

Untersuchungen zum geschützten Pflanzenbau im urbanen Bereich in Berlin und Mexiko-Stadt

Abschlussbericht Humboldt-Universität zu Berlin (FKZ: 01DN16032)

Projektlaufzeit: 01.11.16 – 31.12.2023

Projektleiter und -koordinator: Dr. Dennis Dannehl

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1. Kurzdarstellung	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde.....	7
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Eingehende Darstellung	8
2.1. Vorgesehene Zuwendungen sowie Gegenüberstellung der Ziele und der erzielten Ergebnisse.....	8
2.1.1. Datenerhebung zu räumlichen Kapazitäten für urbane Produktionsstätten in Berlin	9
2.1.2. Modellierung von geschlossenen Gewächshäusern zur solaren Wärmeenergiegewinnung mit Wärmespeicherung in oberirdischen Solarlagunen.....	13
2.1.3. Evaluierung wassersparender Produktionsmethoden in geschlossenen Systemen	17
2.1.4. Evaluierung recyclefähiger Substrate	21
2.1.5. Qualität agrarischer Produkte aus dem urbanen Bereich	31
2.1.6. Akzeptanz urbaner Gartenbausysteme.....	35
2.1.7. Substitution der Steinwollsubstrate durch ein Hybridkultursystems	38
2.2. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	45
2.3. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	45
2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Projekts MinTHG bei anderen Stellen.....	47
2.5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	47
3. Referenzen	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Arbeitsplan und Meilensteine	7
Abbildung 2. Klassifikation der Dachflächen nach Landnutzung. Dachflächen zwischen 1000 und 2500 m ² (links) und > 2500 m ² (rechts).....	11
Abbildung 3. Mittlere relative Luftfeuchte in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG).....	18
Abbildung 4. Transpirationsraten in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG)	18
Abbildung 5. Verschiedene Szenarien der Wasserbilanzierung in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG)	19
Abbildung 6. Tägliche generierte Kondensatmenge in Abhängigkeit von der transmittierten Solarstrahlung.....	20
Abbildung 7. Ermittelte volumetrische Wassergehalte bei verschiedenen Saugspannungen von Steinwolle und frischen und alten Hanfschäben.	22
Abbildung 8. Gewichtsabnahme der Substratmatten nach Versuchsende	22
Abbildung 9. Einfluss verschiedener Substratmatten auf den Phänotyp von Tomatenpflanzen	23
Abbildung 10. Standorte der Balkonkästen einschließlich Kategorisierung der Luftverschmutzungsgrade: gering ≤ 1 (grün), moderat 1,21 – 1,50 (gelb und erhöht 1,51 – 1,80 (rot) nach SenSW 21. Quelle Kartenmaterial: https://d-maps.com/carte.php?num_car=6155&lang=de	32
Abbildung 11. Durchschnittliches Frischgewicht der Salatköpfe (Lactuca sativa ‘Descartes’) in Abhängigkeit der Ausrichtung der Balkonkästen.....	33
Abbildung 12. Wofür sollten die Dachflächen in Berlin genutzt werden?.....	35
Abbildung 13. Wofür sollten die Dachflächen in Berlin genutzt werden?.....	36
Abbildung 14. Abschätzung der innerstädtischen Lebensmittelproduktion	38
Abbildung 15. Tunnelvariante des Hybrid Aeroponik-NFT-Systems	39
Abbildung 16. Rohrvariante des Hybrid Aeroponik-NFT-Systems	39
Abbildung 17. Effekte verschiedener Anbausysteme auf den Salatkopfdurchmesser während des Wachstums. Nur bei signifikanten Unterschieden signalisieren differente Buchstaben einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$).	40
Abbildung 18. Einflüsse verschiedener Anbausysteme auf den Chlorophyllgehalt während des Wachstums. Nur bei signifikanten Unterschieden signalisieren differente Buchstaben einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$).	40

Abbildung 19. Einfluss verschiedener Anbausysteme auf den Ertrag. Signifikante Unterschiede sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet ($p < 0,05$).....	41
Abbildung 20. Einfluss verstopfter Sprühnebeldüsen auf die Umdrehungen des Durchflussmengenmessers.....	42
Abbildung 21. Schematische Darstellung des Überwachungs- und Warnsystems	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Dachanzahl und Dachfläche für die einzelnen Bezirke in Berlin in der Kategorie 1000 – 2500 m ²	10
Tabelle 2. Dachanzahl und Dachfläche für die einzelnen Bezirke in Berlin > 2500 m ²	10
Tabelle 3. Supermarktdachflächen sortiert nach Landnutzungskategorien.....	12
Tabelle 4. Benötigte Dachflächen um jährlichen Gemüsebedarf in Berlin zu decken	13
Tabelle 5. Globalstrahlungssumme die auf die jeweilige Dachfläche pro Monat auftritt.....	14
Tabelle 6. Modellierte Speicherladung pro Monat in Abhängigkeit der Dachfläche.....	14
Tabelle 7. Speicherentladung pro Monat für die Beheizung des Gewächshauses in Abhängigkeit der Gewächshausdachfläche	16
Tabelle 8. Speicherentladung pro Monat für den Wärmeenergieexport in Abhängigkeit der Gewächshausdachfläche	17
Tabelle 9. Merkmale der organo-mineralischen Kultursubstratrückstände und der Evapotranspiration bis 25 Tage nach der Aussaat.....	25
Tabelle 10. Nährstoffgehalte in Substratrestoff.....	26
Tabelle 11. SPAD Werte in Brassica carinata gewachsen in verschiedenen Substratrestoffen.....	26
Tabelle 12. Pflanzenentwicklung von äthiopischen Grünkohlpflanzen, die auf verschiedenen Kultursubstraten angebaut wurden	27
Tabelle 13. Pflanzenparameter der äthiopischen Grünkohlpflanzen am Ende des Versuchs	28
Tabelle 14. Gesamtnährstoffgehalt pro Pflanze und geschätzte relative Nährstoffaufnahme von äthiopischem Grünkohl, der 64 Tage lang in verschiedenen Kultursubstraten angebaut wurde	28
Tabelle 15. Potenzielle Einsparung von Nährstoffen [kg/ha] und des damit verbundenen Energieverbrauchs [MJ/ha] sowie von CO ₂ -Äquivalenten [kg/ha] durch die Wiederverwendung von Kultursubstratrückständen als Dünger für verschiedene Kulturen	29
Tabelle 16. Einfluss der Luftverschmutzung und der Behandlung auf die Akkumulation von Schwermetallen und Mikronährstoffen im Salat	34
Tabelle 17. Ergebnisse für die einzelnen Schritte der Testläufe	44

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel bestand darin Wissen um die Machbarkeit der Integration des pflanzlichen Intensivanbaus in peri-urbanen und urbanen Strukturen von Megacities mit Abschätzung der notwendigen technischen, infrastrukturellen und sozialökonomischen Bedingungen zu akkumulieren. Dabei sollten Erkenntnisse aus exzellent bewerteten vorangegangenen Forschungsprojekten zum intensiven Pflanzenbau (Nachhaltigkeitspreis Forschung 2014 des BMBF) auf die Bedingungen in Großstädten übertragen werden. Weiterhin sollten Aussagen zu zukünftig möglichen Szenarien der peri-urbanen und urbanen Pflanzenproduktion in geschlossenen Systemen getroffen und symbiotische Effekte für Gartenbau und Stadtinfrastruktur dargestellt werden. Dieses sollte durch Umfragen, Pflanzenexperimente, Analysen und Simulationsrechnungen erreicht werden.

Realisiert werden sollte dieses Projekt durch den physischen und geistigen Austausch mexikanischer und deutscher Wissenschaftler*innen. Mit der Umsetzung des Projekts „UNCOVER“ sollte die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen mexikanischen und deutschen Kolleg*innen in einer hochinteressanten fachlichen Zusammensetzung (Ingenieurwissenschaften, intensiver Pflanzenbau, Urbaner Gartenbau, mathematische Systemmodellierung) fortgesetzt werden. Die internationale Vernetzung auf dem Gebiet der Bio-Ökonomie sollte der Arbeitsgruppe in Chapingo neue Perspektiven auf diesem komplexen und interessanten Forschungsbereich eröffnen und der Arbeitsgruppe in Berlin neue Möglichkeiten zur Entwicklung und Adaption von Technologien in Bezug auf Megacity-Bedingungen eröffnen.

Die wissenschaftlichen Arbeitsziele basierten auf die Ziele vieler Länder, die Emissionseinträge und den Verbrauch von Wasser und Energie zu reduzieren sowie den Anteil des Abfallrecyclings und die Pflanzenproduktion insbesondere in Großstädten zu erhöhen. Mittels Machbarkeitsstudie sollten potenzielle Flächen für eine pflanzliche Produktion in innerstädtischen Regionen ermittelt werden. In bilateraler Zusammenarbeit sollte geprüft werden, inwieweit Abwasser aus Haushalten und Regenwasser für die pflanzliche Produktion wiederverwendet werden können. Mittels erhobener Daten in Berlin und Mexiko, sollten die Wassereinsparungen mittels modellgestützter Kalkulation auf größere Flächen übertragen werden. Weiterhin sollten gewonnene Daten in der Gewächshausversuchsanlage in Berlin genutzt, um mittels neuronaler Netze Berechnungen zu generierten Energiemengen in unterschiedlich großdimensionierten Gewächshäusern durchzuführen. Darüber hinaus sollten aber auch neue Anbausysteme für rezirkulierende System entwickelt und getestet werden, um den Abfallstrom im Gewächshaus zu reduzieren. Dabei sollte in einer Vergleichsstudie zwischen beiden Städten geprüft werden, ob urban oder peri-urban produzierte Lebensmittel aufgrund einer höheren Luftverschmutzung qualitativ minderwertiger sind.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt UNCOVER wurde mit 2 Projektpartnern (Humboldt-Universität zu Berlin (HU) und der Universidad Autónoma Chapingo (UACH) erfolgreich realisiert. Hierbei stellte die HU die Experimentieranlagen, insbesondere semi-geschlossenen Gewächshäuser und die Experimentalkabinen. Die Zusammenarbeit mit den beiden Projektpartnern war nötig, um die gesteckten Ziele erfolgreich zu erreichen. In diesem Kontext wurden neben der Finanzierung der wissenschaftlichen Aufenthalte im Ausland auch eine Koordinatorinstelle und Sachmittel finanziert.

Wurde das Projekt zuerst vom 01.11.2016 bis 31.10.2019 bewilligt, so erfolgte eine erste Verlängerung um 12 Monate bis zum 31.10.2020. Diese Verlängerung kam hauptsächlich durch einen Regierungswechsel und einem damit in Verbindung stehenden Streik unserer Kolleg*innen an der UACH zustande. In dieser Zeit wurde dort das komplette Präsidium und der UACH ausgetauscht, wodurch es zu einer Verzögerung der Mittelfreigaben für das Projekt UNCOVER gab. Eine zweite (bis 31.10.2021) und dritte Verlängerung (31.10.2022) war dann unter anderem der Pandemie (SARS-Cov-2) und dem Sachverhalt geschuldet, dass ein geschätzter Kollege aus der mexikanischen UNCOVER-Arbeitsgruppe an COVID-19 verstorben ist. Darüber hinaus wurde anschließend noch einmal eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2023 beantragt. Der Grund bestand darin, dass noch ein Workshop und Wissenschaftler austausche offen waren, die in den vergangenen Jahren der Pandemie, aber auch in dem Jahr 2022 nicht realisiert werden konnten, obwohl das Hauptbestandteil des Projekts war. Die geplanten Reisen fanden somit im Jahr 2023 statt. In diesem Kontext wurden die Ergebnisse beider Projektpartner im Rahmen einer internationalen Tagung (Greensys 2023 in Mexiko), die von unseren mexikanischen Kolleg*innen organisiert wurde, präsentiert.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprüngliche Arbeitsplan und die Meilensteine sind in Abbildung 1 dargestellt. In diesem Zusammenhang wurden alle Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen. Ende 2017, 2018 und 2019 lagen wir mit allen Arbeitspaketen und Meilensteinen im vorgegebenen Zeitplan. Die Recherche und Datenerhebung zu räumlichen Kapazitäten für urbane Produktionsstätten in Berlin sowie die Modellierung von geschlossenen Gewächshäusern zur solaren Wärmeenergiegewinnung mit Wärmespeicherung in oberirdischen Solarlagunen waren abgeschlossen. Arbeiten zur Evaluierung recyclefähiger Substrate wurden 2017 begonnen und 2018 sowie fortgesetzt. Das gleiche gilt für die Modellentwicklung zu den Synergien zwischen intensiver Pflanzenproduktion und urbanen Infrastrukturen. Darüber hinaus wurde auch die Akzeptanzanalyse begonnen, ein substratloses Kultursystem entwickelt und ein weiterer Versuch geplant, bei dem ein Alarmsystem für dieses Kultursystem entwickelt werden sollte. Wie be-

reits erwähnt wurde dann eine Projektverlängerung bis zum 31.10.2020 beantragt, was hauptsächlich dadurch zu Stande, dass es in Mexiko einen Regierungswechsel und einem damit in Verbindung stehenden Streik unsere Kolleg*innen an der UACH gab. In dieser Zeit wurde das komplette Präsidium an der UACH ausgetauscht, wodurch es zu einer Verzögerung der Mittel-freigaben für das Projekt UNCOVER gab.

Ende 2020 waren die Arbeitspakete abgeschlossen und die Meilensteine 1-4 erreicht. Durch die Coronapandemie konnten allerdings keine Austausche der Wissenschaftler*innen vorgenommen werden, wodurch die Ergebnisse nicht präsentiert und ein geistiger Austausch nicht stattfinden konnte. Wie bereits unter 1.2. erwähnt, wurde deswegen das Projekt erst Ende 2023 abgeschlossen.

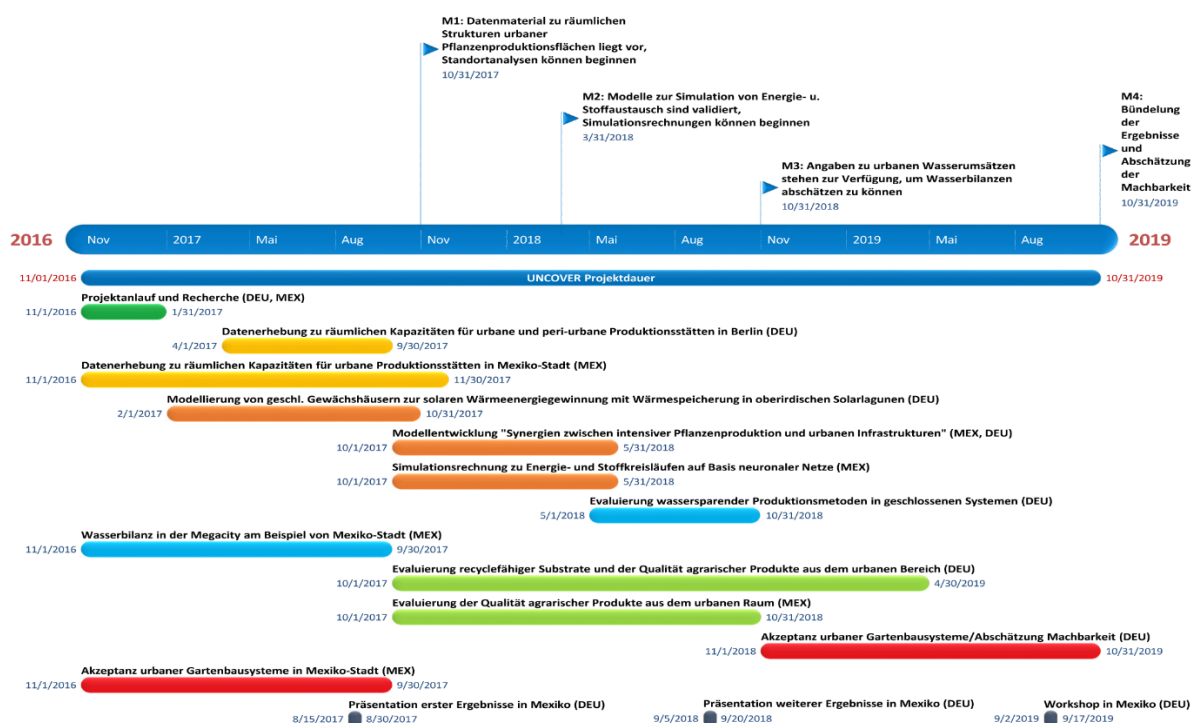


Abbildung 1. Arbeitsplan und Meilensteine

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Betrachtungen zu konkreten Planungen der Pflanzenproduktion in Großstädten bezüglich infrastruktureller Bedingungen, Größenordnungen von Energie- und Massenströmen bis hin zu ökonomischen und sozialen Auswirkungen wurden bis zum Projektbeginn nicht ausreichend untersucht. Deswegen waren Studien erforderlich, die intensive Pflanzenproduktionssysteme in das urbane und peri-urbane Umfeld unter Berücksichtigung der technischen und sozialen Bedingungen einpassen. Mit dem abgeschlossenen Teilprojekt geschlossene Gewächshäuser als thermische Solarkollektoren (ZINEG, HU-Berlin) konnte herausgearbeitet werden, dass in intensiven Pflanzenproduktionsanlagen in geschlossenen Kreisläufen hohe Erträge und Produktqualitäten erzielt werden können^{1,2}. Daneben kann Wasser und Dünger

eingespart sowie Energie an andere Verbraucher abgegeben werden^{3,4}. Weitere Untersuchungsergebnisse in hydroponischen Systemen zeigen, dass umweltschädigende Steinwollsubstrate durch einige organische Substrate substituiert werden können⁵. Allerdings sind die Alternativen zur Steinwolle in ihrer Zahl ausbaubar. Darüber hinaus zeigen erste Ergebnisse, dass diese Reststoffe, insbesondere benutzte organo-mineralische Substrate aus dem hydroponischen Gemüseanbau, zur Bodenverbesserung und -aufdüngung im Freiland genutzt werden können⁶. Untersuchungen zu diesem Thema waren in dem Projekt UNCOVER vorgesehen.

Eine weitere Vorstellung ist allerdings, dass komplett auf Substrate im intensiven Gemüseanbau verzichtet wird. Bereits bestehende System wie „nutrient film technique (NFT)“, „deep water culture (DWC)“ oder „aeroponics (AP)“ sind allerdings für intensive Kulturen nicht ausgelegt. Die Entwicklung eines Prototyps, bei dem ein Hybridsystem bestehend aus NFT und AP entwickelt werden sollte, war im Projekt UNCOVER ebenfalls vorgesehen.

Insgesamt betrachtet, könnte die Einbindung solcher Anlagen in Siedlungsräumen wie Stadtgebieten oder Industrie- und Gewerbeparks Vorteile in Bezug auf Synergien bei Energie- und Wasserversorgung, Nähe zum Konsumenten und Transparenz der pflanzlichen Produktion bringen.

An dieser Stelle sollten insbesondere die Erfahrungen mit geschlossenen Kreisläufen im Intensivanbau im Folgenden herausgestellt werden, um Energie, Dünger, Wasser und Substratabfall einzusparen: i) Datenerhebung zu räumlichen Kapazitäten für urbane Produktionsstätte in Berlin; ii) Evaluierung mehrjährige Messreihen zu Energie- und Stoffbilanzen; iii) Herausstellung von Synergien zwischen intensiver Pflanzenproduktion und urbaner Infrastrukturen; iv) Analysen zu Produktquantität und –qualität agrarischer Produkte aus dem urbanen Bereich; v) Evaluierung recyclefähiger Substrate als Ersatz für Steinwollsubstrate; vi) Entwicklung eines Prozessleitsystems und Einbindung künstlicher Intelligenz zur Steuerung des Energie- und Stoffaustausches; vii) Akzeptanzanalyse urbaner Gartenbausysteme.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In dem Projekt UNCOVER wurde sich hauptsächlich auf die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner konzentriert. Deswegen wurde nicht mit anderen Stellen zusammengearbeitet.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Vorgesehene Zuwendungen sowie Gegenüberstellung der Ziele und der erzielten Ergebnisse

Um den Arbeitsaufwand der geschnürten Arbeitspakete und die Reisen in dem Projekt UNCOVER erfolgreich zu realisieren, waren im Gesamtfinanzierungsplan 91.300,55 € für Personalausgaben (812), 5.113,00 € für die Vergabe von Aufträgen (835), 15.365,67 € für sons-

tige allgemeine Verwaltungsaufgaben und 34.688,00 € für Dienstreisen vorgesehen. Der Verwendungsnachweis wird extra eingereicht.

2.1.1. Datenerhebung zu räumlichen Kapazitäten für urbane Produktionsstätten in Berlin

Um diese Aufgabe zu erfüllen, wurden zuerst Kriterien festgelegt, um die potentiellen Dachflächen für den urbanen Anbau zu ermitteln. In diesem Zusammenhang wurden alle Gebäude innerhalb Berlins erfasst, die folgende Kriterien erfüllten:

- Dachflächen zwischen 1000 m² und 2500 m²
- Dachflächen > 2500 m²
- Dachflächen mit einer Dachneigung < 1 %

Weiterhin wurden die Gesamtanzahl und die Gesamtfläche der Dächer für die jeweiligen Bezirke ermittelt. Die Gebäude wurden nach der Landnutzung klassifiziert und ihre Funktion ermittelt. Methodisch wurden diese Aufgaben mit frei zugänglichen GIS Programmen wie 3DCityDB importer/exporter v.3.3.1, PgAdminIII/PostgreSQL database with its spatial extension Postgis, QGIS 2.16, H2GIS und Notepad++ realisiert. Alle Informationen, die im Folgenden angegeben werden, wurden von Daten generiert, die von dem Geography Markup Language (GML) application schema CityGML angeboten werden.

Die Ergebnisse in Tabelle 1 verdeutlichen, dass die meisten Dächer und die größten Gesamtflächen der Dächer zwischen 1000 und 2500 m² in den Bezirken Lichtenberg, Mitte und Marzahn-Hellersdorf vorzufinden sind. Die Dachanzahl variiert in diesen Bezirken zwischen 298 und 340 Dächer und die gesamte Dachfläche zwischen 42 und 48 ha. Demgegenüber fallen die Dachanzahlen und die gesamten Dachflächen hinsichtlich der erwähnten Dachflächenkategorie in den Bezirken Friedrichshain-Kreuzberg, Treptow-Köpenick und Steglitz-Zehlendorf am geringsten aus. Die Dachanzahl der drei Bezirke liegt bei ca. 180 und die Dächer erreichen insgesamt eine Fläche von ca. 27 ha. Die übrigen Bezirke erreichen eine durchschnittliche Gesamtdachanzahl von 238 und eine mittlere Gesamtfläche von 34,5 ha. Die mittlere Dachfläche pro Dach ist für alle Bezirke ähnlich und liegt zwischen 0,14 und 0,15 ha. Die gesamte für urbane Produktionsstätten zur Verfügung stehende Dachfläche in Berlin liegt bei 424 ha, wenn Dachflächen zwischen 1000 und 2500 m² betrachtet werden.

Tabelle 1. Dachanzahl und Dachfläche für die einzelnen Bezirke in Berlin in der Kategorie 1000 – 2500 m²

Bezirk	Dachflächen zwischen 1000 und 2500 m ²		
	Anzahl Dächer	Dachfläche gesamt (ha)	Mittlere Fläche/Dach (ha)
Lichtenberg	340	48	0,14
Mitte	325	47	0,14
Marzahn-Hellersdorf	298	42	0,14
Friedrichshain-Kreuzberg	177	27	0,15
Neukölln	267	38	0,14
Tempelhof-Schöneberg	271	40	0,15
Charlottenburg-Wilmersdorf	234	33	0,14
Spandau	210	31	0,15
Reinickendorf	224	33	0,15
Pankow	224	32	0,14
Steglitz-Zehlendorf	187	27	0,14
Treptow-Köpenick	177	26	0,14

Werden die Dachflächen größer als 2500 m² in Augenschein genommen (Tabelle 2), so fällt auf, dass die Randbezirke Tempelhof-Schöneberg, Reinickendorf und Spandau die größten Gesamtdachflächen mit 67, 58 und 57 ha entsprechend ausmachen. Die größte mittlere Dachfläche pro Dach wird im Bezirk Tempelhof-Schöneberg (0,58 ha) gefolgt von den Bezirken Reinickendorf (0,55 ha) und Pankow (0,54 ha) erreicht. Dieser Berechnung liegt einer jeweiligen Dachanzahl von 116, 106 und 67 zu Grunde. Die geringste Dachanzahl wird in den Bezirken Steglitz-Zehlendorf (39) und Friedrichshain-Kreuzberg (44) erreicht, die einer Gesamtdachfläche von jeweils 19 ha entsprechen. Werden die Dachflächen (> 2500 m²) aufsummiert, ergibt sich eine Produktionsfläche im urbanen Bereich von 500 ha, die bei Berücksichtigung der Dachflächen zwischen 1000 und 2500 m² auf 924 ha ansteigt.

Tabelle 2. Dachanzahl und Dachfläche für die einzelnen Bezirke in Berlin > 2500 m²

Bezirk	Dachflächen > 2500 m ²		
	Anzahl Dächer	Dachfläche gesamt (ha)	Mittlere Fläche/Dach (ha)
Lichtenberg	104	53	0,51
Mitte	95	41	0,44
Marzahn-Hellersdorf	80	40	0,50
Friedrichshain-Kreuzberg	44	19	0,42
Neukölln	62	30	0,48
Tempelhof-Schöneberg	116	67	0,58
Charlottenburg-Wilmersdorf	99	43	0,25
Spandau	110	57	0,30
Reinickendorf	106	58	0,55
Pankow	67	36	0,54
Steglitz-Zehlendorf	39	19	0,50
Treptow-Köpenick	76	37	0,48

Es kann also festgestellt werden, dass bei einer Realisierung urbaner Produktionsstätten die Verteilung kleinerer Produktionsflächen eher im Zentrum und die größerer Produktionsflächen vorzugsweise in den Randgebieten Berlins wiederzufinden sind. Alle betrachteten Dä-

cher wurden unabhängig der Bedingungen der Gebäudestatik im Sinne einer Vorauswahl gelistet. An GIS Programme gekoppelte Datenbanken für die Statik existieren noch nicht. Dennoch ist jedes Gebäude mittels einer Datenbank und mit Hilfe von Google Earth ausfindig zu machen, um bei Bedarf die Statik der Gebäude anhand eventuell verfügbarer Daten zu prüfen.

Werden die geeigneten Dachflächen nach der Landnutzung klassifiziert (1000 – 2500 m²), ergibt sich auf Wohngebäuden eine Gesamtdachfläche von 160,46 ha, die größtenteils von der Kategorie Industriegebäude (75,26 ha) und der gewerblichen Nutzung (69,28 ha) wie Gastronomie, öffentlichen Gebäuden, Handel, Lagerung usw. vereinnahmt werden (Abbildung 2). Dachflächen in Kleingarten- und Parkanlagen sowie Militärbauwerke und Friedhöfe fallen wie erwartet nicht weiter ins Gewicht. Letzteres gilt auch wenn die Landnutzung von Flächen > 2500 m² in Augenschein genommen wird. Im Detail wird allerdings sichtbar, dass die Verteilung der Flächen zu Gunsten der industriellen Landnutzung verschoben ist. Diese nimmt mit 174,55 ha die größte Fläche ein, gefolgt von der gewerblichen Nutzung (98,28 ha) und den Wohngebäuden (44,7 ha).

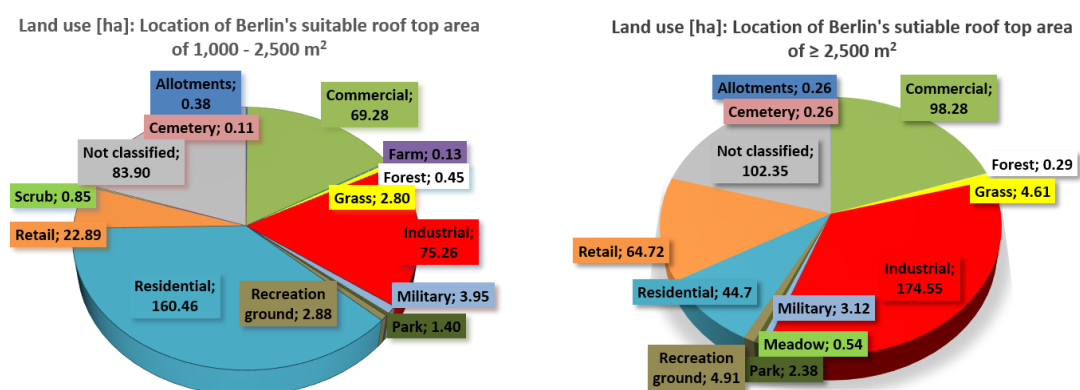


Abbildung 2. Klassifikation der Dachflächen nach Landnutzung. Dachflächen zwischen 1000 und 2500 m² (links) und > 2500 m² (rechts)

Neben den klassifizierten Landnutzungsflächen sollen in einer weiterführenden Studie mögliche Synergien zwischen den detektierten Gebäuden und den Produktionsstätten auf ihnen abgeschätzt werden. Deswegen wurde in einem ersten Schritt exemplarisch untersucht, welche Supermarktdächer für eine Pflanzenproduktionsstätte geeignet wären und in welche Landnutzungskategorie die Supermarktdächer einzuordnen sind. Insgesamt wurden 66 Supermarktdächer mit einer Gesamtfläche von 9,41 ha detektiert, wenn eine Dachfläche zwischen 1000 und 2500 m² in den Auswahlkriterien mitberücksichtigt wurde. Bei Dächern > 2500 m² sank die Anzahl der Dächer auf 24, wobei die Gesamtdachfläche auf 10,57 ha anstieg (Tabelle 3). In der Landnutzungskategorie Wohngebäude und Einzelhandel existieren jeweils knapp 23 Dächer mit einer jeweiligen Gesamtdachfläche von etwas über 3 ha (1000

und 2500 m²). Diese beiden Landnutzungskategorien sind auch bei der Betrachtung der Dächer > 2500 m² favorisiert (Tabelle 3). Anteilig verschiebt sich die Anzahl der Dächer allerdings stark zu der Landnutzungskategorie Einzelhandel mit 15 Dächern und einer Gesamtfläche von 6,80 ha. In der Landnutzung Wohngebäude sind es 3 Dächer mit insgesamt 0,93 ha. Die Gewerbliche Landnutzung macht noch einen Anteil von 6,3 % (1000 und 2500 m²) und 7,9 % (> 2500 m²) an der entsprechenden Gesamtdachfläche aus. Dagegen können die Landnutzungskategorien Kleingärten, Industrie und Park vernachlässigt werden, da ihr Anteil an der Gesamtfläche als sehr gering zu bewerten ist. Zusammenfassend kann also geschlossen werden, dass auf einer Gesamtsupermarktfäche von 90 ha Lebensmittel produziert werden könnten, die frisch geerntet direkt an die Supermärkte abgegeben werden können.

Tabelle 3. Supermarktdachflächen sortiert nach Landnutzungskategorien

Landnutzung	Supermärkte			
	Anzahl		Fläche (ha)	
	1000 – 2500 m ² Dachfläche	>2500 m ² Dachfläche	1000 – 2500 m ² Dachfläche	>2500 m ² Dach- fläche
Kleingärten	0	1	0,00	0,26
Gewerbe	4	2	0,59	0,84
Industrie	1	0	0,16	0,00
Wohngebäude	24	3	3,55	0,93
Einzelhandel	23	15	3,21	6,80
Park	1	0	0,11	0,00
k. A.	13	3	1,80	1,74
Total	66	24	9,41	10,57

Abschließend zu diesem Arbeitspaket wurde noch der jährliche Verbrauch pflanzlicher Produkte für Berlin berechnet. Dazu wurde der jährliche Pro-Kopf-Verbrauch für die am meist verzehrten Gemüsearten (Tomate, Gurke, Paprika und Salat) nach BMEL ⁷ extrahiert (Tabelle 4) und als Berechnungsgrundlage genutzt. Anschließend wurden die Verbräuche mit der aktuellen Einwohnerzahl Berlins multipliziert, um die jährlich benötigte Gemüsemenge für die einzelnen Kulturen zu kalkulieren. In einem nächsten Schritt wurden dann die maximal möglichen Erträge (kg/m²) hinsichtlich der oben erwähnten Kulturen für den geschützten Gemüsebau nach Müller-Lindenlauf et al. ⁸, TLS ⁹ und Voss ¹⁰ herangezogen, um die benötigte Produktionsfläche zu berechnen, die notwendig ist, um der jährlichen Nachfrage innerhalb Berlins gerecht zu werden.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 ist zu erkennen, dass für den jährlichen Tomaten-, Gurken-, Paprika- und Salatverbrauch eine jeweilige Produktionsfläche von 155,89 ha, 44,10 ha, 88,96 ha bzw. 39,89 ha benötigt wird. Insgesamt entspricht das einer Dachfläche von 328,84 ha. Wird nun wie oben erwähnt die ermittelte Gesamtdachfläche von 924 ha berücksichtigt, so kann diese nicht 1:1 als Nettoproduktionsfläche gegengerechnet werden. Von der Brutto-

anbaufläche müssen nämlich noch 4 % der Fläche für infrastrukturelle Räume und Anlagen (Arbeitswege, Büro, Sanitäre Anlagen, Küche, Verarbeitungshalle, Lagerung und Maschinenräume) abgezogen werden, um die Nettoanbaufläche zu ermitteln. In unserem speziellen Fall wären das ca. 37 ha, wodurch Berlin über eine Nettoanbaufläche von 887 ha verfügt. Um den jährlichen Konsum der Bevölkerung von Berlin zu gewährleisten ist wie dargestellt eine Dachfläche von 328,84 ha nötig. Wird diese nun von 887 ha abgezogen, bleiben immer noch 558,16 ha Dachfläche übrig, die für andere Kulturen wie Zucchini, Kräuter usw. verwendet werden kann. Der jährliche Bedarf an Gemüse in Berlin würde dementsprechend durch eine urbane Produktion in Berlin mehr als gedeckt sein. Es wäre sogar denkbar, einen Teil der Produkte in umliegenden Städten oder Dörfern zu vermarkten.

Tabelle 4. Benötigte Dachflächen, um den jährlichen Gemüsebedarf in Berlin zu decken

Gemüse	Jährlicher Pro-Kopf-Verbrauch in Deutschland [kg]	Jährlicher Gemüsebedarf in Berlin (3520031 Einwohner) [kg]	Durchschnittliche Jahresproduktion in Gewächshäusern [kg/m ²]	Benötigte Dachfläche [ha]
Tomate	24,8	87296769	56,00	155,89
Gurke	6,4	22528198	51,10	44,10
Salat	6,8	23936211	60,00	39,89
Paprika	2,9	10208090	11,48	88,96

2.1.2. Modellierung von geschlossenen Gewächshäusern zur solaren Wärmeenergiegewinnung mit Wärmespeicherung in oberirdischen Solarlagunen

Um die solare Wärmeenergiegewinnung durch geschlossene Gewächshäuser zu berechnen, wurden exemplarisch 3 unterschiedlich große Dachflächen von Wohngebäuden und Supermärkten ausgewählt (Tabelle 5). Anhand dessen sollte aufgezeigt werden, wie viel der gespeicherten Wärmeenergie für die Beheizung des jeweiligen Gewächshauses benötigt wird, wie viel Wärmeenergie für den Export zur Verfügung steht und wie groß das Volumen des Wärmespeichers sein sollte.

Für die Modellierung wurden Mittelwerte der Außenlufttemperatur, der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit verwendet, die zwischen 2010 und 2014 am Standort Berlin Dahlem aufgenommen wurden. Weiterhin wurde ein Lichttransmissionsgrad der Dachkonstruktion von 70 % in den Berechnungen mit einbezogen. Um die Wärmeenergie zu sammeln, wurde eine Kühlfläche von 2 m² (Kühlrippenrohre im Dachbereich) pro m² Gewächshausgrundfläche und eine reversibel betriebene Wärmepumpe mit einer elektrischen Anschlussleistung von 0,13 kW pro m² Gewächshausgrundfläche angenommen. Diese Auslegung basiert auf Erfahrungswerten für die Tomatenkultur, die bei einer Tag-/Nachttemperatur von 20 °C/17 °C von Januar bis November geführt wurde.

Tabelle 5. Globalstrahlungssumme die auf die jeweilige Dachfläche pro Monat auftrifft

	Monat	Dachfläche Wohngebäude (m ²)			Dachfläche Supermärkte (m ²)		
		1000	2502	5011	1003	2504	13090
Globalstrahlung (kWh)	Januar	15442.03	38635.96	77380.02	15488.36	38666.85	200746.40
	Februar	35996.34	90062.84	180377.65	36104.33	90134.83	467952.39
	März	83074.85	207853.27	416288.06	83324.07	208019.42	1079973.01
	April	122018.88	305291.24	611436.61	122384.94	305535.27	1586245.44
	Mai	146111.61	365571.24	732165.26	146549.94	365863.46	1899450.88
	Juni	167742.18	419690.92	840556.04	168245.40	420026.41	2180648.29
	Juli	167640.50	419436.53	840046.54	168143.42	419771.81	2179326.50
	August	137179.92	343224.16	687408.58	137591.46	343498.52	1783338.96
	September	92507.06	231452.66	463552.87	92784.58	231637.67	1202591.76
	Oktober	56811.85	142143.24	284684.17	56982.28	142256.87	738554.03
	November	22408.36	56065.72	112288.29	22475.59	56110.53	291308.68
	Dezember	13427.92	33596.66	67287.31	13468.20	33623.51	174562.96

Die in Tabelle 5 aufgezeigten Werte verdeutlichen, dass die auftreffende Globalstrahlungssumme von der Größe der Dachfläche und der Jahreszeit abhängt. Nimmt die Globalstrahlungssumme von Januar bis Juni stetig zu, so reduziert sich diese wieder ab Juli und erreicht ihr Minimum im Dezember.

Als nächstes wurde die theoretische Speicherladung eines thermischen Energiespeichers betrachtet, die von der oben aufgeführten technischen Ausstattung abhängt. Auch hier ist sofort zu erkennen, dass die Speicherladung in erster Linie von der Kollektorfläche und somit von der Größe der Dachfläche abhängig ist. In den strahlungsarmen Monaten Januar, November und Dezember wird er Speicher kaum oder gar nicht geladen. Das bedeutet, dass in diesen Monaten das Gewächshaus mit anderen Energieträgern beheizt werden muss, wenn die räumlichen Speicherkapazitäten zu klein werden. Demzufolge steht auch keine Energie für den Export zur Verfügung. Ab Februar ändert sich das und der Speicher kann zum ersten Mal geladen werden. In den meisten Fällen der Fallbeispiele wird die höchste Speicherladung im Juni erreicht, was sehr stark mit der einfallenden Globalstrahlung korreliert (Tabelle 6).

Tabelle 6. Modellierter Speicherladung pro Monat in Abhängigkeit der Dachfläche

	Monat	Dachfläche Wohngebäude (m ²)			Dachfläche Supermärkte (m ²)		
		1000	2502	5011	1003	2504	13090
Speicherladung (kWh)	Januar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Februar	497,46	2145,01	5886,29	498,95	2146,73	19632,09
	März	17005,30	52504,92	115298,09	17146,96	52546,89	312893,41
	April	45828,98	122160,97	250942,06	45966,47	122258,62	677348,54
	Mai	63295,55	161777,65	327778,62	63485,44	161906,97	857882,60
	Juni	77034,79	194184,19	390742,11	77265,90	194339,41	1020260,56
	Juli	77061,07	193362,85	387800,53	77292,25	193517,42	1008999,60
	August	71447,90	180047,02	361797,48	71662,25	180190,94	943479,72
	September	46400,83	122596,81	247514,34	46540,03	122694,81	649227,01
	Oktober	10335,16	32685,87	71592,60	10366,17	32712,00	202278,63
	November	0,00	91,07	902,55	0,00	91,15	4001,36
	Dezember	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anhand dieser Kalkulationen wurde als nächstes das Volumen des Energiespeichers errechnet. Als Speichermedium wurde Wasser mit seinen Eigenschaften gewählt. Würde man auf die Erfahrungswerte am Fachgebiet zurückgreifen, so würden 6 m^3 Wasser pro m^2 Grundfläche benötigt, um die größtmögliche Wärmeenergiemenge aus dem Gewächshaus zu generieren. Bei einer kleinen Dachfläche von 1000 m^2 wäre das ein 6000 m^3 großer Wassertank mit einem Gewicht von 6000 t , was die Dachlast eines jeden Gebäudes übertrifft. Deswegen wurden die weiteren Kalkulationen mit einem Tag-/Nachtspeicher durchgeführt. Um die richtige Tankgröße zu wählen, wurde dazu die maximal ausgekoppelte Wärmeenergie pro Tag eines Jahres berücksichtigt. Diese wurde dann umgerechnet auf die Wassermenge, die nötig ist, um diese Wärmeenergie zu speichern, wenn ein Temperaturmaximum des Speichers von 44°C angenommen wurde (Niedrigtemperaturspeicher nach Ergebnissen des ZINEG-Projektes, um Isolierkosten zu sparen und das Wasser auch für die Bewässerung zu nutzen). Daraus ergibt sich, dass die ausgewählten Wohngebäude und Supermärkte einen 80 m^3 Tank für eine knapp 1000 m^2 große Dachfläche und einen 200 m^3 Tank für ca. 2500 m^2 Dachfläche bedürfen. Steigt die Dachfläche auf 5000 m^2 oder ca. 13000 m^2 an, vergrößert sich das Volumen des Tanks entsprechend auf 420 m^3 bzw. 1100 m^3 . Es muss selbstverständlich geprüft werden, ob diese Last von den Dächern gehalten wird. Ist dieses nicht der Fall, müssen alternative Aufstellmöglichkeiten der Tanks gefunden werden. Dazu gehört als erstes die Verlagerung des Wassertanks auf den Boden. In diesem Fall könnte der Wassertank in den Boden versenkt werden, um eine bessere Isolierung und somit einen geringeren Wärmeenergieverlust von diesem zu realisieren. Alternativ wäre auch die Umnutzung von gegebenen unterirdischen Speichertanks, wie zum Beispiel alte Öllagertanks anzudenken. Inwiefern diese Option in die Infrastruktur Berlins integriert werden kann, hängt von den Gegebenheiten vor Ort ab.

Als nächstes konnte dann basierend auf der technischen Ausstattung der Gewächshäuser und anhand der durchschnittlichen Kennzahlen der klimatischen Bedingungen die theoretisch notwendige Wärmeenergie aus der Speicherentladung für die unterschiedlich großen Gewächshäuser pro Monat berechnet werden (Tabelle 7).

Tabelle 7. Speicherentladung pro Monat für die Beheizung des Gewächshauses in Abhängigkeit der Gewächshausdachfläche

	Monat	Dachfläche Wohngebäude (m ²)			Dachfläche Supermärkte (m ²)		
		1000	2502	5011	1003	2504	13090
Speicherentladung (kWh)	Januar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Februar	403,0	1130,97	3421,46	403,72	1131,60	10611,39
	März	13979,56	38722,18	83628,27	14015,86	38749,05	203034,78
	April	13913,47	28471,82	50811,55	13948,27	28489,91	117210,46
	Mai	10150,52	20825,83	37160,09	10173,28	20839,24	85831,53
	Juni	4918,06	10131,35	18130,53	4929,20	10137,94	41986,85
	Juli	1892,83	3804,97	6734,18	1896,95	3807,39	15428,89
	August	3169,22	6481,93	11562,32	3176,27	6486,13	26730,55
	September	9490,79	19621,11	35200,06	9512,28	19633,89	81675,89
	Oktober	9525,24	27451,24	53667,38	9545,64	27467,96	126396,79
	November	0,00	91,07	902,55		91,14	4001,36
	Dezember	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Obwohl im Februar und November eigentlich die größten Wärmeenergiemengen benötigt werden, ist die Speicherentladung in diesen Monaten am geringsten. Das liegt vor allem daran, dass der Speicher aufgrund der niedrigen Globalstrahlung nicht genügend geladen werden kann, um das Gewächshaus mit Wärmeenergie zu versorgen. In den Frühjahrsmonaten dagegen ist der Speicher geladen und es steht genügend Wärmeenergie zur Verfügung, um das Gewächshaus zu beheizen und optimale Kulturbedingungen für die Tomatenpflanzen zu schaffen. Weiterhin ist ersichtlich, dass auch in den Sommermonaten Wärmeenergie für die Gewächshäuser zur Verfügung gestellt werden muss, was in erster Linie auf das Trockenheizen zurückzuführen ist. Dieses wird in vielen Betrieben praktiziert, um die relative Luftfeuchte und den damit in Verbindung stehenden pathogenen Druck zu reduzieren.

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, steht im Februar nicht genügend Wärmeenergie im Speicher zur Verfügung, um das Gewächshaus zu beheizen und trotzdem kann Wärmeenergie exportiert werden (Tabelle 8). Das hängt insbesondere damit zusammen, dass an strahlungsreichen Tagen im Februar der Tag-/Nacht-Speicher überdurchschnittliche aufgeladen werden kann, wodurch an solchen Tagen genügend Wärmeenergie vorhanden ist, um das Gewächshaus ausreichend zu beheizen und darüber hinaus Wärmeenergie zu exportieren. Während der Anteil des Wärmeenergieexports im Februar sehr gering ausfällt, steigt dieser stetig bis zu einem Maximum im Juli an. Mit einer Dachfläche von 1000 m² können im Juli ca. 75 MWh und mit einer Dachfläche von 2500 m² ca. 189 MWh Wärmeenergie exportiert werden (Tabelle 8). Bei einer Supermarktdachfläche von 13000 m² steigt der Wärmeenergieexport sogar auf 993 MWh an. Werden Synergien von Gebäuden in Betracht gezogen, so ist vorstellbar, dass die exportierte Wärmeenergie z.B. für die Beheizung von kleinen Wohnungseinheiten, für die Warmwasseraufbereitung dieser oder für zukünftige Kraft-Wärme-Kälte-Anlagen verwendet wird. Es ist weiterhin vorstellbar, dass die Wärmeenergie für die direkte

Lebensmittelverarbeitung in den Supermärkten genutzt wird. In diesem Zusammenhang könnte man die Wärmeenergie für Trocknungsprozesse der Tomaten einsetzen, um getrocknete Tomaten zu produzieren und im Supermarkt zu vermarkten¹¹. Dadurch können Transportwege und fossile Brennstoffe eingespart werden.

Tabelle 8. Speicherentladung pro Monat für den Wärmeenergieexport in Abhängigkeit der Gewächshausdachfläche

	Monat	Dachfläche Wohngebäude (m ²)			Dachfläche Supermärkte (m ²)		
		1000	2502	5011	1003	2504	13090
Speicherentladung (kWh)	Januar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Februar	94,42	1014,04	2464,82	95,22	1015,12	9020,70
	März	3025,74	13782,74	31669,81	3131,10	13797,84	109858,63
	April	31915,51	93689,15	200130,51	32018,19	93768,70	560138,08
	Mai	53145,02	140951,82	290618,53	53312,15	141067,73	772051,06
	Juni	72116,72	184052,83	372611,57	72336,69	184201,47	978273,70
	Juli	75168,24	189557,88	381066,34	75395,30	189710,02	993570,71
	August	68278,68	173565,08	350235,15	68485,97	173704,81	916749,17
	September	36910,03	102975,70	212314,28	37027,74	103060,91	567551,12
	Oktober	809,92	5234,63	17925,22	820,52	5244,04	75881,83
	November	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dezember	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.1.3. Evaluierung wassersparender Produktionsmethoden in geschlossenen Systemen

Um wassersparende Produktionsmethoden in geschlossenen Systemen evaluieren zu können, wurden die Wasserumsätze einer Tomatenproduktion in einem semi-geschlossenen Gewächshaus mit Kühlrippenrohre betrachtet und derer in einem konventionellen Gewächshaus gegenübergestellt. Die Daten wurden beispielhaft aus dem Jahr 2011 verwendet. Wurden in der konventionellen Klimaführungsstrategie die Lüftungsklappen bei einer Temperatur von 24 °C geöffnet, so wurde dieser Prozess im semi-geschlossenen Gewächshaus bei einer Temperatur von 28 °C aktiviert. Die Auswirkungen dieser Klimaeinstellungen können in Abbildung 3 entnommen werden. Während in dem Gewächshaus mit der konventionellen Klimaeinstellung (RG) die relative Luftfeuchte meistens zwischen 60 und 80 % liegt, so variiert diese im semi-geschlossenen Gewächshaus (KG) zwischen 80 und 95 %. Dieses wirkt sich auf die Transpirationsraten der Tomatenpflanzen aus, welche im KG gegenüber dem RG reduziert sind (Abbildung 4). Durch diesen pflanzenphysiologischen Prozess war es möglich, die Bewässerungstakte und somit die zugefügte Bewässerungsmenge tagsüber im KG zu reduzieren, ohne das Ertragsverluste zu verzeichnen waren (Daten nicht angezeigt). Der phytopathogene Druck wurde ebenfalls nicht erhöht.

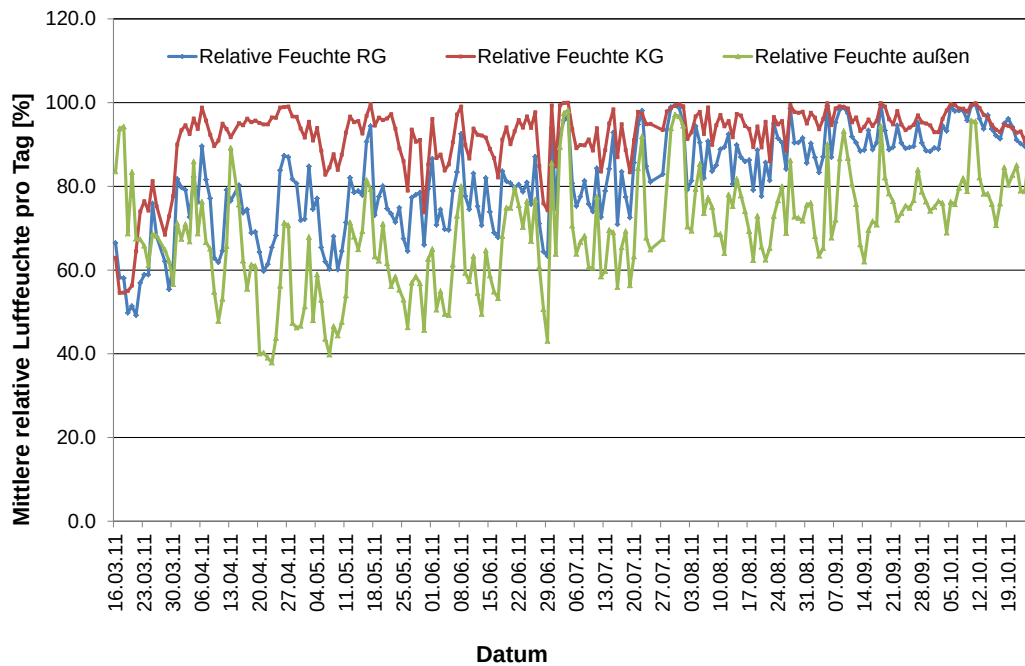


Abbildung 3. Mittlere relative Luftfeuchte in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG)

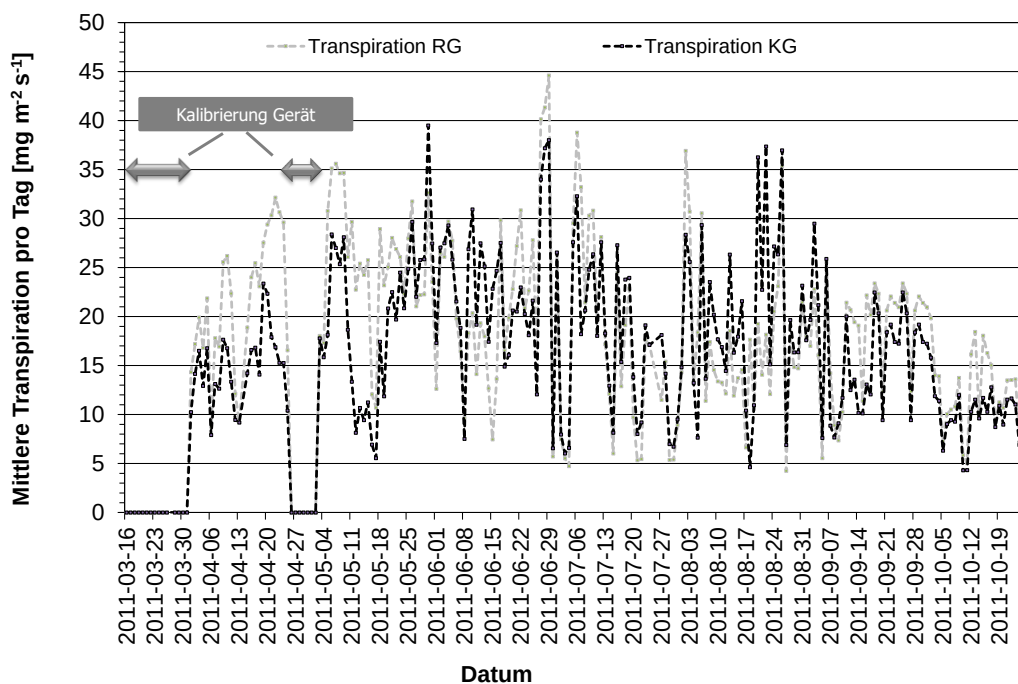
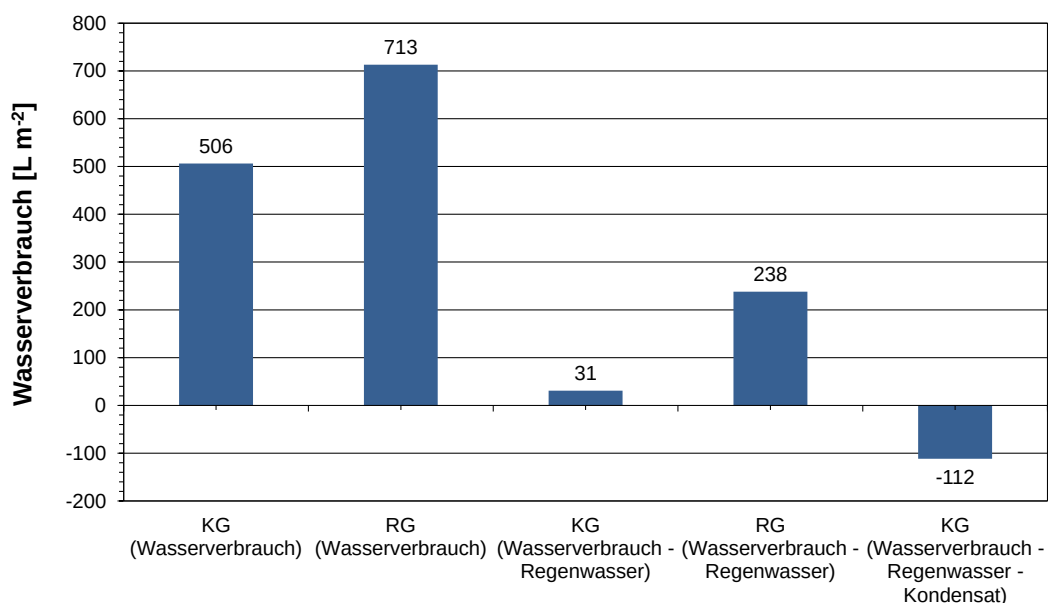


Abbildung 4. Transpirationsraten in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG)

Daraus folgend wurde in einem ersten Szenario der Wasserverbrauch einer Tomatenkultur in Abhängigkeit der beiden Klimaführungsstrategien kalkuliert. Basierend auf die Luftzustände und den damit in Verbindung stehenden pflanzenphysiologischen Reaktionen konnte die Frischwasserzufuhr von 713 L/m^2 im konventionellen Gewächshaus auf 506 L/m^2 im semi-geschlossenen Gewächshaus reduziert werden (Abbildung 5). Das bedeutet, dass allein

durch die Veränderung der Klimaführungsstrategie der Frischwasserverbrauch während der Kulturdauer von der 11. Bis zur 43. Kalenderwoche um 29 % verringert werden konnte. Wird in einem zweiten Schritt das Szenario des Wasserverbrauchs im semi-geschlossenen Gewächshaus ausgeweitet, in dem die gefallen Regenwassermengen in der Kalkulation des Frischwasserverbrauchs mit aufgenommen werden, so kann dieser auf 31 L/m² vermindert werden (Abbildung 5). In einem dritten Szenario wurde dann die über die Kulturdauer gesammelte Kondensatmenge, die durch den Kühlprozess im Gewächshaus generiert wird, mit in den Berechnungen integriert. In diesem Zusammenhang ist in Abbildung 6 exemplarisch für den September im Jahr 2011 die tägliche Kondensatmenge in Abhängigkeit von der transmittierten Solarstrahlung abgebildet. Es ist zu erkennen, dass das täglich anfallende Kondensat zwischen 0,1 und 1,2 L/m² liegt. Wird dieses Kondensat über die gesamte Kulturdauer aufsummiert und anschließend von der bis dahin berechneten Frischwasserverbrauch subtrahiert, so kann dieser auf einen Negativwert von -112 L/m² absinken (Abbildung 5). Das bedeutet, dass durch das semi-geschlossene Gewächshaus am Ende von der Kulturperiode ein Wasserüberschuss/Wasserzugewinn von 112 L/m² erzeugt werden kann.



2011

Abbildung 5. Verschiedene Szenarien der Wasserbilanzierung in Abhängigkeit einer konventionellen (RG) und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie (KG)

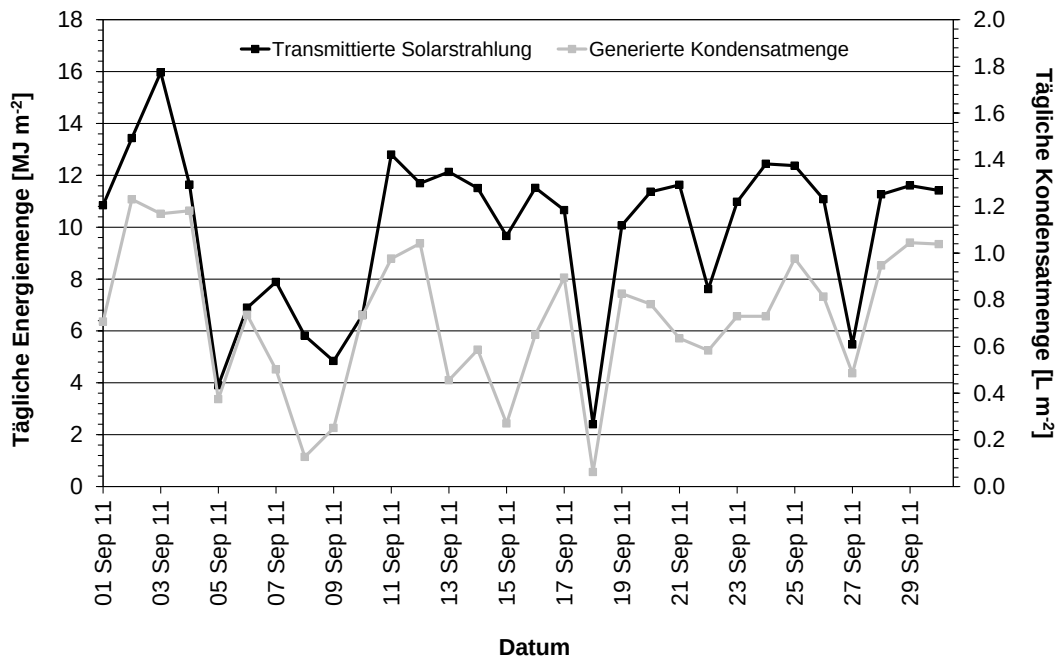


Abbildung 6. Tägliche generierte Kondensatmenge in Abhängigkeit von der transmittierten Solarstrahlung

In einem vierten Szenario wurde ein virtuelles Gewächshaus mit Kühlrippenrohre und einer semi-geschlossenen Klimaführungsstrategie auf eine Dachfläche von 1608,43 m² (= Dachfläche Gewächshaus) in Berlin projiziert. In dem Gebäude befinden sich 24 Apartments mit durchschnittlich 2 Bewohnern. Wird eine 4-prozentige Fläche für die Infrastruktur im Gewächshaus abgezogen, ergibt sich eine Nettoanbaufläche von 1544,1 m². Werden die oben aufgeführten Wasserbilanzierungen berücksichtigt, so erreicht man am Ende der Kulturdauer unter konventionellen Bedingungen einen Gesamtwasserverbrauch von 1101 m³ und unter semi-geschlossenen Bedingungen von 781 m³. Wird das Regenwasser gespeichert und zur Bewässerung wiederverwendet, wird der Frischwasserverbrauch auf 368 m³ unter konventionellen Bedingungen und auf 48 m³ unter semi-geschlossenen Bedingungen reduziert. Wird die generierte Kondensatmenge ebenfalls in der Kalkulation mit aufgenommen, wird ein Wasserüberschuss in der semi-geschlossenen Variante von 173 m³ erzielt. Dieses Überschusswasser, bestehend aus Regen- und Kondensatwasser, kann aufbereitet den Haushalten als Betriebswasser zur Verfügung gestellt werden. In diesem Zusammenhang beträgt der derzeitige tägliche Pro-Kopf-Wasserverbrauch in Deutschland 123 L ¹². Berechnet man diesen Verbrauch auf ein Jahr, ergibt sich ein Gesamtwasserverbrauch von 44,8 m³ pro Person. Würde man diesen Verbrauch mit dem Wasserüberschuss vom Gewächshaus (s.o.) decken, könnten somit in unserem Fallbeispiel fast 4 von 48 Personen für ein Jahr mit Wasser versorgt werden.

Im Umkehrschluss produziert eine Personen pro Tag ca. 60 L Grauwasser, welches beim Baden, Duschen, Händewaschen oder durch das Wäschewaschen entsteht) ¹³. Dieses Was-

ser kann durch unterschiedliche Aufbereitungstechnologien wieder zu einem hochwertigen Betriebswasser aufbereitet und für alle Verwendungszwecke, auch zur Bewässerung, für die der Gesetzesgeber keine Trinkwasserqualität vorschreibt verwendet werden ¹⁴. In Bezug auf unserem Fallbeispiel produzieren so 48 Personen ca. 1051 m³ Grauwassers pro Jahr. Das bedeutet, dass der Wasserbedarf der Tomatenproduktion auf dem Dach der Appartements nicht nur unter semi-geschlossenen, sondern auch unter konventionellen Bedingungen ohne Nutzung des Regenwassers fast zu 100 % abgedeckt wird.

2.1.4. Evaluierung recyclefähiger Substrate

Im hydroponischen Gewächshausanbau werden für Gemüsekulturen weltweit zum größten Teil Steinwollmatten verwendet, die neben Abfall auch hohe CO₂-Emissionen bei ihrer Produktion verursachen⁵. Um dem entgegenzuwirken wurden Hanfschäben aus Abfallresten zu einem Substrat verarbeitet, welches in der hydroponischen Tomatenproduktion getestet und dem Steinwollsubstrat gegenübergestellt wurde.

Die Ergebnisse der volumetrischen Wassergehalte sind in Abbildung 7 dargestellt. Ein erkennbarer Unterschied ist, dass das leicht verfügbare Wasser als Differenz des Wassergehalts bei Saugspannungen von 1 und 1,8 bei Hanfschäben deutlich geringer ist als bei Steinwolle - unter 10 % anstatt 51%. Es ist also zu erkennen, dass bei Hanfschäben ein weitaus größerer Anteil des Wassers so stark gebunden ist, dass er nicht pflanzenverfügbar ist. Insgesamt ist der volumetrische Wassergehalt bei alten Hanfschäben größer als bei frischen. Trotzdem scheint es im hydroponischen Anbau keine spürbaren Nachteile zu geben, da die Pflanzen ihren Nähr- und Wasserbedarf durch die häufig stattfindenden Bewässerung decken können.

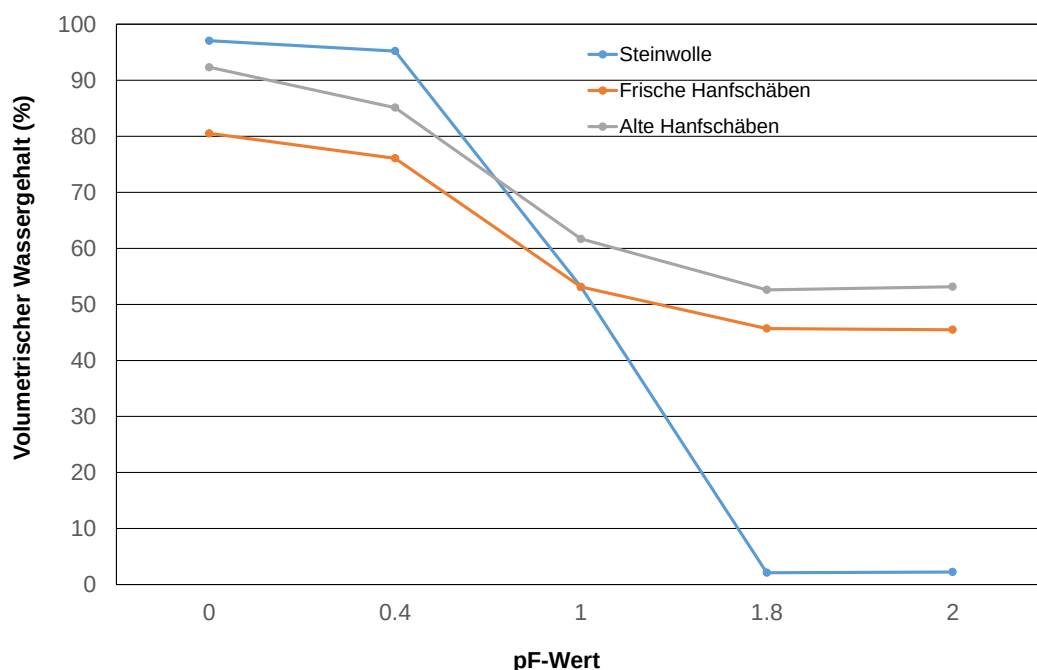


Abbildung 7. Ermittelte volumetrische Wassergehalte bei verschiedenen Saugspannungen von Steinwolle und frischen und alten Hanfschäben.

Die Untersuchungen ergaben weiterhin, dass sich die Hanfschäben in den Matten sehr schnell abbauen. Am Ende der Versuche wurde eine Gewichtsabnahme von 46,6 % kalkuliert (Abbildung 8). Demgegenüber betrug der Gewichtsverlust bei den Steinwollmatten nur 0,5 %, was auf das anorganische Material zurückzuführen ist. Abgeleitet von anderen Studien, sollte eine Gewichtsreduktion von über 30 % nicht überschritten werden¹⁵⁻¹⁹.

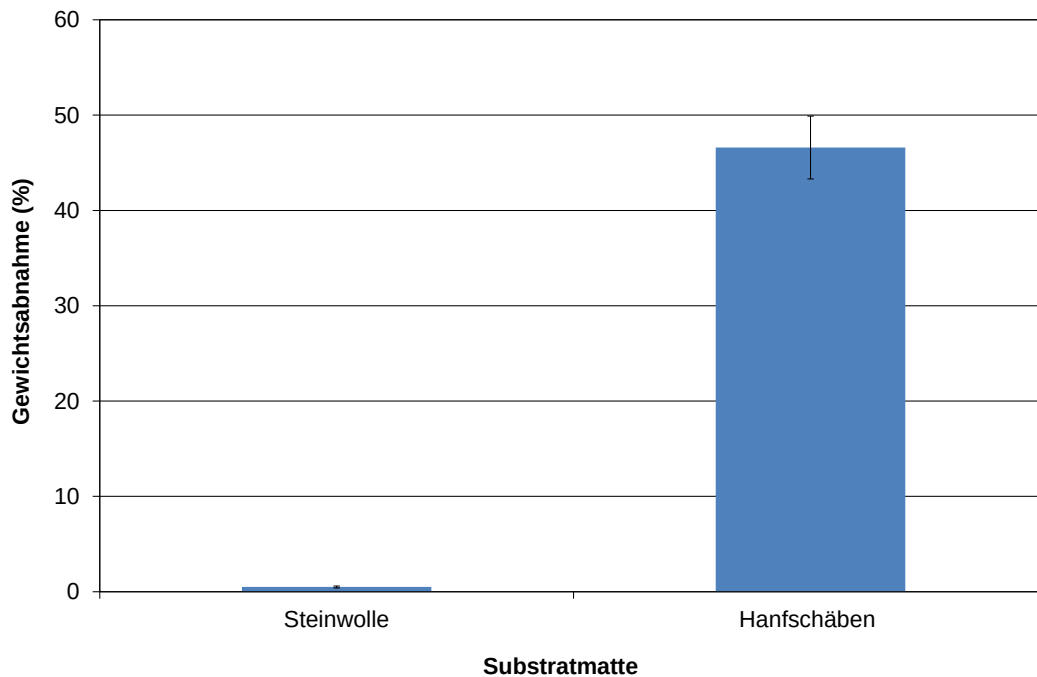


Abbildung 8. Gewichtsabnahme der Substratmatten nach Versuchsende

Bezogen auf eigene Beobachtungen wurde die Standfestigkeit der Pflanzen nicht nachteilig beeinflusst. Sowohl die Pflanzen auf Steinwolle als auch auf Hanfschäben weisen ein normales Wachstum und Erträge auf. Die Blattfläche zum Ende der Versuchsperiode lag bei beiden Varianten bei 1 m², die Rispenanzahl zwischen 11 und 12 und die Erträge bei 2,7 kg pro Pflanze (Abbildung 9). Diese Pflanzenparameter unterschieden sich nicht signifikant. Gleiches gilt auch für weitere Parameter wie den durchschnittlichen Internodienabstand (ca. 7,1 cm), Stängeldurchmesser (ca. 12 mm) und die Blattanzahl (ca. 20/Pflanze).

Es kann geschlussfolgert werden, dass trotz der weniger idealen physikalischen Substrateigenschaften der Hanfschäben diese eine alternative zum Einsatz von Steinwolle sind. Insbesondere bei der Betrachtung des Abfallstroms und des Energieaufwands, schneiden die Hanfschäben bedeutend besser ab, da diese als organische Substanz sogar als Düngemittel in der Freilandproduktion verwendet werden können. Der Energieaufwand zur Herstellung der Hanfschäben ist ebenfalls um ein Vielfaches geringer gegenüber der Steinwolle.

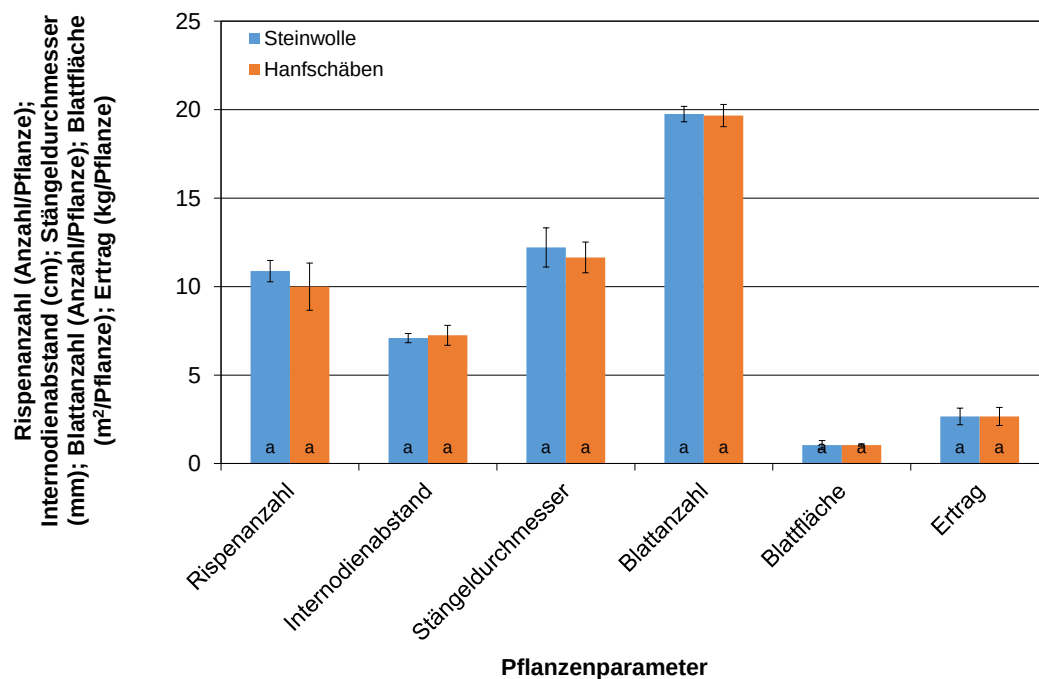


Abbildung 9. Einfluss verschiedener Substratmatten auf den Phänotyp von Tomatenpflanzen

Ob nun in sehr großflächigen Gewächshäusern oder in kleineren Dachgewächshäusern im urbanen Bereich verbleiben am Ende der Tomatenproduktion in Hydrokultur große Mengen ($150 \text{ m}^3/\text{ha}$) an nährstoffreichen Kultursubstratreststoffen. Konventionell werden diese Reststoffe entsorgt, und die Nährstoffe gehen verloren. Um dieses zu verhindern, haben wir Versuche mit gebrauchten organo-mineralischen Reststoffen aus der Hydrokultur durchgeführt. Ziel dieser Studie war es, (i) die Vorteile verschiedener organo-mineralischer Kultursubstrate (Holzfaser, Hanffaser und Torfmoos) aus der hydroponischen Tomatenproduktion als Nährstoffquelle für die Produktion von äthiopischem Grünkohl als Topfkultur zu untersuchen. Darüber hinaus sollte (ii) die Menge der Nährstoffe bestimmt werden, die wiederverwendet werden können, und (iii) die Umweltbelastung abgeschätzt werden, die durch eine solche Praxis vermieden werden kann.

Es wurden drei verschiedene Kulturrestsubstrate verwendet, die während der Kulturperiode von Tomaten mit Nährlösung in Hydrokultur versorgt wurden: Sphagnum palustre-Biomasse, die als Torfmoosreste (SMR) bezeichnet wird, Holzfaserreste (WFR) und Hanffaserreste (HFR). In diesem Zusammenhang wurde zur Erzeugung von äthiopischem Grünkohl von Februar bis April 2021 ein Gewächshausversuch in Berlin-Dahlem, Deutschland, durchgeführt. Die Samen wurden am 24. Februar in einer Tiefe von 2 cm ausgesät. Drei Samen pro Topf ($\varnothing = 16 \text{ cm}$; Höhe = 14 cm; $v = 2,8 \text{ l}$) wurden ausgesät, um die Keimrate zu erfassen, was 24 Samen pro Behandlung ergab. Die Pflanzen wurden dann 7 Tage nach dem Säen (DAS) auf eine Pflanze pro Topf ausgedünnt. Jeder organisch-mineralischer Kultursubstratreststoff wurde mit Quarzsand in einem Volumenverhältnis von 25 % (v/v) oder 50 %

(v/v) gemischt. Die 25 %-Varianten werden mit HFR25, WFR25 und SMR25 abgekürzt, während die 50 %-Varianten als HFR50, WFR50 und SMR50 bezeichnet werden. Der Versuch wurde mit drei Kontrollen abgeschlossen: Die voll gedüngte Kontrolle bestand aus Quarzsand, der mit mineralischen Nährstoffen ergänzt wurde (S100), die Negativkontrolle bestand aus Quarzsand ohne Zusatz von mineralischen Nährstoffen (S0). Drittens wurde Quarzsand mit 50 % der Nährstoffe aus der voll gedüngten Kontrolle verwendet. Diese Gruppe wird als mittlere Kontrolle (S50) bezeichnet. Insgesamt wurden neun Behandlungen untersucht. Jeder Topf der voll gedüngten Kontrolle S100 erhielt insgesamt 400 mg N, 170 mg P, 788 mg K, 96 mg Mg, 326 mg Ca und 126 mg S. Die Nährstoffe wurden als: KH_2PO_4 , (KNO_3) , $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O})$ (Tetrahydrat) und $(\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O})$. Die Mineralien wurden in Form einer Nährlösung 7 DAS (2. März) und 25 DAS (20. März) zugegeben. Die Pflanzen wurden mit einer Feldkapazität von 80 % angebaut. Zehn Wiederholungen pro Behandlung wurden vom 24. Februar bis zum 28. April vollständig randomisiert angeordnet. In den Versuchen selbst wurden unter anderem die Feldkapazität (FC), der Chlorophyllgehalt der Blätter mit dem SAD-Meter, die Erträge, die Blattfläche und die Nährstoffe in den Pflanzen und in den organo-mineralischen Substratreststoffen analysiert.

Das Düngemittel-Einsparpotenzial für N, P, K, Mg, Ca und S durch die Verwendung der mineralorganischen Kultursubstrat-Rückstände wurde anhand des Nährstoffgehalts der mineralorganischen Rückstände und ihrer geschätzten Ausbringungsmenge pro ha berechnet. Neben dem äthiopischen Grünkohl wurden vier der in Deutschland am häufigsten angebauten Kulturen in unsere Berechnungen einbezogen: Mais, Zuckerrüben, Zwiebeln und Weißkohl. Die Ausbringungsmengen wurden so begrenzt, dass die angegebene P-Menge pro ha dem erwarteten P-Entzug durch die jeweilige Kultur pro ha entspricht. Für äthiopischen Grünkohl wurde der Entzug durch den Mittelwert des durchschnittlichen P-Gehalts pro Pflanze sowohl der voll gedüngten Kontrolle als auch der 50 %igen Behandlungen und einer Pflanzendichte von 6 Pflanzen/m² im Freiland berechnet. Für die anderen Kulturen wurden die zu erwartenden Entnahmen mit den Richtwerten für den P-Gehalt nach deutschem Recht und den durchschnittlichen Erträgen pro ha berechnet. Die errechnete Düngereinsparung pro ha wird in kg/ha für jeden eingesetzten Pflanzennährstoff angegeben. Aus diesen Ergebnissen wurde das Einsparpotenzial an Energie [MJ] und CO₂-Äquivalenten [kg] für N, P, K, Ca, Mg und S berechnet.

Die Feldkapazität variierte signifikant zwischen den Behandlungen (SMR > HFR > WFR > Sand) und nahm mit zunehmendem Sandanteil ab (Tab. 1). Die Evapotranspiration reichte von $1016,4 \pm 35,4$ g Wasser (WFR50) bis $1177,4 \pm 19,6$ g Wasser (SMR25) und nahm mit der Menge an Sand in den Kultursubstraten zu (Tabelle 9). Daher kann davon ausgegangen werden, dass Böden, die arm an organischen Verbindungen sind, von einer verbesserten

Wasserspeicherkapazität profitieren könnten, wenn sie mit den Rückständen ergänzt werden.

Tabelle 9. Merkmale der organo-mineralischen Kultursubstratrückstände und der Evapotranspiration bis 25 Tage nach der Aussaat

Treatments	Volum Sand [l/Topf]	Volume Reststoff [l/Topf]	Masse Sand [g/Topf]	Masse Reststoff [g/Topf]	FC [g Wasser/g Substrat]	Evapotranspiration [g Wasser/Topf]
HFR50	1.2	1.2	1920	342	0.40 ± 0.02 b	1038.00 ± 26.98 cd
HFR25	1.8	0.6	2880	171	0.23 ± 0.01 e	1076.13 ± 34.87 bcd
WFR50	1.2	1.2	1920	132	0.38 ± 0.01 c	1016.38 ± 35.44 d
WFR25	1.8	0.6	2880	66	0.24 ± 0.01 e	1059.38 ± 73.26 bcd
SMR50	1.2	1.2	1920	72	0.46 ± 0.01 a	1103.86 ± 22.80 ab
SMR25	1.8	0.6	2880	36	0.26 ± 0.01 d	1177.43 ± 19.61 a
S100	2.4	0	3840	0	0.17 ± 0.00 f	1078.75 ± 20.60 bc
S50	2.4	0	3840	0	0.17 ± 0.00 f	1075.13 ± 51.58 bc
S0	2.4	0	3840	0	0.17 ± 0.00 f	1044.38 ± 16.26 cd

Hanffaserreste (HFR), Holzfaserreste (WFR), Torfmoosreste (SMR) und Sand (S). Die Werte nach den Behandlungen bedeuten den Gehalt an organo-mineralischen Reststoffen in %. Unterschiede sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 10$; für Evapotranspiration Fisher's LSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 8$).

Die Nährstoffgehalte und das C:N-Verhältnis der organo-mineralischen Reststoffe wurden analysiert (Tab. 2). HFR wies den höchsten N-Gehalt und das niedrigste C:N-Verhältnis auf, wobei der N-Gehalt nur im Vergleich zu WFR signifikant höher war. Die Gehalte an P ($121,8 \pm 11,9$ g/kg TM) und Ca ($168,3 \pm 16,9$ g/kg TM) waren in HFR mehr als fünfmal so hoch wie in SMR und WFR. Die höchsten Gehalte an K und Mg wurden in Sphagnum-Rückständen gefunden. Das C:N-Verhältnis von HFR ($13,4 \pm 0,9$) war etwa fünfmal niedriger als bei WFR und etwa dreimal niedriger als bei SMR (Tab. 2). In allen Kultursubstraten waren die Konzentrationen von Ca und P höher oder wesentlich höher als die der anderen Nährstoffe, wobei HFR die größten Unterschiede in der Konzentration der einzelnen Nährstoffe aufwies (N : P : K : Ca : Mg : S = 1 : 11,8 : 0,3 : 14,3 : 0,3 : 0,6) (Tabelle 10).

Tabelle 10. Nährstoffgehalte in Substratreststoffe

Substrate	N	P	K	Mg	Ca	S	C/N
g Nährstoff/kg TM Substratreststoff							
HFR	11.8 ± 2.5 a	121.8 ± 11.9 a	4.0 ± 0.4 b	3.8 ± 0.5 b	168.3 ± 16.9 a	7.3 ± 1.0 a	13.4 ± 0.9 b
WFR	6.6 ± 1.7 b	19.2 ± 3.3 b	7.5 ± 1.7 b	2.9 ± 0.7 b	26.2 ± 4.2 b	5.9 ± 1.1 a	70.2 ± 18.1 a
SMR	8.4 ± 1.8 ab	15.6 ± 2.4 b	11.9 ± 1.8 a	6.9 ± 0.1 a	31.1 ± 2.1 b	5.5 ± 0.9 a	48.6 ± 11.7 a
Sand	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.8 ± 0.0	0.5 ± 0.0	1.2 ± 0.0	0.1 ± 0.0	
g Nährstoff/Topf							
HFR50	4.29	41.90	4.59	3.32	62.23	2.70	
HFR25	2.27	21.06	3.91	2.68	33.46	1.45	
WFR50	1.12	2.76	4.21	2.42	8.14	0.97	
WFR25	0.68	1.50	3.72	2.23	6.41	0.58	
SMR50	0.85	1.36	4.08	2.53	6.92	0.59	
SMR25	0.55	0.79	3.65	2.28	5.80	0.39	
S100	0.65	0.40	4.02	2.14	5.01	0.32	
S50	0.45	0.32	3.62	2.09	4.85	0.26	
S0	0.25	0.23	3.23	2.04	4.68	0.19	

Unterschiede sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 3$).

Die SPAD-Werte aller Behandlungen außer S0 stiegen während des Versuchs kontinuierlich an (Tabelle 11). Bei der Negativkontrolle wurden 16 DAS keine Ergebnisse erzielt. Zu Beginn des Versuchs wurden die höchsten SPAD-Werte (35 ± 2) in Blättern von Hanfpflanzen gemessen, die sich jedoch nur signifikant von den mit WFR25 (28 ± 1) und SMR25 (27 ± 0) behandelten Pflanzen unterschieden. Bei 60 DAS zeigte die voll gedüngte Kontrolle den höchsten SPAD-Wert (54 ± 2), mit einem signifikanten Unterschied zu HFR50 (48 ± 4) > SMR50 > WFR25 > SMR25 > S0 (30 ± 3) (Tabelle 11).

Tabelle 11. SPAD Werte in Brassica carinata gewachsen in verschiedenen Substratreststoffen

Behandlung	16 DAS	25 DAS	60 DAS
HFR50	35 ± 3 a	37 ± 2 a	48 ± 4 bc
HFR25	33 ± 2 a	36 ± 4 a	51 ± 4 ab
WFR50	32 ± 3 ab	34 ± 4 ab	54 ± 2 a
WFR25	28 ± 1 b	33 ± 3 ab	46 ± 4 bc
SMR50	31 ± 1 ab	34 ± 2 ab	48 ± 2 bc
SMR25	27 ± 0 b	34 ± 3 ab	45 ± 4 c
S100	30 ± 1 ab	36 ± 3 a	54 ± 2 a
S50	31 ± 0 ab	34 ± 3 a	49 ± 4 abc
S0	NA	29 ± 2 b	30 ± 3 d

* In S0 waren die Pflanzen bei 16 DAS zu klein (NA = nicht anwendbar). Die angezeigten Daten sind mittlere SPAD-Werte von fünf Messungen am jüngsten voll entwickelten Blatt pro Pflanze, von acht Pflanzen pro Behandlung an verschiedenen Tagen nach der Aussaat (DAS). Unterschiede sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet (HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 8$).

Bei 25 DAS wurde im Vergleich zur voll gedüngten Kontrolle kein signifikanter Wachstumsrückgang beobachtet, wie aus den Blattgrößen und Pflanzenhöhen hervorgeht, außer bei den Behandlungen S0 und HFR50 (Tabelle 12). In Bezug auf die Höhe waren die Pflanzen in den Behandlungen mit Holz- und Sphagnumreststoffen sogar signifikant höher. S0- und

HFR50-behandelte Pflanzen zeigten die kleinsten Blätter und die geringste Höhe (HFR50 > S0) im Vergleich zu den anderen Behandlungen 25 DAS (Tabelle 12).

Tabelle 12. Pflanzenentwicklung von äthiopischen Grünkohlpflanzen, die auf verschiedenen Kultursubstraten angebaut wurden

	25 DAS	25 DAS	25 DAS	60 DAS	60 DAS	60 DAS
Treatment	Blattlänge [cm/Pflanze]	Blattbreite [cm/Pflanze]	Pflanzenhöhe [cm/Pflanze]	Blattlänge [cm/Pflanze]	Blattbreite [cm/Pflanze]	Pflanzenhöhe [cm/Pflanze]
HFR50	8.21 ± 1.03 b	5.33 ± 0.84 b	9.50 ± 1.52 c	21.63 ± 1.55 b	16.43 ± 0.94 a	100.56 ± 7.31 bc
HFR25	9.99 ± 1.25 a	6.30 ± 0.88 ab	11.09 ± 0.79 bc	18.19 ± 1.36 cd	13.76 ± 1.30 bc	116.98 ± 16.92 b
WFR50	10.66 ± 0.54 a	7.19 ± 0.57 a	15.10 ± 1.29 a	17.59 ± 1.22 cd	13.59 ± 1.44 bc	144.63 ± 15.25 a
WFR25	11.31 ± 0.43 a	7.15 ± 0.49 a	14.78 ± 1.61 a	12.86 ± 1.66 e	8.60 ± 1.40 d	78.89 ± 20.62 cd
SMR50	10.56 ± 0.63 a	6.91 ± 0.58 a	14.75 ± 0.22 a	16.21 ± 2.33 d	11.80 ± 1.93 c	125.45 ± 25.80 ab
SMR25	11.11 ± 0.72 a	6.91 ± 0.61 a	14.61 ± 1.95 a	12.63 ± 2.01 e	8.81 ± 1.29 d	67.71 ± 15.92 d
S100	10.48 ± 1.26 a	6.68 ± 0.53 a	11.29 ± 1.02 bc	24.31 ± 1.17 a	18.03 ± 1.11 a	109.63 ± 11.96 b
S50	11.10 ± 1.26 a	7.19 ± 0.61 a	12.03 ± 1.69 b	20.01 ± 1.27 bc	14.08 ± 0.57 b	106.86 ± 9.10 b
S0	2.13 ± 0.43 c	1.86 ± 0.27 c	3.03 ± 0.70 d	5.70 ± 0.32 f	3.98 ± 0.35 e	12.70 ± 0.99 e

DAS bedeutet Tage nach der Aussaat. Unterschiede sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 8$, für Blattbreite Dunnett's T3-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 8$).

Dies änderte sich jedoch am Ende des Versuchs, wo die in HFR50 angebauten Pflanzen im Vergleich zur voll gedüngten Kontrolle nur kleinere Blätter und darüber hinaus den höchsten Ertrag ($81,35 \pm 15,70$ g Blattgewicht) und die größte Blattfläche ($19,06 \pm 3,54$ cm²) aufwiesen (Tabelle 12 und 13). Es ist auch anzumerken, dass es keinen signifikanten Unterschied zur voll gedüngten Kontrolle in Bezug auf Ertrag, Pflanzenhöhe, Blattfläche, Anzahl der Blätter oder Gesamtbiomasse gab (Tabelle 13). Die Behandlungen WFR50, SMR50 und HFR25 zeigten keine signifikanten Unterschiede zu S50 in Bezug auf Ertrag, TM, Blattfläche, Anzahl der Blätter, Gesamtbiomasse und R:S-Verhältnis (Tab. 5). Die Pflanzen der Negativkontrolle und die in SMR25 und WFR25 angebauten Pflanzen zeigten die stärksten Wachstumseinbußen (Tabelle 13) und wiesen die geringste Blattzahl (3 - 8,5), Blattfläche (0,4 - 3,6 cm²), Ertrag (1,2 - 14,6 g TM) und Gesamtbiomasse (0,5 - 8 g TM) auf. Der TM-Gehalt (17,6 - 20 %) und das Wurzel-Spross-Verhältnis (R:S) (0,2 - 0,28) waren jedoch bei den gleichen Behandlungen am höchsten (Tabelle 13). Was die Pflanzenhöhe betrifft, so wiesen die in WFR50 angebauten Pflanzen, gefolgt von den Pflanzen in SMR50, die höchsten Werte auf. Vergleicht man die Wirkung der beiden Kultursubstrate, so ergaben sich bei der WFR50-Behandlung dreimal so viel Biomasse, Blattfläche und Ertrag wie bei der WFR25-Behandlung, während bei den anderen Behandlungen in der Regel nicht einmal doppelt so hohe Werte erzielt wurden (Tabelle 13).

Tabelle 13. Pflanzenparameter der äthiopischen Grünkohlpflanzen am Ende des Versuchs

Treatment	Ertrag [g Blatt FG/Pflanze]	Blattfläche [dm ² /Pflanze]	Blätter [Anzahl/Pflanze]	Gewicht [g TM/Pflanze]	TM Gehalt Blätter [%]	Wurzel : Trieb Verhältnis
HFR50	81.35 ± 15.90 a	19.06 ± 3.54 a	13.88 ± 0.64 a	26.21 ± 4.12 a	11.44 ± 0.91 d	0.18 ± 0.02 bc
HFR25	46.46 ± 8.79 ab	11.89 ± 3.56 bc	12.63 ± 1.60 a	22.01 ± 3.02 ab	13.60 ± 0.41 cd	0.15 ± 0.02 c
WFR50	45.50 ± 20.80 b	12.15 ± 5.48 bc	14.50 ± 1.60 a	21.42 ± 4.50 ab	14.16 ± 2.20 cd	0.15 ± 0.01 c
WFR25	14.03 ± 3.36 d	3.63 ± 0.82 de	8.50 ± 1.69 b	7.99 ± 2.34 cd	18.16 ± 1.01 a	0.20 ± 0.03 ab
SMR50	23.46 ± 7.75 cd	6.18 ± 2.20 cde	12.75 ± 2.82 a	14.17 ± 5.36 bc	16.38 ± 0.95 abc	0.18 ± 0.02 bc
SMR25	14.57 ± 2.76 d	3.40 ± 0.94 de	8.13 ± 0.99 b	8.02 ± 2.60 cd	17.56 ± 1.45 ab	0.24 ± 0.03 a
S100	68.42 ± 12.98 ab	15.40 ± 1.70 ab	14.75 ± 1.28 a	29.73 ± 5.22 a	14.47 ± 1.63 bcd	0.19 ± 0.02 bc
S50	36.98 ± 5.32 bc	8.89 ± 1.40 cd	12.38 ± 2.26 a	22.01 ± 1.72 ab	16.69 ± 0.60 abc	0.17 ± 0.01 bc
S0*	1.24 ± 0.16 e	0.43 ± 0.04 e	3.00 ± 0.53 c	0.51 ± 0.13 d	19.99 ± 2.87 a	0.28 ± 0.12 NA

* Signifikanz = Kleinbuchstaben (Tukey's HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± StAbw, $n = 4$, für Höhe und Blattanzahl $n = 8$, für TM-Gehalt Blätter Fisher's LSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± StAbw, $n = 4$).

Die Pflanzen der HFR50-Behandlung und der voll gedüngten Kontrolle wiesen den höchsten Gesamtnährstoffgehalt (Summe aller Nährstoffe) pro Pflanze auf (Tabelle 14). Es folgten Pflanzen in HFR25 (mit 66 % der Menge in S100), S50 und WFR50 (mit 59 % und 54 % der Menge in S100). Den niedrigsten Nährstoffgehalt wiesen die mit SMR25 und WFR25 behandelten Pflanzen (23 %) und die mit SMR50 behandelten Pflanzen (36 %) auf. Die relative Nährstoffaufnahme (Tabelle 14) durch die Grünkohlpflanzen zeigt für alle Behandlungen, dass die zugesetzten Kultursubstratreste mehr Nährstoffe enthielten, als die Grünkohlpflanze aufgenommen hat. Bezogen auf die Menge der vorhandenen Nährstoffe nahmen die in Holzfasern angebauten Grünkohlpflanzen in der 25 %-Behandlung weniger auf als in der 50 %-Behandlung. Bei allen anderen Behandlungen, einschließlich der Kontrollen, kehrte sich dieses Verhältnis um.

Tabelle 14. Gesamtnährstoffgehalt pro Pflanze und geschätzte relative Nährstoffaufnahme von äthiopischem Grünkohl, der 64 Tage lang in verschiedenen Kultursubstraten angebaut wurde

	N	P	K	Ca	Mg	S
	Nährstoff [g/Pflanze TM]					
HFR50	0.41 ± 0.06 a	0.11 ± 0.02 a	0.74 ± 0.09 a	0.25 ± 0.06 bc	0.13 ± 0.02 a	0.23 ± 0.03 a
HFR25	0.24 ± 0.03 bc	0.07 ± 0.01 b	0.46 ± 0.12 b	0.21 ± 0.04 bcd	0.08 ± 0.02 b	0.15 ± 0.02 bc
WFR50	0.17 ± 0.05 cd	0.06 ± 0.01 bc	0.36 ± 0.09 bc	0.23 ± 0.06 bcd	0.05 ± 0.01 b	0.13 ± 0.03 cd
WFR25	0.06 ± 0.02 e	0.03 ± 0.01 d	0.14 ± 0.04 c	0.12 ± 0.03 d	0.02 ± 0.01 c	0.06 ± 0.01 e
SMR50	0.10 ± 0.05 cd	0.04 ± 0.01 cd	0.24 ± 0.11 bc	0.17 ± 0.06 bcd	0.03 ± 0.01 c	0.08 ± 0.03 de
SMR25	0.06 ± 0.02 e	0.03 ± 0.01 d	0.13 ± 0.05 c	0.13 ± 0.05 cd	0.02 ± 0.01 c	0.06 ± 0.02 e
S100	0.33 ± 0.03 ab	0.07 ± 0.01 b	0.71 ± 0.10 a	0.44 ± 0.03 a	0.07 ± 0.01 b	0.22 ± 0.02 ab
S50	0.17 ± 0.02 cd	0.04 ± 0.01 bcd	0.40 ± 0.06 b	0.30 ± 0.02 b	0.04 ± 0.01 c	0.13 ± 0.02 cd
	Verhältnis der Nährstoffaufnahme der Pflanzen zu den Nährstoffen enthalten im Topf [%]					
HFR50	9.5% ± 1.3% c	0.3% ± 0.0% c	16.0% ± 2.0% a	0.4% ± 0.1% e	3.8% ± 0.6% a	8.3% ± 1.1% c
HFR25	10.6% ± 1.2% c	0.3% ± 0.0% c	11.7% ± 3.0% ab	0.6% ± 0.1% de	2.9% ± 0.6% ab	10.6% ± 1.5% c
WFR50	15.6% ± 4.6% c	2.1% ± 0.4% c	8.5% ± 2.0% abc	2.8% ± 0.7% c	1.9% ± 0.5% bc	13.7% ± 3.1% c
WFR25	9.2% ± 3.0% c	1.7% ± 0.5% c	3.8% ± 1.1% cd	1.8% ± 0.4% cde	1.0% ± 0.2% de	9.5% ± 2.0% c
SMR50	11.5% ± 5.5% c	2.8% ± 1.0% c	5.8% ± 2.6% bcd	2.5% ± 0.9% c	1.3% ± 0.5% cde	14.3% ± 5.0% c
SMR25	10.3% ± 3.5% c	3.2% ± 1.1% c	3.5% ± 1.3% cd	2.3% ± 0.9% cd	0.9% ± 0.3% e	15.4% ± 4.2% c
S100	51.0% ± 4.6% a	17.8% ± 2.4% a	17.7% ± 2.5% a	8.8% ± 0.6% a	3.5% ± 0.3% ab	67.2% ± 5.2% a
S50	38.4% ± 3.9% b	14.3% ± 1.8% b	11.0% ± 1.6% ab	6.2% ± 0.4% b	1.9% ± 0.3% bcd	51.7% ± 5.9% b

Unterschiede sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD-Test, $p < 0,05$, Mittelwert ± Standardabweichung, $n = 3$).

Hinsichtlich der Düngewirkung von Kultursubstratreststoffen zeigt die Wiederverwendung von HFR das geringste Nährstoffeinsparpotenzial zwischen 11 kg/ha (äthiopischer Grünkohl) und 154 kg/ha (Zuckerrüben) (Tabelle 15). WFR liegt zwischen 14 und 211 kg/ha, und das höchste Einsparpotenzial wurde mit 21 bis 300 kg/ha für SMR festgestellt. Diese Einsparungen könnten durch den Einsatz von (i) 0,1 - 1,7 m³/ha HFR (0,3 - 4,9 dt/ha) oder (ii) 2,0 - 28,1 m³/ha WFR (2,2 - 30,9 dt/ha) oder (iii) 4,5 - 63,5 m³/ha SMR (2,7 - 38 dt/ha) realisiert werden. Die potenziellen Einsparungen reichen von einem Gesamt-Primärenergiebedarf von 87 MJ/ha und 6 kg CO₂-äq/ha für HFR in Verbindung mit äthiopischem Grünkohl und 2879 MJ/ha und 285 kg CO₂-äq/ha für SMR in Verbindung mit Zuckerrüben (Tabelle 15).

Tabelle 15. Potenzielle Einsparung von Nährstoffen [kg/ha] und des damit verbundenen Energieverbrauchs [MJ/ha] sowie von CO₂-Äquivalenten [kg/ha] durch die Wiederverwendung von Kultursubstratrückständen als Dünger für verschiedene Kulturen

Pflanzenart	Organo-mineralischer Reststoff	N	P	K	Ca	Mg	S	Primärenergiebedarf zur Herstellung von N, P, K, Ca and S	Entsprechendes Erderwärmungspotenzial
	dt/ha			Nährstoffe kg/ha				MJ/ha	kg CO ₂ äq/ha
Äthiopischer Kohl	HFR 0.3	0.41	4.20	0.14	5.80	0.13	0.25	86.88	6.07
	WFR 2.2	1.44	4.20	1.64	5.73	0.63	1.29	148.49	13.70
	SMR 2.7	2.26	4.20	3.20	8.37	1.86	1.48	203.87	20.16
	dt/ha			Nährstoffe kg/ha				MJ/ha	kg CO ₂ äq/ha
Mais	HFR 2.8	3.29	33.91	1.11	46.86	1.06	2.03	701.50	49.01
	WFR 17.7	11.66	33.91	13.25	46.28	5.12	10.42	1198.92	110.59
	SMR 21.7	18.26	33.91	25.87	67.61	15.00	11.96	1646.12	162.75
	dt/ha			Nährstoffe kg/ha				MJ/ha	kg CO ₂ äq/ha
Zuckerrübe	HFR 4.9	5.75	59.32	1.95	81.97	1.85	3.56	1227.08	85.74
	WFR 30.9	20.39	59.32	23.17	80.95	8.96	18.23	2097.20	193.44
	SMR 38.0	31.94	59.32	45.25	118.26	26.24	20.91	2879.44	284.69
	dt/ha			Nährstoffe kg/ha				MJ/ha	kg CO ₂ äq/ha
Zwiebel	HFR 1.3	1.50	15.49	0.51	21.40	0.48	0.93	320.34	22.38
	WFR 8.1	5.32	15.49	6.05	21.13	2.34	4.76	547.50	50.50
	SMR 9.9	8.34	15.49	11.81	30.87	6.85	5.46	751.71	74.32
	dt/ha			Nährstoffe kg/ha				MJ/ha	kg CO ₂ äq/ha
Weißkohl	HFR 2.0	2.33	24.06	0.79	33.25	0.75	1.44	497.74	34.78
	WFR 12.5	8.27	24.06	9.40	32.83	3.63	7.39	850.69	78.47
	SMR 15.4	12.96	24.06	18.36	47.97	10.64	8.48	1168.00	115.48

Berechnet auf Basis der Ausbringungsmenge pro ha, begrenzt durch den erwarteten P-Entzug der jeweiligen Kultur pro ha.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle organo-mineralischen Kultursubstratreststoffe, die bei der Tomatenproduktion in Gewächshäusern anfallen, als Bodenverbesserungsmittel und Nährstoffquelle für den Anbau von äthiopischem Grünkohl wiederverwendet werden können. Die Feldkapazität ist eine Eigenschaft, die zwischen den Kultursubstratreststoffen variiert (Tabelle 9). Daher ist zu erwarten, dass Böden, die arm an organischen Verbindungen sind, von einer verbesserten Wasserhaltekapazität profitieren, wenn sie mit den Substratreststoffen gedüngt werden. Darüber hinaus wurde im Topfversuch eine enorme Wachstumsförderung beobachtet, wenn ungedüngter Sand (Variante S0) mit Rückständen aus SMR, WFR oder HFR ergänzt wurde (Tabelle 12 und 13). Dies zeigt im Allgemeinen, dass Nährstoffe übertragen und wiederverwendet werden können.

Bei 25 DAS konnten keine drastischen Unterernährungssymptome beobachtet werden, wenn nährstoffarmer Sand mit 50% (v/v) oder 25% (v/v) SM, WF oder HF gemischt wurde. Nach

64 DAS zeigten Pflanzen, die mit 50% HFR versorgt wurden, keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zur voll gedüngten Kontrolle (S100), während alle anderen Behandlungen einen geringeren Ertrag, eine geringere Gesamtbiomasse und eine geringere Blattfläche aufwiesen. Insbesondere die 25 %-Varianten von Sphagnum-Moos (SMR25) und Holzfäsern (WFR25) zeigten im Vergleich zu allen anderen Behandlungen ein signifikant reduziertes Wachstum, Biomasse, SPAD und Ertrag (Tabelle 13). Dies kann auf die hohe Nährstoffbelastung und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Substratreststoffe zurückgeführt werden, da bei allen Behandlungen mit Substratreststoffen die Nährstoffbelastung viel höher war als bei der voll gedüngten Kontrolle. Physikalisch-chemische Eigenschaften spielen eine Rolle. So kann das Wachstum, z.B. von Gerstenpflanzen, durch die Schüttdichte beeinflusst werden. Da die Kultursubstrate sehr unterschiedliche Massen haben, was zu geringeren Schüttdichten führt (52% für SMR50 bis 79% für HFR25 im Vergleich zu Sand), könnte dies auch einen Einfluss auf die unterschiedlichen Wachstumsleistungen haben. Die Einarbeitung von organo-mineralischen Reststoffen in den Boden führt unweigerlich zu einer Erhöhung des C:N-Verhältnisses. Aufgrund der Immobilisierung von Nährstoffen könnte dies kurzfristig zu Problemen bei der Nährstoffversorgung führen. Hohe C:N-Verhältnisse können zu reduzierten Raten der N-Mineralisierung führen und damit die N-Verfügbarkeit verringern. Solche Effekte könnten das geringere Wachstum (Tabelle 13) und den niedrigeren Nährstoffgehalt (Tabelle 14) von Pflanzen mit kohlenstoffreichen Reststoffzusätzen wie SMR und WFR (Tabelle 10) erklären, verglichen mit Pflanzen, die mit HFR (niedriges C:N-Verhältnis) oder mineralisch über eine Nährlösung (S100) gedüngt wurden.

Die relative Nährstoffaufnahme (Tabelle 14) liefert Informationen über die Menge der fehlenden Nährstoffe und kann als Eingangsgröße zur Ermittlung des Düngebedarfs verwendet werden. Da gezeigt wurde, dass die Übertragung von Nährstoffen aus der Hydrokultur möglich ist, zeigt Tabelle 15 das Einsparpotenzial hinsichtlich verschiedener Pflanzenarten, das sich aus der Wiederverwendung von Kultursubstraten ergibt. Je nach Kultur können ca. 11 - 300 kg Nährstoffe pro ha (N, P, K, Mg, Ca, S), mit einem durchschnittlichen Primärenergiebedarf von 87 - 2879 MJ/ha und 6 - 285 kg CO₂-Äquivalent/ha, eingespart werden. Die Berechnungen zeigen, dass die Energie- und CO₂-Einsparungen bei der Düngemittelproduktion umso höher sind, je höher der Nährstoffbedarf der Kultur ist. Während der äthiopische Grünkohl das geringste Einsparpotenzial aufweist, zeigt die Zuckerrübe mit ihrem viel höheren Bedarf die höchsten Energie- und CO₂-Einsparungen (Tabelle 15).

Die Daten dieser Studie zeigen, dass die Anwendung aufgrund der außerordentlich hohen P-Gehalte und der ungeeigneten Nährstoffverhältnisse, insbesondere im HFR (N : P₂O₅ : K₂O = 1 : 24 : 0,4), nicht einfach zu realisieren ist. Um Auswirkungen auf die Umwelt im Sinne einer P-Belastung auszuschließen, wird bei der Berechnung davon ausgegangen, dass der gesamte P in den Kultursubstraten mobil oder pflanzenverfügbar ist (wohl wissend, dass dies

nicht der Fall ist). Daher wurden die Aufwandmengen der Kultursubstrate so begrenzt, dass die angegebene P-Menge pro ha dem zu erwartenden P-Bedarf der jeweiligen Modellkultur pro ha entspricht. Aufgrund der hohen P-Werte zeigt Tabelle 15 geringere Aufwandmengen als ursprünglich erwartet. Dies bedeutet, dass weniger positive Effekte (Nährstoffeinsparungen und organische Substanz) zu erwarten sind, zumal die Daten aus dieser Studie darauf hindeuten, dass ein großer Teil der ausgebrachten Nährstoffe nicht direkt pflanzenverfügbar ist (Tabelle 14). Die in diesem Versuch verwendeten HFR eignen sich nicht für die Einarbeitung in den Boden, da umweltschädliche Mengen an P zugeführt würden, um den Bedarf der Pflanzen an den anderen Nährstoffen zu decken. Außerdem wäre die berechnete Ausbringungsmenge von 0,1 - 1,7 m³ HFR/ha (entsprechend einer Schichtdicke von 0,01 - 0,17 mm) nicht praktikabel, da die übliche Ausbringungstechnik nicht für so kleine Mengen ausgelegt ist. Dieses Problem hat seinen Ursprung in der Vorbehandlung. Die auf die Tomaten ausgebrachte Nährlösung enthielt realistische Phosphorgehalte. Dennoch reicherte sich eine beträchtliche Menge an P in den Nährmedien an. Um eine effektive Wiederverwendung mit größtmöglicher Entlastung der Umwelt zu erreichen, muss in der Primärproduktion auf eine genaue Nährstoffversorgung geachtet werden, wie sie von Pflanzen benötigt wird. Dadurch könnte das Einsparungspotenzial stark erhöht werden. Darüber hinaus könnten 112,5 m³ Kultursubstratabfälle pro Hektar Gewächshausproduktionsfläche durch die Verwendung alternativer organischer Kultursubstrate und deren Wiederverwendung als organisch-mineralischer Dünger in einer Freilandproduktion vermieden werden.

2.1.5. Qualität agrarischer Produkte aus dem urbanen Bereich

Metalle in der Luft wie Arsen, Cadmium, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei, Zink und Quecksilber werden hauptsächlich durch industrielle Prozesse freigesetzt, wobei diese in Berlin über die Jahre abgenommen haben ²⁰. In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss dieses Luftzustandes auf Produkte des „Urban Farmings“ untersucht und beurteilt. Dazu wurden im Mai 2018 vierzig Balkonkästen (Länge = 1 m) mit Salatpflanzen an 20 verschiedenen Orten in Berlin mit unterschiedlichen Lichtbedingungen und Luftverschmutzungsgraden aufgestellt. Die Luftverschmutzungsgrade wurden nach SenSW ²¹ wie folgt kategorisiert: gering ≤ 1 (grün), moderat 1,21 – 1,50 (gelb und erhöht 1,51 – 1,80 (rot) und den jeweiligen Standorten der Balkonkästen in Berlin zugeordnet (Abbildung 10). In diesem Zusammenhang wurden jeweils vier Pflanzen pro Balkonkasten in einem Standardsubstrat ausgebracht, die unter definierten Bedingungen bewässert wurden. Die Balkonkästen verweilten vom 15.05. bis zum 18.06.2018 an ihrem Standort, bevor die Frischmasse der Salatköpfe sowie die Akkumulation der Schwermetalle ermittelt wurden. Die Untersuchungen wurden an gewaschenen und ungewaschenen Salatköpfen vorgenommen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um herauszufinden, ob bei erhöhter Schwermetallbelastung des Gemüses die Akkumulation durch einer äußeren oder einer inneren Akkumulation der Schwermetalle verursacht wurde.

Anschließend wurden die Proben nach Verordnung-(EG)-Nr.-1881/2006 ²², WHO ²³, EFSA ²⁴ und EFSA ²⁵ beurteilt ob sie den jeweiligen Grenzwert überschreiten und für den Lebensmittel Einzelhandel zugelassen sind. Die Analyse der Proben erfolgte mittels ICP-OES.

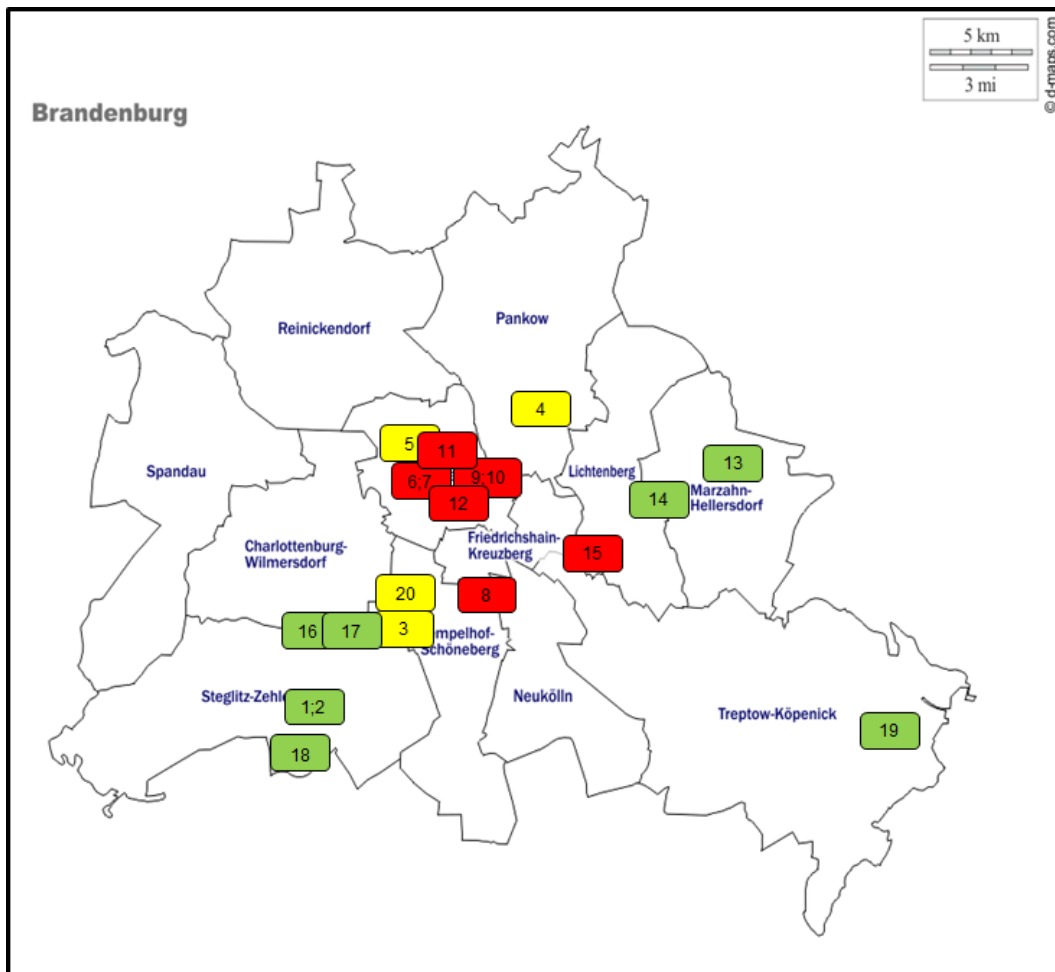


Abbildung 10. Standorte der Balkonkästen einschließlich Kategorisierung der Luftverschmutzungsgrade: gering ≤ 1 (grün), moderat 1,21 – 1,50 (gelb) und erhöht 1,51 – 1,80 (rot) nach SenSW 21. https://d-maps.com/carte.php?num_car=6155&lang=de

Da das Salatgewicht hauptsächlich durch die Lichtintensität bestimmt wird, wurden die Balkonkästen mit den Salatpflanzen nach ihrer Ausrichtung klassifiziert. Wie zu erwarten, waren die südlich und östlich ausgerichteten Pflanzen am größten. Die Rangfolge des mittleren Salatgewichts ist wie folgt: Osten (172,17 g) > Süden (154,23 g) > Westen (132,32 g) > Norden (86,86 g) (Abbildung 11). Es ist anzumerken, dass sich die östlich und südlich ausgerichteten Salatköpfe in ihrem Gewicht nicht signifikant unterscheiden. Das gleiche gilt für die südlich und westlich ausgerichteten Salatpflanzen. Demgegenüber verzeichneten die nördlich ausgerichteten Salatköpfe die signifikant geringsten Gewichte.

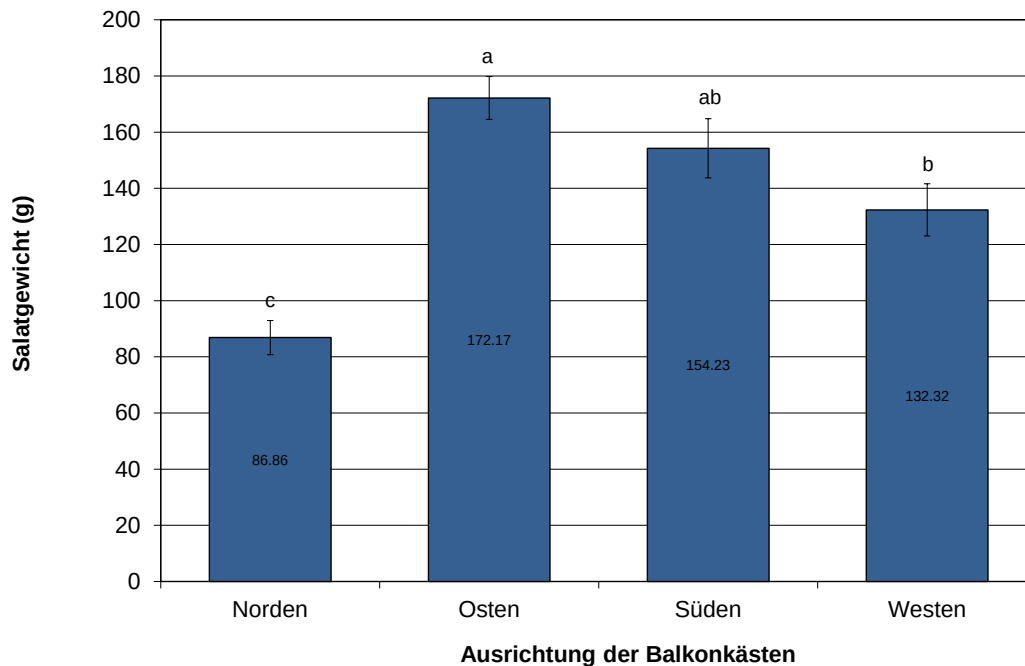


Abbildung 11. Durchschnittliches Frischgewicht der Salatköpfe (*Lactuca sativa* 'Descartes') in Abhängigkeit der Ausrichtung der Balkonkästen

Im Anschluss nach der Ernte wurden die Elemente Pb, Cd, Zn, Cr, Cu und Ni in ungewaschenen und gewaschenen Salatköpfen analysiert. Es wurde eindeutig identifiziert, dass die Gehalte dieser Elemente mit dem Verschmutzungsgrad der Luft sehr eng positiv korrelieren (Tabelle 9). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch den Waschvorgang vor der Analyse die Akkumulation der Schwermetalle und Spurenelemente reduziert werden konnte. Demzufolge befinden sich viele Elemente an der Blattoberfläche wieder. Trotzdem muss festgehalten werden, dass die Schwermetalle und Spurenelemente auch im Blattgewebe eingelagert werden. Das ist vor allem daran zusehen, dass auch in der gewaschenen Variante die Akkumulation mit einem Anstieg des Luftverschmutzungsgrades zunimmt (Tabelle 16).

Werden die Grenzwerte hinsichtlich Cd und Pb herangezogen²², besteht keine Gefahr die durch diese Schwermetalle ausgehen könnte. Der Grenzwert für Pb liegt bei 0,3 mg/kg Blattgemüse. Dieser wird in Bezug auf den höchsten Luftverschmutzungsgrad in der ungewaschenen Variante um das Dreifache und in der gewaschenen Variante um das Zehnfache unterschritten. Zn und Cu wird als bedenklich für den menschlichen Körper eingestuft, wenn die Aufnahme pro kg Körpergewicht und Tag 1 mg bzw. 0,5 mg entsprechend überschreitet²³. Um diese Mengen zu erreichen, müsste man täglich von dem Salat, der unter den schlechtesten Luftbedingungen gewachsen ist, hinsichtlich Zn 15,8 kg und bezüglich Cu 81,5 kg verzehren. Die Verzehrmenge von Salat lägen unter Berücksichtigung des Grenzwertes für Cr²⁴ sogar noch höher. So müssten für eine toxische Wirkung mindestens 143 kg Salat täglich gegessen werden. Bei Ni hingegen liegt der Grenzwert im Blattgemüse bei 2,8 µg/kg Körpergewicht²⁵. Um diesen zu erreichen, müsste man täglich 3,4 kg Salat konsumieren,

was immer noch sehr viel ist. Demzufolge kann aus den vorliegenden Ergebnissen geschlossen werden, dass der Konsum von dem in Berlin produzierten Salat als unbedenklich eingestuft werden kann.

Tabelle 16. Einfluss der Luftverschmutzung und der Behandlung auf die Akkumulation von Schwermetallen und Mikronährstoffen im Salat

		Luftverschmutzungsgrad								
		gering			moderat			erhöht		
Element	Behandlung	(mg/kg FG)	± SA	Sig.	(mg/kg FG)	± SA	Sig.	(mg/kg FG)	± SA	Sig.
Pb	ungewaschen	0.042	0.058	b	0.048	0.024	a	0.114	0.108	a
	gewaschen	0.016	0.012	a	0.017	0.003	a	0.031	0.031	a
Cd	ungewaschen	0.007	0.001	a	0.007	0.002	a	0.008	0.002	a
	gewaschen	0.007	0.001	a	0.007	0.001	a	0.007	0.001	a
Zn	ungewaschen	2.546	0.268	b	2.768	0.855	a	3.805	0.969	a
	gewaschen	2.637	0.422	a	2.452	0.485	a	2.867	0.470	a
Cr	ungewaschen	0.042	0.020	a	0.028	0.016	b	0.126	0.157	a
	gewaschen	0.027	0.024	a	0.015	0.007	a	0.028	0.034	a
Cu	ungewaschen	0.211	0.049	ab	0.240	0.093	b	0.368	0.161	a
	gewaschen	0.239	0.052	a	0.283	0.129	a	0.311	0.154	a
Ni	ungewaschen	0.014	0.011	b	0.008	0.007	a	0.050	0.057	a
	gewaschen	0.009	0.010	a	0.004	0.004	a	0.012	0.014	a

Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede auf einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$. Die Standardabweichung ist als $\pm$ SA angegeben.

Zu diesem Thema haben wir ebenfalls mit unseren mexikanischen Kolleg*innen eine Vergleichsstudie in Mexiko City durchgeführt und die Ergebnisse gemeinsam publiziert²⁶. In urbanen Gärten Mexikos wurden Römersalat und Kirschtomaten angebaut, um die Akkumulation von Schwermetallen im Salat und in den Tomaten zu untersuchen und eine Risikobewertung hinsichtlich des Verzehrs dieses Gemüses durchzuführen. Hintergrund ist der, dass Mexiko City mit seinem Ballungsraum eine der am dichtesten besiedelte Megastädte der Welt ist. In diesem Zusammenhang entstehen durch anthropogene Aktivitäten Schadstoffe, die sich im Boden, im Wasser oder im Pflanzenmaterial anreichern können. Es wurden zwei Kulturen (Römersalat und Kirschtomaten), die als Bioakkumulatoren von Schwermetallen gelten, in 13 städtischen Gärten und einem in der Stadtrandzone analysiert. In unserer Studie waren Cr und Ni die Schwermetalle mit den höchsten durchschnittlichen Konzentrationen in den Blättern des Salats, während As und Cr die höchsten Konzentrationen in den Früchten der Kirschtomaten aufwiesen. Das System Boden-Wasser-Pflanze ist nicht der einzige Grund für die Schwermetallbelastung von Gemüse, da im Bewässerungswasser nur zwei Metalle (Cr, Cd) über den festgelegten Grenzwerten lagen und alle Bodenproben Schwermetallkonzentrationen unterhalb der zulässigen Grenzwerte aufwiesen. Somit bleibt die Luftverschmutzung als Hauptursache für die Schwermetallanreicherung in Salat- und Kirschtoma-

tenpflanzen übrig. Die Gefahrenindizes (TF, HI, CHI) bestätigen, dass der Verzehr von Salat und Tomaten, die in den meisten städtischen Gärten angebaut werden, für die menschliche Gesundheit schädlich sein kann. Der TF-Index ist ein Maß für die Translokation von Schwermetallen aus den Stängeln und Wurzeln in die essbaren Teile der Pflanze, berücksichtigt aber nicht die Wege, über die die Metalle zu diesen gelangen, wie z. B. die Ablagerung in der Atmosphäre. Der CHI-Index beruht auf vielen Annahmen und kann die potenziellen Auswirkungen der Schwermetalle überbewerten. Dennoch sind wir uns einig, dass der Verzehr von Gemüse, das in städtischen Gärten in Mexiko-Stadt angebaut wird, mit äußerster Vorsicht erfolgen sollte.

2.1.6. Akzeptanz urbaner Gartenbausysteme

Um die Akzeptanz urbaner Gartenbausysteme in Berlin und Mexico-City abschätzen zu können, wurde in Zusammenarbeit mit den mexikanischen Wissenschaftlern ein umfänglicher Fragebogen entwickelt. Die Umfrage in Berlin wurde zur Langen Nacht der Wissenschaften durchgeführt, um eine angemessene Probandenanzahl mit wenig Aufwand zu realisieren.

Hinsichtlich der Frage, wofür die Dachflächen in Berlin genutzt werden sollten, waren Mehrfachbenennungen erlaubt (Abbildung 12). Dabei konnte ermittelt werden, dass den Bürgern und Bürgerinnen, die Stromerzeugung (36 %) auf dem Dach fast genauso viel Wert ist wie die Dachbegrünung mit Zierpflanzen (34 %) und die Nahrungsmittelproduktion (29 %).

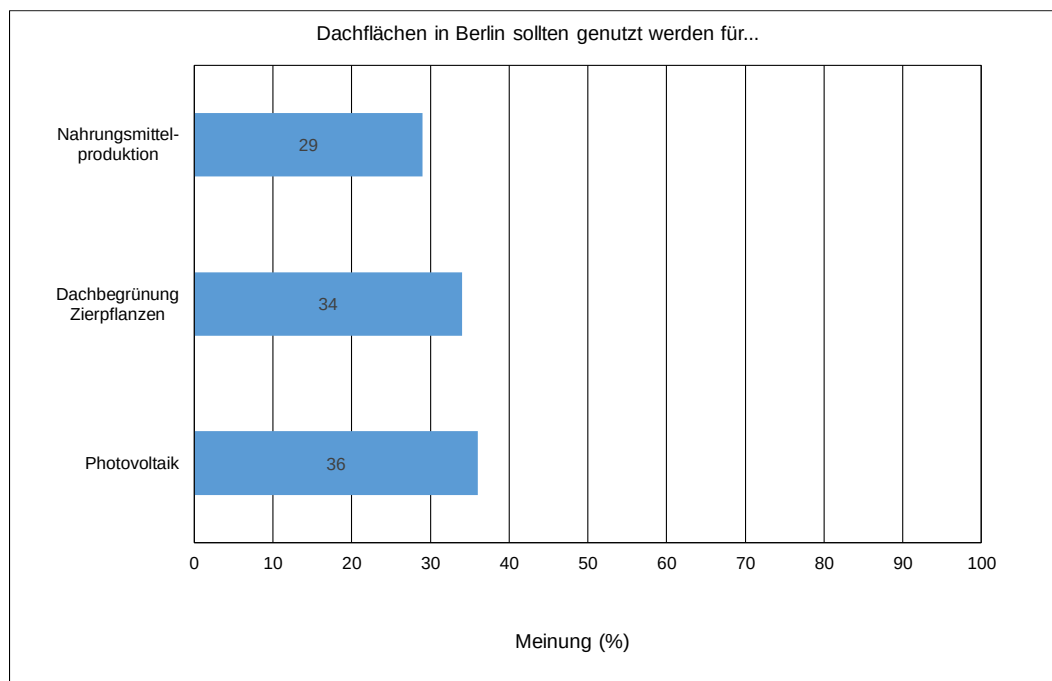


Abbildung 12. Wofür sollten die Dachflächen in Berlin genutzt werden?

Weiterhin war uns die Meinung wichtig, wozu die Dachgewächshäuser in Berlin der Bevölkerung dienen könnten. Die Mehrheit der Befragten stimmten eher oder voll und ganz zu, dass die Lebensmittelproduktion in Dachgewächshäusern für eine,

- bessere Bildung (eher: 44 %; voll und ganz: 47 %),
- bessere Transparenz der Lebensmittelerzeugung (eher: 47 %; voll und ganz: 20 %),
- Nahrungsmittelversorgung (eher: 44 %; voll und ganz: 26 %),
- verbesserte Wassereffizienz (eher: 32 %; voll und ganz: 45 %),
- besseres Recycling organischer Abfälle (eher: 41 %; voll und ganz: 35 %),
- verbesserte Energieeffizienz des Gebäudes (eher: 42 %; voll und ganz: 44 %),
- Transportemissionsverringering (eher: 26 %; voll und ganz: 59 %)

genutzt werden kann.

Diese Vorteile lehnten die Befragten nur mit einem geringen Teil eher oder voll und ganz ab (Abbildung 13). Hinsichtlich der Frage, ob die Lebensmittelproduktion in Dachgewächshäusern zu einer Verbesserung der Lebensmittelqualität beiträgt, waren die Befragten der Meinung, dass dies eher (38 %) bis voll und ganz (14 %) zutrifft. Andere Befragte sahen dies

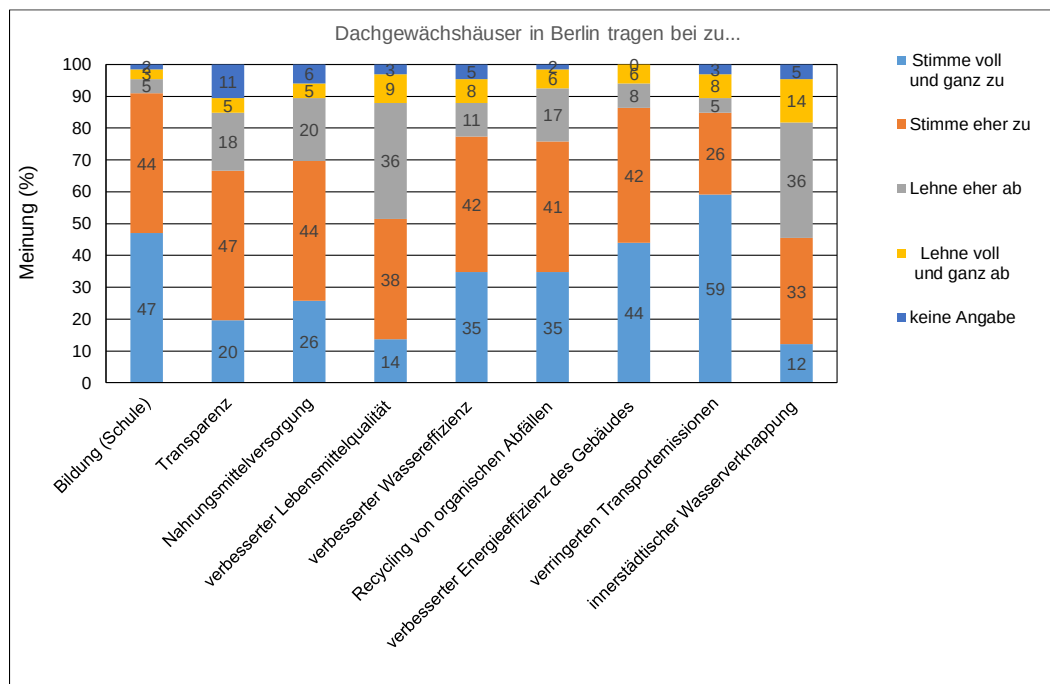


Abbildung 13. Wofür sollten die Dachflächen in Berlin genutzt werden?

eher skeptisch und lehnten das eher (36 %) bis voll und ganz (9%) ab. Eine weitere sehr interessante Frage war für uns, ob Dachgewächshäuser in Zeiten des Klimawandels zu einer innerstädtischen Wasserverknappung beitragen könnten. Während 45 % der Befragten einer Wasserverknappung durch eine Gewächshausproduktion auf dem Dach zustimmten, waren 50 % der Meinung, dass keine Verknappung der Trinkwasserversorgung durch die innerstädtische Produktion erreicht werden würde. Weitere 5 % enthielten sich der Stimme. In diesem Zusammenhang gehen die mexikanischen Partner davon aus, dass die Frage zur Konkurrenz zwischen der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung und dem Wasserverbrauch durch die innerstädtische Produktion in Gewächshäusern am interessantesten ist, da Wasser

in Mexico-City eine knappe Ressource ist. Basierend darauf wurde nicht nur eine Umfrage erstellt, sondern auch praktische Versuche durchgeführt, um zu schauen, ob der Wasserverbrauch in der Stadtproduktion ohne starker Frischwasserzufuhr gedeckt werden kann. Die Ergebnisse wurden im Jahr 2022 in einem wissenschaftlichen Journal Mexikos publiziert²⁷. Bislang gab es keine Daten über die für den Gemüseanbau in Mexiko-Stadt benötigte Wassermenge (CDMX). Ziel dieser Studie war es daher, den Ertrag und die Wassernutzungseffizienz von zwei repräsentativen Kulturen in städtischen Gärten, darunter Römischer Salat und Kirschtomaten, für 13 städtische Gärten in CDMX zu erfassen. Außerdem wurde die Speicherkapazität des Regenwassers anhand von Daten der nächstgelegenen Wetterstation jedes Obstgartens geschätzt, um Aussagen über die Deckung des Wasserbedarfs der Pflanzen treffen zu können. Der Ertrag und die Wassernutzungseffizienz für die Salatproduktion lagen zwischen 0,10 und 1,20 kg/m² bzw. 0,21 - 2,93 kg/m³ Wasser. Bei der Kirschtomate lagen diese Indikatoren zwischen 0,25 und 3,40 kg/m² bzw. 0,32-5,52 kg/m³ Wasser. Die Bewässerung in den städtischen Gärten erfolgte auf empirische Weise und unter Verwendung von Frischwasser. In den meisten Fällen wurde ein Überangebot an Wasser festgestellt, das bis zu 0,27 m³/m² und 0,4 m³/m² für eine komplette Wachstumsperiode von Salat und Kirschtomaten betragen kann. Die Regenwasserspeicherkapazität in einem Jahr wurde mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 80 % geschätzt. Der akkumulierte Regenwasserspeicher schwankt zwischen 0,261 und 0,5215 m³/m² in den Obstgärten, was den Wasserbedarf für eine komplette Saison von Salat (0,128 bis 0,389 m³/m²) oder Kirschtomaten (0,145 bis 0,569 m³/m²) decken könnte.

Zurück zu Berlin und wie oben erwähnt, würde die vorhandenen Dachflächen in Berlin ausreichen, um den jährlichen pro Kopf Verbrauch von Gemüse in Berlin zu decken. Bei der Befragung ergab sich, dass 31 % der Befragten richtig abschätzten, dass die jährliche Gemüseversorgung der Berliner Bevölkerung durch eine innerstädtische Produktion zu realisieren ist. Dagegen waren 67 % der Befragten nicht oder überhaupt nicht dieser Meinung (Abbildung 14). Nach eigener Berechnung muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich um eine theoretische Anbaufläche handelt, bei der die Statik der Gebäude nicht geprüft wurde.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Befragten eher auf Land- statt Stadtprodukte setzten. 56 % der Befragten bevorzugten Landprodukte wohingegen 41 % der Befragten auf Stadtprodukte umsteigen würden. Hierbei ist zu prüfen, ob der Gedanke der Landprodukte mit einer verbesserten Lebensmittelqualität einhergeht. Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen konnte dieses nicht ermittelt werden. Auch wenn aus den Untersuchungsergebnissen geschlussfolgert werden kann, dass die Mehrheit der Befragten der Meinung ist, dass die innerstädtische Lebensmittelproduktion zu einer Verbesserung der Lebensmittelqualität der Energie- und Wassereffizienz führt, sowie organische Abfälle und Transportemissionen verringert werden würden, sind die Befragten nicht bereit mehr Geld für

in der Stadt produzierte Agrarprodukte auszugeben (65 %). Dagegen würden 32 % der Befragten mehr Geld für ein solches Produkt ausgeben. Wenn berücksichtigt wird, dass die Produktion in Dachgewächshäusern mit all den Produktionsprozessen erschwert ist, sind Mehrkosten zu erwarten.

Die letzte Frage beschäftigte sich damit, ob die urbane Lebensmittelproduktion dem allgemeinen Trend entspricht. 81 % der Befragten waren davon überzeugt. Die restlichen Befragten lehnten dieses eher (14 %) oder voll und ganz (2 %) ab.

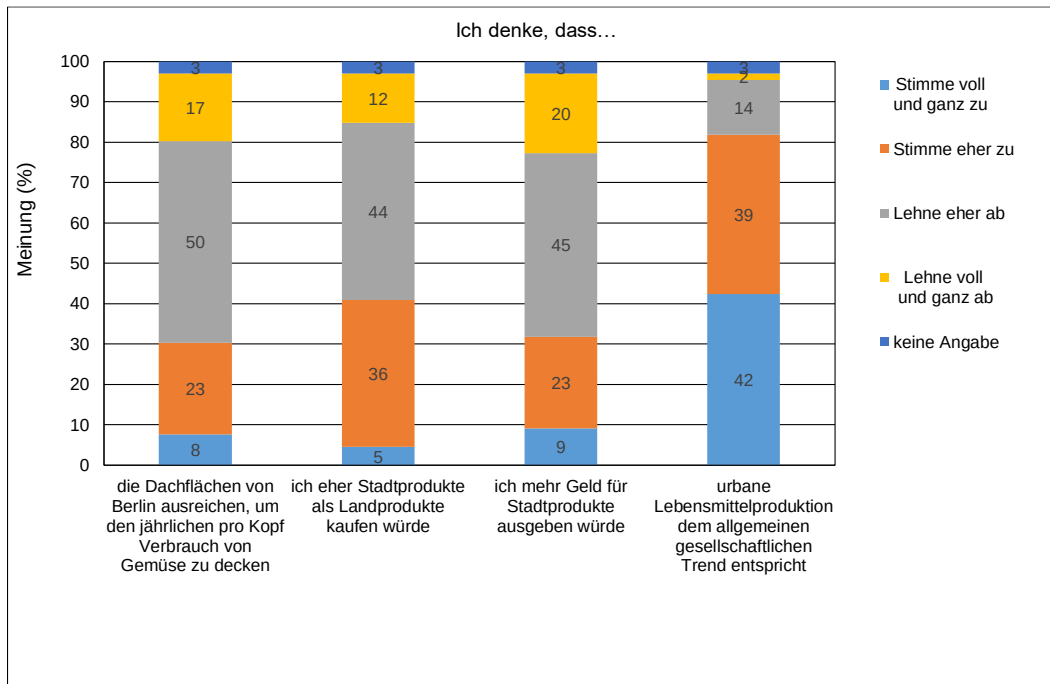


Abbildung 14. Abschätzung der innerstädtischen Lebensmittelproduktion

2.1.7. Substitution der Steinwollsubstrate durch ein Hybridkultursystems

Basierend auf der COVID-19 Pandemie und der daraus resultierenden Projektverlängerung wurde zusätzlich ein Hybridkultursystem (Hybrid Aeroponik-NFT-System) als Prototyp entwickelt. Dieses sollte dazu befähigen, komplett auf Kultursubstrate im hydroponischen System zu verzichten. In diesem Zusammenhang wurde ein Hybrid Aeroponik-NFT-System als Tunnel- und Rohrvariante mit einem kommerziellen NFT-System verglichen, wobei im NFT-System nicht wiederverwendbare Steinwolle und in den Hybridsystemen wiederverwendbarer Blähton als Wurzelverankerung der Pflanzen eingesetzt wurden.

Die Hybridsysteme wurden so aufgebaut, dass eine Sektion 2 m lang ist, vier Pflanzplätze enthält und über zwei Klappen verfügt, die eine Beobachtung der Wurzelentwicklung zulässt (Abbildung 15 und 16). Der Boden der Tunnelvariante ist durchgehend konzipiert, wohingegen auf dem Boden der Rohrvariante Barrieren eingebaut sind, um Nährlösung anzustauen. Diese wirkt als Puffer, falls es zu einem Ausfall der Bewässerung kommen sollte. Am Ende

jeder Rohrsektion, fließt die Nährlösung in einen unteren Schacht ab und wird gemeinsam mit der restlichen Nährlösung im Nährlösungstank gesammelt (Abbildung 16). Dadurch kommt es zu dem Vorteil, dass in dem Rohrsystem immer nur die Wurzeln von 4 Pflanzen in Berührung kommen, wodurch eine Ausbreitung von eventuellen phytosanitären Problemen vermieden werden kann.

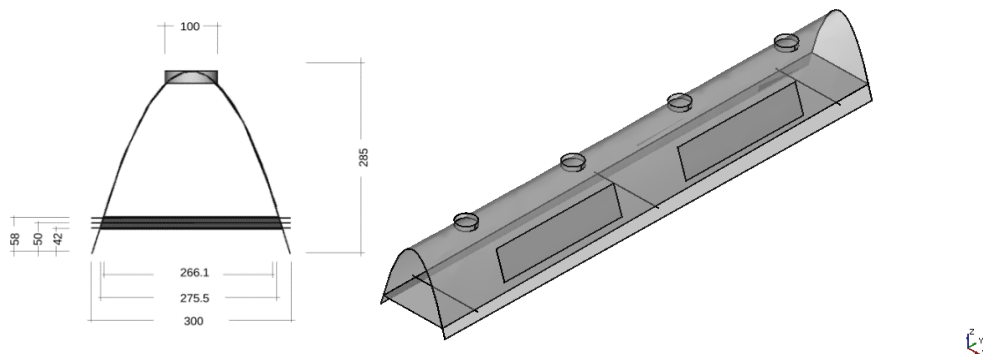


Abbildung 15. Tunnelvariante des Hybrid Aeroponik-NFT-Systems

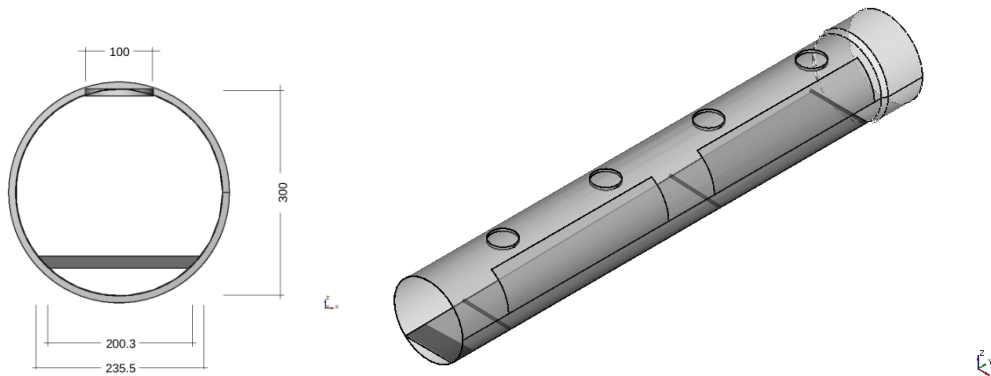


Abbildung 16. Rohrvariante des Hybrid Aeroponik-NFT-Systems

Durch den Aufbau der Hybridsysteme sollen einige Vorteile gegenüber einem konventionellen NFT-System erreicht werden. Dazu gehören:

- Keine Verwendung von energiereich hergestellten Steinwollsubstraten
- Keine Nährstoffunterversorgung (im NFT-System nur am Einlass eingeleitet)
- Ein höherer Sauerstoffeintrag
- Höheres Puffervermögen bei Pumpenausfall
- Geringere Temperaturschwankungen

Erste Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die Salatkopfdurchmesser während der Wachstumsphase nicht signifikant voneinander unterschieden haben (Abbildung 17).

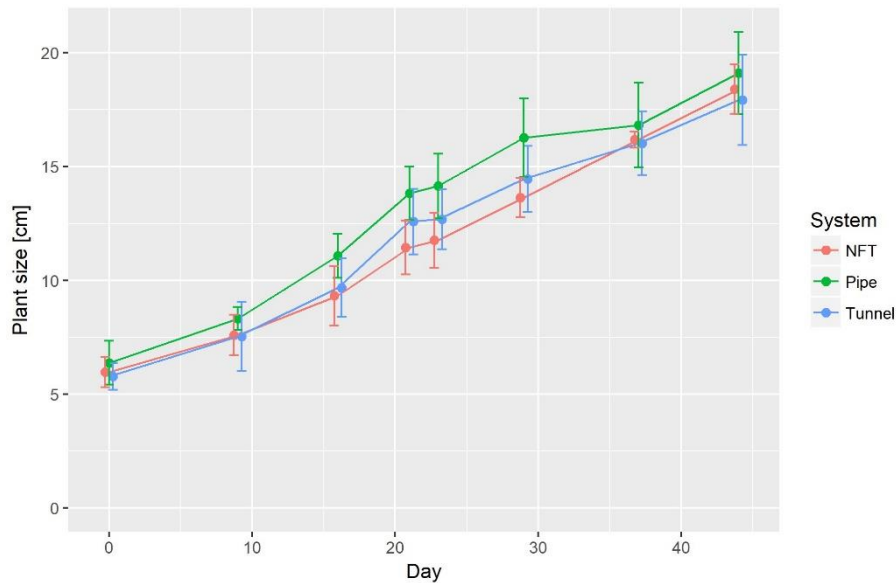


Abbildung 17. Effekte verschiedener Anbausysteme auf den Salatkopfdurchmesser während des Wachstums. Nur bei signifikanten Unterschieden signalisieren differente Buchstaben einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$).

Gleiches gilt für den Chlorophyllinhalt in den Blättern des Salats (Abbildung 18). Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass sich die Salate in allen Systemen fast identisch entwickelt haben und demzufolge als gleichwertig in ihrer Performance bewertet werden können.

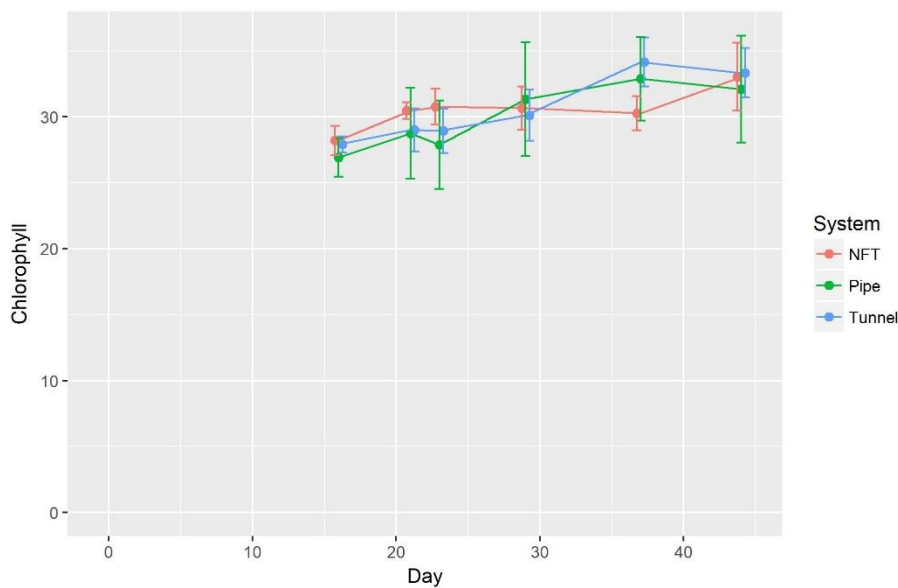


Abbildung 18. Einflüsse verschiedener Anbausysteme auf den Chlorophyllgehalt während des Wachstums. Nur bei signifikanten Unterschieden signalisieren differente Buchstaben einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$).

Die Höhe des Ertrags gehört bei dem Produzenten mit Abstand zu einer der wichtigsten Fragen. Dieser wurde durch die verschiedenen Anbausysteme nicht signifikant beeinflusst (Abbildung 19). Tendenziell kann allerdings festgehalten werden, dass das Hybrid-Rohrsystem den mittleren Ertrag um 32 % gegenüber einem herkömmlichen NFT-System erhöhte. Der Grund dafür konnte bis jetzt noch nicht ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die oben genannten Vorteile dafür verantwortlich waren.

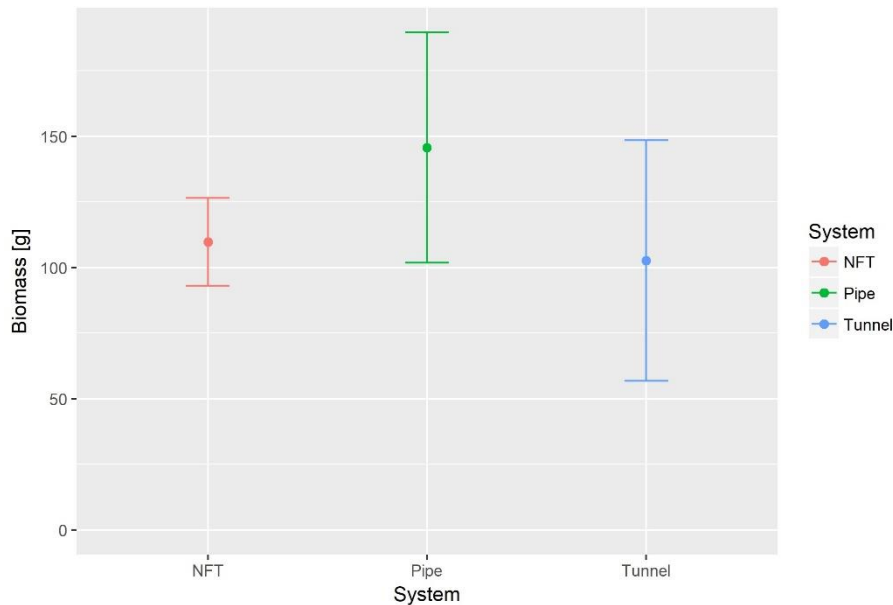


Abbildung 19. Einfluss verschiedener Anbausysteme auf den Ertrag. Signifikante Unterschiede sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet ($p < 0,05$).

Wie oben beschrieben, handelt es sich bei den Hybridsystemen um Sektionen, die so aneinandergesetzt werden können, dass sie auch für den intensiven Gemüseanbau vorstellbar wären. Allerdings ist der Anbauer gegenüber solchen Systemen sehr skeptisch, da es bei einem Pumpenausfall/Unterbrechung der Nährlösungszufuhr innerhalb kürzester Zeit zu einem Totalausfall kommen kann. Das Hybrid-Rohrsystem hat den Vorteil, dass durch die zusätzlichen Tanks ein solcher Ausfall abgepuffert werden kann. Um das System noch sicherer zu gestalten, wurde ein simples Überwachungs- und Warnsystem entworfen, das den Nutzer bei Störungen der Bewässerungstechnik warnen soll.

Grundlegend wurde ein Ansatz gewählt, der sich an einem drahtlosen Sensornetzwerk (WSN) anlehnt. Verschiedene Sensoren wurden mit einem Mikrocontroller zu einem Sensorknoten verbunden, der jeweils ein Hybridkultursystem abdeckt. Der Mikrocontroller digitalisierte die Sensorsignale und übermittelte sie an ein Computerprogramm in einer Basisstation, welches mit diesen Daten automatisiert und in Echtzeit eine Analyse durchführte sowie eine Diagnose erstellte.

In einem Vorversuch wurde überprüft, ob es möglich ist, unter Einsatz eines Durchflussmessers ein Verstopfen der Sprühnebeldüsen im Kultursystem zu erkennen (Abbildung 20).

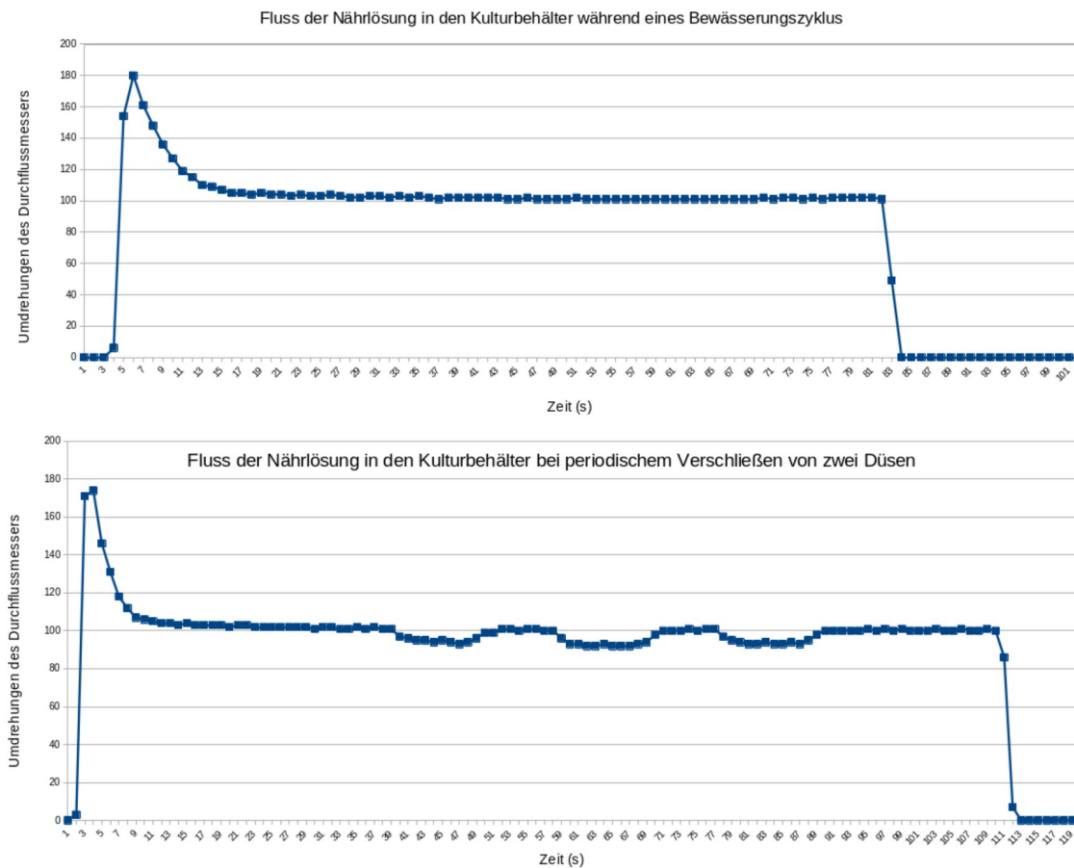


Abbildung 20. Einfluss verstopfter Sprühnebeldüsen auf die Umdrehungen des Durchflussmengenmessers.

Der Referenzwert repräsentiert den Erwartungswert (Sollwert) für den Durchfluss (Umdrehungen/s), wenn alle Düsen einwandfrei funktionieren. Er betrug im Mittel 101.9 Umdrehungen/s. Bei einer verstopften Düse war der Durchfluss im Mittel um 5.8 % verringert, bei zwei Düsen um 9,7 % und bei drei Düsen um 14,3 %.

Für den Betrieb der Sensorknoten wurde eine Arduino Mikrocontroller Platine (Elegoo UNO R3) verwendet, die auf dem ATmega328 Mikrocontroller aufgebaut war. Dieser wurde über die Arduino Entwicklungsumgebung (www.arduino.cc) programmiert. Als Basisstation diente ein Laptop-Computer mit Linux Betriebssystem (Version 4.19.87-1). Auf der Basisstation lief das Programm, das die Daten der Sensorknoten empfing und verarbeitete. Es steuerte auch die Kommunikation mit dem Benutzer im Falle einer Warnmeldung (Abbildung 21).

Schematische Darstellung des Systems

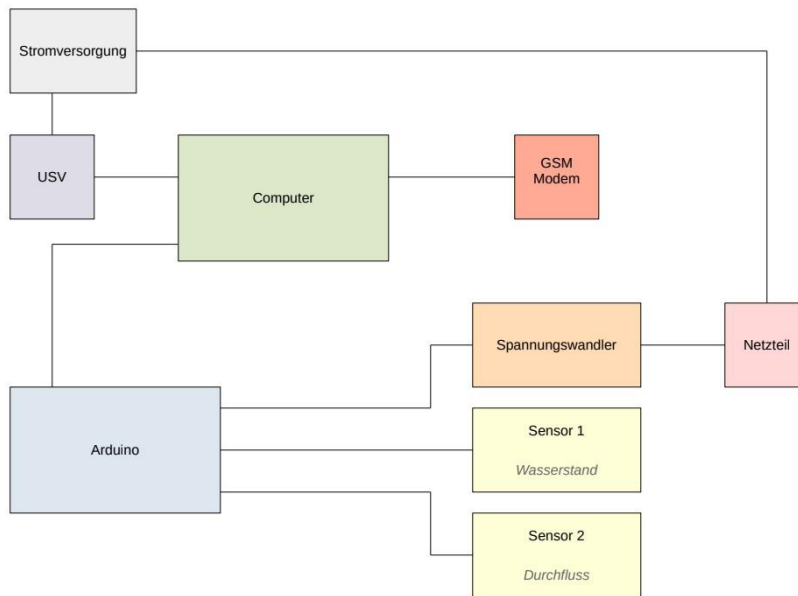


Abbildung 21. Schematische Darstellung des Überwachungs- und Warnsystems

Zur Überwachung des Füllstands in den Nährlösungstanks wurde ein Schwimmerschalter der Marke Haljia eingesetzt. Um einen Stromausfall erkennen zu können, wurde der Arduino Mikrocontroller selbst als Sensor eingesetzt. Für die Überwachung von Sprühnebeldüsen und Pumpenfunktion wurde ein Durchflussmesser (www.magnetventile-shop.de, Art-Nr. DMH-611-k) eingesetzt. Dieser wurde nach Pumpe und Filter und vor dem Kulturbehälter mit den Sprühnebeldüsen in die Rohrleitung integriert. Zum Auslesen der Sensoren wurden die digitalen Eingänge des Mikrocontrollers genutzt. Die ermittelten Werte wurden in Zustandsvariablen gespeichert und später an die Basisstation übermittelt.

Beim Start des Programms wurde begonnen, in einer Endlosschleife kontinuierlich zu prüfen, ob eine Nachricht von einem Sensorknoten eingetroffen war. Wurden für den Füllstand oder die Stromversorgung kritische Zustände übermittelt, wurde sofort eine Benachrichtigungsroutine an den Nutzer eingeleitet.

Zum Absetzen von Warnmeldungen wurde ein Huawei Surfstick (Huawei E3531) verwendet, der nach Einlegen einer freigeschalteten SIM-Karte per USB mit der Basisstation verbunden wurde. Es wurde die Funktion genutzt den Surfstick als reines GSM-Modem (GSM = Global System for Mobile Communications) einzusetzen, um damit Textnachrichten zu verschicken. Dabei half die Gammu-Bibliothek für Python (<https://wammu.eu/python-gammu/>), die eine Programmierschnittstelle bietet. Wurde durch die Software der Basisstation ein Zustand erkannt, der dem Nutzer gemeldet werden musste, wurde eine Benachrichtigungsroutine eingeleitet.

Tabelle 17. Ergebnisse für die einzelnen Schritte der Testläufe

Phase	Schritt	Grenzwert (%)	Simulierter Störfall	Erfolgreiche Wiederholungen	Fehlmeldungen
1	1	10	Keiner – Beobachtung des Systems für 20 Minuten		0
	2		Stromausfall	5/5	0
	3		Kritischer Füllstand	5/5	0
	4		Eine verstopfte Düse	1/5	0
	5		Zwei verstopfte Düsen	5/5	0
	6		Drei verstopfte Düsen	5/5	0
2	1	5	Keiner – Beobachtung des Systems für 20 Minuten	1/1	0
	2		Eine verstopfte Düse	5/5	0
	3		Zwei verstopfte Düsen	5/5	0
	4		Drei verstopfte Düsen	5/5	0
3	1	3	Keiner – Beobachtung des Systems für 20 Minuten		2
	2		Eine verstopfte Düse	5/5	1
	3		Zwei verstopfte Düsen	5/5	3
	4		Drei verstopfte Düsen	5/5	0

In der ersten Phase der Tests wurde das Überwachungs-Warnsystem in sechs Schritten beobachtet und Störfälle simuliert (Tabelle 17). Den Grenzwerttest ausgenommen waren alle Schritte in allen Wiederholungen zu 100 % erfolgreich. Alle simulierten Störfälle von kritisch niedrigen Füllständen und Stromausfällen wurden korrekt erkannt und gemeldet. Bei einem Grenzwert von 10 % Abweichung konnte nur in einem von fünf Wiederholungen eine einzelne verstopfte Düse korrekt erkannt werden. Es wurden keine Fehlmeldungen festgestellt. In der zweiten Phase des Tests mit einem Grenzwert von 5 % Abweichung lag die Erfolgsquote über alle Schritte und Wiederholungen bei 100 %. Es wurden keine Fehlmeldungen festgestellt. In der dritten Phase mit einem Grenzwert von 3 % Abweichung konnten alle simulierten Störfälle korrekt erkannt und gemeldet werden. Es wurden jedoch in drei von vier Schritten Fehlmeldungen registriert, zwei davon in Schritt 1, eine in Schritt 2 und drei in Schritt 3. Alle Fehlmeldungen betrafen ein fälschlicherweise gemeldetes Verstopfen der Sprühnebeldüsen (Tabelle 17). Dass tatsächlich keine Verstopfung vorlag, konnte durch Überprüfung der Düsen bestätigt werden.

Die Ergebnisse der Testläufe deuten darauf hin, dass das konstruierte Überwachungs- und Warnsystem durchaus das Potenzial hat, substratlose Kultursysteme gegen technische Fehler abzusichern. So konnten bekannte Fehlerquellen wie ein zu niedriger Füllstand im Nährlösungsreservoir und ein Ausfall der Stromversorgung zuverlässig erkannt und dem Benutzer gemeldet werden. Auch eine zuverlässige Überwachung der Sprühnebeldüsen war möglich, wenn die Entscheidungskriterien der Software richtig gewählt wurden. Von den angewandten

Einstellungen zeigte hier ein Grenzwert von 5 % Abweichung vom Sollwert die besten Ergebnisse, da so auch schon einzelne verstopfte Düsen erkannt worden sind, ohne dass Fehlmeldungen auftraten.

2.2. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bevölkerungszuwachs, Klimawandel und damit einhergehende Probleme wie Luftverschmutzung sowie Verknappung fossiler Brennstoffe und Wasserreserven wirken sich global negativ auf die Lebensmittelproduktion aus. Lösungsansätze zu dieser Problematik sind notwendig und müssen in globaler Zusammenarbeit gefunden werden.

Die von uns (mexikanische und deutsche Wissenschaftler*innen) durchgeführten Arbeiten inklusive der Datenerhebung zu räumlichen Kapazitäten für urbane Produktionsstätte in Berlin und Mexiko City, Evaluierung mehrjährige Messreihen zu Energie- und Stoffbilanzen, die Herausstellung von Synergien zwischen intensiver Pflanzenproduktion und urbaner Infrastrukturen, die Analysen zu Produktquantität und –qualität agrarischer Produkte aus dem urbanen Bereich, die Evaluierung recyclefähiger Substrate als Ersatz für Steinwollsubstrate, die Entwicklung eines Prozessleitsystems und Einbindung künstlicher Intelligenz zur Steuerung des Energie- und Stoffaustausches und die Akzeptanzanalyse urbaner Gartenbausysteme tragen abgemessen zur Einsparung von Energie, Wasser, Dünger und Substratabfall beim Pflanzenanbau im urbanen und peri-urbanen Bereich Berlins und Mexiko Citys (Megacity) bei. Es ist festzuhalten, dass das Projekt die Arbeitsgruppen nachhaltig in ihrer wissenschaftlichen Zusammenarbeit förderte, wodurch Expertise auf dem Gebiet urbaner und peri-urbaner Produktionssysteme entstanden ist. Diese wurde gemeinsam in wissenschaftlichen Journals publiziert und auf Tagungen und Workshops präsentiert.

2.3. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

In dem Projekt UNCOVER half die Fördermaßnahme im Rahmen der Strategie der Bundesregierung zur Internationalisierung von Wissenschaft und Forschung sowie des Aktionsplans des BMBF „Internationale Kooperation“ die wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit mit Mexiko weiter zu intensivieren. In diesem Sinne konnte Wissen zur Machbarkeit und Akzeptanz der Integration des pflanzlichen Intensivanbaus in peri-urbanen und urbanen Strukturen von Megacities mit einer Abschätzung der notwendigen technischen und infrastrukturellen Bedingungen akkumuliert werden. Durch die: Evaluierung mehrjähriger Messreihen zur Energie- und Wasserbilanzen, Herausstellung von Synergien zwischen intensiver Pflanzenproduktion und urbaner Infrastrukturen, Analysen zu Produktquantität und –qualität agrarischer Produkte aus dem urbanen Bereich, Entwicklung neuer Kultursysteme sowie Einbindung künstlicher Intelligenz zur Steuerung des Energie- und Stoffaustausches und Akzeptanzanalyse urbaner Gartenbausysteme kann nun abgeschätzt werden wie hoch die

Einsparung von Energie, Wasser, Dünger und Substratabfall beim Pflanzenanbau in peri-urbanen und urbanen Bereichen Berlins und Mexiko Citys ist. Im Detail bedeutet das, dass anhand umfänglicher Datenerhebungen zu möglichen urbanen Flächen für den intensiven Pflanzenanbau auf den Dächern von Berlin Planungshilfen für die Stadtentwicklung und für Gartenbauunternehmen als Betriebsstandorte bereitgestellt werden können. Die potenziellen Dachflächen wurden den Bezirken und der Landnutzung zugeordnet. Eine Abschätzung der Gemüseproduktion auf den Dächern von Berlin und die Abdeckung des Pro-Kopf-Verbrauchs in Berlin ist gegeben. Darüber hinaus wurden erstmals Synergien zwischen der Gewächshausproduktion im urbanen Bereich und Wohnungseinheiten aufgezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass Überschussenergie und -wasser aus semi-geschlossene Gewächshäuser von den Wohneinheiten genutzt und Grauwasser von den Wohneinheiten aufbereitet für die Gewächshausproduktion für die Produktion wiederverwendet werden könnten. Diese Ergebnisse wurden auf der DGG-Tagung präsentiert, bei der neben Wissenschaftlern auch gartenbauliche Unternehmen zugegen waren.

Weiterhin konnten Hanfschäben für die Gemüseproduktion zur Substitution von Steinwollsubstrate erfolgreich eingesetzt werden. Gleiches gilt für den Einsatz der Hybridkultursysteme, die ohne Verwendung von Substraten auskommen. Würden sich diese Anbaumethoden etablieren, könnten Treibhausgasemissionen, die bei der Produktion von Steinwolle anfallen, eingespart werden. In diesem Zusammenhang wurde das Hybridkultursystem weiterentwickelt und im Projekt CUBES Circle (FKZ: 031B0733A) integriert. Die Ergebnisse zu dem Hybridkultursystem wurden auf der Greensystagung im Jahr 2023 in Mexiko vorgestellt.

Darüber hinaus konnte durch Pflanzenversuche im nicht geschützten Anbau in peri-urbanen und urbanen Bereichen nachgewiesen werden, dass die Schwermetallakkumulation bei der innerstädtischen Gemüseproduktion in Berlin als unbedenklich, in Mexiko-City aber als bedenklich eingestuft werden kann. Diese Ergebnisse wurden veröffentlicht und stehen der Bevölkerung zur Verfügung^{26,28}.

Die Ergebnisse aus dem Projekt UNCOVER wurden bereits in den Inhalten der Lehrmodule an der HU Berlin integriert, um Wissen zu transferieren. Unter anderem wurde die Generierung dieser durch die folgenden wissenschaftlichen Arbeiten von Studierenden unterstützt:

B.Sc.-Arbeiten

Ein sensorbasiertes Warnsystem zur Überwachung der technischen Prozesse in substratlosen hydroponischen Kultursystemen; Organic rooting substrate residues from hydroponic tomato production as a nutrient source for production of Ethiopian kale (*Brassica carinata*); Einfluss wiederverwendeter organomineralischer Substrate auf die Morphologie und Nährstoffakkumulation von Pak Choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*); Hybrid Aeroponic Water Buffer System: Ein Alternatives Kultursystem zur konventionellen Tomatenproduktion auf

Steinwolle; Viability of a hybrid Aeroponic/Nutrient Film Technique system for cultivation of greenhouse tomato

M.Sc.-Arbeiten

Entwurf, Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Kultursystems zur Kombination von Aeroponik- und Nährlösungsfilmtechnologie

2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Projekts MinTHG bei anderen Stellen

In Bezug auf unsere Arbeiten sind uns keine weiteren Fortschritte bekannt. Es bleibt natürlich nicht aus, dass auch andere Forschungsgruppen an ähnliche Forschungsfragen arbeiten.

2.5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Wir können auf 7 Publikationen blicken, die im Zuge des Projekts UNCOVER in wissenschaftlichen Journalen oder Proceedings publiziert wurden. Dazu gehören:

Dannehl, D., Taylor, Z., Suhl, J., Miranda, L., Fitz-Rodriguez, E., Lopez-Cruz, I., Rojano-Aguilar, A., Navas-Gomez, G., Schmidt, U., 2017. Sustainable cities: viability of a hybrid aeroponic/nutrient film technique system for cultivation of tomatoes. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering* 11, 470-477.

Schmidt, U., Dannehl, D., Schuch, I., Suhl, J., Rocks, T., Salazar-Moreno, R., Fitz-Rodrigues, E., Aguilar, A.R., Cruz, I.L., Gomez, G.N., 2018. Closed greenhouse production systems for smart plant production in urban areas. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering* 12, 472-476.

Altmann, A., Alcántara, M., Suhl, J., Ulrichs, Ch., Salazar, R., Fitz-Rodriguez, E., Lopez-Cruz, I., Rojano-Aguilar, A., Navas-Gomez, G., Schmidt, U., Dannehl, D., 2018. Potential of urban rooftop farming in Berlin. *BFGl Tagungsband* 33, 155.

Altmann, S., Ulrichs, C., Salazar, R., Fitz-Rodriguez, E., Schmidt, U., Dannehl, D., 2019. Effects of different air pollution levels in Berlin on lettuce production in various locations. *DGG-Proceedings* 9, 1-5.

Fernández, H.A., Salazar-Moreno, R., Fitz-Rodríguez, E., López-Cruz, I.L., Schmidt, U., Dannehl, D., 2022. Yields and water use efficiency of lettuce and cherry tomatoes in urban gardens. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1-35.

Vollmer, A., Nerlich, A., Geilfus, C.M., Dannehl, D., 2022. Saving CO₂ emissions by reusing organic growing media from hydroponic tomato production as a source of nutrients to reduce Ethiopian kale (*Brassica carinata*). *Sustainability* 14, 1-14.

Pérez-Figueroa, C.E., Salazar-Moreno, R., Rodríguez, E.F., Cruz, I.L.L., Schmidt, U., Dannehl, D., 2023. Heavy metals accumulation in lettuce and cherry tomatoes cultivated in cities. *Polish Journal of Environmental Studies* 32, 1-16.

3. Referenzen

1. Dannehl, D., Josuttis, M., Huyskens-Keil, S., Ulrichs, C., and Schmidt, U. (2014). Comparison of different greenhouse systems and their impacts on plant responses of tomatoes. *Gesund Pflanz.* 66, 111-119. 10.1007/s10343-014-0322-0.
2. Dannehl, D., Josuttis, M., Ulrichs, C., and Schmidt, U. (2014). The potential of a confined closed greenhouse in terms of sustainable production, crop growth, yield and valuable plant compounds of tomatoes. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 84, 210-219.
3. Schmidt, U., Schuch, I., Dannehl, D., and Rocks, T. (2014). Long Time Plant Response Measurements for Yield Prediction, Water Use and Climate Control Optimization Using Gas Exchange Measurements in Semi Closed and Ventilated Greenhouses. *Acta Hort.*, 469-476.
4. Schmidt, U., Schuch, I., Dannehl, D., Rocks, T., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., and López-Cruz, I.L. (2012). The closed solar greenhouse technology and evaluation of energy harvesting under summer conditions. *Acta Hort.* 952, 433-439.
5. Dannehl, D., Suhl, J., Ulrichs, C., and Schmidt, U. (2015). Evaluation of substitutes for rock wool as growing substrate for hydroponic tomato production. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 88, 68-77.
6. Dannehl, D., Becker, C., Suhl, J., Josuttis, M., and Schmidt, U. (2016). Reuse of organomineral substrate waste from hydroponic systems as fertilizer in open-field production increases yields, flavonoid glycosides, and caffeic acid derivatives of red oak leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) much more than synthetic fertilizer. *J. Agric. Food Chem.* 64, 7068-7075.
7. BMEL (2014). Der Gartenbau in Deutschland. Daten und Fakten. BMEL.
8. Müller-Lindenlauf, M., Zipfel, G., Rettenmaier, N., Gärtner, S., Münch, J., Paulsch, D., and Reinhardt, G. (2013). CO₂-Fußabdruck und weitere Umweltwirkungen von Gemüse aus Baden-Württemberg. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
9. TLS (2011). Spitzenerträge im Jahr 2011 bei Gurken und Tomaten in Gewächshäusern. Thüringer Landesamt für Statistik.
10. Voss, J. (2011). Market Special: Greenhouse Farming in Germany. The ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation.
11. Ramírez, T., Meas, Y., Dannehl, D., Schuch, I., Miranda, L., Rocks, T., and Schmidt, U. (2015). Water and carbon footprint improvement for dried tomato value chain. *J. Clean. Prod.* 104, 98-108. 10.1016/j.jclepro.2015.05.007.

12. BDEW (2019). Entwicklung des Wasserverbrauchs pro Kopf und Tag in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2017 (in Litern). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Statista.
13. Nolde, E. (2013). Hohe Energie- und Wassereffizienz durch Grauwasserrecycling mit vorgeschalteter Wärmerückgewinnung. Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. 1, 3-6.
14. fbr (2005). Grauwasser-Recycling. Planungshinweise und Betriebsgrundlgen.
15. Abad, M., and Noguera, P. (2000). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In Manual del cultivo sin suelo, M. Urrestarazu, ed. (Servicio de Publicaciones Universidad de Almeria, Mundi-Prensa), pp. 137-183.
16. Abad, M., Martinez, P.F., Martinez, M.D., and Martinez, J. (1993). Evaluació n agrono mica de los sustratos de cultivo. Actas Hortic. 11, 141-154.
17. De Boodt, M., and Verdonck, O. (1972). The physical properties of the substrates in horticulture. Acta Hort. 26, 37-44. 10.17660/ActaHortic.1972.26.5.
18. Boertje, G.A. (1983). Physical laboratory analyses of potting composts. Acta Hort. 150, 47-50. 10.17660/ActaHortic.1984.150.4.
19. Jenkins, J.R., and Jarrell, W.M. (1998). Predicting physical and chemical properties of container mixtures. Hortscience 24, 292-295.
20. SenUVK (2017). Schwermetalle Jahresübersicht 2017 - Luftqualität / Land Berlin. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz.
21. SenSW (2019). Luftreinhalteplan 2018-2025 - Szenarien zur NO₂-Konzentration im Straßenraum 2020 (Umweltatlas). Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen.
22. Verordnung-(EG)-Nr.-1881/2006 (2006). Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln.
23. WHO (1973). Trace elements in human nutrition : report of a WHO expert committee. World Health Organization technical report series 532, 1-68.
24. EFSA (2014). Scientific opinion on the risk to public health related to the presence of chromium in food and drinking water. EFSA Journal 12, 3595.
25. EFSA (2015). Scientific opinion on the risk to public health related to the presence of nickel in food and drinking water. EFSA Journal 13, 4002.
26. Pérez-Figueroa, C.E., Salazar-Moreno, R., Rodríguez, E.F., Cruz, I.L.L., Schmidt, U., and Dannehl, D. Heavy metals accumulation in lettuce and cherry tomatoes cultivated in cities. Polish Journal of Environmental Studies 32, 1-16. 10.15244/pjoes/157316.
27. Fernández, H.A., Salazar-Moreno, R., Fitz-Rodríguez, E., López-Cruz, I.L., Schmidt, U., and Dannehl, D. (2022). Yields and water use efficiency of lettuce and cherry

- tomatoes in urban gardens. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1-35. 10.24850/j-tyca-14-5-5.
28. Altmann, S., Ulrichs, C., Salazar, R., Fitz-Rodriguez, E., Schmidt, U., and Dannehl, D. (2019). Effects of different air pollution levels in Berlin on lettuce production in various locations. *DGG-Proceedings* 9, 1-5. 10.5288/dgg-pr-sa-2019.