

Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion¹

K. Soyez*, D. Baier**, K. Fieback, M. Koller, M. Matthäi, J. Reinhold, H. Sommerfeldt

* Universität Potsdam, Zentrum für Umweltwissenschaften, FG Ökotechnologie

Postfach 60 15 53, D-14415 Potsdam

** Gesellschaft für ökologische Technologie und Systemanalyse e.V., Büro Brandenburg, In der Aue 9, Frankenförde

1 Einleitung und Zielstellung

Angesichts des zunehmenden Einsatzes der Kompostierung als Entsorgungstechnologie biogener Abfälle muß neben der Wirtschaftlichkeit der Anlagen auch der Umweltfreundlichkeit der Kompostierung steigendes Augenmerk geschenkt werden, um die ökologische Bilanz dieses Prozesses im Sinne einer nachhaltigen Abfallwirtschaft zu verbessern. Dabei ist die Verwertung der naturgesetzlich freiwerdenden und durch Prozeßführungsmaßnahmen nur bedingt oder nicht zu beeinflussenden Abprodukte der Kompostierung - Kohlendioxid, Wärme und Prozeßwasser - zu beachten. Für sie müssen stoffwirtschaftlich und energetisch sinnvolle Nutzungen gefunden werden. Einen Zugang hierzu stellt die Nutzung von CO₂, Wärme und Prozeßwasser aus der Kompostierung im Gewächshausgartenbau dar (s. Tab. 1).

Tab. 1: Vorteile einer Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion

für den Gartenbaubetrieb	für den Kompostbetrieb
interne Verwertungsmöglichkeit für Grünabfälle	interne Verwertungsmöglichkeit für die Abprodukte CO ₂ und Prozeßwärme
kostengünstige und umweltfreundliche CO ₂ -Düngung mit kompostbürtigem CO ₂	stabile Belieferung mit biogenem Material
teilweise Deckung des Wärmebedarfs mit Kompostierungsabwärme	interner Bedarf für den hergestellten Kompost
Geschäftsbereichserweiterung durch Annahme und Verwertung von Bioabfall	Geschäftsbereichserweiterung durch Gewächshausbetrieb

1.1 Gartenbauliche Nutzung von CO₂ angereicherter Kompostierungsabluft

CO₂ wird im Gartenbau zur Steigerung der pflanzenbaulichen Erträge, zur Ernteverfrüherung, zur Verbesserung des Gesundheitszustandes der Pflanzen (Überdruckdüngung) und zum Ausgleich eines CO₂-Mangels (Kompensationsdüngung) eingesetzt (GLEU, 1987; VOGEL, 1987; KTBL, 1984). Bereits der CO₂-Gehalt der Außenluft liegt mit durchschnittlich ca 340 vpm deutlich unter dem für Pflanzen optimalen Bereich von 600 bis 1200 vpm (s. Tab. 2). Im Gewächshaus kann die CO₂-Konzentration aufgrund der Betonierung von Gewächshausflächen, der Umstellung auf synthetische bzw. biologisch inaktive Substrate und aufgrund des verringerten Luftwechsels infolge von Wärmedämmung erheblich unter die Werte für die Umgebungsluft fallen. Nachgewiesene quantitative Effekte einer CO₂-Düngung liegen bei 20 - 30 % Mehrertrag (s. hierzu z.B. ANONYMUS 1988, 19 ff.).

¹ Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Bonn, Förderkennzeichen 14 606 38 U

Tab. 2: Empfohlene CO₂-Konzentrationen im Pflanzenbau²

pflanzenbaulich anzustrebende CO ₂ -Konzentrationen im Zierpflanzenbau		pflanzenbaulich anzustrebende CO ₂ -Konzentrationen im Gemüsebau	
Topfpflanzen	600-900 vpm	Gurke	1000-2000 vpm
Beetpflanzen	600-800 vpm	Tomate	1000-2000 vpm
Edelnelke (Jungpflanzen)	300-1000 vpm	Salat	ca. 1000 vpm
Rosen	750-1000 vpm	Kohlrabi	bis 1000 vpm
Chrysanthemen	700-1000 vpm	Paprika	bis 1000 vpm
Sommerblumen	500-800 vpm		
Hortensien	800 vpm		

Üblicherweise wird für die CO₂-Anreicherung technisches CO₂ (GRELLE und SEIDEL, 1984) oder CO₂ aus Gasgeneratoren (z. B. HEGE 1984; DOMKE, 1984; RUHRGAS 1995) eingesetzt. Es kann durch das CO₂ der Kompostierungsabgase vollständig ersetzt werden. Der jährliche pflanzenbauliche Bedarf liegt - abhängig von pflanzenbaulichen, klimatischen und konstruktiven Faktoren - bei etwa 100 Mg/ha. Bei einer mittleren CO₂-Ausbeute der Kompostierung von 100-200 kg/Mg Input entspricht das dem CO₂-Ausstoß bei der Verwertung von 500 bis 1000 Mg Bioabfall. Setzt man eine Kompostierungsanlage dezentraler Dimension von z.B. 5.000 Mg/a an, so lassen sich mit der erzeugten CO₂-Menge 5-10 Hektar Gewächshausfläche versorgen. Dabei können etwa 5-10 % des zu verwertenden Abfalls aus dem Gartenbaubetrieb selbst gewonnen werden. Für die volle Versorgung der Gewächshausflächen ist also noch weiterer Abfall zu verwerten. Dafür bietet sich die Nutzung von Bioabfall aus der Getrennsammlung an.

1.2 Abwärmenutzung im Verbund von Kompostierung und Gewächshausproduktion

Die Nutzungsmöglichkeiten von Wärme aus der Kompostierung im Gewächshausanbau sind weniger offensichtlich, weil das Gewächshaus selbst eine große Kollektorfläche darstellt, die in Zeiten der Sonneneinstrahlung zu einem Überangebot an Wärme im System führt. Bedingt durch die Bauweise tritt aber kaum ein Speichereffekt ein, so daß in Zeiten ungünstiger Witterung, im Nachtbetrieb und in der kalten Jahreszeit ein erheblicher Wärmebedarf besteht. Insgesamt liegt dieser Wert in der BRD in einem Bereich von 0,3 - 4 GJ/m² jährlich, je nach Klima (Innentemperatur-Sollwerte) und Bauform des Gewächshauses (Angaben nach KTBL, 1994). Für einen Innentemperatur-Sollwert von 15°C ergibt sich z. B. ein durchschnittlicher jährlicher Wärmeverbrauch von 1,7 GJ/m². Wird der Verbund von Kompostierung und Gewächshausproduktion auf die bedarfsgerechte CO₂-Versorgung ausgelegt, dann kann über die Kompostierungsabwärme nur ein Bruchteil des Wärmebedarfs des Gewächshauses gedeckt werden (1-5%). Bereits dieser relativ geringe Beitrag kann aber über die Abdeckung von Lastspitzen zu einer günstigeren Auslegung führen und damit zu niedrigeren Investitionskosten. Voraussetzung für ein sinnvolles Wärmemanagement eine entsprechende Speicherungsmöglichkeit von Wärme. Damit kann die Kompostierungswärme auch im Kompostierungsprozeß selbst genutzt werden kann, z.B. für eine beschleunigte Aufwärmung am Prozeßbeginn. Das führt zu einer beträchtlichen Steigerung der Effektivität und einer Verkürzung der Kompostierungsdauer.

² Werte nach einer Literaturzusammenstellung in BIOPLAN (1996)

1.3 Anforderungen an die Verfahrensrealisation

Der einfache Zusammenschluß der beiden Prozesse reicht nicht aus, um die für die Prozeßrealisierung beider Systeme erforderlichen Bedingungen einzuhalten. Gartenbauseitig ist die für den Anbau erforderliche CO₂-Menge über das Prozeßabgas bereitzustellen. Das CO₂ muß in entsprechender Qualität verfügbar sein, d.h. im pflanzenbaulich optimalen Konzentrationsbereich. Weiterhin sind die Auflagen des Arbeitsschutzes (MAK-Wert für CO₂: 5.000 vpm) sowie des Pflanzenschutzes zu berücksichtigen. Das bedeutet Freiheit von Schadstoffen und mikrobieller Belastung mit Phytopathogenen. Weiterhin sind die klimatischen Bedingungen wie Temperatur und Feuchte der Gewächshausluft einzuhalten. Beide hängen von der gewählten Kultur ab. Der Salatbau verlangt z.B. Temperaturen im Bereich von 20°C und geringe Feuchten, wohin gegen Gurken Temperaturen um 30°C und Feuchten um 90% benötigen. Das erfordert eine entsprechende Konditionierung der Prozeßgase. Kompostierungsseitig sind eine hohe Kompostierungsintensität und die Qualität des Endproduktes Kompost zu gewährleisten und die Forderungen nach geringen Emissionen und ökonomischer Arbeitsorganisation einzuhalten.

Das nach diesen Vorgaben entwickelte Carboferm[®]-Verfahren wurde in den vergangenen Jahren in einer kleintechnischen Versuchsanlage mit einem 3 m³ Kompostreaktor, gekoppelt mit einem 180 m² Gewächshaus, in einem Gartenbaubetrieb erprobt (Soyez et al., 1989). Bioprozeßtechnische Untersuchungen erbrachten den Nachweis, daß die kompostseitigen Voraussetzungen für die Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion gegeben sind, so daß eine Überführung in den großtechnischen Maßstab im Rahmen einer Demonstrationsanlage sinnvoll erschien.

2 Verfahrensrealisierung

2.1 Demonstrationsanlage

Als Demonstrationsanlage wurde ein Anlagenkomplex der Fa. GINKO - Gesellschaft für innovative Kompostierung Wilhelmshorst am Standort Langerwisch/Brandenburg genutzt. Dieser besteht aus zwei Kompostierungsreaktoren von je 1.000 Tonnen Jahresdurchsatz und einem Gewächshaus von 900 m² Anbaufläche. Die Kompostierungsanlage verwertet Abfälle des Gartenbaus sowie Bioabfälle aus der Stadtentsorgung Berliner Randgebiete. Die Komposte werden über einen betriebseigenen Garten- und Landschaftsbau genutzt. Die Anlage wurde entsprechend den Anforderungen des Versuchbetriebes umgebaut. Im Gesamtsystem sind Meßsonden zur Erfassung von Volumenströmen (Gasmengen), Temperatur (Gase, Wasser), Feuchte (Gas und Rottemasse), CO₂-Konzentration (Prozeßgas, Gewächshausatmosphäre in Pflanzennähe), Druck und Niveau eingefügt. In Bezug auf die Meßtechnik sind die Luftmengenmessung und die Feuchtemessung im Kompostierungsgut hervorzuheben.

Die Luftmengenmessung ist für die Prozeßbilanzierung ausschlaggebend. Die ursprünglichen mechanischen Anemometer waren den Anforderungen nicht gewachsen und fielen aus. Für den Anwendungszweck geeignete Paddelsonden, Rotameter und Staurohrsonden schieden aus Kostengründen aus. Als kostengünstiger und robuster Ersatz boten sich kalorimetrische Strömungssensoren an, die allerdings bisher nicht für diesen Einsatzzweck am Markt sind und daher auf Praxistauglichkeit erprobt werden mußten. Erste Versuche ergaben gute Korrelationen mit Vergleichsanemometern.

Die Gutsfeuchte ist eine für die Prozeßoptimierung der Kompostierung wichtige Größe, da nur im Feuchtebereich von 40 bis 60% eine effiziente Kompostierung möglich ist. Systeme für eine kostengünstige, kontinuierliche Online-Bestimmung stark veränderlicher Feuchtegehalte in einem inhomogenen festen Materialgemisch, wie es das Rottegut darstellt, sind derzeit kommerziell nicht verfügbar. Versuchsweise wurde ein auf Basis der Time-Domain-Reflektometrie arbeitender Sensor zur Online-Feuchtebestimmung verwendet. Die Time-Domäne-Reflektometrie nutzt die hohe Dielektrizitätskonstante des Wasser zur Bestimmung der absoluten volumetrischen Feuchte aus. Bis zum Ausfall der Meßsonde waren die Ergebnisse so vielversprechend, daß eine weitere Erprobung sinnvoll scheint.

Für die Prozeßsteuerung wurde ein Industrie-PC mit einem Echtzeitsystem eingesetzt, das die quasi gleichzeitige Steuerung der verschiedenen Vorgänge in der Anlag erlaubt. Die räumlich weit verteilten Sensoren und die Stellglieder wurden an Meßmodule angeschlossen, die in Form von Meßinseln in der Nähe der jeweiligen Sensoren und Stellglieder angeordnet sind. Dadurch wurden nur kurze Leitungen benötigt. Die Meßmodule sind untereinander und mit dem PC über einen seriellen Bus verbunden.

Die Prozeßsteuerung der Rotte wurde mit dem Ziel des maximalen Umsatzes organischer Substanz und der Einhaltung der Hygienisierungsbedingungen auf der Basis von Prozeßmodellen und Simulationen von erwünschten Prozeßzuständen konzipiert und in einen Steuerungsalgorithmus umgesetzt. Für die Rottesteuerung wurden drei Teilstrategien entwickelt, die die Realisierung eines optimalen Temperaturprogramms, die Feuchteregeung im Optimalbereich durch zeitversetzte Sicker- und Kondenswasserrückführung sowie die Vermeidung von Sauerstofflimitation durch untere Begrenzung der Belüftungsrate in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration vorsehen. Steuergröße des Gewächshausbetriebs ist das CO₂-Meßsignal im Pflanzenbereich. Die Regelung erfolgt über die Zufuhr von Reaktorabluft zu der Mischkammer. Die Zufuhr wird unterbrochen, sobald die Zuluftkonzentration von CO₂ 5.000 vpm erreicht. Damit wird ein Überschreiten des MAK-Wertes für CO₂ im Gewächshaus sicher vermieden.

2.2 Medienmanagement

An die verfahrenstechnische Realisierung der Anlage wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Rotteboxen können einzeln und gekoppelt im Umluft- und Durchluftbetrieb betrieben werden;
- die Luftströme können befeuchtet bzw. gewaschen und mit Frisch- und/oder Gewächshausluft gemischt werden;
- die Prozeßabgase werden mittels Strahlwäscher und Biofilter gereinigt und konditioniert;
- die Luftströme sind über die systeminternen Wärmesenken und -quellen kühl- und heizbar;
- die Zuführung und Absaugung der Luftströme in bzw. aus dem Gewächshaus kann wahlweise in in Boden- oder Dachnähe in das Gewächshaus erfolgen;
- dem Gesamtsystem kann an festgelegten Positionen über einen geschlossenen Wasserkreislauf Wärmeenergie zugeführt oder entnommen werden;
- die Überschußwärmen sind in einem Latentwärmespeicher speicherbar.

Luftstromseitig sind folgende Betriebsweisen zu unterscheiden:

- Unabhängiger Betrieb der Rotteboxen (Standardbetrieb); optional mit oder ohne CO₂-Anreicherung der Gewächshäuser; optional mit oder ohne Vorwärmung der Rottezuluft;

- Beschleunigung der Anfahrphase durch Belüftung mit warmer Luft; wahlweise mit Rotteabluft aus der gleichen oder aus einer weiteren Box, mit Gewächshausluft oder durch Vorwärmung über Latentwärmespeicher;
- Beladung der Latentwärmespeicher wahlweise mit Rotteabluft oder Gewächshausluft;
- Trockenblasen (am Ende der Intensivrotte) mit Gewächshausluft;
- Beheizung des Gewächshauses wahlweise über aufbereitete Kompostierungsabluft oder über Entladung der Latentwärmespeicher (indirekte Nutzung von Solar-, Rotteabluftwärme oder Gewächshauswärme).

Während die Rotteboxen und die Biofilter als Standardaggregate üblicher geschlossener Kompostierungsanlagen anzusehen sind, wurden Latentwärmespeicher, Strahlwäscher und Luftbeschickeranlage eigens für die speziellen Anforderungen der Verfahrensentwicklung konzipiert.

Latentwärmespeicher

Um die bei den technologisch ungünstigen, niedrigen Temperaturen anfallenden Wärmen zu speichern, wurden in Entwicklung befindliche Latentwärmespeichersysteme auf Paraffinbasis so modifiziert, daß ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Dabei kommen Paraffine mit Schmelztemperaturen im Bereich von 10 bis 60°C und Speicherdichten im Bereich von 160-190 kJ/kg Speichermaterial zum Einsatz. Die Kapazität der in das System integrierten Speicher beträgt insgesamt 100 kWh in vier Einheiten (je 500 l).

Luftbeschickeranlage für die Gastransporte in und aus dem Gewächshaus

Dieses Aggregat dient dazu, die Luftmengen entsprechend den Prozeßanforderungen zu verteilen. Es ist mit einem Lüfter und einem Wärmetauscher ausgestattet, der eine Wärmeeinspeisung aus der Fernwärme, aus dem Speichersystem und aus der Solaranlage ermöglicht. Die Lufttransporte erfolgen über armierte Kunststoffschläuche mit 300 mm Durchmesser, in die regelbare Luftauslässe integriert sind.

Gaswäscher

Die Gaswäscher haben die Aufgabe, die Rottegasen von Schadstoffen zu entbinden, Wärme aus den Gasen ein-/auszukoppeln und einen hilfsenergiearmen Rottegastransport zu gewährleisten. Sie wurden als Strahlwäscher in einer einfachen, korrosionsfesten, robusten und damit betriebssicheren, kostengünstigen Bauweise in Kunststoff ausgeführt. Die Luftförderung erfolgt über zwei Kunststoff-Axial-Ventilatoren mit je 660 m³/h.

2.3 Aufbau und Ausstattung des Gewächshauses

Das im Betrieb vorhandene Gewächshaus ist eine zweischiffige Anlage des Baukastensystems Thermogewächshaus (TG). Es hat bei einer Systembreite von 24 m und Systemlänge von 48 m eine Grundfläche von 1180 m² (VOGEL 1987, S. 108). Die Traufhöhe beträgt 2,4 m; die Firsthöhe 5,7 m; der Binderabstand 4,5 m. Das Gewächshaus wurde durch Abhängen mit Kunststofffolien in zwei jeweils 240 m² große, räumlich voneinander getrennte Bereiche unterteilt, zwischen denen sich eine Pufferzone befindet. Davon war eine Zelle für die gas- und wärmeseitige Kopplung mit dem Kompostierungsreaktor vorgesehen, die andere diente zum Vergleich. Hier wurden außer der CO₂-Versorgung alle weiteren Parameter analog den Verhältnissen in der begasteten Zelle eingestellt. In der zwischen den Zellenliegenden Pufferzone sind gartenbauliche Einrichtungen untergebracht.

Als Anbauverfahren wurde eine Variante des substratlosen Anbaus in folienbedeckten nährstoffdurchströmten Vliesmatten, das sogenannte Plant-Plane-Hydroponik-Verfahren ausgewählt. Es ermöglicht einen rationellen, kostengünstigen Betrieb und ist für ein breites Einsatzspektrum von Pflanzkulturen geeignet (SCHRÖDER, 1991). Bei diesem Verfahren werden Substratwürfel mit den Nutzpflanzen auf ein Vlies aufgestellt. Die beiden Gewächshauszellen wurden dabei mit je 5 Beeten ausgestattet. Als Testpflanze wurde Salat eingesetzt. Diese Pflanze ist eine gartenbaulich typische Kultur. Sie ist im mehreren Umtrieben in Kurzkultur anbaubar und stand daher für mehrere Durchgänge unter verschiedenen Kultivierungs- und Kompostierungsbedingungen zur Verfügung. Wesentlich ist weiterhin die bekannte gute Reaktion auf eine CO₂-Düngung, so daß sich hier entsprechende Effekte leichter nachweisen lassen (GEISSLER, 1988, S. 143). Eine Gewächshauszelle zeigt Abb. 1.



Abb. 2: Gewächshauszelle mit Beetanlagen nach dem plant-plane-Verfahren

3 Anlagenerprobung und gartenbauliche Ergebnisse

3.1 Vorgehensweise

Entsprechend dem technischen Realisierungsstand und den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurde in die detaillierte Auswertung hauptsächlich die Standardbetriebsvariante einbezogen.

Dabei wurde das Prozeßabgas aus dem Reaktor entnommen und über in Reihe geschaltete Gaswäscher und Biofilter in die Mischkammer geleitet. Dort wurde es durch Zumischung von Frischluft auf die erforderliche CO₂-Konzentration eingestellt. Die Gasdosierung für die Einhaltung der pflanzenbaulich optimalen CO₂-Konzentrationen im Gewächshaus erfolgte per Handsteuerung

Gartenbauseitig wurden 6 Durchgänge mit Salat durchgeführt und in bezug auf den pflanzlichen Ertrag und die Qualität der erzeugten Gemüses untersucht. Daneben wurde eine Erfassung der bei der Kultivierung anfallenden Abwässer und ihrer Nutzungsmöglichkeiten im Ge-

samtsystem von Kompostierung und Gewächshaus vorgenommen. Dazu wurden Untersuchungen zur überdachten Nachrotte (im Gewächshaus) durchgeführt.

3.2 Ergebnisse zur Zusammensetzung der Gewächshausatmosphäre

Die Sollwerte der CO₂-Konzentration im Gewächshaus liegen bei der gewählten Kultur bei 1000 vpm. Abb. 2 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentrationen in der unbegasten und in der begasten Gewächshauszelle. Deutlich wird, daß die CO₂-Anreicherung mit Kompostierungsabluft optimale Kohlendioxidgehalte in der Gewächshausluft, d.h. Werte im Bereich von 1.000 vpm sichert, während die unbehandelte Gewächshauszelle fast ständig zu niedrige Kohlendioxidgehalte aufwies. Die zeitweiligen Überschreitungen des pflanzenbaulichen Optimums in der kompostierungsabluftbehandelten Gewächshauszelle erreichten in keinem Falle schädigende Bereiche. Die CO₂-Konzentration der aufbereiteten Kompostabluft lag ständig unter den MAK-Wert. Damit können arbeitshygienische Bedenken bezüglich der Kohlendioxidgehalte weitgehend ausgeschlossen werden.

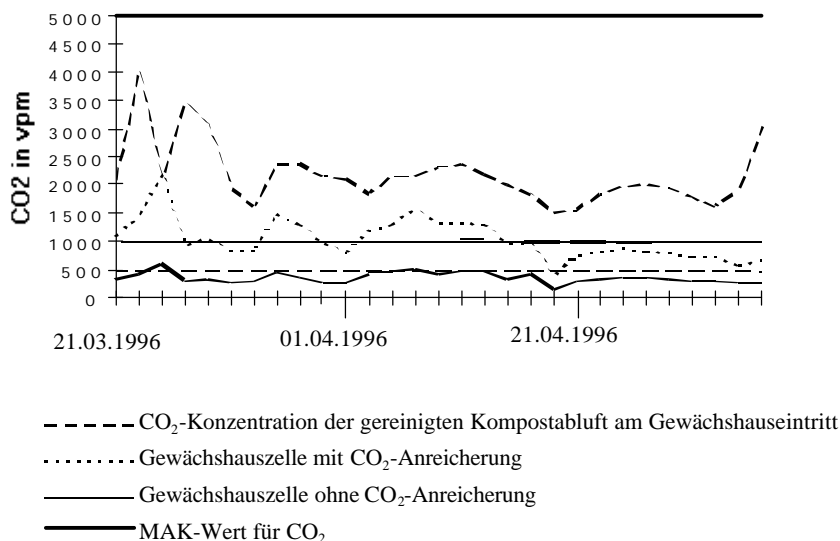


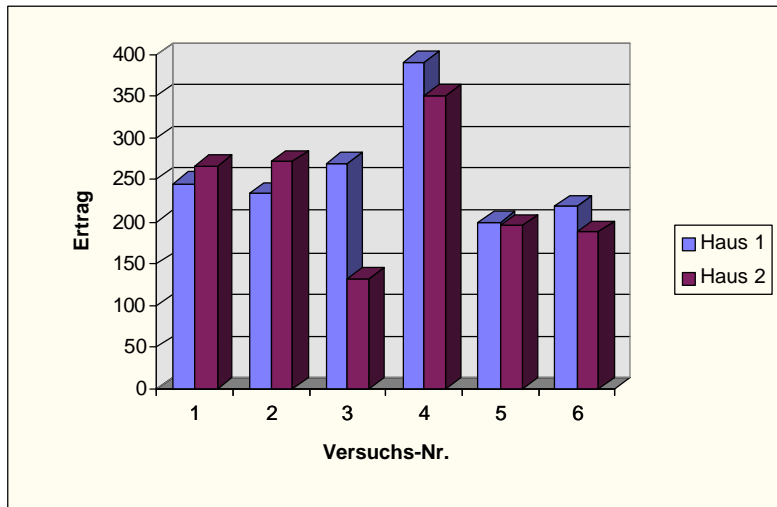
Abb. 2: Tagesmittel der Kohlendioxidgehalte in begaster und unbegaster Zelle

Die Einleitung gereinigter Kompostierungsabluft bewirkte selbst bei starker Lüftung etwa eine Verdoppelung der Kohlendioxidgehalte in der Gewächshausluft. Bei geschlossenen Lüftungsklappen konnte in der begasten Zelle auch während der höchsten Assimilationsleistung des Kopfsalatbestandes der Kohlendioxidgehalt im Bereich optimaler Konzentrationen gehalten werden.

3.3 Gartenbauliche Ergebnisse

Die Ergebnisse der Anbauversuche mit Salat zeigt Abb 3. Darin weisen die Anbauzyklen 1 und 2 zunächst die Unterschiede in den Anbauflächen aus, die aus unterschiedlichen Standortbedingungen, z.B. Beschattung durch die Kompostierungsreaktoren, resultieren. Zu erkennen ist ein Minderertrag von etwa einem Drittel für die für die Begasung vorgesehene Fläche. Das ist bei der Beurteilung der Begasungsversuche zu berücksichtigen. Diese als Anbau-Nr. 3-6 dargestellten Versuche zeigen selbst ohne Korrektur um diesen Malus einen mittleren Mehr-

ertrag der begasten Kulturen von etwa 33 %. Das liegt im oberen Bereich von Ergebnissen, die in der Literatur beschrieben sind. Es ist also deutlich, daß das pflanzenbauliche Ziel der Kompostgasanwendung in vollem Umfang erreicht wurde.



Legende: Versuch 1-2: ohne Begasung - günstigere Ergebnisse bei Haus 2
 Versuch 3-6: Haus 1: begaste Zelle, Haus 2: unbegaste Zelle

Abb. 3: Gartenbauliche Ergebnisse der Begasung mit CO₂-haltiger Kompostierungsabluft

4 Ökologisch-ökonomische Beurteilung

Eine ökologische Bewertung erfolgt üblicherweise über Systemvergleiche auf der Basis gleicher Nutzenfunktionen, die sich hier im wesentlichen als eine Nutzenmenge mit den drei Elementen {Bioabfallkompostierung, Gewächshaus-CO₂ Düngung, Gewächshauswärmeversorgung} darstellt. Weitere Vergleichssysteme mit dieser Nutzenmenge sind nicht bekannt³, so daß ein Vergleich auf dieser Ebene entfällt. Nur zu den Untermengen {Bioabfallkompostierung}, {CO₂-Düngung von Gewächshäusern}, {Gewächshauswärmeversorgung} und {Gewächshaus-CO₂ Düngung, Gewächshauswärmeversorgung} existieren Vergleichssysteme.

Für das Vergleichssystem Bioabfallkompostierung sind die innerhalb des Forschungsvorhabens entwickelten Prozeßsteuerungsvarianten⁴ auf ihre ökologische Vorteilhaftigkeit zu untersuchen. Da die Umetzung an einer großtechnischen Anlage noch aussteht und hierzu keine belastbaren Daten vorliegen, ist eine ökologische Bewertung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Die übrigen Nutzenmengen werden von der Verfahrensentwicklung je nach Auslegung realisiert. Tab. 4 zeigt überschlägig einen Vergleich der Auslegungsvarianten in Bezug auf eine zu versorgende Gewächshausfläche von 1 ha. Es wird deutlich, daß die Auslegung auf eine bedarfsgerechte CO₂-Versorgung die wahrscheinlichere Realisierungsvariante ist. Die bedarfsgerechte, vollständige Wärmeversorgung eines Gewächshauskomplexes dieser Größenordnung über eine Boxenkompostierung ist mit sehr großem baulichem Aufwand verbunden und mit anderen Kompostierungssystemen (z.B. geschlossene Mietenkompostierung) sicherlich zweckmäßiger zu lösen⁵.

³ In ähnliche Richtung zielt allerdings der Vorschlag von GLEU (1987) einer CO₂-Düngung durch Verbrennen von Biogas aus der Vergärung gartenbaulicher und landwirtschaftlicher Abfälle.

⁴ Siehe den Tagungsbeitrag im gleichen Band von PRAUSE „...Bioprozeßtechnische Untersuchungen“.

⁵ Zu Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung s. a. BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (1993)

Tab. 4: Vergleich von Auslegungsvarianten für die Kopplung von Boxenkompostierung und Gewächshausproduktion

	Auslegung auf eine bedarfsge- rechte CO ₂ -Versorgung des Ge- wächshauses	Auslegung auf eine bedarfsgerechte Wär- meversorgung des Gewächshauses
Systemnutzen(menge)	{CO ₂ -Anreicherung }	{Wärmeversorgung} bzw. {Wärme- versorgung, CO ₂ -Anreicherung }
Erforderliche Kompos- tierungskapazität	< 1.500 Mg/a (Annahme: durch- schnittlich 100 kg CO ₂ /Mg In- put)	> 80.000 Mg/a (Annahme: durchschnittliche nutzbare Wärmeleistung pro Box 20 kW, Auslegung auf $\Delta T_{\max} = 20$ K)
Investitionskosten*	< 1.000.000 (Annahme: <1.000 DM/Mg)	> 30.000.000 (Annahme: > 400 DM/Mg)
Flächenbedarf*	< 5000 m ² (Annahme: 5 m ² /Mg)	> 40.000 m ² (Annahme: 0,5 m ² /Mg)
materieller Aufwand	2 Rotteboxen	> 70 Rotteboxen (-container), große Wär- metauscher- und Heizungsflächen
voraussichtliche Um- weltvorteile	jährliche Primärenergieeinspa- rung bis zu 1 Mio kWh durch CO ₂ -Düngung,	Deckung eines jährlichen Gewächshaus- energiebedarfs von mehr als 4 Mio kWh; jährliche Primärenergieeinsparung bis zu 1 Mio kWh durch CO ₂ -Düngung
Genehmigungsverfahren	ggf.baurechtliche Genehmigung	immissionsschutzrechtliches Genehmi- gungsverfahren
Realisierungsaussichten	relativ hoch	relativ gering

* überschlägige Annahmen auf der Basis von KERN und WIEMER (1990)

Die ökologische Bewertung der Verfahrensentwicklung muß demnach insbesondere die Frage beantworten, ob die CO₂-Anreicherung mit Kompostierungsabluft insgesamt ökologisch vorteilhafter ist, als die CO₂-Düngung mit herkömmlichen Verfahren⁶. Vergleichssysteme sind die Düngung mit technischem CO₂, die CO₂-Anreicherung mittels kleiner Gasbrenner (keine gleichzeitige Wärmeversorgung) und die Düngung aus Verbrennungsabgasen von Wärmeerzeugern im Gewächshaus (sog. CO₂-Kanonen).

In der Ökobilanzierung werden üblicherweise bei der Nutzung von Abprodukten nur die Aufwendungen für ihre Fassung, Aufbereitung, weitere Verwendung und Entsorgung in die Bilanz aufgenommen, nicht aber die übrigen Umweltbelastungen des Prozesses, bei dem das Abprodukt entstanden ist (z. B. UBA, 1995). Bei der Düngung mit technischen CO₂ und mit Rotteabluft ist das CO₂ eindeutig als Abprodukt eines vorgelagerten Prozesses (Synthesegasherstellung bzw. Kompostierung) anzusehen, die Systemgrenze für die Bilanzierung beginnt also erst mit der Fassung und Reinigung des CO₂. Bei der Nutzung von Verbrennungsabgasen fällt das CO₂ als Abprodukt an, solange eine gewünschte Wärmeproduktion stattfindet, während bei nicht benötigter Wärmeproduktion das CO₂ das Hauptprodukt darstellt und die Verbrennung fossiler Rohstoffe in die Bilanzierung einbezogen wird. Eine Analyse der langjähriger Klimadaten für Potsdam zeigt, daß für Kopfsalat in den Monaten November bis März auch tagsüber eine Wärmeproduktion benötigt wird. Bei der CO₂-Anreicherung mittels spezieller Gasbrenner wird allgemein von einer vernachlässigbaren Wärmeproduktion ausgegangen, d. h. CO₂ ist ganzjährig als das Hauptprodukt anzusehen. Eine exakter ökologisch-ökonomischer Systemvergleich kann nur für ein spezifisches System erfolgen, da der CO₂-

⁶ Ausführlich siehe hierzu den Endbericht zum Teilvorhaben TV3/3 „Ökobilanzierung“ im Vorhaben „Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion“, BMBF-Vorhaben: 14 606 38 U

Bedarf und die Sachbilanz wesentlich vom Standort des gartenbaulichen Betriebs (Transportaufwendung, klimatische Bedingungen...), vom Anbauprodukt (erforderliches Gewächshausklima etc.), von der Anbaufolge (z. B. Winterpause oder ganzjähriger Betrieb), vom Anbauverfahren und vom Gewächshaustyp (natürlicher Luftwechsel, Verglasung, Schattierung etc.) abhängen. Dennoch zeigt bereits ein überschlägiger Vergleich deutliche ökologisch-ökonomische Vorteile der Verfahrensentwicklung gegenüber herkömmlichen CO₂-Anreicherungssystemen. Im Hinblick auf den Arbeits- und Pflanzenschutz muß allerdings eine gut funktionierende Abluftreinigung gewährleistet sein. Dies setzt eine sachgerechte Bio- und Grünabfallkompostierung und eine sorgfältige Dimensionierung und Wartung der Abluftreinigung voraus. Gegebenenfalls sind weitere Maßnahmen der Abluftreinigung vorzusehen, unter Verringerung der ökologischen und ökonomischen Vorteilhaftigkeit.

Literaturangaben

- ANONYMUS 1988: Zwischenbericht zum Versuchsprojekt: Untersuchung des Einsatzes von technischem CO₂ und Ergas zur CO₂-Düngung im Unterglas-Gartenbau; Straelen
- BIOPLAN DR. REINHOLD und DR. MÜLLER GMBH 1996: **Kompostierungsabluftwertung und Kompostmietenachrotte im Gewächshaus**. Anlage zum Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3/2 „Aufbau und Betrieb einer Demonstrationsanlage“ im BMBF Forschungsvorhaben: Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion; Wilhelmshorst
- BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (Hrsg.) 1993: **Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung bei der Kompostierung**. Maschwanden, CH
- DOMKE, O: 1984: **Erste Erfahrungen mit kleinen Gasbrennern zur CO₂-Düngung im Gewächshaus**. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.) 1984: CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296
- GANSLMEIER, J. 1984: **Wirtschaftlichkeit der CO₂-Düngung**. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.) 1984: CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296
- GEISSLER, Th. 1988: **Gemüseproduktion unter Glas und Platten - Produktionsverfahren**, Berlin
- GLEU, A. 1987: **Entwicklung eines Verfahrens zur energiewirtschaftlichen CO₂-Düngung von Gewächshäusern durch Biogasverbrennung**. Meißen
- GRELLE, F. und SEIDEL, S. 1984: **Versorgungs- und Dosiereinrichtungen zur Düngung mit technischem CO₂ in Gewächshäusern**. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.) 1984: CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296
- HEGE, H. 1984: **Einsatz von CO₂-Generatoren**. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.) 1984: CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296
- KERN, M.; WIEMER, K. 1990: **Kostenstrukturen der Boxenkompostierung. Arbeitswirtschaft und Betriebskosten**. 1. Aufl. Witzenhausen
- KTBL KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) 1984: **CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachge-**

- sprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn.
KTBL Schrift 296
- KTBL KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT
(Hrsg.) 1991: **Gewächshausheizung mit CO₂-Kanonen**. KTBL Arbeitspapier 160,
Darmstadt
- KTBL KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT
(Hrsg.) 1994: **KTBL-Taschenbuch Gartenbau. Daten für die Betriebskalkulation
im Gartenbau**. 4. Aufl. Darmstadt
- LECKER, F., HEGE, H. 1990: **Gewächshausheizung und CO₂-Düngung mit gasbetriebe-
nen Warmlufterzeugern**. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben 88 UM 11 des
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Weihenstephan
- PRAUSE, M. 1996: **Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Ge-
wächshausproduktion - Bioprozeßtechnische Untersuchungen**. Tagungsbeitrag
zum BMBF Statusseminar „Verbundvorhaben: Neue Techniken zur Kompostierung“.
6.-8.11.1996 Hamburg
- RUHRGAS AG (Hrsg.) 1995: **Erdgas im Gartenbau**. Essen, 3. Aufl.
- SCHRÖDER, F.-G 1991: **Entwicklung und pflanzenbauliche Grundlagen eines neuen er-
delosen Kulturverfahrens „Plant Plane Hydroponic“**, Humboldt-Universität Berlin,
Dissertation an der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau,
- SOYEZ, K.; FIEBACK, K.; BRANKATSCHK, K.; PASSIN, H. 1989: **Kombinierte CO₂-
Produktion, Schnellkompostierung und Abwärmenutzung**. In: Gartenbau 36
(1989)8, 236.
- SOYEZ, K., FIEBACK, K., BRANKATSCHK, K. 1990: **Regenerative CO₂-Düngung und
Heizung von Gewächshäusern durch Kompostierung**. In: Dott, W., u.a. (Hrsg.):
Biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Berlin, , 387-392.
- SOYEZ, K.; PRAUSE, M.; COSTA, A. 1995: **Modelling and simulation of composting u-
sing kinetic models**. In: Bidlingmaier, W.; Stegmann, R. (Hrsg.): Proceedings 1. Inter-
national Symposium Biological Waste Management, A wasted chance ? p. S8/1-8. Bo-
chum, 1995.
- UBA UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) 1995: **Ökobilanz für Getränkeverpackungen**, UBA
Texte 52/95, Berlin
- VOGEL, G. (Hrsg.) 1987: **Gemüseproduktion unter Glas und Platten - Natürliche und mate-
riell-technische Voraussetzungen**. Berlin