

Teil I: Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung:

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben *OfficeFarming – Gartenbau in städtischen Büroräumen (OF2021)* hatte das Ziel, eine büorraumtaugliche, nutzerorientierte Kultivierungsstrategie von essbaren Pflanzen zu entwickeln sowie strategische Partnerschaften mit lokalen Gartenbaubetrieben zu identifizieren. Als zentrales Element des OfficeFarming Konzeptes waren vertikale Office Farm Module (OFM) vorgesehen. Damit wurde die Entwicklung einer innovativer technischer Lösung angestrebt, die baukonstruktiv von der Gebäudestruktur entkoppelt ist und in jede Büroraumkonfiguration integriert werden kann. Weiterhin sah das Konzept vor, dass die dezentral organisierten, vernetzten, offen gestalteten, vertikalen OFM zu Office Farmen zusammengeschlossen und durch einen intelligenten Algorithmus gesteuert werden.

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt knüpfte an einen umfassenden wissenschaftlichen und technischen Stand an, der durch die Expertise und Vorarbeiten der beteiligten Partner etabliert wurde.

Die Professur für Green Technologies in Landscape Architecture und der Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik an der Technischen Universität München (TUM) haben ihre Know-how Schwerpunkte in jeweils der Nutzung biologischer Prozesse zur Entwicklung innovativer technischer Lösungen und in den Bereichen Smart Grids und datenbasiertes Pflanzenmanagement aufgebaut.

Die Mediabiöse GmbH ist ein innovatives Unternehmen, das sich durch seine Expertise in der Entwicklung multifunktionaler Produkte und wegweisender Beleuchtungslösungen auszeichnet. In ihrer Dissertation hat Dr. Mariana Yordanova, Geschäftsführerin und wesentliche Know-how-Trägerin des Unternehmens, umfassende Themen wie Gewächshausbeleuchtung, Beleuchtung für Vertical Farming sowie die Synergieeffekte zwischen ästhetischer Beleuchtung und Vertical Farming untersucht.

Das Ingenieurbüro Armin Pelka verfügt über umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung von IoT-Sensoren und komplexen Steuerungen, die Sensordaten für Regelalgorithmen und Alarmer nutzen. Die Produkte ermöglichen sowohl die Visualisierung von Betriebszuständen als auch Optimierungen durch Datenanalysen.

Die Professur für Green Technologies in Landscape Architecture, die Mediabiöse GmbH und das Ingenieurbüro Armin Pelka konnten durch ihre Vorarbeiten an einem themenverwandten Projekt zur Entwicklung einer Fassadenlösung für Pflanzenanzucht und ästhetische Beleuchtung sowie durch umfangreiche Testreihen im Gewächshauslaborzentrum Dürnast

fundierte Erkenntnisse über Indoor-Farming und Pflanzenkultivierung in klimatisierten Räumen gewinnen, die im aktuellen Projekt OF2021 erfolgreich eingesetzt werden konnten.

Der wissenschaftliche Hintergrund der Partner wurde durch zahlreiche Publikationen und Auszeichnungen untermauert. Auf dieser Grundlage wurde ein breites Spektrum an Know-how abgedeckt, das sowohl die wissenschaftliche Fundierung als auch die technologische Umsetzbarkeit der Projektziele sicherstellen konnte.

Ablauf des Vorhabens

In dem FuE-Vorhaben wurde eine agile Produktentwicklung angewendet. Dabei erfolgte die Bearbeitung der Entwicklungsprozesse in aufeinander aufbauenden Zyklen unter Berücksichtigung des Feedbacks von Testpersonen sowie laufender Erfahrungswerte (TUM, Mediabiose, IB APelka).

Durch eine strategische Priorisierung der wichtigsten Aufgaben – insbesondere solche mit Bezug zum Nutzerfeedback – sowie die Entwicklung modularer Komponenten und iterative Anpassungen, konnten die Ziele im Arbeitsplan erfolgreich erreicht werden.

Es wurden in iterativen, aufeinander aufbauenden Entwicklungszyklen die wesentlichen Anforderungen an ein OFM zur Integration in bestehende Gebäude (Mediabiose), die technischen und steuerungsrelevanten Merkmale eines OFM (IB APelka) definiert und relevante Pflanzenparameter untersucht (TUM). Zudem wurden die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten mechatronischen und elektronischen Komponenten spezifiziert (IB APelka). Auf dieser Grundlage wurde ein Katalog mit für das OFM geeigneten Pflanzen erstellt (TUM), der anschließend durch eine Befragung (TUM, Mediabiose) validiert wurde. Die Umfrage (TUM, Mediabiose) lieferte Entscheidungskriterien für eine engere Auswahl an Pflanzenarten und für eine Priorisierung von Systemfunktionalitäten. Die entscheidende Rahmenparameter wurden erfolgreich festgelegt und die relevanten Pflanzenarten selektiert.

Aufbauend darauf wurden steuerungsrelevante Szenarien für Büroräume (Mediabiose, IB APelka) sowie die Pflanzenkapazität des OFM (TUM) definiert. Die Steuerungsstrategien für Beleuchtung und Nährstoffversorgung wurden entwickelt (Mediabiose, TUM), implementiert (IB APelka) und durch Versuche (Mediabiose, TUM, IB Pelka) validiert. Die technischen Komponenten und Bestückungsmodalität wurden erfolgreich spezifiziert. Es wurden der Algorithmus und die Software entwickelt, überarbeitet und getestet (IB APelka).

Die wesentlichen technischen Eigenschaften des Produkts wurden anhand von Mustern getestet und validiert (Mediabiose, TUM, IB APelka). Diese konnten Testnutzern anhand von ausgewählten Pflanzen präsentiert werden. Durch eine qualitative Umfrage wurden die Funktionalitäten der Hardware und der Software der OFM (Mediabiose, IB Pelka) validiert und die endgültige Pflanzenselektion abgeschlossen (TUM).

Die Entwicklung, Testung und Interaktion mit Testnutzern führten zu einem innovativen Ansatz, der auf einer modularen, lokal umsetzbaren Implementierung der Anzucht von Jungpflanzen basiert. Um diesen fortschrittlichen Ansatz zu realisieren, wurden Bearbeitungen iterativ vorgenommen und erfolgreich in den Labormustern (Mediabiose, TUM, IB APelka) umgesetzt.



Die daraus entstandene neue Funktionalität eröffnete die Möglichkeit, den Kreis potenzieller strategischer Partner aus der Indoor-Begrünungsbranche erheblich zu erweitern. Damit wurde ein zentrales Projektziel erreicht: eine zukunftsweisende Perspektive für die Gartenbaubranche zu schaffen und durch die vielversprechende Grundlage einer Win-Win-Kooperation langfristige Chancen zu eröffnen.

Wesentliche Ergebnisse

Innerhalb des Projektes OF2021 konnte erfolgreich eine büroraumtaugliche, nutzerorientierte Kultivierungsstrategie für essbare Pflanzen entwickelt und durch die Entwicklung spezifischer OFM realisiert werden.

Die OFM wurden gezielt so gestaltet, dass sie unabhängig von der Gebäudestruktur baukonstruktiv entkoppelt eingesetzt und flexibel in jede Büroraumkonfiguration integriert werden können (Mediabiose). Durch ein ansprechendes, auf den Bürogrundriss abgestimmtes Design fügen sich die Module nahtlos in die jeweilige Arbeitsumgebung ein (Mediabiose). In diesen speziell entwickelten OFM wachsen auf mehreren Ebenen Salate, Kräuter und Microgreens, wodurch die vertikale Flächennutzung optimal ausgenutzt wird (TUM). Energieautarke Sensoren erfassen relevante klimatische Raumparameter und reagieren auf Basis einer codierten Steuerung, die aus Erfahrungswerten, Testergebnissen, Systemparametern, Raumbedingungen und Vitalitätszuständen der Pflanzen abgeleitet wurde (IB APelka). Ein intelligenter Algorithmus im Hintergrund sorgt anschließend für optimale Lebensbedingungen, um das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen bestmöglich zu unterstützen (IB APelka).

Hervorzuheben ist die Fähigkeit des Systems, den gesamten Lebenszyklus der Pflanzen lokal und direkt vor Ort im jeweiligen Büroraum zu ermöglichen – von der Aussaat über das Wachstum bis hin zur Ernte (TUM, Mediabiose, IB APelka).

Die OFM stellen eine in sich funktionell geschlossene, autarke Struktur dar, die sich dem Anwender offen präsentiert, keine Hülle und somit keine Barriere zwischen den Menschen und den Pflanzen aufweist – sowohl physischer als auch psychologischer Art. Das innovative Konzept fördert nicht nur die Frische und Qualität der Pflanzen, sondern stärkt auch die Verbindung der Nutzer zur Natur und schafft ein nachhaltiges, gesundheitsförderndes Arbeitsumfeld.

Die kontinuierliche Überarbeitung des Designs und die Berücksichtigung von Nutzerfeedback führten zu gezielten Anpassungen der OFM-Komponenten (TUM, Mediabiose) und der Ansteuerung (IB APelka), die zu einer wesentlichen Steigerung der Verwertungsmöglichkeiten geführt und den Kreis möglicher strategischen Partnerschaften auf Unternehmen aus dem Bereich der Innenraumbegrünung ausgedehnt haben.



Teil II: Eingehende Darstellung

Hinweise zum Bericht

Der Bericht Teil II wurde als Projektverbund – Mediabiöse, TUM, IB APelka - gemeinsam vorbereitet und verfasst. Durch gezielte Hinweise sind die Aufgaben und Arbeiten gekennzeichnet, die der jeweilige Partner durchgeführt hat.

Zusammenfassung

Unser Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zielte auf die Entwicklung einer bürotauglichen, nutzerorientierten Kultivierungsstrategie für essbare Pflanzen ab, die durch vertikale Office-Farming-Modulen (OFM) realisiert wird. Die Module wurden als autarke, von der Gebäudestruktur entkoppelte und in jede Büroraumkonfiguration integrierbare Lösung konzipiert.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts wurde die Methode der agilen Produktentwicklung konsequent angewendet, um eine flexible, iterative und nutzerzentrierte Gestaltung des Entwicklungsprozesses zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise basierte auf der Durchführung zyklischer Prozesse, die durch kontinuierliche Evaluation und iterative Verbesserungen geprägt waren.

Die kontinuierliche Überarbeitung des Designs und die Berücksichtigung von Nutzerfeedback führten zu gezielten Anpassungen der OFM-Komponenten. So wurden beispielsweise statische Konstruktionen überarbeitet, was die Führung der Bewässerung beeinflusste. Gleichzeitig veränderte die Anpassung der Haptik der Pflanzentnahme die Formgebung der Rinneneinheiten. Erkenntnisse aus Pflanzenversuchen deckten Herausforderungen wie Algenbildung auf, was zu Änderungen in Materialwahl und optischer Gestaltung führte.

Die spezifischen Designanpassungen an dem OFM haben zu einer wesentlichen Steigerung der Verwertungsmöglichkeiten geführt und den Kreis möglicher strategischen Partnerschaften auf Unternehmen aus dem Bereich der Innenraumbegrünung ausgedehnt. Dadurch können nun neben spezialisierten Anzuchtbetrieben auch klassische Dienstleister der Büropflanzenpflege als Kooperationspartner einbezogen werden.

1. Flexibilität und Nutzerorientierung: Office-Farming-Module als anpassungsfähige Lösung für moderne Arbeitswelten

Die OFMs wurden als wesentlicher Bestandteil zukünftiger Arbeitsplätze konzipiert, die sowohl ökologische als auch ästhetische Anforderungen erfüllen und dazu beitragen können, Bürostandorte zu schaffen, die eine produktivere und angenehmere Arbeitsumgebung bieten.

Die Integration von OFM in moderne Büroumgebungen und -konzepte wurde umfassend untersucht, um deren funktionale, ästhetische und praktische Vorteile zu maximieren (Mediabiöse). Im Fokus stand die Flexibilität der Module, die in verschiedenen Bürotypologien und Grundrissen integriert werden sollten. Dabei wurden Möblierungskonzepte analysiert, um die Anforderungen präzise zu definieren. Zentrale Aspekte der Analyse waren die Untersuchung des Flächenpotenzials und die Modellierung der Bürolandschaft.

Es wurden die Auswirkungen der Positionierung der OFM auf den laufenden Bürobetrieb sowie mögliche Einsatzszenarien wie die Verwendung der Module als akustische Trennelemente oder in Mittelzonen von Büros untersucht.

Dazu wurden Bürotypen wie Kombibüros, offene Teamzonen oder Großraumbüros definiert und mit spezifischen Attributen wie Möblierung, Raumgestaltung und Nutzungsverhalten verknüpft.

Dabei zeigte sich, dass der Schwerpunkt der Module nicht allein in ihrer Funktionalität liegen, sondern Qualitäten wie Ästhetik und Nachhaltigkeit moderner Arbeitswelten vermitteln soll.

Computergestützte Visualisierungen und reale Labortests belegten die Funktions- und Anpassungsfähigkeit der Module in verschiedenen Büroumgebungen. Parallel fand ein Austausch mit einem Weltmarktführer aus dem Bereich der Büroausstattern statt, um bevorzugte Büroraumkonzepte und die neuen Trends in der Bürogestaltung zu validieren.



Ein Schwerpunkt bei der Entwicklung lag auf einer flexibel einsetzbaren, statisch unabhängigen Konstruktion für die OFM, die an Büromobiliär angebracht werden konnte. Die Module sollten sowohl ein Wohlgefühl vermitteln als auch einen praktischen Nutzen bieten. Dabei wurde, unter anderem in Anlehnung an geführte Gespräche mit dem Büroausstatter, ein

besonderer Wert auf die Verbindung von Nutzerbedürfnissen, modernen Gestaltungstrends wie Biophilie und den Anforderungen an ergonomische, leicht zu reinigende und funktionale Designs gelegt (Mediabiöse, TUM).

Parallel zu den technischen Entwicklungen (IB APelka, Mediabiöse) wurde sehr früh die Interaktion mit Testnutzern gesucht, um praktisches Nutzerfeedback in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen. Diese Zusammenarbeit ermöglichte es, verschiedene Aspekte der Funktionalität, Arbeitsabläufe, Pflanzenarten und deren



Wahrnehmung umfassend zu evaluieren. Das Feedback lieferte wertvolle Erkenntnisse, die gezielt in die Optimierung des Systems einfließen.

Ein wesentlicher Punkt, der dabei identifiziert wurde, betraf den Austauschzyklus der Jungpflanzen und die Logistik im Umgang mit den OFM (TUM, Mediabiöse). Es stellte sich heraus, dass die herkömmlichen Verfahren zur Jungpflanzenproduktion und deren Einsatz in das System eine aufwendige und zeitintensive Logistik erforderten. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde das Design der OFM iterativ entwickelt, um eine integrierte Produktion von Jungpflanzen zu ermöglichen.

Dieser Entwicklungszyklus führte nicht nur zur Steigerung der betrieblichen Effizienz der OFM, sondern hatte auch erhebliche Auswirkungen auf die strategische Ausrichtung zukünftiger Verwertungsstrategien (Mediabiöse).

Die Möglichkeit, Jungpflanzen unmittelbar im OFM zu kultivieren, erweiterte den Kreis potenzieller Service-Partner erheblich. Neben spezialisierten Anzuchtbetrieben wurden nun auch klassische Dienstleistungsunternehmen der Büropflanzenpflege in den Kreis potenzieller Kooperationspartner einbezogen, da durch die geplante Optimierung kein separates Equipment für die Anzucht mehr erforderlich sein sollte.

Um eine integrierte Produktion von Jungpflanzen zu ermöglichen, wurden spezifische Modifikationen durchgeführt, die es erlaubten, Jungpflanzen direkt innerhalb des Systems anzubauen und anschließend in die Pflanzrinnen zu übertragen.

Das Modul- und Rinnendesign wurde an den Pflanzenzyklus und die Wachstumsstadien angepasst, um eine nahtlose Integration von Pflege, Entwicklung und Konsum zu ermöglichen. Dazu gehörte die Entwicklung der statisch unabhängigen Konstruktion des Moduls, um zusätzliche Rinnenzugänge und eine erweiterte Leitungsinfrastruktur zu integrieren, Optimierungen in der Pflanzenbestückung, ein lebenszyklusgerechtes Bewässerungssystem und ein optimierter Steuerungsalgorithmus, der unterschiedliche Kultivierungsgruppen separat hinsichtlich Licht- und Nährstoffanforderungen reguliert (TUM, Mediabiöse, IB APelka).

- Entwicklung des Designs der Anzuchtrinnen



Im Rahmen eines agilen Entwicklungsprozesses wurden Anzuchtrinnen zunächst in Form eines 3D-Modells konzipiert und iterativ weiterentwickelt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Gestaltung der Rinnen, der äußeren Optik, der Praktikabilität der Pflanzenentnahme und des Pflanzenaustauschs sowie auf dem Abstand zur Substratoberfläche (TUM).

In mehreren Iterationen wurde untersucht, wie die Rinnen ästhetisch in den Arbeitskontext (Mediabiiose) integriert werden können, ohne dabei ihre Funktionalität zu beeinträchtigen. Gleichzeitig wurde geprüft, ob die Handhabung – insbesondere die Entnahme und der Austausch der Pflanzen – für die Nutzer intuitiv und effizient gestaltet ist.

Aufbauend auf diesen Entwürfen wurden in den folgenden Iterationen ergonomische Aspekte des Arbeitsplatzes sowie fertigungstechnische Überlegungen schrittweise integriert, um die Funktionalität und Praktikabilität der Rinnen zu optimieren.

Zur Validierung wurden Labormuster mit Anzuchtschalen und Abdeckungen angefertigt und in Kombination mit Pflanzenversuchen und Pflanzenbestückung getestet (TUM, Mediabiiose).

- Material



Parallel zu der Entwicklung der Rinnen wurden verschiedene Materialien geprüft, da aufgrund der besonderen Anforderungen – wie der Wirkung der Nährstofflösung und der Reflexion der Beleuchtung – ein geeignetes Material identifiziert werden sollte. Zudem wurde die Rinnenfarbe in Varianten wie transparent, weiß, grau und schwarz hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Lichtreflexion und Pflanzengesundheit eingehend evaluiert.

Die Untersuchungen ergaben, dass transparente Materialien zwar zunächst einen optisch ansprechenden Eindruck vermittelten, jedoch schnell erhebliche Algenbildung zeigten. Diese Algen beeinträchtigten nicht nur die Bewässerungsfunktion der Rinnen, sondern führten auch zu einem unerwünschten optischen Erscheinungsbild.

Aus diesen Gründen wurde das transparente Material als ungeeignet bewertet. Dennoch boten die transparenten Materialien während der Entwicklungsphase wertvolle Einblicke, insbesondere bei der Beobachtung der Wurzelentwicklung von Pflanzen mit ausgeprägtem Wurzelsystem, wie Minze, Gurken und Melisse.

Diese Sorten neigen aufgrund ihrer langen Wurzeln dazu, die Bewässerungsstruktur der OFM zu beeinflussen (TUM), was bei der Optimierung der baulichen Konstruktion berücksichtigt werden konnte (Mediabiiose).

Durch die Untersuchungen mit transparenten Materialien konnte präzise festgestellt werden, zu welchen Zeitpunkten und an welchen Positionen massive Wurzelbildungen den Abfluss blockieren könnten.



Es wurde die Wurzelbildung sowohl bei Pflanzen in den Pflanzrinnen als auch in den Anzuchtrinnen systematisch analysiert, um deren Einfluss auf die Funktionalität des Systems zu verstehen.

Ein Rückschluss daraus war, dass besonders Pflanzenarten mit einer hohen Wurzelmassebildung in den Pflanzrinnen so platziert werden müssen, dass sie möglichst weit von den Be- und Entwässerungsöffnungen entfernt sind. Eine Mindestdistanz von drei Pflanzenöffnungen erwies sich dabei als effektiv, um den Wasserfluss und die Funktionalität der Rinnen langfristig sicherzustellen.

In der Anzuchtrinne war die Wurzelbildung in den frühen Wachstumsphasen der Keimlinge hingegen noch so gering, dass keine spezifischen Vorgaben zur Positionierung erforderlich waren. Diese Flexibilität ermöglichte eine effiziente Nutzung der Anzuchtflächen.

Dennoch wurde das Wurzelwachstum kontinuierlich überwacht, insbesondere bei Pflanzenarten mit bekannt hohem Wurzelwachstum, um rechtzeitig Anpassungen im Systemdesign oder in der Bepflanzungsstrategie vornehmen zu können. Dieses Vorgehen trug wesentlich dazu bei, die Funktionsfähigkeit der gesamten Bewässerungsinfrastruktur sicherzustellen.

- **Auswirkungen der Pflanzenbestückung auf Design & Konstruktion des OFM**

Die geänderte Pflanzenbestückung, die erhöhte Anzahl an Rinnen im System und deren Auswirkungen auf die Kapazitäten des Systems machten eine Reihe von Designanpassungen erforderlich. Dies führte zu einer Neubewertung des Einsatzes von OFM-Modulen aufgrund geänderter ergonomischer Anforderungen.

Eine limitierende Größe war insbesondere die maximal mögliche Höhe des Moduls, die sicherstellen musste, dass Mitarbeitende weiterhin bequem ernten können. Ebenso entscheidend war der Abstand zwischen der Substratoberfläche und der Beleuchtung, sowohl für ausgewachsene Pflanzen als auch für neu ausgesäte Keimlinge.

- **Auswirkungen auf Design durch Pflanzenentnahme durch Nutzer**

Aus den Erfahrungen mit den Labormustern, die sowohl von Testnutzern als auch von Forschenden gesammelt wurden, kristallisierte sich heraus, dass das Design der Öffnungen überarbeitet werden musste.

Es zeigte sich, dass eine verbesserte Gestaltung notwendig war, um die Pflanzenentnahme für die Nutzer einfacher und intuitiver zu gestalten. Gleichzeitig musste das Design den Anforderungen der Wartung und Instandhaltung gerecht werden, damit Pflegearbeiten effizient und problemlos durchgeführt werden konnten.



Ein weiterer zentraler Aspekt war die Hygiene: Die Öffnungen mussten so angepasst werden, dass Verunreinigungen minimiert wurden. Zudem wurde eine Einsatzform für die Substrateinheiten hinzugefügt, um die Handhabung zu erleichtern und die Funktionalität des Systems weiter zu verbessern.

- **Auswirkungen auf Design durch Handhabung**

Weiteres Ergebnis der Untersuchungen war die Erkenntnis, dass Abdeckungen mit einer Länge von mehr als einem Meter in der Praxis unpraktisch waren. Solche Abdeckungen erschwerten essenzielle Arbeitsschritte wie die regelmäßige Wartung, den Austausch von Pflanzen und die gründliche Reinigung erheblich.

Um diese Probleme zu lösen, wurde ein flexibleres Konzept für kleinere, segmentierte Abdeckungen entwickelt.

Die Muster wurden zunächst in verschiedene Längen zugeschnitten und getestet (TUM, Mediabiöse), um die optimale Variante zu identifizieren. Dabei stellte sich eine zentral segmentierte Abdeckung als die effizienteste Lösung heraus, da sie eine Balance zwischen Stabilität und einfacher Handhabung bot. Diese Variante wurde daraufhin in das Gesamtkonzept integriert und für weitere Tests verwendet.

- **Formgebung und Funktionalität der Pflanzenöffnungen**

Auch die Form der Pflanzenöffnungen hatte einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtsystem. Um die optimale Gestaltung zu bestimmen, wurden Muster mit Einzelöffnungen sowie mit zusammengefassten Pflanzenöffnungen angefertigt und getestet (TUM, Mediabiöse).

Dabei stellte sich heraus, dass zusammengefasste Pflanzenöffnungen für das System ungeeignet waren. Sie boten den Pflanzen nicht ausreichend Stabilität und führten zu einer erhöhten Verdunstung, was wiederum den Bedarf an Nährlösung deutlich steigerte.

Aufgrund dieser Nachteile wurde auf die Entwicklung von zusammengefassten Pflanzenöffnungen verzichtet.

Stattdessen setzte man auf Einzelöffnungen, die mit speziellen Eingriffsmulden in den Abdeckungen der Rinnen versehen wurden, um den Pflanzenaustausch zu erleichtern und gleichzeitig die notwendige Stabilität für die Pflanzen sicherzustellen.

Die ersten Muster wiesen zudem eine unzureichende Stabilität bei den Schalen und Abdeckungen auf.

Um diese Schwachstellen zu beheben, wurden die Muster zunächst händisch nachbearbeitet, wobei zusätzliche Aussteifungen angebracht und Aussparungen für Befestigungen ergänzt wurden.

Diese Nachbearbeitungen (Mediabiöse) verbesserten die Stabilität der Komponenten deutlich und lieferten wichtige Erkenntnisse für die nächsten Entwicklungsschritte.

In den darauffolgenden Iterationen wurden die zuvor manuell angefertigten Aussteifungen in das Design integriert, wodurch ein praktisches mechanisches Stecksystem entstand. Dieses



System erhöhte die Stabilität und erleichterte zugleich das Handling der Komponenten erheblich. Das mechanische Stecksystem trug wesentlich zur Stabilisierung der Verbindung zwischen Rinne und Abdeckung bei und stärkte damit den geschlossenen Charakter des Kreislaufsystems. Dadurch wurde sichergestellt, dass keine Flüssigkeit durch Transpiration nach außen entweichen konnte.

2. Evaluierung der Auswirkung der Pflanzenbestückung

- **Auswirkung auf das Arbeitsumfeld**

Die Auswirkung der Pflanzenbestückung in Büros wurde umfassend evaluiert, um die positiven Effekte auf das Arbeitsumfeld besser zu verstehen und potenzielle Herausforderungen zu identifizieren.

Während eine direkte Bewertung der psychologischen Wirkung von Pflanzen auf das Arbeitsumfeld durch praktische Versuche nicht vollständig möglich war – da das Wohlbefinden am Arbeitsplatz von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird – zeigten direkte Gespräche und Umfragen unter den Testpersonen eine durchweg positive Wahrnehmung. Diese Rückmeldungen bestätigten, dass das OFM-System einen eindeutig positiven Effekt auf das Arbeitsumfeld hat.

Parallel dazu wurde Fachliteratur analysiert, die die Ergebnisse untermauerte. Zahlreiche Studien belegen, dass Pflanzen in Büros weitreichende Vorteile bieten. Sie verbessern nicht nur die Luftqualität, sondern fördern auch das allgemeine Wohlbefinden, reduzieren Stress und können die Produktivität der Mitarbeitenden steigern.

- **Auswirkung auf das Design des Systems**

Ein weiteres Thema war die Wartung der Pflanzenbestückung, die im Rahmen der Evaluierung ebenfalls berücksichtigt wurde und die damit einhergehende Integration von jungpflanzenproduzierenden Einheiten – den Anzuchtrinnen. Die Anzahl dieser Einheiten beeinflusste direkt den Nährstoffverbrauch und somit den Befüllzyklus der Nährstoffeinheit.

Um die optimale Wartung zu gewährleisten, wurden verschiedene Szenarien simuliert und durch Pflanzenversuche getestet, die untersuchten, welche Kombination aus Jungpflanzen und erntebereiten Pflanzen die längste Zeitspanne zwischen zwei Befüllzyklen ermöglicht, ohne die Vitalität der Pflanzen zu gefährden.

- **Herausforderungen der technischen Umsetzung**

Eine besondere technische Herausforderung stellte die Implementierung von herausragenden Rinneneinheiten an zwei Seiten sowie deren Aufbau als Muster dar.

Dabei war es entscheidend, die technische Machbarkeit des Konstruktionsaufbaus sicherzustellen. Zum einen betraf dies die Konstruktion selbst, die überarbeitet werden musste, um Befestigungspunkte für Rinnen an beiden Seiten des Moduls zu ermöglichen. Zum anderen mussten die Leitungen für Beleuchtung und Nährstoffzufuhr so gebündelt untergebracht werden, dass sie den neuen Anforderungen gerecht wurden.



Zusätzlich hatte die Einführung der zweigeteilten Rinneneinheiten Auswirkungen auf die Nährstoffversorgung des Systems. Es galt, zwei unterschiedliche Arten von Pflanzenbestückungen innerhalb eines Moduls bedarfsgerecht mit Nährstoffen zu versorgen. Spezifische Abzweigungen wurden geplant, um die Verteilung der Versorgungselemente zu optimieren.

Da hierfür keine passenden Bauteile am Markt verfügbar waren, war eine händische Bearbeitung der Muster (Mediabiöse) erforderlich, um das Design zu implementieren und gleichzeitig die Funktionalität des gesamten Systems sicherzustellen.

3. Optimierung und Validierung technischer Komponenten

Im Rahmen des Projekts wurden die technischen Komponenten der OFM-Systeme eingebaut, umfassend auf ihre Funktionalität an Labormuster getestet, bedarfsorientiert überarbeitet und einzeln oder zusammengeführt an Versuchsaufbauten evaluiert. Dieser Prozess wurde iterativ wiederholt, um die Ergebnisse schrittweise zu optimieren.

- **Methodik des Labormusteraufbaus für objektives Nutzerfeedback**

Die technischen Komponenten des OFM-Systems wurden entweder einzeln oder in gebündelten Labormusteraufbauten entwickelt (TUM, IB APelka, Mediabiose). Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass das Rinnensystem mit einer realitätsgetreuen Oberfläche ausgestattet war, um ein möglichst objektives Nutzerfeedback zu erhalten. Die Bauteile der Ansteuerung und die Elektronik (IB APelka) wurden in einer Aluminiumverbundstruktur – als optisch geschlossene Versuchseinheit - verborgen und während aufeinander aufbauender Entwicklungszyklen schrittweise ausgetauscht und überarbeitet.

Diese intelligente Integration in die Testumgebung stellte sicher, dass das Gesamterscheinungsbild des Systems während der Überarbeitungsphasen unverändert blieb. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass das Nutzerfeedback in begleitenden Umfragen nicht durch visuelle Veränderungen der technischen Komponenten beeinflusst wurde.

Auch die Konstruktion des OFM-Systems musste diese technische Herausforderung bewältigen, um während der Entwicklungs- und Testphase den flexiblen Austausch einzelner Bauteile zu ermöglichen, ohne die optische Wahrnehmung der Umgebung zu beeinflussen. Dies gewährleistete, dass begleitende Umfragen und Nutzerevaluationen unabhängig vom Fortschritt der technischen Iterationen objektiv und unverfälscht durchgeführt werden konnten.

Diese Herangehensweise ermöglichte eine anschauliche Wahrnehmung des Systems, die die Grundlage für fundierte Rückmeldungen zu Konzept und Design durch Umfragen bildete. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden iterative Verbesserungen an den einzelnen Komponenten vorgenommen, um deren Platzierung und Dimensionierung zu optimieren sowie Funktionalität, Ergonomie und langfristige Einsatzfähigkeit sicherzustellen.

- **Geschlossener bedarfsgerecht-gesteuerter Kreislauf der Nährstofflösung**

Das OFM nutzt ein dezentrales System zur Versorgung mit Nährstofflösung. Diese wird in einem geschlossenen Kreislauf bedarfsgerecht durch den Algorithmus den Pflanzen zugeführt

und in abgestimmten Zeitabständen nachgefüllt. Der Kreislauf wird durch das Abpumpen der Flüssigkeit aus einem abgeschlossenen Behälter gewährleistet.

Mehrere Lösungsansätze wurden verfolgt und an Musteraufbauten getestet (TUM, Mediabiiose) – eine bis vier Pumpen – um den Bedarf unterschiedlicher Pflanzenzyklen abzudecken. Auf der elektronischen Seite wurden vier Pumpenzugänge vorgesehen und deren Steuerung im Algorithmus implementiert (IB APelka).

Eine wesentliche Herausforderung bestand in der Auswahl geeigneter Pumpen, die spezifische technische Anforderungen (IB APelka) erfüllen mussten: ausreichende Pumpleistung, passende Betriebsspannung, geringe Geräusentwicklung sowie die Integration von Filtern. Nach Tests verschiedener verfügbarer Geräte fiel die Wahl auf eine Amphibienpumpe, da sie eine optimale Balance zwischen Leistung, Platzbedarf und geringer Lautstärke bietet. Von den Testpersonen wurde sie als „unauffällig“ wahrgenommen.

Pflanzenversuche mit mehreren Pumpengängen wurden mit Testnutzern durchgeführt, um die Wahrnehmung der Nutzer im Hinblick auf den Geräuschpegel in einem durchschnittlichen Büroraum zu evaluieren.

Besonderes Augenmerk lag auf der Einhaltung eines geringen Geräuschpegels, um die Pumpe gemäß den Vorgaben der Arbeitsplatzverordnung im Büro einsetzen zu können (Mediabiiose, TUM). Diese erlaubt einen maximalen Lärmpegel von 55 Dezibel, was etwa der Lautstärke eines normalen Gesprächs entspricht.

Da die Pumpe während des Betriebs ihre Position veränderte, war eine geeignete Befestigung erforderlich, die die Geräuschbildung minimiert, die Dichtigkeit des Behälters sicherstellt und gleichzeitig Wartungsarbeiten erleichtert.

Durch iterative Tests (Mediabiiose, TUM) wurde die optimale Lösung ermittelt: Eine Fixierung der Pumpenbasis mit speziellem Kleber am Tankboden, kombiniert mit einem Schiebemechanismus. Diese Konstruktion gewährleistet Stabilität, geräuscharmen Betrieb und eine einfache Wartung.

Parallel zur erfolgreichen Optimierung der Pumpenbasis mit Fokus auf Stabilität und Geräuschreduzierung wurde die Implementierung eines geeigneten Füllstandsensors (IB APelka) vorangetrieben. Dieser erfasste mittels eines Schwimmers den Niveaustand im Tank und stellte eine erhebliche Herausforderung bei der Bestimmung der optimalen Sensorlänge dar. Erste Tests mit zwei verschiedenen Längen verdeutlichten die Komplexität der Aufgabe: Während die kürzere Variante nicht in der Lage war, den gesamten Tankinhalt zuverlässig zu erfassen, führte die längere Variante zu erheblichen Schwierigkeiten beim Einbau.

Um diese Problematik zu überwinden, wurde ein innovativer Ansatz entwickelt (Mediabiiose, TUM, IB APelka), bei dem der Sensor mittels präzise kalibrierter Distanzmodule in eine optimierte Position gebracht wurde. Diese Maßnahme ermöglichte eine effiziente Integration in das bestehende System. Darüber hinaus wurde die Software entsprechend modifiziert (IB APelka), um die durch die neue Konfiguration gewonnenen Messwerte korrekt und präzise

darzustellen. Die iterative Optimierung erforderte ein hohes Maß an technischer Expertise, da sowohl die mechanische als auch die softwareseitige Anpassung eng aufeinander abgestimmt werden mussten, um die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit des Sensors (IB APelka) zu gewährleisten.

4. Entwicklung von Ansteuerungsalgorithmen, Einbindung von Sensortechniken



Im Rahmen der Analyse und Entwicklung von Sensortechnologien für den Einsatz in OFM wurden die zentralen Eigenschaften der Sensoren systematisch untersucht. Dabei wurden Strategien zur Erfassung des Pflanzenwachstums sowie zur Bewertung der Pflanzenvitalität entwickelt (IB APelka).

Präferierte Sensoren wurden getestet (IB APelka) und ihre Einsatzfähigkeit in Labormuster umfassend validiert. Essenzielle Parameter, darunter Versorgungsspannung, Leistungsaufnahme, Timing-Definitionen und mechanische Abmessungen, wurden abschließend festgelegt und fixiert.

Somit konnte im Zuge der Evaluation der Sensortechniken (IB APelka) aufgezeigt werden, dass die generierten Daten sowohl Rückschlüsse auf die Vitalität der Pflanzen als auch auf das Wohlbefinden der Nutzer zulassen. Dazu wurden im Minutentakt erhobene Datensätze von Temperatursensoren, Luftfeuchtesensoren und Lichtsensoren erfasst und analysiert. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Bewertung der Sensorleistung und die Ableitung potenzieller Optimierungsmaßnahmen.

Es wurde ein multifunktionaler Funksensor (IB APelka) mit energieautarker Versorgung eingebunden (IB APelka), getestet und erfolgreich in die Steuerung integriert. Dieser Sensor erfasst kontinuierlich Umgebungsdaten und ermöglicht deren Verarbeitung durch den Algorithmus. Die generierten Datensätze in Echtzeit liefern eine präzise Abbildung der Umweltbedingungen, die das Wohlbefinden der Nutzer und die Vitalität der Pflanzen beeinflussen.

Die Funktionalität des Multisensors für das System wurde erweitert (IB APelka), indem mehrere OFMs mithilfe des Algorithmus an den Multisensor gekoppelt wurden. Dies trug zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs bei und verbesserte gleichzeitig die Datenkommunikation zwischen den Modulen, wodurch die Effizienz und Leistungsfähigkeit des Systems insgesamt gesteigert wurden.

Parallel zum Einsatz des Multisensors wurden alternative Methoden zur Erfassung von Vitalitätszuständen der Pflanzen evaluiert, darunter der Einsatz von Lichtschranken (IB APelka). Die Integration einer Lichtschranke erwies sich jedoch als ungeeignet, da die heterogene Struktur der Pflanzenreihen eine präzise Messung verhinderte. Eine mögliche Lösung hätte in einer homogenen Bepflanzung bestanden, die jedoch aufgrund ästhetischer Einschränkungen verworfen wurde. Zusätzlich wäre für den Einsatz von Lichtschranken ein

gleichmäßiges Pflanzenwachstum erforderlich gewesen, sodass alle Pflanzen innerhalb einer Reihe eine einheitliche Höhe aufwiesen. Praktische Tests zeigten jedoch, dass dies mit der flexiblen Ernte durch die Nutzer unvereinbar ist. Die Entnahme einzelner Blätter oder ganzer Pflanzen erfolgt zeitlich individuell und unvorhersehbar, was eine einheitliche Wachstumsstruktur und damit die Nutzung einer Lichtschranke als Messinstrument unpraktikabel machte.

Ein weiterer Fokus lag auf der Optimierung der Beleuchtung und Steuerung des Systems. Hierbei wurde die hardwareseitige Dimensionierung der Beleuchtung auf maximale Effizienz ausgelegt, während der Algorithmus die Beleuchtungsintensität entsprechend den Wachstumsphasen regelte (IB APelka, Mediabiöse). Parallel dazu erfolgte eine umfassende Validierung und Weiterentwicklung der Beleuchtungs- und Steuerungskonfiguration (IB APelka), um eine optimale Anpassung an die spezifischen Anforderungen des Pflanzenwachstums zu gewährleisten. Lichtmessungen an relevanten Stellen in Büroräumen dienten als Grundlage für ein Konzept zur Erfassung des Pflanzenwachstums, das klimatische Parameter, Lichtbedarf und Nährstoffversorgung berücksichtigt (Mediabiöse, IB APelka, TUM).

Parallel dazu wurde die Steuerungsmodul-Komponente (IB APelka) überarbeitet, um ihre Eignung für die angestrebten Funktionalitäten sicherzustellen. Die Sensoren wurden hinsichtlich Kosten, Ressourcenverbrauch, Datenanforderungen und spezifischem Bedarf evaluiert.

- **Maßnahmen zur Sicherstellung der Systemstabilität**

Nachdem festgestellt wurde, dass Messungen der Licht- und Pumpenströme (IB APelka) teilweise Verzögerungen von mehreren Sekunden verursachen und die Systemstabilität beeinträchtigen, erfolgte eine detaillierte Analyse. Anschließend wurden Maßnahmen umgesetzt, die dieses Problem erfolgreich behoben haben. Mit Abschluss dieser Optimierungen konnte die Stabilität des Systems sichergestellt werden.

Die Funktionalität der Pumpen wurde anschließend durch mehrere Entwicklungs- und Testschritte (IB APelka) verbessert. Dazu gehörten Design, Einbau und Tests von Schutzmechanismen für die Ansteuerungseinheit, um rückfließende Ströme zu verhindern, sowie die iterative Anpassung elektronischer Bauteile. Labormuster wurden erstellt und überarbeitet, bis eine funktionierende Lösung erfolgreich implementiert und validiert werden konnte. Zusätzlich wurden unterschiedliche Bewässerungsszenarien simuliert, die Wärmeentwicklung unter intensiver Pumpennutzung untersucht und die Relation zwischen Pumpenströmen und der Viskosität der Nährstofflösungen getestet. Dies führte zur Überarbeitung der Ansteuerungseinheit und zur Auswahl neuer robusterer Bauteile, die nach erfolgreichen Tests implementiert wurden.

Die Entwicklung und Codierung des Ansteuerungsalgorithmus (IB APelka) für Wasser-, Licht- und Nährstoffsteuerung wurde iterativ an Labormustern und Versuchsaufbauten getestet.

5. Sensortechniken, Ansteuerung

Vor dem Hintergrund der Integration von Pflanzen in Innenraumumgebungen und ihrer wechselseitigen Wirkungen wurde die dafür geeignete Sensortechnik (IB APelka) für die OFM analysiert. Dabei wurden verschiedene Messtechniken (IB APelka) untersucht, miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet.

Der Parameter der Luftfeuchtigkeit erwies sich als besonders relevant, da Pflanzenversuche zeigten, dass dieser Faktor die deutlichsten Auswirkungen auf die unmittelbare Gestaltung des Raumklimas hat. Dieser Parameter unterlag, wie die Datenaufzeichnungen (IB APelka) belegten, einer dynamischen Veränderung. Die Luftfeuchtigkeit variierte in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanzen sowie von Umgebungsfaktoren wie der Temperatur, das Lüftungsverhalten der Nutzer und den saisonale Schwankungen.

Weiterhin wurde der Anbringungsort der Sensoren untersucht (IB APelka), da die erfassten Daten je nach Standort erheblich variierten. Ein ungünstig gewählter Standort barg das Risiko, auf fehlerhafte Datengrundlagen aufzubauen, was zu falschen Annahmen und ineffizienten Steuerungsszenarien führen konnte, insbesondere bei lichtmessenden Sensoren. Die Lichtsensoren waren zudem besonders anfällig für Verschattungen durch die Blattmasse der Pflanzen, wodurch der Standort der Sensoren eine noch größere Bedeutung erhielt, da falsche Platzierungen unmittelbare Beeinträchtigungen der Messergebnisse zur Folge hatten.

Ein Präsenzsensoren wurde unter technischen und integrationstechnischen Gesichtspunkten untersucht. Er wurde einerseits unter Berücksichtigung seiner technischen Anschlussfähigkeit und der Auswirkungen (IB APelka) sowie andererseits im Kontext büroraumrelevanter Steuerungsszenarien (Mediabiöse) analysiert. Dabei arbeiteten beide Partner in engem Austausch zusammen, um sinnvolle und praxistaugliche Ergebnisse zu erzielen.

Es standen sowohl die Funktionsweise und Zuverlässigkeit des Sensors als auch seine Einbindung in das bestehende System im Fokus der Analyse.

Neben rechtlichen Hindernissen aufgrund des Datenschutzes wurden auch technische Einschränkungen als Faktoren identifiziert, die gegen den Einsatz eines solchen Sensors sprechen. Präsenzsensoren könnten beispielsweise bei geringer Bewegungsintensität – wie sie beim konzentrierten Arbeiten am PC häufig vorkommt – fehlerhaft reagieren und die Anwesenheit der Nutzer nicht korrekt erfassen. Weitere Einflussfaktoren sind die Sitzposition, die Körpergröße oder der verfügbare Bewegungsraum, etwa bei der Pflege von Pflanzen (Mediabiöse). Wenn das OFM-System somit auf fehlerhaft erfasste Daten reagiert, kann dies die Stabilität des Systems beeinträchtigen und somit den gesamten Arbeitszyklus negativ beeinflussen (IB APelka).

Ein CO₂-Sensor wurde untersucht und für die Labormessungen als sinnvoll bewertet (IB APelka). Für den späteren praktischen Einsatz wurde er jedoch aus wirtschaftlichen Gründen als nachteilig eingestuft.

Vielversprechende Ergebnisse lieferte die Analyse eines Multisensors, der eine optimale Zusammenstellung wesentlicher Parameter erfasste (IB APelka). Dieser Sensor erfüllte

wesentliche gewünschte Funktionalitäten und könnte komplementär in Verbindung mit mehreren Modulen eingesetzt werden.

Es wurden verschiedene Ansätze untersucht, um Szenarien für die dynamische Erfassung des Pflanzenwachstums zu entwickeln (IB APelka). Mehrere technische Alternativen wurden diskutiert, teilweise in Versuchsreihen (IB APelka, TUM, Mediabiose) umgesetzt und getestet.

Auch die Möglichkeit einer Bildanalyse wurde untersucht. Es wurde eine Bildreihe über mehrere Pflanzenversuche durchgeführt, die Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien erfasste – einzeln und im Verbund (TUM, Mediabiose, IB Pelka).

Dabei wurden Pflanzen aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Wachstumsstadien, vor unterschiedlichem farbllichem Hintergrund fotografisch innerhalb Labormuster-Reihen mit Pflanzen erfasst und anschließend analysiert (TUM, IB Pelka, Mediabiose).

Die Pflanzen zeigten ein dynamisches Erscheinungsbild, das stark durch ihr Wachstum geprägt war. Diese Dynamik erschwerte eine konsistente Erfassung über längere Zeiträume. Zudem war es ab einem bestimmten Wachstumsstadium nicht mehr möglich, einzelne Pflanzen als einzelnes Bild oder einzeln innerhalb eines Bildes zu erfassen, da sich die Blattmassen überlappten und die Bildanalyse die grüne Vegetationsmasse als eine zusammenhängende Einheit interpretierte. Darüber hinaus hatte der Aufnahmewinkel einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse, insbesondere in Verbindung mit der Dynamik des Wachstums und der Überlappung der Pflanzen. Unterschiedliche Perspektiven führten zu variierenden Resultaten und schränkten die Zuverlässigkeit der Analyse zusätzlich ein. Ein weiteres Hindernis bestand in der visuellen Ähnlichkeit einiger Pflanzenarten, die jedoch unterschiedlichen Sorten angehören. Diese Ähnlichkeit erschwerte eine präzise Unterscheidung, insbesondere in frühen Wachstumsstadien.

Es wurden verfügbare Apps zur Pflanzenerkennung analysiert. Diese waren jedoch meist auf eine begrenzte Anzahl von Sorten ausgelegt, die typischerweise in der freien Natur vorkommen. Sie basierten auf Bildern ausgewachsener Pflanzen und lieferten daher häufig ungenaue Ergebnisse, wenn sie auf junge oder spezifisch kultivierte Pflanzen angewandt wurden.

Aufgrund dieser Einschränkungen wurde diskutiert und eingeschätzt, dass der Ansatz der Bildanalyse in der vorliegenden Form zu Ergebnissen mit hoher Ungenauigkeit führen könnte (IB APelka, Mediabiose, TUM). Solche Ungenauigkeiten würden nicht nur die Erwartungen der Nutzer enttäuschen, sondern auch deren Bereitschaft zur Nutzung entsprechender Anwendungen erheblich mindern. Die Untersuchung machte deutlich, dass für eine zuverlässige Erfassung des Pflanzenwachstums alternative oder ergänzende Methoden erforderlich sind, die die genannten Herausforderungen gezielt angehen.

Im Rahmen der untersuchten Alternativen zur Erfassung der Vitalitätszustände von Pflanzen wurde der Einsatz von Wärmebildkameras diskutiert. Dabei wurden mehrere Herausforderungen identifiziert, die den praktischen Einsatz dieser Technologie einschränken könnten (IB APelka). Hochwertige Wärmebildkameras, die für präzise Messungen erforderlich sind, erweisen sich als kostenintensiv, was ihre breite Anwendung einschränkt.

Die Aussagekraft der thermischen Daten wurde als begrenzt eingeschätzt, da sie lediglich Temperaturdifferenzen und nicht direkt physiologische Zustände der Pflanzen darstellen kann. Dies erschwert die eindeutige Zuordnung von Stresssymptomen zu bestimmten Ursachen wie Wassermangel oder Nährstoffdefiziten.

Zudem wurde – in Anlehnung an die Fotoversuchsreihe – geschätzt, dass der Einsatz von Wärmebildkameras in dichten Pflanzenbeständen problematisch ist, da die Überlagerung von Blättern oder Pflanzen die Erfassung verdeckter Bereiche verhindern würde.

Insgesamt ergab die Analyse, dass der Einsatz von Wärmebildkameras zwar wertvolle Einblicke liefern kann, die Technologie jedoch durch mehrere einschränkende Faktoren ergänzt oder angepasst werden muss, um die Erfassung der Vitalitätszustände von Pflanzen in der Praxis effizient und zuverlässig zu gestalten (IB APelka).

Die durchgeführten Untersuchungen zu verschiedenen Strategie-Szenarien zur Erfassung der Vitalitätszustände von Pflanzen zeigen, dass die Nutzung einer App mit Bilderkennungssoftware mit wesentlichen Herausforderungen bzw. Nachteilen verbunden sind.

Im Fall der App-basierten Bilderkennung müssten Nutzer selbstständig Bilder der Pflanzen aufnehmen und diese an eine Datenbank senden, die Anhaltspunkte für eine softwaregestützte Analyse bereitstellt. Die Untersuchungen zur Bildanalyse zeigen jedoch, dass die Erfassung von Pflanzenbildern aus verschiedenen Blickwinkeln und Wachstumsstadien mit erheblichen Einschränkungen einhergehen würde (IB APelka). Dynamische Wachstumsprozesse, die Überlagerung von Blattmassen sowie die visuelle Ähnlichkeit verschiedener Pflanzenarten erschweren eine präzise und konsistente Auswertung der Bilder. Solche Ungenauigkeiten in der Bildauswertung würden nicht nur die Qualität der Daten beeinträchtigen, sondern auch die Nutzererfahrung negativ beeinflussen, was die Akzeptanz und langfristige Nutzung einer solchen App gefährden könnte (IB APelka). Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass weder die App-basierte Bildanalyse noch der Einsatz von Wärmebildkameras als alleinige Strategien zielführend wären. Beide Ansätze erfordern erhebliche Anpassungen, um die genannten Herausforderungen zu bewältigen.

Durch die Ergebnisse der Untersuchungen ergab sich die Grundlage für die Codierung eines intelligenten Steuerungsalgorithmus zur bedarfsgerechten Regulierung von Wasser- und Nährstoffversorgung sowie zur Entwicklung einer implementierungsfähigen Lichtsteuerung im OFM (IB APelka).

Da es sich bei den OFM um ein komplexes, kleines Ökosystem handelt, sind die Parameter stark miteinander vernetzt. Eine Änderung eines einzelnen Faktors infolge eines

Nutzerszenarios erforderte oftmals Anpassungen weiterer Parameter, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Ein Beispiel hierfür ist die Blendung einer Testperson während der PC-Arbeit, die eine Anpassung der Beleuchtungszeiten notwendig machte. Diese Änderung führte wiederum zu einer Umrechnung der Lichtsummen, wodurch Beleuchtungszeiten modifiziert wurden. Da der Hardware-Aufbau des Systems die Nährstofflösung als Teil der technischen Symbiose zur Kühlung der Lichtstränge nutzt, war es erforderlich, dass eine Anpassung der Beleuchtung automatisch eine Anpassung des Bewässerungs- und damit des Kühlzyklus nach sich zieht.

Diese Erfahrungswerte, die komplexen Wechselwirkungen sowie die Wahrscheinlichkeit einer Vielzahl relevanter Szenarien wurden im intelligenten Algorithmus berücksichtigt (IB APelka). Die Bestandteile des Algorithmus wurden iterativ einzeln getestet und anschließend schrittweise zusammengeführt, um eine umfassende Steuerungslösung zu entwickeln, die den dynamischen Anforderungen des Systems gerecht wird. Um die Belastbarkeit der Softwarelösung zu überprüfen, wurde sie auf verschiedene Versuchsaufbauten in unterschiedlichen Umgebungen implementiert (IB APelka).

Die Entwicklung der Software erfolgte parallel und als integraler Bestandteil der Validierung der technischen Funktionalitäten der Hardwarelösung. Im Rahmen der Versuche wurden die technischen Komponenten des OFM, das Beleuchtungskonzept sowie deren Ansteuerung umfassend getestet und validiert. Dabei konnten anhand von Labormustern die mechatronischen Komponenten und die elektronische Schaltung eingehend geprüft werden (IB APelka).

Einzelne elektronische Baugruppen mussten überarbeitet, neu evaluiert und optimiert werden, da Wechselwirkungen zwischen einer oder mehreren Komponenten dies erforderlich machten. Zum Beispiel führte der Einsatz von mehreren Pumpen im Betrieb zu höheren Stromstärken, die leistungstärkere elektronische Bauteile erforderlich machten. Um die Hardware zu entlasten und potenziellen Überlastungen vorzubeugen, wurden zusätzliche Sicherungsmechanismen in die Software integriert (IB APelka). Beispielsweise wurde implementiert, dass zwar mehrere Pumpen im System vorhanden sein können, jedoch immer nur eine Pumpe gleichzeitig Strom zieht, um eine Überlastung des Systems zu verhindern. Die Pumpenzeiten wurden dynamisch an den jeweiligen Bedarf angepasst, wobei die Software den parallelen Einsatz einer Versorgungspumpe priorisiert steuerte (IB APelka).

Das Ergebnis war durchweg erfolgreich: Das System läuft stabil und zuverlässig. Die vorläufige Spezifikation des gesamten Systems konnte erstellt werden, basierend auf einer umfangreichen Validierung und Optimierung unter Testbedingungen.

6. Phänotypeneignung, technische Systemanforderungen und Nutzerpräferenzen

Durch praktische Versuche, iterative Überarbeitung von Labormustern sowie sukzessiven Austausch und Optimierung einzelner technischer Komponenten (Mediabiologie, TUM, IB APelka) wurden verschiedene Szenarien der Pflanzenbelegung und Wachstumsphasen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Büroraumtypologien und Möblierungskonzepte untersucht und getestet.

Es wurden in aufeinanderfolgenden Zyklen Simulationen und Laborversuche miteinander verzahnt. Zu diesem Zweck wurden einzelne Bausteine der Labormuster themenspezifisch aufgebaut und zu größeren, zusammenhängenden Mustern kombiniert (TUM, IB APelka, Mediabiologie). Im Anschluss erfolgte eine Testung der Muster in einer Umgebung, die in direktem Austausch mit den Testnutzern stand. Die einzelnen Muster wiesen unterschiedliche Entwicklungsstände auf und verfügten teils über variierende technische Komponenten. Dadurch war es möglich, die Funktionalitäten der Muster miteinander zu vergleichen und zu evaluieren (TUM, Mediabiologie, IB APelka).

- **Realitätsnahen Bezug zu Testnutzern, Einbinden von Nutzerfeedback**



Das Testen von Pflanzenphänotypen und ihre Eignung zum Einsatz im System erfolgte im Sinne der agilen Produktentwicklung in parallelen Entwicklungsumgebungen – einerseits einzelne botanische Untersuchungen und daraus folgende Selektierung bevorzugter Phänotypen und überlappend dazu das Einsetzen der Pflanzen in Testumgebung mit einem realitätsnahen Bezug zu Test-Nutzern.

Darauf aufbauend wurde eine umfassende quantitative Umfrage durchgeführt, um die Hypothese zu validieren, welche Pflanzenarten und -sorten bevorzugt werden und wie intensiv einzelne Pflanzen in einem OFM konsumiert werden.

Zunächst wurden lokalen Testumgebungen (TUM) in Betracht gezogen aufgrund ihrer logistischen Anbindung. Nach kritischer Auseinandersetzung mit relevanten räumlichen Kriterien, die eine ausschlagende Bedeutung für die Rückschlüsse auf die Systemfunktionalitäten, das Nutzerfeedback und die Erreichung projektspezifischer Ziele haben, wurden lokale Räumlichkeiten als unzureichend eingestuft und nach relevanten Umgebungen gesucht, die eine Vielfalt und Qualität an Bürogestaltungsmöglichkeiten besitzen.

Vor dem Hintergrund geplanter Umfragen in Verbindung mit dem OfficeFarming Konzept wurde ein Standort gefunden, der den Zugang zu einer größeren Anzahl an Test-Nutzer ermöglichte.

Über mehrere Pflanzenzyklen wurden unterschiedliche Produktmerkmale getestet (TUM, Mediabiologie, IB APelka), telemetrisch erfasst (IB APelka) und die Kapazität einer Farm und das Wohlbefinden der Nutzer untersucht (TUM, Mediabiologie).

Hierbei wurden OFM-Muster in verschiedene Büroraumtypologien platziert, unter anderem in der Typologie eines Großraumbüros als optischer Raumtrenner, in der Typologie einer gemeinschaftlich genutzten Kommunikationszone mit Küchennutzung und in der Typologie eines Besprechungsraums.

Diese Diversität der Büroraumtypologien ermöglichte unterschiedliche Wahrnehmungsperspektiven der befragten Testpersonen, die innerhalb von Umfragen und anschließenden Diskussionen zu wertvollen Erkenntnissen geführt hat.

Eine Brücke zwischen der technischen Entwicklung und der Umfrage stellte das iterative Screening verschiedener Pflanzenarten dar. Nach der zeitgenössischen Entwicklungsart der Design Thinking Methode stand der Nutzer im Mittelpunkt.

Zunächst fand eine Vorauswahl an Pflanzen statt, die als geeignet für den Einsatz in einem Büroraum eingestuft wurden. Aus diesen vorausgewählten Sorten wurden systematisch Pflanzen extern ausgesät und als Jungpflanzen in die Module eingesetzt.

Die Tests ermöglichten die Identifizierung verschiedener Pflanzenphänotypen, darunter Blattgemüse, Pflücksalate, Kräuter, Microgreens und besondere Sorten. Wichtiges Ergebnis aus den Langzeitversuchen im Austausch mit Test-Nutzern war die Erkenntnis über präferierte Sorten und Arten von Blattgemüse. Die Präferenzen wurden evaluiert und flossen in den Katalog geeigneter Pflanzenphänotypen mit ein.

Der Austausch mit den OFM bot den Nutzern die Möglichkeit, ein Stück Umweltbewusstsein real zu erleben und mit ihrem eigenen Tun einen Beitrag dazu zu leisten. Die Verbundenheit zur Natur zeigte sich auch im intuitiv richtigen Agieren der Nutzer mit den OFM.

- **Konsumentenverhalten – Einflüsse der Büroraumtypologie**

Ein überraschendes Ergebnis der Studie war der Zusammenhang zwischen Intensitätskonsum, und räumliche Anbindung der Module. Eine geringere Anzahl an Nutzern (einzelner Büroraum) erzeugte eine tiefgreifendere Identifikation und ein ausgeprägteres Verantwortungsgefühl für die Pflanzen. Es wurde mehr konsumiert und auf eine optimale optische Wirkung während jeder Wachstumsphase der Pflanzen geachtet. Daraus konnten Rückschlüsse über Erntetechniken gezogen werden, die für die Kommunikation innerhalb der späteren Verwertung von Bedeutung waren.

Langzeitversuche mit Pflanzen und Nutzerfeedback-Anbindung lieferten wertvolle Rückschlüsse zu der Anbauintensität (TUM), der Belegungsintensität von Büroräumen (Mediabiöse), den saisonalen Konsum-Schwankungen und daraus folgenden asynchronen Bepflanzungen innerhalb eines Jahreszyklus. Zur Optimierung der Pflanzenanordnung und Bestückung wurden Simulationen und Tests unter Berücksichtigung von Pflanzenart, -größe, Pflanzbeginn, Verzehrverhalten und sensorischen Datenerhebung (IB APelka) durchgeführt. Iterativ wurden Pflanzenversuche und Umfrageergebnisse verzahnt und durch Nutzer-Feedback validiert (TUM, Mediabiöse, IB APelka).

- **Kalkulation von Pflanzenressourcen im Einklang mit Konsumentenpräferenzen**

Die Auswahl geeigneter Pflanzen für den Einsatz in Office-Farmen sowie die Entwicklung und Bewertung effizienter Aussaattechniken zielten darauf ab, optimale Pflanzenphänotypen zu gewährleisten, die den spezifischen Anforderungen der OFM entsprechen. Ein systematisches Screening verschiedener Pflanzenarten erfolgte unter Berücksichtigung der vorherrschenden Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Gehalt. Weitere wesentliche Kriterien umfassten die limitierte Höhe und Breite der Pflanzen, das verfügbare Nährstoffangebot sowie die speziellen Anforderungen des Kultivierungsverfahrens in den OFM.

Um eine ansprechende Vielfalt und Einzigartigkeit zu schaffen, lag der Fokus auf besonderen Sorten, die sich durch optisch ansprechende Phänotypen (z. B. Farbpigmente oder besondere Blatt- und Wuchsformen) sowie geschmacklich hervorstechende Eigenschaften auszeichnen. Diese Vielfalt trägt dazu bei, die Nutzer zu einer bewussteren Ernährung zu motivieren und den Mehrwert der OfficeFarmen zu steigern.

Verschiedene Aussaatmethoden wurden getestet, um mit minimalem Aufwand den größtmöglichen Output zu erzielen. Diese Methoden wurden in Kombination mit der Evaluation kompatibler Substrate entwickelt.

In Zusammenarbeit mit einem der führenden Anbieter für Kokosfaser-Substrate sowie weiteren Anbietern aus dem EU-Raum wurden zahlreiche Tests durchgeführt. Hierbei konnten die Vor- und Nachteile spezifischer Substratzusammensetzungen ermittelt werden: Während einige Substrate eine leichte Handhabung ermöglichen, weisen sie eine geringe Speicherkapazität auf und neigen zum schnellen Austrocknen. Diese Eigenschaften machen angepasste Bewässerungszyklen erforderlich, die in das OFM-System integriert wurden.

Die Erfahrungen aus den vielfältigen Versuchen mit Aussaattechniken, Substraten, Bewässerungszyklen sowie weiteren zusammenhängenden Faktoren wurden in einer Datenbank erfasst, die das Konzept für eine zahlenbasierte Aussaatplanung lieferten. Dabei wurden Anforderungen an unterschiedliche Keimzeiten und die Konsumhäufigkeit berücksichtigt. Dieses Tool bildete die Grundlage für die Erstellung eines Katalogs geeigneter Pflanzenphänotypen, der die Intensität des Konsums und die Häufigkeit der Bestückung in Office-Farmen abbildet. Die Validierung der Mindestbepflanzungsintensität sowie der eingesetzten Sorten erfolgte durch direktes Feedback der Nutzer.

7. Relevante rechtliche Rahmenbedingungen zur Pflanzenproduktion in OFMs

Eine rechtliche Analyse (TUM), gestützt auf den Austausch mit Experten aus dem BLE-Netzwerk sowie umfassende Recherchen, hat ergeben, dass das Lebensmittelrecht für Pflanzen im OFM keine Anwendung findet. Gemäß der VERORDNUNG (EG) Nr. 178/2002 vom 28. Januar 2002 werden Pflanzen vor der Ernte nicht als Lebensmittel klassifiziert. Stattdessen fallen lebende Pflanzen unter die Regelungen der Allgemeinen Vermarktungsnorm gemäß VERORDNUNG (EG) Nr. 1234/2007 DES RATES vom 22. Oktober 2007. Diese Verordnung definiert Qualitätsmerkmale, die für die im OFM angebauten Pflanzen von Bedeutung sind.



Da alle Pflanzen in den Office-Farmen vor ihrer Ernte verbleiben, unterliegen sie folglich nicht dem Lebensmittelrecht, sondern sind klar der Allgemeinen Vermarktungsnorm zuzuordnen. Zusätzlich wird durch die Verordnung über das Inverkehrbringen von Anbaumaterial von Gemüse-, Obst- und Zierpflanzenarten (Anbaumaterialverordnung - AGOZV) eine Ausnahme von der Registrierungspflicht eingeräumt. Diese betrifft insbesondere Anbieter, die Anbaumaterial für nicht gewerbliche Endverbraucher bereitstellen.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen bestätigen somit, dass die Produktion und Vermarktung von Pflanzen in OFM flexibel und ohne umfangreiche Registrierungspflichten erfolgen kann, sofern die Pflanzen vor der Ernte nicht als Lebensmittel gelten und ausschließlich nicht-gewerbliche Endverbraucher bedient werden.

8. Laboranalyse-Ergebnisse über Inhaltsstoffe der Pflanzen in den OFMs

Abgeleitet aus den Umfrageergebnissen wurde eine Laboranalyse von positiven sekundären Pflanzeninhaltsstoffen angestoßen (TUM). Ergebnisse zeigen, dass die Pflanzen aus den OFM positiv wirkende sekundäre Inhaltsstoffe produzieren. Sie erreichen oder übertreffen in den meisten Fällen den Vergleichswert der inneren und äußeren Qualität zu angebauten Pflanzen aus dem Erwerbsgartenbau.

9. Das Thema Schädlinge innerhalb eines barrierefreien Systems im Innenraum

Das Thema der Schädlingsbekämpfung (TUM) innerhalb von Vertical-Farming-Systemen stellt eine eigenständige Herausforderung dar und kann als ein Pionierfeld betrachtet werden, zu dem bisher kaum fundierte Literatur verfügbar ist. Gespräche mit Experten auf diesem Gebiet haben bestätigt, dass in diesem Bereich noch erhebliches Forschungspotenzial besteht. Die derzeit vorhandenen Informationen und Berichte beziehen sich größtenteils auf Systeme, die entweder im klassischen Gewächshausbau oder im Außenbereich angewendet werden. Diese Erkenntnisse lassen sich nur bedingt auf die besonderen Anforderungen geschlossener Indoor-Systeme wie Vertical Farming übertragen und sind für die Anwendung als barriereoffenes System wie OFM nur ansatzweise anwendbar.

Diese Herausforderung hat dazu geführt, spezifische Strategien zur Schädlingsprävention und -bekämpfung zu diskutieren, die den besonderen Bedingungen des OFM gerecht werden.

- **barrierefreier Zugang zu den OFM-Pflanzen**

Ein OFM-Modul vereint eine einzigartige Kombination aus einem geschlossenen System, das sich durch einen geschlossenen Nährstoffkreislauf auszeichnet, und einem offenen Design, das eine unmittelbare, berührungsoffene Interaktion zwischen Menschen und Pflanze ermöglicht. Dadurch kann das System Ressourcen effizient nutzen, während es gleichzeitig eine direkte und intuitive Benutzererfahrung bietet, bei der die Pflanzen jederzeit greifbar und erlebbar sind. Der barrierefreie Zugang zu den Pflanzen bringt jedoch auch einen Nachteil mit sich: Der Konsument kann unbemerkt Schädlingen einschleppen, beispielsweise durch Kleidung, Hände oder mitgebrachte Pflanzen.

- **Innenraumumgebung: Geringere Anfälligkeit für Schädlingsbefall**

Die OFM-Module wurden speziell für den Einsatz in Innenräumen konzipiert, was im Hinblick auf das Thema Schädlinge einen wesentlichen Vorteil darstellte. Obwohl die Umgebung nicht aktiv kontrolliert wurde, sondern lediglich den Bedingungen eines typischen Innenraums mit Büronutzung entsprach, war das Risiko eines Schädlingsbefalls im Vergleich zu Außenanwendungen erheblich reduziert. Der Schutz vor äußeren Einflüssen wie Witterung

oder offenen Interaktionen mit der Umwelt schuf eine deutlich weniger anfällige Umgebung für Schädlingsprobleme.

Diese Einschränkung potenzieller Schädlingsherde ermöglichte es, das System pestizidfrei zu betreiben und somit eine umweltfreundliche und nachhaltige Pflanzenproduktion sicherzustellen. Sollten dennoch Schädlinge eingeschleppt werden, etwa durch Nutzer oder mitgebrachte Pflanzen, blieben die Auswirkungen in der Regel lokal begrenzt. Die Bedingungen im Innenraum erwiesen sich für die meisten Schädlingsarten als ungeeignet, wodurch eine großflächige Ausbreitung effektiv verhindert wurde.

- **Relevante Schädlingsart: Blattlaus**

Die ersten Pflanzenversuche in der Laborumgebung, bei denen nur eine begrenzte Anzahl von Personen in unmittelbarer Nähe der Pflanzen agierte, zeigten, dass keine Schädlinge in das System eingeschleppt wurden. Dieses Ergebnis bestätigte zunächst die Annahme, dass die geschlossene Innenraumumgebung einen wirksamen Schutz vor Schädlingsbefall bietet. Mit der Ausweitung der Tests auf eine größere Anzahl von Testnutzern und nach zahlreichen Langzeitversuchen trat unregelmäßig ein Blattlausbefall auf. Dieser Befall wurde eingehend untersucht, um die Ursachen und Bedingungen des Auftretens zu identifizieren. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden gezielte Bekämpfungskonzepte diskutiert, die einerseits präventiv wirken andererseits akute Befälle vorbeugen sollen. Das Validieren dieser Konzepte erfordert jedoch Langzeitversuche.

- **saisonale Herausforderungen im OFM**

Blattläuse (Aphidoidea) zählen zu den häufigsten Pflanzenschädlingen. Sie weisen eine Körperlänge von 1 bis 3 mm auf und zeichnen sich durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit sowie eine rapide Fortpflanzungsrate aus. Sie ernähren sich durch das Saugen von Pflanzensaft, wobei sie ihre stilettartigen Mundwerkzeuge in das Phloem der Pflanzen einführen.

Dies führt nicht nur zu direkten Schäden wie Wachstumsstörungen, sondern schwächt die Pflanze insgesamt. Sie scheiden beim Saugen sogenannte Honigtau-Tröpfchen aus, die ideale Bedingungen für die Besiedlung mit Rußtaupilzen bieten, was die Photosyntheseleistung der Pflanzen beeinträchtigen kann.

Eine Besonderheit der Blattläuse ist ihr komplexer Lebenszyklus, der sowohl sexuelle als auch asexuelle Fortpflanzungsphasen umfasst.

Unter günstigen Bedingungen vermehren sich Blattläuse überwiegend durch Jungfernzeugung (Parthenogenese), wobei ein Weibchen innerhalb von nur zwei Wochen eine neue Generation hervorbringen kann. Diese hohe Vermehrungsrate macht sie besonders schwer kontrollierbar. Während der Wintermonate suchen sich Blattläuse in der freien Natur frostgeschützte Wirtspflanzen, um zu überwintern.

Durch den saisonalen Druck von außen steigt auch das Risiko eines Befalls an einem OFM, wo die Blattläuse ideale Lebensbedingungen vorfinden.

- **Bewertung klassischer Schädlingsbekämpfungsmethoden**

Es wurden herkömmliche Methoden zur Blattlausbekämpfung betrachtet und ihre Anwendbarkeit sowie die damit verbundenen Grenzen im spezifischen Kontext des OFM analysiert.

Blattläuse zeichnen sich durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Pflanzenarten und Umweltbedingungen aus. Während einige Arten auf spezifische Wirtspflanzen spezialisiert sind, zeigen andere eine generalistische Veranlagung und können eine Vielzahl verschiedener Pflanzen befallen.

- **Herkömmliche Bekämpfungsstrategien gegen Blattläuse und ihre Grenzen**

Blattläuse zählen zu den am häufigsten auftretenden Schädlingen in der Landwirtschaft und im Gartenbau, weshalb über die Jahre zahlreiche Bekämpfungsstrategien entwickelt wurden. Diese lassen sich in chemische, biologische und mechanische Ansätze unterteilen. Während sie in herkömmlichen landwirtschaftlichen Systemen oder geschlossenen Gewächshäusern meist effektiv sind, stoßen sie im Kontext der OFM auf erhebliche Einschränkungen.

Chemische Bekämpfungsmethoden

Chemische Insektizide gehören zu den effektivsten Mitteln gegen Blattläuse, da sie schnell und zuverlässig wirken. Viele Produkte zielen darauf ab, die Blattläuse direkt zu töten oder ihre Fortpflanzung zu hemmen. Die Anwendung solcher Mittel ist jedoch im OFM ausgeschlossen, da die Pflanzen direkt von den Mitarbeitenden verzehrt werden sollen. Rückstände von Chemikalien auf den Blättern oder in den Wurzelsystemen könnten gesundheitliche Risiken darstellen. Auch das Versprühen von Insektiziden ist in Bürogebäuden problematisch, da es nicht nur die Luftqualität beeinträchtigen, sondern auch Sicherheits- und Gesundheitsvorschriften verletzen würde.

Biologische Bekämpfungsmethoden

Eine der klassischen Strategien zur Schädlingsbekämpfung ist der Einsatz von Nützlingen, wie Marienkäfern, Florfliegen und Schlupfwespen. Diese natürlichen Feinde der Blattläuse sind in vielen Anwendungsbereichen eine effektive, umweltfreundliche und nachhaltige Lösung, da sie die Population der Schädlinge auf natürliche Weise reduzieren können.

In einem OFM-System, das in einem Büroraum betrieben wird, ist der Einsatz solcher Nützlinge jedoch problematisch. Die unmittelbare Nähe zu Büromitarbeitenden und der laufende Betrieb stellen erhebliche Einschränkungen dar, da der Einsatz von lebenden Organismen wie Nützlingen in dieser Umgebung potenziell störend oder sogar unangenehm wirken kann. Darüber hinaus könnten solche Maßnahmen die Hygieneanforderungen und die kontrollierte Umgebung des Büros beeinträchtigen.

Mechanische Bekämpfungsmethoden

Eine mechanische Entfernung der Blattläuse, etwa durch Abwischen der Blätter, das Entfernen befallener Pflanzen oder den Einsatz von Klebefallen, hat sich im Rahmen des OFM bisher als die praktikabelste Methode erwiesen. Diese Ansätze sind jedoch zeit- und arbeitsintensiv, da die Blattläuse aufgrund ihres kurzen Fortpflanzungszyklus von zwei Wochen schnell wieder auftreten können. Auch ist bei größeren Pflanzenbeständen eine rein mechanische Bekämpfung oft nicht ausreichend, um den Befall langfristig einzudämmen.

Präventive Ansätze

Präventive Ansätze zur Schädlingsbekämpfung konzentrierten sich darauf, die Pflanzen widerstandsfähiger gegen Schädlingsbefall zu machen, indem sie mit Stärkungsmitteln behandelt wurden. Solche Mittel werden in der Regel in den Boden oder das Gießwasser eingearbeitet oder auf die Pflanzen aufgetragen.

Besonders wirkungsvoll ist dabei die systemische Zuführung von Wirkstoffen über die Nährstofflösung bereits während der Keimung der Pflanzen. Dieser Ansatz stärkt die Pflanzen von innen heraus, indem die Schutzstoffe über die Wurzeln aufgenommen und in die gesamte Pflanze transportiert werden. Dies bietet sowohl eine präventive Wirkung als auch Unterstützung bei einem akuten Schädlingsbefall.

Bezogen auf das OFM-System bestehen hier allerdings technische Herausforderungen: Die Zeitspanne zwischen der Applikation und der effektiven Aufnahme durch die Pflanze ist begrenzt, und die Wirkstoffe könnten zu einer Verfärbung der Rinnen führen.

Durch das saisonale Auftreten der Läuse war es nicht möglich, eine Langzeitstudie mit einem ausschließlichen Schwerpunkt auf dieser Maßnahme und seine Wirksamkeit für OFM-Systeme durchzuführen.

10. Kommunikationsmaßnahmen zum Projekt

Im Rahmen der Kommunikationsstrategie wurden vielseitige Maßnahmen (TUM, Mediabiologie, IB APelka) umgesetzt, um das geförderte Projekt einer breiten Öffentlichkeit sowie potenziellen Partnern und Nutzern näherzubringen.

Munich Creative Business Week (MCBW)

Eine zentrale Plattform für die Präsentation bot die Munich Creative Business Week (MCBW), auf der das Projekt durch eine Reihe von Live-Vorträgen und praktischen Demonstrationen vorgestellt wurde. Diese Veranstaltungen fanden über eine ganze Woche hinweg statt und gaben den Teilnehmern nicht nur die Möglichkeit, das Projekt kennenzulernen und die theoretischen Grundlagen des OFM zu verstehen, sondern auch, die Funktionalitäten des Systems in einer interaktiven Vorführung mit allen Sinnen zu erleben. Besucher konnten das Modul aus erster Hand erkunden, was das Ziel verfolgte, die praxisnahe Anwendbarkeit und die unmittelbare Verbindung von Menschen und Natur am Arbeitsplatz zu verdeutlichen.

Weltmarktführer der Saatgutbranche

Über die reinen Kommunikationsmaßnahmen hinaus konnten im Verlauf des Projekts wertvolle strategische Kontakte (geknüpft werden. Besonders hervorzuheben ist die Kooperation mit einem führenden Unternehmen der Saatgutbranche, das hochwertiges Saatgut für die Weiterentwicklung und Tests innerhalb des OFM bereitstellte.

Angebahnte Kooperationen mit Projekten aus der Fördermaßnahme

Gespräche mit anderen Projekten im Bereich Innovationen im urbanen Gartenbau wurden initiiert und eröffneten zudem Perspektiven für künftige Kooperationen, wobei gemeinsame Anknüpfungspunkte identifiziert und erste Schritte zur Realisierung einer Zusammenarbeit eingeleitet wurden. Insbesondere wurde eine Kooperation zum Thema der Bilderkennung von Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien angebahnt.

Kommunikationsmaterial

Flankierend zu diesen Live-Events wurde eine breite Palette an Kommunikationsmaterial entwickelt, darunter eine eigens gestaltete Website, ein prägnanter Flyer sowie eine ausführlichere Broschüre, die vertiefende Informationen über das Projekt, die Projektergebnisse und ihre technischen wie ökologischen Vorzüge bot.

Diese Materialien dienen der Schaffung von Aufmerksamkeit für das Projekt, um dessen Reichweite zu maximieren.

Veröffentlichungen

Als Teil der Kommunikationsmaßnahmen im Rahmen des Projekts OF2021 wurde eine breite Palette an Veröffentlichungen gesehen, die zur Verbreitung der Projektergebnisse und zur Sensibilisierung der Fachöffentlichkeit und einer breiteren Zielgruppe dienten.



Bereits publizierte Artikel umfassen den Beitrag "Vertical Farming in Bürogebäuden – von der Fassade bis ins Innere" von Ernst Nathanael Hotz et al. im Ernst & Sohn Special 2022 – Industrie- und Gewerbebauten sowie "OfficeFarming – Wohlbefinden und Nachhaltigkeit im Büro-Alltag" von Mariana Yordanova et al. im Ernst & Sohn Special 2023 – Industrie- und Gewerbebauten erschienen. Diese Fachpublikationen beleuchten die technischen und sozialen Dimensionen des Projekts und haben das Interesse an der Integration von Vertikal Farming in Arbeitsumgebungen geweckt.

Zusätzlich wurde das Projekt einem breiteren Publikum durch einen Fernsehbeitrag in der MDR-Umschau vorgestellt ("Landwirtschaft in der Stadt – Wenn das Gemüse auf dem Dach wächst", 30.01.2024).

In naher Zukunft sind weitere Veröffentlichungen geplant, darunter ein Fachartikel zur Qualitätssicherung der Pflanzen in OFM, der die Analyse sekundärer Pflanzenmetabolite thematisiert. Zudem ist ein Artikel in der DEGA Gartenbau über das Projekt geplant, ermöglicht durch das INUGA-Netzwerk, sowie ein Beitrag auf praxis-agrar.de, der sich auf die praktische Umsetzung des Konzepts konzentrieren wird. Diese strategischen Publikationen sollen die Sichtbarkeit des Projekts erhöhen und dessen Innovationscharakter betonen.

Diese umfassenden Kommunikations- und Netzwerkmaßnahmen unterstreichen die strategische Bedeutung der Öffentlichkeitsarbeit und Kooperationen im Rahmen des Projekts und legen eine solide Basis für dessen Weiterentwicklung und langfristigen Erfolg.

INUGA

Das Projekt war auch in das Innovationsnetzwerk Urbaner Gartenbau (INUGA) eingebunden. Im Rahmen dieses Netzwerks wurden Vernetzungsmaßnahmen durchgeführt, die insbesondere darauf abzielten, eine Plattform für den Wissens- und Erfahrungsaustausch zu schaffen.

Im Rahmen von INUGA fanden Fach- und Networking-Veranstaltungen statt, die Projekten wie OF2021 die Möglichkeit gaben, ihre Ergebnisse einem breiteren Fachpublikum vorzustellen und potenzielle Kooperationen mit anderen Projekten und Industriepartnern zu erkunden. Durch den anwesenden Expertenkreis konnten fachbezogene Fragestellungen gezielt adressiert werden.

11. Fachmessen

Während des Projektverlaufs wurden mehrere Fachmessen besucht, um gezielt Wissen zu erweitern, Kontakte zu knüpfen und mögliche Kooperationen anzubahnen.

Die **Fruit Logistica** (Mediabiöse, TUM) in Berlin lieferte wertvolle Einblicke und praktische Anknüpfungspunkte. Dabei ergaben sich konkrete Hinweise darauf, wie einzelne technische Bausteine sowie Produktionsabläufe aus anderen Produkten und Systemen in den OFM berücksichtigt bzw. integriert werden können. Die Messe ermöglichte es zudem, aktuelle Marktanforderungen und zukünftige Trends zu identifizieren. Außerdem fand ein Austausch mit potenziellen Substratlieferanten statt. Im Fokus standen Themen wie Lagerung, Zusammensetzung, Abbaubarkeit und Nachhaltigkeit von Substraten sowie deren Keimeigenschaften.

Insbesondere konnten durch Gespräche mit Branchenexperten entscheidende Rückschlüsse zu den OFM eingeholt werden. Hervorzuheben ist der Kontakt zu einem Vertical-Farming-System-Anbieter, dessen System anhand austauschbarer Kapseln funktioniert.

Der Besuch der **KPA – Kunststoff-Produkte-Aktuell-Messe** (Mediabiöse, TUM) bot wertvolle Einblicke für Design, Entwicklung und Beschaffung von Kunststoffprodukten und präsentierte ein breites Spektrum an kunststoffverarbeitenden Unternehmen, Materialanbietern und Dienstleistern, die ihre Kompetenzen und Leistungen im Bereich Entwicklung und Produktion neuer Kunststoffprodukte vorstellten.

Während des Messebesuchs konnten aktuelle Entwicklungen und Trends in der Kunststoffverarbeitung kennengelernt werden. Besonders die Entwicklungen im Bereich Materialauswahl und -verarbeitung sowie energieeffizienter und ressourcenschonender Systeme lieferten wichtige Impulse für die weitere Arbeit, insbesondere zur Frage, wie die modularen OFM-Rinnen noch nachhaltiger gestaltet werden konnten.

Die dort gezeigten Technologien bestätigten die Relevanz kurzer, segmentierter Abdeckungen.

Zudem ermöglichte die KPA den Austausch mit Experten, was zu neuen Perspektiven für die Optimierung unserer Systeme führte. Die Gespräche und Präsentationen auf der Messe lieferten entscheidende Anregungen, die Bedürfnisse unserer Lösung noch besser auf die Möglichkeiten dieser Branche abzustimmen, insbesondere in Hinblick auf die Umsetzung von Komponenten der OFM in den Bereichen Nährstoffeinheit, Rinnensystem und Service.

Der Besuch der **VertiFarm**, einer führenden Fachmesse für Next Level Farming und innovative Anbausysteme, bot wertvolle Einblicke. Hier ergab sich die Gelegenheit, aktuelle Entwicklungen und Trends in der vertikalen Landwirtschaft kennenzulernen und diese mit den Ansätzen der OFM zu vergleichen. Es wurden Einblicke in verschiedene Themenschwerpunkte im Bereich Vertical Farming durch Fachvorträge und Podiumsdiskussionen gewonnen, die zu Rückschlüssen und Impulsen in der Weiterentwicklung des OFM geführt haben.



Während des Besuchs konnte die Modularität und Flexibilität des OFM-Systems im Kontext anderer präsentierter Lösungen reflektiert werden. Die dort gezeigten Innovationen, insbesondere im Bereich automatisierter Prozesse und energieeffizienter Systeme, boten wertvolle Impulse zur Verbindung von Flexibilität, Nachhaltigkeit und Skalierbarkeit.

Der Besuch bot zudem die Möglichkeit, durch Gespräche und Beobachtungen Einblicke in zukünftige Marktanforderungen zu gewinnen. Themen wie Ressourcenschonung, Automatisierung und die Integration von Technologien zur Lichtsteuerung und Bewässerung waren zentrale Diskussionspunkte, die auch für unsere Arbeit von Bedeutung sind.

Die **GaLaBau**, eine internationale Leitmesse für urbanes Grün und Freiräume, erwies sich als ideale Plattform für die Evaluierung potenzieller Vertriebskooperationen, da hier Fachbesucher aus unterschiedlichen Bereichen wie Garten- und Landschaftsbau, Stadtplanung und Grünflächenmanagement vertreten waren, was eine gezielte Ansprache potentieller Kooperationspartner ermöglichte.

Hier konnten Kontakte mit Fachleuten geknüpft werden, die ein Interesse an modularen Anbausystemen zeigten, insbesondere im Bereich nachhaltiger urbaner Landwirtschaft. Die ausgestellten Innovationen und Technologien dienten zudem als Inspirationsquelle, um die OFM gezielt weiterzuentwickeln und besser auf die Bedürfnisse des Marktes abzustimmen.

Darüber hinaus bot die GaLaBau die Möglichkeit, Markttrends zu analysieren und von den Erfahrungen anderer Unternehmen zu lernen. Durch Gespräche und Interaktionen mit Ausstellern und Besuchern konnten wichtige Einblicke in die Anforderungen und Erwartungen der Branche gewonnen werden.

Diese Messebesuche trugen zur Erweiterung des Netzwerks und zur Erschließung neuer Lösungsansätze für das Projekt bei.

12. Notwendigkeit und Angemessenheit der im Rahmen des Projekts geleisteten Arbeiten

Die Notwendigkeit und Angemessenheit, der im Rahmen des Projekts geleisteten Arbeiten lassen sich aus den spezifischen Anforderungen und Zielsetzungen des Projekts ableiten. Die Entwicklung des OFM-Moduls, die Optimierung der Steuerungsalgorithmen und die Integration von Jungpflanzenproduktionsmöglichkeiten waren essenzielle Bestandteile, um die angestrebten Ziele hinsichtlich Effizienz, Nachhaltigkeit und Flexibilität zu erreichen.

Insbesondere die iterative Testung und Anpassung technischer und biologischer Komponenten (z. B. Steuerungsalgorithmen, Bewässerungssysteme, Pflanzenbestückung) war notwendig, um den spezifischen Anforderungen an moderne Büroraumbegrünungssysteme gerecht zu werden. Die enge Verknüpfung von Forschungsergebnissen, praktischen Erprobungen und Designüberarbeitungen war dabei ein zentraler Ansatz, der sicherstellte, dass sowohl funktionale als auch gestalterische und wirtschaftliche Anforderungen erfüllt wurden.

Darüber hinaus waren die projektbegleitenden Analysen, wie der Vergleich technischer Umsetzbarkeit mit realen Anwendungsszenarien oder die Evaluierung arbeitsplatzbezogener Faktoren, von zentraler Bedeutung, um ein ganzheitliches System zu entwickeln, das nicht nur technisch einwandfrei funktioniert, sondern auch die Bedürfnisse der Endnutzer berücksichtigt. Die Notwendigkeit dieser Arbeiten wurde durch die erzielten Fortschritte in der Funktionalität und Nutzerfreundlichkeit des Systems sowie durch die Erweiterung der potenziellen Anwendungsfelder bestätigt.

Die geleisteten Arbeiten waren somit nicht nur angemessen, sondern unerlässlich, um den Anforderungen des Projekts gerecht zu werden und die gesetzten Ziele effizient und nachhaltig zu erreichen.

13. Verwertbarkeit des Ergebnisses

Der voraussichtliche Nutzen der Projektergebnisse liegt vor allem in der breiten Verwertbarkeit des entwickelten OFM-Systems sowie den damit einhergehenden Innovationen in den Bereichen Bürobegrünung, Pflanzenpflege und nachhaltige Arbeitsplatzgestaltung. Das System bietet eine effiziente, skalierbare Lösung für die Integration von Pflanzen in Büroumgebungen, was positive Effekte auf die Luftqualität, das Wohlbefinden und die Produktivität der Mitarbeitenden verspricht.

Kommerzielle Nutzung des OFM-Systems

Durch die flexible, modular gestaltete Konstruktion des Systems wird eine breite Zielgruppe adressiert, der Einsatz des Systems ist in Räumen von kleinen Unternehmen bis hin zu Großraumbüros möglich.

Serviceorientierte Anwendung

Durch die integrierte Möglichkeit, Jungpflanzen direkt im System zu kultivieren, können auch Dienstleistungsanbieter der Büropflanzenpflege das System in ihr Portfolio aufnehmen. Dies eröffnet neue Marktchancen, insbesondere für Unternehmen, die bisher keine eigene Pflanzenaufzucht betreiben.

Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz

Die Möglichkeit, Pflanzen im System selbst anzuziehen und eine energieeffiziente Steuerung für Wasser, Licht und Nährstoffe zu gewährleisten, trägt zu einer nachhaltigen Nutzung bei. Diese Eigenschaften machen das System besonders attraktiv für Unternehmen, die Wert auf ökologische Aspekte legen.

Integration in zukünftige Smart-Building-Konzepte

Das System bietet durch seine digitalen Steuerungsmöglichkeiten Potenzial für eine Integration in bestehende Smart-Building-Infrastrukturen, was die Attraktivität für moderne Büroplanungen weiter steigert.

Kooperationen

Es werden Kooperationen mit Architekten und Büroplanern angestrebt, um das OFM-System frühzeitig in Neubauprojekte zu integrieren. Diese strategische Einbindung soll sicherstellen, dass das System bereits bei der Raumplanung optimal berücksichtigt wird und langfristig als fester Bestandteil moderner Bürokonzepte etabliert werden kann.

- **Schnittstellen zur strategischen Zusammenarbeit**

Die zahlreichen Iterationen und Tests verfolgten das Ziel, eine Lösung zu entwickeln, die langfristig eine erfolgreiche Implementierung und Verwertung ermöglicht. Als wesentlicher Erfolgsfaktor wurde die Handhabung der Pflanzen vor Ort, einschließlich ihrer Logistik zum Ernteort, ihrer Entsorgung und ihres Austauschs, identifiziert.

14. Wesentliche Ressourcen

Im Rahmen des Projekts wurden wesentliche Ressourcen in den Bereichen Personalaufwand, Labormusteraufbau und Materialkosten, Reisekosten sowie bezogene Dienstleistungen Dritter eingesetzt, was sich im zahlungsmäßigen Nachweis widerspiegelt. Der Personalaufwand umfasste die Entwicklung und Optimierung der OFM-Systeme, während die Materialkosten für die Erstellung und Validierung der Muster verwendet wurden. Reisekosten entstanden durch die logistische Abstimmung und den Austausch zwischen den FuE-Partnern, sowie weiteren notwendigen Reisen, um eine reibungslose Zusammenarbeit und um einen fortlaufenden Projektfortschritt sicherzustellen. Diese Punkte belegen die gezielte Mittelverwendung und deren Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele.

Personalaufwand

Ein erheblicher Teil der Projektressourcen wurde in die Bereitstellung qualifizierter Arbeitskräfte investiert. Dazu gehörte das Personal, das maßgeblich an der Entwicklung, Implementierung und Optimierung der OFM-Systeme beteiligt war, einschließlich der Erstellung und Anpassung von Algorithmen, der Konzeption und Weiterentwicklung des Designs sowie der Durchführung von Tests an Prototypen und Labormustern.

Labormusteraufbau und Materialkosten

Die agile Erstellung, Entwicklung und Überarbeitung von Labormustern stellte einen zentralen Bestandteil des Projekts dar. Dafür wurden gezielt spezifische Materialien und Komponenten beschafft, um die Funktionsfähigkeit der entwickelten Module zu testen und zu validieren. Die Labormuster dienten der iterativen Optimierung der technischen Infrastruktur, einschließlich der Steuerungssysteme und Bewässerungsmechanismen. Gleichzeitig wurde die Integration der OFM und deren Anpassungsfähigkeit an bestehende Büroräume und Arbeitsabläufe getestet und validiert.

Reisekosten durch Logistik zwischen den FuE-Partnern

Die Zusammenarbeit zwischen den Forschungspartnern erforderte eine koordinierte Logistik und den Austausch von Materialien, Labormustern und Testergebnissen. Dienstreisen waren notwendig, um die Abstimmung zwischen den Partnern sicherzustellen, technische Details zu klären und die Fortschritte direkt vor Ort zu evaluieren. Diese Reisen trugen wesentlich zur erfolgreichen Durchführung des Projekts bei und unterstützten die enge Zusammenarbeit aller Beteiligten.