terrain	BTF	m2	1120	Betonwand	1,3	70	6	1.456	78.400	8.720	0,49	26,16	2,24	6,1%
E 2		Aussere Wandbekleidung über Terrain		Aussere Wandbekleidung über Terrain	BTF	m2	1120	Vollverglasung Pfostenriegel	4,4	160	12	4.928	179.200	13.440	1,84	56,79	4,48	20,5%
E 3 / F 2		Fenster		Fenster	BTF	m2	562	= 0 für Vollverglasung; Mittelwert 2-fach / 3-fach	5,2	150	7	2.922	84.300	3.934	0,98	28,13	1,31	12,2%
C 2.2 / G 3		Innerwand		Innerwand	GF	m2	2997	Mittelwert tragend und nicht tragend	0,9	43	3	2.697	128.871	8.991	0,90	43,00	3,00	11,2%
C 4.1 / G 4		Deckenkonstruktion (inkl. Deckenbekleidung)		Deckenkonstruktion (inkl. Deckenbekleidung)	BTF	m2	233	Betondecke	1,5	82	7	350	19.106	1.631	0,12	6,38	0,54	1,5%
		Dämmung gegen unbeliebt		Dämmung gegen unbeliebt	BTF	m2	0		0,3	8	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0%
G 2		Deckenaufbau		Deckenaufbau	BTF	m2	372	Unterkonstruktion und Bodenbelag	1,1	26	6	409	9.672	2.232	0,14	3,23	0,74	1,7%
C 4.3		Balkon		Balkon	BTF	m2	0		2,6	96	8	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0%
C 4.4		Dachkonstruktion		Dachkonstruktion	BTF	m2	680	Holzdecke (Flachdach)	0,6	26	6	408	17.680	4.080	0,14	5,90	1,36	1,7%
F 1.2 / F 1.3		Dachaufbau		Dachaufbau	BTF	m2	680	gedämmt (Flachdach)	2,3	42	26	1.564	28.560	17.680	0,52	9,53	5,90	6,5%
D1		Elektroanlage		Elektroanlage	EBF	m2	2556	Büro	1,0	21	10	2.556	53.676	25.560	0,85	17,91	8,53	10,6%
		Solarstromanlage		Solarstromanlage	BTF	m2	0	0,1 kWp = 1 m2	6,8	200	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0%
D5		Wärmeanlage		Wärmeanlage	EBF	m2	2556	Wärmeerzeugung und Verteilung	0,4	7	3	1.022	17.892	7.668	0,34	5,97	2,56	4,3%
		Erdsonden		Erdsonden	BTF	m2	0		0,3	10	1	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0%
		Sonnenkollektoren		Sonnenkollektoren	BTF	mw	0		8,5	170	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,0%
D7		Lufttechnische Anlage		Lufttechnische Anlage	bel EBF	m2	7	Büro	0,5	15	0	4	106	0	0,00	0,04	0,00	0,0%
D8		Wasseranlage		Wasseranlage	EBF	m2	2556	Büro	0,2	4	1	511	10.224	2.556	0,17	3,41	0,85	2,1%
<b>Total</b>											<b>24.007</b>	<b>897.824</b>	<b>148.635</b>	<b>8</b>	<b>300</b>	<b>50</b>	<b>100,0%</b>	

Tabelle 12 - Berechnung der grauen Energie

## **2.9 Erwartbare ökologische, ökonomische und soziale Chancen und Herausforderungen der Vertikalen Farm**

Seit Jahren ist eine verstärkte Sensibilisierung bei KonsumentInnen für die Lebensmittelproduktion feststellbar. Die Frage nach dem Produzenten und der Art und Weise der Lebensmittelherstellung rückt dabei immer häufiger in den Mittelpunkt. Lebensmittelproduktion in vertikalen Farmen direkt vor Ort, wo Lebensmittel auch konsumiert werden, eröffnet die Möglichkeit, Transparenz und damit auch Vertrauen in die Herstellung wieder zu implementieren.

Beispiele wie „Vertical Harvest“ in Jackson Wyoming belegen durch deren gesellschaftlichen Fokus bei Planung und Betrieb der vertikalen Farm die Akzeptanz für den Einsatz neuer Anbau- und Produktionsmethoden sowie der damit verbundene High-Tech-Prozess. Der inklusorische Ansatz, insbesondere die Integration körperlich und geistig beeinträchtigter Personen in den Betrieb, führen dazu, dass die vertikale Farm in Jackson zu einem neuen öffentlichen Hot-Spot wurde.

Die Erweiterung der vertikalen Farm mit öffentlichen Räumen und Plätzen kann zu einer Sensibilisierung für Chancen und Herausforderungen im Lebensmittelsektor führen und damit die Implementierung in den urbanen Raum unterstützen.

Das vorliegende Forschungsprojekt legt offen, dass eine starke Reduktion der benötigten Landfläche für die Lebensmittelproduktion zu erwarten ist. Allerdings gilt es auch zu betonen, dass es in Abhängigkeit von Produktionsmethoden und den gewählten Kulturpflanzen zu einem hohen Energiebedarf in der Produktion kommen kann, insbesondere durch den Stromverbrauch für die Zurverfügungstellung von Kunstlicht.

Der Neubau einer vertikalen Farm benötigt viel graue Energie. Der wesentliche Teil dafür ist für die großen Glasflächen aufzubringen. Bezüglich Gebäudehülle werden aufbauend auf dieses Forschungsprojekt weitere Untersuchungen empfohlen. Alternative Materialien zu Glas, wie etwa ETFE oder Acrylglas, sowie das Verhältnis zwischen transparenter und opaker Gebäudehülle sind wesentliche Einflussfaktoren auf den operativen Energieverbrauch.

Die hohen Investitionskosten fordern längerfristig ausgelegte Geschäftsmodelle. Gespräche, welche im Rahmen des Forschungsprojekts mit produzierenden und politischen Akteuren in der Lebensmittelproduktion geführt wurden, legten einmal mehr den großen Preis- und Kostendruck in der landwirtschaftlichen Produktion offen.

Zwei Chancen für erfolgreiche Geschäftsmodelle können hier hervorgehoben werden:

1. die Erweiterung des Raumprogramms über das Produktionsvolumen hinaus, beispielsweise über Verkaufsflächen wie Geschäfte oder Marktplätze, Gastronomie und Ausstellungs- oder Veranstaltungsräume und

2. die Auslegung der Vertikalen Farm als multidisziplinäres Forschungsobjekt zur Generierung von Erfahrungswerten, als Testobjekt für neue Technologien bzw. für den Anbau seltener Sorten etc.

### 3 Schlussfolgerungen

Das Projektziel des Sondierungsprojektes wurde erreicht. Es konnten wesentliche Grundlagen für die Vorbereitung der Entwicklung einer prototypischen Vertikalen Farm in Österreich erarbeitet werden. Von wesentlicher Bedeutung war die Erarbeitung energetischer Potentiale durch das Erstellen eines ganzjährigen Kulturpflanzenkatalogs, welcher auf äußere klimatische Bedingungen abgestimmt wurde, um den Energiebedarf zu senken.

Es liegen ein Funktions- und Raumprogramm sowie ein konzeptueller Vorentwurf vor, der als Grundlage für einen aufbauenden Planungsprozess und eine Erhöhung des Detaillierungsgrades dient. Basierend auf den tatsächlichen Energieverbrauch und Erkenntnissen pflanzenphysiologischer Bedürfnisse konnte ein Gebäudetechnikkonzept erarbeitet werden. Die Zusammenarbeit des Konsortiums erreichte letztlich auch die Entwicklung einer konzeptuellen Systemarchitektur für ein Automatisierungssystem.

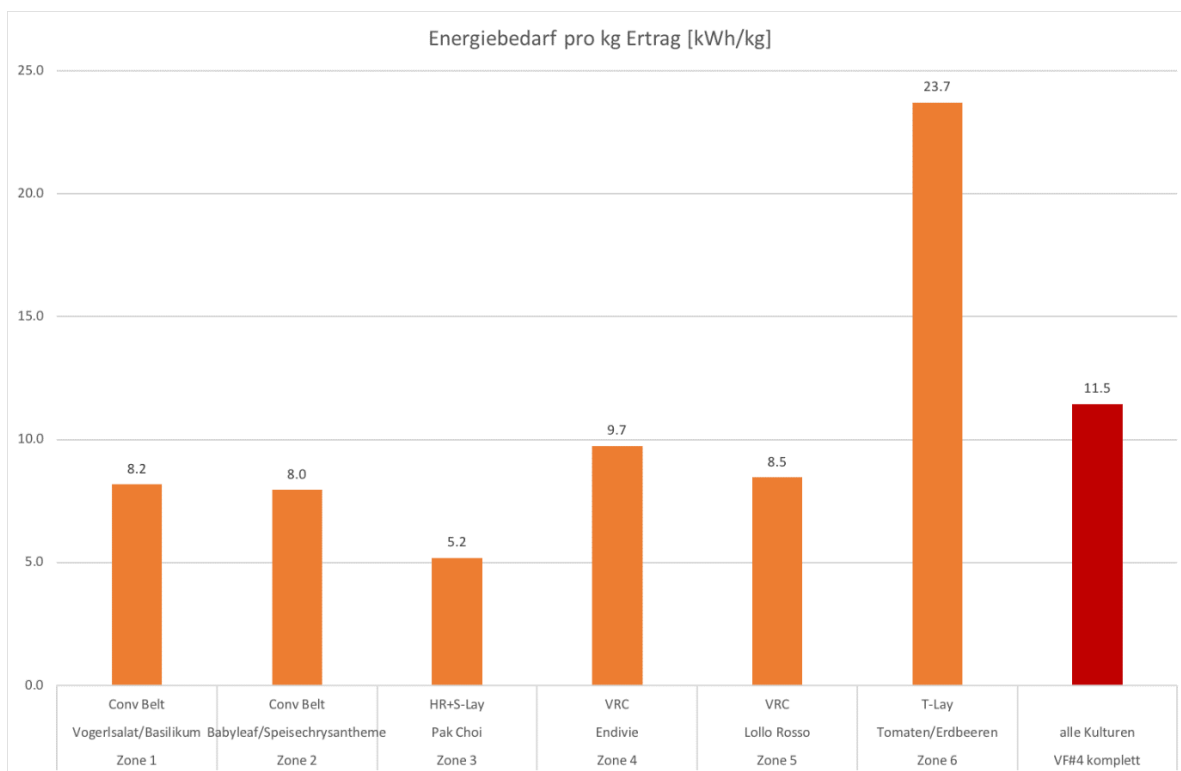


Abbildung 56 - Energiebedarf pro kg Ertrag

Erkenntnisse bezüglich Ressourcenverbrauch und der tatsächlichen Gesamtenergiebilanz einer Vertikalen Farm zeigen, dass es bezogen auf vorangegangene Studien<sup>31</sup> starke Einsparungsmöglichkeiten gibt, insbesondere beim Stromverbrauch für die Bereitstellung von künstlichem Licht. Es zeigen sich auch die Grenzen durch begrenzte variable Parameter hinsichtlich der Erfassung komplexer Prozesse bei der Abbildung von Wachstumsbedingungen

<sup>31</sup> Podmirseg, D. 2016. up! Contribution of Vertical Farms to increase the overall Energy Efficiency of Cities. Dissertation, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-7369-9305-1



und pflanzenphysiologischer Parameter (im speziellen Wasseraufnahme, Wasserbedarf und Evapotranspiration).

Bezüglich der Reduktion des Landverbrauchs bestätigen sich Zahlen vorangegangener Studien und Untersuchungen. Demnach erzielt die VF#4 auf seinen 786,24 m<sup>2</sup> denselben Ertrag wie in der konventionellen Landwirtschaft auf ca. 36 ha, also um das Verhältnis 1/45.

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts erhöhen das Verständnis über eine neue Gebäudetypologie und legen einerseits deren Planungskomplexität und andererseits deren Chancen und Herausforderungen hinsichtlich der Implementierung in das urbane Umfeld dar. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen kann stark reduziert festgehalten werden, dass eine drastische Reduktion des Landverbrauchs einem hohen Energieverbrauch (Abbildung 56) in der Lebensmittelproduktion gegenübersteht.

*Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?*

Das Ergebnis des Forschungsprojekts, insbesondere die Darstellung der Komplexität der Abbildung von Wachstumsbedingungen mit der Simulationssoftware, bildet ein starkes Fundament für darauf aufbauende Forschungsprojekte, welche zum Ziel haben müssen, weitere Potentiale zur Reduktion des Energieverbrauchs zu finden.

Die Grundlagen bieten eine solide Basis für die Integration in die Lehre, beispielsweise für Entwurfsaufgaben im Architekturbereich oder für die Lehre im Kulturpflanzenanbau.

Das Forschungskonsortium beabsichtigt, über ein kooperatives F&E-Projekt mit weiteren Forschungspartnern und der Industrie Prototypen für die Weiterentwicklung der Ergebnisse voranzubringen.

*Für welche Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?*

Die erarbeiteten Grundlagen, insbesondere die dreidimensionale Darstellung einer Vertikalen Farm, sind für weitere Gespräche mit Stakeholdern von großer Bedeutung, um auf ökonomischer und politischer Ebene Chancen und Herausforderungen bei der Implementierung neuer Gebäudetypologien zu diskutieren. Weiters bildet der Planstand die Möglichkeit, verstärkt Untersuchungen zu unternehmen, welche die Gebäudehülle betreffen.

Auf stadtplanerischer Ebene sind die vorliegenden Ergebnisse relevant für weiterführende Gespräche mit dem Ziel, eine Vertikale Farm im Stadtentwicklungsgebiet Seestadt Aspern aufzunehmen.

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten:

Die Ergebnisse legen Chancen und Potentiale für einen Kulturpflanzenkatalog im Anbau im Vertical Farming-Prinzip offen. Energetische Antworten wurden gegeben. Der Ressourcenaufwand, insbesondere Primärenergie, Wasser und Landverbrauch wurde dargestellt. Ertragsschätzungen sowie stadtplanerische Potentiale können als solide Grundlage eingestuft werden, um darüber hinaus über Investitionskosten, Produktionsprozesse, insbesondere Personalaufwand zu einem Geschäftsmodell zu gelangen.

Weiters müssen aufbauend auf die untersuchten Lebensmittelprodukte Grundlagen über Nährstoffbedarf und Substrate erarbeitet werden.

Eine Intensivierung mit Stadtplanung zur Entwicklung und Implementierung einer vertikalen Farm (auch als Mischnutzung mit Zusatzfunktionen wie Markt, Wohnen, Arbeiten etc.) auf einem spezifischen Bauplatz wird empfohlen.

Steuerungs- und Regelungstechnik, IOT sowie Automatisierung bzw. Robotisierung müssen untersucht und entwickelt werden.

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts erhöhen das Verständnis über die Komplexität des Lebensmittelanbaus in vertikalisierten Gewächshäusern im urbanen Umfeld. Weitere Forschungsarbeiten werden empfohlen – mit der Erweiterung des Konsortiums durch Partner aus der Industrie, wie etwa Gewächshausproduzenten und Fassadenhersteller.

Das vorliegende Forschungsprojekt und dessen Ergebnisse bieten Grundlagen für Forschung und Lehre an den Instituten der KonsortialpartnerInnen. Weiters bieten die Ergebnisse und offenen Fragen die Gelegenheit, Forschungsfragen für Dissertationen, beispielsweise im Bereich Architektur, Technische Wissenschaften, Pflanzenphysiologie, Informatik abzuleiten.

Also große Herausforderung werden die zu erwartenden hohen Investitionskosten gesehen. Wie jedoch aus Gesprächen mit Stakeholdern während des Forschungsprozesses ersichtlich wurde, werden realistische Potentiale für die Implementierung des neuen Gebäudetyps beispielsweise bei der Aufwertung von Bauplätzen bzw. Stadtteilen abgeleitet. Um ein Beispiel zu nennen, können vertikale Farmen zwischen Infrastrukturflächen und Wohnbauzonen als Sicht- und Schallschutz fungieren. Weiters können über PPP-Modelle vertikale Farmen als Forschungseinrichtungen und als Produktionsstätten konzipiert werden sowie programmatisch erweitert mit Gastronomie, Veranstaltungs- und Ausstellungsräumen und Gewerbe. Diese Überlegungen können neue Marktfelder erschließen.

Als große Chance für die Steigerung der Resilienz der Stadt der Zukunft wird die Typologie der vertikalen Farm dennoch gesehen. Die Konzeption des Gebäudes, welches im Raumprogramm nach Möglichkeit die gesamte Wertschöpfungskette abbildet, hat wesentliche positive Externalitäten aufzuweisen. Als beträchtlich ist hier einerseits die drastische Reduktion von Landfläche beim selben Ertrag verglichen mit der konventionellen Landwirtschaft hervorzuheben.

Weiters garantiert die Produktion vor Ort frische Produkte über das gesamte Jahr, kurze Transportwege und die Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

Das Forschungskonsortium beabsichtigt in Schritt 2 über ein kooperatives F&E-Projekt mit Partnern aus anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie dieses Projekt weiter zu entwickeln.

Empfohlene weiterführende Forschungsarbeiten als Schlagwörter: *Food on demand*, Robotik, Industrie 4.0, Lebensmittelhygiene und -recht, erweiterte Produktionspalette für vertikale Farmen (Fisch-, Pilz- und Insektenproduktion). Smart Grid: Durch die prototypische Umsetzung einer vertikalen Farm könnte man das Flexibilitätspotential (i.e. Integration der Farm als Prosumer in das Smart Grid) testen und die Simulationen verifizieren. Steuerung einer Vertikalen Farm: Wie steuert man eine Vielzahl von Farmen am besten (Cloudlösung) auch hinsichtlich Übermittlung von Alarmen / Informationen bzgl. Verhalten der Farm, Ertragsoptimierung durch Optimierung der Farmparameter (Wasser / Temperatur / Licht), Einsatzplanung der Mitarbeiter (Ernte / Pflege) bei mehreren Farmen sowie Aggregierter Verkauf bestimmter Produkte über mehrere Farmen.

## 5 Verzeichnisse

### 5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Simulationsmodell mit Zone 2 als Basis für die Untersuchungen .....	22
Abbildung 2 - Simulationsmodell mit allen Gewächshauszonen 1-6 .....	23
Abbildung 3 - schematische Darstellung mit den nummerierten Anbauzonen der VF#4 .....	23
Abbildung 4 - Gebäudehülle: Transparente Flächen.....	24
Abbildung 5 - Verglasung Gewächshäuser.....	25
Abbildung 6 - Verglasung Innenscheiben zwischen den Gewächshäusern.....	25
Abbildung 7 - Darstellung der opaken Gebäudekonstruktionen im 3D Modell.....	26
Abbildung 8 - Lichtparameter der Zone 2 (1.004 m <sup>2</sup> Anbaufläche).....	26
Abbildung 9 - Position des Tageslichtsensors der Zone 2.....	27
Abbildung 10 - Ermittlung der Position des Lichtsensors durch Simulationsvarianten.....	27
Abbildung 11 - Regelverhalten der Lichtregelung (SumControl) .....	28
Abbildung 12 - Regelung SumControl.....	28
Abbildung 13 - Eingabe der Parameter Verdunstung des Wassers in der Zone 2.....	29
Abbildung 14 - Tagesprofil Verdunstung.....	29
Abbildung 15 - Eingabeparameter der Konvektorheizung pro Zone.....	30
Abbildung 16 - Schema des Lüftungsgeräts .....	31
Abbildung 17 - Zulufttemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur .....	31
Abbildung 18 - Ermittlung des Luftwechsels beim Öffnen der Süd- und Nord- sowie nur der Süd- Fassade .....	32
Abbildung 19 -Temperatur in der Zone in Abhängigkeit der prozentuellen Fensteröffnung .....	33
Abbildung 20 - Regelungsschemata der Fensteröffnung .....	33
Abbildung 21 - VF#4 mit Randbebauung in der Seestadt Aspern .....	36
Abbildung 22 - Bauplatz für die VF#4 in der Seestadt Aspern.....	37
Abbildung 23 - Typologische Lösungen .....	38
Abbildung 24 - Rendering VF#4.....	40
Abbildung 25 - Kulturpflanzen und Zonen der VF#4 .....	45
Abbildung 26 - Systemarchitektur Vertikale Farm Automatisierung.....	52
Abbildung 27 - VF-Gateway Architektur.....	53
Abbildung 28 - Sensor Prototyp.....	54
Abbildung 29 - Testaufbau.....	55
Abbildung 30 - Übersicht über die verschiedenen Gewinne und Verluste an Wärme (eigene Darstellung von Siemens AG).....	56
Abbildung 31 - Leistungsaufnahme VF PGes, Bei Kultivierung einer Chili-Pflanze (Zeitraum 16.04 bis 23.04).....	58
Abbildung 32 - Leistungsaufnahme PGes, Bei Kultivierung des gewöhnlichen Feldsalats (Zeitraum 16.04 bis 23.04).....	58
Abbildung 33 - Verlauf regenerativer Energieerzeuger in Österreich am 20.07.2017.....	58

Abbildung 34 - Stündlicher Temperaturverlauf (bei Kultivierung einer Chili-Pflanze) unter Demand Response Abruf (20.07.2015).....	59
Abbildung 35 - Stündlicher Temperaturverlauf, ( bei Kultivierung von Feldsalat) unter Demand Response Abruf (20.07.2015).....	59
Abbildung 36 - Stündlicher Leistungsverlauf (bei Kultivierung einer Chili-Pflanze) unter Demand Response Abruf (20.07.2015).....	59
Abbildung 37 - Stündlicher Leistungsverlauf ( bei Kultivierung von Feldsalat) unter Demand Response Abruf (20.07.2015).....	59
Abbildung 38 - Simulationsvarianten.....	62
Abbildung 39 - BlackBox Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a (Var 1) .....	63
Abbildung 40 - Blackbox Zone 2 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a (Var 2) .....	63
Abbildung 41 - VF#4 Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2).....	64
Abbildung 42 - VF#4 Zone 2 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 2).....	65
Abbildung 43 - VF#4 Zone 2 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3).....	66
Abbildung 44 - Zone 2 VF#4 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 3) .....	66
Abbildung 45 - VF#4 Zone 6 - VF#4 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4).....	67
Abbildung 46 - VF#4 Zone 6 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung (Var. 4).....	68
Abbildung 47 - VF#4 Zone 6 – monatlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5).....	68
Abbildung 48 - VF#4 Zone 6 – jährlicher Primärenergiebedarf pro Anbaufläche in kWh/m <sup>2</sup> a, ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung (Var. 5) .....	69
Abbildung 49 - Jährliche Primärenergie pro Anbaufläche .....	70
Abbildung 50 - Jährliche Primärenergie bezogen auf die Anbaufläche .....	71
Abbildung 51 - Gesamtenergiebedarf VF#4 mit Kühlung, ohne natürliche Lüftung .....	72
Abbildung 52 - Gesamtenergiebedarf VF#4 ohne Kühlung, mit natürlicher Lüftung .....	72
Abbildung 53 - Gesamtenergiebedarf VF#4 – Gegenüberstellung der Varianten.....	73
Abbildung 54 - Energie- und Wasserverbrauch von High-Tech-Gewächshäusern.....	75
Abbildung 55 - LCA assessment results .....	76
Abbildung 56 - Energiebedarf pro kg Ertrag.....	80

## 5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Auslegungsbedingungen am Standort – Auszug IDA ICE basierend auf den beschriebenen Wetterdaten (ASHRAE IWE2 Weather File for WIEN-SCHWECHAT-FLUG. (c) 2011) .....	21
Tabelle 2 - tabellarische Darstellung der Anbauzonen der VF#4 .....	23
Tabelle 3 - Verglasungen VF#4 (gelbe markierte Scheiben wurden verwendet) .....	24
Tabelle 4 - Aufbauten der opaken Gebäudekonstruktion .....	25
Tabelle 5 - Übersicht TGA und Schächte.....	35
Tabelle 6 - Auswahl geeigneter Pflanzenarten, Zuweisung Produktionsmethoden und Kulturfolge .....	46
Tabelle 7 - Ertrag VF#4 .....	46
Tabelle 8 - Wasserbedarfsermittlung .....	47
Tabelle 9 - Getestete Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wasserfüllstand.....	55
Tabelle 10 - Sollwerte für die Simulation der Wachstumsbedingungen.....	60
Tabelle 11 - Kulturfolge und Sollwerte für die Simulation der Wachstumsbedingungen .....	61
Tabelle 12 - Berechnung der grauen Energie .....	77

### 5.3 Literaturverzeichnis

Bachche S.: Deliberation on design strategies of automatic harvesting systems: A survey. Robotics 4.2 194-222, Tohoku University, 2015.

Bhatt V., L.M. Farah: Urban Design for Food-Security: Thinking Globally Designing Locally, 2010

Birkby J.: Vertical Farming. ATTRA Sustainable Agriculture. NCAT Ed. Mumma Tracy; [www.attra.ncat.org](http://www.attra.ncat.org), 2016

Bisgrove R.: Urban Horticulture: Future Scenarios. Proc. XXVIIIth ICH ib Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation. Ed. N. Castilla. Acta Hort. 927 79-84 und 33-46, ISHS 2012

Buchholz M., P. Jochum: Concept for Water, Heat and Food Supply from a Closed Greenhouse – the Watergy project. Proc. IC on Greensys. 509-515. Eds.: G. van Straaten et al. Acta Hort 691, ISHS, 2005

Castilla N.: Irrigation and Fertilization (book chapter) in: Greenhouse Technology and Management 2nd ed., 2013

Chiancone I., A. Bacco, M. Stipic, V. Caponigro, F. Piro and A. Venezia (2010): Easy Home Hydroponic Production of Leafy Greens. Proc. IIInd Int'l Conference on Landscape and Urban Hort. 151-155. Eds: Prosdociemie Gianquinto and F. Orsine. Acta Hort. 881, ISHS, 2010

Cicekli M., N. T. Barlas: Transformation of Today Greenhouses into High Technology Vertical Farming Systems for Metropolitan Regions. Journal of Environmental Protection and Ecology 15, No 4, 1779-1785. <https://www.researchgate.net/publication/290052266>, 2014

Despommier D., E. Ellingson: The Vertical Farm: The sky-scraper as a vehicle for a sustainable urban agriculture. CTBUH 8th World Congress, 2008  
<https://www.researchgate.net/publication/241325575>

Diwold Konrad et al.: Erhebung des Potentials einer vertikalen Farm als verschiebbare Last in einem Smart Grid. Interner Projektbericht Vertikal Farm, 2018

Dueck T. A., et al.: Growth of tomatoes under hybrid LED and HPS lighting." International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management Greensys 2011 952, 2011

Dielmann J.A., E. Meinen, L.F.M. Marcelis: Optimisation of CO2 and Temperature in Terms of Crop Growth and Energy Use. Proc. IC on Greensys. Pp 149-154. Eds.: G. van Straaten et al. Acta Hort 691, ISHS, 2005

Ellingsen Eric C., Despommier D.: The vertical farm – the origin of a 21st century architectural typology. CTBUH Journal 3 26-34, 2008

- Eppel J., Vertikales Grün – Zukunft oder Luftnummer? Gartenpraxis 06 44-51, 2016
- Giacomelli Gene, et al.: Innovation in greenhouse engineering. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management Greensys 2007 801, 2007
- Gaicomelli G.A., S. Sase, R. Cramer, J. Hoogbeem, A.MacKenzie, K. Parbst, G. Scarascia-Mugnozza, P. Selina, D.A. Sharp, J.O. Voogt, P.A. vanWeel and D. Mears: Greenhouse Production Systems for People. Proc. XXVIIIth ICH ib Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation. Ed. N. Castilla. Acta Hort. 927 23-37, ISHS, 2012
- Goyal Nandini Kant: Hydrobase: An IoT Gardening Application. San Jose State University, 2016.
- Graves Chris J.: The nutrient film technique. Horticultural Reviews Volume 5 1-44, 1983
- Harper Caleb, Siller Mario: OpenAG: a globally distributed network of food computing. IEEE Pervasive Computing 14.4 24-27, 2015
- Hayashi S., K. Ganno, Y. Ishii: Machine vision algorithm of eggplant recognition for robotic harvesting. Journal of Society of High Technology in Agriculture 12.1 38-46, Taketoyo, 2000
- van Henten E.: Greenhouse mechanization: State of the art and future perspective. Acta Horticulturae 2006.710 55-69, 2006
- T. Hubick Kerry, R. Drakeford David, M. Reid. David: A comparison of two techniques for growing minimally water-stressed plants. Canadian Journal of Botany 60.3 219-223, 1982
- Bin Ismail, Ikhwan Hanif Muhammad, M. Thamrin Norashikin: IoT implementation for indoor vertical farming watering system. Electronics and System Engineering (ICEESE), 2017 International Conference on IEEE, 2017
- Jansen G., Nazli Cila, Marije Kanis, Yanti Slaats, Attitudes Towards Vertical Farming at Home: A User Study. CHI'16 Extended Abstracts. <http://dx.doi.org/10.1145/285181.2892474>, 2016
- Joch T. (k.A.): Nachhaltige Energieversorgung. Hausarbeit zur Erreichung des Gartenbaumeister'. 89 Seiten. Unveröffentlicht.
- Kalantari Fatemeh, et al.: A Review of Vertical Farming Technology: A Guide for Implementation of Building Integrated Agriculture in Cities. Advanced Engineering Forum. Vol. 24. Trans Tech Publications, 2017
- Kozai Toyoki et al.: LED Lighting for Urban Agriculture. Springer 309-315, Singapore, 2016
- Libelium and Beecham Research: Enabling the Smart Agriculture Revolution: The Future of Farming through the Internet of Things Perspective. Whitepaper, 2016
- Liu Xiang: Design of a Modified Shipping Container as Modular Unit for the Minimally Structured & Modular Vertical Farm (MSM-VF). University of Arizona, 2014



Marcelis L. F. M., et al.: The adaptive greenhouse-an integrated systems approach to developing protected cultivation systems. III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation 718, 2006

Nichols M.: High value vegetable production using soilless culture. SEAVEG2012 Regional Symposium, 24-26 January 2012

Nichols M. A.: Plant factories. SEAVEG2012 Regional Symposium, 24-26 January 2012

Orsini F., M. Dubbeling and G. Gianquinto (2015): Multifunctiona rooftop horticulture: a promising strategy for intensifying horticulture production in cities. *Chronica Horticulturae* Vol. 55 No 4 13-17, 2011

Pekkeriet E.J., E.J. van Henten: Current Developments of High-Tech Robotic and Mechatronic Systems in Horticulture and Challenges for the Future. Proc. IS on High Technology for Greenhouse Systems – GreenSys2009. 85-94. Ed. M. Dorais *Acta Hort.* 893, ISHS, 2011

Podmirseg D.: Contribution of Vertical Farms to increase the overall Energy Efficiency of Cities, Cuviller Verlag, 2016

Singh Devesh, et al.: LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 139-147, 2015.

Schnitzler W.H.: Urban Hydroponics for Green and Clean Cities and for Food Security. Proc. IS on Soilless Cultivation 13-26, Eds.: Weimin Zhu and Qianheng LI, *Acta Hort.* 1004, ISHS, 2013

Tantau J., J. Meyer, U. Schmidt, B. Bessler: Low Energy Greenhouse – a System Approach. Proc. IS on High Technology for Greenhouse Systems – GreenSys2009. 75-84. Ed. M. Dorais *Acta Hort.* 893, ISHS, 2011

Toyoki Kozai: Plant Factory in Japan – Current Situation and Perspectives. *Chronica Horticulturae* Vol. 53 No 2 8-11 ISHS, 2013

Vasisht Deepak, et al.: FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture. NSDI'17 Proceedings of the 14th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation, Boston MA, 2017

Vermeulen Kristof, et al.: Simultaneous response of stem diameter, sap flow rate and leaf temperature of tomato plants to drought stress. International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management Greensys2007 801, 2007

Wouter Bac Cornelis: Improving obstacle awareness for robotic harvesting of sweet-pepper. Wageningen University, 2015

Wolf L. K.: Metro nature for mental health and wellness: horticulture secondary benefits. *Chronica Horticulturae* Vol. 55 No 4 5-11, 2015

Zeidler Conrad, Schubert Daniel, Vrakking Vincent: Vertical Farm 2.0: Designing an Economically Feasible Vertical Farm-A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture. Diss. Association for Vertical Farming, 2017

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)