

Zukunftsfähige Ernährungssicherung durch Agrarwirtschaft in kontrollierten Produktionssystemen

Forschungsstrategie der Deutschen Agrarforschungsallianz,
Fachforum Controlled Environment Agriculture

Herausgeber

Deutsche Agrarforschungsallianz (DAFA), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

ENTWURF, Stand: 20.02.2026 13:58:00

Koordination und verantwortliche Autorinnen und Autoren:

Senthold Asseng¹, Hildegard Garming², Claudia Luksch³, Werner Kloas⁴, Oliver Körner⁵,
Heike Susanne Mempel⁶, Stefan Streif^{7, 11}, Andreas Ulbrich⁸, Christian Ulrichs⁹,
Andreas Vilcinskas^{10, 11}, Ute Katharina Vogler¹², Martin Erbs¹³, Martin Köchy¹³

¹ Technische Universität München, Hans Eisenmann-Forum für Agrarwissenschaften, Lehrstuhl für Digital Agriculture

² Thünen-Institut für Betriebswirtschaft

³ Technische Universität München, Hans Eisenmann-Forum für Agrarwissenschaften

⁴ Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Abteilung Biologie der Fische, Fischerei und Aquakultur

⁵ Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ), Programmbereich Gartenbausysteme der Zukunft

⁶ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Professur Technik im Gartenbau und Qualitätsmanagement

⁷ Technische Universität Chemnitz, Professur Regelungstechnik und Systemdynamik

⁸ Hochschule Osnabrück, Professur Gemüseproduktion und -verarbeitung

⁹ Humboldt-Universität zu Berlin, Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Fachgebiet Urbane Ökophysiologie der Pflanzen

¹⁰ Justus-Liebig- Universität Gießen, Professor am Institut für Insektenbiotechnologie

¹¹ Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME, Institut Bioressourcen

¹² Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und urbanem Grün

¹³ Geschäftsstelle der Deutschen Agrarforschungsallianz

1 Das Wichtigste in Kürze

2 *Die nachfolgende Strategie zeigt auf, wie die Lebensmittelproduktion in Produktionssystemen mit kontrollierter Umgebung (Controlled Environment Agriculture, CEA) einen zentralen Beitrag zur Ernährungssicherung innerhalb der planetaren Grenzen leisten kann. Die Strategie wurde von führenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern erarbeitet und öffentlich intensiv diskutiert.*

7

8 Die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung mit bestehenden landwirtschaftlichen Produktionssystemen stößt an ökologische Belastungsgrenzen, besonders bei Klima, Biodiversität, Nährstoffausträgen und Flächenverbrauch. CEA kann diesen Druck erheblich reduzieren, indem Pflanzen, Pilze, Insekten, Garnelen und Fische in weitgehend geschlossener Kreislaufwirtschaft produziert werden.



21 ■ CEA als Exportgut und Beitrag zu den globalen Nachhaltigkeitszielen

22 CEA kann entscheidend zur Umsetzung mehrerer Sustainable Development Goals (SDGs) beitragen - darunter SDG 2 „Kein Hunger“, SDG 3 „Gesundheit und Wohlergehen“, SDG 9 „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ sowie SDG 12 „Nachhaltiger Konsum und Produktion“.

25 Deutschland verfügt über exzellente Forschung, Ingenieurkompetenz sowie herausragende Expertise in Regelungs-, Automatisierungs- und KI-Anwendungen. Diese Voraussetzungen ermöglichen es, die CEA-Technologie international wettbewerbsfähig zu entwickeln und erfolgreich zu exportieren.

29 Um dafür eine starke Position im globalen Markt aufzubauen, sind Standardisierung, Normung und Patente ebenso entscheidend wie eine koordinierte Weiterentwicklung der Technologie und der Aufbau eines Pilotmarktes in Deutschland. Politik und Verwaltung können diese Entwicklung durch gezielte Forschungs-, Wirtschafts- und Innovationsförderung maßgeblich unterstützen.

34 ■ Stand der CEA-Technologie und weitere Entwicklung

35 CEA erlaubt die Erzeugung gleichbleibend hochwertiger Lebensmittel, nah am Verbraucher und unabhängig von Standortfaktoren, wie Klima, Wetter oder Bodenqualität. Vertikal gestapelte Produktionsflächen erhöhen die Flächennutzungseffizienz massiv und ermöglichen im Vergleich zur feldgebundenen Landwirtschaft auf der gleichen Fläche wesentlich höhere Erträge.

1 Der derzeit noch hohe Energiebedarf von CEA relativiert sich zunehmend, vor allem durch
2 Fortschritte in den Produktionsverfahren, in der Lichttechnik und den Ausbau erneuerbarer
3 Energien. Um CEA als leistungsfähige Ergänzung zu etablieren, müssen robuste, automati-
4 sierte und skalierbare Systeme entwickelt werden, die ökologisch wie ökonomisch überzeu-
5 gen.

6 ■ **Zentrale Herausforderungen und strategische Hebel**

7 Für den Export bestimmte CEA-Technologie muss durch Qualität und Kosteneffizienz über-
8 zeugen. Da sowohl der Klimawandel als auch technologische Entwicklungen - insbesondere
9 in der künstlicher Intelligenz - eher exponentiell als linear verlaufen, ist schnelles und ko-
10 ordiniertes Handeln wichtig.

11 Die Forschungsstrategie konzentriert sich daher auf die Felder Produktionseffizienz, Systemeffizienz, Produktqualität, Sicherheit und Anlagenbau sowie die notwendigen Bedingungen (rechtliche Anpassungen, gesellschaftliche Akzeptanz, Nachfrage, Ausbildung). Binnen- und Exportmarkt bauen aufeinander auf und sollten gemeinsam gedacht werden. Daher sind geeignete Absprachen zwischen den zuständigen Ressorts angeraten.

16 ■ **Dringendste Maßnahmen für Technologievorsprung und Marktchancen**

17 Die Strategie empfiehlt, in Forschungsförderung und -projekten aus Sicht der Ziele Qualitätsführerschaft und Marktfähigkeit vorrangig folgende Maßnahmen in enger Kopplung zu unterstützen:

- 20 • **Produktionseffizienz** durch optimierte Wachstumsbedingungen, automatisierte Regelungssysteme und züchterische Anpassungen steigern
- 22 • **Systemeffizienz** durch gekoppelte Produktionssysteme, Kreislaufwirtschaft und Rückgewinnung von Ressourcen verbessern
- 24 • **Produktqualität und Lebensmittelsicherheit erhöhen**
- 25 • **Robustheit, Zuverlässigkeit und Automatisierungsgrad** der Anlagen stärken
- 26 • **Standardisierung, Normung und Skalierbarkeit fördern**
- 27 • **gesellschaftlicher Akzeptanz, Marktentwicklung und Ausbildungsstrukturen stärken**
- 28
- 29 • **Pilotanlagen mit Forschungszugang im industriellen Maßstab aufbauen**

30

1. Motivation

Die Weltbevölkerung umfasst bereits mehr als acht Milliarden Menschen und wächst weiter. Gleichzeitig führt der Klimawandel bereits heute zu einem Rückgang der Anbauflächen und Ernteerträge sowie zu immer häufigeren Extremwetterereignissen. Es besteht dringender Handlungsbedarf, um die Lebensmittelversorgung zu sichern.

Eine weitere Intensivierung der feldgebundenen Landwirtschaft kann diese Herausforderungen nicht lösen. Der höhere Einsatz von mineralischem Dünger, chemischen Pflanzenschutzmitteln und Frischwasser überschreitet bereits jetzt vielerorts ökologische Grenzen. Dies destabilisiert natürliche Ökosysteme, reduziert deren Leistungen und beeinträchtigt langfristig die Anbau- und Erntesicherheit. Eine weitere Intensivierung der Landwirtschaft würde zudem den weiteren Verlust der biologischen Vielfalt beschleunigen und höhere Treibhausgasemissionen verursachen.

Hinzu kommt, dass Produkte aus feldgebundener Landwirtschaft auch aufgrund lokaler Standortfaktoren bedenklich sein können: Weltweit sind 14 % der landwirtschaftlich genutzten Böden mit Schwermetallen wie Arsen oder Kadmium belastet, die von Nutzpflanzen aufgenommen und in die Nahrungskette eingeschleust werden¹.

Weiter verschärft werden die Herausforderungen für die feldgebundene Landwirtschaft durch wirtschaftliche und geopolitische Umwälzungen, die ganze Regionen vorübergehend vom Import von Grundnahrungsmitteln abschneiden können.

Vor diesem Hintergrund entsteht ein dringender Bedarf an Produktionssystemen, die **robust gegenüber externen ökonomischen Schocks, ökologisch tragfähig und unabhängig von natürlichen Standortfaktoren** betrieben werden können. Controlled Environment Agriculture (CEA) bietet hier eine zukunftsweisende Option: Sie entkoppelt Lebensmittelproduktion von Klima, Wetter und Bodenbeschaffenheit und ermöglicht damit die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln in gleichbleibend hoher Qualität.

Glossar

CEA:	Controlled Environment Agriculture (CEA) umfasst die Produktion von Pflanzen - einschließlich Algen -, Pilzen, Insekten, Garnelen und Fischen in weitgehend geschlossener Kreislaufwirtschaft und unter umfassender Kontrolle der Umweltbedingungen (insbesondere Licht, Temperatur, Wasser und Nährstoffe)
CEA-Anlage:	Gebäude mit technischer Installation, in der die Produktion stattfindet
CEA-System:	Technisch-biologisches Produktionssystem, von Aufzucht bis Ernte
CEA-Produkte:	Erzeugnisse eines CEA-Systems
Produktorganismus:	Kulturart, die in einem CEA-System verwendet wird

¹ Hou, Deyi; Jia, Xiyue; Wang, Liuwei; McGrath, Steve P.; Zhu, Yong-Guan; Hu, Qing et al. (2025): Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. In: Science (New York, N.Y.) 388 (6744), S. 316-321. DOI: 10.1126/science.adr5214.

1 2. Die Möglichkeiten von CEA

2 Die Agrarproduktion unter kontrollierten Bedingungen hat das Potenzial, ein tragender
3 Baustein zur resilienten, regionalen Versorgung mit Lebens- und Futtermitteln zu werden.
4 CEA erlaubt die Produktion von Pflanzen - einschließlich Algen -, Pilzen, Insekten, Garne-
5 len und Fischen in weitgehend geschlossenen Kreisläufen. Die Pflanzen wachsen substratlos
6 oder in Substraten unter optimierten Bedingungen. Die Insekten-, Kriebstier- und Fischpro-
7 duktion nutzt vor allem Arten, die sich aufgrund ihrer Ansprüche eignen, in kontrollierten
8 und begrenzten Umgebungen heranzuwachsen. Die benötigte Energie stammt idealerweise
9 aus erneuerbaren Quellen.

10 CEA bietet drei wichtige Vorteile: die weitgehende **Entkopplung von Jahreszeiten, Klima**
11 **und Standort**, die eine sehr viel **höhere Produktivität bei beständig hoher Produktquali-**
12 **tät**, sowie eine deutliche **Verringerung von Umwelt- und Gesundheitsbelastungen** (Nähr-
13 stoffauswaschung, Flächen- und Wasserverbrauch, Pflanzenschutzmittel- und Antibiotika-
14 einsatz).

15 Da CEA nicht an landwirtschaftlich geeignete Flächen gebunden ist, schafft sie stabile Pro-
16 duktionsmöglichkeiten innerhalb der planetaren Grenzen² – resilient, ressourceneffizient
17 und eine zukunftstaugliche Form der Agrarwirtschaft, um gesellschaftlichen und ökologi-
18 schen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen. Aufgrund ihrer hohen Effizienz eignet
19 sich die CEA-Technologie zudem als exportfähiges Wirtschaftsgut.

20 Die Vorteile von CEA treten besonders deutlich in Regionen zutage, in denen landwirt-
21 schaftliche Flächen knapp sind, klimatische oder standörtliche Bedingungen konventionelle
22 Produktionssysteme einschränken und zugleich ein hoher Anteil nachhaltig erzeugter Ener-
23 gie verfügbar ist.

24 Die Entwicklung der CEA-Technologie ist deshalb für die Erreichung der UN-
25 Nachhaltigkeitsziele sowohl für bevölkerungsreiche Länder in wärmeren Regionen als auch
26 für Industrienationen der gemäßigten Breiten sehr relevant. CEA ist Bestandteil der Road-
27 map „Zirkuläre Bioökonomie für Deutschland“ der Fraunhofer-Gesellschaft.³

28 Die Möglichkeiten, die Nachhaltigkeit der Lebensmittelproduktion durch den Einsatz von
29 CEA zu steigern, sind um ein Vielfaches größer als etwa durch neue Züchtungen oder An-
30 baumethoden in der feldgebundenen Landwirtschaft (Tabelle 1).

²United Nations Development Program (Hg.) (2025): Controlled Environment Agriculture for Sustainable Development. Singapur. Online verfügbar unter https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2025-01/controlled_environment_agriculture_for_sustainable_development.pdf.

³Buller, Jens; Daschner, Robert; Grimm, Lena; Hofer, Michael; Hüsing, Bärbel; Kraye, Julia et al. (2022): Zirkuläre Bioökonomie für Deutschland. Eine Roadmap der Fraunhofer-Gesellschaft zur Umsetzung der Bioökonomie in Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Gesellschaft. Berlin. Online verfügbar unter https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/FSF/biooekonomie/Fraunhofer_Roadmap_Biooekonomie.pdf.

1 **Tabelle 1.** Vergleich des theoretischen Potentials verschiedener Einzel-CEA-Systeme mit repräsentativen Leistungsindikatoren (RPIs) der feldgebundenen Landwirtschaft. Positive Unterschiede von CEA zur feldgebundenen Landwirtschaft sind blau, negative Unterschiede rot hinterlegt. Das theoretische Potential von CEA bezieht sich auf Einheiten mit 10 gestapelten Produktionsschichten (Vertical Farming) auf einer Grundfläche von 1 ha. Für Pilze wurde von einem Bioreaktor mit 10 m Höhe und 1 ha Grundfläche ausgegangen. Alle Werte für feldgebundene Landwirtschaft beruhen auf veröffentlichten Daten.⁴

RPIs – bezogen auf 10 gestapelte Produktionsflächen von 1 ha	Feldfrüchte	CEA mit Kulturpflanzen	CEA mit Algen	CEA mit Pilzen	CEA mit Insekten	CEA mit Fischen
Mittlere globale Jahresproduktion [t ha ⁻¹]	4,5	1.900	1.900	23.040	32.140	12.410
Proteingehalt [kg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	766	220.000	330.000	4.800.000	13.500.000	2.500.000
Landfläche [Millionen ha]	697	2	2	0,1	0,1	0,3
Wassernutzung [l kg ⁻¹ Lebensmittel]	1.781	0,14	33	50	0,01	2.500
Energienutzung [kWh kg ⁻¹ Lebensmittel]	2,6	650	12	4	17	42
Treibhausgasemissionen [CO ₂ e kg ⁻¹ Lebensmittel]	3,1	~0	~0	~0	8	3
Pflanzenschutzmittel und Antibiotika [kg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	1,6	~0	~0	~0	~0	~0
Stickstoffabfluss und -versickerung [kg ha ⁻¹]	5,4	~0	~0	~0	~0	nicht erfasst
Phosphorabfluss und -versickerung [kg ha ⁻¹]	0,1	~0	~0	~0	~0	nicht erfasst

Änderung [%]	0 bis 10	10 bis 100	100 bis 10.000	10.000 bis 100.000
positiv				
negativ				

8
9
10 Darüber hinaus ist CEA besonders geeignet für Produkte, die hohen Ansprüchen an Qualität und Gleichmäßigkeit genügen müssen, wie Arzneipflanzen, oder geringe Kontaminationen aus der Umwelt (z.B. Mikroplastik, polychlorierte Biphenyle „PCBs“, Schwermetalle) aufweisen sollen.

14 3. Stand der Technik

15 CEA-Systeme werden bereits weltweit produktiv angewendet, in kleinem Maßstab in Europa, in größerem Maßstab in Nahen Osten, Singapur, Indonesien, China und den USA. Die Produktion ist bei fast allen Anlagen auf einen Produktorganismus begrenzt (Einzelsystem); gekoppelte Systeme (z.B. Fisch/Pflanze) sind selten. Die eingesetzte Technik stammt im Allgemeinen aus dem Gartenbau und wird entsprechend erweitert, um die Beleuchtung zu optimieren, sowie Wasser und Nährstoffe im Kreislauf zu führen. Aktuell bestehen die

⁴ Calvo-Baltánas et al. 2025, The future potential of controlled environment agriculture, PNAS NEXUS 4:4 pgaf078, DOI: 10.1093/pnasnexus/pgaf078, angepasst.

1 zentralen Herausforderungen darin, den Energiebedarf deutlich zu senken, Versuchsanla-
2 gen zu ökonomisch relevanten Größen zu skalieren sowie Prozesse und Anlagen zu standar-
3 disieren und zu automatisieren.

4 Die Weiterentwicklung der Technik geht weit über den Einsatz als flächenschonende Pro-
5 duktionsalternative in Deutschland hinaus. Sie dient insbesondere der Entwicklung einer
6 Exporttechnologie und damit der Stärkung Deutschlands als innovative Exportnation.

7 **4. Technologieexport als Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt**

8 Deutschland exportiert und importiert Waren abhängig davon, wo sie besser oder preiswer-
9 ter hergestellt werden können. Als rohstoffarmes Land ist Deutschland auf den Export
10 technologischer Produkte angewiesen, um über die finanziellen Mittel für den Import ande-
11 rer Güter zu erwirtschaften. Fast jeder vierte Arbeitsplatz hängt vom Export ab und 42
12 Prozent der deutschen Wirtschaftsleistung (BIP) beruhen auf Exporten (2024). Damit tragen
13 Ausfuhren erheblich zum Steueraufkommen und zur gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt bei.

14 Von besonderem strategischem Interesse ist die Weiterentwicklung einer wissens- und in-
15 novationsbasierten Wirtschaft, die hohe Wertschöpfung und hochqualifizierte Beschäfti-
16 gung schafft. Der Anteil von Hochtechnologie an deutschen Exporten liegt bei 14 Prozent
17 (2022). Forschung, Lehre und praktische Erfahrung bei der Entwicklung von Hochtechnolo-
18 gien⁵ greifen dabei eng ineinander und stärken nicht nur die Exporte, sondern auch
19 Deutschlands internationales Ansehen und geopolitisches Gewicht.

20 CEA kann die wachsende globale Nachfrage nach hochwertigen, nachhaltig produzierten
21 Lebensmitteln bedienen (vgl. Tabelle 1). Der gezielte Aufbau eines Exportsegments für
22 CEA-Technologie bietet Deutschland damit die Chance, ein zusätzliches, wachsendes
23 Marktfeld zu erschließen und seine technologische Wettbewerbsfähigkeit weiter auszu-
24 bauen. Es liegt daher im Interesse Deutschlands, die Entwicklung dieser Technologie zu
25 fördern, auch wenn CEA in Deutschland aufgrund guter Böden und weiterhin vergleichs-
26 weise günstiger klimatischer Bedingungen voraussichtlich nicht denselben Stellenwert er-
27 reichen wird wie in heißen und trockenen dichtbevölkerten Ländern.

28 **5. Forschung für CEA**

29 Damit die CEA-Produktion von Unternehmen erfolgreich eingesetzt werden kann, sollte im
30 gesellschaftlichen Interesse auch öffentliche Forschung die Weiterentwicklung der CEA-
31 Technologie unterstützen: etwa bei der Ausnutzung der Produktionsflächen, der präzisen
32 Regelung der Wachstumsbedingungen, der Automatisierung der Produktionsschritte, der Er-
33 höhung der Robustheit und Effizienz von Anlagen und Produktionsabläufen sowie bei Maß-
34 nahmen zum Schutz der Gesundheit von Tieren und Pflanzen. Förderprogramme sollten
35 sich dabei an den angestrebten Technologiereifegraden (Technology Readiness Levels, TLR)

⁵ Hochtechnologie-Produkte sind definiert als „Waren deren Herstellung eine hohe Forschungs- und Entwicklungsintensität aufweist“ (Stat. Bundesamt 2011). Die Einteilung in 9 Kategorien von Gütern basiert auf einer Klassifikation der OECD und wird entsprechend auch seitens des Statistischen Amtes der EU (Eurostat) verwendet (ebenda).

1 orientieren, also von der Grundlagenforschung, beispielsweise zum Mikrobiom bis hin zum
2 Bau und Betrieb von Pilotanlagen.

3 Da die Nachfrage nach CEA aufgrund des Klimawandels, des globalen Bevölkerungswach-
4 tums und der zunehmenden Bedrohung der Biodiversität eher exponentiell als linear stei-
5 gen wird, muss die Forschungsförderung die dringendsten Probleme zuerst angehen. Die
6 vorliegende Forschungsstrategie gibt hierfür Empfehlungen. Sie berücksichtigt auch, dass
7 die gesellschaftliche Akzeptanz für CEA-Produkte ein wichtiger Erfolgsfaktor ist.

8 Für die kontinuierliche Weiterentwicklung der CEA-Technologie, Aufbau und Erhalt der Ex-
9 pertise sowie die Demonstration der erfolgreichen Anwendung ist der Forschungs- und Ent-
10 wicklungsstandort Deutschland von grundlegender Bedeutung. Fände die Skalierung und
11 Marktdurchdringung ausschließlich in den Zielländern statt, gingen Deutschland praktische
12 Erfahrung sowie Experimentier- und Ausbildungsmöglichkeiten verloren. Die hier ausgear-
13 beitete Forschungsstrategie geht daher davon aus, dass die deutsche Politik zwei Ziele ver-
14 folgen wird: erstens die Marktführerschaft bei CEA-Anlagen für den Export und zweitens
15 die Etablierung von CEA in Deutschland als Pilotmarkt und Standort für Entwicklungen so-
16 wie als Baustein zur Verbesserung der Selbstversorgung.

17 Die folgenden Abschnitte beschreiben, wie sich diese beiden Ziele erreichen lassen. Ein
18 weiterer Abschnitt erläutert unterstützende Maßnahmen zu den Aspekten Nachhaltigkeit,
19 Betriebssicherheit, Lebensmittelsicherheit, Ausbildung und strategische Zielverfolgung. Da
20 die vorgeschlagenen Maßnahmen ineinandergreifen und unterschiedliche Entwicklungsdau-
21 ern haben, folgt abschließend ein Überblick, in welcher Reihenfolge sie bearbeitet werden
22 sollten, um das Ziel eines entscheidenden Beitrags von CEA-Produkten zur Ernährungssiche-
23 rung zu erreichen.

24 **6. Marktführerschaft bei CEA-Technologie**

25 CEA-Technologien aus Deutschland muss im internationalen Wettbewerb überzeugen, um
26 eine Marktführerschaft zu erlangen. Dies gelingt durch höhere Produktions- und höhere
27 Systemeffizienz, verringerte Umwelt- und Gesundheitsbelastungen, höhere Produktqualität
28 sowie durch geringere Kosten pro Endprodukt. Auch die gelungene Integration von CEA-
29 Anlagen in den urbanen Raum oder in vorhandene Infrastruktur stellen wichtige Verkaufs-
30 argumente dar.

31 **6.1. Höhere Produktionseffizienz**

32 Die Produktionseffizienz beschreibt das Verhältnis zwischen erzieltm Ertrag und einge-
33 setzten Ressourcen. Besonders hoch ist der Bedarf an effizienterer Lebensmittelproduktion
34 in Weltregionen mit Wassermangel, häufigen Extremwetterereignissen und gleichzeitig
35 wachsender Bevölkerung und wird aufgrund des Klimawandels weiter steigen. Entspre-
36 chend besteht in diesen Regionen auch das größte kurzfristige Potential für CEA-
37 Technologien und -Produkte. Gerade in den heißen, trockenen Regionen kann aber auch
38 ausreichend klimaneutrale Energie bereitgestellt werden, um die energieintensiven CEA-
39 Anlagen zu betreiben. In anderen Regionen könnten geothermale Energie oder industrielle
40 Abwärme genutzt werden.

41 Eine höhere Effizienz der Produktion lässt sich über zwei Hebel erreichen:

- 1 ■ **Optimierung des Verhältnisses von Ressourcen zu Ertrag:** a) Die Steigerung der
2 Ressourceneffizienz senkt den Bedarf an Energie, Wasser, Nährstoffen und Grund-
3 fläche bei gleichbleibenden Erträgen und gleicher Qualität. b) Die Steigerung der
4 Produktionseffizienz erhöht die Erträge durch günstigere Wachstumsbedingungen,
5 Schutz der Gesundheit der kultivierten Organismen, Züchtung angepasster Sorten
6 oder Rassen und besseren Erntemethoden bei gleichem Ressourceneinsatz. c) Eine
7 verbesserte Prozesssteuerung durch ausgeklügelte Regelungsstrategien und den Ein-
8 satz künstlicher Intelligenz erhöht ebenfalls den Ertrag.
- 9 ■ **Verminderung von Ressourcenverlusten und Abfällen:** Geschlossene Kreisläufe
10 und die Nutzung von Stoffnebenströmen, beispielsweise durch Rückgewinnung von
11 Betriebsstoffen aus Abfällen, erhöhen die Gesamteffizienz.

12 Um das Potenzial aktueller CEA-Systeme mit nur einem Produkt-Organismus optimal auszu-
13 schöpfen, müssen diese durch Forschung und Innovation deutlich weiterentwickelt werden.
14 Nach unserer Einschätzung gilt es in dieser Rangfolge:

- 15 1. für CEA besonders geeignete Anbau- und Haltungsmethoden zu entwickeln und ge-
16 eignete Arten und Rassen auszuwählen,
- 17 2. Verfahren zu entwickeln, die Verluste aufgrund von Schadorganismen und Kontami-
18 nationen verringern,
- 19 3. besser geeignete Rassen zu züchten und
- 20 4. Kosten für den Einsatz von Produktionsmitteln zu verringern.

21 6.2. Wirtschaftlichkeit

22 Die Wirtschaftlichkeit der CEA-Produktion hängt vor allem von den Energiekosten, den er-
23 zielbaren Produktpreisen und den verfügbaren Alternativen zur CEA-Erzeugung ab (Tabelle
24 2).

25 **Tabelle 2.** Wirtschaftliche Eignung von CEA-Produkten in Abhängigkeit von (klimatischer) Umgebung
26 und Situation.

Umgebung, Situation	Begünstigte Produkte aus CEA
arides Klima (hoher Wasserbedarf)	Gemüse, Salat
Gemäßigtes Klima (konkurrierender Frei- landanbau möglich)	Produkte mit hohem Qualitätsanspruch: Gewürze, Kräuter, Arzneipflanzen, Inhaltsstoffe (Öle, Proteine, Antikörper)
Proteinbedarf (in allen Klimazonen)	Pilze, Insekten, Fische, Leguminosen, Garnelen
gemäßigtes oder kaltes Klima	Beerenobst, Gemüse, Südfrüchte
allgemein	Anzucht von Vermehrungsmaterial und Jungpflanzen von Gehölzen
allgemein	Wurzelgemüse, Kartoffeln, Rettich, Wasabi, Maniok, Medizinalwurzeln
lokale Märkte	Biosprossen („microgreens“)
geringe landwirtschaftliche Fläche, hohe Unabhängigkeit gewünscht	Getreide

1

2 Da Kosten und Preise je nach Standort und Land erheblich variieren können, müssen CEA-
3 Anlagen saisonal oder dauerhaft anpassbar sein – insbesondere hinsichtlich der Regelung
4 der Wachstumsbedingungen sowie der Automatisierung von Aufzucht und Ernte. Für ver-
5 schiedene Standortbedingungen eignen sich dabei bestimmte Produktkategorien wirt-
6 schaftlich besonders gut. Dies sollte bei der Ausgestaltung der Förderbedingungen
7 berücksichtigt werden.

8 Weitere wirtschaftliche Vorteile können entstehen, wenn CEA-Anlagen ihre Energienutzung
9 flexibel an schwankende Energiepreise anpassen können. Die Forschung sollte daher theo-
10 retisch und experimentell untersuchen, wie sich eine variable Energiezufuhr durch Rege-
11 lung anderer Wachstumsparameter anpassen lässt und ab welchem Punkt eine
12 wirtschaftlich relevante Verringerung der Produktion eintritt.

13 6.3. Höhere Systemeffizienz, verringerte Umwelt- und Gesundheitsbelastungen

14 Die drei wichtigsten Bausteine für eine höhere Systemeffizienz sind aus unserer Sicht die
15 Verbesserung der Anbauverfahren, Kopplung von CEA-Systemen, die Verbesserung der Re-
16 gelung- und Automatisierungstechnik sowie die Verbesserung der Robustheit und Zuverläs-
17 sigkeit von CEA-Anlagen.

18 Angesichts der zentralen Herausforderungen unserer Zeit – Klimawandel, Biodiversitäts-
19 verlust, Umweltverschmutzung und Flächenversiegelung einerseits sowie globales Bevölke-
20 rungswachstum und veränderte Ernährungsgewohnheiten andererseits – bieten
21 insbesondere die Verknüpfungen zwischen tierischen und pflanzlichen Produktionssystemen
22 sowie die kaskadische Nutzung von Reststoffen großes Potenzial, die Produktion bezogen
23 auf den Ressourceneinsatz deutlich zu steigern. **Fortschrittliche, produktions-effiziente**
24 **CEA-Anlagen bestehen daher aus mehreren gekoppelten Systemen**, etwa Tier-Pflanze-
25 Pilz, einschließlich der technischen Infrastruktur.

26 Eine hohe Gesamtproduktivität entsteht, wenn die Kosten für den Schutz der kultivierten
27 Arten gesenkt werden – etwa durch vorbeugenden **Pflanzenschutz oder Maßnahmen zur**
28 **Sicherstellung von Tiergesundheit und Tierwohl**. Etwaige Schutzaspekte müssen daher
29 bereits bei Maßnahmen zur Erhöhung der Produktivität durch physiologische, technische
30 und züchterische Verfahren, Kulturführung, verbesserte Infrastruktur und Regelung berück-
31 sichtigt werden („protection by design“), soweit dies wirtschaftlich vertretbar ist.

32 Da jedoch vorbeugende Maßnahmen allein voraussichtlich nicht ausreichen, ist zunächst zu
33 analysieren, welches Risiko von unzureichendem Schutz ausgeht – also unter welchen Um-
34 ständen ein inakzeptables Risiko entsteht und wie groß der zu erwartende Schaden wäre.
35 Für solche Fälle sollten in Projekten zur Produktionseffizienz auch ergänzende Schutzmaß-
36 nahmen sowie physikalische und biologische Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Die
37 Forschung muss dementsprechend **systemisch** angelegt sein und sollte dafür ausreichend
38 lange Projektzeiten eingeräumt bekommen.

39 Zur wirtschaftlichen Systemeffizienz trägt eine weitgehende Automatisierung von Anzucht
40 und Aufzucht, Wachstumsüberwachung, Ernte und Reststoffbehandlung bei (zusammenge-
41 fasst als Prozesssteuerung bezeichnet). **Robotik** verbunden mit **künstlicher Intelligenz**

1 kann schneller und gezielter auf Wachstumsänderungen reagieren als Menschen. Gleichzei-
2 tig verringert Robotik den Platzbedarf, was die Flächeneffizienz einer CEA-Anlage erhöht.

3 Mess- und Sensorsysteme erfassen den Zustand der CEA-Kulturen und optimieren ihn mit-
4 tels **Steuer- und Regelungstechnik**. Daher kommt der Mess- und Regeltechnik eine beson-
5 dere Bedeutung zu. Schon Einzelsysteme benötigen eine ausgefeilte Steuer- und
6 Regelungstechnik; bei gekoppelten Systemen steigt die Komplexität aufgrund der Vielzahl
7 an Steuerungsgrößen und potenziellen Rückkopplungen erheblich. Da die Verknüpfungen
8 solcher Einzelsysteme bisher nur wenig entwickelt ist, erfordert sie eine Optimierung auf
9 Einzel- und Gesamtsystemebene, um CEA als kosteneffiziente Ergänzung zur herkömmli-
10 chen Agrarwirtschaft zu etablieren. Modellbasierte Algorithmen und künstliche Intelligenz
11 können die Regelung, Überwachung und Automatisierung von CEA-Anlagen weiter verbes-
12 sern.

13 Robustheit – hier verstanden als Toleranz gegenüber Fehlern – sowie Effizienz, Anpassbar-
14 keit, und Zuverlässigkeit der eingesetzten Infrastruktur einschließlich Mess- und Regeltech-
15 nik sind entscheidende Qualitätsmerkmale, auch für den internationalen Export. Forschung
16 zur Erhöhung der **Robustheit und Zuverlässigkeit** von CEA-Anlagen sowie ihrer Steuer- und
17 Regelung muss sowohl einzelne Teilkreisläufe betrachten als auch die Robustheit und Effi-
18 zienz des Gesamtsystems im Blick behalten. Besonders relevant ist dabei die komplexe Re-
19 gelung verknüpfter Mehrfachsystemen wie Tier-Pflanze-Pilz. Das Ausmaß der
20 Innovationsförderung sollte sich hierbei an dem erwarteten Beitrag zur Wertschöpfung ori-
21 entieren.

22 6.4. Höhere Produktqualität und Verbrauchervertrauen

23 CEA-Anlagen ermöglichen eine gleichbleibend hohe Qualität von Futter- und Lebensmit-
24 teln. Die Qualitätsstandards für sichere Lebensmittel für den frischen Verzehr und für die
25 Weiterverarbeitung lassen sich dadurch leichter einhalten. Die kontrollierte Produktion in
26 einer geschlossenen Umgebung ermöglicht zudem die gezielte Beeinflussung bestimmter
27 **Qualitätseigenschaften**, wie etwa gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe. Allerdings besteht
28 noch erheblicher Forschungsbedarf, um zu verstehen, wie Umweltreize die Entstehung der
29 Inhaltsstoffe beeinflussen und wie dies produktspezifisch gesteuert werden kann.

30 Nicht nur die Zusammensetzung der Lebensmittel beeinflusst die menschliche Gesundheit,
31 sondern auch die auf und in ihnen vorkommenden Mikroorganismen, das **Mikrobiom**. Men-
32 schen, die vor allem in der Kindheit mit einem vielfältigen Mikrobiom in Berührung gekom-
33 men sind, sind weniger anfällig für Infektionen. Zudem gibt es Hinweise auf einen
34 Zusammenhang zwischen einem eingeschränkten Mikrobiom und der Gesundheit von Men-
35 schen in Raumstationen. Daher sind Untersuchungen des Mikrobioms von CEA-Produkten,
36 der Vergleich mit Erzeugnissen aus unkontrollierten oder teilkontrollierten Umgebungen
37 sowie die Bewertung möglicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit essenziell.
38 Weitergehende Forschung sollte zudem klären, wie sich das Mikrobiom unter den kontrol-
39 lierten Bedingungen von CEA-Anlagen gezielt beeinflussen lässt.

40 Die **Sicherheit** der erzeugten Futter- und Lebensmittel ist ein unverzichtbares Qualitäts-
41 merkmal. Da CEA-Anlagen nicht vollständig geschlossen sind – Ressourcen und biologisches
42 Ausgangsmaterial werden eingebracht, reife Produkte werden entnommen – kann es zur
43 Einschleppung von Keimen und Stoffen kommen, die die Endprodukte belasten. Zur

1 Vermeidung oder Eingrenzung einer solchen Einschleppung gelten die gleichen Maßnahmen
2 wie oben für den Schutz der Kulturen beschrieben. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob
3 sich auch Humanpathogene langfristig in CEA-Anlagen anreichern und mit den Produkten in
4 die Nahrungskette gelangen können.

5 Obwohl CEA-Erzeugnisse somit **hohe Qualitäts- und Sicherheitsstandards** erfüllen werden,
6 kann das neuartige Produktionsverfahren Bedenken und Skepsis bei Verbraucherinnen und
7 Verbrauchern Bedenken auslösen. Für eine erfolgreiche Markteinführung ist es daher wich-
8 tig, die Qualität von CEA-Erzeugnissen zu erfassen und mit Erzeugnissen aus anderen Pro-
9 duktionsmethoden zu vergleichen, um einen konstruktiven Verbraucherdialo führen zu
10 können. Dafür sind wissenschaftlich fundierte Konzepte und Methoden zu erarbeiten.

11 **6.5. Etablierung von CEA-Anlagen: Bau, Modularisierung, Skalierung**

12 Grundsätzlich stehen zwei bauliche Wege zur **Etablierung neuer CEA-Anlagen** offen: An-
13 passung vorhandener Gebäude an die Anforderungen von CEA-Anlagen und Neubau. Ein
14 Neubau sollte im Sinne der Nachhaltigkeit nur dann in Betracht gezogen werden, wenn vor-
15 handene Gebäude (z.B. Bürogebäude, Wohngebäude, Fabriken, Tiefgaragen, Tierställe)
16 nicht wirtschaftlich umgebaut werden können. Neubauten sollten bevorzugt aus nachhaltig
17 produzierten Materialien wie beispielsweise Holz gebaut werden. Neu produzierter Beton
18 oder Stahl sollten nur zum Einsatz kommen, wenn belastbare Ökobilanzen (Life Cycle As-
19 sessments) klare Vorteile belegen.

20 Neue, wie bestehende Gebäude müssen im Sinne der Nachhaltigkeit so gestalten werden,
21 dass Stoff- und Energieflüsse geschlossen werden können. Die Forschungsförderung sollte
22 deshalb in Ideenwettbewerben und späteren Umsetzungsprojekten nachhaltige Rohbaukon-
23 struktionen unterstützen. Zusätzlich erscheinen Ideenwettbewerbe für Umbaumaßnahmen
24 von Bestandsgebäuden sinnvoll.

25 Die **Standardisierung** von Verfahren, Infrastrukturen und Maßen kann weitere wirtschaftli-
26 che Vorteile schaffen. Daher gilt es, abgestimmt zwischen Forschung und Industrie, früh-
27 zeitig internationale Normen und Standards zu entwickeln. Deutschland sollte im Sinne
28 dieser Strategie eine aktive Rolle übernehmen und entsprechende Standardisierungspro-
29 zesse anstoßen.

30 **Standardisierte Anlagenmodule** könnten dabei Konstruktion und Betrieb vereinfachen, in-
31 dem weltweit kompatible Module genutzt und an betriebliche Anforderungen angepasst
32 werden. Eine solche Modularisierung reduziert zudem den Aufwand, für jede Anlage indivi-
33 duelle Steuer- und Regelungssysteme zu entwickeln und stärkt damit die nationale und in-
34 ternationale Wettbewerbsfähigkeit der CEA-Technologien.

35 Eine bedeutende Herausforderung besteht darin, kleine experimentelle Forschungsanlagen
36 in großtechnische Produktionsanlagen zu überführen, die als Vorbild für exportierbare An-
37 lagen dienen können. Wie eine solche **Skalierung** unter welchen Bedingungen am günstig-
38 sten gelingt, ist eine wichtige Innovationsaufgabe, die eine enge Zusammenarbeit von
39 Unternehmen und Forschungseinrichtungen erfordert. Dabei müssen auch vor- und nachge-
40 lagerte Bereiche entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden – von Zuchtma-
41 terial und Jungstadien über die Einbindung in vorhanden Versorgungsinfrastruktur bis hin
42 zu Transport und Verwertung.

6.6. Anforderungen an Forschung und Innovation

Die **Förderung** von Forschung und Entwicklung im Bereich der CEA-Produktion muss langfristig angelegt sein und zugleich kurzfristig auf spezifische Forschungsfragen reagieren können. Dazu sollte sie zwei Stränge parallel verfolgen: erstens die langfristige Erforschung und Entwicklung zwei- oder dreifach gekoppelter Systeme, die höchstwahrscheinlich mehrere Iterationsstufen benötigt und zweitens die gezielte Optimierung bestehender CEA-Einfachsysteme im Rahmen von Innovationsvorhaben. Antragsteller sollten darlegen, in welchem Umfang ihr Forschungsbeitrag zur Erhöhung der CEA-Produktion in Deutschland oder global beiträgt.

Die **agrartechnische Forschung** für CEA-Exportmärkte sollte sich vor allem auf die Systemoptimierung konzentrieren, indem Erträge gesteigert (Produkteffizienz) und insbesondere Energie- und Wasserverbrauch verringert werden (Ressourceneffizienz). An dieser Entwicklung muss der Anlagenbau und die Steuerungs- und Regelungstechnik beteiligt werden, damit die wirtschaftlichen Gesamtziele berücksichtigt bleiben.

Ergänzend zur technologischen Weiterentwicklung der Anlagen sollte **agrarökonomische und agrarpolitische Forschung** die volkswirtschaftlichen Potenziale des CEA-Exports analysieren und politische Handlungsoptionen erarbeiten, die die internationale Wettbewerbsfähigkeit CEA-Anlagen aus deutscher Produktion stärken.

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

- Die Qualität der in CEA erzeugten Produkte muss gleich oder höher sein als in Erzeugnissen aus unkontrollierter oder teilkontrollierter 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 gewährleistet sein. Die Entwicklung von Umgebungen, Installationen und Regelungen muss dies berücksichtigen.

Die Auswahl von Zuchtmaterial sowie die Züchtung angepasster Rassen und Sorten erfordert lange Entwicklungszeiten und sollte daher frühzeitig und langfristig gefördert werden.

7. Deutschland als Pilotmarkt

Neue Produktionsverfahren setzen sich nur durch, wenn sie im praktischen Einsatz ihre Qualität, Eignung, Leistung und Wirtschaftlichkeit unter Beweis stellen und am Markt erfolgreich sind. Eine reine Forschungsförderung der CEA-Technologie reicht dafür nicht aus.

Durch direkte Förderung oder wirtschaftliche Anreize könnte die Politik zwar Unternehmen dazu bewegen, Lebensmittel mittels CEA zu erzeugen, volkswirtschaftlich effizienter ist jedoch ein Ansatz, bei dem sich CEA weitgehend aufgrund eigener Vorteile etabliert und die Politik **vor allem den Marktzugang erleichtert**. Die Agrarforschung kann hierfür geeignete Optionen entwickeln. Eine Vorstudie sollte analysieren, warum CEA-Startups in den vergangenen Jahren gescheitert sind oder sich etablieren konnten, um daraus fundierte Entscheidungsgrundlagen für zukünftige Förderschwerpunkte abzuleiten.

1 Ein zentraler Vorteil von CEA ist die Unabhängigkeit von Umweltfaktoren. Dadurch gewin-
2 nen andere Standortfaktoren an Bedeutung, etwa die Verfügbarkeit von Energie, die Nähe
3 zu den Absatzmärkten und günstige bauliche Voraussetzungen. Die politische Steuerung der
4 **Raumentwicklung** benötigt wissenschaftlich fundierte Vorschläge, wie CEA nicht nur im ur-
5 banen Raum aufgebaut werden kann, sondern auch bestehende Agrarsysteme in ländlichen
6 Regionen sinnvoll ergänzt. Zudem sollte untersucht werden, welche gesellschaftlichen Vor-
7 und Nachteile eine zentralisierte oder dezentrale Verteilung von CEA-Anlagen bietet, um
8 politische Entscheidungen entsprechend auszurichten.

9 Eine wichtige Grundlage für unternehmerische und behördliche Entscheidungen ist ein Ka-
10 taster geeigneter und priorisierter Flächen, auf denen CEA-Produktion erwünscht ist. Dafür
11 müssen zunächst wissenschaftlich fundierte und gesellschaftlich akzeptierte Kriterien ent-
12 wickelt werden – etwa zu Energie- und Logistikinfrastuktur, rechtlichen Rahmenbedingun-
13 gen, Boden-, Klima-, Natur- und Landschaftsschutz sowie zur Stärkung des ländlichen
14 Raumes.

15 Eine CEA-Pilotanlage im industriellen Maßstab ermöglicht es, Skalierungseffekte experi-
16 mentell zu erforschen, gezielt Marktforschung zu betreiben und CEA-Produkte auf dem
17 deutschen Lebensmittelmarkt zu etablieren. Dafür sind Standorte zu identifizieren, die gut
18 erreichbar sind, die über erforderliche Infrastruktur verfügen, Zugang zu günstiger Energie
19 bieten und wo bereits versiegelte Flächen weiter genutzt werden können. Da diese Pilotan-
20 lagen sowohl wirtschaftlich arbeiten als auch wissenschaftliche Erkenntnisse liefern sollen,
21 eignen sich insbesondere Public-Private-Partnerships für ihren Aufbau.

22 Gleichzeitig ist es notwendig, geeignete **rechtliche Rahmenbedingungen** zu schaffen: Da
23 mehrere Formen der CEA-Produktion derzeit rechtlich nicht als Landwirtschaft eingestuft
24 werden, müssen bestehende Regelungen angepasst oder neue entwickelt werden, die CEA-
25 Produkte mit Erzeugnissen der feldgebundenen Landwirtschaft gleichstellen. Diese sollten
26 im Rahmen von Forschungsaufträgen und unter Beteiligung relevanter Industriefachver-
27 bände erarbeitet werden.

28 CEA-Produkte werden von Endverbrauchern oder von der verarbeitenden Lebensmittelin-
29 dustrie nur dann **nachgefragt** werden, wenn sie preiswerter oder qualitativ höherwertiger
30 sind als Feldprodukte. Die Forschung sollte daher gezielt untersuchen,

- 31 ■ welche Eigenschaften von CEA-Produkten im Vergleich zu Erzeugnissen aus beste-
32 henden Anbausystemen – etwa aus Freilandproduktion oder geschütztem Anbau in
33 Gewächshäusern oder offener Aquakultur – die Akzeptanz von CEA-Produkten erhö-
34 hen oder verringern
- 35 ■ welche Maßnahmen von Politik, Förderung und Wissenschaftskommunikation geeig-
36 net sind, gesellschaftliche Bedenken gegenüber CEA zu adressieren und so die
37 Marktintegration zu stärken und
- 38 ■ wie die ökonomische Nachhaltigkeit und die Wettbewerbsfähigkeit von CEA-
39 Produkten gegenüber etablierten agrarischen Produktionssystemen verbessert be-
40 ziehungsweise langfristig gesichert werden kann.

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

1 8. Rahmenbedingungen

2 Sowohl der Aufbau eines Exportmarkts
3 als auch die Etablierung eines Pilot-
4 markts in Deutschland, erfordern ver-
5 lässliche und objektive Vergleichs-
6 möglichkeiten für unterschiedliche Ent-
7 wicklungs- und Nutzungspfade von CEA.
8 Dafür eignen sich **Life Cycle Assess-**
9 **ments (LCAs)**, die CEA systemisch be-
10 trachten: Gebäude, Energiebedarf,
11 Lebensmittelproduktion, Kreislauf- und
12 Abfallwirtschaft, Grundflächennutzung,
13 Bodenversiegelung und Klimawirkung.
14 Verfahren für die Erstellung von LCAs in
15 dieser Komplexität müssen jedoch erst
16 noch entsprechend den ISO-Normen aus-
17 gearbeitet und etabliert werden.

18 Da sich biologische Kulturen und techni-
19 sche Systeme kontinuierlich weiterent-
20 wickeln, müssen auch die Methoden und
21 Datengrundlagen der LCAs fortlaufend
22 aktualisiert werden. Es ist daher sinn-
23 voll, dass Forschungseinrichtungen und
24 Unternehmen die notwendigen Daten für die Fortentwicklung der LCAs standardisiert be-
25 reitstellen und ein langfristiger Forschungsauftrag die kontinuierliche Weiterentwicklung
26 der LCAs sicherstellt.

27 CEA-Systeme in Gebäuden unterliegen völlig anderen Störungen als die Produktion im Frei-
28 land. Die Forschung muss daher klären, wie die **Betriebsicherheit** der Anlagen gegen un-
29 absichtliche oder mutwillige Störungen festgestellt, gewährleistet, dokumentiert und
30 gegebenenfalls wiederhergestellt werden kann. Aus den Ergebnissen müssen Änderungen
31 der einschlägigen Rechtsnormen abgeleitet werden können.

32 Ebenso ist die Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit eine unabdingbare Voraussetzung
33 für die Nutzung von CEA-Produkten. Entsprechend sind kontinuierliche Untersuchungen zur
34 Lebensmittelsicherheit von CEA-Erzeugnissen erforderlich, die möglichst personen-, kos-
35 ten- und ressourceneffizient gestaltet werden müssen.

36 Die Komplexität von CEA-Anlagen und der Anspruch an ihre Robustheit erfordern speziell
37 ausgebildetes Personal für Kulturführung, Technik, Architektur und Regelung. Diese **Aus-**
38 **und Fortbildungsangebote** sollten sich sowohl an inländische als auch an internationale
39 Fachkräfte richten, um den Export von CEA-Anlagen zu unterstützen.

40 Da die Forschungsförderung für CEA zumindest auf Bundesebene vermutlich über mehrere
41 Ministerialressorts verteilt wird, ist es umso wichtiger, dass die **Ergebnisse der Forschung**
42 **durch die Ministerien für Wirtschaft, Landwirtschaft, Entwicklung und Wissenschaft re-**
43 **gelmäßig zusammengeführt und beurteilt** werden, um daraus notwendige, weitere

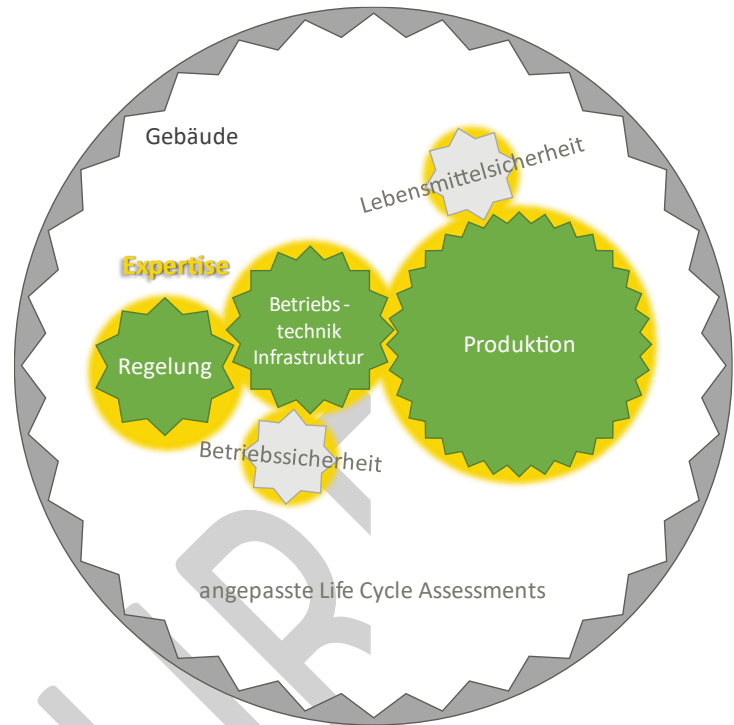


Abbildung 1. Die Aufgaben für die Lebensmittelproduktion in CEA-Anlagen greifen wie Zahnräder ineinander. Die Forschung dazu muss ähnlich verzahnt sein.

1 forschungs- und wirtschaftspolitische Maßnahmen abzuleiten und sie gut in den Forschungs-
2 ablauf zu integrieren (Abbildung 2).

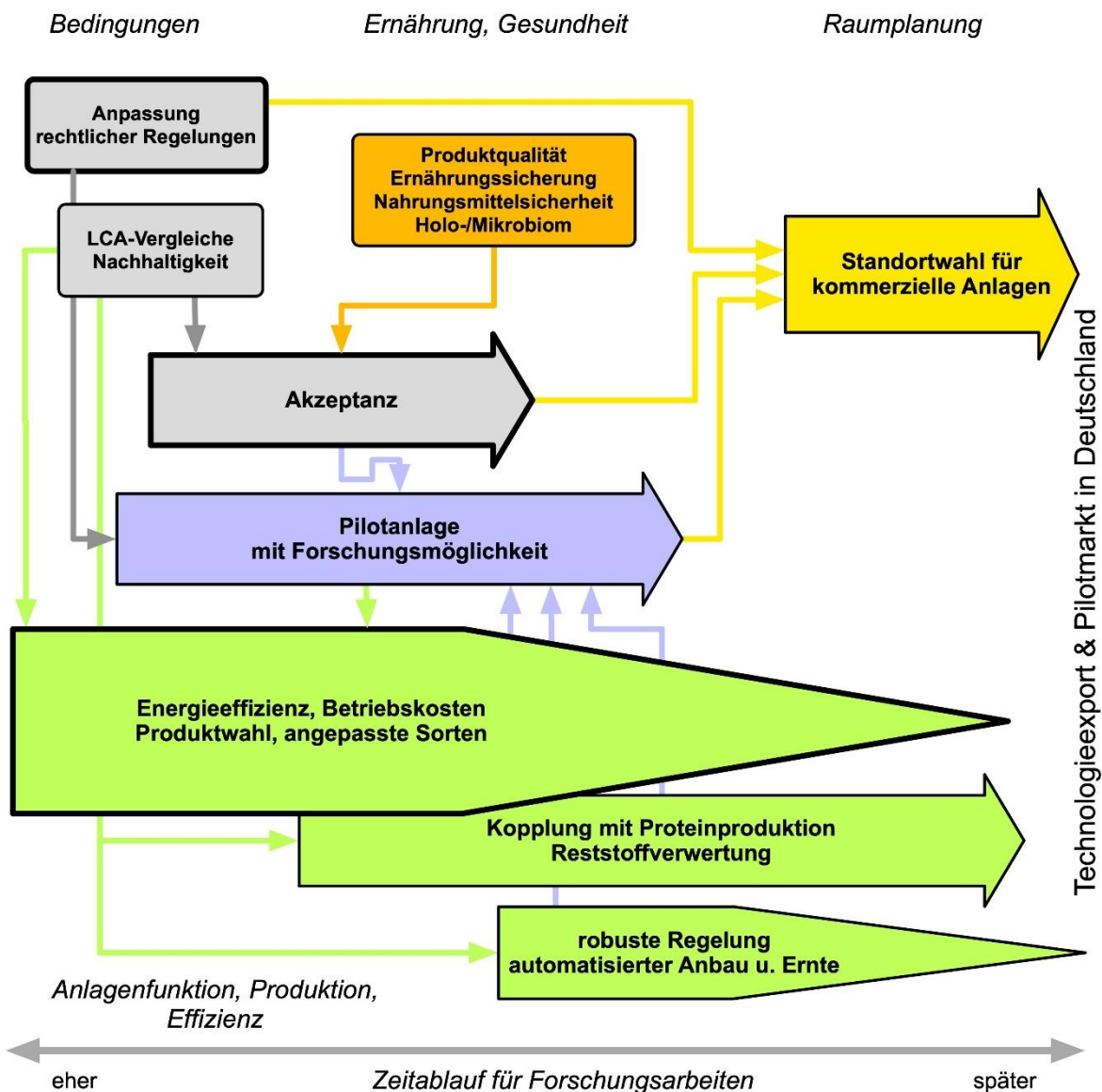
3 In der Forschungscommunity besteht zudem der Wunsch nach einem Kompetenz- und Koor-
4 dinationszentrum, das Ergebnisse und Daten zusammenführt und den fachlichen Austausch
5 unterstützt. Für die Etablierung eines solchen Zentrums kommen verschiedene Modelle in-
6 frage – von Angliederung an eine Fachgesellschaft bis zum Aufbau eines virtuellen Kno-
7 tens. Sie sind jedoch nicht Teil dieser Forschungsstrategie, sondern sollten im Dialog von
8 Bund, Ländern, Forschung und Wirtschaft diskutiert werden.

9 **9. Strategische Priorisierung der Maßnahmen**

10 Die unterschiedlichen Entwicklungszeiträume und ihre Bedeutung für den Ausbau von CEA
11 erfordern eine klare Priorisierung der Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen. Wir emp-
12 fehlen die folgende Priorisierung:

- 13 1. Energieeffizienz steigern und Betriebskosten senken; wirtschaftlich geeignete Pro-
14 dukte und Produktionsverfahren auswählen sowie Arten und Sorten züchterisch an-
15 passen
- 16 2. rechtliche Rahmenbedingungen in Deutschland und der EU für die CEA-Produktion
17 an Regeln zur landwirtschaftlichen Produktion angleichen
- 18 3. Akzeptanz bei Konsument:innen untersuchen
- 19 4. Automatisierungsgrad erhöhen
- 20 5. Pilotanlage mit Forschungsmöglichkeit aufbauen
- 21 6. LCA-Standards für Vergleiche und Modellierung entwickeln
- 22 7. Pflanzenproduktion mit Proteinproduktion durch Insekten, Fische, Garnelen koppeln
- 23 8. Regelungstechnik der Anlagen robuster gestalten
- 24 9. Reststoffe verwerten

25 Der Forschungsprozess sollte zeitlich so koordiniert werden, dass eine enge Abstimmung
26 zwischen den einzelnen Forschungsbereichen sichergestellt ist (Abbildung 2).



1
2 **Abbildung 2.** Idealisierter Ablauf der wichtigsten Forschungsaufgaben für CEA. Verbindungen
3 (Strichpfeile) zeigen notwendige Informationsflüsse an. Auslaufende Flächenpfeile (►)
4 zeigen an, dass die Wichtigkeit der Aufgabe mit der Zeit abnimmt. Flächenpfeile mit ausgezogenen Flügeln (➤)
5 zeigen an, dass die Aufgabe kontinuierlich oder längerfristig besteht.

6 **10. Zusammenfassung**

7 Die größte volkswirtschaftliche Bedeutung von CEA liegt aus deutscher Sicht im Export der
8 Technologie. Die Basis dafür sind Forschung, Entwicklung und Demonstration der Technolo-
9 gie in Deutschland. CEA ergänzt die herkömmliche Landwirtschaft überall dort, wo land-
10 wirtschaftliche Fläche knapp ist und nachhaltig bereitgestellte Energie preiswert verfügbar
11 ist.

12 Angesichts begrenzter finanzieller Ressourcen sollte sich die staatliche Forschungsförde-
13 rung auf jene Aufgaben konzentrieren, die am stärksten zur späteren Produktion von Le-
14 bens- und Futtermitteln in CEA-Anlagen beitragen. Nach unserer Ansicht gehören dazu:

- 1 1. die Wechselwirkungen zwischen der Umgebung und dem Produkt zu verstehen und da-
2 rauf aufbauend Regelung, Messtechnik und Überwachung von Mehrkomponenten-CEA-
3 Anlagen zu entwickeln, um sowohl Produktivität (insbesondere die Energieeffizienz)
4 als auch Produktqualität zu erhöhen,
 - 5 2. Gebäude- und Energietechnik weiterzuentwickeln, um Kosten zu senken,
 - 6 3. Stoffkreisläufe soweit wie möglich zu schließen, um Ressourcen zu sparen,
 - 7 4. durch geeignete Maßnahmen die Robustheit und Zuverlässigkeit der Anlagen, der Pro-
8 duktion und die Lebensmittelsicherheit der Produkte sicherzustellen.
- 9 Die Förderung der Forschung und Innovation muss politisch von Maßnahmen flankiert wer-
10 den, die die Akzeptanz von CEA-Produkten und -Anlagen in Deutschland als Pilotmarkt er-
11 höhen. Sozialwissenschaftliche Forschung unterstützt die Politik dabei, geeignete Wege zu
12 identifizieren und gesellschaftliche Bedenken gezielt zu adressieren.
- 13 Controlled Environment Agriculture baut auf wissenschaftlicher Exzellenz in der Agrarfor-
14 schung und jahrzehntelanger Erfahrung im Ingenieurwesen auf. Sie bietet Deutschland die
15 Chance, eine Schlüsseltechnologie zu entwickeln, die Ernährungssicherheit, Ressourceneff-
16izienz und wirtschaftliche Resilienz gleichermaßen stärkt.
- 17 In einer Welt, die zunehmend von Klimarisiken, geopolitischen Unsicherheiten und wach-
18sender Nachfrage geprägt ist, wird CEA zu einem strategischen Instrument, um Versor-
19gungssysteme unabhängiger, stabiler und nachhaltiger zu gestalten.
- 20 Die Investition in CEA schafft nicht nur die Grundlage für die eigene technologische Souve-
21ränität, sondern erschließt auch einen global wachsenden Markt mit erheblichem Wert-
22schöpfungspotenzial. Durch entschlossene Förderung kann Deutschland hier eine führende
23Position einnehmen - wissenschaftlich, wirtschaftlich und gesellschaftlich.
- 24