

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	5
TABELLENVERZEICHNIS	8
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	10
1 AUFGABEN UND ZIELE DES VORHABENS.....	11
2 DEMONSTRATIONSANLAGE LANGERWISCH	13
2.1 GRUNDLAGEN.....	13
2.2 ANFORDERUNGEN UND REALISIERUNG	14
2.3 TECHNISCHE VERFAHRENSREALISIERUNG.....	14
2.3.1 Erläuterungen zur ursprünglichen Anlage	15
2.3.2 Umbau der Anlage zur Realisierung der Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion	16
2.3.2.1 Verfahrenstechnische Anforderungen	16
2.3.2.2 Luftseitige Betriebsweisen	17
2.3.3 Übersicht über die innovativen Bauteile und Aggregate.....	17
2.3.3.1 Latentwärmespeicher.....	18
2.3.3.2 Strahlwäscher.....	18
2.3.3.3 Weitere Aggregate.....	19
2.3.4 Aufbau und Ausstattung des Gewächshauses.....	19
2.4 ERGEBNISSE DER DEMONSTRATIONSANLAGE.....	20
2.4.1 Kompostierung.....	20
2.4.2 Medien- und Energiemanagement	21
2.4.3 Hygiene	22
2.4.4 Ergebnisse zur CO ₂ -Bereitstellung für die Gewächshausversorgung	24
2.4.5 Gartenbauliche Ergebnisse.....	24
2.5 KOSTENSTRUKTUREN UND FLÄCHENBELEGUNG DER BOXENKOMPOSTIERUNG	25
2.6 ÜBERSICHT KOMPOSTIERUNGSVERFAHREN.....	29
3 GARTENBAULICHE GRUNDLAGEN DER CO ₂ -ANREICHERUNG	32
3.1 NUTZEN DER CO ₂ -DÜNGUNG	33
3.2 CO ₂ -BEDARF.....	35
3.3 UNTERGLASANBAU UND STAND DER CO ₂ -DÜNGUNG IM GARTENBAU.....	37
3.4 RECHTLICHE REGELUNGEN.....	39
3.4.1 DVGW-Arbeitsblatt G 633.....	40
3.5 VERFAHREN DER CO ₂ -DÜNGUNG.....	40
3.5.1 CO ₂ -Generatoren.....	40
3.5.1.1 CO ₂ -Brenner	42
3.5.1.2 Einleiten von Verbrennungsgasen aus zentralen Heizeinrichtungen.....	43
3.5.1.3 Gaskanonen	45
3.5.2 Technisches CO ₂	52
3.5.3 Vergleichende Untersuchungen zur CO ₂ -Anreicherung.....	56
3.6 PHYTOHYGIENISCHE EFFEKTE DER CO ₂ -ANREICHERUNG.....	60
3.7 HUMANHYGIENISCHE ASPEKTE DER CO ₂ -ANREICHERUNG	64

3.7.1 Wirkung von CO ₂ auf den menschlichen Organismus.....	64
3.7.2 Humanhygienische Aspekte der Begleitgase der CO ₂ -Anreicherung.....	64
3.7.2.1 Gesundheitsrisiken durch Bioaerosole	65
3.7.2.2 Gefährdungsschwellen und Grenzwertempfehlungen	66
3.7.2.3 Bioaerosolbelastungen	68
3.7.2.4 Zusammenfassung.....	69
3.8 GEWÄCHSHAUSBEHEIZUNG	70
3.9 KOSTEN- UND ERTRAGSSTRUKTUREN.....	73
4 METHODIK DER ÖKOBILANZIERUNG.....	77
4.1 DEFINITION	77
4.2 ANFORDERUNGEN AN DIE DURCHFÜHRUNG.....	79
4.3 ABLAUF.....	80
4.3.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	81
4.3.2 Sachbilanz.....	82
4.3.3 Wirkungsabschätzung	84
4.3.4 Bewertung.....	88
4.3.4.1 Berechnung kritischer Volumina	90
4.3.4.2 Ökopunkte (kritische Stoffflüsse).....	91
4.3.4.3 Ökotoxikologische Bewertung.....	92
4.3.4.4 Eco-indicator 95	92
4.3.4.5 EPS	93
4.3.4.6 Nutzwertanalyse	94
4.3.4.7 SPI Sustainable Process Index.....	94
4.3.4.8 MIPS (Material Intensity per unit service).....	95
4.3.4.9 ABC-Analyse	96
4.3.4.10 UBA	96
4.3.4.11 Ökonomische Modelle	97
4.3.5 Optimierungs- und Sensitivitätsanalyse	98
4.3.6 Auswertung.....	98
4.4 ENTWICKLUNGSSTAND UND FORSCHUNGSBEDARF.....	98
4.5 ÖKOBILANZSTUDIEN, LITERATUR UND -SOFTWARE	100
5 BEURTEILUNG VERSCHIEDENER VERFAHREN DER CO₂-ANREICHERUNG -	
VERFAHRENSVERGLEICH	103
5.1 UNTERSUCHUNG ZU AUSLEGUNGSVARIANTEN DER VERFAHRENTWICKLUNG	103
5.2 FESTLEGUNG DES ZIELS UND DES UNTERSUCHUNGSRAHMENS	111
5.2.1 Ausgangsfragestellung, Ziel:	112
5.2.2 Untersuchungsrahmen.....	112
5.2.2.1 Sytemfunktion, funktionelle Einheit und untersuchte Systeme.....	112
5.2.2.2 Systemgrenzen und Allokationsverfahren.....	114
5.2.2.3 Methode für Wirkungsabschätzung und anschließende Auswertung	115
5.2.2.4 Annahmen und Festlegungen für die Sachbilanz.....	115
5.2.3 Anforderungen an Daten, kritische Begleitung und Dokumentation.....	117
5.3 SACHBILANZ	118
5.3.1 Datenquellen und generelle Daten.....	118
5.3.2 Berechnungsgrundlagen.....	120
5.4 WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	125

5.5 SUBSTITUTIONSPOTENTIALE	129
5.5.1 Substitutionspotential Carboferm	129
5.5.2 Substitutionspotential Mehrertrag	130
5.5.3 Substitutionspotential Kompostierungswärme	132
5.5.4 Substitutionspotential Intensivrotteverkürzung.....	134
5.6 SENSITIVITÄTSANALYSEN.....	135
5.7 WIRTSCHAFTLICHKEIT	137
5.8 AUSWERTUNG.....	137
6 ZUSAMMENFASSUNG.....	141
7 LITERATURVERZEICHNIS.....	143
8 ANLAGEN	153

Tabellenverzeichnis

TAB. 1: VORTEILE EINER KOPPLUNG VON KOMPOSTIERUNG UND GEWÄCHSHAUSPRODUKTION.....	13
TAB. 2: TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN EINER ROTTEBOX	15
TAB. 3: LUFTSEITIGE BETRIEBSWEISEN DER ANLAGE.....	17
TAB. 4: KENNZEICHNUNG VERFAHRENTYPISCHER EINFLUßMÖGLICHKEITEN.....	20
TAB. 5: MASSENVERLUSTE WÄHREND DER INTENSIVROTTE	20
TAB. 6: ANALYSEWERTE SICKERWASSER (AUSWAHL).....	21
TAB. 7: ABWASSERBELASTUNGEN DES UMLAUFWASSERS	22
TAB. 8: UNTERSUCHUNGSGEBIETE DER KEIMBELASTUNGEN.....	23
TAB. 9: GARTENBAULICHE ERGEBNISSE DER BEGASUNG MIT CO ₂ -HALTIGER KOMPOSTIERUNGSABLUF.....	25
TAB. 10: FLÄCHENBEDARF DER BOXENKOMPOSTIERUNG	27
TAB. 11: INVESTITIONSKOSTEN	28
TAB. 12: BETRIEBSKOSTEN	29
TAB. 13: EIGENSCHAFTEN VON CO ₂	32
TAB. 14: EMPFOHLENE CO ₂ -KONZENTRATIONEN IM PFLANZENBAU	34
TAB. 15: CO ₂ -BEDARF FÜR DIE CO ₂ -ANREICHERUNG.....	36
TAB. 16: AUFNAHME VON CO ₂ IM GEWÄCHSHAUS.....	36
TAB. 17: PFLANZENAUFNAHME UND CO ₂ -BEDARF.....	37
TAB. 18: BETRIEBE MIT GEWÄCHSHÄUSERN NACH BUNDESLÄNDERN.....	38
TAB. 19: BETRIEBE MIT EINER GEWÄCHSHAUSFLÄCHE VON .. BIS UNTER ... M ² IN DER BRD	38
TAB. 20: PHYSIKALISCHE KENNGRÖßEN UND BRENNEIGENSCHAFTEN VON ERDGASEN NACH DVGW- ARBEITSBLATT G 620	41
TAB. 21: CO ₂ -PRODUKTION IN ABHÄNGIGKEIT VOM ENERGIETRÄGER.....	41
TAB. 22: DATEN UND KOSTEN FÜR PROPAN UND ERDGAS	42
TAB. 23: TECHNISCHE DATEN KODIMAX.....	43
TAB. 24: ZUSAMMENSETZUNG DER GH-LUFT BEI CO ₂ -ANREICHERUNG AUF 4000 VPM (HEIZUNGSANLAGE FRÖLING/ELCO).....	45
TAB. 25: TECHNISCHE DATEN PRIVA CO ₂ -KANONE, TYP LN-BRENNER	46
TAB. 28: LUFTWECHSEL ZUR EINHALTUNG DES MAK-WERTES FÜR CO ₂	50
TAB. 29: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES WIRKUNGSGRADES	50
TAB. 30: ZUSAMMENSETZUNG DER DURCH CO ₂ -GENERATOREN BEHEIZTEN GEWÄCHSHAUSLUFT.....	51
TAB. 31: CO ₂ -STAHLFLASCHEN	55
TAB. 32: AUSLEGUNGSWERTE FÜR DIE CO ₂ BEVORRATUNG	55
TAB. 33: CO ₂ NIEDERDRUCKTANKS	55
TAB. 34: KOSTENSTRUKTUREN DER TECHNISCHEN CO ₂ -ANREICHERUNG.....	56
TAB. 35: ERGEBNISSE DER KULTURVERSUCHE	58
TAB. 36: ANLAGEN- UND BETRIEBSKOSTEN (3.000 M ² GEWÄCHSHAUSFLÄCHE, 2 KG CO ₂ /(M ² A)	59
TAB. 37: ANLAGEN- UND BETRIEBSKOSTEN (3.000 M ² GEWÄCHSHAUSFLÄCHE, 3 KG CO ₂ /(M ² A)	59
TAB. 38: KRITISCHE BEGASUNGSDAUER (TAGE BIS ZUR REDUKTION DER WACHSTUMSRATE) BEI KONTINUIERLICHER CO ₂ -ANREICHERUNG	61
TAB. 39: PFLANZENRELEVANTE BEGLEITGASE IN DER KOMPOSTIERUNGSABLUF	63
TAB. 40: WIRKUNGEN VON CO ₂ AUF DEN MENSCHLICHEN ORGANISMUS.....	64
TAB. 41: ANGABEN ZU GEFÄHRDUNGSSCHWELLEN	67
TAB. 42: GRENZWERTEMPFEHLUNGEN	67
TAB. 43: LEITKEIME UND SUMMENPARAMETER.....	68
TAB. 44: MITTLERE KEIMKONZENTRATIONEN (VERSCHIEDENE QUELLEN)	69

TAB. 45: GEWÄCHSHAUSFLÄCHEN NACH ENERGietRÄGER FÜR BEHEIZUNG	71
TAB. 47: NORMAUßENTEMPERATUR NACH DIN 4701 VON AUSGEWÄHLTEN STANDORTEN.....	72
TAB. 48: WÄRMEBEDARF EINES BREITSCHIFFHAUSES.....	72
TAB. 49: WÄRMEVERBRAUCH VON GEWÄCHSHAUSANLAGEN MIT EINFACHGLASBEDACHUNG.....	73
TAB. 50: SPEZIALAUFWAND IN GEMÜSEBAUBETRIEBEN	74
TAB. 51: WIRTSCHAFTSDATEN DER GARTENBAUBETRIEBE, FRÜHERS BUNDESGBIET, KALENDERJAHR 1994.....	74
TAB. 52: GEWINNENTWICKLUNG (IN %) IN ABHÄNGIGKEIT VON KOSTEN UND ERTRAGSSTEIGERUNG BEI DER CO ₂ -ANREICHERUNG, GEMÜSEBAU	75
TAB. 53: GEWINNENTWICKLUNG (IN %) IN ABHÄNGIGKEIT VON KOSTEN UND ERTRAGSSTEIGERUNG BEI DER CO ₂ -ANREICHERUNG, ZIERPFLANZENBAU	76
TAB. 54: WIRKUNGSKATEGORIEN.....	85
TAB. 55: BEWERTUNGSMODELLE (AUSWAHL).....	90
TAB. 57: ÜBERSICHT ZUR ÖKOBILANZSOFTWARE	101
TAB. 58: MASSENBILANZIERUNG DER ROTTE FÜR 1 MG INPUT	104
TAB. 59: STÜNDLICHE CO ₂ -PRODUKTION WÄHREND 14-TÄGIGER INTENSIVROTTE (KG CO ₂ /H).....	106
TAB. 60: NUTZBARE WÄRMELEISTUNG DER INTENSIVROTTE	107
TAB. 61: DURCHSCHNITTliche WÄRMefREISETZUNG BEI DER KOMPOSTIERUNG.....	109
TAB. 62: PARAMETER FÜR DEN VERGLEICH VON AUSLEGUNGSVARIANTEN.....	111
TAB. 63: VERGLEICH DER AUSLEGUNGSVARIANTEN.....	111
TAB. 64: VERGLEICHSSYSTEME DER ÖKOBILANZIERUNG	113
TAB. 65: KLIMADATEN	117
TAB. 66: DATENQUELLEN	118
TAB. 67: DIREKTE EMISSIONEN VON GÜTERVERKEHRSMITTELN	118
TAB. 68: EMISSIONEN BEI DER VERBrenNUNG VON ERDGAS, GEBlÄSEBrenNER.....	119
TAB. 69: BEREITSTELLUNG STROM, FREI VERBRAUCHER	119
TAB. 70: AUFWENDUNGEN FÜR DIE BEREITSTELLUNG ERDGAS FREI VERBRAUCHER IN DER BRD.....	119
TAB. 71: EMISSIONSINVENTAR DER SACBHILANZ.....	123
TAB. 72: EMISSIONSRANGFOLGEN	125
TAB. 73: WIRKUNGSPOTENTIALE VON EMISSIONEN	126
TAB. 74: ERGEBNIS DER WIRKUNGSCHARAKTERISIERUNG	126
TAB. 75: REDUKTIONSZIELE NACH ECOINDICATOR	129
TAB. 76: BEWERTUNG MIT ÖKOPUNKTEN NACH ECO-INDICATOR	129
TAB. 77: SUBSTITUTIONSPOTENTIAL CARBOFERM.....	130
TAB. 78: EMISSIONSEINSPARUNGEN DURCH MEHRERTRAG	131
TAB. 79: SUBSTITUTIONSPOTENTIAL KOMPOSTIERUNGSWÄRME	133
TAB. 80: SUBSTITUTIONSPOTENTIAL INTENSIVROTTEDAUER	135
TAB. 81: SENSITIVITÄTSANALYSEN.....	136
TAB. 82: VERGLEICH DER VERBRAUCHSABHÄNGIGEN KOSTEN FÜR DIE DÜNGUNG VON 1 HA ANBAUFLÄCHE.....	137

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: TAGESMITTEL DER KOHLENDIOXIDGEHALTE IN BEGASTER UND UNBEGASTER ZELLE.....	24
ABB. 2: CO ₂ KONZENTRATION IM GEWÄCHSHAUS	48
ABB. 3: BESTANDTEILE EINER ÖKOBILANZ.....	81
ABB. 5: EMISSIONSINVENTAR.....	124
ABB. 6: ERGEBNISSE DER WIRKUNGSCHARAKTERISIERUNG	127
ABB. 7: ANTEILE DER EMISSIONEN AN DEN GESAMTEMISSIONEN IN DER BRD.....	128
ABB. 8: EMISSIONSVERGLEICH DÜNGUNG - MEHRERTRAG	132
ABB. 9: SUBSTITUTIONSPOTENTIAL KOMOSTIERUNGSWÄRME.....	134

1 Aufgaben und Ziele des Vorhabens

Forschungspolitischer Hintergrund

Die getrennte Sammlung und Kompostierung von Bioabfällen gewinnt aufgrund neuer Verwaltungsvorschriften und Gesetze (z. B. TASI) zunehmend an Bedeutung. Bis zum Jahr 2000 werden die Investitionen im Anlagenbereich auf bis zu 3 Mrd. DM für den Aufbau weiterer 150 Kompostierungsanlagen geschätzt. Es wird von einer Entsorgungskapazität von 9,8 bis 10,4 Mio. t ausgegangen. Obwohl die Kompostierung seit langem als Behandlungsmethode für Abfälle verschiedener Art (Grünabfälle, Klärschlämme, Bioabfälle, Hausmüll in den siebziger Jahren) angewendet wird bzw. wurde, birgt dieser Behandlungsweg noch eine Reihe von Problemen und offenen Fragen, die insbesondere die ökologischen Auswirkungen der Kompostierung selbst (Emissionsproblematik) und die Absetzbarkeit von Komposten (z. B. hygienische Anforderungen an den Kompost, Anwendungsgebiete, Gütekriterien etc.) betreffen.

Vor diesem Hintergrund hat der Bundesminister für Forschung und Technologie 1990 das Verbundvorhaben „Neue Techniken zur Kompostierung“ unter der fachlichen und organisatorischen Betreuung durch das Umweltbundesamt gestartet. In dieses Verbundvorhaben eingebettet war das Teilvorhaben 3 „Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion“.

Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens

Die Verfahrensentwicklung zielt auf einen ökologisch und wirtschaftlich optimalen Betrieb des Gesamtsystems aus Kompostierung und Gewächshausproduktion. Technologisch stellt das Verfahren ein System mit weitgehend geschlossenen Stoff- und Energiekreisläufen dar, einhergehend mit einer Minimierung des Einsatzes fossiler Energien für die Gewächshausbetrie- bung und die Kompostierung. Dabei werden apparateseitig ein Strahlwaschsystem, ein Biofilter und ein Gasmisch- und Konditioniersystem kombiniert, so daß die Reinigung, Konditionierung und Einleitung von Kompostierungsabgas in das Gewächshaus in einer pflanzenphysiologisch optimalen Menge und Qualität erfolgen können.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte in den drei Teilprojekten

- | | |
|--------|--|
| TV 3/1 | Bioprozeßtechnische Untersuchung zur Auslegung und Steuerung |
| TV 3/2 | Demonstrationsanlage |
| TV 3/3 | Ökobilanzierung |

Die Arbeiten zum Teilvorhaben 3/1 hatten zum Ziel, nach dem Entwurf des technologischen Gesamtschemas einen Algorithmus zur prozeßrechnergestützten Steuerung des Gesamtsys-

tems zu entwerfen und praktisch zu erproben. Die Ergebnisse sind im Abschlußbericht dargestellt [EBT 1996].

Die technische Verfahrensrealisierung des Carboferm[®]-Verfahrens war Aufgabe des Teilvorhabens 3/2 [KOLLER 1997]. Als Demonstrationsanlage wurde ein Anlagenkomplex am Standort Langerwisch im Land Brandenburg genutzt. Dieser besteht aus zwei geschlossenen 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 Versuchsbetriebes umgebaut, in praktischen Versuchen untersucht und optimiert.

Ziel der ökologischen Beurteilung im Teilvorhaben 3/3 war es, ausgehend von der Verfahrensentwicklung in der Demonstrationsanlage die Umweltauswirkungen der Kombination von Kompostierung und Gewächshausproduktion zu erfassen und Ansatzpunkte für eine Optimierung unter ökologischer Zielstellung zu finden.

2 Demonstrationsanlage Langerwisch

2.1 Grundlagen

Die Kopplung von Kompostierungs- und Gartenbaubetrieb kann für die Kompostierung wie auch für den Gartenbau gleichermaßen von Vorteil sein, indem wechselweise CO₂ und Wärme für beide Prozesse bereitgestellt und günstig verwertet werden (s. Tab. 1).

Tab. 1: Vorteile einer Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion

Vorteile für den Gartenbaubetrieb	Vorteile 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

CO₂ wird im Gartenbau zur Steigerung der pflanzenbaulichen Erträge, zur Ernteverfrüherung, zur Verbesserung des Gesundheitszustandes der Pflanzen und zum Ausgleich eines CO₂-Mangels eingesetzt [GLEU, 1987; VOGEL, 1987; KTBL, 1984].

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.

Wird der Verbund von Kompostierung und Gewächshausproduktion auf eine bedarfsgerechte CO₂-Versorgung ausgelegt, dann kann über die Kompostierungsabwärme zwar nur ein Anteil von etwa 1 - 5 % des Wärmebedarfs des Gewächshauses gedeckt werden, bereits dieser relativ geringe Beitrag reicht aber aus für die Abdeckung von Lastspitzen und führt zu einer günstigeren Auslegung und zu niedrigeren Investitionskosten. Ein sinnvolles Wärmemanagement verlangt jedoch eine entsprechende Speicherungsmöglichkeit von Wärme. Dann kann die Kompostierungswärme auch im Kompostierungsprozeß selbst genutzt werden, z.B. für eine beschleunigte Aufwärmung am Prozeßbeginn der Intensivrotte. Das führt zu einer beträchtlichen Steigerung der Effektivität, einer Verkürzung der Kompostierungsdauer und zu einer ökologisch-ökonomischen Optimierung.

2.2 Anforderungen und Realisierung

Der einfache Zusammenschluß der beiden Prozesse reicht nicht aus, um ein technologisches System zu realisieren, das den Anforderungen an einen ressourcenschonenden Betrieb gerecht wird. Dazu ist es notwendig, Gewächshaus und Kompostierung über ein Medien, Prozeß- und Energiemanagement zu koppeln.

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 sowie des Pflanzenschutzes zu berücksichtigen. Das bedeutet Freiheit von phyto- und humanhygienischen Schadstoffen und Bioaerosolen. Weiterhin sind die klimatischen Bedingungen wie Temperatur und Feuchte der Gewächshausluft einzuhalten. Das erfordert eine entsprechende Konditionierung der Prozeßgase.

Kompostierungsseitig sind eine hohe Kompostierungsintensität und eine hohe Qualität des Endproduktes Kompost zu gewährleisten und die Forderungen nach geringen Emissionen und ökonomischer Arbeitsorganisation einzuhalten. Zur Minderung des Einsatzes fossiler Energie und für eine rationelle Energienutzung sind die aus dem Bioprozeß und aus der Sonnenstrahlung stammenden Energiemengen so weit als möglich systemintern zu verwerten. Dazu ist ein entsprechendes Energiemanagement aufzubauen. Das Gesamtsystem ist bezüglich ökologischer und ökonomischer Kriterien zu optimieren und zu steuern. Dazu ist ein Prozeßmanagement erforderlich.

2.3 Technische Verfahrensrealisierung

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

Als Demonstrationsanlage wurde der Anlagenkomplex am Standort Langerwisch im Land 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 Versuchsbetriebes umgebaut.

2.3.1 Erläuterungen zur ursprünglichen Anlage

Kernstück der Anlage sind zwei luft- und flüssigkeitsdicht abgeschlossene Rottereaktoren¹ (s. Tab. 2), die in einem Gebäude untergebracht sind. Sie erfüllen die Voraussetzungen für eine kontrollierte Steuerung des Rotteprozesses. Ein wesentliches Merkmal der Anlage ist, daß alle maschinellen Einrichtungen und beweglichen Teile außerhalb der Rottereaktoren liegen und somit nicht mit korrosiver Luft, Sickerwasser oder Kondenswasser in Kontakt geraten. Jeder Rottereaktor stellt eine in sich funktionsfähige Einheit aus folgenden Baugruppen dar:

- Behälter aus Stahlbeton mit preßluftgedichteter Tür und äußerer Wärmeisolierung (100 mm Styropor)
- Klimaanlage, bestehend aus Wärmetauschern, Ventilatoren, Luftsteuerklappen, Filter und Kühler
- EDV- unterstützte Meß- und Regelanlage.

Tab. 2: Technische Spezifikationen einer Rottebox

Parameter	Wert	Einheit
Länge	7530	mm
Breite (ohne Gangbreite)	3460	mm
Gangbreite	1500	mm
Höhe	5482	mm
Grundfläche (einschl. Gangbreite)	37,35	m ²
Gewicht: (einschl. Klimaanlage, 2 Mg)	55	Mg
Nettofüllvolumen	54	m ³
Einfüllgewicht (max.)	30	Mg
Stromanschluß (bei 50 Hz)	380	V
Anschlußleistung	4	KW
Verfügbarkeit	50	Wochen per anno
Generalwartung	2	Wochen per anno

Die zu kompostierenden Materialien werden chargenweise zugeführt. Die Belüftung erfolgt über gelochte Rottebodenplatten. Die Rotteabluft wird oberhalb des Rottegutes abgesaugt und entweder direkt der Zuluft beigemischt oder über den Wärmetauscher zum Biofilter geleitet. Durch die Kühlung wird ein beträchtlicher Teil der Geruchsstoffe in Form von Kondensaten aus der Abluft entfernt. Die Wärme des Kühlwassers wird über einen Verdunstungskühler an die Atmosphäre abgegeben.

¹ System Herhof

Das in dem Abluftsystem anfallende Kondensat gelangt über Siphons und eine zentrale Sammelleitung in einen Sammelbehälter. Es kann bei Bedarf wieder in den Rotteraktor zurückgeführt oder zum Befeuchten der Nachrottemieten verwendet werden. Das anfallende Sickerwasser sammelt sich in einem Schacht und wird über eine Pumpe in den Innenraum der Reaktoren zurückgeführt.

Zur Charakterisierung der Kompostierungsreaktion ist die Anlage u.a. mit der für eine komplette CO₂-Bilanzierung erforderlichen Meßeinrichtung ausgestattet. Durch die ständige Temperatureaufzeichnung ist der Temperaturverlauf jederzeit dokumentiert. Die Bedingungen für die Hygienisierung können so überprüft werden.

Abluftreinigung

Zur Abluftreinigung ist jedem Kompostierungsreaktor ein Biofilter zugeordnet, dessen Ausgang in die freie Atmosphäre führt. Jeder Biofilter besteht aus 4 übereinander angeordneten Kunststoffbehältern (Grundmaße Kunststoffbehälter innen: 1120 mm x 920 mm x 600 mm), die mit organischen Filtermaterialien (z. B. Rindenmulch) gefüllt sind. Der Vorteil des geschlossenen Filtersystems besteht neben dem geringen Platzbedarf vor allem darin, daß gleichmäßigere Betriebsbedingungen gewährleistet werden können. Nachteilig ist der Aufwand bei einer Kontrolle bzw. bei einem Austausch des Filtermaterials.

Die Abluft durchströmt den Filter von oben nach unten. Durch diese Art der Luftführung verteilt sich das auskondensierte Wasser über die gesamte Höhe des Filters. Es entsteht keine Vernässungszone am Fuße des Filters. Die unterste Etage ist mit einer Stahllochplatte versehen (300 mm unter Behälterranda), um einen Stau des anfallenden Kondenswassers zu verhindern. Das Kondenswasser fließt über ein Ventil am Boden des Filters ab. Eine Blechabdeckung bildet die Verbindung zwischen Abluftrohrleitung und Biofilter. Die Abdichtung zwischen den Behältern erfolgt über Gummidichtungen und wird von zwei Spannbändern pro Biofilter unterstützt.

2.3.2 Umbau der Anlage zur Realisierung der Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion

2.3.2.1 Verfahrenstechnische Anforderungen

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 Boden- oder Dachnähe in das Gewächshaus erfolgen;
- dem Gesamtsystem kann an festgelegten Positionen über einen geschlossenen Wasserkreislauf Wärmeenergie zugeführt oder entnommen werden;
- die Überschußwärmern sind in einem Latentwärmespeicher speicherbar.

Die Umsetzung dieser Vorgaben zeigt das Anlagenschema im Anhang 1.

2.3.2.2 Luftseitige Betriebsweisen

Das Anlagenschema verdeutlicht, daß unterschiedliche Betriebsweisen möglich sind. Aus diesen Optionen können die an die jeweiligen lokalen und infrastrukturellen Bedingungen angepaßten Varianten ausgewählt werden. Die luftstromseitig allgemein sinnvollen Betriebsweisen sind in Tab. 3 aufgelistet und im Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3/2 ausführlicher dargestellt.

Tab. 3: Luftseitige Betriebsweisen der Anlage

Nr.	Variante
1	Unabhängiger Betrieb der Rotteboxen (Standardbetrieb); optional mit oder ohne CO ₂ -Anreicherung der Gewächshäuser; optional mit oder ohne Vorwärmung der Rottezuluft
2	Beschleunigung der Anfahraphase durch Belüftung mit warmer Luft; wahlweise mit Rotteabluft aus der gleichen oder aus einer weiteren Box, mit Gewächshausluft oder durch Vorwärmung über Latentwärmespeicher
3	Beladung der Latentwärmespeicher wahlweise mit Rotteabluft oder Gewächshausluft
4	Trockenblasen (am Ende der Intensivrotte) mit Gewächshausluft
5	Beheizung des Gewächshauses wahlweise über aufbereitete Kompostierungsabluft oder über Entladung der Latentwärmespeicher (indirekte Nutzung von Solar-, Rotteabluftwärme oder Gewächshauswärme)

2.3.3 Übersicht über die innovativen Bauteile und Aggregate

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. Für die MSR-Technik fanden neuartige Meßgeräte Einsatz, und für die Prozeßsteuerung wurden innovative Strategien erprobt. Die gartenbauliche Realisierung erfolgte in einem traditionellen Gewächshaus, jedoch unter Einsatz einer substratlosen Anbaumethode nach dem plant-

dem plant-plane-Verfahren. Bei der Umrüstung der Kompostierungsreaktoren wurden zudem die im Verlauf der Anlagenrealisierung erkannten Mängel durch Neuaufbau und Anpassung der speicherprogrammierbaren Steuerung, Austausch von Durchflußmeßsonden, Austausch bzw. Reparatur der Kühler, der Strömungswächter und der Drosselklappensteuerung abgestellt.

2.3.3.1 Latentwärmespeicher

Um die bei den energetisch 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 betrug insgesamt 100 kWh in vier Einheiten mit je 500 l Volumen.

2.3.3.2 Strahlwäscher

Die Kopplung von Kompostierung und Gewächshaus setzt voraus, daß die entstehenden Gase keine arbeitshygienisch und phytopathologisch relevanten Emissionen an Schadstoffen und Keimen in das Gewächshaus eintragen bzw. in den Gaskreislauf einschleusen. Des weiteren werden bei einem Rotteprozeß erhebliche Wärmemengen auf relativ niedrigem Temperaturniveau frei. Diese Wärmemengen in geeigneter Weise zu speichern, um sie dem Prozeß oder einem anderem Verbraucher zu einem späteren Zeitpunkt wieder verfügbar zu machen, stellt einen aus ökologischer und ökonomischer Sicht interessanten Gesichtspunkt dar. Zur Lösung beider Aufgaben ist beim Carboferm-Verfahren ein Strahlwaschsystem installiert, in dem eine intensive Gaswäsche mit einem Stoff- und Energieaustausch stattfindet. Die Aufgabe des installierten Strahlwäschers ist primär die Gaswäsche. Erst in zweiter Linie dient der Strahlwäscher der Wärmeauskopplung aus der Rotteluft (Winterbetrieb, Aufheizen der Wärmespeicher bzw. der Gewächshauszellen) und der Gewächshausluft (Sommerbetrieb, Kühlung der Gewächshauszellen). Zusätzlich kann Frischluft, die für den Anfahrvorgang in den Rotteboxen notwendig ist, durch den Strahlwäscher befeuchtet und so der Anfahrprozeß verkürzt werden.

Anstelle eines üblicherweise aus Metall ausgeführten Strahlwäschers wurde eine wartungsarme Leichtbauweise aus Kunststoff mit einem speziellen Düsensystem im Oberteil konzipiert. Über dieses Düsensystem wird die in den Strahlwäscher eintretende mit Wasserdampf gesättigte Rotteluft mit dem im Kreis gefahrenen kühlen Strahlwäscherwasser beaufschlagt (Kreuzstrom), wodurch sie abgekühlt und von einem Teil der enthaltenen Schadstoffe befreit wird. Das so konditionierte Abgas verläßt nach dem Passieren eines Tropfenabscheiders den Strahlwäscher. Um die der Rotteabluft entzogene Wärme anderen Verbrauchern zugänglich zu machen, ist in das System ein Wärmeübertrager integriert, über den die Wärme an einen vom

Strahlwäscherkreislauf hydraulisch getrennten Zwischenkreislauf abgegeben wird. Über diesen Kreislauf können z. B. die Wärmespeicher bedient werden.

2.3.3.3 Weitere Aggregate

Die Luftbeschickeranlage dient dazu, die Luftmengen entsprechend den Prozeßanforderungen zu verteilen. Sie ist mit einem Lüfter und einem Wärmetauscher ausgestattet, der eine Wärmeinspeisung 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.

Im Gesamtsystem sind Meßsonden zur Erfassung von Volumenströmen (Gas), Temperatur (Gase, Wasser), Feuchte (Gas und Rottmasse), CO₂-Konzentration (Prozeßgas, Gewächshausatmosphäre in Pflanzennähe), Druck und Niveau eingefügt. Für die Prozeßsteuerung wurde ein Industrie-PC mit einem Echtzeitsystem eingesetzt, das die quasi gleichzeitige Steuerung der verschiedenen Vorgänge in der Anlage erlaubt. 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 Konzentration von CO₂ in der Zuluft den Wert von 5.000 vpm erreicht. Damit wird ein Überschreiten des MAK-Wertes für CO₂ im Gewächshaus sicher vermieden.

2.3.4 Aufbau und Ausstattung des Gewächshauses

Das im Betrieb vorhandene Gewächshaus ist eine zweischiffige Anlage des Baukastensystems Thermogewächshaus (TG) der ehemaligen DDR. Es hat bei einer Systembreite von 24 m und einer Systemlänge von 48 m eine Grundfläche von 1180 m². 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 Zelle diente zum Vergleich. In dieser wurden außer der CO₂-Versorgung alle weiteren Parameter analog den Verhältnissen in der begasten Zelle eingestellt. In der zwischen den Zellen liegenden Pufferzone sind gartenbauliche Einrichtungen für das Plant-Plane-Hydroponik-Verfahren untergebracht.

Als Anbauverfahren wurde eine Variante des substratlosen Anbaus in folienbedeckten nährlösungsdurchströmten 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 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 bekannt gute Reaktion auf eine CO₂-Düngung, so daß sich hier entsprechende Effekte leichter nachweisen lassen [GEISLER, 1988].

2.4 Ergebnisse der Demonstrationsanlage

2.4.1 Kompostierung

Für die Kombination von Kompostierung und Gewächshausproduktion war der Nachweis erforderlich, daß die Kompostierung wie in üblichen Kompostierungsprozessen nach guter fachlicher Praxis durchgeführt wird. Die meisten Parameter werden durch die Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion nicht beeinflusst (vgl. Tab. 4.).

Tab. 4: Kennzeichnung verfahrenstypischer Einflußmöglichkeiten

Bioprozeßtechnischer Parameter	Einflußgröße	verfahrenstypisch
Glühverlust	Zusammensetzung des Bioabfalls	-
Feuchte	Wasserrückführung	(-)
Rottegrad	Zusammensetzung, Prozeßführung, Prozeßdauer	(+)
Temperatur	Zusammensetzung, Prozeßführung	(+)
Rotteschwund	Zusammensetzung, Prozeßdauer, Prozeßführung	(+)

Sowohl für das Ausgangsmaterial als auch während des Prozesses und im Endprodukt ergaben sich für die Feuchte Werte, wie sie für eine normale Kompostierung typisch sind. Eine Auswirkung der Prozeßkopplung war nicht nachzuweisen. Die Hyginisierungsbedingungen konnten in der Mehrzahl der Versuchsdurchläufe eingehalten werden. Die Werte für den Rotteschwund lagen im Bereich des üblichen.

Tab. 5: Massenverluste während der Intensivrotte

	Masse vor dem Rotteprozeß (t)	Masse nach dem Rotteprozeß (t)	Rottedauer (Tage)	Masseverlust (%)
R 1; 08.02.96	30,2	25,5	14	15,7
R 2; 08.02.96	29,5	25,4	14	14,9
R 2; 21.02.96	27,0	22,6	14	16,1

Aus Untersuchungen, wie sich ein Betriebsstillstand - gewollt oder ungewollt - auf den Rotteprozeß auswirkt ergab sich, daß sich zumindest kurzzeitige Prozeßunterbrechungen (hier 20 Stunden) nicht ungünstig auf den Kompostierungsprozeß auswirkten. Die Nachrottemieten

zeigten noch eine erhebliche Reaktivität, die erst nach etwa 100 Tagen abklang, Geruchsemissionen gingen von ihnen nicht aus.

2.4.2 Medien- und Energiemanagement

Mit dem Beginn der Bioabfallkompostierung gingen vom Sickerwasser deutlich unangenehme Geruchsemissionen aus. Farbe (bernsteinfarben bis schwarzbraun) und Eigenschaften (z.B. Neigung zur Schaumbildung) änderten sich des öfteren. Die Zusammensetzung des Sickerwassers (s. Tab. 6) wird überwiegend von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials bestimmt. Hinsichtlich der Metallbelastungen können auch Ablösungen von Metallteilen der Anlage eine Rolle spielen. Im Falle der Demonstrationsanlage sind die hohen Zinkgehalte auf solche Effekte zurückzuführen.

Tab. 6: Analysenwerte Sickerwasser (Auswahl)

Parameter	Einheit	Meßwert
AOX	mg / l	0,35
TC (Gesamt- C)	mg / l	27 600
TIC (anorg. C)	mg / l	590
TOC (org. C)	mg / l	27 010
Zink	mg / l	230
Leuchtbakterientest (G _L - Wert) *		512

Der Kondenswasseranfall betrug in der Regel zwischen 10 und 18 l/h. Die Kondensate waren meistens wasserklar, nur selten waren leichte Trübungen zu beobachten. Das Kondenswasser wurde entweder in die Rottereaktoren zurückgeführt oder zum Befeuchten der Nachrottemieten genutzt. Das Umlaufwasser wurde jeweils nach ca. 200 Stunden durch Frischwasser ersetzt. Das Umlaufwasser war bedingt durch feine Feststoffpartikel rostrot. Im Ruhezustand trat eine Klärung ein. Nach der chemischen Zusammensetzung handelt es sich um ein hochbelastetes Wasser, für das eine weitere Behandlung erforderlich ist. Die hohen Kupferwerte wurden durch die messingenen Verbindungselemente zwischen Vorlagegefäß und Wäscher hervorgerufen; sie sind nicht verfahrensspezifisch und durch entsprechende Werkstoffwahl vermeidbar.

Die Untersuchungen zu Speicherparaffinen führten zur Bereitstellung mehrerer Materialien für den Bereich von 40°C. Die Leistungsfähigkeit wurde in Labortests umfassend nachgewiesen. Im geregelten Speicher lag die mittlere Ausspeicherleistung bei etwa 9 kW, geregelt bei 12,5 kW.

Die Wirksamkeit für die Abscheidung von Schadstoffen im Strahlwäscher wurde nachgewiesen. Die Schadstoffe lagen in hoher Konzentration im Strahlwäscherwasser vor, das im Rhythmus der Befüllung der Rottereaktoren ausgetauscht werden sollte. Die im Strahlwäscher

bewirkte Auswaschung ist unterschiedlich groß, je nachdem, welche Eigenschaften die Gaskomponenten aufweisen. Aufgrund der starken Anreicherung des Strahlwäscherwassers mit Metallen und weiteren Komponenten, die in den hohen BSB₅- und CSB-Werten zum Ausdruck kommen (siehe Tab. 7), kann auf eine wirksame Gasreinigung des Strahlwäschers geschlossen werden. Das Verhältnis CSB/BSB₅ liegt mit ca. 1,8 nur wenig oberhalb der Werte für kommunales Abwasser (1,7) und ist in dieser Hinsicht mit normalem Abwasser vergleichbar. Einige der Analysenwerte (CSB, BSB₅, NH₄⁺, Cu, Ni, Zn) liegen jedoch über den gesetzlich festgelegten Grenzwerten. Das Abwasser aus dem Strahler muß in einer Abwasserreinigung aufbereitet werden. Da der Waschprozeß mit Wasser aus einem vorgegebenen Wasservolumen gespeist wird, reichert sich das Reservoir mit den Schadstoffkomponenten an. Um die Waschwirkung des Wäschers aufrecht zu erhalten, ist es erforderlich, das Strahlwäscher-system in regelmäßigen Zeitabständen zu reinigen und das Waschwasser zu wechseln.

Der Strahlwäscher erzielte mit seinem relativ kleinem $k \times A$ in allen hier untersuchten Betriebsfällen einen Wärmeauskopplungsgrad von ca. 21 %.

Tab. 7: Abwasserbelastungen des Umlaufwassers

Dauer h	Analysenparameter											
	pH	CSB mg/l	BSB ₅ mg/l	NH ₄ mg/l	AOX µg/l	Pb µg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Hg µg/l	Zn µg/l
0	7,18	17,4	6	0,115	<10	0,3	0,13	30	17	30	<0,5	856
18	7,77	1170	600	121	<10	1,9	0,07	30	312	58	<0,5	4435
41	5,2	1480	950	127	<10	0,7	0,11	30	297	30	<0,5	497
63,5	7,2	6360	3650	118	<10	24	0,22	30	180 0	784	0,7	3020
87,5	4,7	4510	2900	106	<10	18,7	0,64	30	258 0	187	<0,5	4330
157,5	4,51	2760	1850	69,5	<10	17,2	1,53	43	831 0	485	<0,5	10900
184,2	4,61	2230	1250	79	<10	16,1	1,64	31	257 0	657	<0,5	15400
Grenzwerte nach der Indirekteinleitungsverordnung												
		20	200	50	500	500	100	500	500	500	50	2000

Legende: Kursiv gesetzte Werte liegen über den Grenzwerten

2.4.3 Hygiene

Die zur Geruchsentfrachtung eingesetzten Biofilter arbeiteten am wirksamsten mit einem Rindenkompost der Fraktion 10-20 mm sowie mit einem Koks/Kompost-Gemisch im Verhältnis 1:1. Die ermittelten Werte für die Geruchsbelastung lagen im Bereich von 100-150 GE/m³. Eine Beeinträchtigung der Arbeit im Gewächshaus war dadurch nicht zu verzeichnen.

Im Hinblick auf die Hygiene wurden Fragestellungen gemäß Tab. 8 geprüft.

Tab. 8: Untersuchungsgebiete der Keimbelastungen

Untersuchung	Relevanz für Humanpathologie	Relevanz für Phyto-pathologie
Keimbelastungen in den Rotteboxen über dem Rottegut	Arbeitsschutz beim Befüllen und Entleeren	
Keimbelastungen beim Vorbereiten und Nachbehandeln des Rottematerials (Mischen, Ansetzen von Nachrottemieten etc.)	Arbeitsschutz Kompostwerker, Emissionen humanpathogener Keime in die Abluft	Emissionen phytopathogener Keime in die Außenluft
Keimbelastungen im Luftstrom nach Passieren des Biofilters	Arbeitsschutz der Kompostwerker, Emissionen humanpathogener Keime in die Abluft	Emissionen phytopathogener Keime in die Außenluft
Keimbelastungen im Versuchsgewächshaus nach Einleitung des Abluftstromes	Arbeitsschutz der Gärtner	Direkte Wirkungen von Phytopathogenen auf den Pflanzenbestand

Die gemessenen Werte liegen im Bereich von 8.500 bis 17.000 bei den Gesamtkeimen, bei den Hefe und Schimmelpilzen im Bereich von 5.000 bis 10.000.

Bei den für das Carboferm-Verfahren relevanten Prüfungen bezüglich des Eintrages phytopathogener Keime in die Versuchsgewächshausanlage konnten in keinem Falle positive Befunde ermittelt werden, obgleich bei der Prüfung verschiedener Ausgangsmaterialien wirtschaftlich bedeutsame Phytopathogene wie Fusarium-Arten (Rostpilze an Nelken, Chrysanthemen und Porree), Echte und Falsche Mehlaupilze (an Blumenkohl), verschiedene Blattfleckerreger (Septoria-Arten, Phyllosticta violae, Ramularia an Primeln und Phytophthora-Arten) gefunden wurden. Als Schlußfolgerung aus den durchgeführten Untersuchungen ergibt sich, daß sich bei der Kopplung der Kompostierung mit dem Gewächshaus kein größeres Krankheitsrisiko gegenüber anderen Anbauverfahren ergeben sollte. Wegen des zudosierten CO₂ sind eher noch positive Effekte wahrscheinlich, da die bessere Konditionierung der Pflanzen in der Regel eine höhere Abwehrkraft zur Folge hat.

Arbeitsschutz

Abb. 1 zeigt den Gang der CO₂-Konzentration für einen Versuchszeitraum. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration von 5.000 vpm für CO₂ wurde stets eingehalten.

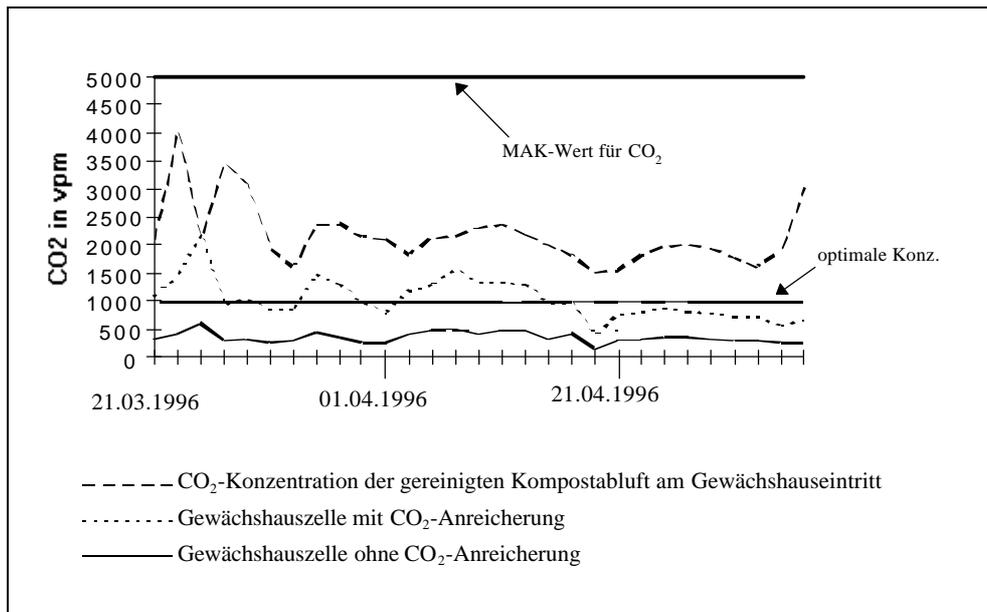


Abb. 1: Tagesmittel der Kohlendioxidgehalte in begaster und unbegaster Zelle

2.4.4 Ergebnisse zur CO₂-Bereitstellung für die Gewächshausversorgung

Die mittlere CO₂-Konzentration der Eintrittsgase lag überwiegend im Bereich von 0,3 bis 0,5 Vol.-%. Eine arbeitshygienisch unzulässige Überschreitung des MAK-Wertes ist praktisch nicht vorgekommen. Die unter den vorliegenden Versuchsverhältnissen in das Gewächshaus eingetragene CO₂ Menge betrug etwa 3 kg/h. Die CO₂-Konzentrationen im Gewächshaus lagen unterhalb des pflanzenphysiologisch optimalen Werts. Die Ursache dürfte in einer mit der CO₂-Düngung nicht optimal abgestimmten Klappensteuerung und dem daraus resultierenden erhöhten Luftwechsel des Gewächs liegen. Im Hinblick auf die schwankenden Konzentrationen in Abb. 1 ist anzumerken, daß es in der Literatur Berichte gibt, die ein stark schwankendes CO₂-Angebot positiv bewerten, weil es einer Gewöhnung der Pflanzen entgegenwirkt [ITG WEIHENSTEPHAN: 1988, S.20].

2.4.5 Gartenbauliche Ergebnisse

Eine Zusammenstellung von Anbauversuchen mit Salat zeigt Tab. 9. Die Anbauzyklen 1 und 1a weisen zunächst die Unterschiede in den Anbauflächen aus, die aus unterschiedlichen Standortbedingungen resultieren. Zu erkennen ist ein Minderertrag von etwa einem Drittel auf der zur CO₂-Versorgung vorgesehenen Fläche. Die als Anbau-Nr. 2-5 dargestellten Versuche zeigen ohne Korrektur um diesen Malus einen mittleren Mehrertrag der begasten Kulturen von etwa 33 %. Wird der Malus berücksichtigt, ergibt sich ein durchschnittlicher Mehrertrag von ca. 40%. Das liegt im oberen Bereich von Ergebnissen, die in der Literatur beschrieben sind.

Tab. 9: Gartenbauliche Ergebnisse der Begasung mit CO₂-haltiger Kompostierungsabluft

Anbaunr.	Kulturzeitraum	Kopfsalatmasse in den Gewächshauszellen (in g FM/Kopf)			
		Zelle 1	Zelle 2	Differenz	Grenzdifferenz (p<0,05)
Anbau, beide Zellen ohne CO ₂ -Anreicherung					
1	16.09.94-14.11.94	246,0	266,8	-20,8	11,5
1a	20.02.95-25.04.95	233,8	277,7	-43,9	22,1
Mittelwerte:		239,9	272,3	-32,4	16,8
Anbau, Zelle 1 mit CO ₂ -Anreicherung					
2	19.06.95-19.07.95	270,3	132,0	138,3	16,0
3	16.08.95-25.09.95	391,2	349,4	41,8	10,3
4	02.10.95-14.11.95	198,5	194,8	3,7	9,0
5	24.02.96-24.04.96	218,9	186,7	32,2	15,3
Mittelwerte		269,7	215,7	54,0	12,6
Geschätzte Abluftwirkung			231,9	86,4 g FM/Kopf	
Anbaunr.	Kulturzeitraum	Variabilität der Einzelkopfmassen im Salatbestand (in %)			
		Zelle 1	Zelle 2	Differenz	Grenzdifferenz (p<0,05)
Anbau, beide Zellen ohne CO ₂ -Anreicherung					
1	16.09.94-14.11.94	27,01	27,15	-0,14	2,39
1a	20.02.95-25.04.95	29,94	26,22	3,72	3,59
Mittelwerte		28,48	26,69	1,79	2,99
Anbau, Zelle 1 mit CO ₂ -Anreicherung					
2	19.06.95-19.07.95	20,24	25,37	-5,13	3,27
3	16.08.95-25.09.95	14,82	16,59	-1,77	3,64
4	02.10.95-14.11.95	21,13	19,11	2,02	4,42
5	24.02.96-24.04.96	40,41	38,25	2,16	4,46
Mittelwerte		24,15	24,83	-0,68	3,95
Geschätzte Abluftwirkung			25,36	-2,47 s%	

Legende zum Newman-Keuls-Test: Fettdruck = Differenz statistisch gesichert (p<0,05)

2.5 Kostenstrukturen und Flächenbelegung der Boxenkompostierung

Bei der praktischen Umsetzung der Verfahrensentwicklung ist die Auslegung auf eine bedarfsgerechte CO₂-Versorgung der wahrscheinlichste Fall. Für eine Abschätzung der Realisierungsmöglichkeit, z. B. durch einen Gartenbaubetrieb, ist daher der voraussichtliche Investitions- und Flächenbedarf der Kompostierungsanlage von Bedeutung. Hiefür wurde ein Kostenmodell [KERN 1990] die hier vorliegenden Rahmenbedingungen angepaßt und Flächenbe-

darf, Investitions- und Betriebskosten für eine Anlage von 4 Rotteboxen, mit einem Jahresdurchsatz von 2.000 Mg und einer überdachten Nachrotte und berechnet. Mit einer solchen Anlage wäre die bedarfsgerechte Düngung von bis zu 10.000 m² Gewächshausfläche möglich. Die Verfahrensrealisierung in dieser Größenordnung bildet die Grundlage für die folgende Systembewertung.

Flächenbedarf

Der Flächenbedarf hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die Berechnung der Flächen beruhte u. a. auf folgenden Annahmen:

Für den Eingangsbereich wird ein Flächenbedarf von 600 m² angenommen. Für die Reaktorgrundfläche werden 35 m², für den Anlieferungsbereich 35 m² und für den Arbeitsbereich 65 m² veranschlagt. Für die Zwischenlagerfläche für Grünabfälle wird von einer Dichte von 0,1 t/m³ der ungeschredderten bzw. 0,5 t/m³ der geschredderten Abfälle ausgegangen, sowie von einer durchschnittlichen Lagerhöhe von 3 m, einer maximalen Lagerzeit von 2 Monaten, einer durchschnittlichen 20% igen Beimengung von Grünabfällen und einer wöchentlichen Lieferung. Für den Flächenbedarf des Nachrotte-/Lagerbereiches gelten folgende Festlegungen:

- mittlerer Massenverlust von 30%,
- Schüttgewicht von 0,7 t/m³,
- maximale Nachrotte/Lagerzeit von 4 Monaten,
- die Fläche wird zu zwei Drittel für die Nachrotte und zu einem Drittel für den Lager/Fertigproduktbereich genutzt.

Für die Verkehrsflächen und sonstigen Flächen wird 50% der übrigen Funktionsflächen angesetzt. Der Flächenbedarf von knapp 3.000 m² entspricht etwa einem Drittel der zu begasenden Gewächshausflächen.

² Für die ausführliche Darstellung der Ableitung der Kostengrößen s. [ebd.].

Tab. 10: Flächenbedarf der Boxenkompostierung

Funktion	Größe in m ²
Eingangsbereich (bis 3500 t/a)	600
Grundfläche der Reaktorhalle incl. Anlieferungs- und Arbeitsbereich (bis 3500 t/a) in m ² /Reaktor	135
Summe Fläche Reaktorhalle	540
Fläche ungeschredderte Grünabfälle	33
Fläche geschredderte Grünabfälle	56
Summe Zwischenlagerfläche Grünabfälle	89
Fläche Nachrotte	199
Fläche Fertigprodukte	100
Summe Nachrotte/Lagerfläche	299
Verkehrsfläche in % der übrigen Funktionsflächen (%)	50
Summe Verkehrsfläche	764
Grünfläche:	
Breite des Grünstreifens (m)	3
Summe der Grünfläche (m ²)	574
Gesamtfläche	2.866

Investitionsbedarf

Den Investitionskosten liegen u. a. folgende Annahmen zugrunde (s. [KERN 1990, S. 57 ff.]:

- Umhausung der Reaktorhalle: 130 000 DM pro Reaktor (bei 4 Reaktoren)
- Untergrundbefestigung: 125 DM/m²
- Infrastruktur der Anlage (Kosten für den Anschluß von Frischwasser, Abwasser, und für die Stromverteilung in der Anlage): 22 DM/m²
- Überdachung der Nachrottefläche/Lagerfläche: 140 DM/m²
- Büro/Sozialraum (Betriebscontainer mit Büro, Aufenthaltsbereich, Sanitärbereich, Raum für Kleingeräte): 60 000 DM (pauschal)
- Einzäunung incl. Toreinfahrt: 65 DM/m
- Begrünung: 6 DM/m²
- Honorare und Gebühren gemäß der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, Honorarzone III, 1988

Bei einer Realisierung der Verfahrensentwicklung in der Größenordnung von 2.000 Jahrestonnen muß mit Investitionskosten von ca. 3 Mio DM gerechnet werden (vgl. Tab. 11).

Tab. 11: Investitionskosten

Kostenstelle	Betrag in DM
Grunderwerb (in m ²)	42.993
Bautechnische Anlagengruppen	
Reaktor	1.000.000
Umhausung Reaktorhalle	520.000
Untergrundbefestigung	214.470
Infrastruktur der Anlage	50.419
Überdachung der Nachrotte	41.854
Büro-/Sozialraum	60.000
Waage	70.000
Einzäunung incl. Toreinfahrt	12.447
Begrünung	3.447
Zwischensumme Bautechnische Anlagengruppen	1.972.636
Maschinentechnische Anlagengruppen	
Radlader	150000
Vor/Nachzerkleinerungsanlage	150000
Siebanlage	100000
Förderband	30000
Reinigung/Kehrmaschine	20000
Zwischensumme Maschinentechnische Anlagen	450000
Elektrotechnische Anlagengruppen	
Trafostation mit Hoch- und Niederspannungsschaltteil...	55000
EDV-Steuerungsanlage	54000
Zwischensumme Elektrotechn. Anlagen	109000
Sonstige Investitionen	
Honorare und Gebühren	140000
Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen	20000
Zwischensumme Sonstige Investitionen	160000
Gesamtinvestitionen	
Gesamtinvestitionen (incl. Grunderwerb)	2.734.630
Gesamtinvestitionen (ohne Grunderwerb)	2.691.636
Spezifische Kenngrößen (incl. Grunderwerb)	
Investitionen/t Input	1.367
Investitionen / m ²	954

Tab. 12 zeigt die resultierenden Betriebskosten für unterschiedliche Zinssätze und Abschreibungszeiträume. Die Erlöse beziehen sich auf den Verkauf des produzierten Kompostes³.

³ Ausführlicher zu der Berechnung der Betriebskosten s. [KERN 1990, S. 68 ff.]

Tab. 12: Betriebskosten

Zinssatz (%)	8	8	9,5	9,5
Abschreibung für die Gesamtkosten der Reaktorhalle (Jahre)	20	12	20	12
Gesamtkosten ohne Erlöse	524.660	571541	555722	600883
Gesamtkosten mit Erlöse	494.660	541541	525722	570883
Spezifische Gesamtkosten (DM/t Input)				
ohne Erlöse	262	285	277	300
mit Erlösen	247	270	262	285

2.6 Übersicht Kompostierungsverfahren.

Neben der Boxenkompostierung, wie sie in der Demonstrationsanlage Verwendung findet, haben sich am Markt noch weitere Kompostierungsverfahren etabliert. Der wesentliche Unterschied der Verfahren liegt in den Intensivrottesystemen. Im nachgeschalteten Haupt- bzw. Nachrottebereich und in der vorgeschalteten Materialaufbereitung (Störstoffauslese, Absiebung, Zerkleinerung, Mischen, Homogenisierung, Magnetabscheidung) unterscheiden sie sich kaum.

Zielvorgaben der Kompostierungsverfahren sind in unterschiedlicher Ausprägung

- die Erzeugung eines hochwertigen Kompostes,
- die optimale Betriebssicherheit,
- die Minimierung von Emissionen,
- die Minimierung des Flächenbedarfs,
- und die Minimierung der spezifischen Kosten.

Die Kompostierungsverfahren können nach der Belüftungs- bzw. Umsetztechnik, der Intensivrottedauer und dem eingesetzten Rottesystem unterschieden werden. Technologisch lassen sich die Verfahren in fünf Kategorien einordnen:

- Trommelkompostierung
- Boxen-/Containerkompostierung⁴
- Mietenkompostierung (Dreiecks- oder Tafelmieten)
 - a) offene bzw. überdachte Anlagen
 - b) gekapselte Anlagen
- Zeilen-/Tunnelkompostierung

⁴ Auf die Boxenkompostierung wird hier nicht weiter eingegangen, da sie bereits im Abschlußbericht zum Teilvorhaben TV3/2 [KOLLER 1997] ausführlich erörtert wird.

- Brikollarekompostierung

Trommelkompostierung

Durch die drehende Bewegung in der Trommel kommt es zu einer guten Durchmischung und Zerkleinerung des Rottegutes bei gleichzeitig kontinuierlicher Belüftung. Die Dauer der Vorbehandlung in der Trommel beträgt 1 - 7 Tage, im Anschluß erfolgt die Hauptrotte in Form der Mietenkompostierung (mit der eigentlichen Hygenisierung).

Mietenkompostierung

Die offene Mietenkompostierung stellt die Urform der Kompostierung als aufgeschüttetes Haufwerk dar. Es ist ein bestimmtes Mindestvolumen erforderlich, um die Auskühlung der Mieten bei zu großer Mietenoberfläche in Relation zum Volumen möglichst gering zu halten. Bei unbelüfteten Systemen erfolgt der Sauerstoffeintrag allein durch Diffusion, Konvektion oder durch manuelles Umsetzen der Mieten. Die Produktion hochwertiger Komposte erfordert eine Zwangsbelüftung bzw. regelmäßiges Umsetzen. Für Umsetzvorgänge in der Nachrotte kommen meist Radlader zum Einsatz. Der Rotteprozeß ist je nach Umsetzhäufigkeit innerhalb von 3 bis 6 Monaten abgeschlossen. Die gekapselte Mietenkompostierung bewirkt bei größeren Inputs eine Reduzierung der Rotteflächen und Geruchsminimierung. Durch Zwangsbelüftung (Druck- und Saugbelüftung) und Umsetzaggregate werden Rottegrade von III bis IV bereits nach 45 bis 90 Tagen erreicht.

Zeilen- /Tunnelkompostierung

Bei der Zeilenkompostierung wird das Rottegut in verschiedenen befestigten, nach oben offenen Rottezeilen abgelegt, die durch feste Zwischenwände voneinander getrennt sind. Es erfolgt eine separate Belüftung der Zeilen, die Umsetzung erfolgt durch spezielle Umsetzgeräte. Die Tunnelkompostierung verschließt die nach oben offenen Zeilen zu einem Tunnel, um das Abluftvolumen gering zu halten. Die Umsetz- und Belüftungstechnik unterscheidet sich nicht von der Zeilenkompostierung. Der Kompostierungsprozeß benötigt je nach Rottegrad vier bis 12 Wochen.

Brikollare-Kompostierung

Bei der Brikollare-Kompostierung wird der zerkleinerte Kompostrohstoff zu Formlingen gepreßt und auf Paletten in eine Rottehalle gebracht. Durch die Kapillarwirkung erfolgt eine Förderung des Wassers von innen nach außen. Es setzt eine starke Verpilzung und Erwärmung (bis 70 Grad) und ein simultaner Abbau und Trocknung ein. Nach 3 bis 6 Wochen entsteht ein trockenstabiles, waserabweisendes Produkt mit ca. 20 % Restfeuchte,

Allgemein geht der Trend von kleinen Anlagen (bis 5000 t/a) mit offener Mietenkompostierung zu größeren Anlagen bis 25 000 t/a. Im Hinblick auf einen möglichen Einsatz für die Gewächshausdüngung erscheint neben der Boxen-/Containerkompostierung die Tunnelkompostierung (z.B. DBA-Intensivrotteverfahren), vor allem wenn größere Flächen versorgt werden sollen, geeignet zu

sein. Sie böte gegenüber der Boxenkompostierung insbesondere den Vorteil einer kontinuierlichen CO₂- und Wärmeproduktion.

3 Gartenbauliche Grundlagen der CO₂-Anreicherung

Die CO₂-Düngung von Gewächshauskulturen im Unterglasgemüsebau und -zierpflanzenbau ist eine etablierte Methode zur Produktions- und Ertragssteigerung im Gartenbau und in Bezug auf ihre Wirkung auf das Pflanzenwachstum intensiv untersucht worden. Schon um die Jahrhundertwende wurden durch die CO₂-Anreicherung in Gewächshäusern Produktionserhöhungen erzielt. Heute gehört die Anreicherung der CO₂-Konzentration zur gängigen Praxis im Unterglasgartenbau.

CO₂ ist ein farb- und geruchslos Gas, das als Schutz- und Treibgas, Kühl- und Kältemedium sowie Lösch- und Düngemittel zum Einsatz kommt (vgl. Tab. 13). Die Verwendung von CO₂ in der Lebensmittelindustrie ist deklarationsfrei und auch in der Medizin findet CO₂, z. B. in durchblutungsfördernden Bädern Anwendung.

Tab. 13: Eigenschaften von CO₂

Chemische Formel	CO ₂ (Atombindung C=O=C)
Molare Masse	M _{CO₂} = 44,011 kg/kmol
Molare Normvolumen	V _{m,n} = 22,263 m ³ /kmol
Spezifische (individuelle) Gaskonstante	R _{CO₂} = 0,1889 Jk/(kg*K)
Normdichte	ρ _n = 1,977 kg/m ³
Dichteverhältnis CO ₂ /Luft im Normzustand	1,529
Kritische Temperatur	31°C
Kritischer Druck	73,83 bar
Kritische Dichte	466 kg/m ³
Tripelpunkt	- 56,6°C bei 5,18 bar
Zersetzungstemperatur	ab ca 1200°C
Farbe im Gaszustand	farblos
Brandverhalten	nicht brennbar, Verwendung als Feuerlöschmittel
Reaktion unter normalen Bedingungen	Stabile Verbindung, wird bei normalen Umgebungstemperaturen als Inertgas eingesetzt
Verbindung mit Wasser	CO ₂ + H ₂ O <=> H ₂ CO ₃ vom gelösten CO ₂ Gas in Wasser liegen nur ca. 0,1 % als Säure H ₂ CO ₃ vor, der pH-Wert wässriger CO ₂ -Lösungen bei Normdruck beträgt 3,7
Geruch	Geruchslos
Geschmack	nicht giftig, Lebensmittelrechtlich zugelassen und deklarationsfrei
MAK-Wert	5000 ppm (0,5 Vol. %)
Medizinische Anwendungen	Inhalationen von 3 bis 5 % CO ₂ , durchblutungsfördernde Bäder...
Trockeneis	bei 0,981 bar und -78,9°C
Sublimationswärme	r _s = 573,02 kJ/kg
Kälteleistung	≈ 645 kJ/kg (bei Erwärmung von -78,9°C auf 0°C)

Quelle: [FACHVERBAND KOHLENSÄURE 1992]

3.1 Nutzen der CO₂-Düngung

Die CO₂-Düngung erfolgt sowohl aus gartenbaulichen als auch wirtschaftlichen Gründen. Ökonomisch führte der zunehmende Preisdruck zur Suche nach Möglichkeiten der Ertragssteigerung. Von 1970 bis 1983 wuchsen die Aufwendungen im Gartenbau stärker als die Preise für die Produkte; dem daraus zunehmenden Importdruck konnte nur durch ein günstigeres Verhältnis von Ertrag und Aufwand begegnet werden. Da Maßnahmen zur Kostensenkung (z. B. Energiesparmaßnahmen) weitgehend ausgereizt sind, wird nun stärker auf Maßnahmen zur Ertragssteigerung, z. B. durch CO₂-Düngung, abgezielt [SCHWIEBERT 1985]. Durch die CO₂-Düngung lassen sich Wachstumsteigerungen von 20% bis 30% erzielen. Dabei müssen Pflanzenart, Bodenbeschaffenheit, Düngung, Pflanzungszeit, Bodenfeuchtigkeit, Luftfeuchtigkeit, Bodentemperatur, Gewächshaustemperatur, Gewächshauslage, Lichtintensität, Brenneranordnung, Brennerauswahl und die Überwachung der technischen Einrichtungen und der CO₂-Konzentration im Gewächshaus sinnvoll aufeinander abgestimmt sein [SHELL]. Den Ertragssteigerungen müssen die zusätzlichen Aufwendungen gegenübergestellt werden. Unter einer Mindestgröße von 200 m² ist die CO₂-Düngung unrentabel [SHELL]. Vielfach werden in den Betrieben aber sogar bereits vorhandene Anlagen zur Anreicherung mit technischem CO₂ und zur CO₂-Anreicherung aus zentralen Heizanlagen nicht mehr genutzt, vermutlich weil die Betreiber vom Nutzen nicht überzeugt sind und die Überprüfung der pflanzenbaulichen Wirksamkeit nur bei sorgfältigen Vergleichen möglich ist [LECKER 1995].

Gartenbaulich empfiehlt sich die CO₂-Düngung aus dem Minimum-Gesetz von Justus-Liebig nach dem das Wachstum der Pflanzen und damit das Ertrags- und Qualitätsniveau von dem Faktor bestimmt wird, der gemessen am tatsächlichen Bedarf in geringster Menge der Pflanze zur Verfügung steht [SCHWIEBERT 1985]. Da bereits der CO₂-Gehalt der Außenluft mit ca 340 ppm weit unter dem für Pflanzen optimalen Bereich von 600 bis 1200 ppm liegt (s. Tab. 14) und die CO₂-Konzentration im Gewächshaus deutlich unter die Werte für die Umgebungsluft fallen kann, stellt die CO₂-Konzentration häufig einen solchen, wachstumsbegrenzenden Faktor dar.

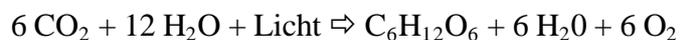
Tab. 14: Empfohlene CO₂-Konzentrationen im Pflanzenbau⁵

pflanzenbaulich anzustrebende CO ₂ -Konzentration in der Gewächshausluft im Zierpflanzenbau	
allgemein	< 1500 vpm
Topfpflanzen	600-900 vpm
Beetpflanzen	600-800 vpm
Edelnelke (Jungpflanzen)	300-1000 vpm
Rosen	750-1000 vpm
Chrysanthemen	700-1000 vpm
Sommerblumen	500-800 vpm
Hortensien	800 vpm
pflanzenbaulich anzustrebende CO ₂ -Konzentration in der Gewächshausluft im Gemüsebau	
ökologisches Optimum	1000 vpm
Gurke	1000-2000 vpm
Tomate	1000-2000 vpm
Salat	etwa 1000 vpm
Kohlrabi	bis 1000 vpm
Paprika	bis 1000 vpm

Der Mangel an CO₂ im Gewächshaus wird durch folgende Faktoren begünstigt:

- Betonierung von GH-Flächen
- Umstellung auf synthetische Substrate (z. B. Steinwolle, Blähton in der Hydrokultur)
- biologisch inaktive Substrate
- verringerter Luftwechsel infolge von Wärmedämmung

Aus den Anteilen der Elemente (ca. 44% Kohlenstoff, 44 % Sauerstoff, 6% Wasserstoff und 6% Mineralstoffen), die die Trockensubstanz aufbauen, wird der Bedarf an Kohlenstoff deutlich. Während die Pflanze die Mineralstoffe aus dem Boden und den Düngemitteln entnimmt, bezieht sie die Baustoffe C, O und H aus dem CO₂ der Luft und aus dem Wasser. Bei der Photosynthese erfolgt die Bildung von Glukose aus Kohlendioxid und Wasser gemäß der Bruttoformel:



Aus der Glukose kann die Pflanze alle weiteren organischen Stoffe (Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette, Vitamine und Enzyme) synthetisieren. Die von der Pflanze mittels der Photosynthese produzierten energiereichen organischen Stoffe dienen nicht nur der Bildung körpereigener Substanz, sondern dienen auch als Energieträger. Für die Vermehrung von körpereigener Substanz stehen daher nur die Stoffe zur Verfügung, die nicht veratmet werden.

⁵ Werte nach einer Literaturzusammenstellung in BIOPLAN 1996, für ausführlichere Zusammenstellungen s. [AGEFKO], [SCHWIEBERT 1985]

Die Lichtintensität, bei der die Assimilation gleich der Dissimilation ist, wird als Lichtkompensationspunkt bezeichnet. Durch die Erhöhung der CO₂ Konzentration wird der Lichtkompensationspunkt zu niedrigeren Intensitäten verschoben, d. h. es läßt sich schon bei niedrigeren Lichtintensitäten ein Substanzgewinn erzielen. Schwiebert berichtet beispielsweise von einer Verschiebung des Kompensationspunktes bei Tomaten von 3000 lux zu 600 lux bei Anhebung der CO₂ Werte von 350 ppm auf 2100 ppm [SCHWIEBERT 1985]. Die CO₂-Düngung empfiehlt sich daher besonders in lichtarmer Zeit (Winterzeit, früh morgens).

Wie alle chemischen und biochemischen Prozesse sind auch die Assimilation und Dissimilation temperaturabhängig. Nach der Van T'Hoff'schen Regel verlaufen bei einer Temperaturerhöhung um 10°C chemische Prozesse etwa 2-3 mal so schnell, d.h. sowohl die Photosynthese als auch die Atmung verlaufen bei höheren Temperaturen schneller, die Photosynthese weist jedoch steilere Zuwachsraten als die Atmung auf [SCHWIEBERT 1985]. Daraus folgt,

- daß insbesondere bei höheren Temperaturen die CO₂-Konzentration zum wachstumsbegrenzenden Faktor werden kann, und
- daß eine zusätzliche CO₂ Düngung nur dann wirksam ist, wenn eine angemessene Temperatur gefahren wird.

Auch das Wasserangebot hat einen bedeutenden Einfluß auf die Assimilationsleistung und auf die Aufnahmefähigkeit von CO₂. Bei einem Wasserdefizit verlieren die Schließzellen der Pflanzen ihren Turgordruck, werden schlaff und verschließen die Spaltöffnungen. Damit wird zwar ein weiterer Wasserverlust durch Transpiration unterbunden, zugleich aber auch die CO₂-Aufnahme blockiert. Zahlenangaben zur Abhängigkeit der Assimilationsleistung in bezug auf das Wasserangebot finden sich bei Schwiebert [1985].

3.2 CO₂-Bedarf

Zu dem CO₂-Bedarf für die Gewächshausdüngung finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben, wohl eine Folge der unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Eine Berechnung des Jahresbedarfs (kg CO₂ pro m² Anbaufläche) setzt Festlegungen zu

- Art des Anbauprodukt
- Angestrebte Sollkonzentration (CO₂-Düngung zur Erhaltung der natürlichen CO₂-Konzentration oder zur Anreicherung auf eine höhere Konzentration?)
- Dichtigkeit des Gewächshauses
- Klimaregime des Gewächshauses
- CO₂-Anreicherungssystem
- Wartungszeiten
- Bewirtschaftungsweise (i. e. ganzjährig oder mit Winterpause)

voraus.

Neben der theoretischen Berechnung [z. B. bei SCHWIEBERT 1985] werden auch Angaben zum CO₂-Bedarf aus praktischen Erfahrungen abgeleitet (s. Tab. 15). Daraus ergeben sich Bedarfswerte im Bereich von 3 - 30 kg/(m² • a) bzw. 30 - 300 Mg/(ha • a) bei ca 300 Düngungstage mit 10 Stunden täglicher Begasungszeit. Eine überschlägige Kalkulation des CO₂-Bedarfs über die CO₂-Aufnahme der Pflanzen liefert Werte in einem ähnlichen Bereich.

Tab. 15: CO₂-Bedarf für die CO₂-Anreicherung

Quelle	Angabe
WINDHORST 1984	5,5 m ³ CO ₂ pro 1000 m ² Gewächshausfläche und Stunde
DOMKE 1984	0,5 kg Propan/Stunde für 500 m ² Kulturfläche
GRELLE 1984	2 kg pro 1000 m ² und Stunde Düngzeit
SCHWIEBERT 1985	Pflanzenaufnahme von CO ₂ : 0,55 l/(m ² h) bei einer Lichtintensität von 30 W/m ² und einer CO ₂ -Konzentration von 960 vpm, 1,41 l/(m ² h) bei einer Lichtintensität von 180 W/m ² und einer CO ₂ -Konzentration von 960 vpm ⇒ mittlerer CO ₂ -Bedarf von 750 l CO ₂ /(h 1.000 m ²)
CARBO	1,9 bis 2,3 kg/(1.000 m ² h) bei einer Anreicherung auf 800 bis 1.000 vpm; 1 kg/(1.000 m ² h) bei einer Anreicherung auf 600 vpm und dichtem Gewächshaus, 10 kg CO ₂ /(1.000 m ² Tag) im Jahresdurchschnitt bei Winter- und Sommerdüngung 2.200 - 2.500 kg CO ₂ /(1.000 m ² Jahr) Gesamtverbrauch im Jahr bei 220 - 250 Düngetage
PAPENHAGEN	6 kg CO ₂ /(m ² Jahr) Gesamtverbrauch bei etwa 3.000 Düngestunden (davon 2-3 kg Pflanzenaufnahme)
LINDE 1995	2-2,5 kg CO ₂ /(1000 m ² h)

Nach Schwiebert⁶ [1985] kann man in Abhängigkeit von der Lichtintensität und von der CO₂-Konzentration im Gewächshaus von folgenden Aufnahmeraten ausgehen (Tab. 16):

Tab. 16: Aufnahme von CO₂ im Gewächshaus
in l/(m² • h) im Gewächshaus

Lichtintensität in W/m ²	CO ₂ -Konzentration im Gewächshaus	
	200 vpm	960 vpm
30	0,33	0,55
180	0,5	1,41

Daraus läßt sich ein durchschnittlicher jährlicher CO₂-Bedarfs berechnen (Tab. 17):

⁶ auf der Basis von HEY (1982)

Tab. 17: Pflanzenaufnahme und CO₂-Bedarf

Pflanzenaufnahme in g/(m ² * h)	Düngungstage	CO ₂ -Bedarf in Mg/(ha * a)	CO ₂ -Bedarf in kg/(m ² * a)
0,5	250	10	1
1	250	20	2
1,5	250	30	3
2	250	40	4
2,5	250	50	5
3	250	60	6
0,5	300	12	1,2
1	300	24	2,4
1,5	300	36	3,6
2	300	48	4,8
2,5	300	60	6
3	300	72	7,2
0,5	350	14	1,4
1	350	28	2,8
1,5	350	42	4,2
2	350	56	5,6
2,5	350	70	7
3	350	84	8,4

3.3 Unterglasanbau und Stand der CO₂-Düngung im Gartenbau

Eine Recherche bei den Landesverbänden der Gartenbau e. V. sowie bei den Landwirtschaftskammern der Länder ergab, daß nur wenig Informationen zu Umfang, Qualität und technischer Realisierung der CO₂-Düngung im Unterglasanbau verfügbar sind. Nach Auskunft der Landwirtschaftskammer Rheinland werden zu 80% CO₂-Kanonen eingesetzt, ansonsten Abgasen aus zentralen Heizanlagen, nur wenige Betriebe düngen mit technischem CO₂. Nach Schätzung der Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe liegt der Anteil der CO₂-Düngung mit Verbrennungsabgasen bei 90%. Insgesamt scheint die Tendenz bei der Anwendung eher rückläufig zu sein. Nach Auskunft des brandenburgischen Landesverband Gartenbau setzten in Brandenburg nur 2-3 Unternehmen die CO₂-Anreicherung im Gartenbau ein. Dies sei auf die schlechte Wirtschaftslage zurückzuführen. In Berlin findet überhaupt keine CO₂-Anreicherung statt, so die Senatverwaltung für Wirtschaft und Technologie, Gartenbauberatung.

Umfangreiches Zahlenmaterial über die struktur land- und forstwirtschaftlicher Betriebe liefern die etwa alle 10 Jahre durchgeführten statistischen Erhebungen. Demnach betrug in der BRD 1994 die Gewächsfläche insgesamt 3917,27 ha GARTENBAUERHEBUNG [1994]. Fast zwei Drittel davon verteilen sich auf die vier Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (Tab. 18). In Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt werden nur rund 14% der Gewächshausflächen be-

trieben. Ihr Anteil von Gewächshausflächen an den entsprechenden gärtnerischen Nutzflächen liegt mit Ausnahme Sachsens unter dem Bundesdurchschnitt. Bemerkenswert ist der relativ hohe Gewächshausflächenanteil der Stadtstaaten, insbesondere auch im Verhältnis zur gärtnerischen Nutzfläche.

Die Verteilung der Gewächshausflächen auf Größenklassen zeigt Tab. 19. Daraus folgt, daß die Betriebe mit einer Gewächshausfläche unter der für eine rentable Düngung erforderlichen Mindestgröße von 200 m² noch nicht einmal 3% der gesamten Gewächshausfläche darstellen und die Gewächshäuser mit einer Fläche größer 2.000 m² weit über 50% der Gesamtfläche umfassen. Somit kann bundesweit von einem großen Potential für die CO₂-Anreicherung im Gartenbau ausgegangen werden.

Tab. 18: Betriebe mit Gewächshäusern nach Bundesländern

Bundesland	Betriebe	GN-Fläche	Anteil an BRD-Ges.	GH-Fläche	Anteil an BRD-Ges.	durchschnittl. GH-Fläche	Anteil GH-fläche an GN-Fläche
		ha	%	ha	%	qm	%
Ba-Wü.	2529	5221	11,7	589,2	15,0	2330	11,3
Bayern	2575	4915	11,0	464,1	11,8	1802	9,4
Brandenburg	603	3807	8,5	137,4	3,5	2278	3,6
Hessen	1088	1905	4,3	201,0	5,1	1848	10,6
Meckl.-Vorp.	211	1218	2,7	58,7	1,5	2780	4,8
Niedersach.	2360	6425	14,4	494,0	12,6	2093	7,7
Nord-Westf.	3761	8543	19,2	1064,5	27,2	2830	12,5
Rheinl-Pfalz	813	2354	5,3	134,6	3,4	1656	5,7
Saarland	168	344	0,8	26,9	0,7	1602	7,8
Sachsen	1067	1837	4,1	192,0	4,9	1800	10,5
Sachsen-A.	364	2101	4,7	56,9	1,5	1563	2,7
Schles-Hol.	766	3139	7,0	136,6	3,5	1783	4,4
Thüringen	452	1506	3,4	102,4	2,6	2266	6,8
Stadtstaaten	975	1292	2,9	259,0	6,6	2656	20,0
BRD-Gesamt bzw. -schnitt	17732	44607	100,0	3917,3	100,0	2092	8,4

Legende: GN = gärtnerische Nutzfläche, GH = Gewächshaus

Quelle: zusammengestellt und berechnet nach [GARTENBAUERHEBUNG 1994, S. 165]

Tab. 19: Betriebe mit einer Gewächshausfläche von .. bis unter ... m² in der BRD

Fläche in m ²	unter 250	250 - 500	500 - 1.000	1.000 - 1.500	1.500 - 2.000	2.000 - 5.000	5.000 - 10.000	10.000 und größer
Zahl der Betriebe	2.587	2.381	3.401	2.458	1.436	3.592	1.281	596

Quelle: zusammengestellt nach [GARTENBAUERHEBUNG 1994, S. 162]

3.4 Rechtliche Regelungen

Rechtliche Vorschriften, die sich auf die CO₂-Anreicherung im Gewächshaus beziehen, finden sich der DIN 4793 sowie im DVGW⁷-Arbeitsblatt G 633 mit installationstechnischen Hinweisen. Bei der Versorgung mit technischem CO₂ bzw. bei der Bevorratung von Propan sind auch die Vorschriften zu beachten, die bei der Errichtung und beim Betrieb von Gasversorgungsanlagen für verdichtete und verflüssigte Gase Anwendung finden:

1. Druckbehälter-Verordnung mit den zugehörigen technischen Regeln (TRB und TRG), insbesondere:
 - TRG 280 Betreiben von Druckgasbehältern
 - TRB 610 Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern von Gasen
 - TRB 700 Betrieb von Druckbehältern
2. Unfallverhütungsvorschriften
3. Explosionsschutzrichtlinien (EX-RL)

Die DIN-Norm 4793 „Gasbefeuerte Geräte für die CO₂-Anreicherung der Raumluft in Gewächshäusern“ enthält sicherheitstechnische Anforderunge und wendet sich vor allem an die Hersteller von CO₂-Generatoren [WIDDERICH 1984]. Im Gartenbau dürfen nur solche Geräte zur CO₂-Anreicherung eingesetzt werden, die als „CO₂-Generator DIN 4793“ gekennzeichnet sind. Die Norm gilt für alle Geräte, deren Abgase zur CO₂-Anreicherung der Raumluft in Gewächshäusern verwendet werden. Für die CO₂-Anreicherung mit Technischem CO₂ und mit Abgasen der Kompostierung liegen keine speziellen Vorschriften vor.

Die DIN 4793 legt unter anderem fest, daß

- der CO-Gehalt im unverdünnten, trockenen Abgas 0,02% Volumenanteil nicht überschreiten darf;
- die CO-Konzentration bei direkter Ausblasung im Ausblasquerschnitt 30 vpm nicht übersteigen darf;
- Geräte mit Gebläsebrennern, die Abgase in Gewächshäuser leiten, mit einem CO-Überwachungsgerät ausersütet sein müssen. Ausgenommen davon sind CO₂-Gernatoren mit gemeinsamen Gebläse für die Umluft- und Verbrennungsluftzuführung, sogenannte CO₂-Kanonen, da sie eine offene Brennkammer besitzen und ein unvollständige Verbrennung weitgehend ausgeschlossen ist. Diese benötigen abaer eine Luftdrucküberwachung, die bei Luftmangel den Brenner abschaltet, bevor eine Erhöhung der CO-Konzentration im Ausblasequerschnitt erfolgt.

⁷ DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

- elektrische Einrichtungen der in Gewächshäuser aufgestellten Geräte mindestens spritzwassergeschützt sein müssen.

DVGW-Arbeitsblatt G 633

Das Arbeitsblatt nennt Anforderungen an Anlagen zur CO₂-Anreicherung, gibt Hinweise zu Sicherheitseinrichtungen, Inbetriebnahme, Wartung und auf weitere relevante Bestimmungen und Normen und hält unter anderem fest:

- Im Gartenbau dürfen nur solche Geräte zur CO₂-Anreicherung eingesetzt werden, die DIN 4793 entsprechen und vom DVGW ausdrücklich als CO₂-Generatoren registriert sind.
- Die Abgaseinschleusung ist so auszulegen, daß die maximale CO₂-Konzentration den MAK-Wert für CO₂ von 5000 vpm nicht überschreitet.
- Das Abgas von CO₂-Generatoren darf uneingeschränkt in ein Gewächshaus eingeleitet werden, sofern die Nennwärmeleistung des Generators 10 kW je 1000 m³ Gewächshausvolumen nicht überschreitet. Dieser Bemessung liegt ein minimaler Luftwechsel von 0,2 pro Stunde zugrunde, wie er bei sehr dichtem Gewächshaus und extremer Windstille zu erwarten ist. In der Regel liegt die Luftwechselzahl höher, so daß ein Überschreiten der Grenzwerte mit Sicherheit vermieden wird.
- Eine größere spezifische Abgaseinschleusung ist zulässig, wenn die max. CO₂-Konzentration im Gewächshaus durch Regelung auf einen Wert unter 5000 vpm (Vol.ppm) begrenzt wird, bzw. wenn durch eine geeignete Kontrollmessung nachgewiesen wird, daß die CO₂-Konzentration von 5000 vpm aufgrund des Luftwechsels nicht überschritten wird. Alternativ ist eine größere spezifische Abgaseinschleusung zulässig, soweit durch geeignete Kontrollmessungen nachgewiesen wird, daß die CO₂-Konzentration von 5000 vpm aufgrund des Luftwechsels nicht überschritten wird; über die Kontrollmessung ist ein Protokoll zu verfassen.

3.5 Verfahren der CO₂-Düngung

Als Stand der Technik zur CO₂-Anreicherung von Gewächshäusern haben sich im Gartenbau CO₂-Generatoren und die Düngung mit technischem CO₂ durchgesetzt.

3.5.1 CO₂-Generatoren

Unter CO₂-Generatoren werden Geräte verstanden, deren Abgase der Raumluft von Gewächshäusern beigemischt werden können. CO₂-Generatoren sind vom DVGW anerkannte Geräte wie Warmluftheizer, Heizkessel, Raumheizer, Heizstrahler oder Gasleuchten, die den für sie geltenden Normen entsprechen und die besonderen Anforderungen der DIN 4793 erfüllen [DVGW G 633]. Warmluftheizer mit offener Brennkammer und einem Ventilator für die Umwälzung von Raumluft werden als CO₂-Kanonen bezeichnet. Die Gasgeneratoren wer-

den mit Gas (Erdgas, Propan) betrieben, Erdöl scheidet aufgrund der hohen Schwefelgehalte aus. Physikalische Eigenschaften von Erdgasen, Energie- und Massebilanzen sowie Angaben zu Kosten in Abhängigkeit vom Energieträger sind in Tab. 20 bis Tab. 22 dargestellt.

Tab. 20: Physikalische Kenngrößen und Brenneigenschaften von Erdgasen nach DVGW-Arbeitsblatt G 620

Kenngröße	Bezeichnung	Einheit	Gruppe L	Gruppe H
Gaszusammensetzung	CH ₄	Vol%	82,0	85,4
	C ₂ H ₆	Vol%	3,3	8,0
	C ₃ H ₈	Vol%	0,6	2,9
	C ₄ H ₁₀	Vol%	0,3	1,0
	N ₂	Vol%	12,6	0,7
	CO ₂	Vol%	1,2	2,0
Brennwert	Ho,u	kWh/m ³	10,0	12,2
Heizwert	Hu,n	kWh/m ³	9,03	11,04
Verhältnis Hu,n/Ho,n		/	0,903	0,905
Zündgrenzen in Vol.-% Gas in Luft	Zu, Zo	%	5-15	5-15
Zündtemperatur mit Luft	tz	°C	640	640
Verbrennungskennzahlen für λ = 1				
Brennluftbedarf		m ³ /m ³ Gas	8,6	10,5
Abgasmenge feucht			9,6	11,6
Abgasmenge trocken			7,9	9,5
Abgaszusammensetzung				
feucht	CO ₂	Vol.-%	9,6	10,0
	H ₂ O		18,4	18,3
	N ₂		72,0	71,7
trocken	CO ₂		11,8	12,3
	N ₂		88,2	88,7

Quelle: zusammengestellt nach [KTBL 1992]

Tab. 21: CO₂-Produktion in Abhängigkeit vom Energieträger

Energieträger	Heizwert kWh/m ³	Brennwert kWh/m ³	Wasserprod. kg H ₂ O/m ³	CO ₂ -Prod. m ³ CO ₂ /m ³	CO ₂ -Prod. m ³ CO ₂ /kWh
Erdgas L	9,0	10,0	1,4	0,93	0,1
Erdgas H	11	12,2	1,6	1,17	0,1
	Heizwert kWh/kg	Brennwert kWh/kg	kg H ₂ O je kg	CO ₂ -Prod. m ³ CO ₂ /kg	CO ₂ -Prod. m ³ CO ₂ /kWh
Propan	12,8	13,9	1,6	1,5	0,12

Quelle: [RUHRGAS 1990]

Tab. 22: Daten und Kosten für Propan und Erdgas

Gas	Einheit	DM/Einheit von..bis	m ³ CO ₂ / Einheit	DM/m ³ CO ₂ von..bis
Propan	kg	0,82 ..1,08	1,5	0,55..0,72
Ergas L	m ³	0,52..0,62	0,90	0,58..0,69
Erdgas H	m ³	0,61..0,73	1,07	0,57..0,68

Quelle: [HEGE 1984]

Die CO₂-Anreicherung mittels Verbrennungsgasen aus Gasbrennern kann über drei Wege erfolgen [KTBL 1991, S. 5]:

- CO₂-Anreicherung über das Abgas-CO₂ aus Kleinbrennern, die ohne Beachtung der Heizleistung gezielt für die CO₂-Erzeugung betrieben werden (CO₂-Brenner);
- Abzweigen von Verbrennungsgasen aus zentralen Heizeinrichtungen;
- Direktes Einleiten der Verbrennungsabgase von Gaswärmeerzeugern, die im Gewächshaus angebracht sind und vorrangig dem Heizen dienen (CO₂-Kanonen).

3.5.1.1 CO₂-Brenner

Bei den CO₂-Brennern handelt es sich um atmosphärische Gasbrenner, wie sie auch für Baustellenbrenner oder Hausheizkessel eingesetzt werden, die in einem Gehäuse untergebracht sind (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), d. h. um Lötlampen in einer Blechdose [DOMKE 1984a]. Die Brenner arbeiten mit einem großen Luftüberschuß (1:25) und werden mit Propan oder Erdgas betrieben. Bei einem ordnungsgemäßen Betrieb können daher kritische Verbrennungsprodukte ausgeschlossen werden. Die abgegebene Wärme ist so gering⁸, daß sie als Heizenergie vernachlässigt werden kann und die Lüftung bei auch warmem Wetter nicht vorzeitig öffnet [KTBL 1986]. Die Gasbrenner werden über Gasregler gesteuert, die im wesentlichen eine Zündleitung für die Zündflamme und ein Magnetventil zum Schalten des Hauptgasstrom enthalten. Beim Verlöschen der Zündflamme wird die Gaszufuhr unterbrochen.

Über praktische Versuche mit CO₂-Brennern berichten DOMKE [1984, 1984a] und INGENILMEM [1984]. Die Pflanzenschadstoffe Ethylen und Kohlenmonoxid konnten im Abgas nicht nachgewiesen werden, die Stickoxide lagen im unverdünnten Abgas bei 10 vpm. Die relative Luftfeuchte erhöhte sich um durchschnittlich 5%. Das eingebrachte CO₂ verteilte sich innerhalb kürzester Zeit gleichmäßig. Es wurden Wachstumssteigerungen bzw. Kulturzeitverkürzungen um 20% ermittelt.

⁸ die Austrittstemperatur des Gemisches liegt etwa 70 K über der Temperatur der angesaugten Zuluft (INGENILMEM: 1984)

Tab. 23: Technische Daten Kodimax

Nennwärmebelastung	6-12 kW
Anschlußdruck	Erdgas: 20 mbar Flüssiggas: 50 mbar
Gasdurchsatz	Erdgas: 13 kWh/h Flüssiggas: 1 kg/h
CO ₂ -Leistung	Erdgas: 1,2 bis 2,4 kg/h Flüssiggas: 1,4 bis 2,7 kg/h
Elektrischer Anschluß:	220/24 V, 50 Hz
Abmessungen:	B 1150 x H 720 x T 480 mm
Kosten:	xxx

Quelle: Firmenunterlagen der Gesellschaft für Heizungs- und Klimatechnik mbH, Duisburg

3.5.1.2 Einleiten von Verbrennungsgasen aus zentralen Heizeinrichtungen

Auch durch das Abzweigen von Verbrennungsgasen aus zentralen Heizeinrichtungen kann Kohlendioxid genutzt werden, das üblicherweise durch den Kamin entweicht. Hierzu müssen ein Absaugventilator und spezielle Meß- und Steuerungseinrichtungen verwendet werden, um das Einhalten des gewünschten Konzentrationsbereiches zu gewährleisten. Bei zentralen Heizungsanlagen wird der Luftüberschuß für die Optimierung des Verbrennungswirkungsgrades knapp eingestellt, so daß ein geringer Anteil an Kohlenmonoxid entsteht. Bei einem Einsatz als CO₂-Generator darf der CO₂-Anteil im unverdünnten, trockenen Abgas aber nicht mehr als 0,02 vpm betragen. Da zentrale Heizanlagen nur CO₂ liefern können, wenn auch Heizenergie benötigt wird, ist das Verfahren nur wirtschaftlich, wenn die Heizanlage auch tagsüber mit geringer Last betrieben werden kann und wenig Stillstandszeiten hat [KTBL 1986]. Die Wärme, die mit dem für die CO₂-Anreicherung genutzten Abgas in das Gewächshaus gelangt, trägt zu einer Brennstoffeinsparung von etwa 0,5 bis maximal 3,0 Prozent bei. Die Brennstoffeinsparung, die über die CO₂-Düngung erreicht wird (kürzere Kulturzeiten bzw. größere Pflanzenerträge) ist also wesentlich größer als die Einsparung über den Wärmeeintrag. [KTBL 1992]

Über praktische Versuche zur Nutzung von Abgasen aus zentralen Heizungsanlagen für die CO₂-Anreicherung berichten Hege und Finger [HEGE 1988]⁹. Das Institut für Technik im Gartenbau, Weihenstephan, führte an drei Gewächshäusern, die mit einer CO₂-Anreicherungsanlage und Heizkessel mit Erdgasbrenner und Brennwertgerät ausgestattet wurden, Untersuchungen zur CO₂-Anreicherung durch. Die isoliergedeckten Gewächshäuser hatten eine Grundfläche von je 216 m² (9 m x 24 m) bei einem Volumen von je 833 m³ und unterschieden sich in ihrer Eindeckung: Haus B Isolierglas, Haus C Stegdoppelplatte, Haus D Stegdreifach-

⁹ Mit der Nutzung von Heizungsabgasen für die CO₂-Anreicherung im Gartenbau beschäftigte sich auch ein Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Fördertitel: F.u.E. Vorhaben 91 UM 02 „Neuartige Kombination von Heizungssystemen mit Abgasrückführung ... für Gewächshäuser“.

platte, Vergleichshaus ohne CO₂-Anreicherung Klarglas. Als Brenner wurde ein modulieren-der Erdgasbrenner mit einer Feuerungsnennwärmeleistung von 385 bis 1400 kW verwendet. Der Erdgaskessel hatte eine Kesselleistung von 1163 kW. Daran war ein Brennwertgerät mit einer Wärmeleistung von 85 kW angeschlossen.

Der erdgasbefeuerte Kessel stellte Abgas mit einem CO₂-Gehalt von 9 bis 10 Vol%, abhängig von der Laststufe, zur Verfügung. Der CO-Anteil im Abgas bewegte sich zwischen 5 - 15 vpm im Normalbetrieb, die Abgase können daher unbedenklich ins Gewächshaus eingeblasen werden. Durch Abgaskühler wurde eine Energieeinsparung von 10% erreicht. Die Überwachung des CO-Gehaltes in der Abluft (vor der Zumischung mit Luft) schützt auch gegen Ethylen, da CO und Ethylen meistens in einem konstanten Verhältnis freigesetzt werden. Die CO₂-Anreicherung erbrachte für die untersuchte Kultur (Usambara-Veilchen) eine Kulturzeitverkürzung von 10 - 14 Tage und eine kulturbezogene Energieeinsparung von 15%.

Ein Gärtner, der längere Zeit in Gewächshäusern arbeitete, in die Abgase eingeblasen wurden, klagte über Geruchsbelästigung und meinte, daß die Abgaszuführung ihm Augenbrennen und Kopfweg verursachte. Es wurde angenommen, daß bei ihm eine besondere Empfindlichkeit vorliegt, da andere Mitarbeiter stunden- und tagelang bei wesentlich höheren CO₂- Konzentrationen ohne Beeinträchtigungen in Gewächshäuser gearbeitet hatten [HEGE 1988, S. 13]. Das eingeleitete Abgas wurde auf Schadstoffe untersucht (Tab. 24). Gaschromatographisch konnten keine Fremdstoffe nachgewiesen werden, nur ein geringer Kohlenwasserstoffanteil. Sachverständige bezeichneten den Geruch in der Nähe der Abgaseinleitung als „schwimmbadartig“. Ein mit CO₂ angereichertes Gewächshaus sei von anderen zu unterscheiden, die Wahrnehmung wäre am besten mit dem Eindruck von verbrauchter Luft zu beschreiben. Man kam zu dem Schluß, daß die vom Gärtner angegebene Beeinträchtigung psychologische Ursachen habe, nachdem die CO₂-Anreicherung üblicherweise „CO₂-Begasung“ genannt wird.

Bezüglich der Verteilung des eingebrachten CO₂ wurde festgestellt, daß die auch ohne jede Störung von außen im Gewächshaus stets vorhandene Luftbewegung mit Geschwindigkeiten von 0,01 bis 0,1 m/s lokale Konzentrationserhöhungen sofort ausgleicht. Diese ständige Luftbewegung mache eine nur auf den Pflanzenbereich konzentrierte CO₂ Anreicherung unmöglich, spezielle Verteilungseinrichtungen wie Kanäle oder gelochte Folienschläuche brächten aus diesem Grund keinen Vorteil.

Tab. 24: Zusammensetzung der GH-Luft bei CO₂-Anreicherung auf 4000 vpm (Heizungsanlage Fröling/Elco)

Komponente	Gewächshauskonzentration		MAK-Wert	
	in vpm	in mg/m ³	in vpm	in mg/m ³
CO ₂	4000	7200	4000	9000
NO _x	2	4		
NO	2	3		
NO ₂	≤ 1	≤ 1	5	9
SO ₂	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	2	5
Kohlenwasserstoffe (z. B. Propan C ₃ H ₈)	≤ 1	≤ 1,8	1000	1800
Ethylen (C ₂ H ₄)	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar		

Quelle: [HEGE 1988]

Auch in der Lehr- und Versuchsanstalt für Gemüse- und Zierpflanzen Strälen der Landwirtschaftskammer Rheinland Bonn wurden in mehreren Etappen Versuche zur Nutzung von Heizungsabgasen für die CO₂-Anreicherung von Gewächshäusern durchgeführt [ANDREAS 1984]. Die Versuchsanlage war mit einem gasbefeuerten Kessel und einer Wärmerückgewinnungsanlage, Typ „Coabamat“, ausgerüstet. In das Gewächshaus wurde ein Abgas/Raumluftgemisch mit ca. 3% CO₂ und einer CO-Konzentration von max. 10 vpm eingeblasen. Die eingeblasenen Mengen wurden so bemessen, daß sich im denkbar ungünstigsten Fall (Windstille, geschlossene Lüftungsklappen etc.) der MAK-Wert für CO₂ nicht überschritten werden konnte. Als Betriebsweise galt, nur dann zu heizen, wenn Wärme benötigt wurde, aber mit CO₂ zu düngen, wenn geheizt wurde.

Durch Nutzbarmachung der Abgaswärme eines Abgaskühlers und durch die anschließende teilweise Nutzung der in den Abgasen enthaltenen Wärme im Gewächshaus wurden insgesamt fast 21% der Energie eingespart. Die daraus resultierende Erhöhung der CO₂-Konzentration im Gewächshaus betrug selbst in den Sommermonaten vielfach Tagesmittelwerte um 0,15 Volumenprozent CO₂. Aus der CO₂-Anreicherung resultierten bis zu 25% Kulturzeitverkürzungen bei Kohlrabi, bis zu 36% höheres Kopfgewicht bei Salat und bis zu 30 % Erntemehrertrag bei Tomaten; insgesamt wurden 20 Kulturen untersucht. Der finanzielle Vorteil durch CO₂-Düngung und Energieeinsparung wurde zu durchschnittlich 0,70 DM/m² berechnet.

3.5.1.3 Gaskanonen

Das direkte Einbringen von Verbrennungsgasen aus Gaswärmeerzeugern, die im Gewächshaus angebracht sind und vorrangig dem Heizen dienen, erfolgt in der Regel mittels sogenann-

ter CO₂ Kanonen¹⁰. Als CO₂ Kanonen werden Warmluftföhrer mit offener Brennkammer und einem Ventilator für die Zufuhr der Verbrennungsluft und das Umwälzen der Raumluft bezeichnet [WIDDERICH 1984]. Die Geräte können als Gebläsebrenner mit einem Ventilator für die Zuführung der Verbrennungsluft und Umwälzung der Raumluft oder als Warmluftföhrer mit atmosphärischem Brenner und Umluftgebläse zur Umwälzung der Raumluft ausgeführt sein. Dabei bringt das direkte Einleiten der Verbrennungsabgase ins Gewächshaus eine beachtliche Energieeinsparung, weil die Abgaswärme, die sonst durch den Kamin entweicht, dem Gewächshaus zugute kommt [KTBL 1986]. Bei richtiger Einstellung bilden sich keine schädlichen Konzentrationen von Kohlenmonoxid oder Kohlenwasserstoff, die entstehenden Stickoxide (NO_x) können allerdings zu Pflanzenschädigungen föhren [RUHRGAS 1990].

Kenngrößen von Gaskanonen sind Gasdurchsatz, Luftföhrleistung, Wurfweite, elektrischer Energiebedarf, Geräuschentwicklung, Wärmeleistung, verwendete Gasart und die CO₂-Produktionsrate in Abhängigkeit von der Wärmeabgabe (vgl. Tab. 25). Für die Ausbringung im Gewächshaus ist auch die Ausblasehöhe von Bedeutung.

Tab. 25: Technische Daten Priva CO₂-Kanone, Typ LN-Brenner

Typ		LN 8	LN 10	LN 13
Nennwärmeleistung	Mcal/h	67	84	107
	kW	78	98	125
Gasdurchsatz	m ³ /h	8	10	13
Luft-Volumenstrom	m ³ /h	6500	6500	6500
Ventilatorumdrehzahl	U/min	1400	1400	1400
aufgenommene Leistung	W	600	600	600
Gewicht	kg	75	75	75

Quelle: Priva-Informationsmaterial

Bis 20 K aufzuheizender Temperaturdifferenz können die Gaskanonen unter Einbeziehung einer Zwangsluftwechseleinrichtung als alleinige Heizung dienen, bei höheren Temperaturen werden sie entweder zur Deckung des Grundwärmebedarfs oder als Zusatzheizung eingesetzt [RUHRGAS 1990]. Die Zwangslüftung ist notwendig, um bei hohen Heizleistungen bestimmte Grenzwerte für die CO₂-Konzentration einzuhalten. Die Konzentration muß auf jeden Fall unter dem MAK-Wert von 5000 vpm gehalten werden, aus pflanzenbaulichen Gründen sind aber in der Regel geringere Konzentrationen einzuhalten [KTBL 1991]. Für den Zwangsluftwechsel werden Außenluftventilatoren empfohlen, da vorhandene Lüftungseinrichtungen bei Frost in ihrer Funktion durch Eis und Schnee gestört sein können [HEGE 1986].

¹⁰ Über praktische Erfahrungen mit CO₂ Kanonen für die Gewächshausbeheizung und CO₂-Anreicherung berichten u. a. Hege und Lecker (HEGE 1986) bzw. Lecker (KTBL: 1991)

Nach DIN 4793 ist eine installierte Nennwärmebelastung bis zu 10 kW pro 1.000 m³ Gewächshausvolumen ohne Meß- und Steuereinrichtung zulässig, da davon ausgegangen wird, daß der MAK-Wert von 5.000 vpm nicht überschritten wird. Der Verlauf der CO₂-Konzentration im Gewächshaus in Abhängigkeit von dem natürlichen Luftwechsel n, der Begasungsdauer t und bei Vernachlässigung der Assimilation kann nach [DVGW G 633] wie folgt berechnet werden:

$$K = \frac{Q \times 10^6}{V \times n} \times (1 - e^{-nt}) + 300 \text{ vpm}$$

K = CO₂-Konzentration in der Gewächshausluft in vpm

Q = CO₂-Einschleusung vom Generator

n = Luftwechselrate in 1/h

t = CO₂-Einwirkzeit in h

V = Volumen des Gewächshauses in m³

Abb. 2 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentrationen für einen stündlichen CO₂-Eintrag von 1 m³ CO₂ in ein Gewächshausvolumen von 1000 m³ bei unterschiedlichen Luftwechseln. Dieser Eintrag entspricht bei einem Erdgas betriebenen Brenner eine Feuerungsleistung von 10 kW pro 1.000 m³ Gewächshausvolumen. Je nach Gewächshausstyp ist damit eine Temperaturerhöhung um 4 bis 7°C möglich [KTBL 1991, S.18]. Nur bei extrem dichten Gewächshäusern mit einer Luftwechselzahl kleiner 0,1/h würde nach etwas mehr als 6 Stunden der MAK-Wert überschritten. Untersuchungen an den als besonders dicht eingeschätzten Foliengewächshäusern mit aufblasbarer Doppelseindeckung zeigten, daß auch bei Windstille der minimale Luftwechsel für alle im Erwerbsgartenbau praxisüblichen Gewächshausanlagen mit n = 0,15 angenommen werden kann. Bei realistischen Luftwechselzahlen > 0,2 wird der MAK Wert bei diesem CO₂-Eintrag innerhalb üblicher Begasungsdauern nicht erreicht.

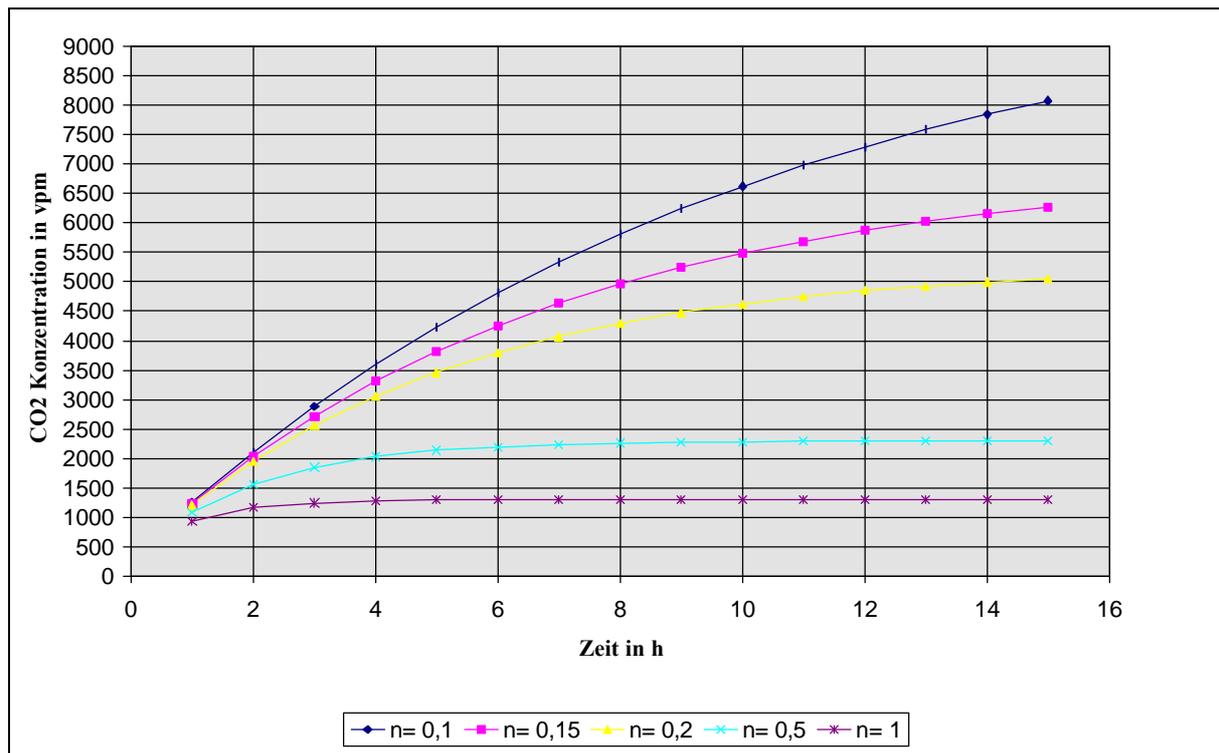


Abb. 2: CO₂ Konzentration im Gewächshaus

Über Versuche zur CO₂-Anreicherung mit Gaskanonen berichten u. a. Hege und Lecker [HEGE 1986]. Schwerpunkt der Untersuchungen war die Fragestellung, ob mit den Gaskanonen eine wirtschaftlichere Gewächshausheizung erreicht werden kann, als mit zentralen Wärmeversorgungsanlagen. Das Versuchsgewächshaus war eine dreischiffige Anlage mit 1.253 m² (22,7 m x 55,2 m) bzw. 4.185 m³ Luftvolumen. Für den nötigen Zwangsluftwechsel (zur Einhaltung zulässiger CO₂-Konzentrationen) wurden zwei Ventilatoren an mit einer maximalen stündlichen Förderleistung von je 3.000 m³ eingebaut. Die Beheizung erfolgte mit vier Gaskanonen mit folgenden Merkmalen:

- Gasdurchsatz: je Brenner 8 m³/h mit einer max. Heizleistung ca. 80 kW
- Luftförderleistung: je Brenner 7.000 m³ bei 40 m Wurfweite
- Gasverbrauch der Zündflamme: 70 l/h
- Befeuerung mit Erdgas H
- maximale CO₂ Produktion je Brenner: 8,48 m³ CO₂ je Stunde

Zusammenfassung werden u. a. folgende Ergebnisse genannt (HEGE 1986, S. 23):

- Bei bestimmten Wetterlagen (Nebel, Windstille) reichte der natürliche Luftwechsel des relativ undichten Gewächshaus nicht aus, merkbarer Einfluß auf die CO₂-Konzentration im GH zu nehmen, die Luftwechselrate blieb unter 0,1 je Stunde.

Mit zwangsweisem Luftwechsel mittels Außenluftventilatoren wurden mit den direkt ausblenden Gasheizgeräten ausreichende Heizleistungen erzielt, ohne die maximale Arbeitsplatzkonzentration für CO₂ zu überschreiten. Der Wirkungsgrad des Heizsystems ist von der erforderlichen Gewächshaustemperatur und deren Differenz zur Außentemperatur abhängig (s. Tab. 27).

Die Verteilung der CO₂-Konzentration kann als ausgeglichen angesehen werden.

Bei korrekter Brennereinstellung und ausreichendem Sauerstoff durch genügende Außenluftzufuhr besteht keine Gefahr einer Schadstoffanreicherung (vergleiche Tab. 28)

Der Verbrauch an elektrischer Energie beträgt bei voller Heizleistung und Einsatz der Außen- und Umluftventilatoren 2,4 kW, d.h. 0,75% der Heizleistung von 320 kW.

Zum Nachjustieren der Geräte sind Prüfgase erforderlich. Die Außenluft ist nicht geeignet, da in den unteren Luftschichten bis einige Meter über dem Boden starke Konzentrationsschwankungen auftreten.

- Gaskanonen sind besonders geeignet für Kulturen, die hohe CO₂-Werte vertragen und/oder für Gewächshäuser, die in der kältesten Jahreszeit einige Wochen stillgelegt werden bzw. deren Kulturen bei tiefen Temperaturen nur frostfrei geheizt werden.
- Tab. 26 Der Wirkungsgrad des Heizsystems ist von der erforderlichen Gewächshaustemperatur und deren Differenz zur Außentemperatur abhängig (s. Tab. 27).
- Die Verteilung der CO₂-Konzentration kann als ausgeglichen angesehen werden.
- Bei korrekter Brennereinstellung und ausreichendem Sauerstoff durch genügende Außenluftzufuhr besteht keine Gefahr einer Schadstoffanreicherung (vergleiche Tab. 28)¹¹
- Der Verbrauch an elektrischer Energie beträgt bei voller Heizleistung und Einsatz der Außen- und Umluftventilatoren 2,4 kW, d.h. 0,75% der Heizleistung von 320 kW.
- Zum Nachjustieren der Geräte sind Prüfgase erforderlich. Die Außenluft ist nicht geeignet, da in den unteren Luftschichten bis einige Meter über dem Boden starke Konzentrationsschwankungen auftreten.
- Gaskanonen sind besonders geeignet für Kulturen, die hohe CO₂-Werte vertragen und/oder für Gewächshäuser, die in der kältesten Jahreszeit einige Wochen stillgelegt werden bzw. deren Kulturen bei tiefen Temperaturen nur frostfrei geheizt werden.

¹¹ Die Probendauer betrug jeweils ca. 20 min.

Tab. 26: Luftwechsel zur Einhaltung des MAK-Wertes für CO₂

Temperaturdifferenz in K	erforderlicher Luftwechsel pro Stunde
8	0,7
14	1,4
20	2,1

Tab. 27: Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades

Temperaturdifferenz DT	Wirkungsgrad
≤ 4 K:	direkt ausblasende Gasheizgeräte sind anderen Systemen bei Einfachverglasung deutlich überlegen
$5 \leq T \leq 15$:	Wirkungsgrad ist mit anderen Systemen vergleichbar
≥ 15 K:	infolge der Zwangslüftung sinkt der Wirkungsgrad unter 85% und damit unter den üblicher Heizsysteme

Tab. 28: Zusammensetzung der durch CO₂-Generatoren beheizten Gewächshausluft

Probe		Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
			(Hausmitte, 1 m über dem Boden)		0,5 m nach Brennerausgang
CO ₂	Kohlendioxid	Vol.%	0,42	0,44	0,46
O ₂	Sauerstoff	Vol.%	20,01	19,97	19,94
N ₂ und Ar	Stickstoff und Argon	Vol.%	79,51	79,59	79,60
CO	Kohlenmonoxid	ppm	<30	<30	<30
H ₂	Wasserstoff	ppm	<2	<2	<2
CH ₄	Methan	ppm	8,3	10,3	6,9
C ₂ H ₆	Ethan	ppm	0,3	1,4	0,2
C ₂ H ₄	Ethylen	ppm	0,0	0,0	0,0
C ₃ H ₈	Propan	ppm	0,1	1,3	<0,1
C ₃ H ₆	Propylen	ppm	0,0	0,0	0,0
C ₄ H ₁₀	Butan	ppm	<0,1	0,8	<0,1
C ₄ H ₈	Butylen	ppm	0,0	0,0	0,0
C ₄ H ₆	Butadien	ppm	0,0	0,0	0,0
C ₅ H ₁₂	Pentan	ppm	0,0	0,4	<0,1
C ₆ H ₁₄	Hexan	ppm	0,0	0,2	0,0
C ₇ H ₁₆	Heptan	ppm	0,0	0,1	0,0
C ₈ H ₁₈	Oktan	ppm	0,0	0,1	0,0
C ₉ H ₂₀	Nonan	ppm	0,0	0,1	0,0
C ₁₀ H ₂₂	Dekan	ppm	0,0	0,1	0,0
C ₁₁ H ₂₄ und höhere		ppm	0,0	<0,1	0,0
C ₆ H ₆	Benzo	ppm	<0,1	0,1	<0,1
C ₇ H ₈	Toluol	ppm	<0,1	0,1	<0,1
C ₈ H ₁₀	Xylol	ppm	<0,1	0,1	0,0

Quelle (HEGE 1986, S. 16)

Die gleichen Autoren berichten auch über den Einsatz verbesserter Gaskanonen mit geringeren Schadstoffemissionen in einem Forschungsvorhaben im Gemüsebaubetrieb Dworschak in Nürnberg-Kraftshof [HEGE 1990]. Die Versuche wurden hauptsächlich in einem Gewächshaus in Venlo-Bauweise mit jeweils 9 Doppelschiffen und einer Gewächshausfläche von 3467 m² und einem Gewächshausvolumen von 12032 m³ durchgeführt. Im Gewächshaus wurden als sechs NO_x arme CO₂-Generatoren mit je 93 kW Heizleistung, d. h. insgesamt 558 kW eingebaut. Bei einem spezifischen Energiebedarf von 8,88 W/(m²*K) bzw. 2,56 W/(m³*K) reichte diese Leistung aus, um eine Temperaturdifferenz von 18 K auszugleichen.

Die Emissionen von Stickoxiden lagen mit 3,5 vpm unter den Vergleichswerten von 70 - 75 vpm bei herkömmlichen Brennern. Die entsprechenden Stickoxidkonzentrationen in der Gewächshausluft waren so niedrig, daß selbst bei CO₂-Konzentration von 5 000 vpm die NO_x-Werte 0,2 vpm nicht überschritten wurden. CO und Ethylen waren in der Gewächshausluft nicht nachzuweisen. Bei dem einfachverglasen Gewächshaus stieg die CO₂-Konzentration

um ca. 1000 vpm je Kelvin an. Das heißt, daß bei Temperaturdifferenzen über 5 K eine Zwangslüftung notwendig ist. Die Berechnungen der Heizverluste aus dem Zwangsluftwechsel ergaben, daß bei einer Temperaturdifferenz von 15 K etwa 23% der zur Verfügung stehenden Heizleistung für die Luftwechselverluste aufzuwenden sind, wenn der MAK-Wert von 5.000 vpm eingehalten werden soll [HEGE 1990, S. 20]. Eine weitere Erhöhung der CO₂-Konzentration kann nach Meinung der Autoren in der Nachtzeit, in der etwa 80% des Heizbedarfs anfallen, vertreten werden, soweit sich in dieser Zeit keine Personen im Gewächshaus aufhalten und es die Pflanzenkultur zuläßt.

Bemerkenswert waren häufige Betriebsstörungen an den Brennern, deren Ursache im Untersuchungszeitraum nicht ermittelt werden konnte. Die Autoren berichten auch von einer starken Geräuschentwicklung der CO₂-Kanonen; Schallpegelmessungen ergaben im unmittelbaren Bereich der Brenner Werte von 79 dB (A) bis 82 dB(A), als niedrigster Wert wurde im Gewächshaus 62,5 dB(A) gemessen [HEGE 1990, S. 24 ff.]. Auf die bedeutenden Lärmemissionen verweist auch Lecker [KTBL 1991].

3.5.2 Technisches CO₂

CO₂-Quellen

Nach Marnette kommen für die Bereitstellung von technischem CO₂ als Ressourcen

- Prozeßkohlenensäure,
- natürliche Quellkohlenensäure,
- Gärkohlenensäure,
- CO₂ aus Verbrennungsabgasen und
- CO₂ aus Carbonaten

in Frage [MARNETTE 1988].

Prozeßkohlenensäure:

Bei der Synthesegaserzeugung aus fossilen Rohstoffen¹² fällt CO₂ als Abprodukt an, welches aus dem Synthesegas ausgewaschen werden muß. An diese CO₂-Wäschen hängt sich die CO₂-Industrie an, da hier CO₂ in hoher Konzentration anfällt und keine weiteren Aufkonzentrationen notwendig sind. Nach einer entsprechenden Reinigung kann die Prozeßkohlenensäure direkt der Verflüssigung zugeführt werden.

¹² Synthesegas, Gasgemisch aus CO und H₂, das durch Reaktion von Wasserdampf mit Koks sowie mit Erdöl oder Erdgas hergestell wird; dient zur Synthese aliphatischer Kohlenwasserstoffe und Sauerstoffverbindungen (Fischer-Tropsch-Synthese, Methanol-Synthese, Herstellung höherer Alkohole). Wassergas, aus Wasserdampf und Koks oder Kohle erzeugt überschneidet sich in seinen Eigenschaften und Anwendungen mit Synthesegas (SCHMIDT 1981, S. 152)

Natürliche Quellkohlenensäure

Die Herkunft von natürlicher Quellkohlenensäure ist mineralischen Ursprungs aus ehemaligen unterirdischen Schmelzen. Das CO₂-haltige Gas wird heute vorwiegend durch Bohrungen, welche mehrere hundert Meter tief sein können, erschlossen. Die Förderung ist auf Ungarn und die Bundesrepublik Deutschland beschränkt und rückläufig. Die natürliche Quellkohlenensäure fällt in Konzentrationen von 99,4 bis 99,85 Vol.-% an. Häufigste Verunreinigungen sind Schwefelwasserstoff und Methan [Ullmanns 1977]. Die Quellkohlenensäure wird weitgehend in der Getränkeherstellung eingesetzt [Ullmanns 1977] und hat insgesamt noch einen Marktanteil von etwa 10-15 % in der BRD.

Gärkohlenensäure:

Bei der alkoholischen Gärung fallen pro kg Alkohol ca 0,96 kg CO₂ an, wovon ca. 80 % gewinnbar sind. Die bei der Gärung entweichende Kohlenensäure enthält neben Schwefelwasserstoff und eventuell Schwefeldioxid deutliche Anteile an organischen Verunreinigungen und erfordert daher spezielle Reinigungsverfahren. Die Gärkohlenensäure wird fast ausschließlich wieder in der Getränkeindustrie eingesetzt.

CO₂ aus Verbrennungsabgasen und aus Carbonaten:

Die Gewinnung von technischem CO₂ aus Carbonaten (z. B. Kalkbrennöfen] oder aus Verbrennungsabgasen ist heute fast immer unrentabel.

Gewinnung

Die eigentliche Gewinnung von CO₂ umfaßt die Reinigung, Verdichtung, Trocknung, Nachreinigung, Verflüssigung, Strippung und Lagerung [MARNETTE 1988].

Die Reinigungsstufe ist auf das jeweilige Rohgas und dessen Herkunft abgestimmt; sie beinhaltet z. B. die Entfernung von Schwefelwasserstoff über Aufoxidation in einer oxidierende Wäsche (in Kaliumpermanganat oder Chromat) und die Entfernung von SO₂ durch eine Kalkbehandlung.

Der Verdichtungsdruck richtet sich nach dem Kältemittel und der Temperatur, bei der die Kondensationswärme abgeführt werden soll, ist auf jeden Fall aber kleiner als die kritische Temperatur von 31°C. Mit kaltem Wasser (15°C) könnte bei ca. 50 bar verdichtet werden. Die ölfreie Verdichtung erfolgt mit sogenannten Trockenläufer-Kompressoren, je nach erforderlichem Druck einstufig oder mehrstufig mit jeweiliger Zwischenkühlung und Wasserabscheidung.

Die Trocknung erfolgt heute ausschließlich adsorptiv an Kieselgel, aktivierter Tonerde oder über Molekularsieve bis auf Taupunkttemperaturen von -60 bis -80°C. Die Regenerierung der Adsorptionsmittel wird mit heißem trockenem CO₂, Stickstoff oder Luft durchgeführt. Zur Entfernung von Geschmacks- und Geruchsträgern wird meist eine zusätzliche Adsorption an Aktivkohle nachgeschaltet. Die Verflüssigung wird heute im Hinblick auf Investitionskosten,

Verflüssigungsgrad, Kältemittel und Inertgasabtrennung fast ausschließlich bei 15 - 20 bar und -30 bis -20 Grad C durchgeführt. Als Kältemittel dienen in der Regel Fluorchlorkohlenwasserstoffe (Frigen, Freon, kaltron, usw.) oder Ammoniak. Nicht zu verflüssigende Inertgase werden als Flashgase aus der Anlage abgezogen. In flüssigem CO₂ gelöste Gase werden in einer nachgeschalteten Stripkolonne ausgetrieben.

Die Lagerung erfolgt in isolierten Druckbehältern bei 15 bis 20 bar und -30 bis -20° C. In diesem Zustand wird die verflüssigte Kohlensäure auch mit Tankfahrzeugen vermarktet.

Anwendung und Lagerung am Anwendungsort

Flüssiges CO₂ ist im Handel unter der Bezeichnung Kohlensäure mit einem Reinheitsgrad von 99,5 bis 99,995 Vol.-% erhältlich und wird in Stahlflaschen geliefert oder von Tankwagen in Druckbehälter abgefüllt. Die Stahlflaschen (Tab. 29) haben einen Inhalt von 0,35 - 50 kg CO₂ und lassen sich ggf. zu Flaschenbatterien zusammenschließen. Bei größeren Verbrauchsmengen kommen Flaschenbündel bzw. Kohlensäuretankanlagen zum Einsatz (vgl. Tab. 30).

Ein Flaschenbündel besteht aus zwölf 50-Liter-Stahlflaschen Typ 52 mit je 10 m³ Gasinhalt (Fülldruck 200 bar), die in einem Bündelgestell zu einer Transporteinheit zusammengefaßt und durch Rohrleitungen miteinander verbunden sind. Das Bruttogewicht ausschließlich Gasfüllung beträgt ca. 1017 kg, die Abmessungen bei stehender Ausführung 1842 mm (h) x 965 mm (l) x 760 mm (b) [LINDE].

Tankanlagen werden für 1,5 - 25 Mg ausgelegt [LINDE 1995]. Die Bevorratung von dem flüssigen Kohlendioxid erfolgt bei normalem, gasförmigen Verbrauch in Niederdruckbehältern (s. Tab. 31) mit tiefkalter Speicherung und hochwertiger Isolierung, die ein Kälteaggregat zur Rückkühlung entbehrlich macht. Nichtisolierte Hochdrucktankanlagen¹³ zur flüssigen Speicherung von Kohlendioxid bei Umgebungstemperaturen werden bei CO₂-Notinertisierungsanlagen oder bei gewünschten CO₂-Verbrauchsdrücken größer als 20 bar verwendet und kommen im Gartenbau nicht zum Einsatz.

¹³ maximale Betriebsdrücke bis 80 bar, Prüfüberdruck 104 bar

Tab. 29: CO₂-Stahlflaschen

Rauminhalt	Außen- Ø	Länge mit Kappe	Gesamgew. mit Füllung	Dampfdruck bei 20°C	Füllmenge
1	mm	mm	ca. kg	ca. bar	kg
2	100	490	6,8	57,29	1,5
8	140	805	16,5	57,29	6,0
13	204	720	28,0	57,29	10,0
27	204	1260	58,0	57,29	20,0
40	204	1700	80,0	57,29	30,0

Quelle: [LINDE]

Tab. 30: Auslegungswerte für die CO₂ Bevorratung

Durchschnittlicher Gasverbrauch m ³ /Woche	Gasspeicher	
	Flaschenbatterie mit 10 m ³ - Flaschen	Bündelbatterie mit 120 m ³ - Bündeln
10	2 x 1	
25	2 x 2	
50	2 x 4	
75	2 x 6	
100		2 x 1
200		2 x 2
> 200	Flüssigversorgung über eine Tankanlage	

Quelle: [LINDE]

Tab. 31: CO₂ Niederdrucktanks

Tanktyp		T22S 15-CO ₂	T22S 60-CO ₂	T22S 120-CO ₂
max. Betriebsdruck	bar	22	22	22
Inhalt	ltr.	1.580	6.300	12.630
CO ₂ -Füllung	kg	1.500	6.000	12.000
Behältergewicht	kg	1.250	3.730	7.600
Höhe	mm	3.040	7.020	6.025
Durchmesser	mm	1.400	1.600	2.500
Fundamentplatte	m x m	2 x 2	2,8 x 2,8	2,8 x 2,8
Eigenverdampfung	% CO ₂ /d	0,23	0,2	0,09
elektr. Anschluß für Druckaufbau	kW	0,5	1,0	1,0

Quelle: LINDE

Über Druckregler wird CO₂ aus Flaschen und Behältern über ein Rohrsystem in das Gewächshaus eingeleitet. Eine CO₂-Messung und eine automatische Steuerung für die CO₂-Einspeisung ins Gewächshaus sind ebenso wie bei dem Einsatz von Gasgeneratoren für die Einhaltung des MAK-Wertes von 5000 ppm vorzusehen. Eine Zusammenstellung zu Kostenstrukturen der CO₂-Anreicherung mit technischem CO₂ zeigt Tab. 32.

Tab. 32: Kostenstrukturen der technischen CO₂-Anreicherung

Kostenstelle	Betrag	Quelle/Bemerkungen
CO ₂ (bei Abnahme von 15 Mg/a)	550 DM/Mg	GRELLE und SEIDEL [1984]
CO ₂ (bei Abnahme von 6 Mg/a)	650 DM/Mg	dito
Behältermieter (6-12 Mg?)	300 DM/Monat	dito
CO ₂ -Überwachung (mit Infrarot-Gasanalysator)	3.000 bis 10.000 DM (je nach Ausstattung)	dito
CO ₂ aus Flaschenbündel (bei Abnahme von 6 Mg)	1500 DM/Mg	GANSLMEIER [1984] ¹⁴
CO ₂ aus Tank (bei Abnahme von 6 Mg)	650 DM/Mg	dito
Anlagekosten (incl. Meßgeräte, Ventile etc.)	14.000 DM	dito
Miete für (29) Flaschenbündel	725 DM	dito
Behältermiete	4380 DM	dito
Betriebskosten für CO ₂ -Düngung	1,50 bis 2,50 m ² /a	AGEFKO Kohlensäure-Industrie GmbH Informationsmaterialien

3.5.3 Vergleichende Untersuchungen zur CO₂-Anreicherung

Vergleiche verschiedener Systeme für die CO₂-Anreicherung von Gewächshäuser wurden im Hinblick auf die technische Funktionsfähigkeit, die Effizienz der CO₂-Begasung und insbesondere im Hinblick der Wirtschaftlichkeit durchgeführt.

Landwirtschaftskammer Rheinland

Ein Systemvergleich mit verschiedenen Systemen zur CO₂-Anreicherung in Gewächshäusern wurde in einem Versuchsprojekt der Landwirtschaftskammer Rheinland, Bonn, der Thyssen-gas GmbH, Duisburg und den Niederrheinischen Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg in der Lehr- und Versuchsanstalt Straelen 1986/1987 durchgeführt [STRÄLEN 1988]. Die Untersuchungen betrafen CO₂-Generatoren (Kodimax) und die Einleitung von technischem CO₂. Ziel war ein Vergleich der Begasungssysteme im Hinblick auf die pflanzenbaulich und wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit. Mitgeprüft wurde ebenfalls die Nullvariante, d. h. keine CO₂-Düngung.

Der Vergleich erfolgte unter identischen Bedingungen mit folgenden technischen Merkmalen:

- identische Gewächshauseinheiten in niederrheinischer Bauweise mit je 460 m² Gewächshausfläche (12,5 m Breite, Rauminhalt ca. 2.020 m³) und einem Luftwechsel von ca. 1,
- Sollwert der CO₂-Anreicherung: 1000 ppm,
- Beginn der CO₂-Düngung: 1,5 h vor Sonnenaufgang,
- Ende der CO₂-Düngung: 1,5 h vor Sonnenuntergang,
- Unterbrechung der CO₂-Düngung bei Lüftungsklappenstellung von > 10%,

¹⁴alle Angaben beziehen sich auf 3.000 Gewächshausfläche, Verbrauch von 2 kg CO₂/(m² a)

- gleiche kulturtechnische Behandlung in allen drei Vergleichseinheiten,
- Temperierung über Konvektoren,
- Lüftung durch First- und Seitenlüftungsklappen.

Der CO₂-Generator „Kodimax“ wurde von der Thyssengas GmbH und den Niederrheinischen Gas- und Wasserwerken entwickelt und arbeitet mit einem atmosphärischen Langbrenner und thermoelektrischer Zündung mit ständig brennender Zündflamme. Die entstehenden Abgase entweichen durch seitliche lamellen aus dem Generator, der in der Gewächshausmitte ca 1,8 m hoch aufgehängt ist. Der Anschlußwert beträgt ca. 12 kW, was einem stündlichen Verbrauch von ca. 1,2 m³ Erdgas entspricht.

Die Düngeeinrichtung für technisches CO₂ bestand aus einem 1.000 kg Tank, der im Freien aufgestellt war und in dem das technische CO₂ bei ca. 40 bar gelagert wurde. Nach einer Entspannung über mehrere Druckstufen wurde das CO₂ gasförmig in das Gewächshaus geleitet, in dem es in etwa 2,2 m Höhe über eine mittig in Längsrichtung verlegte Vitonschlauchleitung ausströmte. In den Gewächshäusern wurden die Temperatur, Feuchte, CO₂-Konzentration, CO-Konzentration, Helligkeit, Stellung der Lüftungsklappen und die Einspeisung von technischem CO₂ bzw. Erdgas aufgezeichnet, im Freien wurden die Klimawerte registriert.

Zum Zwischenbericht lagen u. a. folgende Ergebnisse vor:

- Die Resultate der Kulturversuche (s. Tab. 33) lassen erkennen, daß mit CO₂-Düngung bei Gemüsen ein deutlicher Mehrertrag erzielt werden kann. Zwischen den CO₂-Düngungsvarianten Kodimax-CO₂ mit Erdgasverbrennung und Technischen CO₂ ergaben sich keine signifikanten Ertragsunterschiede [STRAELEN 1988, S. 19 ff.].

Tab. 33: Ergebnisse der Kulturversuche

Kultur	Einheit	ohne CO ₂	Kodimax CO ₂	techn. CO ₂
1986				
Kopfsalat, Früh-jahr	g/Kopf	304	379	405
Eissalat, Frühjahr	g/Kopf	499	510	495
Paprika, grün, Sommer	kg/m ²	5,76	6,48	7,20
Paprika, violett, Sommer	kg/m ²	6,16	6,36	7,28
Tomaten, Sommer	kg/m ²	8,59	9,31	9,26
Kohlrabi, Herbst	g/Knolle	310	341	338
Kopfsalat Herbst	g/Kopf	169	187	181
1987				
Eissalat, Frühjahr	g/Kopf	328	386	409
Kohlrabi, Frühjahr	g/Knolle	292	359	329
Paprika, grün, Sommer	kg/m ²	5,74	6,60	6,79
Paprika, violett, Sommer	kg/m ²	5,71	6,43	6,61
Tomaten, Sommer	kg/m ²	11,50	12,50	12,40
Kohlrabi, Herbst	g/Knolle	258	306	308
Kopfsalat Herbst	g/Kopf	230	261	259

Quelle: [STRAELEN 1988, S. 19]

- Die durchschnittliche CO₂-Konzentration in den angereicherten Gewächshäusern betrug 610 vpm (Technisches CO₂) bzw. 556 vpm (Kodimax), im ungedüngten Gewächshaus bei 376 vpm.
- Die Einspeisezeiten sind beim technischen CO₂ um 19% und beim CO₂-Verbrauch um 21% geringer als beim Kodimax. Dies wird auf unterschiedliche Mischungs- und Strömungsverhältnisse des warmen CO₂ aus dem Kodimax-Generator einerseits und des kalten technischen CO₂ andererseits zurückgeführt. Es wird beim Kodimax-Verfahren ein gleichmäßigere vertikale Konzentration vermutet und damit höhere CO₂-Verluste beim Lüften als bei der Düngung mit technischem CO₂.
- Trotz des CO₂-Mehrverbrauchs waren aufgrund des Preisunterschiedes von Erdgas und technischem CO₂ die Verbrauchskosten bei technischem CO₂ mit 1,13 DM/m² für die Beispielkultur um das 2,35 fache höher als für die Düngung mit dem CO₂ aus der Erdgasverbrennung (0,48 DM/m²).

Wirtschaftlichkeitsvergleiche

Wirtschaftlichkeitsvergleiche wurde u. a. von GANSLMEIER [1984] durchgeführt (Tab. 34 und Tab. 35). Die Kosten hängen wesentlich von den Annahmen, z. B. zum CO₂-Bedarf, ab.

Erwartungsgemäß ist die technische CO₂-Anreicherung deutlich teurer als die übrigen Verfahren.

Tab. 34: Anlagen- und Betriebskosten (3.000 m² Gewächshausfläche, 2 kg CO₂/(m² a))

CO ₂ -Träger und Ausbringungstechnik	Technisches CO ₂		kleine Gasbrenner im Gewächshaus		Abgas aus Erdgaskessel	
	Flaschenbündel	Tank	Propan	Erdgas	nur bei Heizbetrieb	ausschließlich zur CO ₂ -Düngung
Anlagekosten incl. Meßgeräte, Ventile	14000	14000	15000	15000	20000	25000
1. Gemeinkosten	3805	7460	3800	3300	4400	5500
2. Verbrauchskosten	9000	3900	2700	1800	---	1800
Gesamtkosten	12795	11360	6500	5100	4400	7300
Gesamtkosten (DM/(a m ²))	4,27	3,79	2,17	1,70	1,47	^s 2,43

^sBerichtigung des Zahlenwertes durch den Verfasser

Quelle: [GANSLMEIER 1984]

Tab. 35: Anlagen- und Betriebskosten (3.000 m² Gewächshausfläche, 3 kg CO₂/(m² a))

CO ₂ -Träger und Ausbringungstechnik	Technisches CO ₂		kleine Gasbrenner im Gewächshaus		Abgas aus Erdgaskessel	
	Flaschenbündel	Tank	Propan	Erdgas	nur bei Heizbetrieb	ausschließlich zur CO ₂ -Düngung
Anlagekosten incl. Meßgeräte, Ventile	14000	14000	15000	15000	20000	25000
1. Gemeinkosten	4155	7460	3800	3300	4400	5500
2. Verbrauchskosten	13500	5850	4050	2700	---	2700
Gesamtkosten	17655	13310	7850	6000	4400	8200
Gesamtkosten (DM/(a m ²))	5,89	4,44	2,62	2,00	1,47	2,73

Quelle: [GANSLMEIER 1984]

GLEU

In einer Arbeit von GLEU [1987] wird die CO₂-Anreicherung von Gewächshäuser unter energiewirtschaftlichen und bilanzmäßigen Gesichtspunkten der DDR analysiert. Im Ergebnis der Analyse wird die anaerobe technische Schlammfäulung zu Biogas und des Verbrennung im Gewächshaus für die Erzeugung von CO₂ als neues, energiewirtschaftliches Verfahren der CO₂-Düngung vorgeschlagen. Damit soll insbesondere das energieaufwendige Verflüssigen für die Bereitstellung und Lagerung von technischem CO₂ vermieden werden. Die Praktikabili-

tät dieser Vorgehensweise wurde mit der Entwicklung und Untersuchung eines CO₂-Generators auf der Basis von Biogasverbrennung getestet. Die Arbeit kommt zu dem Schluß, daß prinzipiell auf eine CO₂-Düngung von Gewächshäusern in der DDR aus volkswirtschaftlichen Gründen nicht verzichtet werden sollte. Die Biogas-CO₂-Düngung wird dafür – da eine CO₂-Düngung mit technischem CO₂ aus energie- und volkswirtschaftlichen Gründen abzulehnen ist und Erdgas für eine Rauchgasdüngung nicht zur Verfügung steht – als eine aussichtsreiche Alternative empfohlen.

3.6 Phytohygienische Effekte der CO₂-Anreicherung

CO₂

Während der optimale Konzentrationsbereich je nach Anbauprodukt zwischen 700 bis 2000 vpm liegen dürfte und Konzentrationen bis zu 5.000 vpm in der Regel zumindest nicht zu Schädigungen führen, wirken sich noch höhere Konzentrationen ungünstig auf das Pflanzenwachstum aus: Die Schädigungen umfassen

- Morphologische Veränderungen wie starkes Einrollen der Blattränder bei Rettich, Kopfsalat und Gurken, veränderte Blattstellung, Krümmung der Blattränder oder Einrollen der Blätter nach oben;
- Anomalien: Ausbildung kleinerer aber dickerer Blattspreiten;
- Vergilbungen der Blattränder (Chlorosen);
- Nekrosen: Blätter vertrocknen vom Rand her und sterben vollständig ab.

Bei Untersuchungen zeigten kälteverträglichen Arten bei mäßigem CO₂-Streß zumeist nur morphologische Veränderungen, leichte Schäden traten erst bei sehr hohen Konzentrationen oder bei langer Einwirkungsdauer auf. Die wärmebedürftigen Arten erweisen sich als empfindlicher gegenüber hohen CO₂-Konzentrationen. Sie reagieren schon nach relativ kurzer Behandlungsdauer bis hin zu letalen Schäden [KRUG 1991, S. 250]. Die Konzentrationsbereiche, in denen Pflanzenschädigungen durch CO₂ zu erwarten sind, liegen mit Werten von 10.000-30.000 vpm weit über dem MAK-Wert von 5.000 vpm und sind somit schon aus Gründen des Arbeitsschutzes indiskutabel.

Tab. 36: Kritische Begasungsdauer (Tage bis zur Reduktion der Wachstumsrate) bei kontinuierlicher CO₂-Anreicherung

Art	CO ₂ -Konzentration		
	10.000 vpm	20.000 vpm	30.000 vpm
Spinat	> 36	> 15	3
Kopfsalat	> 36	6-7	
Radies	21	8	4-5
Rettich	20	4-5	2
Kohlrabi	16		
Feldsalat	16		2-3

Quelle: [KRUG 1991, S. 250]

Begleitgase bei der Verbrennung

Das Schädigungspotential durch Luftschadstoffe hängt nicht nur von der Konzentration und der Einwirkungsdauer ab, sondern auch von weiteren Faktoren wie Entwicklungsstadium, Empfindlichkeit der Art oder der Sorte, von Umweltbedingungen wie Lichtintensität, Luftfeuchte etc. und von dem Auftreten weiterer Schadgase¹⁵. Potentielle Pflanzenschadstoffe, die als Begleitgase bei der Verbrennung von Erdgas entstehen, sind Stickoxide, Ethylen, Kohlenmonoxid, Ozon, Aldehyde und Ammoniak. Ihre Bewertung wurde in einer Literaturstudie von Lecker und Hege [HEGE 1990, S.30 ff.] untersucht.

Stickoxide

Akute Schädigungen durch NO_x kommen bereits ab Konzentrationen von 2 vpm vor, Wachstumshemmungen wurden bereits ab NO_x-Konzentrationen von 0,25 vpm beobachtet. Chronische Schäden durch NO_x traten bei Konzentrationen von 0,1 vpm auf.

Ethylen

Ethylen wird bei unvollständiger Verbrennung, aber auch von Pflanzen selbst gebildet. Es erhöht stark den Stoffwechsel der Pflanzen und bewirkt dadurch eine Beschleunigung des Alterns und des Stoffabbaus. Nach holländischen Untersuchungen können sich latente Schädigungen durch Ethylen schon bei Konzentrationen von 20 ppb einstellen. Die Grenze für akute Schäden liegt bei Kopfsalat bei 50 ppb. Schädymptome sind kurze Internodien, verdickte Stengel, das Einrollen von Blättern; vorzeitiger Blatt- und Blütenabwurf sowie vorzeitige Fruchtreife.

Kohlenmonoxid

Gegen Kohlenmonoxid, das wie Ethylen bei unvollständiger Verbrennung entsteht, sind Pflanzen weniger empfindlich, es wird aber dennoch die Einhaltung der MAK-Konzentration von 30 vpm empfohlen. Schädymptome sind Einrollen von Blättern, Adventivwurzelbildung und der Abwurf älterer Blätter, Blüten und Früchte.

¹⁵ Besonders schädlich sind Mischungen von Schwefeldioxid und NO_x [KRUG 1991].

Weitere Angaben zu pflanzenschädlichen Gaskonzentrationen werden von KRUG (1991) zitiert¹⁶:

- Schwefeldioxid: 0,2 µl/l und 220 µg/m³
- Ozon: 0,2 µl/l
- Formaldehyd: 0,7 µl/l
- Ammoniak: 10 µl/l
- Stickstoffdioxid: 20 µl/l und 750 µg/m³
- Kohlenmonoxid: 500 µl/l
- Fluorwasserstoff: 1 µg/m³
- Chlorwasserstoff: 400 µg/m³

Ozon, Aldehyde und Ammoniak erreichen in der Regel keine pflanzenschädigenden Werte [HEGE 1990, S.30 ff.].

Begleitgase und Keimbelastung bei der Nutzung von Rotteabluft für die CO₂-Anreicherung

Im Rahmen einer Literaturstudie wurden die bei der Kompostierung freiwerdenden organischen Verbindungen unter Hinzuziehung

- der Häufigkeit ihres festgestellten Auftretens in der Intensivrotte,
- der Größenordnung der MAK-Werte und
- von Hinweisen auf mögliche Pflanzenschädigungen

hinsichtlich ihrer Rangfolge für labortechnische Nachweise gewertet (s. Tab. 37). Eine Überschreitung in der Kompostierungsabluft der hier genannten Verträglichkeitswerte sei nicht zu befürchten [REINHOLD 1996].

¹⁶ verschiedene Quellen

Tab. 37: Pflanzenrelevante Begleitgase in der Kompostierungsabluft

Verbindung	Auftreten in Kompostabgasen	MAK-Wert, (Geruch)	Wirkung auf Pflanzen
größte Bedeutung			
Ethanal	Intensiv- und Nachrottesaure Startphase	50 ppm (stechend, fruchtig)	Schädigung von Kopfsalat ab 0,53 µg/ m ³
Benzen	Intensiv- und Nachrotte, fakultativ anaerob	2 ppm (aromatisch)	ab 0,1 mg/m ³ Wachsminderung gut biologisch abbaubar
nächst wichtige Schadgase			
Tetrachlorethen	Intensivrotte aerob	50 ppm (chloroformartig)	Wachsminderung ab 0,13 mg/m ³
Essigsäure	Nachrotte, aerob-anaerob	10 ppm (stechend)	keine Angaben
2-Hexanon	Intensivrotte	5 ppm (scharf)	keine Biokonzentration
Campher	Intensivrotte	2 ppm, (durchdringend)	keine Angaben
fallweise bedeutsam			
2-Methyl-1-propanol	Intensivrotte, aerob	100 ppm (fuselölartig)	gut biologisch abbaubar
1-Butanol	Intensiv- und Nachrotte	100 ppm (alkoholisch)	Keimminderung bei Salat ab 390.000 mg/m ³
2-Butanol	Intensivrotte, fakultativ anaerob	100 ppm (süßlich)	Keimminderung bei Salat ab 650.000 mg/m ³
Ethenylbenzen	Intensivrotte, aerob-anaerob	20 ppm (aromatisch)	keine toxische Wirkung bekannt
Essigsäuremethylester	Intensivrotte, aerob saure Startphase	200 ppm (unangenehm)	keine Angaben
Essigsäureethylester	Intensivrotte, aerob saure Startphase	400 ppm (fruchtig)	keine Angaben
Essigsäurepropylester	saure Startphase	200 ppm (fruchtig)	keine Angaben
Essigsäurebutylester	Intensivrotte	200 ppm (fruchtig)	keine Angaben
2-Propanon	Intensiv- und Nachrotte, aerob-anaerob saure Startphase, thermophile Phase	1000 ppm (süß aromatisch)	keine Bioakkumulation
2-Butanon	Intensivrotte, aerob-anaerob saure Startphase, thermophile Phase	200 ppm (süß aromatisch)	keine Angaben
2-Pentanon	Intensivrotte, aerob-anaerob	200 ppm (süß aromatisch)	keine Angaben
3-Pentanon	Intensivrotte, fakultativ anaerob	200 ppm (süß aromatisch)	keine Angaben
2-Heptanon	Intensivrotte, fakultativ anaerob	100 ppm (muffig)	keine Angaben
Methantiol	fakultativ anaerob, thermophile Phase	0,5 ppm (stechendfaulig)	ist in Spuren in Pflanzenteilen vorhanden

Quelle: [REINHOLD 1996]

3.7 Humanhygienische Aspekte der CO₂-Anreicherung

3.7.1 Wirkung von CO₂ auf den menschlichen Organismus

CO₂ wirkt bei Mangel an Sauerstoff als Stickgas, bei ausreichendem Sauerstoff und höheren Konzentrationen hat es eine narkotische, bei kleineren Konzentrationen eine erregende Wirkung auf das Atemzentrum (vgl. Tab. 38). Entsprechend dem Säurecharakter können sich lokale Reizwirkungen insbesondere an der Nasenschleimhaut, dem Rachen und den Augen sowie Hustenreiz bemerkbar machen.

Tab. 38: Wirkungen von CO₂ auf den menschlichen Organismus

CO ₂ - Konzentration in Vol %	Wirkung
bis 2,5	keine
ab 3	verstärkte und vertiefte Atmung
ab 4	Örtliche Reizung, Kopfschmerzen, Ohrensausen, Schwindelgefühl, Druck im Kopf, Herzklopfen, Pulsverlangsamung, psychische Erregung, Neigung zur Ohnmacht, seltener Erbrechen. Bei plötzlicher Einwirkung erfolgt eine Blutdrucksteigerung. Bei langsamer Steigerung der CO ₂ -Anreicherung ist eine Konzentration bis 8 Vol.% CO ₂ noch längere Zeit erträglich.
8-10	schnelle Bewußtlosigkeit, dann Tod durch Atemstillstand
ab 20%	in wenigen Sekunden vollkommene Lähmung der lebenswichtigen Zentren

Quelle: [MARNETTE 1988]

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) beträgt für CO₂ 5000 vpm = 0,5 Vol%. Der zusätzliche MAK-Kurzzeitwert beträgt 10000 vpm. Er darf innerhalb des 8 Stunden-Arbeitstages höchstens dreimal vorkommen und jeweils maximal 60 Minuten dauern, wenn der Durchschnittswert 5000 vpm nicht überschreitet.

3.7.2 Humanhygienische Aspekte der Begleitgase der CO₂-Anreicherung

Sowohl bei der Nutzung von Verbrennungsabgasen als auch von der Intensivrotteabluft treten organische und anorganische Begleitgase auf. Generell sind die aktuellen Vorschriften und Anforderungen zum Arbeitsschutz zu beachten und einzuhalten. Durch die Vorgaben der DIN 4793 sowie des DVGW Arbeitsblattes G 633 kann der Arbeitsschutz hinsichtlich der Nutzung von Verbrennungsabgasen als gewährleistet angesehen werden. Davon unberührt bleibt eine mögliche Gefährdung durch Bioaerosole in der Kompostierungsabluft beim Carobfermverfahren.

3.7.2.1 Gesundheitsrisiken durch Bioaerosole¹⁷

Bioaerosole aus Kompostierungsanlagen setzen sich aus Viren, Bakterien, Pilzen, Endotoxinen und Staub zusammen. Diese können

- Infektionen der Atemwege;
- allergische Erkrankungen;
- Infektionen der Haut oder von Schleimhäuten;
- systemische Mykosen (vor allem bei prädisponierten und Risikopersonen),
- Wirkungen von Mykotoxinen.

verursachen.

Pilze

Unter den kompostierungsrelevanten Pilzen wurde z.B. *Aspergillus flavus* als Produzent des äußerst pathogenen Aflatoxin bestimmt. Mycotoxine stehen auch in dem Verdacht, für die Entstehung des Organic Dust Toxic Syndroms (ODTS) von ursächlicher Bedeutung zu sein. Als potentieller Hauptverursacher dieses Krankheitsbildes gilt *Aspergillus fumigatus*, der eine Reihe von Mycotoxinen, z.B. Gliotoxin und Fumigatin, erzeugen kann. Es ist allerdings nicht erwiesen, ob Mycotoxine inhalativ in krankheitsauslösenden Dosen aufgenommen werden können. Das allergene Potential von Pilzen ist im Zusammenhang mit der Gesundheitgefährdung durch Kompostierungsanlagen als das größte Risiko unter den Pilzkrankungen einzuschätzen, da Infektionen durch Pilzsporen nur dann auftreten, wenn besondere Eintrittspforten oder Resistenzminderungen vorliegen. Allergische Reaktionen auf Pilzsporen betreffen im allgemeinen nur den Respirationstrakt. Über 80 Pilzgattungen sind mit einer Respirationallergie in Zusammenhang gebracht worden; hierzu zählen z. B.. Die bekanntesten allergenen Gattungen und Arten sind *Alternaria* spp., (bes. *Alternaria alternata*), *Aspergillus* spp. (bes. *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*), *Cladosporium* spp., bes. *Cladosporium herbarum*, *Epicoccum nigrum*, *Fusarium* spp. und *Penicillium* spp..

Bakterien

Zu den relevanten Krankheitsbildern, die durch Bakterien ausgelöst werden, zählen Atemwegsinfektionen, Pneumonie, Durchfallerkrankungen bei Säuglingen und Erwachsenen, Wundinfektionen, Aktinomykose, Nocardiosen, Gastroenteritis, Lungen- und Hirnhautentzündung, systemische Erkrankungen (Leibschmerzen, Übelkeit, Erbrechen, Durchfall) und Infektionen der Gallenblase und der abführenden Harnwege.

¹⁷ Für eine ausführliche Diskussion siehe [KOLLER 1996a]

Sonstige Krankheitserreger

Endotoxine sind meist hitzestabile Komplexe aus Lipopolysacchariden aus der Zellwand gramnegativer Bakterien, die beim Abbau abgestorbener Bakterien freigesetzt werden. Die Endotoxine bewirken nach Inhalation eine akute Entzündung der Atemwege (toxische Pneumonitis) oder eine chronisch granulomatöse Entzündung der Lungenbläschen. Die Wirkung der Endotoxine beruht vermutlich auf einer Stimulation der T-Zellen, die eine Monozyteninfiltration induzieren.

Als weitere Krankheitserreger in Bioaerosolen kommen Peptidoglykane, Viren und organischer Staub (Organic Dust Toxic Syndrom) in Betracht. Peptidoglykane sind Bestandteile der Zellwand grampositiver Bakterien, denen eine ähnliche Wirkung wie den Endotoxinen zugeschrieben wird. Als Auslöser von Atemwegsinfektionen werden u. a. Rhino-, Adeno-, Influenza-, Parainfluenza-, Corona- Masern- und Zytomegalieviren angegeben. Das Organic Dust Toxic Syndrom (ODTS) beginnt 4-6 Stunden nach der Exposition gegenüber organischem Staub. Als Symptome treten Fieber, Husten, Atemnot auf. Vereinzelt wurden Augenreizungen, wiederholte Infektionen der oberen Atemwege und Lungenentzündung beobachtet. Als Auslöser gelten Endotoxine, Mycotoxine (z.B. Aflatoxine), inerte Stäube, Chemikalien (Pestizide) und Insekten (z. B. Milben)

3.7.2.2 Gefährdungsschwellen und Grenzwertempfehlungen

In der Literatur finden sich nur wenige Angaben zu Gefährdungsschwellen und Grenzwertempfehlungen (vgl. Tab. 39). Die Ermittlung der erforderlichen Dosis-Wirkungsbeziehungen ist mit außerordentlichen methodischen Problemen behaftet. Die Schwierigkeiten beruhen u. a.

- auf dem breiten Spektrum der in Frage kommenden Mikroorganismen
- der Vielfalt der Inputmaterialien
- den schwankenden Belastungskonzentrationen und Umgebungsbedingungen
- den synergistischen, antagonistischen Effekten und dem schwer zu fassenden Einfluß der toxischen Gesamtsituation.

Tab. 39: Angaben zu Gefährdungsschwellen

Krankheit/Symptom	Noxe	Gefährdungs- bzw. Auslöseschwelle
Holzarbeiter-Alveolitis	Aspergillus fumigatus	10 ⁶ KBE/m ³
Korkarbeiter-Alveolitis	Penicillium glabrum u.a.	10 ⁶ -10 ⁷ KBE/ m ³
EAA- Symptome	Actinomyceten/Pilze	10 ⁶ -10 ¹⁰ KBE/m ³
Sensibilisierung	Actinomyceten/Pilze	10 ⁸ -10 ¹⁰ KBE/m ³
EAA-Symptome	Sporenkonzentration	10 ⁹ KBE/ m ³
EAA-Symptome	thermophile Actinomyceten	> 10 ⁹
Toxische Pneumonitis	Schimmelpilze	10 ⁷ KBE/m ³
Atemwegsentzündung	Schimmelpilze	10 ⁵ KBE/m ³
Toxische Pneumonitis	gramnegative Stäbchen	10 ⁵ KBE/m ³
Atemwegsentzündung	gramnegative Stäbchen	10 ³ KBE/m ³
Keine respiratorischen Effekte	Endotoxine in Stäuben aus d. Baumwollver-arbeitung (Schwelle)	90 EU/ m ³ (=7,5 ng/m ³)
Schwellenwert	Endotoxin, durch-schnittliche Belastung über 8 Stunden	30 ng/m ³
Toxische Pneumonitis	Endotoxin	1 µg/m ³
Atemwegsentzündung	Endotoxin	0,02 µg/m ³

Quelle: [WABOLU 1996]

Daher ist auch die Angabe von Grenzwerten zur Zeit wissenschaftlich umstritten. Dennoch existieren Vorschläge (Tab. 40), die bereits vereinzelt Eingang in Genehmigungsrichtlinien auf Länderebene gefunden haben.

Tab. 40: Grenzwertempfehlungen

Parameter	Empfohlener Grenzwert
Gesamtakterien	1*10 ⁴ / m ³ Luft
Gesamtakterien	5*10 ³ /m ³ Luft
gramnegative Bakterien	1*10 ³ /m ³ Luft
Endotoxine	0,1 µg/ m ³ Luft

In der Literatur finden sich allerdings keine einheitlichen Aussagen bezüglich geeigneter Leitkeime und Summenparameter für die Beurteilung der hygienischen Relevanz. Eine Auswahl bisher verwendeter Summenparameter und Leitkeime zeigt Tab. 41.

Tab. 41: Leitkeime und Summenparameter

Spezies	Auswahlkriterium
Gesamtbakterien (aerob)	Ableiten des Gesamtemissionspotentials
Staphylococcus aureus	Leitkeim in der Krankenhaushygiene, relativ trockenheits- und hitzebeständig, Erreger von Pyodermien
aerobe Sporenbildner	Endosporenbildner, trocken- und hitzebeständig
Enterobacteriaceen,	Fäkalindikator, Endotoxinrelevanz
gramnegative Stäbchen	Fäkalindikator, Endotoxinrelevanz
E. coli, Coliforme	Fäkalindikator nach Trinkwasserverordnung
Fäkalstreptokokken	Fäkalindikator nach Trinkwasserverordnung
Salmonellen	Pathogenität
thermophile / thermotolerante Actinomyceten	Erreger der exogenen allergischen Alveolitis
Streptomyces	Allergenes Potential
Saccharopolyspora	Allergenes Potential
Saccharomonospora	Allergenes Potential
Thermoactinomyces	Allergenes Potential
Gesamtpilze	Ableiten des Gesamtemissionspotentials
Schimmelpilze	Ableiten des Gesamtemissionspotentials
Aspergillen, Aspergillus fumigatus	infektiöses und allergenes Potential
Penicillien	Allergenes Potential
Mucorales	infektiöses und allergenes Potential
Cladosporium	infektiöses und allergenes Potential
Hefen (Candida, Cryptococcus)	infektiöses und allergenes Potential

Bei einer Orientierung auf Leitkeime für eine Erfassung der hygienischen Relevanz scheinen *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus* Gruppe, *Aspergillus niger* und *Cladosporium* spp. besonders geeignet. Bisher wurde häufig *Aspergillus fumigatus* als Indikatorkeim herangezogen. Er ist oportunistisch pathogen, toxisch und allergen. Im Aerosol werden jedoch auch andere Pilze in einer Konzentration gefunden, die in anderen Arbeitsbereichen zu Berufskrankheiten geführt haben. *Aspergillus flavus* kann eine Aspergillose verursachen, produziert das hochtoxische Aflatoxin B1 und kann Allergien induzieren. Das Aflatoxin könnte auch eine Bedeutung für das Organic Dust Toxic Syndrom (DOTS) oder bei dem Krankheitsbild der Mucos Membrane Irritation (MMI) besitzen. *Aspergillus niger* ist ebenfalls opportunistisch pathogen (Aspergillose), allergen (Typ 1 und 3 Allergie) und toxisch. *Cladosporium herbarum* gehört neben *Alternaria alternata* und *Aspergillus fumigatus* zu den am meisten vorkommenden Schimmelpilzen, die Allergien induzieren. *Cladosporium* ist auch in der natürlichen Umgebung nachweisbar. Schon 3×10^3 KBE/m³ können vermutlich eine Allergie hervorrufen.

3.7.2.3 Bioaerosolbelastungen

Eine Zusammenfassung von Keimgehalten nach Arbeitsbereichen zeigt Tab. 42. Dabei ist zu beachten, daß die Anlagen in unterschiedlichem Umfang mit z.T. unterschiedlichen Sammel-

geräten und Kultivierungsmethoden zu verschiedenen Jahreszeiten beprobt wurden. In allen Bereichen von Kompostierungsanlagen treten gegenüber der unbelasteten Außenluft erhöhte Keimkonzentrationen auf. Die Belastungen überschreiten häufig die vorgeschlagenen Empfehlungen und Orientierungen für Grenzwerte. Besonders Arbeiten mit einer hohen Materialbewegungsintensität wie Umsetzen von Mieten, Befüllen und Entleeren von Rotteboxen, Abkippen der Abfälle, Shreddern und Absieben führen zu erhöhten Belastungen.

Tab. 42: Mittlere Keimkonzentrationen (verschiedene Quellen)

Häufige mittlere Gehalte [KBE/m ³]	Gesamt-bakterien	Gramnegative Bakterien	Schimmelpilze	Aspergillus fumigatus	Thermophile Actinomyceten
Anlieferung	10 ⁴ -10 ⁵ max: 4*10 ⁷	um 10 ³ max 10 ⁴	um 10 ⁴	0-10 ³	2*10 ³ -9*10 ⁴ max. 2*10 ⁵
Vorbehandlung	5*10 ⁴	6*10 ²	4*10 ⁴	3*10 ³	4*10 ³
Sortierung	10 ⁴ -6*10 ⁵	10 ³ -10 ⁴	um 10 ⁴	8*10 ³	4*10 ³ -6*10 ⁴
Intensivrotte	10 ⁴ -3*10 ⁵ max.: 7*10 ⁷	0-7*10 ³ max. 3*10 ⁴	10 ³ -2*10 ⁴ max. 5*10 ⁷	10 ² -2*10 ³	10 ² -2*10 ⁴
Nachrotte	10 ⁴ -10 ⁵	0- 5*10 ²	um 10 ⁴	um 10 ⁴	4*10 ³

3.7.2.4 Zusammenfassung

Für die Beurteilung gesundheitlicher Risiken im Arbeitsbereich und in der Umgebung von Kompostierungsanlagen liegen keine ausreichende Bewertungsgrundlagen vor. Das betrifft nicht nur die Unsicherheiten der Bioaerosolanalytik selbst, sondern auch die humanhygienische Beurteilung von Belastungsdaten. Der derzeitige Wissenstand erlaubt keine wissenschaftlich begründete Ableitung von Grenz- oder Abstandswerten. Auch die in der Literatur häufig vorgeschlagene Ermittlung von Leitkeimen gestattet keine Abschätzung der vielfältigen Gefährdungspotentiale von Bioaerosolen. Ein vollständiger Nachweis aller chemischer und biologischer Spezies mit Schädigungspotential und die Ableitung entsprechender Dosis-Wirkungsbeziehungen ist praktisch aufgrund des enormen Aufwandes nicht durchführbar. Daher sollten zur Beurteilung der immunologischen, genotoxikologischen, zytotoxikologischen und mutagenen Belastungen verstärkt Methoden des Biomonitoring zum Einsatz kommen.

Kompostierungsabluft ist ein komplex zusammengesetztes Stoffgemisch, das außer einem Infektions- und einem Irritationspotential auch ein allergenes und immunmodulatorisches Risikopotential, sowie ein zyto- und genotoxisches und mutagenes Potential besitzt. Von diesen und weiteren Gefahrenpotentialen ist u. a. auszugehen, da eine Kontamination des Bioabfalls mit organischen Schadstoffen und Restmüll zu erwarten ist. Auch im Kompostierungsprozeß selbst wurde die Bildung risikobehafteter Reaktionsprodukte, z. B. kanzerogener polykonden-

sierter aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) nachgewiesen. Akute Wirkungen auf die Lungenfunktion und die Aktivierung immunkompetenter Zellen im Respirationstrakt sind belegt.

Das allergene Gesamtpotential ist nicht überschaubar und entzieht sich daher einer Bewertung auf wissenschaftlicher Basis. Das betrifft sowohl die Risikoabschätzung einzelner allergener Komponenten als auch die von Summenparametern. Allerdings ist in Kompostierungsanlagen von einer Vervielfachung der emittierten Allergen-Mengen und der Expositionsdauer gegenüber der natürlichen Umgebung und damit von einer Potenzierung der Allergenbelastung von Exponierten auszugehen. Als berufsbedingte biologische Risiken sind bisher mindestens 193 biologische Agenzien (Viren, Bakterien, Pilze) bekannt, gegenüber denen ca. 20 Berufsgruppen exponiert sind. Zu diesen zählen auch die Werk tätigen aus Kompostierungsanlagen, die vorrangig der Exposition gegenüber Allergenen ausgesetzt sind.

Ein vollständiger Nachweis aller chemischer und biologischer Spezies mit Schädigungspotentialen für den Menschen ist aufgrund des zeitlichen und analytischen Aufwands nicht realisierbar. Die Bewertung von Risikopotentialen über die Erfassung von geeigneten Leitkeimen von Hauptkomponenten ist prinzipiell ein möglicher Weg für eine wissenschaftlich begründete Abschätzung der Risikopotentiale. Allerdings läuft man bei dieser Vorgehensweise Gefahr, einige Gefahrenpotentiale überzubewerten und andere nicht ausreichend zu berücksichtigen. Auch sind selbst viele der bekannten Spezies in ihrer Bedeutung für den Menschen nicht oder nur unzureichend bekannt, was besonders für ihre antigenen Strukturen gilt.

3.8 Gewächshausbeheizung

In Deutschland sind ca 3546 ha Gewächshausfläche, d. h. weit über 90% der Gewächshausflächen beheizbar. Die Beheizung der Gewächshausflächen erfolgt überwiegend mit extra leichtflüssigem Heizöl (EL) und zu knapp 30% mit Erdgas (Tab. 43). Eine Nutzung der Abgase von ölgefeuerten Heizungen für die CO₂-Anreicherung kommt vor allem aufgrund der Schwefelbestandteile praktisch nicht in Betracht. Im Zusammenhang mit der CO₂-Anreicherung im Gartenbau nehmen erdgasbetriebene Systeme eine Sonderstellung ein, da sich ihre Abgase unmittelbar verwenden lassen. Erdgas ist in den letzten Jahren zu einem bedeutenden Energieträger im Unterglas-Gartenbau der Bundesrepublik Deutschland geworden, wozu auch staatliche Förderprogramme für die Umstellung auf Erdgas beigetragen haben.

Tab. 43: Gewächshausflächen nach Energieträger für Beheizung

Energieträger	Gewächshausfläche ¹⁸ in ha	Menge	Einheit	Gewächshausfläche in ha	Menge	Einheit
Kohle, Koks	364,64	95.232	Mg	39,58	18.903	Mg
Heizöl S	109,09	18.094	Mg	2,06	239	Mg
Heizöl EL	2.747,58	439.473	1.000 l	42,14	7.302	1.000 l
Erdgas	961,79	197.343	1.000 m ³	9,18	3.148	1.000 m ³
Flüssiggas	256,90	8.725	Mg	5,09	312	Mg
andere Energie	19,00			26,02		

Quelle: zusammengestellt nach [GARTENBAUERHEBUNG 1994, S. 176 ff.]

Für die Beheizung von Gewächshäusern mit gasförmigen Brennstoffen sind folgende Systeme üblich:

- Zentrale Heizkessel mit Wasser als Wärmeträger im Gewächshaus
- Luftheizsysteme, besonders in Kombination mit einer CO₂-Anreicherung
- Blockheizkraftwerke mit Eigenstromerzeugung, z. B. für die Pflanzenbelichtung¹⁹.

Bei den Luftheizsystemen dominieren direkt befeuerte Luftherhitzer. Besondere Bedeutung im Hinblick auf die CO₂-Anreicherung kommt den CO₂-Kanonen zu, die direkt im Gewächshaus installiert werden.

Die Auslegung der Gewächshausbeheizung erfolgt nach dem Wärmebedarf. Der Wärmebedarf ist die Heizleistung²⁰, die eine Heizungsanlage erbringen muß, um bei einer bestimmten Außentemperatur eine gewünschte Innentemperatur im Gewächshaus zu halten. Während die gewünschte Innentemperatur von der Anbaukultur bestimmt wird, wird die Normaußentemperatur durch die DIN 4701 in Abhängigkeit vom ausgewählten Standort vorgegeben (s.Tab. 44).

¹⁸ Die Summe der Flächen ist größer als 3.546 ha, manche Gartenbaubetriebe für die Abdeckung der Grundlast und die Abdeckung der Spitzenlast unterschiedliche Heizungssysteme bzw. Energieträger verwenden.

¹⁹ s. hierzu ausführlicher (KTBL 651)

²⁰ Einheit Watt (W) oder Kilowatt (kW)

Tab. 44: Normaußentemperatur nach DIN 4701 von ausgewählten Standorten

Standort	Temperatur in °C
Berlin	-14
Düsseldorf	-10
Erfurt	-14
Frankfurt	-12
Hannover	-14
München	-16
Oldenburg	-10
Schwerin	-12
Stuttgart	-12

Quelle: [KTBL 1994]

Für die überschlägige Bestimmung des Wärmebedarfs können Tabellen herangezogen werden. Tab. 45 zeigt beispielhaft, wie sich die Auslegungstemperaturdifferenz und die Verglasung auf den Wärmebedarf auswirken.

Tab. 45: Wärmebedarf eines Breitschiffhauses

Grundfläche	Auslegungstemperaturdifferenz ΔT					
	10 K	15 K	20 K	25 K	30 K	35 K
Wärmebedarf in W/m ² Grundfläche						
1.000 ¹⁾	121	182	242	303	364	424
1.000 ²⁾	80	120	159	200	240	279
5.000 ¹⁾	101	151	201	251	302	352
5.000 ²⁾	71	106	142	177	211	247

Breitschiffhaus: 2,8 m Stehwandhöhe, 12,8 m Schiffbreite

¹⁾ Einfachverglasung an allen Außenwänden

²⁾ Einfachglasbedachung an Dachflächen, Doppelglasbedachung an Stehwand und Giebelflächen, einlagiger aluminierter Energieschirm

Quelle: [KTBL 1994]

Vom Wärmebedarf zu unterscheiden ist der Wärmeverbrauch²¹, mit dem man die Menge an Heizenergie bezeichnet, die beim Betrieb einer Heizungsanlage in einem festen Zeitraum benötigt wird. Der Wärmeverbrauch wird wesentlich von dem Jahreswitterungsverlauf, vom Gewächshaustyp, von der Klimastrategie im Gewächshaus und von dem Bewässerungs- und Heizungssystem bestimmt. Auch der Wärmeverbrauch kann über Tabellenwerke überschlägig kalkuliert werden (Tab. 46). Dort sind auch Korrekturfaktoren zusammengestellt, die bei der Berechnung des Jahreswärmeverbrauch Standort und Betriebsbedingungen berücksichtigen.

²¹Einheit z. B. Kilowattstunde (kWh)

Tab. 46: Wärmeverbrauch von Gewächshausanlagen mit Einfachglasbedachung

Monat	Innentemperatur-Sollwerte				
	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
Wöchentlicher Wärmeverbrauch in kWh/m ² Grundfläche					
Januar	6,3	14,1	22,8	31,5	40,0
Februar	4,5	11,2	19,3	27,9	36,4
März	1,5	6,0	12,8	20,7	29,0
April	0,2	2,1	6,8	13,2	20,3
Mai	-	0,4	2,8	7,4	13,1
Juni	-	0,1	1,0	4,2	8,9
Juli	-	-	0,4	2,8	7,1
August	-	-	0,5	3,0	7,5
September	-	0,2	1,8	6,1	12,2
Oktober	0,1	1,3	5,7	12,8	20,7
November	1,5	6,1	13,6	22,1	30,7
Dezember	5,0	12,8	21,6	30,5	39,4
Insgesamt/Jahr	83,1	235,6	471,9	789,3	1149,0

Quelle: [KTBL 1994, S. 51 ff.]

Art	Anbau im	
	Frühjahr	Herbst
Aubergine	11/18 → 18/14	22/18
Gurken	22/18 → 18/14	16/14
Kohlrabi	12/10 → 10/6	12/10 → 10/6
Kopfsalat	12/10 → 8/6	3/3
Paprika	22/18 → 18/14	16/14
Petersilie	16/14 → 12/10	12/10
Porree	16/14 → 12/10	
Rettich	16/14 → 10/6	12/10 → 10/6
Tomaten	20/16 → 16/14	16/14
Zucchini	18/14 → 16/14	12/10

Quelle: [FAUSTZAHLEN 1993]

3.9 Kosten- und Ertragsstrukturen

Für die Einordnung der Kosten für eine CO₂-Anreicherung sind in den folgenden Tabellen Kosten- und Ertragsstrukturen für den Gartenbau zusammengestellt. Der Spezialaufwand (Saat- und Pflanzengut, Düngemittel, Heizmaterial etc.) umfaßt ca. 32% des betrieblichen Aufwandes im Gemüsebau (Tab. 47). Unter den Kostenstellen des Spezialaufwandes dominieren die Ausgaben für Saat- und Pflanzengut, gefolgt von Heizmaterial, Sonstiges und Düngemittel. Neben dem Spezialaufwand enthält der Unternehmensaufwand Kosten für Löhne, Gehälter, Sozialabgaben, Berufsgenossenschaften, Abschreibungen und Unterhaltungskosten für Maschinen, Geräte, Gewächshäuser, Heizungsanlagen, Wirtschaftsgebäude, Betriebsversicherungen, Zinsen, Pachten etc.. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Kostenstrukturen im Zier-

pflanzenbau: auch hier hat der Spezialaufwand einen Anteil von gut 30% am Unternehmensaufwand, ebenfalls mit den größten Posten für Saat- und Pflanzengut und für Heizmaterial (Tab. 48). Die spezifische Spezialaufwand betrug 1994 nach Tab. 48 im Zierpflanzenbau ca. 13 DM/(m² a) und im Gemüsebau 4 DM/(m² a), der spezifische Gewinn 3,87 DM/(m² a) im Gemüsebau und 4,88 DM/(m² a) im Zierpflanzenbau.

Tab. 47: Spezialaufwand in Gemüsebaubetrieben

Kostenstelle	DM/m ²	%
Saat und Pflanzengut	4,46	38
Düngemittel	1,13	10
Pflanzenschutzmittel	0,56	5
Heizmaterial	2,92	25
Strom	0,67	6
Wasser	0,24	2
Sonstiges	1,70	14
Spezialaufwand insg.	11,68	100
desgl. in % des Betriebsaufwandes		32

Quelle: zusammengestellt nach Agrarbericht 1988 in [KRUG 1991, S 84]

Tab. 48: Wirtschaftsdaten der Gartenbaubetriebe, früheres Bundesgebiet, Kalenderjahr 1994

	Einheit	Gemüse	Zierpflanzen
Unternehmensertrag	DM/ha GG	169.386	465.998
Unternehmensaufwand	DM/ha GG	130.734	417.216
dar. Spezialaufwand	DM/ha GG	41.458	128.641
Saat. - und Pflanzengut	DM/ha GG	14.419	55.613
Düngemittel	DM/ha GG	3.543	8.724
Pflanzenschutz	DM/ha GG	2.004	2.456
Heizmaterial	DM/ha GG	8.870	30.231
Strom	DM/ha GG	1.524	4.861
Wasser	DM/ha GG	872	1.320

Quelle: zusammengestellt nach Daten aus WWW-Seiten des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 3/1997

Ausgehend von den Wirtschaftsdaten nach Tab. 48 läßt sich der Bereich ermitteln, in dem eine CO₂-Anreicherung wirtschaftlich vorteilhaft ist. Tab. 49 zeigt die prozentuale Gewinnentwicklung im Gemüsebau in Abhängigkeit von der Ertragssteigerung durch die CO₂-Anreicherung und von den spezifischen Kosten für die CO₂-Düngung. Bei einer mittleren Ertragssteigerung von 20% dürften die zusätzlichen Kosten für die CO₂-Anreicherung demnach 3 DM/(m² a) für eine Erhöhung des Gewinns nicht übersteigen. Bei Begasungskosten von mehr als 5 DM ist keine Steigerung des spezifischen Gewinnes zu erwarten, bei niedrigen Begasungskosten bis zu 1 DM wäre die CO₂-Düngung bereits ab einer Ertragssteigerung von 7% vorteilhaft.

Tab. 49: Gewinnentwicklung (in %) in Abhängigkeit von Kosten und Ertragssteigerung bei der CO₂-Anreicherung, Gemüsebau

Ertragssteigerung in %	Kosten für CO ₂ -Anreicherung in DM/(m ² * a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	-4	-30	-56	-82	-107	-133	-159	-185	-211	-237
6	0	-25	-51	-77	-103	-129	-155	-181	-207	-232
7	5	-21	-47	-73	-99	-125	-150	-176	-202	-228
8	9	-17	-43	-68	-94	-120	-146	-172	-198	-224
9	14	-12	-38	-64	-90	-116	-142	-168	-193	-219
10	18	-8	-34	-60	-86	-111	-137	-163	-189	-215
11	22	-4	-29	-55	-81	-107	-133	-159	-185	-211
12	27	1	-25	-51	-77	-103	-129	-154	-180	-206
13	31	5	-21	-47	-72	-98	-124	-150	-176	-202
14	35	10	-16	-42	-68	-94	-120	-146	-171	-197
15	40	14	-12	-38	-64	-89	-115	-141	-167	-193
16	44	18	-7	-33	-59	-85	-111	-137	-163	-189
17	49	23	-3	-29	-55	-81	-107	-132	-158	-184
18	53	27	1	-25	-50	-76	-102	-128	-154	-180
19	57	32	6	-20	-46	-72	-98	-124	-150	-175
20	62	36	10	-16	-42	-68	-93	-119	-145	-171
21	66	40	14	-11	-37	-63	-89	-115	-141	-167
22	71	45	19	-7	-33	-59	-85	-111	-136	-162
23	75	49	23	-3	-29	-54	-80	-106	-132	-158
24	79	53	28	2	-24	-50	-76	-102	-128	-154
25	84	58	32	6	-20	-46	-72	-97	-123	-149
26	88	62	36	10	-15	-41	-67	-93	-119	-145
27	92	67	41	15	-11	-37	-63	-89	-115	-140
28	97	71	45	19	-7	-33	-58	-84	-110	-136
29	101	75	49	24	-2	-28	-54	-80	-106	-132
30	106	80	54	28	2	-24	-50	-76	-101	-127

Deutlichere ökonomische Vorteile zeigt die CO₂-Anreicherung im Zierpflanzenbau (Tab. 50), da hier einerseits höhere spezifische Erträge erzielt werden und andererseits die CO₂-Anreicherungskosten einen kleineren Anteil am Spezialaufwand haben. Bei einer mittleren Ertragssteigerung von 20% wäre eine CO₂-Anreicherung selbst bei spezifischen CO₂-Anreicherungskosten von 9 DM/(m² a) vorteilhaft, für mittlere Anreicherungskosten von 3-5 DM/(m² a) ergeben sich bei mittleren Ertragssteigerungen von 20% noch Gewinnsteigerungen um 120 - 80%, bei niedrigen Anreicherungskosten unter 2 DM/(m² a) wäre eine Gewinnsteigerung noch bei Ertragssteigerungen unter 5% zu erwarten.

Tab. 50: Gewinnentwicklung (in %) in Abhängigkeit von Kosten und Ertragssteigerung bei der CO₂-Anreicherung, Zierpflanzenbau

Ertragssteigerung in %	Kosten für CO ₂ -Anreicherung in DM/(m ² * a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	27	7	-14	-34	-55	-75	-96	-116	-137	-157
6	37	16	-4	-25	-45	-66	-86	-107	-127	-148
7	46	26	5	-15	-36	-56	-77	-97	-118	-138
8	56	35	15	-6	-26	-47	-67	-88	-108	-129
9	65	45	24	4	-17	-37	-58	-78	-99	-119
10	75	55	34	14	-7	-27	-48	-68	-89	-109
11	85	64	44	23	3	-18	-38	-59	-79	-100
12	94	74	53	33	12	-8	-29	-49	-70	-90
13	104	83	63	42	22	1	-19	-40	-60	-81
14	113	93	72	52	31	11	-10	-30	-51	-71
15	123	102	82	61	41	20	0	-21	-41	-62
16	132	112	91	71	50	30	9	-11	-32	-52
17	142	121	101	80	60	39	19	-2	-22	-43
18	151	131	110	90	69	49	28	8	-13	-33
19	161	141	120	100	79	59	38	18	-3	-23
20	171	150	130	109	89	68	48	27	7	-14
21	180	160	139	119	98	78	57	37	16	-4
22	190	169	149	128	108	87	67	46	26	5
23	199	179	158	138	117	97	76	56	35	15
24	209	188	168	147	127	106	86	65	45	24
25	218	198	177	157	136	116	95	75	54	34
26	228	207	187	166	146	125	105	84	64	43
27	237	217	196	176	155	135	114	94	73	53
28	247	226	206	185	165	144	124	103	83	62
29	257	236	216	195	175	154	134	113	93	72
30	266	246	225	205	184	164	143	123	102	82

4 Methodik der Ökobilanzierung

4.1 Definition

Die Beurteilung verschiedener Verfahren der CO₂-Anreicherung erfolgt in Anlehnung an die Methodik der Ökobilanzierung. Unter Ökobilanzierung soll hier im Sinne des DIN Entwurfs zu Produktökobilanzen²² [ISO 14040, S. 2] ein Instrumentarium verstanden werden, das eine Abschätzung von Umweltaspekten und produkt- bzw. dienstleistungsspezifischen potentiellen Umweltwirkungen durch

- die Zusammenstellung einer Sachbilanz von relevanten Input- und Outputflüssen eines Systems;
- die Beurteilung der mit diesen Inputs und Outputs verbundenen potentiellen Umweltwirkungen
- und durch die Auswertung der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungen hinsichtlich der Zielstellung der Ökobilanz

ermöglicht²³.

Die Ökobilanz untersucht die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung. Die allgemeinen Kategorien der zu berücksichtigenden Umweltwirkungen umfassen die Nutzung von Ressourcen, menschliche Gesundheit und ökologische Wirkungen [ISO 14040, S. 2]. Die Ökobilanz dient der Offenlegung von Schwachstellen, der Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten und als Entscheidungsgrundlage für Beschaffung und Einkauf [UBA 1992].

Den prozeduralen Charakter der Ökobilanzierung betont BAUMANN [1995]:

„Life cycle assessment is a procedure with the purpose to improve the environmental performance of the industrial system by comparing alternative means for obtaining functions delivered by the industrial system. In the procedure, models relevant to the problem situation are constructed to compare the differences between alternatives by representing flows of matter and energy related to the function-in-focus for each compared alternative. The flows that pass the system boundary to the part of the system environment that is the ecosphere are to be environmentally assessed and those that pass the system boundary to the part of the system environment that

²² Nach einer persönlichen Mitteilung von Herrn Giegrich, IFEU-Institut, wird im überarbeiteten Entwurf nur noch die Bezeichnung Ökobilanz anstelle Produktökobilanz verwendet werden. Dies ist zu befürworten, da das Wesentliche beim Vergleich von Umweltbelastungen der Dienstleistungsaspekt, d.h. der Systemnutzen ist, der mehr oder weniger durch Produkte, aber auch Verfahren, Systeme, Verhaltensweisen und Produktgruppen geprägt sein kann. Im folgenden wird daher auch hier im Text ausschließlich der Begriff Ökobilanz verwendet.

²³ Für einen Abriss zur historischen Entwicklung s. [UBA 1995], eine kürzere Einführung gibt [UNEP 1996], die zur Zeit vermutlich umfassendste Darstellung zum Thema allgemein ist [CURRAN 1996].

is the technosphere are to be judged as their environmental impact have no relevance relative to the function-in-focus.“

Unter Ökobilanzierung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine abgeschlossene, bis ins Detail festgelegte Methodik zu verstehen, sondern vielmehr ein Methodeninstrumentarium entsprechend den obigen Definitionen. Darüber hinaus wird der Begriff Ökobilanzierung aber auch für volks- und betriebswirtschaftliche oder landplanerische ökologisch orientierte Analyse- und Bewertungsmethoden verwendet.

Der Bilanzbegriff, wie er in der technischen Verfahrenstechnik bereits seit Jahrzehnten in Form von Masse-, Energie- und Impulsbilanzen angewendet wird, trifft wörtlich nur für die Sachbilanz zu, in der Energie- und Massenströme der Vergleichssysteme unter Beachtung der grundlegenden Sätze zur Energie- und Massenerhaltung möglichst vollständig erfaßt werden. Die mit dem betriebswirtschaftlichen Begriff Bilanz gemeinte Erfassung von Aktiva und Passiva steht im übertragenen Sinne für die umfassende Aufstellung der Umweltvor- und -nachteile des untersuchten Systems und kennzeichnet mehr das Ziel als eine bestimmte Phase der Ökobilanzierung [KOLLER 1996].

Weitere Methoden für die zusammenfassende Beurteilung von Umweltwirkungen sind die

- ökologische Bewertung chemischer Stoffe,
- Ökobilanzen mit dem Ziel eines Eco-Controlling bzw. des Environmental Auditing für Unternehmen etc.,
- Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) mit denen die Umweltauswirkungen bestimmter Vorhaben auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Luft, Klima und Landschaft sowie Kultur- und Sachgüter einschließlich der Wechselwirkungen frühzeitig und umfassend ermittelt, beschrieben bewertet werden sollen,
- Technologiefolgenabschätzung für technische Systeme, die die Auswirkungen neuer Techniken auf die natürliche, die technische und die sozioökonomische Umwelt prognostizieren und bewerten soll,
- Ökobilanzierung von Räumen mit dem Ziel der Erforschung der Einflüsse menschlicher Wirtschafts- und Handlungsweisen auf räumliche Ökosysteme und der Feststellung ihrer Belastbarkeit,
- Produktlinienanalyse (PLA)²⁴, bei der neben ökologischen auch soziale Kriterien (z. B. zur Arbeitsqualität) und weitere Kriterien untersucht werden
- Risiko- und Störfallanalysen zur Abschätzung von Gefahren und Umweltschäden die z. B. mit plötzlichen Schadensereignissen verbunden sind.

²⁴ s. hierzu [GRIESSHAMMER] und [EBERLE 1996]

Die Ökobilanzierung selbst ist kein entscheidungstreffender Prozeß, kann aber den Entscheidungsraum so strukturieren, daß Vor- und Nachteile von Vergleichsvarianten deutlich werden und Entscheidungshilfen in verfahrenstechnischen bzw. abfallwirtschaftlichen Kompromißsituationen ableitbar sind. Eine eindeutige Aussage zugunsten einer Variante innerhalb eines Systemvergleichs im Hinblick auf die Relevanz der ökologischen Auswirkungen kann, besonders wenn die Zielgrößen pareto-optimal vorliegen, nur mittels hochaggrierender Methoden unter Verwendung subjektiver Gewichtungsfaktoren getroffen werden. Nach Ansicht von BAUMANN [1995] besteht hinsichtlich des Einsatzes der Ökobilanzierung als systemtechnisch ausgereiftes Instrumentarium für die Entscheidungsfindung noch deutlicher Entwicklungsbedarf.

4.2 Anforderungen an die Durchführung

Der seit August 1996 vorliegende Entwurf DIN EN ISO 14040 „Produktökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen“ beschreibt Prinzipien, allgemeine Anforderungen und Mindestanforderungen zur Durchführung von Ökobilanzen und zur Berichterstattung.

Mit dem Symmetrieprinzip wird gefordert, daß bei einem Systemvergleich die Bilanzgrenzen in allen Vergleichssystemen an der gleichen Stelle gezogen werden. Systeme müssen unter Anwendung derselben funktionellen Einheiten und äquivalenten methodischen Festlegungen (Systemgrenzen, Datenqualität, Allokationsverfahren...) verglichen werden. Hinsichtlich dieser Parameter müssen alle Unterschiede zwischen Systemen angegeben und im Bericht aufgeführt werden.

Das Prinzip der Transparenz verlangt, daß sowohl das Erkenntnisinteresse und die Verknüpfung zum Untersuchungsrahmen als auch die Herkunft und Werte der Bilanzdaten sowie die wesentlichen Systemfestlegungen und Randbedingungen mitgeteilt werden. Die berechneten Daten sollen auch in nichtaggregierter Form einsehbar sein. Der Entwurf der ISO 14040 betont, daß Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz eindeutig festgelegt und auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt werden müssen [ISO 14040, S. 10 ff.]. Das umfaßt die Benennung der Gründe für die Durchführung der Ökobilanz und der angesprochenen Zielgruppen und die Festlegung und eindeutige Beschreibung der Funktion des Systems (der Systeme), der funktionellen Einheit, der Allokationsverfahren, der Methode für die Wirkungsabschätzung und die anschließende Auswertung, der Anforderungen an die Daten, der Annahmen und Einschränkungen, der Art der kritischen Begleitung (sofern vorgesehen).

Bei vergleichenden Aussagen, die veröffentlicht werden, soll diese Beurteilung in Verbindung mit einem kritischen Begleitverfahren durchgeführt werden [ISO 14040, S. 11 ff.]. Unter der kritischen Begleitung wird ein Verfahren zur Klärung, ob eine Ökobilanz die Anforderungen dieser internationalen Norm an die Methodik, Datensammlung und Berichterstattung erfüllt verstanden [ISO 14040, S. 14 ff.].

Die kritische Begleitung soll

- die Übereinstimmung der Ökobilanz mit der Internationalen Norm,
- die wissenschaftliche Begründung und Praktikabilität der angewendeten Methoden,
- die Zweckmäßigkeit und Suffizienz des Daten in Bezug auf das Ziel der Ökobilanz,
- die Berücksichtigung der Einschränkungen und des Ziels bei der Auswertung der Ökobilanz und
- die Transparenz und Stimmigkeit des Berichtes sicherstellen.

4.3 Ablauf

Das Konzept "Ökobilanz" beruht auf vier Kernbestandteilen:

- einer Betrachtung des gesamten Lebensweges der Produkte,
- einer medienübergreifenden Betrachtung der mit dem Lebensweg verbundenen Umweltbelastungen,
- einer Beschreibung der zusammengefaßten Umweltbelastungen hinsichtlich ihrer Einflüsse auf mögliche Umweltauswirkungen,
- einer allgemein akzeptierten Bewertung mit dem Ziel, die Umweltbelastungen zusammenzufassen. Ihr kommt dabei eine Optimierungs- und Vergleichsfunktion zu.

Die wesentlichen Phasen einer Ökobilanz sind in Abb. 3 dargestellt. Alle Phasen werden in der Regel iterativ bearbeitet.

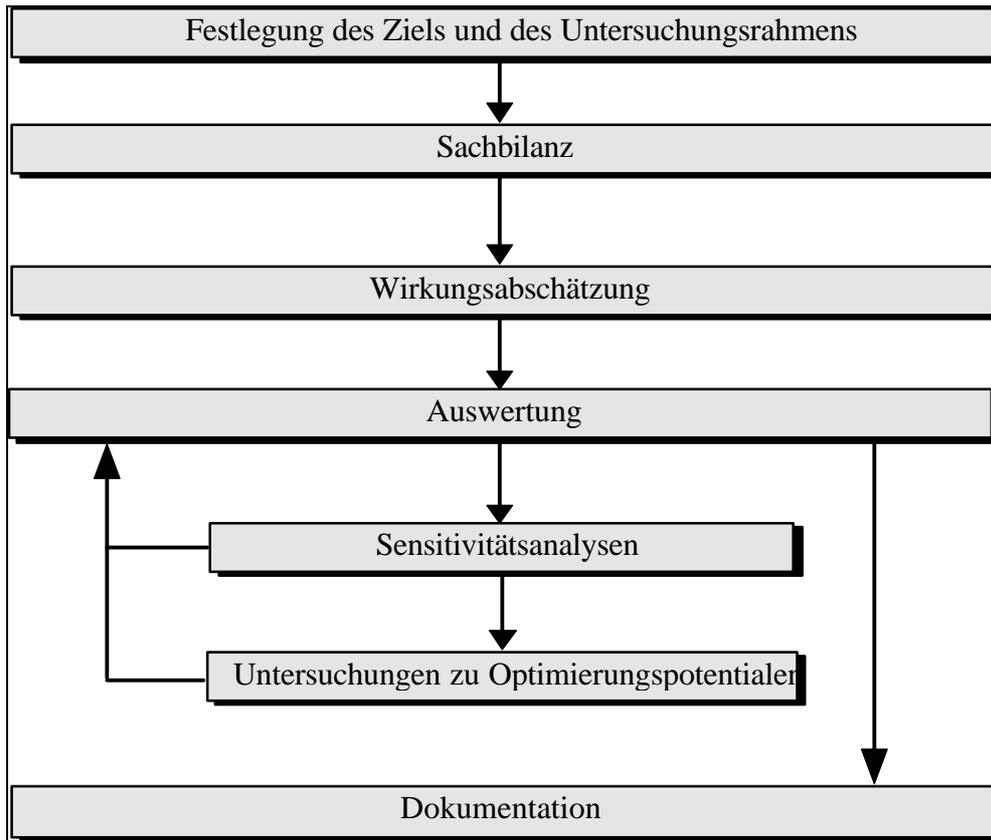


Abb. 3: Bestandteile einer Ökobilanz

4.3.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen soll u. a. folgende Punkte umfassen [ISO 14040]:

- die Funktionen des Systems/der Systeme,
- die funktionelle Einheit,
- die Systemgrenzen,
- die Allokationsverfahren,
- die Wirkungskategorien und die Methode für die Wirkungsabschätzung und die anschließende Auswertung,
- die Anforderungen an die Daten,
- die Annahmen und Einschränkungen.

Abschneidekriterien

Weitere Vereinbarungen betreffen die Abschneidekriterien. Diese legen fest, unter welchen Bedingungen Einzelaspekte bei der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden können. Hierzu zählt der Ausschluß von Lebenslaufphasen, die bei einem Vergleich mit anderen Produktgruppen grundsätzlich keine signifikanten Unterschiede erwarten lassen, der Ausschluß von Phasen, zu denen keine Informationen bzw. Daten vorliegen oder nicht beschaffbar sind, der

Ausschluß von Stoffströmen und Modulen, die nur von nachrangiger Bedeutung sind, z. B. Verbrauch an Hilfsstoffen wie Schmiermittel oder die mit der Herstellung der Produktionsanlagen verbundenen Umweltbelastungen. Das frühzeitige Abschneiden von identischen Modulen ist insofern umstritten, als es dem Anspruch, die Umweltbelastungen des ganzen „Lebensweges“ zu erfassen, widerspricht.

Räumliche Systemgrenzen

Durch die internationale Verflechtung industrieller Prozesse ist die Festlegung einer räumlichen Systemgrenze ein zentrales Problem. Beispielsweise kann der aus der Steckdose entnommene Strom innerhalb des europäischer Stromverbund nicht mehr eindeutig einem Ursprungsland zugeordnet werden. Je nach Herkunftsland unterscheiden sich die mit der Bereitstellung von Strom verbundenen Umweltbelastungen aber erheblich [REINHARDT 1993].

Behandlung von Sekundärrohstoffen

Vereinbart werden muß, wie die Bereitstellung und Entsorgung von Sekundärstoffen bewertet werden soll²⁵. Weitgehend Konsens herrscht darüber, daß aus vorgelagerten Prozessen ausgeschleußte Reststoffe „umsonst“ anfallen und die ökologische Aufwendung erst mit ihrer Fassung und Aufbereitung beginnen. Alle weiteren Aufwendungen einschließlich der Entsorgung am Ende des Lebensweges fallen dem Abprodukt zu.

Zeitliche Systemgrenzen

Die Festlegung der zeitlichen Systemgrenzen betrifft den Bezugszeitraum der Datenerhebung, den Bilanzierungszeitraum selbst und Vereinbarungen zum Umgang mit zeitabhängigen Effekten von einzelnen Bilanzgrößen. Methodisch noch ungeklärt ist die Frage, wie extreme Langzeitwirkungen (z. B. das Deponieverhalten) in die Ökobilanz integriert werden sollen und wie unterschiedliche Emissionsdynamiken angemessen berücksichtigt werden können²⁶

4.3.2 Sachbilanz

Sachbilanzen umfassen die Datensammlung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse des untersuchten Systems [ISO 14040]. Diese Daten bilden die Grundlage für die Wirkungsabschätzung Die Sachbilanz dient insbesondere der Ermittlung aller Stoff- und Energieströme in bzw. aus dem System sowie der Flächen- und Ressourcenverbräuche unter Offenlegung der angewandten Allokations- und Abschneideregeln. Dafür wird das System zweckmäßiger Weise in Subsysteme unterteilt (z. B. Transport, Ressourcenerstellung, Gebrauchsphase, Entsorgung etc.).

²⁵ Ausführlich zu Behandlung von Recyclingprozessen in Ökobilanzierungen s [KARLSSON 1995]

²⁶ Für eine Diskussion unterschiedlicher Lösungsansätze s. z. B. [GUINÉE 1996, S. 40 ff.].

Allokation

Ein besonderes methodisches Problem bei Aufstellung von Sachbilanzen ist die Auswahl eines geeigneten Allokationsverfahrens. Diese sind dann nötig, wenn Systeme untersucht werden, die mehrere Produkte/Nutzen/Dienstleistungen erzeugen und die Stoff- und Energieflüsse sowie die entsprechenden Umweltbelastungen diesen Produkten anteilig zugeordnet werden müssen. Dabei wird unterschieden in Hauptprodukte, für die der eigentliche Prozeß konzipiert ist, in Nebenprodukte, die bei der Produktion des Hauptproduktes neben dem Hauptprodukt anfallen und in Reststoffe, die bei der Produktion unvermeidbar mitentstehen und die aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht verwertbar sind.

Für die Aufteilung der Belastungen bzw. Gutschriften in der Sachbilanz auf die Kuppelprodukte werden verschiedene Bemessungsgrößen vorgeschlagen und angewendet:

- Physikalische Größen wie Masse, Volumen oder Mol
- Energetische Größen wie Heizwert oder Enthalpie
- Wirtschaftliche Größen
- Technische Größen wie Äquivalenzprozeß

Physische Größen

Daß die Aufteilung nach physischen Größen problematisch sein kann, zeigt ein Beispiel von REINHARDT [1993, S. 23 ff.] zur Beurteilung des Proálcohol Programms aus Brasilien. Aus einer Tonne Zuckerrohr läßt sich ca. 10 kg Ethanol und 90 kg Zucker bei 900 kg Rückständen (Schlempe) herstellen. Teilt man die Belastungen anteilig nach den Massen auf, entfallen auf Ethanol, dem eigentlichen Hauptprodukt bei diesem Programm, nur 10% der Umweltbelastungen und auf die Zuckerproduktion 90%, obwohl dieser bei alleiniger Zuckerproduktion mit wesentlich weniger Belastungen gewonnen werden könnte. Diese Relation bleibt auch bei Anwendung anderer physischer Größen wie Volumen oder Mol bestehen.

Energetische Größen

Energetische Größen, besonders der Heizwert, der eng mit der tatsächlichen Nutzenergie von Brennstoffen korreliert, werden vor allem bei der Bilanzierung von Brennstoffen und Raffinerieprodukten angewendet, d. h. für Produkte, für die der Heizwert eine charakteristische und wesentliche Kenngröße ist. Als universal anwendbare Allokationsbezuggröße kommen sie daher nicht in Frage.

Wirtschaftliche Größen

Die Allokation nach wirtschaftlichen Größen ist dann vorteilhaft, wenn der wirtschaftliche Wert eines Produktes ein relativ genaues Bild des Wertes liefert, der von der Gesellschaft dem Produkt beigemessen wird. Sie kommt im Prinzip für alle Dienstleistungen und Güter in Frage.

Problematisch ist die Ermittlung der Preise (Endverbraucherpreis, Erzeugerpreis ...) und ihre Zeitabhängigkeit. Da in den betriebswirtschaftlichen Preise die „Umweltkosten“ weitgehend außen vor bleiben, ist die Aufteilung unter ökologischen Gesichtspunkten zweifelhaft. Die Anwendung ist nur innerhalb einheitlicher Wirtschaftsräume sinnvoll.

Technische Größen

Die Allokation mittels technischer Größen basiert auf der Identifikation geeigneter Äquivalenzprozesse. Für alle bei einem Prozeß entstehenden Kuppelprodukte wird eine Gutschrift in Höhe der Umweltbelastungen des jeweiligen Äquivalenzprozesses verrechnet, mit dem das Kuppelprodukt ansonsten (als Hauptprodukt) produziert wird. Die Schwierigkeiten dieser Methode liegen hauptsächlich in der Identifikation eines geeigneten, tatsächlich repräsentativen Äquivalenzprozesses. Gerade in der chemischen Industrie, in der Kuppelproduktionen der Alltag sind, sind nach dieser Methode ganze Ketten verschachtelter Produktionsprozesse berücksichtigen, die die Möglichkeit einer plausiblen, weitgehend objektiven, Aufteilung nahezu ausschließen.

4.3.3 Wirkungsabschätzung

In dieser Phase der Ökobilanz wird die Beurteilung der Bedeutung potentieller Umweltwirkungen auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt. Die Ausführlichkeit, die Auswahl der zu beurteilenden Wirkungen und die anzuwendenden Methoden hängen vom Ziel und vom Untersuchungsrahmen der Ökobilanz ab [DIN 14040, S. 15].

Als von der prinzipiellen Methodik her weitgehend konsensfähige Bestandteile der Wirkungsabschätzung haben sich die Bearbeitungsschritte (Klassifizierung) und (Charakterisierung)²⁷ etabliert. In der Klassifizierung erfolgt eine Zuordnung der in der Sachbilanz erfaßten umweltrelevanten Größen in eine oder mehrere entsprechende Umweltwirkungskategorien wie Treibhauspotential, Abbau der Ozonschicht, Eutrophierung, Human- und Ökotoxizität (s. Tab. 51). Die Charakterisierung hat die Quantifizierung und Aggregation der Größen innerhalb dieser Wirkungskategorie zum Ziel.

²⁷ Für eine ausführliche Darstellung des Konzeptes zur wirkungsorientierten Klassifizierung und Charakterisierung s. insbesondere [HEIJUNGS 1994] und [HEIJUNGS 1994a]

Tab. 51: Wirkungskategorien

• Treibhauseffekt	• Belästigungen [Geruch, Lärm]
• Ozonabbau	• Arbeitsschutz
• Sommer- und Wintersmog	• Ressourcenverbrauch
• Eutrophierung	• feste Endabfälle
• Versäuerung	• Wirkungen von Abwärme auf Wasser
• Humantoxizität	• elektromagnetische Strahlung, Elektromog
• Umwelttoxizität	• Flächenbedarf

Während über die eher globalen Wirkungskategorien als Bestandteile der Wirkungsabschätzung weitgehend Einigkeit herrscht und zu zahlreichen Stoffen Werte für die Charakterisierung vorliegen, sind die Wirkungskategorien in der rechten Spalte umstritten.

Nur lokal bedeutsame Umweltwirkungen wie Belästigungen (Lärm, Geruch) und Arbeitsschutz sind aufgrund des fehlenden räumlichen und zeitlichen Bezuges von Ökobilanzen bisher innerhalb der Methodik der Ökobilanzierung nicht bewertbar. Es sind jedoch Bemühungen erkennbar, die Methodik der Ökobilanzierung in diese Richtung zu öffnen.

Der Ressourcenverbrauch, der in Ökobilanzen häufig bilanziert wird, stellt unmittelbar, zumindest soweit er sich auf abiotische und fossile Ressourcen bezieht, kein ökologisches sondern allenfalls ein volks- und betriebswirtschaftliches Problem dar. Die Berücksichtigung des Ressourcenverbrauchs innerhalb von Ökobilanzierungen scheint vor allem dann gerechtfertigt, wenn die ökologische Bewertung eine Erweiterung um das Konzept der nachhaltigen Entwicklung erfahren soll.

In der Kategorie elektromagnetische Strahlung reicht das derzeitige Wissen nicht für eine gesicherte Bewertungen aus. Ebenfalls umstritten ist die Bewertung von Flächenbelegungen. Ein Vorschlag des Umweltbundesamtes fußt auf der Zuordnung von Flächen zu bestimmten Hemerobiestufen für die Beurteilung des anthropogenen Einflusses [UBA 1995]; es bleibt abzuwarten, inwieweit man aus einer Charakterisierung von Flächen nach Natürlichkeitsgraden wie natürlich, naturnah etc. ein konsensfähiges Maß für eine quantifizierbare, ökologische Bewertung ableiten kann. Nach Ansicht des Umweltbundesamtes sollten aber auf jeden Fall auch solche Wirkungsbereiche berücksichtigt werden, die nur qualitativ zu beschreiben sind [PAULINI 1996].

Zu den Kategorien, die in wirkungsorientierten Bewertungsmethoden regelmäßig herangezogen werden, zählen Treibhauseffekt, Ozonabbau, Eutrophierung, Versäuerung, Humantoxizität, Umwelttoxizität, Sommer- und Wintersmog. Die Methodik für die Charakterisierung ist einigen Kategorien weit vorangeschritten (z. B. Treibhauseffekt), in anderen noch mitten in der Entwicklung, insbesondere die Abschätzung von öko- und humantoxischen Wirkungspotentialen.

Treibhauseffekt

Treibhauspotentiale werden vom International Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt, um die Klimawirksamkeiten von emittierten Stoffen zu erfassen. Als Referenzsubstanz dient CO₂ dem das Treibhauspotential GWP (global warming potential, Einheit kg) vom Wert 1 zugeordnet wird. Eine Substanz mit einer 14fachen Klimawirksamkeit als CO₂ hat demnach ein GWP von 14 kg CO₂. Die Treibhauspotentiale werden für 20, 100 und 500 Jahre berechnet und berücksichtigen die „Lebensdauer“ und die Absorptionseigenschaften der Gase. Als global wirkende Umweltbelastung werden für ihre Berechnung keine räumlichen Informationen benötigt.

Die Abschätzung tatsächlicher Umwelteffekte aus dem Treibhauspotential scheint methodisch das größte Problem zu sein [NICHOLS 1996]. Eine weitere Schwierigkeit betrifft die Festlegung des geeigneten Bezugszeitraumes. In Studien, in denen die Bedeutung des Treibhauseffektes sehr groß ist, sollten alle drei Bezugszeiträume betrachtet werden [NICHOLS 1996]. In der Praxis zeigt sich aber eine Tendenz zur Verwendung von 100 Jahren als Bezugszeitraum. Eine weitere Schwierigkeit betrifft die Berücksichtigung indirekter Wirkungen von Emissionen auf das Treibhauspotential, z. B. mögliche Abkühlungen durch SO₂ - Emissionen oder die Beeinflussung der klimawirksamen Ozonkonzentration durch Emissionen.

Ozonabbau

Potentiale für den für den stratosphärischen Ozonabbau (ozone depletion potential ODP) werden von der World Meteorological Organisation (WMO) veröffentlicht. Als Referenzsubstanz dient der FCKW 11, dementsprechend wird das Ozonzerstörungspotential eines Stoffes in kg FCKW-11 Äquivalente angegeben; die Berechnung erfolgt für einen unbegrenzten Zeitraum. Da vorauszusehen ist, daß der Ozonabbau in den nächsten 10 Jahren seinen Höhepunkt erreicht, wird vorgeschlagen, die Berechnung für einen kürzeren Zeitraum vorzunehmen [NICHOLS 1996].

Sommersmog

Die photochemische Bildung von Smog wird in der unteren Troposphäre vor allem durch die Reaktion zwischen ungesättigten Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und NO_x unter Einwirkung von Sonnenstrahlung hervorgerufen. Für die Berechnung des Sommersmogs wird das photochemical ozone creation potential (PCOP) herangezogen, als Referenzsubstanz dient Ethylen [HEIJUNGS 1994 und HEIJUNGS 1994a]. Die Verwendung des PCOP-Konzeptes zur Bewertung der Photooxidantienbildung unterliegt nach PAULINI [1996] jedoch Einschränkungen, da es nicht möglich ist, den Gesamtbetrag zur Oxidantienbildung aller freigesetzten Kohlenwasserstoffe abzuschätzen und da die Rolle der Stickoxide bei der Oxidantienbildung unberücksichtigt bleibt. Für das als Katalysator dienende NO_x lasse sich kein Gewichtsfaktor definieren, da die Ozonbildung nicht linear mit der NO_x-Konzentration korreliert

sei [UBA 1995]. Da die Lebensdauer der Kohlenwasserstoffe sehr unterschiedlich ist, kann sich die Bewertung mit dem Bezugszeitraum erheblich verändern.

In ähnlicher Weise wie für den Sommersmog wird die Berechnung von SO₂-Äquivalente (für Staub und Ruß) für die Umweltwirkung Wintersmog vorgenommen.

Eutrophierung

Unter Eutrophierung wird hier die übermäßige Nährstoffzufuhr zu Gewässern und Böden verstanden. Die wichtigsten Nährstoffe sind Stickstoff- und Phosphorverbindungen [UBA 1995]. Es wird davon ausgegangen, daß jede Nährstoffzufuhr eine Überdüngung bewirken kann. Die Berechnung des Eutrophierungspotentials (nutrition potential NP) kann erfolgen, in dem für die in Frage kommenden Substanzen ihr Beitrag zur Biomassenbildung mit einer bestimmten durchschnittlichen Zusammensetzung berechnet und ins Verhältnis zur Biomassenbildung von Phosphaten gesetzt wird [HEIJUNGS 1994a] wird; die Angabe erfolgt in kg PO₄³⁻ Äquivalenten. Problematisch ist die fehlende Berücksichtigung der unterschiedlichen Umweltkompartimente und der Umgebungsbedingungen. In dem Ansatz von HEIJUNGS et al. [HEIJUNGS 1994a] wird nicht deutlich, welche Umweltschäden die Wirkungskategorie Eutrophierung umfaßt.

Versäuerung

Mit dem Versäuerungspotential (acidification potential AP) wird die Fähigkeit von Stoffen, in Gewässern oder in Böden Protonen abzuspalten, erfaßt. Die Berechnung erfolgt über die Bestimmung des gewichtsbezogenen Protonenabspaltungspotentials, mit SO₂ als Referenzsubstanz, mit der Angabe von kg SO₂-Äquivalenten [HEIJUNGS 1994a]. Ein unmittelbarer Kausalzusammenhang mit Schadwirkungen wie Fischsterben und Waldschäden wird damit nicht hergestellt [UBA 1995]. Die Bewertung ist dadurch erschwert, daß die möglichen Schadenswirkungen von der aufnehmenden Umgebung abhängen. Während in walдреichen Gegenden erhebliche Schäden zu erwarten sind, kann die Umweltwirkung bei hoher Pufferkapazität und Verdünnung (Meer) vernachlässigbar sein [NICHOLS 1996].

Ökotoxizität und Humantoxizität

Für die Berechnung von Ökotoxizitäts- und Humantoxizitätspotentialen existieren verschiedene, zumeist recht komplexe, Methodenvorschläge (z. B. [UBA 1995], [HEIJUNGS 1994a], [GEBLER 1992]) und in jüngster Zeit [GUINÉE 1996], es bleibt abzuwarten, ob und welche methodischen Ansätze sich hier durchsetzen werden. Ökotoxizität im weiteren Sinne wird bereits auch durch die zuvor beschriebenen Kategorien zumindest teilweise erfaßt. Das humantoxikologische Potential kann näherungsweise auch durch die Berechnung von Schwermetalläquivalenten (Referenzsubstanz Blei) und von Kanzerogenitätsäquivalenten Referenzsubstanzgruppe PAK) abgeschätzt werden [GOEDKOOOP 1995].

Vielversprechend erscheint der Ansatz von Guinée et al. [GUINÉE 1996]. Mittels eines bereits früher vom niederländischen Umweltministerium (RIVM) und weiteren Institutionen entwickelten Modells für die Risikoabschätzung von Chemikalien (USES Uniform System for the Evaluation of Substances) wurden Human- und Ökotoxizitätsäquivalente für 94 Chemikalien berechnet. Während in USES die Berechnung allein auf der Basis der Toxizität erfolgte, wurden in [GUINÉE] für die Berechnung der ökotoxikologischen Potentiale auch die Persistenz, die (Bio-)Abbaubarkeit und intermediäre Transportprozesse und im Hinblick auf die Humantoxizität auch die möglichen Expositionspfade berücksichtigt. In Abhängigkeit vom primären Emissionskompartiment (Luft, Oberflächenwasser, Agrarboden, industriell genutzter Boden, genereller Boden) werden die Toxizitätsäquivalente für die terrestrische und aquatische Ökotoxizität und für die Humantoxizität angegeben. Grundlage für die Berechnung der Ökotoxizitätspotentiale ist der PEC/PNEC- Quotient, d. h. das Verhältnis von predicted environmental concentration zu predicted no effect concentration bei einer angenommenen Emission von 1.000 kg der untersuchten Substanz in das jeweilige Umweltkompartiment. Das ökotoxikologische Potential für eine Substanz und ein Kompartiment errechnet sich aus dem Verhältnis des entsprechenden PEC/PNEC-Quotienten der Substanz zum PEC/PNEC-Quotienten der Referenzsubstanz 1,4-Dichlorbenzol. Die Berechnungen von PEC und PNEC erfolgen auf der Basis der durchschnittlichen geographischen und klimatischen Rahmenbedingungen Westeuropas (vgl. [GUINÉE 1996, S. 55 ff.]).

In ähnlicher Weise erfolgt die Ableitung von humantoxikologischen Wirkungspotentialen, anstelle der PEC/PNEC-Quotienten werden dafür sogenannte margins of safety (MOS) ins Verhältnis gesetzt, wobei sich die MOS aus dem Verhältnis von acceptable daily intake (ADI) zu predicted environmental intake (PDI) berechnen. Auch hier dient 1,4-Dichlorbenzol als Referenzsubstanz, die Angabe der aquatischen bzw. terrestrischen ökotoxikologischen und des humantoxikologischen Potentials für eine Substanz erfolgt also in kg 1,4 Dichlorbenzol-Äquivalenten. Schwachpunkte der Methode sind insbesondere die fehlende Berücksichtigung synergistischer Effekte, der große Aufwand für die Berechnung der MOS und PEC/PNEC Quotienten sowie die Abhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Referenzsubstanz.

4.3.4 Bewertung

Für die Bewertung der Ergebnisse der Sachbilanz und/oder der vorgelagerten Schritte der Wirkungsabschätzung wurden eine Reihe von Vorschlägen veröffentlicht (Tab. 52). Bevor hier darauf näher eingegangen wird, müssen die Begriffe Bewertung und Auswertung geklärt werden.

In dem ISO Entwurf wird zwischen den Bestandteilen Wirkungsabschätzung (impact assessment)²⁸ und Auswertung (interpretation) unterschieden, mit dem Teilschritt „Bewertung“ als Bestandteil der Wirkungsabschätzung, für die ein weiter methodischer Rahmen vorgegeben wird. Nach Ansicht der Verfasser des Beiblattes zum deutschen ISO-Entwurf können die künftigen Bestandteile Wirkungsabschätzung und Auswertung bereits genauer dargestellt werden (Beiblatt zur [ISO 14040]). Die Wirkungsabschätzung soll auf die Sachbilanz zurückgreifen und anstreben, mit Hilfe wissenschaftlich begründeter Erkenntnisse die Komplexität der Sachbilanzdaten zu reduzieren [ebd.]. Sie unterscheidet sich damit von der darauf folgenden stärker durch Werthaltungen geprägten ökologischen Bewertungsphase, die eine bei Zielkonflikten auftretende Abwägung zwischen konkurrierenden Umweltschutzbereichen notwendigerweise beinhaltet und im folgenden als Auswertung bezeichnet wird. Nach Ansicht der Verfasser des Beiblattes zum DIN-Entwurf sollten daher im Sinne einer engen methodischen Anbindung an die Klassifizierung und Charakterisierung im Bewertungsschritt innerhalb der Wirkungsabschätzung die verschiedenen Umweltwirkungen getrennt behandelt werden. Im Sinne dieser Erläuterungen sind die in Tab. 52 aufgeführten mit Ausnahme des UBA-Ansatzes mit dem so verstandenen Teilschritt „Bewertung“ unverträglich. In der internationalen Diskussion zeichnet sich eine Einigung auf ein solches Vorgehen noch nicht ab.

In dem Bewertungsschritt werden die Ergebnisse der Sachbilanz und/oder der Wirkungsanalyse so aufbereitet, daß eindeutige(re) Aussagen in Bezug auf eine ökologische Einordnung und Rangfolge von Vergleichssystemen und -varianten möglich werden. In den quantitativen Verfahren werden explizite Berechnungsvorschriften für die Aggregationen zu einem einzelnen Indikator oder zu einem Indikatorensatz angegeben, der einen Zahlenwert (Wertetupel) für die Beschreibung der ökologischen Güte liefert. Dies erfordert eine explizite oder implizite Wichtung der Daten der Sachbilanz bzw. der aggregierten Größen der Wirkungsklassifizierung und -charakterisierung. Bei qualitativen Bewertungsmethoden wird auf eine mathematische Operationalisierung der Bewertung verzichtet und der Bewertungsprozeß argumentativ vollzogen.

Prinzipiell wird von dem Bewertungsschritt erwartet, daß er die Einzelergebnisse in angemessener und möglichst wissenschaftlich begründbarer Weise nachvollziehbar und transparent gewichtet und zusammenfaßt. Der Bewertungsschritt soll die Entscheidungsfindung erleichtern, anwenderfreundlich sein und sich für Schwachstellen- und Optimierungsanalysen eignen²⁹.

²⁸ Ausführliche Darstellungen und Diskussionen aktueller methodischer Ansätze zur Wirkungsabschätzung und zur Auswertung enthalten u. a. [EPA 1995], [HAES 1996], [HAES 1994], [IVL 1996] und [UBA 1995].

²⁹ Für eine vergleichende Anwendung verschiedener Bewertungsmethoden am Beispiel einer Ökobilanzierung der Leiterplattenherstellung siehe die Arbeit von SAGE [1993].

Tab. 52: Bewertungsmodelle (Auswahl)

Grenzwertorientierte einkriterielle Bewertungsmodelle
<ul style="list-style-type: none"> • Kritische Volumina • Stoffflußmodell, ökologische Knappheiten • Ökotoxikologische Bewertung
Auf Wirkungskategorien basierende einkriterielle Bewertungsmodelle
<ul style="list-style-type: none"> • Eco-Indicator
Sonstige einkriterielle Bewertungsmodelle
<ul style="list-style-type: none"> • EPS • Nutzwertanalyse • Grad an Nachhaltigkeit • SPI • MIPS
Mehrkriterielle, qualitative Bewertungsmodelle
<ul style="list-style-type: none"> • ABC-Analyse • UBA

4.3.4.1 Berechnung kritischer Volumina

Grundlegend für die Entwicklung des Grenzwertmodell der kritischen Volumina waren Arbeiten des schweizerischen Umweltamtes im Rahmen der Ökobilanzierung von Packstoffen. Eine überarbeitete Version erschien 1991 von dem inzwischen umbenannten Schweizerischen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft [BUWAL 1991]. Über (Immissions-)Grenzwerte für die Umweltkompartimente werden kritische Volumen berechnet, die ein Maß dafür sind, wieviel "sauberes" Volumen für einen Prozeß etc. benötigt wird. Dabei wird jede Volumeneinheit nur einmal mit einem Schadstoff belastet. Es werden nur die Stoffe/Kriterien aufgenommen, für die entsprechende Richtwerte vorliegen, ggf. werden MAK-Werte oder Toxizitätswerte in entsprechende Immissionsrichtwerte umgerechnet. Das kritische Volumen berechnet sich über

$$\text{kritisches Volumen} = \sum \frac{\text{Menge Schadstoff } i \text{ (g)}}{\text{Immissionsgrenzwert Stoff } i \text{ (mg/l)}}$$

Über Vereinbarungen, wie belastete Wasser-, Luft- und Bodenvolumina gegengerechnet werden, ist die Berechnung einer einzigen Maßzahl möglich. Für das Modell sprechen insbesondere die relativ einfachen Berechnungsvorschriften und die umfangreichen Erfahrungen, die bei seiner praktischen Anwendung bereits gesammelt wurden. Als Schwachstellen sind die

Auswahl und Verwendung der Immissionswerte, die fehlende Berücksichtigung von Synergien und die Willkürlichkeit der Aggregierungsvorschriften für die Zusammenfassung der Umweltkompartimente anzusehen.

4.3.4.2 Ökopunkte (kritische Stoffflüsse)

Das Modell beruht auf dem Ansatz der kritischen Volumen und entwickelt diesen weiter, in dem die Emissionen nicht in Bezug zu einem Grenzwert sondern in Bezug zu einem „kritischen Fluß“ in einem Referenzgebiet gesetzt werden, die aus Umweltqualitätszielen abgeleitet werden (s. [BUWAL 1990]). Der „kritische Fluß“ kann, sich an Grenzwerten orientierend, auf die Aufnahmekapazität der Kompartimente Wasser, Luft und Boden bezogen sein, aber auch die Erschöpfbarkeit eines Rohstoffes oder auf die Verfügbarkeit von Deponievolumen beschreiben. Den Stoffen wird ein Ökofaktor (Ökopunkte/g Stoff) zugeordnet, der sich aus der Belastbarkeit einer Umweltressource (kritischer Stofffluß F_K) und der heutigen Belastung (tatsächlicher Stofffluß F) des Stoffes bestimmt. Je geringer die Summe der Ökopunkte für einen Prozeß ist, desto besser ist die jeweilige Alternative zu bewerten.

Für die Berechnung des Ökofaktors aus den Stoffflüssen F und F_K wurden verschiedene Funktionen getestet, ein häufig gewählter Ansatz ist:

$$\text{Ökofaktor} = \frac{1}{F_K} * \frac{F}{F_K} * c$$

Dieser Ansatz bewertet nicht nur den Grad der Ausschöpfung einer kritischen Kapazität, sondern auch die absolute Höhe der kritischen Kapazität. Eine Emission wiegt um so schwerer, je kleiner der zugehörige kritische Stofffluß ist.

Während bei diesem Ansatz die Belastungen verschiedener Kompartimente formal elegant miteinander verrechnet werden können, stellt die Festlegung der kritischen Stoffflüsse ein zentrales Problem dar. Ihre Festlegung allein auf wissenschaftlicher Basis ist nicht möglich. Synergistische Effekte bleiben auch bei dieser Methode unberücksichtigt. Problematisch ist zudem, daß die Anzahl und Auswahl der betrachteten Schadstoffe zu einer indirekten, u. U. zufälligen Gewichtung von Umweltbelastungen führt³⁰.

Eine Ausrichtung auf die Belange einer nachhaltigen Entwicklung erfährt der Ansatz der ökologischen Knappheiten in einem Methodenvorschlag der TU Graz. Für die Kriterien Rohstoffe, Boden, Wasser, Luft, Bodennutzung und Deponieraum wird der pro Kopf Verbrauch bestimmt und in Relation zu dem Verbrauch gesetzt, der für eine nachhaltige Wirtschaftsform als noch akzeptabel angesehen wird. Unter der Annahme einer Gleichgewichtung aller Kriterien werden ein Mittelwert gebildet und die Alternativen miteinander verglichen [SAGE 1993].

³⁰ In diesem Sinne auch [UBA 1995, Teil 2, S. 33ff.]

4.3.4.3 Ökotoxikologische Bewertung

Ökotoxikologische Ansätze bewerten Emissionen nach ihren toxischen Potentialen für Ökosystemen und/oder Menschen. Die verschiedenen Ansätze unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Berechnung der Ökotoxizitätsfaktoren. GEBLER [1992] berechnet dazu unter Berücksichtigung des Bioakkumulationspotential und der Persistenz Toxizitätsfaktoren für das akute toxikologischen Potentials für Säugetiere, für die akute aquatische Toxikologie und für das kanzerogene und mutagene Potential; für ökologische Bewertung wird dann der jeweils kritischste Wert verwendet. Der Ökotoxizitätsfaktor (in kg Biomasse/mg Stoff) ist ein Maß dafür, wieviel Biomasse (Organismen) durch den Stoff potentiell bedroht ist.

Die Berechnung der Toxizitätsfaktoren kann auf mehr oder weniger gesicherter wissenschaftlicher Basis erfolgen; unberücksichtigt bleiben aber auch hier synergistische Effekte. Weitere Umweltwirkungen (Treibhauseffekt, Ozonabbau, Bodenversauerung etc.) werden völlig ausgeblendet.

4.3.4.4 Eco-indicator 95

Die Ecoindicator Methode nach [GOEDKOOOP 1995] basiert auf den Ansätzen zur wirkungsorientierten Klassifizierung und Charakterisierung und führt diese über sogenannte distance-to-target Ansätze in einer eindimensionalen Bewertungsgröße, dem Ecoindicator zusammen.

Nach der Charakterisierung werden die Ergebnisse mit sogenannten „europäische Einwohneräquivalenten“ normiert. Unter den Einwohneräquivalenten werden die Umwelteffekte, die ein Durchschnittseuropäer im Laufe eines Jahres verursacht, verstanden. Daraus ergeben sich „relativ“ große bzw. „relativ“ kleine Umweltbelastungen in der jeweiligen Kategorie. Für eine weitergehende Aggregation über die Wirkungskategorien werden diese untereinander gewichtet. Die Wichtung erfolgt unter der Prämisse, daß eine Korrelation zwischen der Einschätzung der Dringlichkeit einer Umweltwirkung und der Differenz zwischen dem aktuellen Stand und dem angestrebten Stand besteht. Wenn beispielsweise der Treibhauseffekt in einem Wirtschaftsraum um den Faktor 10 reduziert werden soll und das Eutrophierungspotential um den Faktor 5, dann wird der Treibhauseffekt für doppelt so wichtig betrachtet wie die Eutrophierung und somit einen doppelt so hohen Gewichtungsfaktor erhalten.

Die Ableitung der Reduktionsmaße erfolgt auf der Basis der Schutzziele Schutz des menschlichen Lebens und Schutz von Ökosystemen. Dabei werden die Schadensereignisse

- Ein zusätzlicher Toter pro 1 Mio Einwohner und Jahr
- keine zusätzlichen Erkrankungen durch Winter- oder Sommersmog
- eine Ökosystemverschlechterung um max. 5% über mehrere Jahrzehnte

als gleichwertig angenommen. Für diese Vorgaben werden entsprechende Wichtungsfaktoren für die einzelnen Wirkungskategorien abgeleitet, in dem der aktuelle Umweltzustand erfaßt

und die entsprechenden Reduktionsfaktoren für die Gewährleistung der Schadensziele berechnet wird. Die Berechnung des Eco-indicators für eine Emission erfolgt über:

$$\text{Eco}_i = \frac{E_i \cdot R_j}{N_j} \cdot 4,97 \cdot 10^8$$

mit

Eco_i = Ecoindikatorwert der Emission des Stoffes i

E_i = Wert der Emission i nach der Klassifizierung in die Wirkungskategorie j und nach der Charakterisierung

R_j = Reduktionsfaktor der Wirkungskategorie j

N_j = Normalisierungswert der Wirkungskategorie * 10^9

Die Multiplikation mit $4,97\text{E}+8$ (entspricht ungefähr der Einwohnerzahl Europas) erfolgt, um handlichere Zahlenwerte für die Ökoindikatoren zu erhalten.

4.3.4.5 EPS

Die EPS (Environmental Priority Strategy)³¹ Methode aus Schweden liefert eine Vollaggregation, ausgedrückt in Umweltbelastungseinheiten (Environmental Loads Unit ELU), wobei ein ELU einem ECU entspricht. Die Aggregation erfolgt nicht in einem Schritt und kann beliebig unterteilt werden. Es werden fünf schützenswerte Bereiche unterschieden: Biodiversität, menschliche Gesundheit, landwirtschaftliche Produktion, Ressourcenbeanspruchung und ästhetische Werte. Diese Bereiche werden weiter in quantifizierbare Bereiche unterteilt. Den schützenswerten Bereichen werden potentielle Preise (willingness to pay) zugeordnet, d. h. es wird ein Wert bezüglich der Änderung eines Schutzziels in der Umwelt festgelegt. In einem weiteren Schritt wird der Gesamtumfang und der zahlenmäßige Anteil einer Umweltveränderung, der von einer Ressourcenentnahme, Emission oder einer ähnlichen Aktivität ausgeht, abgeschätzt. Daraus folgt nun jeweils ein Wert für eine entsprechende Umweltintervention, der Umweltbelastungswert (environmental load value), der in ELUs ausgedrückt wird.

Während der EPS-Methode eine hohe Flexibilität besonders hinsichtlich der integrierbaren Umwelteffekte bescheinigt wird, konzentriert sich die Kritik auf die geringe Transparenz und Nachvollziehbarkeit, auf die Legitimität der Umweltbewertungen (auf der Basis von willingness to pay Ansätzen), auf die in viele Teilschritte zersplitterte Bewertung und die letzten Endes mehr oder weniger zufällig zustande gekommene Bedeutung der Schutzziele untereinander [UBA 1995, Teil 2; EPA 1995, HOFSTETTER 1994].

³¹ Darstellung nach [HOFSTETTER 1994] und [UBA 1995, Teil 2, S. 49ff.]

4.3.4.6 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse wird bisher erst in geringem Umfang für die ökologische Bewertung eingesetzt. In der Betriebswirtschaft ist sie ein etabliertes Verfahren für die Entscheidungsfindung, mit dem auch qualitative Größen quantitativ verrechnet werden können. Durch eine weitgehend formalisierte Vorgehensweise kann die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung gewährleistet werden. Die Nutzwertanalyse erfordert in einem ersten Schritt das Aufstellen eines Zielsystems, indem, Ziele, Zielebenen und Zielkriterien benannt werden, an denen die Nutzwerte gemessen werden können. Den Zielkriterien werden Zielgewichte zugeordnet. Durch die Ermittlung der Zielerfüllungsgrade und ihrer gewichteten Zusammenführung kann der erreichte Gesamtnutzen des untersuchten Systems bestimmt werden.

In betriebswirtschaftlichen Entscheidungsprozessen wird die Nutzwertanalyse gerne verwendet, da sie aufgrund der Transparenz, der beliebigen Erweiterbarkeit mit Kriterien aus Natur, Wirtschaft und Gesellschaft und den leicht und eindeutig anwendbaren Bewertungsvorschriften Vorteile gegenüber anderen Methoden bietet. Die Ableitung eines konsensfähigen, auch wissenschaftlichen Ansprüchen genügenden Ziel- und Gewichtungssystems dürfte das größte Hindernis für die Integration in den Bewertungsprozeß der Ökobilanzierung darstellen.

4.3.4.7 SPI Sustainable Process Index

Der Sustainable Process Index wurde als Nachhaltigkeitsindikator für die Prozeßbewertung entwickelt, wurde aber auch als Bewertungsgröße in der Ökobilanzierung eingesetzt [SAGE 1993]. Ausgehend von der Annahme, daß die Fläche für Lebens- und Produktionsprozesse eine limitierte Größe ist, wird die Effizienz von Prozessen über die Flächenbelegung bewertet [NARODOSLAWSKI 1992]. Für jeden Prozeß werden die Flächenverbräuche für die Rohstoff- und Energiebereitstellung, für den Prozess selbst und für eine nachhaltige Entsorgung am Ende des Lebensweges bilanziert. Grundlage für die Berechnung der Flächenbelegung bilden technische und naturwissenschaftlich begründete Richtwerte (Solarenergie-konversionsfaktoren, Bodenrichtwerte, Wasserrichtwerte ...). Mit dem Bezug auf eine Produkteinheit ergibt sich der spezifische Flächenbedarf. Der SPI wird aus dem Verhältnis des spezifischen Flächenbedarfs zur Fläche je Einwohner im Bilanzierungsgebiet berechnet.

Während die Flächenbelegung selbst und die Ressourcennutzung auf einfache Weise in den Bewertungsprozeß integriert werden, bleiben weitere Umweltwirkungen (Treibhauseffekt, Ozonabbau, Humantoxizität...) unmittelbar unberücksichtigt; unklar ist auch, wie luftseitige Emissionen verrechnet werden. In dieser Ausgestaltung kann der SPI daher für eine umfassende Bewertung im Rahmen einer Ökobilanzierung nicht in Betracht kommen. Da letztendlich auch nicht die Fläche allein die limitierende Größe ist, sondern allenfalls das Produkt aus Fläche und maximaler Dienstleistungsintensität pro Fläche, wobei letztere wiederum abhängt

vom technischen Entwicklungsstand, vom Ort usw., vom technischen und ökonomischen Aufwand etc., eignet sich der SPI eher als Grobmaß für eine nachhaltige Prozeßbewertung als für eine differenzierte ökologische Untersuchung.

4.3.4.8 MIPS (Material Intensity per unit service)

Die Berechnung von Materialintensitäten je Funktionseinheit, sogenannten MIPS wurde von SCHMIDT-BLEK [1993] vorgeschlagen. Der gesamte Material- und Energiedurchsatz von Produktion, Gebrauch, Entsorgung, Transport etc. für die Bereitstellung einer Dienstleistung wird in Massenflüsse umgerechnet und als aggregierte Größe in kg oder Mg angegeben. Der Indikator soll als erste Risikoabschätzung dienen und Ökobilanzen und Produktlinienanalysen entsprechend einfacher gestalten. Er beruht auf der Auffassung, daß die vom Menschen ausgelösten Stoffströme Ursache der negativen ökologischen Auswirkungen sind und die Materialintensitäten zu hoch sind. Die Massenströme dienen als Kriterium, da man die toxikologischen Auswirkungen der Substanzen nicht ihrer Fülle und Bedeutung erfassen könne³².

Während mit der Berechnung von MIPS ggf. erste Abschätzungen der ökologischen Relevanz eines Systems vorgenommen werden können, eignet sich die Methode aufgrund ihrer geringen Differenzierung und ihrer völligen Vernachlässigung umweltrelevanter Belastungen (Toxizitäten, Klimapotentiale etc.) nicht für eine umfassende Bewertung wie sie im Rahmen einer Ökobilanzierung gefordert ist. Haupteinfluß auf die Bewertung haben große Stoffströme ungeachtet ihrer tatsächlichen ökologischen Relevanz, während hochtoxische Emissionen, die in kleinen Frachten emittiert werden, marginalen Einfluß auf das Bilanzierungsergebnis haben. Da in der Natur selbst die größten Massenströme (ganz ohne menschliches Zutun stattfinden) ist die Verwendung der Materialintensität als einziges Bewertungskriterium nicht so einleuchtend wie die Verwendung von Toxizitäten oder Flächenbelegungen in den vorstehend beschriebenen Ansätzen. So kommen auch Braunschweig et al. zu dem Schluß, daß MIPS allein aufgrund der fehlenden qualitativen Bewertung keine überzeugende Basis für eine Umweltabschätzung bietet und daß bei der Kombination von MIPS mit weiteren Bewertungsmethoden wie die Ökobilanzierung wenig Gründe für seine Verwendung sprechen; ein sinnvolle Anwendung könnte nach Ansicht der Autoren möglicherweise in seiner Anpassung für die Bewertung des Ressourcenverbrauchs innerhalb der Wirkungsabschätzung liegen [BRAUNSCHWEIG 1996, S. 15].

³²Die Bewertungen hinken immer hinterher, und Einzelphänomene können das komplexe und nichtlineare System der Ökosphäre nicht beschreiben; da sich die Komplexität der Natur dem menschlichen Ergründen und Verstehen entzieht.

4.3.4.9 ABC-Analyse

Nach der Sachbilanz, die bei der ABC-Methode [HALLEY 1992] aus den Komponenten Betriebsbilanz, Prozeßbilanz, Produktbilanz und Substanzbetrachtung besteht, werden die Sachbilanzdaten nach den folgenden Kriterien beurteilt:

- Einhaltung umweltrechtlicher Rahmenbedingungen,
- gesellschaftliche Anforderungen/Akzeptanz,
- Effizienz der Energie- und Ressourcennutzung,
- Höhe der internalisierten Umweltkosten,
- Beeinträchtigung der Umwelt im Normalbetrieb,
- Beeinträchtigung der Umwelt durch mögliche Störfälle,
- Beeinträchtigung der Umwelt durch vor- und nachgelagerte Prozesse.

Diese Kriterien werden mit den Graden A, B und C bewertet, wobei A einen besonderen Handlungsbedarf signalisiert, B ein mittleres ökologisches Problem und C ein geringfügiges bzw. zu vernachlässigendes Problem. Die Methode verzichtet bewußt auf eine hohe Objektivität, sollen doch die Wertvorstellungen der untersuchten Unternehmung oder der Bilanzsteller einfließen können [HOFSTETTER 1994]. Die Bewertungen erfolgen nicht nach einem vorgeschriebenen Schema, sondern fallbezogen und sind nur bedingt vergleichbar [ebd.]. Die ABC Analyse eignet sich gut für innerbetriebliche Belange, spielt aber in der Diskussion zur Ökobilanzierung im engeren Sinne keine Rolle.

4.3.4.10 UBA

Die vom UBA in [UBA 1995a] vorgestellte Bewertungsmethodik ist letzten Endes verbalargumentativ, ordnet aber in einer semiquantitativen Herangehensweise die Ergebnisse der Wirkungsklassifizierung und -charakterisierung. Dabei erfolgt eine Bewertung sowohl über einer Wichtung der einzelnen Wirkungskategorien mit ihrem spezifischen Beitrag als auch über eine Wichtung nach ihrer ökologischen Bedeutung. Beide Wichtungen werden dann über ein Verknüpfungstableau zusammengeführt, das als Grundlage für die verbalargumentative Bewertung dient.

Auch eine verbalargumentative Beurteilung kann bei der Abwägung auf eine Gewichtung und Bewertung der einzelnen Umweltbelastungen nicht verzichten. Daß dies in der verbalargumentativen Darstellung wissenschaftlich nachvollziehbarer und transparenter als in einem formalisierten Bewertungsmodell vollzogen wird, muß bezweifelt werden. Die Wichtungstableau stellen einen Schritt in Richtung einer stärkeren Formalisierung dar, ohne in jedoch konsequent umzusetzen. Die Wichtung der Umweltkategorien (ökologische Bedeutung) in „Expertengremien“ muß nicht nur unter demokratischen Gesichtspunkten kritisch hinter-

fragt werden³³. Ihre Ausrichtung an den Gegebenheiten des westeuropäischen Wirtschaftsraum reflektiert in erster Linie das Umweltbewußtsein westeuropäischer Experten und erst in zweiter Linie die globale ökologische Relevanz, die, da „Produkte im Laufe ihres Lebens den Globus oft mehrfach umrunden“ vor allen Dingen gefragt wäre.

Auch die relative Wichtung der Umweltkategorien nach ihrem spezifischen Beitrag ist fragwürdig, da sie u. U. dazu führen kann, daß ein negativer Ausreißer in einer relativ unbedeutenden Kategorie die anderen Belastungen in ihrer Bedeutung unangemessen relativiert wird.

Die Verknüpfung der ökologischen Bedeutung mit dem spezifischen Beitrag impliziert, so wie sie vom UBA vollzogen wird, lineare Unterteilungen der Bewertungsklassen ohne das dies tatsächlich intendiert wäre. Daß hierdurch eine erhöhte Transparenz erreicht wird, muß bezweifelt werden.

Ein weiterer Einwand betrifft die ausschließlich Gegenüberstellung in paarweisen Vergleichen. Das führt, insbesondere bei Ökobilanzierungen, die für eine ökologische Optimierung eingesetzt werden, aufgrund der Vielzahl von zu untersuchenden System- und Verfahrensvarianten zu einem umfangreichen, schwer zu überblickenden und unpraktischem Konvolut von paarweisen Vergleichen.

4.3.4.11 Ökonomische Modelle

Ökonomische Modelle bewerten die Schäden an Mensch und Umwelt über die Berechnung wahrer Kosten. Die bessere Alternative ist die mit den geringeren Kosten. Für die Berechnung der wahren Kosten existieren verschiedenen Ansätze:

- **Schadenskosten:** Kosten, die durch Ausfall eines Umweltgutes entstehen,
- **Ersatz- oder Vermeidungskosten:** Kosten durch Substitution eines (Umwelt-)Gutes durch andere, hauptsächlich technische Leistungen,
- **potentieller Preis:** Kosten, die der Bürger zur Wiederherstellung eines Umweltgutes zu zahlen bereit ist,
- **kompensatorischer Preis:** Kosten, für die der Bürger auf ein (Umwelt-)Gut zu verzichten zu zahlen bereit ist.

In der praktischen Anwendung erweist sich als größte Schwierigkeit die Berechnung konsensfähiger, naturwissenschaftlich und ethisch fundierter „wahrer“ Preise. Prinzipiell bietet dieser Ansatz aber am ehesten die Möglichkeit, angesichts begrenzter materieller und ökonomischer

³³ Nach [FINNVEDEN 1996]hängen die Antworten der Expertenbefragungen sehr stark davon ab, wie die Fragen gestellt werden. Nach einer dort zitierten Studie mußten die Antworten von 7 Experten aus einem Gremium von 17 verworfen werden, da sie offensichtlich die Fragen nicht verstanden hatten. In einer anderen Studie (ibd) gelangten die Experten zu überraschenden Gewichtungsfaktoren, so wurde in einem Expertengremium 1 kg hochradioaktiven Abfalls als ungefähr so bedenklich wie 1 kg CO₂ eingestuft und 6 kg of CO₂ so „schlecht“ wie die Emission von 1 kg Quecksilber ins Wasser!.

Ressourcen, Wirtschaftsprozesse unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Umfangreiche Forschungsaktivitäten zur umweltökonomischen Gesamtrechnung und erste Anwendungen in Ökosteuern und handelbaren Umweltzertifikaten und -emissionen versprechen ökonomischen Bewertungsmodellen zunehmende Einsatzfähigkeit.

4.3.5 Optimierungs- und Sensitivitätsanalyse

Optimierungs- und Sensitivitätsanalyse beinhalten u. a.

- die Identifizierung, Bewertung und Auswahl von Optionen für eine ökologische Optimierung;
- die Erstellung von Szenarien (geänderte Rand- und Anfangsbedingungen);
- Untersuchung der Einflüsse von Annahmen oder Datensätzen auf die Ergebnisse der Ökobilanz.

4.3.6 Auswertung

Die Auswertung ist die Phase der Ökobilanz, bei der die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zusammengefaßt werden. Die Ergebnisse der Auswertungsphase sollten die Ergebnisse von Sensitivitäts- und Optimierungsanalysen sowie von Fehlerbetrachtungen berücksichtigen und können als Grundlage für Schlußfolgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsfindungen dienen.

4.4 Entwicklungsstand und Forschungsbedarf

Die methodischen Probleme der Ökobilanzierung betreffen sowohl grundsätzliche erkenntnistheoretische und normative Fragestellungen wie auch praktische, in absehbarer Zeit mehr oder weniger lösbare Schwierigkeiten.

Zu den theoretischen Problemen ist der nicht auszuschließende Einfluß subjektiver Wertvorstellungen und Wahrnehmungen bei der Ökobilanzierung zählen. Das betrifft nicht nur die offensichtlich subjektiv geprägten Schritte der Bewertung und Zusammenfassung der Sachbilanzdaten und der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Bereits die gewählte Vorgehensweise und die Annahmen bei der Bilanzierung (Festlegung der Systemgrenzen, Auswahl von Datenquellen und Wirkungskategorien) können subjektiv sein [DIN 14040, S.4].

Ein weiteres Problem, insbesondere bei der Datenbewertung sind die kognitiven Wahrnehmungsstrukturen des Menschen, die geprägt sind auf lineare Kausalität, kurze Kausalketten, Eindeutigkeit und lineares Wachstum. Zyklische Kausalitäten, Neben- und Fernwirkungen, Rückkoppelungseffekte und nicht lineares Wachstum können bei den Datenbewertungen nicht angemessen berücksichtigt werden [UBA 1992, S. 349]. Hierzu zählt auch die Bewer-

tung von Emissionen, deren Auswirkungen möglicherweise nur sehr gering mit der Emissionsstärke korrelieren³⁴.

Ein grundsätzliches methodisches Problem ist auch der Widerspruch von Übertragbarkeit und praktischer Aussagekraft einer Ökobilanz. Die Ergebnisse einer Ökobilanz werden entscheidend von den zugrundegelegten Rahmenbedingungen und den verwendeten Datensätzen beeinflusst. Je allgemeingültiger und übertragbarer die Ergebnisse einer Ökobilanz sein sollen, um so unspezifischer müssen auch die zugrundegelegten Rahmenbedingungen und Sachbilanzdaten sein. Dabei verliert die Ökobilanz aber an praktischer Relevanz. In diesem Sinne weist auch der ISO-Entwurf daraufhin, daß Ergebnisse von Ökobilanzen wegen ihrer Ausrichtung auf globale und überregionale Aspekte für örtliche und regionale Anwendungen ungeeignet sein können, und die dortigen Bedingungen möglicherweise durch überregionale oder globale Bedingungen nicht ausreichend dargestellt werden [DIN 14040, S.4]. Gegebenenfalls sollten die Anwenderinteressen und Informationsbedürfnisse darüber entscheiden, wie spezifisch die Ökobilanzierung durchgeführt wird.

Die Zugänglichkeit und Verfügbarkeit von Daten stellt ein häufiges, aber prinzipiell zu lösendes Problem bei der Durchführung von Ökobilanzierungen dar. Nach Ansicht des Umweltbundesamts liegt vielfach der offenkundigste Mangel vorliegender Ökobilanzen in der nicht transparenten Herkunft der Daten, ihrer zeitlich und räumlich bedingten Inhomogenität und ihrer fehlenden oder nicht kompatiblen Meßgrundlage [UBA 1992, S.41].

Eine weitere Schwierigkeit betrifft die Integration der Zeitdimension, sowohl hinsichtlich unterschiedlicher Wirkungsauern von Emissionen wie auch hinsichtlich der Bewertung der zeitlichen Emissionsdynamik. Extremfälle stellen die bisher in die Methodik der Ökobilanzierung nicht integrierten Stör- und Betriebsunfälle dar, die ja dynamisch in der Regel nur relativ hohe (Energie-, Stoff-)Freisetzungen in sehr kurzer Zeit darstellen. Ein Vorschlag, wie Störfälle methodisch in Ökobilanzen eingebunden werden können, wurde von Braunschweig et al. veröffentlicht [BRAUNSCHWEIG 1994], es werden allerdings Zweifel geäußert, ob Emissionen aus Störfällen in die Ökobilanz integriert werden können³⁵. In der Ökobilanzliteratur wird immer wieder darauf verwiesen, daß die Ökobilanzierung nur ein eingeschränktes Instrumentarium zur Bewertung von Umweltbelastungen und Gefährdungen darstellt, daß gegebenenfalls durch weitere Instrumente wie Umweltverträglichkeitsprüfungen, Immissions- und Arbeitsschutz-

³⁴ Z. B. bei der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen.

³⁵ Nach MEIER [1996, S. 52 ff.] sind die vorhandenen Ansätze zur Integration von Störfallrisiken in die Ökobilanzierung nicht befriedigend und können die tatsächlichen Wirkungsunterschiede der verschiedenen Emissionsarten (Normalfallmissionen bzw. Störfallemissionen) nicht erfassen. Diese Emissionsarten seien daher getrennt zu analysieren und dazu die entsprechenden Instrumente der Ökobilanzierung und der Risikoanalyse zu verwenden.

prüfungen und Risikoanalysen ergänzt werden muß. Für den Anwender bzw. Nutzer, für den schon die Ökobilanzierung allein ein sehr zeit- und mittelaufwendiges Verfahren darstellt, ist dieser Verweis sicherlich wenig motivierend.

4.5 Ökobilanzstudien, literatur und -software

In den letzten Jahren ist eine Vielzahl von Ökobilanzstudien veröffentlicht worden, so daß eine detaillierte Darstellung hier den Rahmen sprengen würden. Eine Bibliographie von Grotz und Rubik [GROTZ 1995] spiegelt den Stand bis 1994, unterteilt in Primärstudien, methodische Beschreibungen und Erläuterungen sowie weitere Veröffentlichungen, wieder; umfangreiche bibliographische Hinweise enthalten auch [GUINÉE 1995], [BÖNING 1994], [CURRAN 1996], [WHITE 1995] und etwas älter, aber mit einer methodischen Untersuchung durchgeführter Studien [RUBIK 1992].

Zahlreiche Studien wurden zu Getränkeverpackungen und Verpackungsmaterialien (z. B. [FRANKE 1993] [UBA 1995a], [BUWAL 1991], [BUWAL 1996] durchgeführt. Beispielhaft für Einzelstoffuntersuchungen seien hier für Thermoplaste [APME 1979], PVC [APME 1994a], PET [APME 1995], OLEFIN [APME 1993], Polyethylene, Polypropylene [APME 1993a], Polystyrene [APME 1993b] und in jüngster Zeit [BUWAL 1996] zu zahlreichen Grundstoffen von Verpackungsmaterialien erwähnt.

Für die hier untersuchte Verfahrensentwicklung interessieren besonders Ökobilanzierungen zur Gewächshausdüngung und Kompostierung. Zwar wurden im Bereich der Abfallwirtschaft eine Vielzahl von Arbeiten veröffentlicht (z. B. [BOGON 1995], [GEBLER 1992], [FINNVEDEN 1995], [FLEISCHER 1995], [FEI 1991], [FRANKE 1995], [FhG 1990], [GML 1992], [HESSEN 1994], [IFEU 1992]), diese beziehen sich aber überwiegend auf die Untersuchung verschiedener Entsorgungssysteme und -varianten (z. B. thermisch - mechanisch - anaerobe - aerobe etc.), ein Verfahrenvergleich verschiedener Intensivrottesysteme oder Intensivrottsteuerungsvarianten ist nicht bekannt. Aus dem Bereich der Landwirtschaft sind ebenfalls einige Ökobilanzen bzw. Stoff- und Energiebilanzen veröffentlicht worden, diese beziehen sich schwerpunktmäßig auf die Bewertung verschiedener Landnutzungsvarianten, z. B. [HABERSTOCK 1995], den Anbau nachwachsender Rohstoffe z. B. [UBA 1993], den Vergleich verschiedener Düngemittel [MEIER-PLOEGER 1996] oder den Einsatz landbaulicher Betriebsmittel [KTBL 1992b], ein Ökobilanzierung zur CO₂-Düngung von Gewächshäusern ist nicht bekannt.

Ergänzend sei hier noch auf einige Veröffentlichungen zur Methodik hingewiesen, auf die im Text nicht näher eingegangen wurde. Grundlagendarstellungen bzw. Einzelaufsätze zur Methodik enthalten [FAVA 1993], [FAVA 1994], [FGU 1994], [FGU 1995], [LCANET 1996], [SETAC 1992], zu Einzelaspekten beziehen sich [HUPPES 1994] auf die Allokationsproblematik, [SCHALTEGGER 1994] auf Begriffe und Definitionen der Ökobilanzierung, [STEEN

1994] und [AFR 1996] auf die EPS-Methodik, [KARLSSON auf Nachhaltigkeit und Recycling in Ökobilanzierungen, [GUINÉE 1995b] auf die Bewertung von Ressourcen, [GUINÉE 1993] auf die Bewertung der Toxikologie, [UBA 1995b] auf die Dokumentation von Ökobilanzen und [HAES 1994] und [IVL 1996] auf die Problematik der Wirkungsabschätzung.

Die Eruierung des Softwaremarktes für die Ökobilanzierung über Literaturrecherchen ergab, daß sich hierzu mittlerweile ein breites Angebot am Markt etabliert hat (Tab. 53). Je nach Leistungsumfang und Spezialisierung beinhalten die Pakete sowohl reine Ökobilanzprogramme als auch Ökoauditbausteine. Einen detaillierten Überblick zu den Leistungsangeboten bieten verschiedene Publikationen jüngerer Datums: am umfangreichsten und informativsten aber nicht veröffentlicht [ENVIRONMENT 1996], mit weiteren Informationen zu Abfallwirtschaftssoftware und Ökoauditsoftware [ABAG 1996] und etwas dürftig [ATLANTIC 1994]. Je nach Ausstattungsgrad erlauben die Ökobilanzprogramme mehrdimensionale Bewertungsverfahren, frei definierbare Kennzahlen, die Verknüpfung komplexer Stoffströme (incl. Verzweigungen, Rekursionen) und die Integration von Stoffströme in die Prozeßbilanz.

Tab. 53: Übersicht zur Ökobilanzsoftware

Name	Anbieter	Version	Kosten ^s	Datenherkunft
Boustead	Boustead	2	24.000 US \$	Europa
CLEAN	EPRI	2	14.000 US \$	U.S.
CUMPAN	debis Systemhaus GmbH	unbekannt	unbekannt	Deutschland
EcoAssessor	PIRA	unbekannt	unbekannt	U.K.
EcoManager	Franklin Associates, Ltd.	1	10.000 US \$	Europe/USA
ECONTROL	Oekoscience AG	unbekannt	unbekannt	Schweiz
EcoPack2000	Max Bolliger	2.2	5.800 US \$	Schweiz
EcoPro	EMPA	1	unbekannt	Schweiz
EcoSys	Sandia/DOE	Prototyp	unbekannt	USA
EDIP	Inst. for Prod. Devel.	Prototyp	unbekannt	Dänemark
EMIS	Carbotech	unbekannt	unbekannt	Schweiz
EPS	IVL	1	unbekannt	Schweden
GaBi	IPTS	2	10.000 US \$	Deutschland
Heraklit	Fraunhofer Inst.	unbekannt	unbekannt	Deutschland
IDEA	IIASA	unbekannt	unbekannt	Europa
KCL-ECO	Finnish Paper Inst.	1	3.600 US \$	Finnland
LCA1	P&G/ETH	1	unbekannt	Europa
LCAD	Battelle/DOE	Prototyp	< 1.000 US \$	USA
LCAiT	Chalmers Industriteknik	2.0	3.500 US \$	Schweden
LCASys	Philips/ORIGIN	unbekannt	unbekannt	Niederlande
LIMS	Chem Systems	1	25.000 US \$	USA
LMS Eco-Inv. Tool	Christoph Machner	1	unbekannt	Österreich
Öko-Base II	Peter Meier	unbekannt	unbekannt	Schweiz
PEMS	PIRA	3.1	9.100 US \$	Durchschnitt Europa
PIA	BMI/TME	1.2	1.400 US \$	Europa
PIUSSOECOS	PSI AG	unbekannt	unbekannt	Deutschland

Name	Anbieter	Version	Kosten [§]	Datenherkunft
PLA	Visionik ApS	unbekannt	unbekannt	Dänemark
REGIS	Simum GmbH	unbekannt	unbekannt	Schweiz
REPAQ	Franklin Associates, Ltd.	2	10.000 US \$	USA
SimaPro	PRé Consulting	3.1	3.000 US \$	Niederlande
SimaTool	Leiden Univ.	Prototyp	unbekannt	Niederlande
Simbox	EAWAG	unbekannt	unbekannt	Schweiz
TEAM	Ecobalance	1.15 & 2.0	10.000 US \$	Europa/USA
TEMIS	ÖkounbekanntInstitut	2	unbekannt	Europa
TetraSolver	TetraPak	unbekannt	unbekannt	Europa
Umberto	IFEU	unbekannt	unbekannt	Deutschland
Umcon	Particip GmbH	unbekannt	unbekannt	Deutschland
UMEX	AWD GmbH	unbekannt	unbekannt	unbekannt
Öko-Bil	bfe synergie GmbH	unbekannt	unbekannt	unbekannt
Oekobil	Gütegemeinschaft PVC	unbekannt	3.000 DM	Europa
Cassandra	IMU GmbH	unbekannt	25.000 DM	unbekannt
RECYCLEAN	RECYCLEAN Systems GmbH	unbekannt	5.000 DM	unbekannt
AUDIT	SNI Siemens Nixdorf Informationssysteme	unbekannt	19.000 DM	unbekannt
AIBAS OEK	Universität Kassel	unbekannt	5.000 DM	unbekannt

[§] Preise in der Regel als Mindestpreise für eine Einzelplatzinstallation

Quelle: Zusammengestellt nach [ABAG 1996] und [ENVIRONMENT 1996]

5 Beurteilung verschiedener Verfahren der CO₂-Anreicherung - Verfahrensvergleich

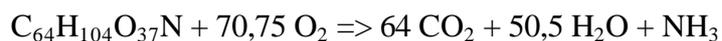
Ziel der ökologischen Beurteilung ist es, ausgehend von der Verfahrensentwicklung in der Demonstrationsanlage die Umweltauswirkungen der Kombination von Kompostierung und Gewächshausproduktion zu erfassen und Ansatzpunkte für die Verfahrensoptimierung unter ökologischer Zielstellung zu finden. Für die Verfahrensentwicklung zeigen sich drei wesentliche Systemfunktionen: die Bioabfallkompostierung, die Gewächshaus-CO₂-Düngung mittels Kompostierungsabluft und die Unterstützung der Gewächshauswärmeversorgung über Kompostierungsabwärme. Vergleichssysteme mit allen drei Funktionen sind nicht bekannt,³⁶ so daß unmittelbarer Vergleich nicht möglich ist.

Bezüglich der Systemfunktion Bioabfallkompostierung sind die im Teilvorhaben TV 3/1 „Bioprozeßtechnische Untersuchungen“ entwickelten Prozeßsteuerungsvarianten gegenüber traditionellen Rottesteuerungen in Intensivrottecontainern auf ihre ökologische Vorteilhaftigkeit zu untersuchen. Ihre Umsetzung in großtechnischen Anlage steht aber noch aus. Daher liegen hierzu bislang keine belastbaren Daten für einen Systemvergleich vor.

5.1 Untersuchung zu Auslegungsvarianten der Verfahrensentwicklung

In welchem Ausmaß die bedarfsgerechte Wärmeversorgung und die CO₂-Düngung des Gewächshauses innerhalb der Kopplung von Gewächshausproduktion und Kompostierung realisiert werden, hängt von der Auslegung ab. Es ist davon auszugehen, daß eine Optimierung hinsichtlich der Wärmeversorgung zu anderen Auslegungsverhältnissen von Kompostierung und Gewächshaus führt als die bei einer Ausrichtung auf eine bedarfsgerechte CO₂-Versorgung. Angaben zum CO₂-Bedarf für die CO₂-Anreicherung wurden bereits in Kap. 3.2 und zum Wärmebedarf in Kap. 3.8 gemacht. Um die Auslegungsverhältnisse bestimmen zu können, muß die CO₂-Produktion und die Wärmefreisetzung während der Kompostierung abgeschätzt werden. Eine genauere Berechnung wäre nur bei detaillierter Kenntnis der Inputmaterialien für die Intensivrotte möglich. Stattdessen handelt es sich aber bei den Bioabfällen um ein heterogenes Stoffgemisch unterschiedlicher Zusammensetzung und Beschaffenheit. Eine Abschätzung ist auf der Basis einer vorgegebenen Standardzusammensetzung möglich, da die stoffliche Zusammensetzung und Energieinhalte der Einzelsubstanzen bekannt sind (s. z. B. [KROGMANN 1994], [HAUG 1993, S. 262]). Eine Abschätzung kann aber auch über die Annahme einer typischen, mittleren Biomassezusammensetzung erfolgen. Nach HAUG [1993] kann für die organische Fraktion des Hausmülls von der Summenformel C₆₄H₁₀₄O₃₇N ausgegangen werden. Bei einem vollständigen stöchiometrischen Abbau mit

³⁶ In ähnliche Richtung zielt allerdings der Vorschlag von GLEU (1987) einer CO₂-Düngung durch Verbrennen von Biogas aus der Vergärung gartenbaulicher und landwirtschaftlicher Abfälle.



entstünden also pro Gramm abgebauter oTS 1,91 g CO₂, 0,62 g H₂O, 0,01 g NH₃ wofür 1,53 g O₂ benötigt würden. In Abhängigkeit vom Feststoffanteil, vom Anteil der organischen Substanz und vom Abbaugrad der organischen Substanz während der Rotte können damit die freiwerdenden CO₂, H₂O und NH₃ sowie der Sauerstoffbedarf abgeschätzt werden (Tab. 54).

Tab. 54: Massenbilanzierung der Rotte für 1 Mg Input

Feststoff-anteil	Anteil oTS	Abbaugrad oTS	abgebaute oTS	CO ₂ , prod	prod. H ₂ O	prod. NH ₃	O ₂ -Bedarf
%	in %	%	in kg	in kg	in kg	in kg	in kg
40	60	20	48	91	30	1	74
40	60	25	60	114	37	1	92
40	60	30	72	137	44	1	110
40	60	35	84	160	52	1	129
40	60	40	96	183	59	1	147
40	65	20	52	99	32	1	80
40	65	25	65	124	40	1	100
40	65	30	78	149	48	1	119
40	65	35	91	173	56	1	139
40	65	40	104	198	64	1	159
40	70	20	56	107	34	1	86
40	70	25	70	133	43	1	107
40	70	30	84	160	52	1	129
40	70	35	98	187	60	1	150
40	70	40	112	213	69	1	172
45	60	20	54	103	33	1	83
45	60	25	68	129	42	1	103
45	60	30	81	154	50	1	124
45	60	35	95	180	58	1	145
45	60	40	108	206	66	1	165
45	65	20	59	111	36	1	90
45	65	25	73	139	45	1	112
45	65	30	88	167	54	1	134
45	65	35	102	195	63	1	157
45	65	40	117	223	72	1	179
45	70	20	63	120	39	1	97
45	70	25	79	150	48	1	121
45	70	30	95	180	58	1	145
45	70	35	110	210	68	1	169
45	70	40	126	240	77	1	193
50	60	20	60	114	37	1	92
50	60	25	75	143	46	1	115
50	60	30	90	171	55	1	138
50	60	35	105	200	65	1	161
50	60	40	120	229	74	1	184
50	65	20	65	124	40	1	100
50	65	25	81	155	50	1	124
50	65	30	98	186	60	1	149
50	65	35	114	217	70	1	174

Feststoff- anteil	Anteil oTS	Abbaugrad oTS	abgebaute oTS	CO ₂ , prod	prod. H ₂ O	prod. NH ₃	O ₂ -Bedarf
%	in %	%	in kg	in kg	in kg	in kg	in kg
50	65	40	130	248	80	1	199
50	70	20	70	133	43	1	107
50	70	25	88	167	54	1	134
50	70	30	105	200	65	1	161
50	70	35	123	233	75	1	188
50	70	40	140	267	86	2	214
55	60	20	66	126	41	1	101
55	60	25	83	157	51	1	126
55	60	30	99	189	61	1	152
55	60	35	116	220	71	1	177
55	60	40	132	251	81	2	202
55	65	20	72	136	44	1	110
55	65	25	89	170	55	1	137
55	65	30	107	204	66	1	164
55	65	35	125	238	77	1	192
55	65	40	143	272	88	2	219
55	70	20	77	147	47	1	118
55	70	25	96	183	59	1	147
55	70	30	116	220	71	1	177
55	70	35	135	257	83	2	206
55	70	40	154	293	95	2	236
60	60	20	72	137	44	1	110
60	60	25	90	171	55	1	138
60	60	30	108	206	66	1	165
60	60	35	126	240	77	1	193
60	60	40	144	274	89	2	221
60	65	20	78	149	48	1	119
60	65	25	98	186	60	1	149
60	65	30	117	223	72	1	179
60	65	35	137	260	84	2	209
60	65	40	156	297	96	2	239
60	70	20	84	160	52	1	129
60	70	25	105	200	65	1	161
60	70	30	126	240	77	1	193
60	70	35	147	280	90	2	225
60	70	40	168	320	103	2	257

Die CO₂-Produktion liegt zwischen 100 und 300 kg pro Tonne Input Bioabfall. Bei einer mittleren CO₂-Produktion von 150 kg pro Mg Bioabfallinput und einer Befüllung der Rotteboxen mit 20 Mg werden im Schnitt bei einer 14 tägigen Intensivrotte stündlich 9 kg CO₂ bzw. 4,5 m³ CO₂ freigesetzt (Tab. 55).

Tab. 55: Stündliche CO₂-Produktion während 14-tägiger Intensivrotte (kg CO₂/h)

Befüllung in Mg	durchschnittliche CO ₂ -Produktion während der Rotte										
	kg CO ₂ / Mg Input										
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
15	4,5	4,9	5,4	5,8	6,3	6,7	7,1	7,6	8,0	8,5	8,9
16	4,8	5,2	5,7	6,2	6,7	7,1	7,6	8,1	8,6	9,0	9,5
17	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9,1	9,6	10,1
18	5,4	5,9	6,4	7,0	7,5	8,0	8,6	9,1	9,6	10,2	10,7
19	5,7	6,2	6,8	7,4	7,9	8,5	9,0	9,6	10,2	10,7	11,3
20	6,0	6,5	7,1	7,7	8,3	8,9	9,5	10,1	10,7	11,3	11,9
21	6,3	6,9	7,5	8,1	8,8	9,4	10,0	10,6	11,3	11,9	12,5
22	6,5	7,2	7,9	8,5	9,2	9,8	10,5	11,1	11,8	12,4	13,1
23	6,8	7,5	8,2	8,9	9,6	10,3	11,0	11,6	12,3	13,0	13,7
24	7,1	7,9	8,6	9,3	10,0	10,7	11,4	12,1	12,9	13,6	14,3
25	7,4	8,2	8,9	9,7	10,4	11,2	11,9	12,6	13,4	14,1	14,9

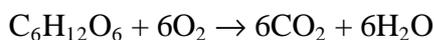
Die Berechnung des Wärmedargebotes durch die Intensivrotte kann über die Reaktionsenthalpien für charakteristische Abbauprozesse der Bioabfallkompostierung oder über die überschlägige Berechnung aus praktischen Betriebswerten erfolgen. Betriebserfahrungen zeigen, bei Belüftungsraten von 600 m³/h Ablufttemperaturen von über 55°C. Aus den Enthalpiedifferenzen lassen sich die theoretisch-nutzbaren Wärmeleistungen in Abhängigkeit von der Kühltemperatur bestimmen, es kann von einer Abwärmeleistung von 50 bis 60 kW pro Rottebox ausgegangen werden (Tab. 56).

Tab. 56: Nutzbare Wärmeleistung der Intensivrotte

Austritts- temperatur	Dichte	h''	Kühltemperat ur	Dichte	h''	nutzbare Leistung
°C	kg/m ³	kJ/kg	°C	kg/m ³	kJ/kg	kW
50	1,03	277,3	5	1,25	18,7	47,4
50	1,03	277,3	10	1,22	29,5	45,4
50	1,03	277,3	15	1,20	42,3	43,1
50	1,03	277,3	20	1,18	57,9	40,2
50	1,03	277,3	25	1,15	76,9	36,7
50	1,03	277,3	30	1,13	100,5	32,4
52	1,02	306,8	5	1,25	18,7	52,8
52	1,02	306,8	10	1,22	29,5	50,8
52	1,02	306,8	15	1,20	42,3	48,5
52	1,02	306,8	20	1,18	57,9	45,6
52	1,02	306,8	25	1,15	76,9	42,1
52	1,02	306,8	30	1,13	100,5	37,8
54	1,00	339,8	5	1,25	18,7	58,9
54	1,00	339,8	10	1,22	29,5	56,9
54	1,00	339,8	15	1,20	42,3	54,5
54	1,00	339,8	20	1,18	57,9	51,7
54	1,00	339,8	25	1,15	76,9	48,2
54	1,00	339,8	30	1,13	100,5	43,9
56	0,99	376,7	5	1,25	18,7	65,6
56	0,99	376,7	10	1,22	29,5	63,7
56	0,99	376,7	15	1,20	42,3	61,3
56	0,99	376,7	20	1,18	57,9	58,4
56	0,99	376,7	25	1,15	76,9	55,0
56	0,99	376,7	30	1,13	100,5	50,6
58	0,98	418,0	5	1,25	18,7	73,2
58	0,98	418,0	10	1,22	29,5	71,2
58	0,98	418,0	15	1,20	42,3	68,9
58	0,98	418,0	20	1,18	57,9	66,0
58	0,98	418,0	25	1,15	76,9	62,5
58	0,98	418,0	30	1,13	100,5	58,2
60	0,97	464,5	5	1,25	18,7	81,7
60	0,97	464,5	10	1,22	29,5	79,8
60	0,97	464,5	15	1,20	42,3	77,4
60	0,97	464,5	20	1,18	57,9	74,5
60	0,97	464,5	25	1,15	76,9	71,1
60	0,97	464,5	30	1,13	100,5	66,7

Annahmen: mittlerer Volumenstrom 600,0 m³/h, mittlere Dichte 1,1 kg/m³

Als charakteristischer Abbauprozess für eine energetische Bilanzierung der Komostierung kann, wie bereits oben erläutert, der Abbau von Glukose zu H₂O und CO₂ nach



mit einer Energiefreisetzung von 2.870 kJ/mol angesehen werden. Im mikrobiellen Abbau werden ca 60% dieser Energie, d. h. ca 1.770 kJ/mol Glukose bzw. 24,6 kJ pro Gramm abgebautem CO₂ als Wärme freigegeben. Beim anaeroben Abbau von Glukose ist dagegen

bautem CO₂ als Wärme freigegeben. Beim anaeroben Abbau von Glukose ist dagegen nur mit einer Wärmefreisetzung von 207 kJ/mol zu rechnen. Aus praktischen Versuchen werden für die freigesetzte Wärme Werte von 8 bis 80 kJ pro Gramm abgebautem Kohlenstoff angegeben [MÖRTH 1995, S.57]. Die Spannweite ist im Hinblick auf die niedrigen Werte durch unvollständige bzw. anaerobe Abbauprozesse und im Hinblick auf die hohen Werte u. a. durch hydrolytische Spaltung von Makromolekülen außerhalb der Zelle bedingt. In Anlehnung an die Wärmefreisetzung beim Glukoseabbau³⁷ wurden durchschnittliche Wärmeleistungen in Abhängigkeit vom Feststoffanteil, vom Anteil der organischen Substanz im Feststoff und vom Abbaugrad der Substanz unter Annahme einer 14-tägigen Intensivrotte berechnet. Nach Tab. 57 kann durchschnittlich von einer Wärmeleistung von mindestens 1 kW pro Mg Input ausgegangen werden, wobei die tatsächlichen Werte aufgrund der konservativen Abschätzung der Wärmefreisetzung eher höher liegen dürften. Über 90% der freigesetzten Wärme werden mit der Abluft aus der Intensivrotte abgeführt, da die Oberflächenwärmeverluste in der Regel 10% nicht überschreiten³⁸. In der Größenordnung stimmen die Werte damit gut mit den aus der Abluft ermittelten Werten nach Tab. 56 überein.

³⁷ Hier wurde mit 25 kJ/g abgebautem C gerechnet.

³⁸ Ausführlicher hierzu Teil 3 „Meßtechnische Untersuchungen zu Ermittlung und Auswertung von Wärmeströmen“ im Projektteil 1 „Bau und Betrieb der Demonstrationsanlage“, Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3/2 [KOLLER 1997].

Tab. 57: Durchschnittliche Wärmefreisetzung bei der Kompostierung

Feststoff- anteil	Anteil oTS	Abbaugrad oTS	prod. CO ₂ pro Mg Input	durchschnittl. Wärmeleistung	freigesetzte Wärme	durchschnittl. Wärmeleistung
					pro Rottebox mit 20 Mg Input	
%	%	%	g CO ₂ /Mg Input	kW/Mg Input	kJ	kW
40	60	20	91453	0,52	623483	10,3
40	60	25	114317	0,64	779354	12,9
40	60	30	137180	0,77	935224	15,5
40	60	35	160043	0,90	1091095	18,0
40	60	40	182907	1,03	1246966	20,6
40	65	20	99074	0,56	675440	11,2
40	65	25	123843	0,70	844300	14,0
40	65	30	148612	0,84	1013160	16,8
40	65	35	173380	0,98	1182020	19,5
40	65	40	198149	1,12	1350880	22,3
40	70	20	106696	0,60	727397	12,0
40	70	25	133369	0,75	909246	15,0
40	70	30	160043	0,90	1091095	18,0
40	70	35	186717	1,05	1272944	21,0
40	70	40	213391	1,20	1454794	24,1
45	60	20	102885	0,58	701418	11,6
45	60	25	128606	0,72	876773	14,5
45	60	30	154327	0,87	1052128	17,4
45	60	35	180049	1,01	1227482	20,3
45	60	40	205770	1,16	1402837	23,2
45	65	20	111459	0,63	759870	12,6
45	65	25	139323	0,79	949837	15,7
45	65	30	167188	0,94	1139805	18,8
45	65	35	195053	1,10	1329772	22,0
45	65	40	222917	1,26	1519740	25,1
45	70	20	120032	0,68	818321	13,5
45	70	25	150041	0,85	1022902	16,9
45	70	30	180049	1,01	1227482	20,3
45	70	35	210057	1,18	1432062	23,7
45	70	40	240065	1,35	1636643	27,1
50	60	20	114317	0,64	779354	12,9
50	60	25	142896	0,81	974192	16,1
50	60	30	171475	0,97	1169031	19,3
50	60	35	200054	1,13	1363869	22,6
50	60	40	228633	1,29	1558707	25,8
50	65	20	123843	0,70	844300	14,0
50	65	25	154804	0,87	1055375	17,4
50	65	30	185765	1,05	1266450	20,9
50	65	35	216725	1,22	1477525	24,4
50	65	40	247686	1,40	1688600	27,9
50	70	20	133369	0,75	909246	15,0
50	70	25	166712	0,94	1136558	18,8
50	70	30	200054	1,13	1363869	22,6
50	70	35	233396	1,32	1591181	26,3

Feststoff- anteil	Anteil oTS	Abbaugrad oTS	prod. CO ₂ pro Mg Input	durchschnittl. Wärmeleistung	freigesetzte Wärme	durchschnittl. Wärmeleistung
					pro Rottebox	mit 20 Mg Input
%	%	%	g CO ₂ /Mg Input	kW/Mg Input	kJ	kW
50	70	40	266739	1,50	1818492	30,1
55	60	20	125748	0,71	857289	14,2
55	60	25	157185	0,89	1071611	17,7
55	60	30	188622	1,06	1285934	21,3
55	60	35	220060	1,24	1500256	24,8
55	60	40	251497	1,42	1714578	28,3
55	65	20	136227	0,77	928730	15,4
55	65	25	170284	0,96	1160912	19,2
55	65	30	204341	1,15	1393095	23,0
55	65	35	238398	1,34	1625277	26,9
55	65	40	272455	1,54	1857460	30,7
55	70	20	146706	0,83	1000171	16,5
55	70	25	183383	1,03	1250213	20,7
55	70	30	220060	1,24	1500256	24,8
55	70	35	256736	1,45	1750299	28,9
55	70	40	293413	1,65	2000341	33,1
60	60	20	137180	0,77	935224	15,5
60	60	25	171475	0,97	1169031	19,3
60	60	30	205770	1,16	1402837	23,2
60	60	35	240065	1,35	1636643	27,1
60	60	40	274360	1,55	1870449	30,9
60	65	20	148612	0,84	1013160	16,8
60	65	25	185765	1,05	1266450	20,9
60	65	30	222917	1,26	1519740	25,1
60	65	35	260070	1,47	1773030	29,3
60	65	40	297223	1,68	2026320	33,5
60	70	20	160043	0,90	1091095	18,0
60	70	25	200054	1,13	1363869	22,6
60	70	30	240065	1,35	1636643	27,1
60	70	35	280076	1,58	1909417	31,6
60	70	40	320087	1,80	2182190	36,1

Für die Auslegung wird davon ausgegangen, daß ein Gartenbaubetrieb das Carboferm[®]-Verfahren einsetzen möchte. Der umgekehrte Fall, daß ein Abfallbetrieb seinen Geschäftsbereich durch die Hinzunahme eines Gartenbaubetriebes erweitert und damit eine Verwertungsmöglichkeit für das CO₂ der Abluft schafft, kann, nicht zuletzt aufgrund der erforderlichen gartenbaulichen Kenntnisse und des Platzbedarfs, als unwahrscheinlich verworfen werden. Der Vergleich der Auslegungsvarianten erfolgt nach folgenden Annahmen (Tab. 58):

Tab. 58: Parameter für den Vergleich von Auslegungsvarianten

Parameter	Einheit	Wert	Quelle
Rottedauer	Tage	14	
Feststoffanteil	%	50	
Anteil oTS	%	60	
Abbaugrad	%	30	
prod. CO ₂	kg/ Mg Input	171	Tab. 54
Befüllung	Mg	20	
stündl. CO ₂ -Prod.	kg /Reaktorfüll.	10,18	Tab. 55
spez. Wärmeleist.	kW/Mg	0,97	Tab. 57
Wärmeleist. Rottebox	kW/Box	19,4	
CO ₂ -Bedarf	kg/(m ² a)	10	Tab. 15
Düngungstage		300	
durchschn. Düngungsdauer	h	8	
durchschn. CO ₂ -Bedarf	kg/(m ² h)	0,0042	
Wärmebedarf bis 1000 m ²	W/m ²	300	in Anlehnung an Tab. 45
Wärmebedarf ab 2000 m ²	W/m ²	250	in Anlehnung an Tab. 45

Der Vergleich der beiden Auslegungsvarianten zeigt, daß eine Auslegung nach einer bedarfsgerechten CO₂-Versorgung die wahrscheinlichere Variante ist (Tab. 59). Die Auslegung nach dem Wärmebedarf würde bei Gewächshausgrößen ab 2.000 m², die insgesamt über 2/3 der Unterglasflächen repräsentieren (vgl. Tab. 19), eine Kompostierungsanlage mit mindestens 15.000 Mg Jahresdurchsatz, 26 Rotteboxen und entsprechendem Kapital- und Flächenbedarf erfordern.

Tab. 59: Vergleich der Auslegungsvarianten

Gewächshausgröße m ²	Auslegung nach CO ₂ -Bedarf		Auslegung nach Wärmebedarf	
	CO ₂ -Bedarf kg CO ₂ /h	Zahl der Rotteboxen	Wärmebedarf kW	Zahl der Rotteboxen
500	2,1	0,2	150	8
1000	4,2	0,4	300	15
2000	8,3	0,8	500	26
5000	20,8	2,0	1250	64
10000	41,7	4,1	2500	129

5.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Ökobilanzierung wird daher für Systeme zur CO₂-Anreicherung von Gewächshäusern durchgeführt. Systemvergleiche zur umfassenden ökologischen Bewertung verschiedener Verfahren der CO₂-Düngung sind bisher nicht bekannt.

5.2.1 Ausgangsfragestellung, Ziel:

Beantwortet werden soll die Frage, mit welchen Umweltbelastungen die untersuchten Varianten der bedarfsgerechten CO₂-Düngung unter den in dieser Studie vereinbarten Randbedingungen verbunden sind. Insbesondere soll untersucht werden, ob die CO₂-Düngung von Gewächshäusern gemäß der Verfahrensentwicklung des Demonstrationsvorhabens ökologische Vorteile gegenüber traditionellen CO₂-Düngungsverfahren aufweist. Die ökologische Untersuchung und Bewertung der Verfahrensentwicklung soll Schwachstellen und Optimierungspotentiale aufzeigen und Interessenten eine Abschätzung der Umweltwirkungen der CO₂-Düngung mittels Kompostierungsluft im Vergleich zu traditionellen Verfahren ermöglichen.

5.2.2 Untersuchungsrahmen

5.2.2.1 Systemfunktion, funktionelle Einheit und untersuchte Systeme

Die untersuchte Systemfunktion ist die CO₂-Düngung von Gewächshäusern. Als nutzenbezogene Vergleichseinheit wird die ganzjährige Anreicherung von einem Hektar Anbaufläche unter Glas auf eine CO₂-Konzentration von 1.000 vpm festgelegt.

Betrachtet werden neben dem in der Versuchsanlage realisierten Carboferm-Verfahren die Düngung mit technischem CO₂, die Düngung mittels CO₂-Kanonen und die Düngung mittels CO₂-Brenne (vgl. Kap. 3.5 ff.) gemäß Tab. 60. Die CO₂-Düngung mittels Rauchgasen aus zentralen Heizkesseln wird hier nicht betrachtet, da diese Anlagen im Sommer ausgeschaltet werden und keine ganzjährige CO₂-Düngung leisten. Zudem vereinbaren die Gasversorger bei häufig eine unterbrechbare Gaslieferung; d. h. an sehr kalten Tagen mit Spitzennachfrage werden diese Betriebe von der Gasversorgung abgetrennt und auf einen Zweitbrennstoff (meist Heizöl) umgestellt. Da für eine unbedenkliche CO₂-Anreicherung eine vorübergehende Umstellung auf Heizöl in der Regel nicht in Frage kommt, wäre auch in diesen Zeiträumen eine durchgehende CO₂-Düngung nicht zu gewährleisten.

Tab. 60: Vergleichssysteme der Ökobilanzierung

Variante	Beschreibung
BR	CO ₂ -Düngung mit gebläsefreien Gasbrennern, die Auslegung erfolgt nach dem CO ₂ -Bedarf unabhängig von der Wärmeversorgung, der eingesetzte Brennstoff ist Erdgas H.
CF	CO ₂ -Düngung nach dem Carboferm [®] -Verfahren in Anlehnung an die Realisierung innerhalb des Demonstrationsvorhaben (Boxenkompostierung, Strahlwäscher und Biofilter zu Abluftaufbereitung), Auslegung auf eine bedarfsgerechte CO ₂ -Düngung, Gewächshaus und Kompostierungsanlage in unmittelbarer Nachbarschaft
GK	CO ₂ -Düngung mit CO ₂ -Kanonen, Auslegung auf bedarfsgerchte Wärmeversorgung, Zwangslüftung ab einer CO ₂ -Konzentration von 2000 vpm, Brennstoff Erdgas H
TK	CO ₂ -Düngung mit technischem CO ₂ , CO ₂ als Abprodukt der Ammoniaksynthese, Bevorratung in hochisolierten Niederdrucktanks mit 8 Befüllungen pro Jahr, durchschnittl. Transportaufwendung vom Herstellungsort: 200 Straßenkilometer mit LKW Diesel

Diese Vergleichssysteme werden in folgenden Untervarianten untersucht:

BR_S: Standardvariante für die CO₂-Düngung mittels CO₂-Brenner.

BR_WG: Ausgehend von der Bilanzierung für die Standardvariante wird eine Gutschrift für die die gleichzeitig mit der CO₂-Produktion stattfindende Wärmeproduktion während der Heizperiode verrechnet.

CF_S: Standardvariante, ein Wärmeeintrag in das Gewächshaus durch warme Kompostierungsabluft bzw. ein Wärmeartrag durch die konditionierte Kompostierungsabluft bleiben unberücksichtigt.

CF_WG: Bei dieser Variante wird während der Heizperiode von einem erwünschten Wärmeeintrag durch die Kompostierungsabluft in das Gewächshaus ausgegangen; es wird daher in der Sachbilanz eine Emissionsgutschrift für die eingebrachte Wärmemenge berechnet.

CF_WB: Bei dieser Variante wird die Konditionierung der Kompostierungsabluft³⁹ mit kalter Umgebungsluft untersucht. Diese verdrängt aus dem Gewächshaus warme Luft, es findet insgesamt ein Wärmeverlust statt.

GK_S: Standardvariante für die CO₂-Düngung mit Gaskanonen, die CO₂-Anreicherung wird nur während der heizfreien Periode bilanziert, in der übrigen Zeit fällt sie „ökologisch umsonst“ an, da die Wärmeproduktion den Hauptnutzen darstellt.

GK_WB: Basierend auf der Standardvariante wird eine Belastung für den erforderlichen Zwangsluftwechsel vorgenommen. Der Zwangsluftwechsel ist bei hohen aufzuheizenden Temperaturdifferenzen nötig, um die CO₂-Konzentration unter dem hier

³⁹ Die Eingangskonzentration ins Gewächshaus soll aus Gründen des Arbeitsschutzes 5.000 vpm nicht überschreiten!

festgelegten maximalen Wert von 2.000 vpm zu halten. Diese Variante ist nur bedingt mit den übrigen Varianten vergleichbar, da keine Emissionsgutschriften für den wesentlich höheren Wirkungsgrad der CO₂-Kanonen gegenüber sonstigen Gewächshausbeheizungen bei niedrigen Temperaturdifferenzen verrechnet werden und ein vollständige Gewächshausbeheizung mit Gaskanonen nur bei Gewächshäusern mit relativ niedrigem Wärmebedarf üblich ist.

TK: Die Düngung mit technischem CO₂ wird nur in einer Standardvariante untersucht, der Einfluß der Annahmen zum Primärenergieverbrauch und zum Transportweg wird in einer Sensitivitätsanalyse beleuchtet.

5.2.2.2 Systemgrenzen und Allokationsverfahren

Die „Lebenswege“ der CO₂-Anreicherung beginnen mit der Sammlung und Aufbereitung von CO₂ soweit es sich um ein Abprodukt handelt bzw. mit der Exploration der Rohstoffe, wenn CO₂ das Primärprodukt eines Prozesses ist. Berücksichtigt werden alle erforderlichen Zwischenschritte wie Reinigung, Transporte, Verdichtung, Speicherung und Einbringung in das Gewächshaus. Das Ende des Lebensweges stellt das Ausbringen des CO₂ in das Gewächshaus dar. Mit der Aufnahme des CO₂ durch die Anbauprodukte bzw. mit dem Eintritt in die freie Atmosphäre über den Luftwechsel des Gewächshauses ist das CO₂ wieder in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf eingegliedert.

Bei der CO₂-Düngung nach dem Carbofermverfahren und bei der CO₂-Düngung mittels Abgasen aus Erdgasbrennern wird neben dem CO₂ in unterschiedlichem Ausmaß auch Wärme ins Gewächshaus eingebracht, die zumindest zu bestimmten Zeiten ein erwünschtes Neben- bzw. weiteres Hauptprodukt darstellt. Die in Kap. 4.3.2 vorgestellten Verfahren zur Lösung von Allokationsproblemen eignen sich hier nicht. Anstelle einer graduellen Zuteilung wird wie folgt verfahren: Solange die Bereitstellung von Wärme den Hauptnutzen darstellt (Heizperiode), wird die Bereitstellung von CO₂ wie die Nutzung eines Abproduktes gehandhabt, daß ökologisch „umsonst“ anfällt, in der übrigen Zeit geht werden alle Belastungen der CO₂-Düngung angerechnet. Bei der Nutzung von technischem CO₂ im Gartenbau entfallen Allokationsprobleme.

Das CO₂ für die CO₂ Düngung wird in der CO₂-Bilanz berücksichtigt, wenn es nicht biogenen Ursprungs ist und kein Abprodukt eines vorgelagerten (außerhalb der Systemgrenzen liegenden) Prozesses darstellt. Nach dieser Vereinbarung wird das technische CO₂ aus der Ammoniaksynthese hier in der CO₂-Bilanz nicht erfaßt, da es auch unabhängig von der Fassung und Aufbereitung als Technisches CO₂ als Abprodukt des vorgelagerten Hauptprozesses Ammoniaksynthese angefallen und freigesetzt worden wäre und als Emission daher diesem Prozeß zuzuordnen ist. Ebenso bleibt das CO₂ aus der CO₂-Düngung mit dem Carboferm[®] Verfahren

unberücksichtigt, da dieses Bestandteil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufes ist und nicht zur einer Verstärkung des Treibhauseffektes beiträgt. Das CO₂ aus der Düngung mit Verbrennungsgasen wird dann erfaßt, wenn die CO₂-Düngung den Hauptnutzen darstellt und Wärmeproduktion nicht im Vordergrund steht.

Der Lebensweg der Düngungsanlagen selbst bleibt unberücksichtigt.

5.2.2.3 Methode für Wirkungsabschätzung und anschließende Auswertung

Die Wirkungsabschätzung erfolgt über eine wirkungsorientierte Klassifizierung und Charakterisierung. Dazu werden die Daten aus der Sachbilanz den Umweltwirkungskategorien Treibhauseffekt, Ozonabbau, Sommer- und Wintersmog, Eutrophierung, Versäuerung zugeordnet. Aufgrund der verwendeten Datensätze können zu Humantoxizität, Umwelttoxizität keine quantitativen Aussagen abgeleitet werden. Auf mögliche Belästigungen und Aspekte des Arbeitsschutzes wird in der Auswertung eingegangen. Ein überschlägige Berechnung des Flächenbedarfs (z. B. für Energiebereitstellung, Düngungsanlage etc.) ergab, daß dieser mit Ausnahme des Carbofermverfahrens nur ein Bruchteil der zugrundegelegten Gewächshausfläche darstellt; auf ihn wird daher nur qualitativ in der Auswertung eingegangen. Die Kategorien Wirkungen von Abwärme auf Wasser und elektromagnetische Strahlung, Elektromog sind hier nicht von Belang. Die Wirkungskategorien werden ergänzend nach dem Ansatz des Eco-Indicators zu einer Maßzahl verdichtet.

Die Auswertung und zusammenfassende Beurteilung erfolgt verbalargumentativ insbesondere über folgende Kriterien:

- Sachbilanz
- Ergebnisse der Wirkungsabschätzung und Analyse von Substitutionspotentialen
- Eco-indicator
- Sensitivitätsanalyse
- Wirtschaftlichkeit
- Arbeitsschutz
- Rechtsverträglichkeit
- Fehlerfreundlichkeit

5.2.2.4 Annahmen und Festlegungen für die Sachbilanz

Begasungsmenge

In Anlehnung an die Ausführungen in Kap. 3.2 wird hier bei einer (relativ) kalten, bodennahen Einbringung (Technisches CO₂, Carboferm) ein Bedarf von 100 Mg CO₂ pro Jahr für die Anreicherung auf 1.000 vpm angesetzt, für die hoch und heiß ausblasenden CO₂-Generatoren (Gaskanonen) wird aufgrund der ungünstigeren Verteilung in der Standardvariante ein Mehrbedarf von 20% veranschlagt (vgl. Kap. 3.2 und [STRÄLEN 1988]), für die in Kulturnähe und

weniger heiß ausblasenden CO₂-Brenner ein Mehrbedarf von 10%. Der Einfluß dieser Annahmen zum Mehrbedarf wird in Sensitivitätsanalysen überprüft. Für die Berechnungen wird von einer Düngung an 300 Tagen mit durchschnittlich 8 Stunden Düngungsdauer, d. h. von einem stündlichen Eintrag in den Begasungszeiten von 41 kg CO₂/ha im Falle der Düngung mit technischem CO₂ bzw. nach dem Carbofermverfahren und von einem stündlichen Eintrag von 50 kg/ha bei den Gasgeneratoren bzw. von 45,8/ha bei den CO₂-Brennern ausgegangen.

Klimaführung im Gewächshaus

Die Temperatur im Gewächshaus soll durchschnittlich tagsüber 18°C und nachts 12°C betragen; beide Werte liegen in der Mitte zwischen den im Schnitt höheren Temperaturen im Zierpflanzenbau und den in der Regel tieferen Temperaturen im Gemüsebau. Da, wie bereits dargestellt, die höheren Gewinnsteigerungen für eine CO₂-Anreicherung im Zierpflanzenbau zu erwarten sind, ist die Festlegung im Hinblick auf den Wärmebedarf als eher niedrig einzustufen. Der Wärmebedarf wird unter Zugrundelegung einer mittleren Normaußentemperatur von -12°C und einer Breitschiffbauweise mit Einfachverglasung mit 250 W/m² bzw. 3 MW pro Hektar angenommen. Die Zwangslüftung bei der Beheizung mit CO₂-Kanonen soll ab einer CO₂-Konzentration von 2.000 vpm einsetzen. Für die klimatischen Umgebungsbedingungen werden die Daten der Wetterstation Potsdam/Telegraphenberg zugrundegelegt. Tab. 61 enthält eine Zusammenfassung von Klimadaten der Jahre 1981 - 1990⁴⁰. Die Spalten mit Mittelwerten stellen Monatsmittel dar, die wiederum über den Auswertungszeitraum gemittelt sind. Die Spalten T max und T min enthalten die über den Bezugszeitraum gemittelten Werte der Monatsmaxima bzw. Minima. Aus der Tabelle wird deutlich, daß unter den festgesetzten Gewächshausklimabedingungen für die Monate Mai bis September sowohl tagsüber als auch nachts keine Heizung erforderlich ist.

⁴⁰ Eine ausführlichere Zusammenstellung der Klimadaten enthält **Anhang 2.**

Tab. 61: Klimadaten

Monat	24-h Mittel	Mittel 10-19 Uhr	Mittel 22-07 Uhr	T max	T min	Mittlere Feuch- te
Januar	-0,15	0,43	-0,70	9,54	-10,74	84,70
Februar	-0,01	1,12	-1,16	11,19	-8,56	80,30
März	4,25	5,99	2,47	17,33	-5,00	75,30
April	8,31	10,80	5,79	24,50	-2,39	68,10
Mai	13,97	16,96	10,94	27,63	2,00	67,30
Juni	15,95	18,43	13,45	30,42	6,39	72,30
Juli	18,17	20,87	15,45	32,22	8,89	69,30
August	17,70	20,23	14,99	32,26	7,97	71,10
September	13,95	16,09	11,80	26,42	5,72	78,10
Oktober	9,84	11,50	8,01	22,44	-0,66	82,40
November	4,35	5,05	3,41	14,09	-5,06	84,40
Dezember	1,37	1,80	0,87	10,87	-8,61	86,70

Transportaufwendungen

Die mittlere Transportaufwend für den Transport des technischen CO₂ zum Einsatzort wird mit 200 km festgelegt. Diese Entfernung ist ungefähr die Hälfte der maximalen Transportdistanz innerhalb Deutschlands von einem der großen Standorte der chemischen Industrie zum Einsatzort. Der Transport von dem technischem CO₂ erfolgt in Tankwagen auf der Straße, die Rückfahrt erfolgt ohne weitere Nutzung.

Sonstiges

Der Bedarf an Meß-, Steuer- und Regelungstechnik wird in allen Fällen als vergleichbar angesehen und hier nicht weiter berücksichtigt.

5.2.3 Anforderungen an Daten, kritische Begleitung und Dokumentation

Der Bilanzraum orientiert sich zeitlich und räumlich an den Gegebenheiten in der BRD nach 1989. Bezugsjahre der zugrunde gelegten Daten sind soweit entsprechende Daten vorhanden sind die 90er Jahre. Die Herkunft der Daten wird bei den jeweiligen Bilanzierungsschritten angegeben. Für die Erdgasbereitstellung, die Strombereitstellung und für die Belastungen durch Transporte werden einheitliche Datensätze des Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) verwendet [GEMIS 1994]. Kritisch ist Datenlage in Bezug auf den Energieaufwand für die Aufbereitung und Bereitstellung von technischem CO₂. Hierbei konnte nicht auf gesicherte Daten zurückgegriffen werden.

Die vollständige Dokumentation erfolgt innerhalb dieses Abschlußberichtes.

5.3 Sachbilanz

5.3.1 Datenquellen und generelle Daten

Die für die Sachbilanzierung interessierenden Prozesse und ihre Datenherkunft zeigt Tab. 62. Daraus wird deutlich, daß sich die Ökobilanzierung hier im wesentlichen auf die Bilanzierung der Energieträger beschränken kann. Der Großteil der Daten wird über GEMIS, das heißt auf einer einheitlichen Datengrundlage generiert, was die Vergleichbarkeit und Aussagekraft erhöht. Nachteilig an den GEMIS-Daten ist, daß die Emissionstableaus nur die (mengenmäßig) bedeutendsten Hauptemissionen enthalten und Nebenelemente (z. B. Schwermetalle) unberücksichtigt bleiben. Mit der jüngst erschienen Veröffentlichung des Schweizer Bundesumweltamtes [BUWAL 1996], die hier nicht mehr berücksichtigt werden konnte, ist es aber dem interessierten Leser leicht möglich, anhand der Sachbilanzdaten ein erweitertes Ökoinventar zu erstellen.

Tab. 62: Datenquellen

Prozeß	Datenherkunft
Bereitstellung elektrischer Energie	[GEMIS 1994]
Bereitstellung ⁴¹ von Erdgas	[GEMIS 1994]
Bereitstellung von Technischem CO ₂	
Verbrennung von Erdgas in CO ₂ -Generatoren	[GEMIS 1994] und weitere
Transportaufwendungen für Güterverkehr auf der Straße (Diesel-LKW)	[GEMIS 1994]
Einbringung von Kompostierungsabluft in das Gewächshaus	verschiedene
Gewächshausbeheizung	[KTBL 1994]

Die folgenden Tabellen (Tab. 63 - Tab. 66) enthalten die GEMIS Werte für die Bereitstellung von Erdgas-, Strom- und Transportleistungen und für die Verbrennung von Erdgas.

Tab. 63: Direkte Emissionen von Güterverkehrsmitteln

Schadstoff	Einheit	LKW-Diesel
SO ₂	g/(t*km)	0,1
NO _x	g/(t*km)	1,5
Staub	g/(t*km)	0,1
CO	g/(t*km)	0,5
CH ₄	g/(t*km)	0
NM _{VOC}	g/(t*km)	0,4
N ₂ O	g/(t*km)	0
CO ₂	g/(t*km)	109

Quelle: [GEMIS 94]

⁴¹ Der Begriff Bereitstellung umschreibt hier alle Aufwendung wie Förderung, Fassung, Aufbereitung, Transport etc. bis zur Nutzung durch den Endverbraucher

Tab. 64: Emissionen bei der Verbrennung von Erdgas, Gebläsebrenner

	kg/TJ	kg/m ³	kg/kWh
SO ₂	0,4	0,00001	0,00000117
NO _X	30	0,00097	0,00008804
Staub	0,1	0	0,00000029
CO	0,1	0	0,00000029
CH ₄	30	0,00097	0,00008804
NM _{VOC}	5	0,00016	0,00001467
N ₂ O	1	0,00003	0,00000293
CO ₂	55.150	1,78686	0,16185326

Quelle: [GEMIS 94, S. 111]

Tab. 65: Bereitstellung Strom, frei Verbraucher

Emission	kg/TJ	kg/kWh
SO ₂	141,7	0,00051
NO _X	232,5	0,00084
Staub	22,8	0,00008
CO	160,3	0,00058
CH ₄	488,2	0,00176
NM _{VOC}	22,3	0,00008
N ₂ O	7,6	0,00003
CO ₂	197790	0,71204
Primärenergie	TJ/TJ _{end}	3

Quelle: [GEMIS 94, S. 81]

Tab. 66: Aufwendungen für die Bereitstellung Erdgas frei Verbraucher in der BRD

Schadstoff	kg/TJ _{end}	kg/m ³
SO ₂	1,4	0,0000512
NO _X	11,5	0,0004206
Staub	0,6	0,0000219
CO	12,8	0,0004682
CH ₄	148,6	0,0054352
NM _{VOC}	0,7	0,0000256
N ₂ O	0,1	0,0000037
CO ₂	2705	0,0989381
Primärenergie	TJ/TJ _{end}	1,1

Quelle: [GEMIS 94, S. 53]

5.3.2 Berechnungsgrundlagen

Für die allgemeinen Berechnungsgrundlagen wird auf die vorangegangenen Kapitel verwiesen. Einzelheiten enthalten auch die Datenblätter im Anhang.

CO₂-Brenner

Bei der Standardvariante BR_S für die CO₂-Düngung mittels CO₂-Brenner wird davon ausgegangen, daß die Wärmeproduktion vernachlässigbar ist und/oder in der Steuerung der Gewächshausbeheizung nicht berücksichtigt ist. In der Variante BR_WG wird ausgehend von der Bilanzierung für die Standardvariante eine Emissionsgutschrift für die gleichzeitig mit der CO₂-Produktion stattfindende Wärmeproduktion während der Heizperiode verrechnet. Die Gutschrift errechnet sich aus dem Heizwert des für die CO₂-Erzeugung im Gewächshaus verbrannten Erdgases. Da in beiden Varianten von einem gebläsefreien Brenner ausgegangen wird, kann der Strombedarf der CO₂-Brenner vernachlässigt werden. Die maximale CO₂-Leistung des zugrundegelegten Brenners beträgt 2,4 kg/h.

Carboferm^â

Für die Sachbilanz der Düngung mit Rotteabluft wird von einer Boxenkompostierung mit 14-tägiger Intensivrotte ausgegangen. Der durchschnittliche Input pro Rottebox beträgt 20 Mg, mit einem Feststoffanteil von 50% und Anteil von organischem Trockenstoff (oTS) an dem Feststoff von 60%. Der Abbaugrad während der Intensivrotte wird mit 30% der oTS festgelegt. Daraus ergibt sich eine mittlere CO₂-Produktion von ca. 0,5 kg CO₂ pro Stunde und Mg Input, für eine bedarfsgerechte CO₂-Düngung von 1 ha Gewächshausfläche sind demnach 4 Boxen nötig. Für die Berechnung der durchschnittlichen CO₂-Konzentration in der Abluft der Intensivrotte wird ein mittlerer Belüftungsstrom von 300 m³/h angenommen. Da aus Sicherheitsgründen die Eingangskonzentration der Rotteabluft in das Gewächshaus nicht höher als 5.000 vpm sein soll, muß die Abluft konditioniert werden. Die durchschnittliche Menge errechnet sich nach den obigen Annahmen zu insgesamt knapp 3.000 m³ pro Stunde. Der Bedarf für sämtliche Gastransporte ab dem Biofilter (incl. Beimischung von Frischluft und Einbringen in das Gewächshaus) wird pauschal mit 1,25 kW pro Rottebox angesetzt. Der Energiebedarf für den Gastransport wird als hier als einzige Aufwendung für die CO₂-Düngung nach dem Carbofermverfahren angesetzt. Alle anderen Aufwendungen entstehen primär im Zusammenhang mit der Bioabfallkompostierung und werden dieser zugeschlagen.

Bei der Standardvariante CF_S wird weder ein eventueller Wärmeeintrag in das Gewächshaus durch warme Kompostierungsabluft noch ein möglicher Wärmeaustrag durch die notwendige Konditionierung (Beimischung von Umgebungs- oder Gewächshausluft) der Kompostierungsabluft berücksichtigt. Diese Fälle werden in den Varianten CF_WG und CF_WB weiter verfolgt.

In der Variante CF_WG wird von einem erwünschten Wärmeeintrag während der Heizperiode durch die Kompostierungsabluft in das Gewächshaus ausgegangen; es wird daher in der Sachbilanz der Standardvariante eine Emissionsgutschrift für die eingebrachte Wärmemenge berechnet. Die Wärmegutschrift wird aus der Enthalpiedifferenz der Kompostierungsabluft zu der von ihr verdrängten Gewächshausluft berechnet. Für die Enthalpie der Kompostierungsabluft wird pro Box ein gesättigter Volumenstrom von 300 m³/h mit einer Eintrittstemperatur von 55°C in das Gewächshaus angenommen. Für das Gewächshaus wird ein Sättigungsgrad der Luft von 0,7 angesetzt.

Bei der Variante CF_WB wird davon ausgegangen, daß die Vorverdünnung der Kompostierungsabluft⁴² mit kalter Umgebungsluft erfolgt. Diese verdrängt aus dem Gewächshaus warme Luft, es findet ein Wärmeverlust statt. Der Wärmeverlust ergibt sich wiederum als Enthalpiedifferenz der mit der CO₂-Düngung eingebrachten Umgebungsluft zu der verdrängten Gewächshausluft und wird für die Dauer der Heizperiode berechnet. Für die Umgebungsluft wird als durchschnittliche Temperatur im Betrachtungszeitraum 5°C und ein Sättigungsgrad von 0,7 angesetzt.

CO₂-Kanonen

In der Standardvariante für die CO₂-Düngung mit Gaskanonen GK_S wird die CO₂-Anreicherung während der gesamten Heizperiode als Abprodukt betrachtet, das „ökologisch umsonst“ anfällt. Als Referenzgerät dient eine CO₂-Kanone mit einer Wärmeleistung von 110 KW, einem Gasdurchsatz von annähernd 13 m³/h und einem elektrischen Anschlußwert von 0,6 KW. Die CO₂-Kanonen sollen den Wärmebedarf des Gewächshauses vollständig abdecken. Die Dimensionierung erfolgt überschlägig nach der Normaußentemperatur für Berlin (vgl. DIN 4701) von -14°C und der Gewächshaussolltemperatur von 18°C entsprechend den Tabellen in [KTBL 1994]. Es wird davon ausgegangen, daß in der heizfreien Zeit die für eine bedarfsgerechte Versorgung nötige Mindestanzahl von CO₂-Kanonen (mit voller Leistung) für die CO₂-Anreicherung eingesetzt wird.

Bei hohen aufzuheizenden Temperaturdifferenzen ist ein Zwangsluftwechsel nötig, um die CO₂-Konzentration im human- und phytohygienisch unbedenklichen Bereich zu halten. Der Arbeitsschutz fordert eine CO₂-Konzentration kleiner 5.000 vpm. Viele Pflanzen haben aber ein niedrigeres Wachstumsoptimum und auch die Einhaltung des MAK-Wertes muß sicher gewährleistet werden. Hier wird daher davon ausgegangen, daß die CO₂-Konzentration im Gewächshaus 2.000 vpm nicht überschreiten soll. Hierfür wird der erforderliche Zwangsluftwechsel anhand der oben erwähnten Klimadaten berechnet. Für die kältesten fünf Monate er-

⁴² Die Eingangskonzentration ins Gewächshaus soll aus Gründen des Arbeitsschutzes 5.000 vpm nicht überschreiten!

geben sich Zwangsluftwechsel bis zu 3,4/h. Der damit verbundene zusätzliche Wärmeverbrauch wurde berechnet und der Variante GK_WB als Emissionsbelastung hinzugerechnet. Die Durchschnittstagesemperatur der Umgebungsluft wurde für die kältesten fünf Monate zu 3°C angesetzt, der Sättigungsgrad zu 0,7. Da die CO₂-Konzentration auch außerhalb der Düngungszeit 2.000 vpm nicht überschreiten soll, ergibt sich der zusätzliche Wärmebedarf aus den ganztägigen Wärmeverlusten. Diese Variante ist wie bereits erwähnt nur bedingt mit den übrigen Systemen vergleichbar, da keine Emissionsgutschriften für den wesentlich höheren Wirkungsgrad der CO₂-Kanonen gegenüber sonstigen Gewächshausbeheizungen bei niedrigen Temperaturdifferenzen verrechnet wurden. Zudem werden CO₂-Kanonen in der Praxis bevorzugt in Gewächshäusern eingesetzt, die in den kalten Wintermonaten nur frostfrei geheizt werden, so daß der Zwangsluftwechsel, sofern er überhaupt nötig wäre, einen wesentlich kleineren Betrag ausmachen würde.

Technisches CO₂

Die CO₂-Düngung mit technischem CO₂ wird nur in einer Variante untersucht. Dabei wird CO₂ als Abprodukt der Ammoniaksynthese angenommen, da dies inzwischen der mengenmäßig bedeutendste Gewinnungsweg für Technisches CO₂ ist (vgl. [ULLMANN 1985]). Für den Energieaufwand für die Fassung und Aufbereitung des Abproduktes CO₂ zum verkaufsfähigen Endprodukt Technisches CO₂ konnten keine gesicherten Daten eruiert werden. Der hier verwendete Wert von 175 kWh_{el}/Mg CO₂ beruht auf einer mündlichen Auskunft des Bayer-Werkes in Ludwigshafen und muß als unsicher betrachtet werden. Der von GLEU [1987] nach TUROWSKI [1977] zitierte Wert (350 kWh Primärenergie /Mg CO₂) liegt zwar in einem ähnlichen Bereich, kann aber nicht verwendet werden, da er sich auf heute nicht mehr übliche Verfahren der technischen CO₂-Gewinnung (CO₂-Gewinnung aus Rauchgasen und CO₂-Gewinnung aus natürlichen Vorkommen) bezieht. Auch die Angaben von Turowski beruhen überwiegend „nur“ auf Firmenmitteilungen. Für die Sachbilanzierung wird die Bevorratung in hochisolierten Niederdrucktanks (ohne Rückkühlung) mit einem Behälterfassungsvermögen von 12,5 Mg angenommen. Diese Auslegung beruht auf den von Kohlendioxidvertreibern empfohlenen 8 Befüllungen pro Jahr. Die mittlere Transportaufwendung vom Herstellungsort wird auf 200 Straßenkilometer festgelegt, da davon auszugehen ist, daß von den bedeutenden Chemiestandorten bis zum Anwendungsort in der BRD in der Regel nicht mehr als 400 km liegen. Der Einfluß der Energieaufwandes für die Gewinnung von CO₂ und der Transportaufwendungen auf die Sachbilanz wird in Sensitivitätsanalysen untersucht. Die hochisolierten Niederdrucktanks bieten in der Regel die Möglichkeit einer Verdampfung für den zusätzlichen Druckaufbau neben der Eigenverdampfung. Bei dem hier zugrundegelegten Behälter wird vom Hersteller dafür ein elektrischer Anschlußwert von 1 kW angegeben. Nach Rücksprachen mit Vertreibern kann bei den hier in Frage kommenden täglichen Entnahmemengen

und -raten von einer geringen Einsatzzeit des Verdampfers für den Druckaufbau ausgegangen werden; die Betriebszeit des Verdampfers wurde zu 10% der Düngezeit festgelegt.

Auswertung der Sachbilanz

Tab. 67 zeigt die Zusammenstellung der Emissionen. Negative Zahlenwerte bedeuten hier eine absolute Umweltentlastung. Bei allen Emissionswerten ist zu beachten, daß diese keine Emissionsgutschriften für die gartenbauliche Ertragssteigerungen enthalten. Diese werden gesondert betrachtet.

Tab. 67: Emissionsinventar der Sachbilanz

		Variante								
		TK	CF_S	CF_WB	CF_WG	BR_S	BR_WG	GK_S	GK_WB	BRD Gesamt
SO2	kg	11,6	6,2	6,3	5,4	2,9	1,2	1,9	7,9	3.896.000.000
NOx	kg	47	10	13	-7	66	28	31	162	2.904.000.000
Staub	kg	3,6	1,0	1,0	0,7	1,0	0,4	0,6	2,6	1.336.000.000
CO	kg	21,0	7,1	7,1	1,1	22,3	9,3	10,7	55,7	9.135.000.000
CH4	kg	32	22	25	-60	305	127	140	745	6.164.000.000
NMVOC	kg	10,0	1,0	1,5	-1,4	8,8	3,7	4,2	22,2	2.791.000.000
N2O	kg	0,5	0,4	0,5	-0,1	1,6	0,7	0,7	3,7	223.000.000
CO2	kg	14986	8698	14297	-15143	89681	37367	41474	219490	927.000.000.000

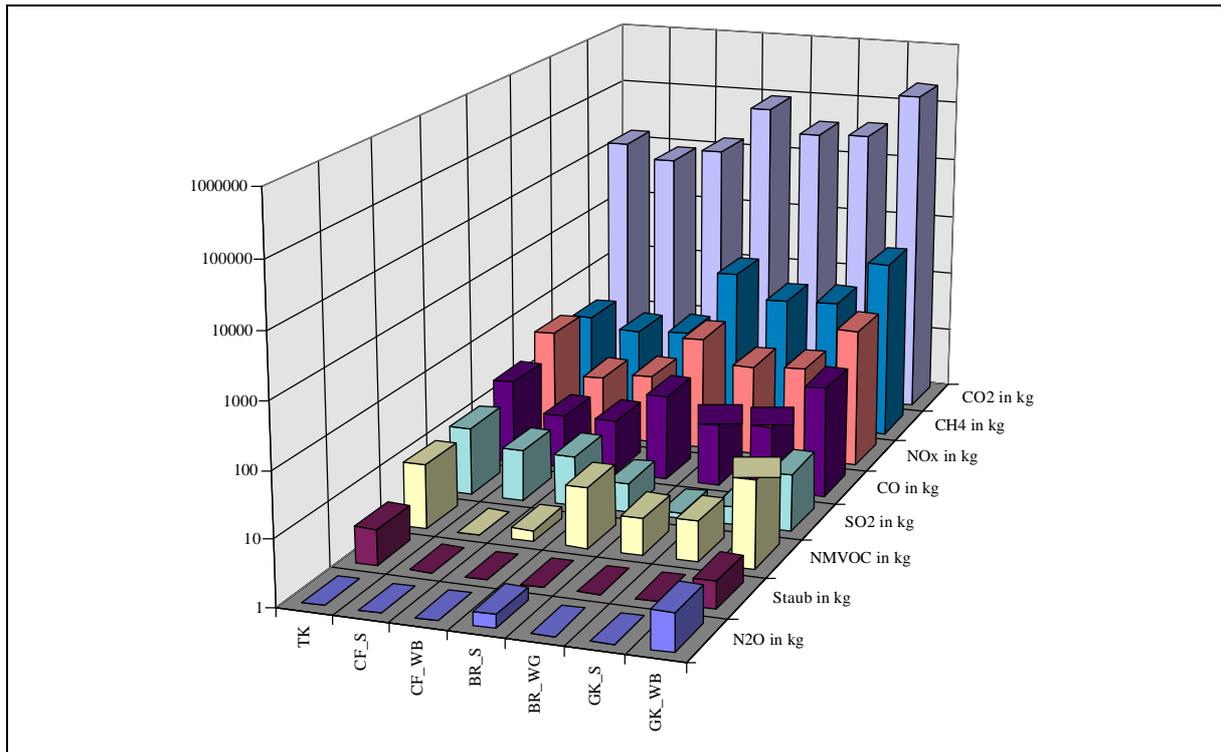


Abb. 4: Emissionsinventar⁴³

Als vorteilhafte Varianten erweisen sich die Verfahren der Düngung mit Kompostierungsabluft, insbesondere, wenn diese warm in das Gewächshaus geleitet wird (vgl. Abb. 4, Tab. 67 und Tab. 68). Wird für die Einstellung der Kompostierungsabluft Umgebungsluft verwendet, schwindet der Vorteil gegenüber den übrigen Verfahren. Die beiden Gasgeneratoren liegen in den Varianten mit Wärmegutschrift nah beieinander, die Gaskanonen schneiden aufgrund des höheren angenommenen Mehrverbrauchs und aufgrund des elektrischen Energiebedarfs für die Gebläse etwas schlechter ab. Wird die Wärmeproduktion der Gasbrenner vernachlässigt (Variante BR_S) erweisen sich die Gaskanonen gegenüber den CO₂-Brennern als vorteilhafter. Die Variante GK_WB ist wie bereits erläutert nur bedingt vergleichbar und wird im folgenden nicht weiter betrachtet. Sie wurde hier mitaufgeführt, um zu verdeutlichen, daß die ökologische Vorteilhaftigkeit von geeigneten Einsatzbedingungen abhängt. Die Düngung mit technischem CO₂ erweist sich nur in Bezug auf die N₂O und CO₂ Emissionen als relativ günstig.

⁴³ Der logarithmische Maßstab ist zu beachten. Die Variante CF_WG ist nicht mit dargestellt, da negative Werte (Umweltentlastungen) innerhalb des logarithmischen Maßstabs nicht angemessen wiedergegeben werden.

Tab. 68: Emissionsrangfolgen

	TK	CF_S	CF_WB	CF_WG	BR_S	BR_WG	GK_S	GK_WB
SO ₂	8	5	6	4	3	1	2	7
NO _x	6	2	3	1	7	4	5	8
Staub	8	4	4	2	4	1	3	7
CO	6	2	2	1	7	4	5	8
CH ₄	4	2	3	1	7	5	6	8
NMVOC	7	2	3	1	6	4	5	8
N ₂ O	3	2	3	1	7	5	5	8
CO ₂	3	2	4	1	7	5	6	8

1 = relativ niedrigste Emission in der Kategorie, 8 = relativ höchste Emission

5.4 Wirkungsabschätzung

Klassifizierung und Charakterisierung

Die Klassifizierung des Emissionsinventars erfolgte für die Wirkungskategorien Treibhauspotential, Versäuerungspotential, Eutrophierungspotential, Sommersmog und Wintersmog. Die Charakterisierung erfolgt nach Tab. 69. Dort sind die jeweiligen Wirkungskategorieäquivalente pro kg Emission angegeben⁴⁴. Die Werte der Charakterisierung der Sachbilanzemissionen weisen bis auf die Kategorie Wintersmog die Varianten CF_WG und CF_S als besonders vorteilhaft aus (Tab. 70 und Abb. 5⁴⁵). In diesen Kategorien schneiden die Gasgeneratorenvarianten besser ab, da sie einen geringeren (direkten und indirekten) Strombedarf aufweisen, dessen Bereitstellung mit den besonders für Wintersmog bedeutsamen Staub- und SO₂-Emissionen verbunden ist.

⁴⁴ Aus der Tabelle kann z. B. abgelesen werden, daß die Emission von 1kg Methan in die Luft ein Treibhauspotential von 11 kg CO₂-Äquivalenten hat.

⁴⁵ In Abb. 5 ist der logarithmische Maßstab zu beachten. Die Variante CF_WG ist nicht mit dargestellt, da negative Werte (Umweltentlastungen) innerhalb des logarithmischen Maßstabs nicht angemessen wiedergegeben werden.

Tab. 69: Wirkungspotentiale von Emissionen

	Emission	GWP	AP	NP	Wintersmog	Sommersmog
Einheit:	kg	kg CO2-eq.	kg SO2-eq.	kg P-eq.	kg SO2-eq.	kg PCOP-eq.
	in					
SO2	Luft	0	1	0	1	0
NOx	Luft	0	0,7	0,13	0	0
Staub	Luft	0	0	0	1	0
CO	Luft	0	0	0	0	0
CH4	Luft	11	0	0	0	0,007
NMVOC	Luft	0	0	0	0	0,416
N2O	Luft	270	0	0	0	0
CO2	Luft	1	0	0	0	0

Tab. 70: Ergebnis der Wirkungscharakterisierung

	TK	CF_S	CF_WB	CF_WG	BR_S	BR_WG	GK_S	BRD gesamt
Treibhauspotential in kg CO2-eq.	15475	9034	14693	-15821	93464	38943	43214	1055014000000
Versäuerung in kg SO2-eq.	44,6	13,4	15,6	0,3	49,2	20,5	23,6	5928800000
Eutrophierungspot. in kg P-eq.	6,1	1,3	1,7	-1,0	8,6	3,6	4,0	377520000
Wintersmog in kg SO2-eq.	15,2	7,2	7,3	6,1	4,0	1,6	2,5	5232000000
Sommersmog in kg PCOP-eq.	4,4	0,6	0,8	-1,0	5,8	2,4	2,7	1204204000

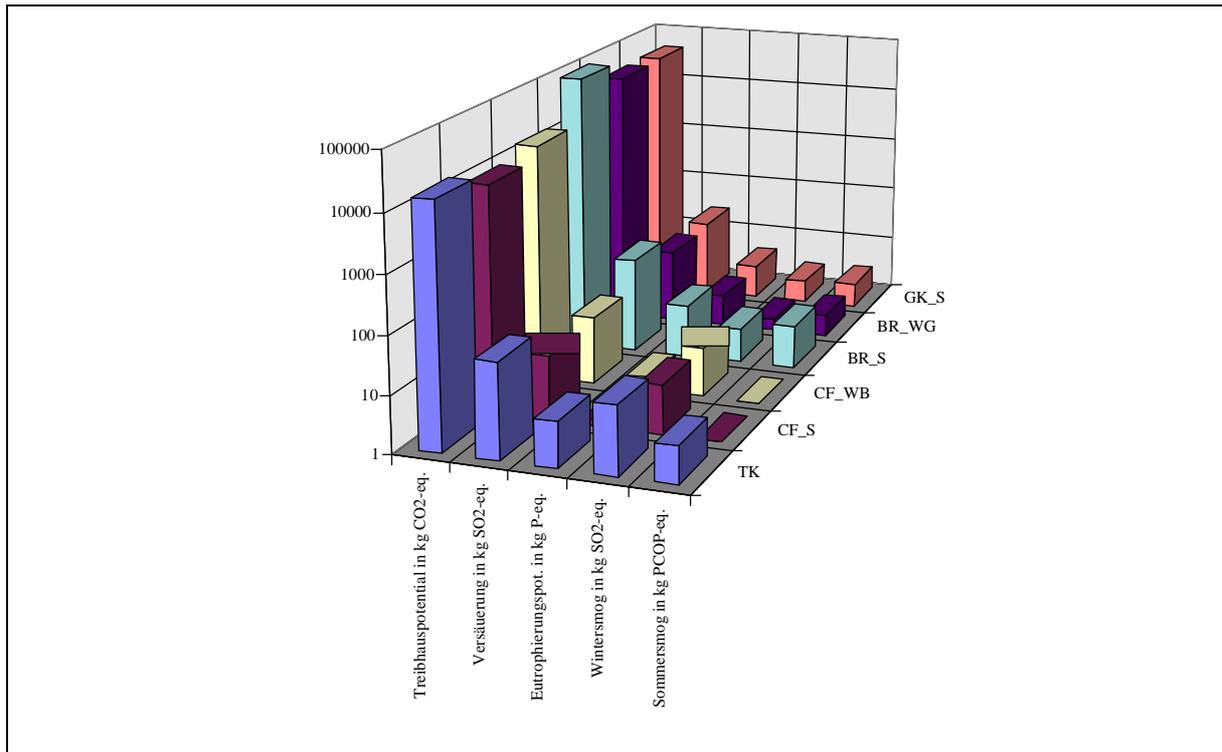


Abb. 5: Ergebnisse der Wirkungscharakterisierung

Normalisierung

Abb. 6 zeigt die Anteile der Emissionen an den bundesdeutschen Gesamtemissionen von 1993 in Prozent. Bei den hier betrachteten Varianten liegt der Anteil der Emissionen für die CO₂-Anreicherung von 1 ha Gewächshausfläche demnach bei allen Emissionen unter 0,00001%. Das entspricht bei einem Bevölkerungsstand 81,3 Mio im Bezugszeitraum den pro Kopf Emissionen von 8 Einwohnern. Geht man von einer maximal zu düngenden Gewächshausfläche in Deutschland von 4.000 ha aus, so bleiben die Emissionsanteile immer noch weit unter 0,04%, was ungefähr 50.000 Einwohneräquivalenten entspricht.

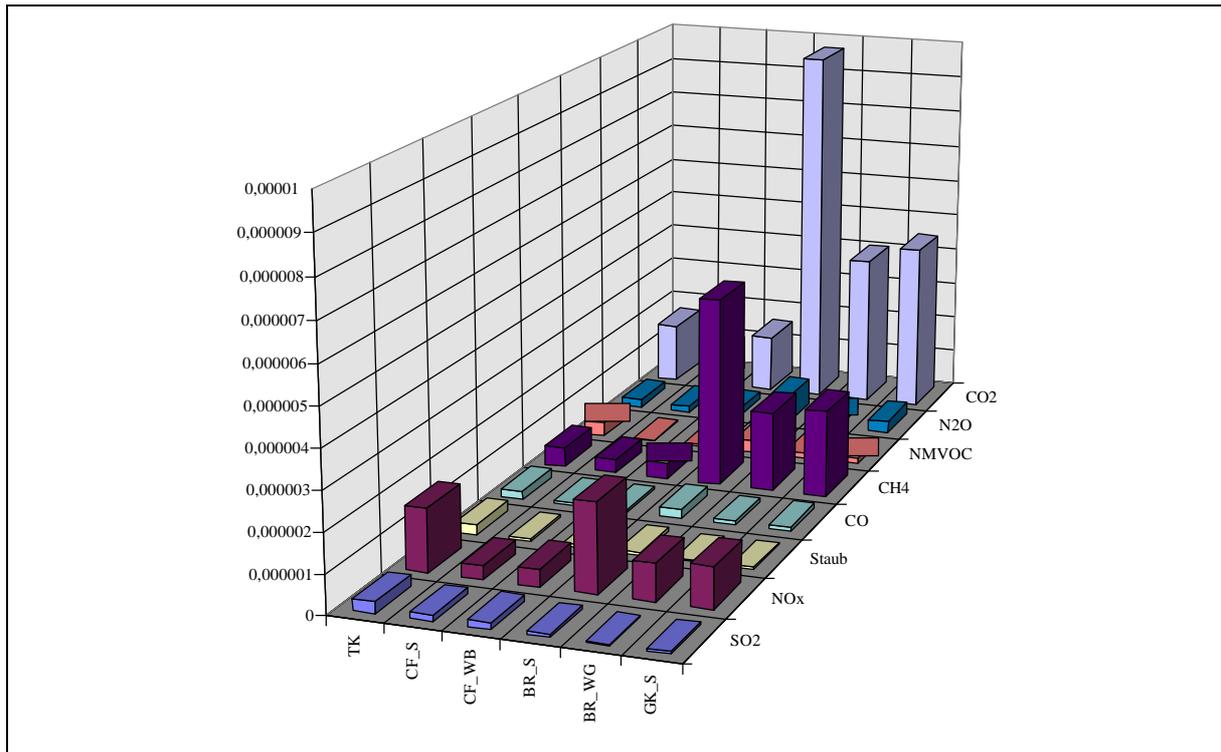


Abb. 6: Anteile der Emissionen an den Gesamtemissionen in der BRD

Bewertung mit Eco-indicator-Punkten

Eine hochaggrierende Bewertung mittels dem Eco-indicator-Ansatz [GOEDKOOP 1995] zeigt Tab. 72. Wie bereits erläutert, bewertet der Ansatz eine Emission anhand von Reduktionszielen (vgl. Tab. 71) für die einzelnen Wirkungskategorien und anhand des Ausschöpfungsgrades der als gerade noch umweltverträglich betrachteten Emissionsfrachten. Je höher die Punktzahl, um so ökologisch ungünstiger ist die Alternative. Die Carbofermvarianten erweisen sich in diesem Bewertungsansatz als am vorteilhaftesten, gefolgt von der Düngung mit technischem CO₂. Dies überrascht, da die Ergebnisse von Sachbilanzierung und Wirkungscharakterisierung eine andere Rangfolge erwarten ließen. Die Anwendung des hochaggrierenden Bewertungsverfahrens zeigt, daß die so ermittelten Kennwerte und Rangfolgen mit Vorsicht zu genießen sind, besonders bei kleinen Emissionsinventaren. Bei den hier betrachteten Emissionen bestimmt ein einziger Schadstoff (N₂O) das Ergebnis fast allein.

Tab. 71: Reduktionsziele nach Ecoindicator

Umweltwirkung	Reduktionsmaß =, ^ Gewichtungsfaktor
Treibhauseffekt	2,5
Ozon layer depletiain	100,0
Acidification	10,0
Eutrophication	5,0
Summer smog	2,5
Winter smog	5,0
Pestizide	25,0
Heavy Metals in air	5,0
Heavy Metals in water	5,0
Karzinogene Substanzen	10,0

Tab. 72: Bewertung mit Ökopunkten nach Eco-indicator

	Ökopunkte/kg Emission (Luft)	Ökopunkte entsprechend der Sachbilanz								
		TK	CF_S	CF_WB	CF_WG	BR_S	BR_WG	GK_S	GK_WB	
SO2	0,3	3,3	1,7	1,8	1,5	0,9	0,4	0,5	2,2	
NOx	0,2	7,6	1,6	2,1	-1,2	11,6	4,8	4,9	25,9	
Staub	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	
CO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
CH4	0,1	3,2	2,2	2,5	-6,0	33,3	13,9	14,0	74,5	
NMVOC	0,1	1,2	0,1	0,2	-0,2	1,2	0,5	0,5	2,7	
N2O	240,0	128,2	88,0	112,0	-21,4	420,2	175,1	182,0	902,0	
CO2	0,0	5,7	3,3	5,4	-5,8	37,2	15,5	15,8	83,4	
Gesamt:		150	97	124	-33	504	210	218	1091	

5.5 Substitutionspotentiale

5.5.1 Substitutionspotential Carboferm

Ein Abschätzung zu Substitutionspotentialen bei Einsatz des Carbofermverfahrens anstelle der traditionellen CO₂-Düngungsverfahren zeigt Tab. 73. Dabei wurden als Vergleichswerte für die Emissionen das arithmetische Mittel der Varianten TK, GK_S und BR_WG verwendet. In der 4. Spalte der Tab. 73 sind die Emissionen ausgewiesen, die eingespart würden bzw. zusätzlich entstehen würden (bei negativem Vorzeichen), wenn die gesamte Gewächshausfläche in Deutschland (ca. 4.000 ha) mit dem Carbofermverfahren anstelle der übrigen Verfahren mit

CO₂ angereichert würde⁴⁶. Abgesehen von den SO₂-Emissionen liegen die Einsparpotentiale im Bereich von 0,00017% bis knapp 0,01% der jeweiligen Gesamtemissionen und erreichen maximal 16.000 Einwohneräquivalente.

Tab. 73: Substitutionspotential Carboferm

	Substitutionspotential in kg/ha	Substitutionsp. in %/ha	Substitutionsp. in %/4000 ha	entspr. Bevölkerungs- anteil
Substitution mit CB_S				
SO ₂	-1,323	0,0000000	-0,0001358	-110
NO _x	25,0	0,0000009	0,0034394	2796
Staub	0,6	0,0000000	0,0001679	136
CO	6,6	0,0000001	0,0002876	234
CH ₄	78,3	0,0000013	0,0050783	4129
NMVOC	5,0	0,0000002	0,0007130	580
N ₂ O	0,3	0,0000001	0,0004785	389
CO ₂	22577,3	0,0000024	0,0097421	7920
Substitution mit CB_WG				
SO ₂	-0,5	0,0000000	-0,0000526	-43
NO _x	42,6	0,0000015	0,0058644	4768
Staub	0,9	0,0000001	0,0002629	214
CO	12,5	0,0000001	0,0005485	446
CH ₄	159,3	0,0000026	0,0103347	8402
NMVOC	7,3	0,0000003	0,0010529	856
N ₂ O	0,7	0,0000003	0,0012960	1054
CO ₂	46418,2	0,0000050	0,0200294	16284

5.5.2 Substitutionspotential Mehrertrag

Tab. 74 zeigt die Emissionseinsparungen durch den gartenbaulichen Mehrertrag der CO₂-Düngung. Für die Berechnungen wurde von einem Mehrertrag im Gewächshaus von 20% und von Erdgas als Energieträger für die Gewächshausbeheizung ausgegangen; im Falle anderer Energieträger wären in der Regel noch höhere Emissionseinsparungen anzusetzen. Der Wirkungsgrad der Gewächshausbeheizung und weiterer Energie- und Materialeinsparungen (insbesondere sonstige Düngemittel) bleiben hier unberücksichtigt. Bei hohen Gewächshaus Temperaturen, d. h. bei hohem Wärmeverbrauch übertreffen die Emissionsminderungen durch den Mehrertrag die Emissionen, die durch die CO₂-Düngung verursacht werden um den Faktor 10 und mehr (vgl. Abb. 7).

⁴⁶ Der tatsächlich CO₂ gedüngte Anteil liegt aber nach Auskünften von Gartenbauverbänden wesentlich niedriger.

Tab. 74: Emissionseinsparungen durch Mehrertrag

Innentemperatur sollwert	°C	5	10	15	20	25
Jahresverbrauch	kWh/m²	83,1	235,6	471,9	789,3	1149
Jahresverbrauch (BRD)	kWh/4000 ha	3324000000	9424000000	18876000000	31572000000	4,596E+10
Energieeinsparung	%	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
Energieeinsparung	kWh	554000000	1570666667	3146000000	5262000000	7660000000
Emissionseinsparungen						
SO2	kg/4.000 ha	3217	9122	18271	30560	44487
NOx	kg/4.000 ha	69880	198120	396830	663737	966216
Staub	kg/4.000 ha	1260	3571	7153	11964	17417
CO	kg/4.000 ha	23655	67067	134332	224684	327078
CH4	kg/4.000 ha	321519	911550	1825809	3053848	4445549
NMVOC	kg/4.000 ha	9412	26684	53447	89395	130135
N2O	kg/4.000 ha	1809	5128	10272	17181	25011
CO2	kg/4.000 ha	94631535	268293496	537384130	898828764	1308443240
Den Emissionen entsprechender Bevölkerungsanteil						
SO2		67	190	381	638	928
NOx		1956	5547	11110	18582	27050
Staub		77	217	435	728	1060
CO		211	597	1196	2000	2911
CH4		4241	12023	24081	40279	58635
NMVOC		274	777	1557	2604	3791
N2O		659	1870	3745	6264	9118
CO2		8299	23530	47130	78829	114753

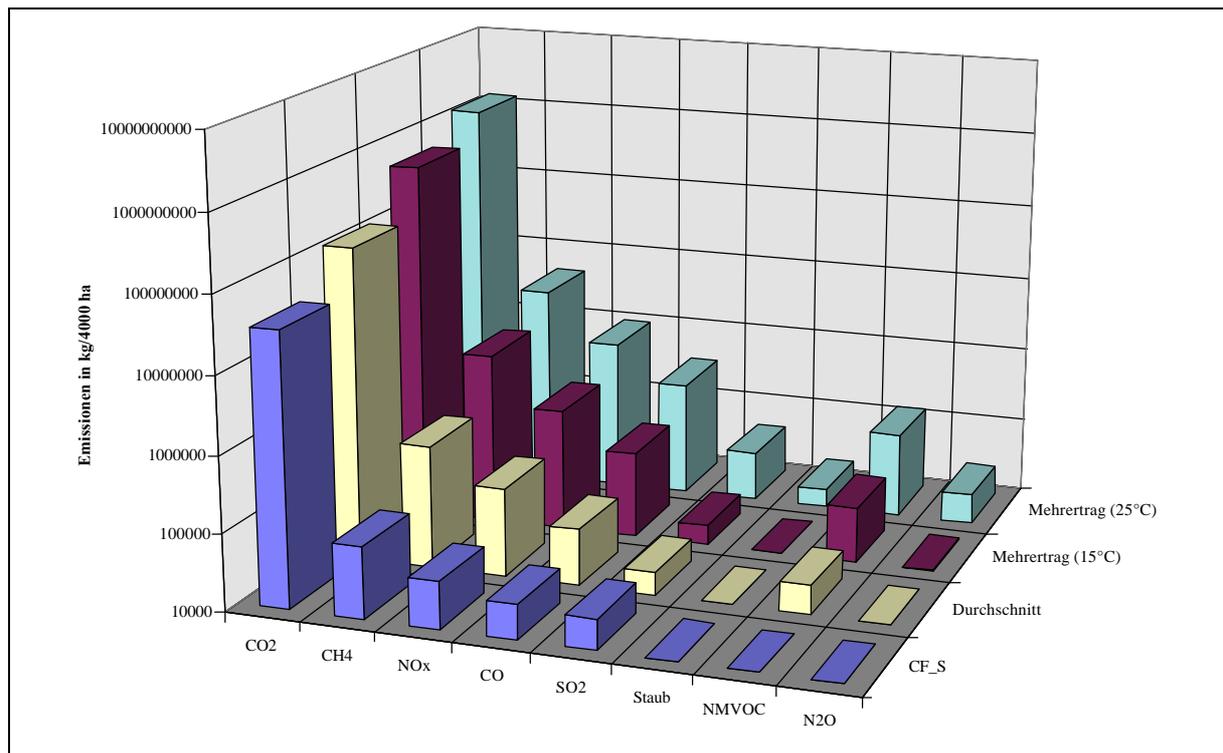


Abb. 7: Emissionsvergleich Düngung - Mehrertrag⁴⁷

5.5.3 Substitutionspotential Kompostierungswärme

Das Substitutionspotential von Kompostierungswärme in Abhängigkeit von dem Anteil der genutzten Abwärme wurde in Tab. 75 näherungsweise berechnet. Bei 20 Mio Mg jährlicher häuslicher Abfälle wurde von einem kompostierbaren Anteil von 10 Mio Mg ausgegangen⁴⁸. Für die prinzipiell nutzbare Wärme wurde ein Betrag von 500 kWh/Mg Input angesetzt. Die Gutschriften wurden auf der Basis einer Wärmebereitstellung durch einen Erdgasbrenner berechnet. In Abb. 8 sind die substituierten Emissionen bei unterschiedlichen Nutzungsgraden der Kompostierungsabwärme dargestellt und in Vergleich gesetzt zu den Emissionen, die durch den Mehrertrag bei der CO₂-Düngung von 4.000 ha eingespart werden. Als „Größenmaßstab“ sind zusätzlich die Emissionen aufgenommen, die bei der Düngung von 4.000 ha mittels der Carboferm-Variante CF_S freiwürden. Selbst bei einer 100% Kompostierung aller häuslichen Bioabfälle und einer 50%igen Nutzung der anfallenden Kompostierungswärme werden demnach, auch wenn man die Emissionen für die CO₂-Bereitstellung berücksichtigt

⁴⁷ Bei der Variantet Durchschnitt wurde das arithmetische Mittel der Emissionsinventare der Varianten TK, GK_S und BR_WG verwendet. Die Temperaturbezeichnungen bei Mehrertrag verweisen auf die Gewächshaussolltemperaturen, die den Emissionsgutschriften zugrunde gelegt wurden.

⁴⁸ Darin noch nicht berücksichtigt sind organische Abfälle aus dem gewerblichen Bereich und aus der Landwirtschaft.

(Abb. 8, Mehrertrag_15°C_netto⁴⁹), weniger Emissionen substituiert als durch den Mehrertrag bei einer CO₂-Düngung, wenn von Gewächshäusern mit 20°C Solltemperatur ausgegangen wird.

Tab. 75: Substitutionspotential Kompostierungswärme

Wärmenutzung in %	0,1	1	10	50
SO ₂	29	290	2904	14519
NO _x	631	6307	63069	315345
Staub	11	114	1137	5684
CO	213	2135	21350	106749
CH ₄	2902	29018	290179	1450897
NM _{VOC}	85	849	8494	42472
N ₂ O	16	163	1633	8163
CO ₂	854075	8540752	85407522	427037611

⁴⁹ Bei der mit Netto-bezeichneten Mehrertragsvariante wurden die Emissionen nach der Standard-Carbofermvariante abgezogen, bei der Bruttovariante blieben die Aufwendungen für die Düngung unberücksichtigt. Die SO₂-Emissionen wurden in die Abbildung nicht mitaugenommen, da sich hier in der Mehrertrags_netto-variante ein tatsächliche Belastung, d. h. hier ein negativer Wert ergibt, der sich in der Diagrammform (logarithmische Skalierung der z-Achse!) nicht darstellen läßt.

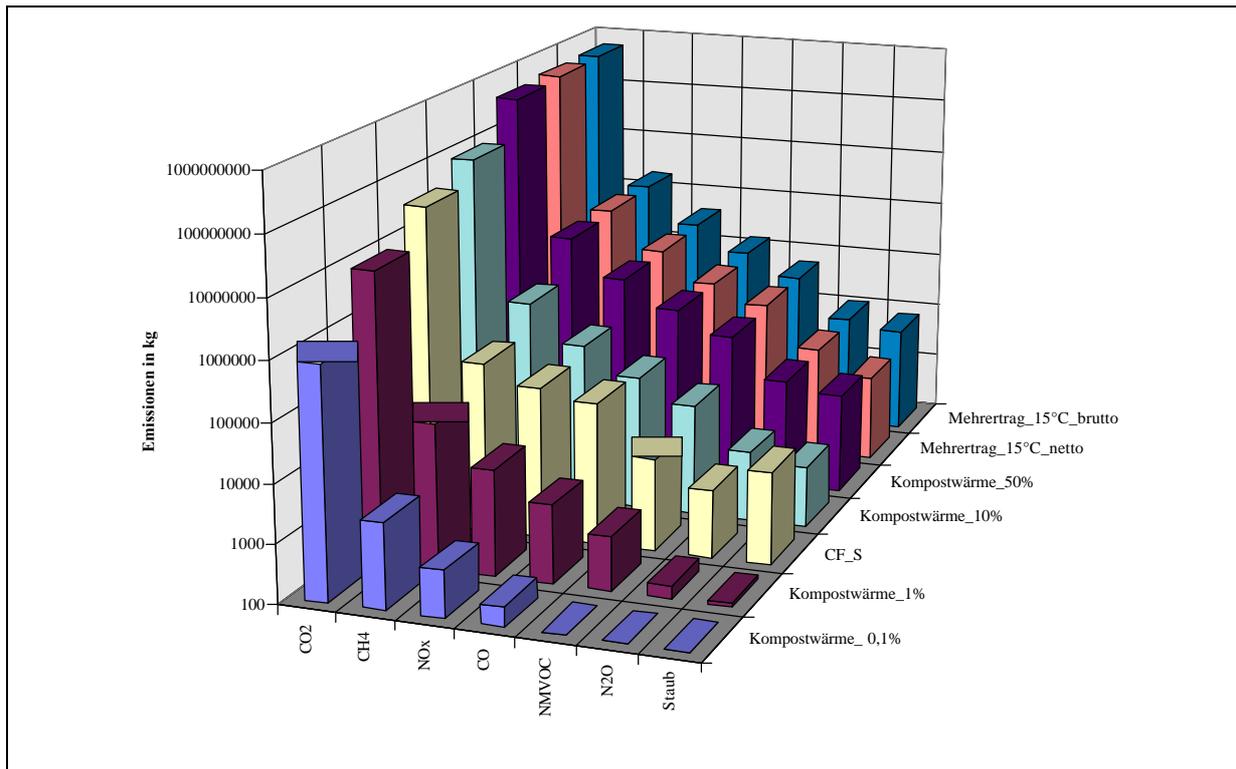


Abb. 8: Substitutionspotential Komostierungwärme

5.5.4 Substitutionspotential Intensivrotteverkürzung

Die Untersuchungen im Teilvorhaben TV3/1 zum Demonstrationsvorhaben beschäftigten sich mit der bioverfahrenstechnischen Optimierung der Intensivrotte mit dem Ziel einer erhöhten Prozeßintensität. Es wurden Steigerungen der Prozeßintensität, z. B. durch Verkürzung der Anfahrphase (durch Luftvorwärmung) oder durch eine Streckung der Wachstumsphase im kleintechnischen Maßstab und in Simulationsrechnungen von bis zu 20% nachgewiesen [EBT 1996]. Anstelle eines erhöhten Abbaugrades kann dadurch auch, unter Beachtung der für eine einwandfreie Hygienisierung erforderlichen Mindestzeiten, die Dauer der Intensivrotte verkürzt werden. Neben weiteren Vorteilen wie einer verbesserte Wirtschaftlichkeit der Anlage hat eine entsprechende Verkürzung der Intensivrottendauer auch eine Senkung des spezifischen Energiebedarfs und damit eine Umweltentlastung zur Folge. Geht man als Bezugsgröße von den für eine CO₂-Düngung von 1 ha Gewächshausfläche, bei einer 14 tägigen Intensivrotte, erforderlichen ca. 2.000 Mg Input aus, so ergibt sich ein Energieaufwand von etwa 42 kWh_{el}/Mg Input. Dieser Wert berechnet sich aus den Energieverbräuchen von Biofilter und Rottebox, wobei für die Rottebox ein Anschlußwert von 4 kW (Angabe der Fa. Herhof) und für den Betrieb der Biofilter eine Anschlußleistung von 1 kW mit einer durchschnittlich 50% igen Leistungsaufnahme angesetzt wird. Der Wert liegt über den Angaben von Wiemer und Kern [KERN 1990], die von einem spezifischen Energieaufwand von 27,2 kWh pro Mg Input für Rottebox und Biofilter ausgehen. Allerdings wurden dort auch von erheblich kürzere Intensivrottendauern untersucht. Da die Energieverbräuche für die Intensivrotte und den Betrieb

der Biofilter kaum vom Durchsatz beeinflusst werden, kann der spezifische Energieaufwand durch eine Verkürzung der Intensivrotte gesenkt werden. In Tab. 76 sind die entsprechenden Einsparpotentiale dargestellt und zum Vergleich den Aufwendungen für die Gewächshausdüngung, bezogen auf den gleichen Jahresdurchsatz, gegenüber gestellt. Bei einer Verkürzung der Intensivrotte um 10% erreichen die Einsparpotentiale etwa die gleiche Größe. Geht man von vornherein von einer geringeren Rottedauer aus, verringern sich die Einsparpotentiale entsprechend dem niedrigeren Startwert für den spezifischen Energiebedarf.

Tab. 76: Substitutionspotential Intensivrottedauer

Verkürzung um x %	%	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	CF_S
entsprechende Rottedauer	Tage	14,0	13,3	12,6	11,9	11,2	10,5	9,8	
Energieaufwand	kWh/Mg	42,0	39,9	37,8	35,7	33,6	31,5	29,4	
Emissionsinventar ⁵⁰ , bezogen auf 2.000 Mg Input									
		absolut	relative Einsparung						absolut
SO2	kg	42,8	2,1	4,3	6,4	8,6	10,7	12,9	6,2
NOx	kg	70,6	3,5	7,1	10,6	14,1	17,6	21,2	10,3
Staub	kg	6,7	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	1,0
CO	kg	48,7	2,4	4,9	7,3	9,7	12,2	14,6	7,1
CH4	kg	147,8	7,4	14,8	22,2	29,6	37,0	44,4	21,5
NMVOC	kg	6,7	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	1,0
N2O	kg	2,5	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,4
CO2	kg	59811	2991	5981	8972	11962	14953	17943	8698

5.6 Sensitivitätsanalysen

In Sensitivitätsanalysen wurden für Hauptvarianten grundlegende Annahmen und Dateneinflüsse auf die Sachbilanz mit folgenden Untervarianten untersucht:

Düngung mit Technischem CO₂

- Variation der Transportaufwendungen um $\pm 33\%$
- Variation des Energieaufwandes für „Herstellung“ des Technischen CO₂ um $\pm 33\%$
- Erhöhung des Energieaufwand für den Druckaufbau um +33% (entspricht 13% Betriebszeit während der Düngung) und um 500% (entspricht 50% Betriebszeit während der Düngung)

Düngung mit Gasbrennern, Variante BR_WG:

- Mehraufwand für schlechtere Verteilung: 0%
- Mehraufwand für schlechtere Verteilung: 20%

Düngung mit Gaskanonen, Variante GK_S:

⁵⁰ Das Emissionsinventar berücksichtigt die Emissionen, die mit der Bereitstellung elektrischer Energie für die Rotteboxen und die Biofilter verbunden sind.

- Mehraufwand für schlechtere Verteilung: 10%
- Mehraufwand für schlechtere Verteilung: 0%

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt auch bei den geänderten Rahmenbedingungen im Kern unveränderte Tendenzen: die technische CO₂-Düngung erweist sich besonders im Hinblick auf die Klima relevanten Emissionen CO₂ und CH₄ als günstiger als die erdgasbetriebenen CO₂-Generatoren, diese schneiden wiederum in typischerweise verkehrsbedingten Emissionen CO und NO_x bzw. in den Emission aus der elektrischen Energieerzeugung (SO₂, Staub, NO_x) besser ab, was sich besonders in den Kategorien Wintersmog und Versäuerung auswirkt. Die Sensitivitätsanalyse belegt auch die bereits festgestellte ökologische Vorteilhaftigkeit der Düngung mit Kompostierungsabluft hinsichtlich der betrachteten Emissionen.

Tab. 77: Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalyse: CO ₂ -Düngung mit technischem CO ₂ , Variante TK								
Emissionen		mittlerer Transportentfernung			Energiaufwand für die CO ₂ Gewinnung kWh _{el} /Mg CO ₂		Betriebsdauer Druckaufbau	
		Standard (100 km)	130 km	266 km	115	250	13% =, ^ 1h/Tag	50% =, ^ 4 h/Tag
SO ₂	kg	11,6	10,7	12,5	8,6	15,5	11,7	12,1
NO _x	kg	47,3	36,0	58,0	42,3	53,6	47,4	48,1
Staub	kg	3,6	2,8	4,3	3,1	4,2	3,6	3,7
CO	kg	21,1	17,3	24,7	17,6	25,4	21,1	21,6
CH ₄	kg	32,1	31,8	32,4	21,5	45,3	32,2	33,8
NMVOC	kg	10,1	7,0	12,9	9,6	10,7	10,1	10,1
N ₂ O	kg	0,534	0,5	0,5	0,4	0,8	0,5	0,6
CO ₂	kg	14986	14161	15762	10713	20326	15037	15669
Emissionen		Sensitivitätsanalyse CO ₂ -Brenner, Variante BR_WG			Sensitivitätsanalyse Gaskanone, Variante GK_S			
		Standard 10%	Mbd.0%	Mbd. 20%	Standard 20%	Mbd. 10%	Mbd. 0%	
SO ₂	kg	1,2	1,1	1,3	1,8	1,7	1,6	
NO _x	kg	27,6	25,1	30,1	30,9	28,4	25,9	
Staub	kg	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	
CO	kg	9,3	8,4	10,1	10,7	9,9	9,0	
CH ₄	kg	127,1	115,5	138,6	140,2	128,7	117,1	
NMVOC	kg	3,7	3,3	4,0	4,1	3,8	3,4	
N ₂ O	kg	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6	
CO ₂	kg	37416	34015	40818	41473	38076	34679	

5.7 Wirtschaftlichkeit

Für die verbrauchsunabhängigen Kosten (z. B. Steuer-, Meß- und Regeleinrichtungen), kann bei allen Systemen von Kosten in gleicher Größenordnung ausgegangen werden⁵¹. Entscheidend sind in allen veröffentlichten Kostenvergleichen die verbrauchsabhängigen Kosten, die sich hier im wesentlichen aus den Energieträgerkosten zusammensetzen. Bei der Düngung mit technischem CO₂ ist ggf. auch eine Behältermiete zu entrichten, diese wird u. U. aber auch mit dem abgenommenen CO₂ verrechnet und hängt entscheidend von den vereinbarten Abnahmemengen und dem Verhandlungsgeschick ab. Besonders beim Technischen CO₂ fällt der Preis drastisch mit einer steigenden Abnahmemenge; von bis zu 2,00 DM/kg aus Flaschenbündeln bis auf 0,3 DM/kg bei CO₂ aus einer Tankanlage und einer Abnahmemenge von 100 Mg pro Jahr. Die verbrauchsabhängigen Kosten für die untersuchten Varianten sind in Tab. 78 zusammengestellt. Bei den Gasgeneratorvarianten wurden die Kosten nur in dem Anteil der CO₂-Düngung angelastet, wie auch die Emissionen angerechnet wurden, d. h. für die Zeiträume, in denen eine gewollte und genutzte Wärmeproduktion stattfindet, werden keine Kosten berechnet. Der Vergleich weist das Carbofermverfahren, gefolgt von den Gasgeneratoren, als die kostengünstigste Variante aus.

Tab. 78: Vergleich der verbrauchsabhängigen Kosten für die Düngung von 1 ha Anbaufläche

Variante			TK		CF_S		GK_S		BR_S		BR_WG	
Energieträger	Einheit	DM/- Einheit	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K
Strom	kWh	0,2	240	48	12000	2400	1000	200	-	-	-	-
Erdgas	m ³	0,5	-	-	-	-	22000	11000	51000	25500	22000	11000
Techn. CO ₂	kg	0,3	100000	30000	-	-	-	-	-	-		
Behältermiete	Monat	500	1	6.000	-	-	-	-	-	-		
Gesamt		DM/ha	36000		2400		11200		25500		11000	
		DM/m ²	3,60		0,20		1,10		2,60		1,10	

M = Menge, K = Kosten

5.8 Auswertung

Die Sachbilanz beruht im wesentlichen auf der Bilanzierung der Bereitstellung und Nutzung von Energieträgern und technischem CO₂. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis ergibt sich daraus ein insgesamt schmales Emissionsinventar, das aber auch bei einer Erweiterung zu keinen Verschiebungen der Rangfolgen führen würde. Die durchgeführten Sensitivi-

⁵¹ GANSLMEIER [1984] setzte z. B. die verbrauchsunabhängigen Kosten bei der CO₂-Anreicherung mit technischem CO₂ und mit Gasbrennern in der Höhe von ca. 15.000 DM an.

tätsanalysen zeigten, daß das die Sachbilanzierung zumindest in ihren Relationen als vertrauenswürdig beurteilt werden kann. Das Emissionsinventar der Sachbilanz, das ohne Berücksichtigung gartenbaulicher Mehrerträge erstellt wurde, weist die Varianten der Gewächshausdüngung nach dem Carbofermverfahren bis auf SO₂ und Staub als ökologisch vorteilhaft aus. Wird für die Konditionierung der Kompostierungsabluft die unvorgewärmte Umgebungsluft verwendet, verringert sich die Vorteilhaftigkeit deutlich. Werden dagegen die Kompostierungsabgase annähernd mit Austrittstemperatur in das Gewächshaus eingeleitet, ist die Düngung auch ohne Berücksichtigung von gartenbaulichen Mehrerträgen überwiegend umweltentlastend. Die beiden Gasgeneratoren liegen in den Varianten mit Wärmegutschrift nah beieinander, die Gaskanonen schneiden aufgrund des höheren angenommenen Mehrverbrauchs (20% gegenüber 10% für die Gasbrenner) und aufgrund des elektrischen Energiebedarfs für die Gebläse etwas schlechter ab. Wird die Wärmeproduktion der Gasbrenner vernachlässigt (Variante BR_S) erweisen sich die Gaskanonen gegenüber den CO₂-Brennern als vorteilhafter. Die Variante GK_WB fällt im Vergleich zu den anderen Verfahren ab. In ihr wurden der zusätzliche Wärmeverbrauch berücksichtigt, der nötig ist, um eine bestimmte CO₂-Konzentration im Gewächshaus einzuhalten. Sind die aufzuheizenden Temperaturen relativ hoch (15°C) und die Sollkonzentrationen niedrig (< 2.000 vpm), kann ein drei- bis vierfacher Luftwechsel pro Stunde nötig sein. Dies verschlechtert die ökologische Bilanz erheblich. Es muß allerdings davon ausgegangen werden, daß in der Praxis CO₂-Kanonen nur dann als alleinige Heizung eingesetzt werden, wenn die maximale CO₂-Konzentration im Gewächshaus relativ hoch sein darf und/oder in den kalten Monaten das Gewächshaus nur frostfrei geheizt wird. Die Düngung mit technischem CO₂ weist relativ niedrige CO₂ und N₂O Emissionen auf und liegt im Bereich der Gasgeneratoren.

Die Ergebnisse der Klassifizierung und Charakterisierung der Sachbilanzemissionen weisen bis auf die Kategorie Wintersmog die Carbofermvarianten CF_WG und CF_S als besonders vorteilhaft aus. In dieser Kategorie schneiden die Gasgeneratorenvarianten besser ab, da sie einen geringeren (direkten und indirekten) Strombedarf aufweisen, dessen Bereitstellung mit den besonders für Wintersmog bedeutsamen Staub- und SO₂-Emissionen verbunden ist.

Die Anwendung eines hochaggregierenden Bewertungsverfahrens, hier dem Eco-indicator, zeigt, daß die so ermittelten Kennwerte und Rangfolgen mit Vorsicht zu genießen sind, besonders bei kleinen Emissionsinventaren. Bei den hier betrachteten Emissionen bestimmt ein einziger Schadstoff (N₂O) das Ergebnis fast allein.

Die Normierung des Emissionsinventar der Sachbilanz und der Wirkungskategorien mit den bundesdeutschen Gesamtemissionen zeigt, daß die Anteile der Emissionen für die CO₂-Anreicherung von 1 ha Gewächshausfläche an den Gesamtemissionen von 1993 bei allen Varianten unter 0,00001% liegt, was bei einem Bevölkerungsstand von 81,3 Mio im Bezugszeitraum ungefähr 8 Einwohnerequivalenten entspricht. Selbst wenn alle Gewächshausflächen in

der BRD mit CO₂ angereichert würden blieben die Emissionsanteile immer noch weit unter 0,04%, d. h. 50.000 Einwohneräquivalenten, die ökologischen Belastungspotentiale sind daher insgesamt als relativ gering einzustufen. Das Substitutionspotential der Standardvariante des Carbofermverfahrens liegt dementsprechend selbst bei Hochrechnung auf die gesamte Gewächshausunterglasfläche unter 8000 Einwohneräquivalenten. Deutlich größer ist das Substitutionspotential durch die CO₂-Düngung an sich. Für alle Anreicherungsverfahren ist bei Berücksichtigung der gartenbaulichen Mehrerträge und der Anrechnung entsprechender Emissionsgutschriften eine beträchtliche Umweltentlastung festzustellen. Die Aufwendung für die CO₂-Anreicherung bleiben in der Regel unter einem Zehntel der eingesparten Emissionen durch die gartenbaulichen Mehrerträge. Vor diesem Hintergrund relativiert sich die Bedeutung der Auswahl einer geeigneten CO₂-Anreicherung nach rein ökologischen Gesichtspunkten. Auch das Substitutionspotential durch die Nutzung von Kompostierungsabwärme weist eine mäßige ökologische Bedeutung auf. Selbst bei einer 100% Kompostierung aller häuslichen Bioabfälle und einer 50%igen Nutzung der anfallenden Kompostierungswärme (bei einem nutzbaren Temperaturgefälle von 30 K) werden weniger Emissionen substituiert als durch den Mehrertrag bei einer flächendeckenden CO₂-Düngung, wenn man den Berechnungen eine Gewächshaussolltemperatur von 20°C zugrundelegt. Einsparpotentiale durch eine Steigerung der Prozeßintensität und eine entsprechende Verkürzung der Intensivrottedauer können in der Größenordnung der Aufwendungen für die CO₂-Anreicherung einer der Inputmenge entsprechenden Gewächshausfläche erwartet werden.

Der Vergleich der wirtschaftlichen Rahmendaten zeigt im Bereich der laufenden Kosten deutliche Vorteile für die Carbofermvarianten. Allerdings erfordert, auch wenn die Kosten der Kompostierung zugeschlagen werden, die Realisierung des Carbofermverfahrens ein beträchtliches Kapital zur Deckung der Investitionskosten. Eine geeignete Kompostierungsanlage für die Bedarfsdeckung von 1 ha Gewächshausfläche wird auf der Grundlage der hier realisierten Kompostierungstechnologie kaum unter 3 Mio DM zu haben sein. Dem gegenüber sind die zu erwartenden Investitionskosten für die übrigen Verfahren, die bei einem Hektar 50.000 DM nicht überschreiten dürften, fast geringfügig. Auch der Flächenbedarf könnte im Vergleich zu anderen CO₂-Anreicherungsverfahren ein Realisierungshindernis sein, er beträgt ca. ein Drittel der zu versorgenden Gewächshausfläche, d. h. hier ca. 3.000 m².

Im Hinblick auf den Arbeitsschutz erweist sich die CO₂-Düngung als am unproblematischsten. Auch die CO₂-Anreicherung mittels CO₂-Generatoren ist unbedenklich, solange die Brenner einwandfrei arbeiten und eingestellt sind. Die bisherigen Erfahrungen lassen hier aber Skepsis aufkommen. Schwieriger erweist sich die Einschätzung der hygienischen Relevanz der Kompostierungsabluft. Für eine abschließende Bewertung reichen die verfügbaren umwelthygienischen Bewertungsgrundlagen nicht aus. Die an der Anlage und andernorts gemessenen Keimkonzentrationen am Biofilter lassen das Gefährdungspotential, eine sorgfältige Wartung

und Kontrolle der Abluftreinigung (in der Regel Biofilter) vorausgesetzt, aber insgesamt eher als unbedeutend erscheinen. Immunologisch vorbelastete Personen sollten generell nicht in oder in unmittelbarer Nähe von Kompostierungsanlagen arbeiten.

Während für die etablierten Verfahren der CO₂-Anreicherung eindeutige Zulassungsvorschriften bestehen, steht für das Carbofermverfahren ein amtlicher Genehmigungsnachweis bzw. Baumusterprüfung noch aus. Dies dürfte sich u. U. gegenwärtig als das größte Hindernis für die Verwirklichung der Verfahrensentwicklung außerhalb von Forschungsvorhaben erweisen.

Während die traditionellen CO₂-Anreicherung-Verfahren ihre typischen Anwendungsfelder haben eignet sich die Düngung nach dem Carbofermverfahren aufgrund der reichlichen und sehr kostengünstigen CO₂-Bereitstellung für nahezu jede Gewächsdüngung und Gewächshausklimaführung, wenn die örtlichen und finanziellen Voraussetzungen gegeben sind. Weitere Vorteile ergeben sich aus der engen Schließung stofflicher Kreisläufe wie z. B. der internen Verwertung von gartenbaulichen Abfällen, die z. B. zu Umweltentlastungen durch verringerte Transportaufwendungen führen. Da die Boxenkompostierung eine bewährte und solide Kompostierungstechnik darstellt, kann von einer hohen Verfügbarkeit der CO₂-Anreicherung ausgegangen werden.

6 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die ökologische Bewertung der Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion auf der Grundlage der in der Demonstrationsanlage realisierten Verfahrensentwicklung.

Für die Bewertung wurden gartenbauliche und kompostierungstechnische Grundlagen der CO₂-Anreicherung erarbeitet und zusammengestellt. Zur Methodik der Bewertung von Umweltwirkungen von Dienstleistungen, Produkten und Verfahren wurde der aktuelle Entwicklungsstand, besonders im Bereich der Ökobilanzierung, eruiert und validiert. Ein besonderes Augenmerk wurde der Einschätzung humanhygienischer Gefährdungspotentiale geschenkt.

Die Grobanalyse verschiedener Auslegungsvarianten zeigte, daß im Hinblick auf eine praktische Umsetzung der Verfahrensentwicklung die Auslegung auf die bedarfsgerechte CO₂-Versorgung orientieren sollte. Die vertiefte ökologische Bewertung der Verfahrensentwicklung erfolgte daher über einen Vergleich der Umweltauswirkungen der CO₂-Düngung nach dem Carbofermverfahren mit konventionellen Systemen zur CO₂-Anreicherung (Gasgeneratoren, Düngung mit technischem CO₂) von Gewächshäusern. Die Auswertung des Verfahrensvergleichs erfolgte anhand der Ergebnisse der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und von Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung weiterer Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Arbeitsschutz, Flächenbelegung und, Genehmigungsfähigkeit etc..

Alle Verfahren der Gewächshausdüngung weisen demnach bei Berücksichtigung der gartenbaulichen Mehrerträge eine positive Emissionsbilanz auf und entlasten somit erheblich die Umwelt. Die Aufwendungen für die CO₂-Düngung liegen in der Regel unter einem Zehntel der Emissionsgutschriften für den Mehrertrag. Auch die Emissionsentlastungspotentiale einer sehr weitgehenden Abwärmenutzung bei der Bioabfallkompostierung liegen deutlich unter diesen Gutschriften. Im Vergleich der Umweltwirkungen der CO₂-Düngungsverfahren erwies sich unter den vereinbarten Randbedingungen die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verfahrensentwicklung.

Die Anteile der Emissionen für die CO₂-Anreicherung von 1 ha Gewächshausfläche an den bundesdeutschen Gesamtemissionen von 1993 liegen bei allen Varianten unter 0,00001%, das entspricht ca. 8 Einwohnerequivalenten. Auch bei einer vollständigen Düngung aller Gewächshausflächen der Standardvariante des Carbofermverfahrens wären, bezogen auf die BRD, im Vergleich zu den übrigen Verfahren Emissionsgutschriften von maximal 17.000 Einwohneräquivalenten zu erwarten.

Auch das Substitutionspotential durch die Nutzung von Kompostierungsabwärme weist eine eher bescheidene ökologische Bedeutung auf. Selbst bei einer 100% Kompostierung aller häuslichen Bioabfälle und einer 50%igen Nutzung der anfallenden Kompostierungswärme werden in der Regel weniger Emissionen substituiert als durch den gartenbaulichen Mehrer-

trag bei einer flächendeckenden CO₂-Düngung. Einsparpotentiale durch eine Steigerung der Prozeßintensität und eine entsprechende Verkürzung der Intensivrottedauer können in der Größenordnung der Aufwendungen für eine CO₂-Anreicherung einer der Inputmenge entsprechenden Gewächshausfläche erwartet werden.

Der Vergleich der wirtschaftlichen Rahmendaten zeigt im Bereich der verbrauchsabhängigen Betriebskosten deutliche Vorteile für die Carbofermvarianten. Allerdings erfordert die Realisierung des Carbofermverfahrens ein beträchtliches Kapital zur Deckung der Investitionskosten, im Falle einer bedarfsdeckenden Anlage für 1 ha Gewächshausfläche ca. 3 Mio DM. Auch der im Vergleich zu anderen CO₂-Anreicherungsverfahren zusätzliche Flächenbedarf könnte in der Praxis ein Realisierungshindernis sein, er beträgt ca. ein Drittel der zu versorgenden Gewächshausfläche.

Für eine abschließende Bewertung der hygienischen Relevanz der Kompostierungsabluft hinsichtlich der Gewächshausanwendung reichen die verfügbaren umwelthygienischen Bewertungsgrundlagen nicht aus. Die an der Anlage und andernorts gemessenen Keimkonzentrationen am Biofilter lassen das Gefährdungspotential, eine sorgfältige Wartung und Kontrolle der Abluftreinigung vorausgesetzt, aber insgesamt eher als unbedeutend erscheinen. Immunologisch vorbelastete Personen sollten generell nicht in oder in unmittelbarer Nähe von Kompostierungsanlagen arbeiten.

Während die traditionellen CO₂-Anreicherungsverfahren ihre typischen Anwendungsfelder haben und im Einsatzbereich begrenzt sind eignet sich die Düngung nach dem Carbofermverfahren aufgrund der reichlichen und kostengünstigen CO₂-Bereitstellung für nahezu jede Gewächsdüngung und Gewächshausklimaführung, wenn die örtlichen und finanziellen Voraussetzungen gegeben sind. Weitere Vorteile ergeben sich aus der engen Schließung stofflicher Kreisläufe wie z. B. der internen Verwertung von gartenbaulichen Abfällen, die zu weiteren Umweltentlastungen, z. B. durch verringerte Transportaufwendungen führen kann.

Während für die etablierten Verfahren der CO₂-Anreicherung eindeutige Zulassungs- und Anerkennungsvorschriften bestehen, steht für das Carbofermverfahren ein amtlicher Genehmigungs- bzw. eine Baumusterprüfung aus. Dies dürfte sich u. U. gegenwärtig als das größte Hindernis für die Umsetzung der Verfahrensentwicklung außerhalb von Forschungsvorhaben erweisen.

7 Literaturverzeichnis

- [ABAG 1996] ABAG Abfallberatungsagentur: Leitfaden Umwelt-Software - Die richtige Entscheidung, Abfallwirtschaftskonzepte, Ökobilanzen, Ökoaudit, o. O. 1996
- [AFR 1996] Swedish Environmental Protection Agency (Hrsg.): EPS-Default Valuation of Environmental Impacts from Emission and Use of Resources, Version 1996, Annual Report, AFR-Report 111, Stockholm 1996
- [AG BIOENERGIE 1993] Arbeitsgemeinschaft Bioenergie: Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung, Studie im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energiewirtschaft, o. O. 1993
- [AGEFKO] AKGEFKO Kohlensäure-Industrie GmbH, Detail-Information X 134, Bereich CO₂-Düngung
- [ANDREAS 1984] Andreas, C.: CO₂-Düngung und Wärmerückgewinnung im Unterglasgemüsebau, in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasbau, Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe "Energie" am 27.3.1984 in Bonn, KTBL Schrift 296, S. 19-34
- [APME 1979] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Eco-balance methodology for commodity thermoplastics., Brüssel o. J. [nach 1979]
- [APME 1993] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European plastics industry, Report 2: Olefin feestock sources, Brüssel 1993
- [APME 1993a] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European polymer industry, Report 3: Polyethylene and Polypropylene, Brüssel 1993
- [APME 1993b] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European polymer industry, Report 4: Polystyrene, Brüssel 1993
- [APME 1994a] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European plastics industry, Report 7: PVDC (Polyvinylidene Chloride), Brüssel 1994
- [APME 1995] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European plastics industry, Report 8: Polyethylene Terephthalate (PET), Brüssel 1995
- [APME1994] Association of plastics manufacturers in europe APME (Hrsg.): Ecoprofiles of the European polymer industry, Report 5: Co-product allocation in chlorine plants, Brüssel 1994
- [ATLANTIC 1994] Atlantic Consulting: LCA-Software Buyers' Guide, o. O. 1994
- [BAUMANN 1995] Baumann, Henrikke: Decision Making and Life Cycle Assessment, Swedish Waste Research Council AFR report 77, Stockholm 1995

- [BIOPLAN 1996] Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH: Kompostierungsabluftverwertung und Kompostmiettennachrotte 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 1996
- [BOGON 1995] Bogon, H.; Doedens, H.: Verfahrensauswahl zur Restabfallbehandlung vor der Deponie; in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung, Berlin 1995
- [BÖNING 1994] Böning, Jeannette A.: Methoden betrieblicher Ökobilanzierung, Marburg 1994
- [BOUSTEAD 1995] Boustead, Ian: Methoden der Sachbilanzierung; in: Thomé-Kozmiensky, Karl (Hrsg.): Management der Kreislaufwirtschaft, Berlin, 1995, 0 0
- [BRAUNSCHWEIG 1994] Braunschweig, A. et al.: Evaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden für Ökobilanzen, IWÖ - Diskussionsbeitrag Nr. 19, o. O. 1994
- [BRAUNSCHWEIG 1996] Braunschweig, A. et al.: Developments in LCA Valuation, IWÖ - Diskussionsbeitrag Nr. 32, o. O. 1996
- [BUS 1984] Bundesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Ökobilanzen von Packstoffen. BUS-Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 24, Bern 1984, 0 1984
- [BUWAL 1990] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung; BUWAL- Schriftenreihe Umwelt Nr. 133, Bern 1990
- [BUWAL 1991] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.): Ökobilanz von Packstoffen - Stand 1990, Schriftenreihe Umwelt Nr. 132, Abfälle, Bern 1991
- [BUWAL 1996] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.): Ökoinventare für Verpackungen, Band I und II, Schriftenreihe Umwelt Nr. 250, Bern 1996
- [CARBO] Informationsbroschüre der CARBO Kohlensäurewerke GmbH & Co. KG
- [CURRAN 1996] Curran, M. A. (Hrsg.): Environmental Life-Cycle Assessment, 1996
- [DOMKE 1984] Domke, O.: Erste Erfahrungen mit kleinen Gasbrennern zur CO₂-Düngung im Gewächshaus, in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau, Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn, KTBL Schrift 296, S. 58-61
- [DOMKE 1984a] Domke, O.: Bewährte CO₂-Technik wiederentdeckt, Kleine Gasbrenner im Gewächshaus, Sonderdruck aus Deutscher Gartenbau, Nr. 38, 38. Jg., 22.9.1984
- [DVGW 1983] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.: Anlagen zur CO₂-Anreicherung in Gewächshäusern - Installation und Betrieb, Technische Regeln, Arbeitsblatt G 633
- [EBERLE 1996] Eberle, U.; Griesshammer, R.: Ökobilanzen und Produktlinienanalyse, 1. Aufl., Freiburg 1996

- [EBT 1996] EBT: Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion - Bioprozßtechnische Untersuchung zur Auslegung und Steuerung, Endbericht zum Teilvorhaben 3/1, Förderkennzeichen 14 606 380 im BMBF-Verbundvorhaben „Neue Techniken der Kompostierung“, 1996
- [ENVIRONMENT 1996] Environment Canada, Hazardous Waste Branch: Evaluation of Life Cycle Assessment Tools, unpublished report, 1996
- [EPA 1995] United States Environmental Protection Agency: Life-Cycle Impact Assessment: A Conceptual Framework, Key Issues, and Summary of Existing Methods, EPA-452/R-95-002, o. O. 1995
- [ERDGAS 1995] Ruhrgas AG (Hrsg.): Erdgas im Gartenbau, 3. Auflage, Essen 1995
- [ETTERLIN 1992] Etterlin, G. K.: Ökobilanzen. Ein Leitfaden für die Praxis., Mannheim, Leipzig, Wein, Zürich 1992
- [FACHVERBAND KOHLENSÄURE 1992] Fachverband Kohlensäure-Industrie: Eigenschaften der Kohlensäure, 4. Auflage, o. O. 1992
- [FALKENBERG 1996] Kommunikation über Werte: Festsetzung und Spielraum, in: Umweltbundesamt (Hrsg.): Transparenz und Akzeptanz von Grenzwerten am Beispiel des Trinkwassers, Berichtsband zur Tagung vom 10. und 11. Oktober mit Ergänzungen, Berlin 1996, S. 20-30
- [FAUSTZAHLEN 1993] Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 12. überarb., erg. und erw. Auflage, Dülmen 1993
- [FAVA 1993] Fava, J. et al.: A conceptual framework for life-cycle impact assessment; Workshop report February 1-7, 1992, Sandestin, Florida, USA, Pensacola 1993
- [FAVA 1994] Fava, J. et al. (ed.): A Technical Framework for Life-Cycle Assessments; Workshop report Aug. 18-23, 1990, Smugglers Notch, Vermont, second printing 1994,, Pensacola 1991
- [FEI 1991] Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e. V. in Stuttgart (FEI) (Hrsg.): Aktuelle Konzepte wie Verpackungsverordnung, Biomüllkompost und Ökobilanzen. 59. Abfalltechnisches Kolloquium 46; in: Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bielefeld 1991
- [FGU 1994] Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin (Hrsg.): Ökobilanzen: 10. FGu-Seminar im Rahmen der UTECH Berlin '94, 0 1994
- [FGU 1995] Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V. (FGU Berlin) (Hrsg.): Produktbezogene Ökobilanzen III, methodische Fortschritte, aktuelle Ökobilanzen, 39. Seminar im Rahmen der UTECH Berlin '95, o. O. 1995
- [FhG 1990] Fraunhofer-Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung: Ökologische Sachbilanzierung zur Integration biologischer Verfahren der Restmüllbehandlung in Abfallwirtschaftskonzepte, o. O. o. J. [um 1990]
- [FINNVEDEN 1995] Finnveden, G.; Huppes, G.: Life Cycle Assessment and Treatment of Solid Waste, Proceedings of the International Workshop, September 28-29, 1995, Stockholm, Schweden, 0

- [FINNVEDEN 1996] Finnveden, G. et al.: Life-Cycle Impact Assessment and Interpretation, Theme report within the LCANET project, o. O. 1996
- [FLEISCHER 1995] Fleischer, G.: Methode der Nutzengleichheit für den ökologischen Vergleich der Entsorgungswege für DSD-Alt kunststoffe, in: Thomé-Kozmiensky, Karl (Hrsg.): Management der Kreislaufwirtschaft, Berlin, 1995, 0 0
- [FRANKE 1993] Franke, Marina: Umweltauswirkungen durch Getränkeverpackungen; Dissertation an der TU Berlin, Berlin 1983
- [FRANKE 1995] Franke, Bend: Ökobilanzen zur Klärschlamm entsorgung; in: Thomé-Kozmiensky, Karl (Hrsg.): Management der Kreislaufwirtschaft, Berlin, 1995, 0 0
- [GANSLMEIER 1984] Ganslmeier, J.: Wirtschaftlichkeit der CO₂-Düngung, in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296, S. 73-78
- [GEBLER 1992] Gebler, W.: Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft, Methodische Ansätze zur Durchführung einer Programm-Umweltverträglichkeitsprüfung, 2. überarbeitete Aufl., Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Bd. 41., Bielefeld 1992
- [GEISSLER 1988] Geissler, T.: Gemüseproduktion unter Glas und Plasten - Produktionsverfahren, Berlin 1988
- [GEMIS 1994] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten: Umweltanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.1 Aktualisierter und erweiterter Endbericht im Auftrag des Hess. Ministers für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, Darmstadt, Kassel 1994
- [GLEU 1987] Gleu, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur energiewirtschaftlichen CO₂-Düngung von Gewächshäusern durch Biogasverbrennung. Meißen 1987
- [GML 1992] GML Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH: Realisierungsstudie zum Abfallwirtschaftskonzept, Umweltbilanzen zur Bewertung des Abfallwirtschaftskonzeptes der GML, erstellt von Saarberg-Oekotechnik GmbH, Saarbrücken unter wissenschaftlicher Mitarbeit von Prof. Dr.- Ing. Scheffold, Bingen, o. O. 1992
- [GOEDKOOOP 1995] Goedkoop, M., Demmers, M.; Collignon, M.: The Eco-indicator 1995, Manual for Designers, NOH report 9524, o.O. 0
- [GRELLE 1984] Grelle, F. und Seidel, S.: Versorgungs- und Dosiereinrichtungen zur Düngung mit technischem CO₂ in Gewächshäusern. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau. Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn. KTBL Schrift 296
- [GRIESSHAMMER] Griebhammer, R. (Hrsg.): Produktlinienanalyse und Ökobilanzen; Werkstattreihe, o. O. o. J. [ca. 1990?]
- [GROTZ 1995] Grotz, Susanne; Rubik, Frieder: Bibliographie zum Thema Produktbilanzen, Berlin, Heidelberg 1995

- [GUINÉE 1993] Guinée, J.; Heijungs, R.: A Proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products, in: Chemosphere, Vol. 26, 1993, No. 10, pp 1925-1944, 0
- [GUINÉE 1995] Guinée, Jeroen: Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products with a case study on margarines; Dissertationsschrift an der Reichsuniversität Leiden, NL, Leiden 1995
- [GUINÉE 1995b] Guinée, J.; Heijungs, R.: A Proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment, in: Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 14, 1995, No. 5, pp. 917-925, 0 1995
- [GUINÉE 1996] Guinée et al.: LCA Impact Assessment of Toxic Releases: Generic modelling of fate, exposure and effect for ecosystems and human beings with data for about 100 chemicals, o. O. 1996
- [HABERSTOCK 1995] Haberstock, W.: Feldversuchsbegleitende Optimierung von Landnutzungsvarianten mittels schrittweiser Ökobilanzierung, in: ZALF Jahresbericht 1995, 0 0
- [HAES 1994] Haes, de H. et al. (ed.): Integrating Impact Assessment into LCA - Proceedings of the LCA symposium held at the Fourth SETAC-Europe Congress, 11-14 April 1994, The Free University Brussels, Belgium, Brüssel 1994
- [HAES 1996] Haes, U. de (ed.): Towards a methodology for life cycle impact assessment, Brüssel 1996
- [HALLEY 1992] Halley, H.; Pfiem, R.: Öko-Controlling - Umweltschutz in mittelständischen Unternehmen, Frankfurt am Main 1992
- [HAUG 1993] Haug, Roger T.: The Practical Handbook of Compost Engineering, Boca Raton 1993
- [HEGE 1984] Hege, H.: Einsatz von CO₂-Generatoren, in: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau, Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn, KTBL Schrift 296
- [HEGE 1986] Hege, H.; Lecker, F.: Vollständige Gewächshausbeheizung und CO₂-Düngung mit gasbetriebenen Warmluftzeugern und Zwangsluftwechsel, Bericht des Institutes für Technik im Gartenbau, Weihenstephan, 1986
- [HEGE 1988] Hege, H.; Finger, J.: Kohlendioxid-Anreicherung in Gewächshäusern durch Heizungsabgase, Bericht des Institutes für Technik im Gartenbau, Weihenstephan 1988:
- [HEGE 1990] Hege, H.; Lecker, F.: Gewächshausheizung und CO₂-Düngung mit gasbetriebenen Warmluftheizern. Bericht des Institutes für Technik im Gartenbau, Weihenstephan 1990
- [HEIJUNGS 1994] Heijungs, R. (final ed.): Environmental life cycle assessment of products - Guide; second printing, Leiden 1994
- [HEIJUNGS 1994a] Heijungs, R. (final ed.): Environmental life cycle assessment of products - Backgrounds; second printing, Leiden 1994
- [HESSEN 1994] Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.): Systemvergleich Restabfallbehandlung - Vergleichende Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen unter-

- schiedlicher Verfahren der Restabfallbehandlung, Schriftenreihe Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Herft 167, 1994, Dieburg/Darmstadt 1994
- [HOFSTETTER 1994] Hofstetter, Patrick; Braunschweig, Arthur: Bewertungsmethoden in Ökobilanzen - ein Überblick; in: GAIA 3 (1994) no.4, S. 227-236, 0 1994
- [HUPPES 1994] Huppés, G.; Schneider, F. (Ed.): Allocation in LCA - Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA at the Centre of Environmental Science of Leiden University, 24. - 25. Februar 1994, Leiden, NL, o. O. o. J. [1994?]
- [IFEU 1992] IFEU GmbH: Vergleich der Auswirkungen verschiedener Verfahren der Restmüllbehandlung auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt Baden-Württemberg, Heidelberg 1992
- [INGELLEM 1984] Ingellem, U.; Maas, W.; Schindler, W.: Ein neuer Weg zur CO₂-Düngung, Der Gasbrenner „Kodimax“ wurde in ersten Praxisversuchen erfolgreich eingesetzt, Sonderdruck aus Deutscher Gartenbau, Nr. 38, 38. Jg., 22.9.1984
- [ISO 14040] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: \Produkt-Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen\, DIN EN ISO 14040, Entwurf und Beiblatt, Berlin 1996
- [IVL 1996] Swedish Environmental Research Institute IVL: Valuation Methods within the Framework of Life Cycle Assessment, IVL Report B1231, Stockholm 1996
- [KARLSSON 1995] Karlsson, Reine: Recycling in Life Cycle Assessments, Licenciate thesis, Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning, Göteborg 1995
- [KERN 1990] Kern, M.; Wiemer, K.: Kostenstrukturen der Boxenkompostierung, Arbeitswirtschaft und Betriebskosten, 1. Aufl., Witzenhausen 1990
- [KOLLER 1996] Koller, M.: Ansätze für eine ökologische Systembewertung - Ökobilanzen zur Restabfallbehandlung, in: Soyéz, K. (Hrsg.) BMBF-Verbundvorhaben Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, Beiträge der 1. Tagung, 13./14. März 1996, Potsdam, Potsdam 1996
- [KOLLER 1996a] Koller, M.; Soyéz, K.: Emissions- und immissionsseitige Belastungspotentials der Kompostierung im Land Brandenburg - Machbarkeitsstudie und orientierende Untersuchungen, Studie im Auftrag des Brandenburgischen Ministeriums für Naturschutz, Umwelt und Raumordnung, Potsdam 1996
- [KOLLER 1997] Koller, M.; Baier, D.; Soyzer, K.: Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion-Demonstrationsanlage, Abschlußbericht zum Vorhaben 3/2 im BMBF-Verbundvorhaben „Neue Techniken der Komopstierung“
- [KORTENKAMP 1991] Kortenkamp; Grahl; Grimme: Die Grenzenlosigkeit der Grenzwerte 1991
- [KRANERT 1988] Kranert, Martin: Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung, Dissertation an der Universität Stuttgart 1988
- [KROGMANN 1994] Krogmann, Uta: Kompostierung, Grundlagen zur Einsammlung und Behandlung von Bioabfällen unterschiedlicher Zusammensetzung, Bonn 1994
- [KRUG 1991] Krug, Helmut: Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis. Berlin, Hamburg 1991

um und Praxis. Berlin, Hamburg 1991

- [KTBL 1984] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): CO₂-Düngung im Unterglasgartenbau, Ergebnisse eines Fachgesprächs der KTBL/ZVG-Arbeitsgruppe „Energie“ am 27. März 1984 in Bonn, KTBL Schrift 296
- [KTBL 1986] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): CO₂-Anreicherung und Heizen im Gewächshaus, KTBL Arbeitsblatt 0646, Darmstadt 1986
- [KTBL 1991] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Gewächshausheizung mit CO₂-Kanonen, KTBL Arbeitspapier 160, Darmstadt 1991
- [KTBL 1992] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Gasheizung, Wärmerückgewinnung und CO₂-Düngung, KTBL Arbeitsblatt Nr. 0650
- [KTBL 1992b] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL): Stoff- und Energiebilanzen landbaulicher Betriebsmittel - von der Produktion bis zur Entsorgung: Vorträge der GKL-Jahrestagung am 5./6. Oktober 1992 in Osnabrück, KTBL Arbeitspapier 186
- [KTBL 1994] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): KTBL-Taschenbuch Gartenbau, Daten für die Betriebskalkulation im Gartenbau, 4. Aufl., Darmstadt 1994
- [LCANET 1996] LCANET (Hrsg.): Definition Document, Leiden 1996
- [LECKER 1995] Persönl. Mitteilung von Herrn Lecker, Staatl. Versuchsanstalt für Gartenbau Weihenstephan
- [LINDE 1995] Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, Persönliche Mitteilung vom 14.08.1995
- [LINDE] Linde AG, Zentrale Gasversorgung, Firmen katalog
- [MARNETTE 1988] Marnette, E.: Herkunft und Eigenschaften von Kohlendioxid, Vortrag zum Seminar „Schutzgasverpackung mit Kohlendioxid“, Haus der Technik, Essen am 15.06.1988
- [MEIER 1996] Meier, Markus: Emissionen im Normalbetrieb versus Störfall, Technisch und sozialwissenschaftliche Analyse am Beispiel des leichtflüchtigen organischen Lösungsmittel Toluol, Abschlußarbeit des Nachdiplomkurses Risiko & Sicherheit der ETH Zürich, Hochschule St. Gallen, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne EPFL, o. O. 1996
- [MEIER-PLOEGER 1996] Meier-Ploeger, A.; Vogtmann, H.; Zehr, M.: Ökobilanz Kompost versus Mineraldünger, Fachbericht der International Nutrition and Agriculture Consultancy, o. O. 1996
- [MÖRTH 1995] Mörth, Joseph: Optimale Ausgangszusammensetzung für die Kompostierung und Simulation eines Rotteprozesses in einer Miete und in einer Rottebox, Diplomarbeit an der TU Graz, 1995
- [NARODOSLAWSKI 1992] Narodoslowski, M. et al.: SPI - Der Sustainable Process Index, in: Moser, A; Soye, K. (Hrsg.): Ecologic bioprocessing - Challenges in practice. Proceedings of the Workshop "Ecologic bioprocessing - challenges in practice", Pots-

dam, 7-9. October 1992, S. 35-54.

- [NICHOLS 1996] Nichols, P. et al.: Impact assessment of non toxic pollution in life cycle assessment, in: Haes, U. de (ed.): Towards a methodology for life cycle impact assessment, Brüssel 1996
- [PAPENHAGEN 1983] Papenhagen, A.: Bessere Erträge durch CO₂ - aber nicht überall, Sonderdruck aus Gärtnerbörse und Gärtnerwelt (Kurzfassung), 83. Jg. (1983), Nr. 49, S. 1244-1249
- [PAULINI 1996] Paulini, I.: Arbeiten des Umweltbundesamtes zur Methodik der Wirkungsabschätzung, Beitrag zum UTECH Berlin Umwelttechnologieforum 1996, Seminar 48
- [REINHARDT 1993] Reinhardt, Guido A.: Energie- und CO₂-Bilanzierung nachwachsender Rohstoffe. Theoretische Grundlagen und Fallstudie Raps, 2. Auflage, Heidelberg 1993
- [REINHOLD 1996] Reinhold, J.; Zimmer, J.: Literaturstudie zu pflanzenbaulichen und arbeitshygienischen Auswirkungen bei der Einleitung von Abgasen aus der Kompostierung in Gewächshäuser, Groß Kreutz 1996, unveröffentlicht
- [RUBIK 1992] Rubik, F.; Baumgartner, T.: Technological innovations in the plastics industry and its influence on the environmental problems of plastic waste. Evaluation of Eco- Balances, o.O. 1992
- [RUHRGAS 1995] Ruhrgas AG (Hrsg.): Erdgas im Gartenbau, 3. Aufl., Essen 1995
- [SAGE 1993] Sage, Jan: Industrielle Abfallvermeidung und deren Bewertung am Beispiel der Leiterplattenherstellung, Graz 1993
- [SCHALTEGGER 1994] Schaltegger, Stefan; Kubat, Ruedi: Das Handwörterbuch der Ökobilanzierung: Begriffe und Definitionen, Basel 1994
- [SCHMIDT 1981] Schmidt, K.-H.; Romey, I.: Kohle – Erdöl – Erdgas, Chemie und Technik, 1. Aufl., Würzburg 1981
- [SCHMIDT-BLEEK 1993] Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften, Berlin u. a. O. 1993
- [SCHRÖDER 1991] Schröder, F.-G: Entwicklung und pflanzenbauliche Grundlagen eines neuen erdelosen Kulturverfahrens „Plant Plane Hydroponic“, Humboldt-Universität Berlin, Dissertation an der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, 1991
- [SCHWIEBERT 1985] Schwiebert, G.: CO₂-Düngung im Gartenbau, Viele Faktoren spielen mit, Sonderdruck aus 'zb'-ZIERPFLANZENBAU 20/85
- [SETAC 1992] Society of Environmental Toxicology and Chemistry SETAC - Euope (pub.): SETAC-Europe Workshop on Environmental Life Cycle Analysis of Products\ am 2./3.12.1991 in Leiden, Brüssel 1992
- [SETAC 1993] Society of Environmental Toxicology and Chemistry SETAC (pub.): Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'; SETAC Workshop held at Sesimbra, Portugal, 31 March - 3 April 1993, o. O. 1993
- [SHELL] Informationsmaterial der Deutschen Shell AG

- [SOYEZ 1989] Soyez, K.; Fieback, K.; Brankatschk, K.; Passin, H.: Kombinierte CO₂-Produktion, Schnellkompostierung und Abwärmenutzung, in: Gartenbau 36 (1989) 8, S. 236.
- [SOYEZ 1995] Soyez, K.; Prause, M.; Costa, A.: Modelling and simulation of composting using kinetic models, in: Bidlingmaier, W.; Stegmann, R. (Hrsg.): Proceedings 1. International Symposium Biological Waste Management, A wasted chance ? Bochum 1995.
- [STEEN 1994] Steen, Bengt: Development of the EPS System, Phase II, Swedish Environmental Institute, AFR-Report 34, Stockholm 1994
- [STRÄLEN 1988] Anonymus: Zwischenbericht zum Versuchsprojekt: Untersuchung des Einsatzes von technischem CO₂ und Erdgas zur CO₂-Düngung im Unterglas-Gartenbau, Lehr- und Versuchsanstalt für Gemüse- und Zierpflanzenbau Strälen 1986-1987, Strälen 1988
- [TUROWSKI 1977] Turowski, R.: Entlastung der Rohstoff- und Primärenergiebilanz der Bundesrepublik Deutschland durch Recycling von Hausmüll, Dissertation an der Gesamthochschule Essen, 1977
- [UBA 1992] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Ökobilanzen für Produkte. Bedeutung - Sachstand - Perspektiven. (Texte 38/92), Berlin 1992
- [UBA 1993] Umweltbundesamt (Hrsg.): Ökologische Bilanz von Rasöl bzw. Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselmotortreibstoff, Texte 4/93, Berlin 1993
- [UBA 1995] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung ; UBA Texte 23/95, Berlin 1995
- [UBA 1995a] Umweltbundesamt (Hrsg.): Ökobilanz für Getränkeverpackungen; Texte 52/95, Berlin 1995
- [UBA 1995b] Umweltbundesamt (Hrsg.): Standardberichtsbogen für produktbezogene Ökobilanzen, Texte 24/95, 0
- [UBA 1995c] Umweltbundesamt: Umweltdaten Deutschland 1995, Berlin 1995
- [UBA 1996] Umweltbundesamt (Hrsg.): Transparenz und Akzeptanz von Grenzwerten am Beispiel des Trinkwassers, Berichtsband zur Tagung vom 10. und 11. Oktober mit Ergänzungen, Berlin 1996
- [ULLMANN 1977] Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie - 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Band 14, Weinheim 1977
- [ULLMANN 1985] Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A5, 1985, S. 165-183
- [UNEP 1996] United Nations Environment Programme, Industrie and Environment (ed.): Life Cycle Assessment: What it is and how to do it, Paris 1996
- [VOGEL 1987] Vogel, G. (Hrsg.): Gemüseproduktion unter Glas und Platten - Natürliche und materiell-technische Voraussetzungen, Berlin 1987
- [WABOLU 1996] Diehl, K.; Hofmann, R.: Literaturstudie zu Hygieneproblemen von Kompostierungsanlagen unter Berücksichtigung der möglichen Gesundheitsgefahren in der Nähe lebender Anwohner, WaBoLu-Heft 11/96

- [WHITE 1995] White, P.; Franke, M.; Hindle, P.: Integrated Solid Waste Management: A Life-cycle Inventory, Glasgow u. a. O. 1995
- [WIDMANN 1990] Widmann, Rhenatus: Ökobilanzen - Lebenslauf im Mittelpunkt, Studienreihe ABFALL NOW Bd. 10, Stuttgart 1990
- [WIEMER 1994] Wiemer, K.; Kern, M.: Verfahrenstechnik der Bioabfallkompostierung, Witzzenhausen 1992
- [WINTER 1986] Winter, G. (Hrsg.): Grenzwerte. Interdisziplinäre Betrachtungen zu einer Rechtsfigur des Umwelt-, Arbeits- und Lebensmittelschutzes, Düsseldorf 1986

8 Anlagen

Anhang 1: Anlagenschema

Anhang 2: Klimadaten

Anhang 3: Sachbilanzdaten