

Zukunftstaugliche Ernährungssicherung durch Agrarwirtschaft in kontrollierter Umgebung

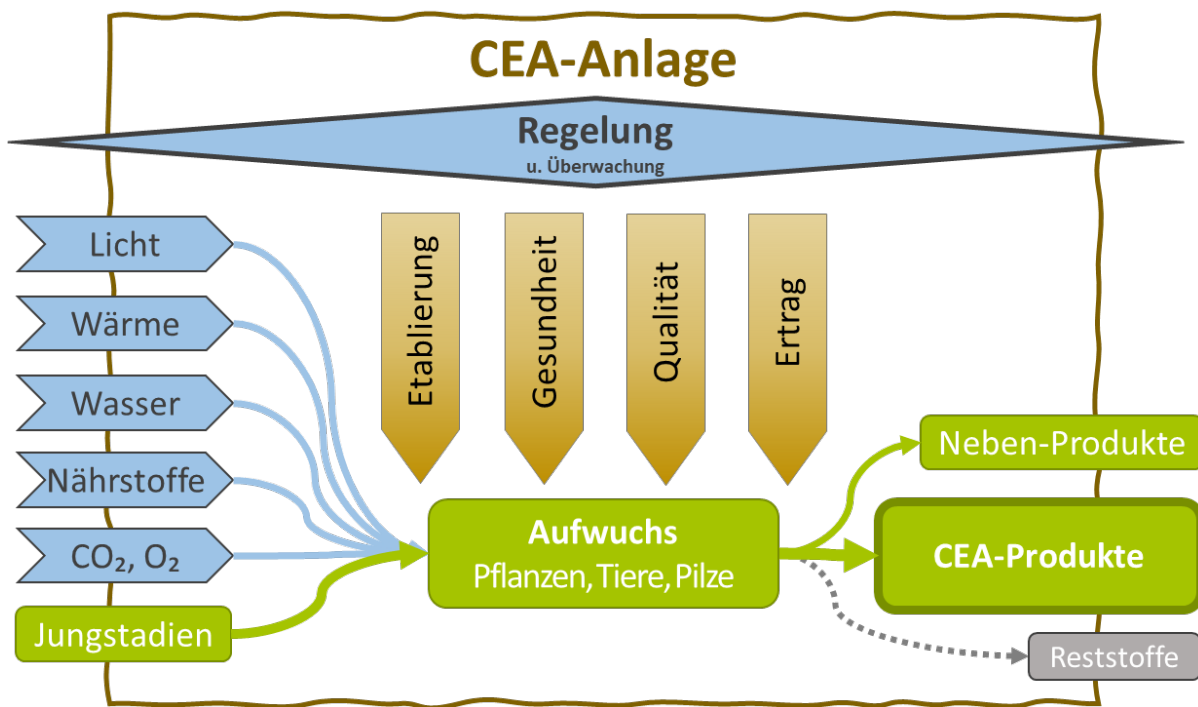
Die Nachfrage nach Fläche zur Produktion von Nahrungsmitteln nimmt weltweit aufgrund des Bevölkerungswachstums zu. Sie wird durch die Folgen des Klimawandels und einer ressourcenintensiven Lebensweise verschärft. Die Agrarwirtschaft unter kontrollierten Bedingungen (hier „Controlled Environment Agriculture“ – CEA, siehe Box rechts), abseits von landwirtschaftlich geeigneten Flächen, ist ein zentraler Baustein zur resilienten, regionalen Versorgung mit Lebens- und Futtermitteln. Die drei wichtigsten Vorteile von CEA sind: die weitgehende **Entkopplung von Jahreszeiten, Klima und Standort**, die deutlich **höhere Produktivität bei beständig hoher Produktqualität**, sowie eine deutliche **Verringerung von Umwelt- und Gesundheitsbelastungen** (Nährstoffauswaschung, Flächen- und Wasserverbrauch, Pflanzenschutzmittel- und Antibiotikaeinsatz). Effiziente CEA-Technik ist damit auch ein exportierbares Wirtschaftsgut.

Was ist CEA?

Controlled Environment Agriculture (CEA) umfasst die Produktion von Pflanzen - einschließlich Algen -, Pilzen, Insekten, Garnelen und Fischen in weitgehend geschlossener Kreislaufwirtschaft. Die Pflanzen werden bei optimierten Wachstumsbedingungen in Substraten oder substratlos angebaut. Die Insekten-, Krebstier- und Fischproduktion umfasst vor allem jene Arten, die sich aufgrund ihrer Ansprüche eignen, in kontrollierten und begrenzten Umgebungen heranzuwachsen. Die benötigte Energie stammt idealerweise aus erneuerbaren Quellen. Controlled Environment Agriculture ist dann nachhaltig, resilient und ressourceneffizient und eine zukunftstaugliche Form der Agrarwirtschaft, um gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen.

Die Vorteile von CEA sind umso größer, je stärker die Nachfrage nach Fläche für landwirtschaftliche Produktion ist, je stärker klimatische oder standörtliche Bedingungen andere Produktionsweisen von Nahrungsmitteln einschränken und je mehr Energie aus nachhaltigen Quellen vorhanden ist. Diese Verhältnisse treffen in vielen Fällen auf bevölkerungsreiche und technisch höher entwickelte Weltregionen zu. Die Entwicklung von CEA-Technik ist deshalb für die UN-Nachhaltigkeitsziele sowohl für bevölkerungsreiche Länder in wärmeren Weltregionen als auch für Industrienationen der gemäßigten Breiten sehr relevant.

Für die ständige Fortentwicklung der Technologie, den Erhalt der Expertise und eine Demonstration der erfolgreichen Anwendung ist der Forschungs- und Entwicklungsstandort Deutschland wichtig. Die folgende Forschungsstrategie geht deshalb davon aus, dass die deutsche Politik zwei Ziele verfolgen wird: erstens Marktführerschaft bei CEA-Anlagen für den Export und zweitens Etablierung von CEA in Deutschland als Pilotmarkt und Standort für Entwicklungen sowie zur Verbesserung der Selbstversorgung.



1. Marktführerschaft bei CEA-Technologie

CEA-Technologie aus Deutschland muss im internationalen Wettbewerb überzeugen, um die Marktführung zu erlangen. Dies kann gelingen durch höhere Produktionseffizienz, bessere Systemeffizienz, verringerte Umwelt- und Gesundheitsbelastungen, höhere Produktqualität und geringere Kosten pro Endprodukt. Auch die gelungene Integration von CEA-Anlagen in den urbanen Raum oder vorhandene Infrastruktur sind gute Verkaufsargumente.

1.1. Höhere Produktionseffizienz

Die Produktionseffizienz stellt das Verhältnis aus erzieltm Ertrag und eingesetzten Ressourcen dar. Nach Ansicht der Steuerungsgruppe ist der Bedarf für die effizientere Produktion von Lebensmitteln in Weltregionen mit Wassermangel, Extremwetterereignissen und gleichzeitig wachsender Bevölkerung am größten und wird aufgrund des Klimawandels weiter steigen. Dementsprechend besteht in diesen Regionen auch das größte Potential für CEA-Technik und CEA-Produkte. Gerade in den heißen, trockenen Regionen könnte ausreichend klimaneutrale Energie bereitstehen, um die energieintensiven CEA-Anlagen zu betreiben. In anderen Regionen können geothermale Energie oder industrielle Abwärme genutzt werden.

Eine höhere Effizienz der Produktion kann über zwei Hebel erreicht werden:

- **Optimierung des Verhältnisses von Ressourcen zu Ertrag**, also a) Nutzung von weniger Energie, Wasser, Nährstoffen und Grundfläche (Ressourceneffizienz) bei gleichen Erträgen und gleicher Qualität oder b) höhere Erträge (Produkteffizienz) durch günstigere Wachstumsbedingungen, Schutz der Gesundheit der kultivierten Organismen, Züchtung angepasster Sorten oder Rassen und besseren Erntemethoden bei gleichem

Ressourceneinsatz und c) durch ausgeklügelte Regelung und möglicherweise den Einsatz künstlicher Intelligenz;

- **Verminderung von Ressourcenverlusten und Abfall** durch Nutzung von Kreisläufen und Stoffnebenströmen zum Beispiel durch Rückgewinnung von Betriebsstoffen aus Abfällen.

Dazu müssen vorhandene CEA-Systeme mit einer Kulturart (Einfachsysteme) deutlich durch Forschung und Innovation optimiert werden. Nach Einschätzung der Autoren gilt es in dieser Rangfolge 1. für CEA besonders geeignete Anbau- und Haltungsmethoden zu entwickeln und geeignete Arten und Rassen auszuwählen, 2. Verfahren zu entwickeln, die Verluste aufgrund von Schadorganismen und Kontaminationen verringern, 3. besser geeignete Rassen zu züchten und 4. Kosten für den Einsatz von Produktionsmitteln zu verringern.

1.2. Höhere Systemeffizienz, verringerte Umwelt- und Gesundheitsbelastungen

Die drei wichtigsten Bausteine für eine höhere Systemeffizienz sind nach Ansicht der Autoren die Kopplung von CEA-Systemen, Verbesserung der Regelungstechnik und Verbesserung der Robustheit und Zuverlässigkeit von CEA-Anlagen.

Für die zentralen Herausforderungen unserer Zeit - einerseits Klimawandel, Biodiversitätsverlust, Umweltverschmutzung und Flächenversiegelung und andererseits globales Bevölkerungswachstum und Ernährungswandel der Gesellschaft - lassen vor allem Verknüpfungen zwischen tierischen und pflanzlichen Produktionssystemen und kaskadischer Verwertung von Reststoffen eine Steigerung der Produktion bezogen auf die Menge der eingesetzten Ressourcen erwarten. **Fortschrittliche produktionseffiziente CEA-Anlagen bestehen daher aus mehreren gekoppelten Systemen** z.B. Tier-Pflanze-Pilz, einschließlich der technischen Umgebung.

Eine hohe Gesamtproduktivität wird durch die Verringerung von Kosten für den **Schutz** der kultivierten Arten gesteigert - z.B. durch vorbeugenden Pflanzenschutz oder Sicherstellung der Tiergesundheit. Etwaige Schutzmaßnahmen müssen daher schon bei der Erhöhung der Produktivität durch physiologische, technische und züchterische Verfahren, Kulturführung, verbesserte Infrastruktur und Regelung berücksichtigt werden („protection by design“), soweit dies wirtschaftlich vertretbar ist. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass allein vorbeugende Maßnahmen für den Schutz von CEA-Kulturen ausreichen. Deshalb sollte zunächst analysiert werden, welches Risiko von unzureichendem Schutz ausgeht, also unter welchen Umständen ein inakzeptables Risiko eintritt und wie groß der zu erwartende Schaden wäre. Für Fälle mit nicht akzeptablem Risiko sollten dann angepasste zusätzliche Schutzmaßnahmen sowie physikalische und biologische Gegenmaßnahmen in einem Förderprogramm für Produktionseffizienz entwickelt werden. Forschung muss dementsprechend **systemisch** angelegt sein und sollte dafür ausreichende Projektzeiten eingeräumt bekommen.

Der Zustand von CEA-Kulturen wird durch Mess- und Sensorsysteme erfasst und mittels **Regelungstechnik** optimiert, weshalb der Mess- und Regeltechnik eine besondere Bedeutung zukommt. Schon Einzelsysteme (z.B. geschlossene Gewächshäuser) benötigen eine ausgefeilte Regelungstechnik. Dies potenziert sich bei gekoppelten Systemen allein schon durch die Anzahl der Steuerungsgrößen und die Möglichkeit von Rückkopplungen. Die Verknüpfungen von Einzelsystemen sind aber bisher nur eingeschränkt entwickelt. Sie erfordern eine

Optimierung der Einzel- und Gesamtsysteme in größeren Maßstäben, um mit CEA die herkömmliche Agrarwirtschaft kosteneffizient zu erweitern. Mit modellbasierten Algorithmen oder künstlicher Intelligenz könnte die Regelung und Überwachung von CEA-Anlagen weiter optimiert werden.

Robustheit (hier verstanden als Toleranz gegenüber Fehlern), Effizienz, Anpassbarkeit, und Zuverlässigkeit der eingesetzten Infrastruktur samt Mess- und Regeltechnik ist ein weiteres Qualitätsmerkmal, das dem internationalen Export dienlich ist. Forschung, die die **Robustheit und Zuverlässigkeit** von CEA-Anlagen und CEA-Regelungssystemen erhöht, muss einerseits Teilkreisläufe betrachten aber gleichzeitig die Robustheit und Effizienz des Gesamtsystems im Auge behalten und hier besonders die komplexe Regelung von verknüpften Mehrfachsystemen wie Tier-Pflanze-Pilz berücksichtigen. Das Ausmaß der Innovationsförderung dazu sollte sich an dem erwarteten Beitrag zur Wertschöpfung orientieren.

1.3. Höhere Produktqualität

Eine **gleichbleibende hohe Qualität** der Futter- und Nahrungsmittel wie sie in CEA-Anlagen produziert werden kann, entspricht den Wünschen der verarbeitenden Industrie und wird von einem Großteil der Konsumenten bevorzugt. Durch die Regelung der Produktion in einer geschlossenen Umgebung ließen sich auch indirekt bestimmte **Qualitätseigenschaften** wie gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe von Produkten bestimmen. Hier fehlt jedoch noch viel Wissen, wie sich die Umweltreize auf die Inhaltsstoffe auswirken und die Inhaltsstoffe je nach Produkt regeln lassen.

Nicht nur die Zusammensetzung der Nahrungsmittel wirkt sich auf die menschliche Gesundheit aus, sondern auch die auf und in den Nahrungsmitteln vorhandenen Mikroorganismen, das **Mikrobiom**. Menschen, die vor allem in der Kindheit mit einem vielfältigen Mikrobiom in Berührung gekommen sind, sind weniger anfällig für Infektionen. Ein Zusammenhang zwischen einem eingeschränkten Mikrobiom und der Gesundheit von Bewohnern von Raumstationen wird vermutet. Deshalb sind Untersuchungen des Mikrobioms von CEA-Produkten an sich, im Vergleich zum Mikrobiom von Produkten in unkontrollierten Umgebungen und der Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit essentiell. Weitergehende Forschung sollte untersuchen, wie sich das Mikrobiom gezielt unter den kontrollierten Bedingungen von CEA-Anlagen beeinflussen lässt.

Die **Sicherheit** von erzeugten Futter- und Lebensmitteln ist ein unverzichtbares Qualitätsmerkmal. CEA-Anlagen sind nicht vollständig geschlossene Systeme – Ressourcen und biologisches Ausgangsmaterial wird eingeführt, reife Produkte werden entnommen. Dabei kann es zur Einschleppung von Keimen und Stoffen kommen, die die Endprodukte belasten. Zur Vermeidung oder Eingrenzung einer solchen Einschleppung dienen die gleichen Maßnahmen wie oben für den Schutz der Kulturen beschrieben.

1.4. Etablierung von CEA-Anlagen: Bau, Modularisierung, Skalierung

Grundsätzlich stehen zwei bauliche Wege zur **Etablierung neuer CEA-Anlagen** offen: Anpassung vorhandener Gebäude an die Anforderungen von CEA-Anlagen und Neubau. Ein Neubau sollte im Sinne der Nachhaltigkeit nur in Betracht gezogen werden, wenn vorhandene Gebäude (z.B. Bürogebäude, Wohngebäude, Fabriken, Tiefgaragen, Tierställe) nicht wirtschaftlich umgebaut werden können. Neubauten sollten aus nachhaltig produziertem

Material gebaut werden (z.B. Holz). Klimaschädlich neu produzierter Beton oder Stahl sollten nur zum Einsatz kommen, wenn in Life Cycle Assessments (Ökobilanzen) Vorteile belegbar sind. Neue, aber auch vorhandene Gebäude müssen im Sinne der Nachhaltigkeit so für CEA-Anlagen gestaltet werden, dass Stoff- und Energieflüsse in vorhandene Infrastrukturen integriert, bzw. auch geschlossen werden können. Die Forschungsförderung sollte deshalb in Ideenwettbewerben und später in Umsetzungsprojekten nachhaltige Rohbaukonstruktionen entwickeln lassen. Zusätzlich erscheinen Ideenwettbewerbe für Umbaumaßnahmen von Bestandsgebäuden lohnenswert.

Weitere wirtschaftliche Vorteile können durch **Standardisierung** von Verfahren, Infrastrukturen und Maßen erreicht werden. Hier gilt es rechtzeitig internationale Normen und Standards unter Beteiligung von Industrie und Forschung zu entwickeln. Deutschland sollte im Sinne dieser Strategie die Standardisierung anstoßen. In dieser Weise könnten **modularisierte Standardeinheiten** mit Energieerzeugung und -speicherung (z.B. koppelbare CEA-Container) Vorteile für Konstruktion und Betrieb bringen und als neue Technologie auch wirtschaftlich überzeugen. Eine Modularisierung von Produktionseinheiten verringert auch den Aufwand, für individuelle Anlagen neue Regelungssysteme zu entwickeln.

Forschung zur Verbesserung von CEA findet an kleinen, experimentellen CEA-Anlagen statt. Für den Export werden aber große Anlagen im industriellen Maßstab benötigt. Wie eine solche **Skalierung** unter welchen Bedingungen am günstigsten gelingen kann, ist eine wichtige Innovationsaufgabe, die die Zusammenarbeit von Unternehmen und Forschungseinrichtungen benötigt. Dabei müssen auch vor- und nachgelagerte Bereiche entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden (Zuchtmaterial, Jungstadien, Einbindung in vorhanden Versorgungsinfrastruktur, Transport, Verwertung).

1.5. Anforderungen an Forschung und Innovation

Die **Förderung** der Forschung und Entwicklung von CEA-Produktion sollte zweigleisig fahren. Zum einen sollte sie langfristig die Forschung zur Entwicklung zwei- oder dreifach gekoppelter Systeme fördern, was höchstwahrscheinlich mehrere Iterationsstufen benötigt. Zum anderen sollten vorhandene CEA-Einfachsysteme in Innovationsvorhaben optimiert werden.

Die **agrartechnische Forschung** für CEA-Exportmärkte sollte sich vor allem auf die Systemoptimierung konzentrieren, indem der Ertrag gesteigert (Produkteffizienz) und der Energie- und Wasserverbrauch verringert wird (Ressourceneffizienz).

Zusätzlich zu der Fortentwicklung von CEA-Anlagen sollte **agrarökonomische und agrarpolitische Forschung** die volkswirtschaftlichen Chancen für den CEA-Export herausarbeiten und der Politik Konzepte empfehlen, die CEA-Anlagen deutschen Ursprungs international fördern.

Bei allen **Forschungs- und Entwicklungsvorhaben** ist folgendes zu beachten:

- Die Qualität der in CEA erzeugten Produkte muss gleich oder höher sein als in Produkten aus unkontrollierter Umgebung.
- Stoffe, die in Futter- oder Lebensmitteln bedenklich sind, dürfen sich nicht im CEA-System anreichern (etwa durch Austritt aus der CEA-Infrastruktur oder Migration innerhalb der CEA-Anlage).

- Das Wohl von in CEA-Anlagen eingesetzten Tieren muss gewährt sein und bei der Entwicklung von Umgebungen, Installationen und Regelungen berücksichtigt werden.

Die Vorauswahl von Zuchtmaterial und die Züchtung angepasster Rassen und Sorten erfordert viel Zeit und sollte frühzeitig und langfristig gefördert werden.

2. Deutschland als Pilotmarkt

Neue Produktionsverfahren überzeugen, wenn sie im praktischen Einsatz ihre Qualität, Eignung, Leistung und Wirtschaftlichkeit zeigen können. Die Politik könnte durch **direkte Förderung oder wirtschaftliche Erleichterungen** Unternehmen anregen, Lebensmittel durch CEA zu erzeugen. Volkswirtschaftlich gesehen wäre es jedoch effizienter, wenn sich CEA größtenteils eigenständig aufgrund seiner Vorteile am Markt etabliert und die öffentliche Förderung sich darauf beschränkt, den Zugang zu erleichtern. Agrarforschung kann dafür geeignete Optionen entwickeln.

Geeignete **rechtliche Rahmenbedingungen** sind eine Voraussetzung für die weitere Etablierung und die Marktgängigkeit von CEA-Anlagen und -Produkten. Diese sollten über Forschungsaufträge identifiziert und formuliert werden. Eine Grundlage für unternehmerische und behördliche Entscheidungen ist ein Kataster geeigneter und priorisierter Flächen, auf denen CEA-Produktion erwünscht ist. Voraussetzung dafür ist zunächst die Entwicklung wissenschaftlich fundierter und gesellschaftlich akzeptierter Kriterien, u.a. infrastrukturelle Voraussetzungen für Energieversorgung und Logistik, rechtliche Rahmenbedingungen, Bodenschutz, Klimaschutz, Naturschutz, Landschaftsschutz und Stärkung des ländlichen Raumes.

Für die politische Steuerung der **Marktentwicklung** sind wissenschaftlich fundierte Vorschläge wichtig, wie CEA nicht nur im urbanen Raum aufgebaut werden kann, sondern wie CEA auch bestehende Agrarsysteme (z.B. in ländlichen Regionen) zur Stärkung der regionalen Landwirtschaft ergänzen kann.

CEA-Produkte werden von Endverbrauchern oder von der verarbeitenden Lebensmittelindustrie **nachgefragt** werden, wenn sie preiswerter oder qualitativ höherwertiger sind. Forschung sollte deshalb auch folgenden Fragen nachgehen:

- Gibt es Eigenschaften von CEA-Produkten im Vergleich zu solchen aus bestehenden Anbausystemen, wie Freilandproduktion oder einfach geschütztem Anbau in nicht-klimaregulierten Gewächshäusern oder offener Aquakultur, die die Akzeptanz von CEA-Produkten erhöhen oder verringern?
- Welche Maßnahmen von Politik, Förderung und Wissenschaftskommunikation können die Akzeptanz der Gesellschaft für CEA und Bedenken adressieren und so die Marktingegration von Produkten aus CEA erhöhen?
- Wie kann die ökonomische Nachhaltigkeit und die Wettbewerbsfähigkeit von CEA-Produkten gegenüber bestehenden agrarischen Produktionssystemen verbessert/gewährleistet werden?

Diese Untersuchungen sollten in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden (z.B. alle fünf Jahre), um die Politik und die Forschungsförderung entsprechend anzupassen.

3. Übergeordnetes

Beide vorgenannten Ziele, Export für den Weltmarkt und Etablierung eines Pilotmarkts in Deutschland, erfordern Möglichkeiten, mit denen verschiedene Optionen der Entwicklung und der Nutzung von CEA verlässlich und objektiv verglichen werden können. Hierfür eignen sich **Life Cycle Assessments (LCAs)**, die das gesamte CEA-System betrachten: Gebäude, Energiebedarf, Lebensmittelproduktion, Kreislauf- und Abfallwirtschaft, Grundflächennutzung, Bodenversiegelung und Klimawirkung. Verfahren für die Erstellung von LCAs in dieser Komplexität müssen jedoch erst noch entsprechend der ISO-Normen ausgearbeitet und etabliert werden.

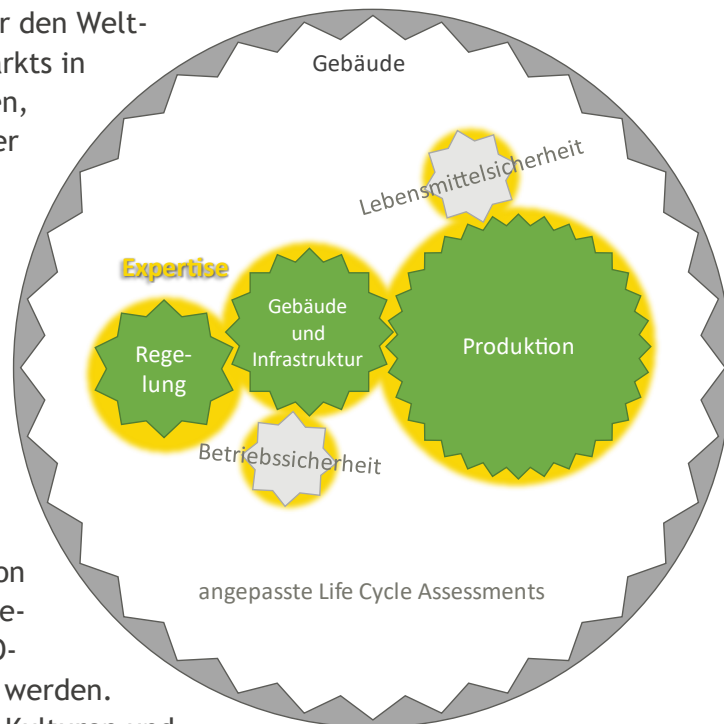
Da sich gleichzeitig die biologischen Kulturen und die Technik für CEA-Anlagen entwickeln, müssen auch die Methoden und Datengrundlagen für LCAs fortlaufend aktualisiert werden. Es wäre deshalb zielführend, wenn Forschungseinrichtungen und Unternehmen die notwendigen Daten für die Fortentwicklung der LCAs standardisiert bereitstellen und ein langfristiger Forschungsauftrag für diese Aktualisierung besteht.

CEA in Gebäuden ist auf andere Weise anfällig für Störungen als die Produktion im Freiland. Wie die **Betriebssicherheit** der Anlagen gegen unabsichtliche oder mutwillige Störungen festgestellt, gewährleistet, dokumentiert und gegebenenfalls wiederhergestellt werden kann, muss deshalb ebenfalls ein Ziel von Forschung sein. Die Forschung muss so angelegt sein, dass daraus Änderungen der einschlägigen Rechtsnormen abgeleitet werden können.

Lebensmittelsicherheit ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Verwendung von CEA-Produkten. Untersuchungen zur Lebensmittelsicherheit von CEA-Produkten müssen daher fortlaufend stattfinden. Forschung sollte der Frage nachgehen, wie die Untersuchungen möglichst personen-, kosten- und ressourceneffizient durchgeführt werden können.

Die Komplexität von CEA-Anlagen bei gleichzeitig angestrebter Robustheit bedarf entsprechender Ausbildung von Spezialist:innen für Kulturführung, Technik, Architektur und Regelung. Diese **Aus- und Fortbildung** muss sich sowohl an inländische als auch an ausländische Personen richten, um CEA-Anlagen als Exportgut zu unterstützen.

Die Forschungsförderung für CEA wird vermutlich gewohnheitsmäßig über mehrere Ministerialressorts verteilt werden, zumindest auf Bundesebene. Daher ist es umso wichtiger, dass die **Ergebnisse der Forschung durch die Ministerien für Wirtschaft, Landwirtschaft, Entwicklung und Wissenschaft regelmäßig zusammengeführt und beurteilt** werden, um daraus notwendige, weitere forschungspolitische und wirtschaftliche Maßnahmen abzuleiten.



4. Zusammenfassung

Die größte volkswirtschaftliche Bedeutung von CEA aus deutscher Sicht liegt im Export der Technologie verbunden mit der Forschung, Entwicklung und Demonstration der Technologie in Deutschland. CEA ergänzt die herkömmliche Landwirtschaft, wo landwirtschaftliche Fläche nicht ausreichend zur Verfügung steht und nachhaltig bereitgestellte Energie preiswert verfügbar ist.



Für die Entwicklung der CEA-Technologie sollte sich die staatliche Forschungsförderung bei begrenzten finanziellen Ressourcen auf diejenigen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben konzentrieren, die am stärksten zur späteren Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln in CEA-Anlagen beitragen. Dies sind nach Ansicht der Autoren:

1. die Wechselwirkungen zwischen der Umgebung und dem Produkt zu verstehen und aus dem Wissen Regelung, Messtechnik und Überwachung von Mehrkomponenten-CEA-Anlagen zu entwickeln, um sowohl Produktivität (insbesondere die Energieeffizienz) als auch Produktqualität zu erhöhen,
2. Gebäude- und Energietechnik zu verbessern, um Kosten zu senken,
3. Stoffkreisläufe soweit wie möglich zu schließen, um Ressourcen zu sparen,
4. durch geeignete Maßnahmen die Robustheit und Zuverlässigkeit der Anlagen, der Produktion und die Lebensmittelsicherheit der Produkte zu sichern.

Die Förderung der Forschung und Innovation muss politisch von Maßnahmen begleitet werden, die die Akzeptanz von CEA-Produkten und -Anlagen in Deutschland als Pilotmarkt erhöhen. Sozialwissenschaftliche Forschung kann die Politik bei der Auswahl geeigneter Wege unterstützen.