

# CO<sub>2</sub>-Anreicherung in Gewächshausanlagen

Lutz Köhler, Friedrich Lecker, Dietmar Prucker

KTBL-Schrift 440



**Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Lutz Köhler | Dipl.-Ing. (FH) Dietmar Prucker  
 Forschungsanstalt für Gartenbau an der Fachhochschule Weihenstephan  
 85350 Freising

Dipl.-Ing. (FH) Friedrich Lecker  
 Holnsteinallee 16 b  
 85402 Thalhausen

**Projektbetreuung**

Dipl.-Ing. agr. Thomas Hölscher  
 Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)  
 Fachgruppe Technik und Bauwesen im Gartenbau  
 Godesberger Allee 142-148 | 53175 Bonn

© 2006  
 Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)  
 Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt  
 Telefon (06151) 7001-0 | Fax (06151) 7001-123  
 E-Mail: ktbl@ktbl.de | <http://www.ktbl.de>

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des KTBL urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) | Bonn

Lektorat  
 Dr. Anita Heidenfelder | Uffing

Redaktion  
 Herbert Harder, Thomas Hölscher | KTBL

Titelfoto  
 Forschungsanstalt für Gartenbau an der Fachhochschule Weihenstephan | Freising

Vertrieb  
 KTBL | Darmstadt

Druck  
 Druckerei Lokay | Reinheim

Printed in Germany

ISBN 3-939371-04-1  
 ISBN 978-3-939371-04-5 (ab 01.01.2007)

**Vorwort**

Die Wirkung von Kohlendioxid auf Pflanzen ist schon seit längerem bekannt und wird von vielen Gartenbaubetrieben bei der Pflanzenkultur in Gewächshäusern genutzt. So ist es nicht erstaunlich, dass dieses Gas bei der gärtnerischen Produktion unter Glas mittlerweile einen ähnlichen Stellenwert einnimmt wie die aus der Pflanzenernährung bekannten Haupt- und Spurennährstoffe. Eine Anreicherung der Gewächshausatmosphäre mit dem wichtigen Pflanzennährstoff CO<sub>2</sub> wirkt nicht nur einem Mangel entgegen, sondern beeinflusst die Qualität und das Wachstum der Kulturen positiv. Dies wird umso bedeutender und notwendiger, je stärker Gewächshäuser aufgrund von Energiesparmaßnahmen wärmedämmung werden und so der Luftwechsel in diesen Kulturräumen verringert wird.

Eine viel genutzte Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Zufuhr in Gewächshäusern ist der Einsatz von Verbrennungsgasen aus Gaswärmeerzeugern, gasbefeuerten Heizkesseln sowie Kraftmaschinen. Diese verbindet die pflanzenbaulichen Vorteile einer CO<sub>2</sub>-Düngung mit einer effizienten Nutzung der Heizenergie. Die vielfältigen Zusammenhänge werden in der vorliegenden Veröffentlichung detailliert beschrieben.

Mit finanzieller Unterstützung durch die E.ON Ruhrgas AG wurden von der Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan (FGW), früher Staatliche Versuchsanstalt für Gartenbau, Untersuchungen über den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeugern und die Wirkung von deren Abgasen auf das Pflanzenwachstum durchgeführt. Wesentliche Aussagen und Ergebnisse der vorliegenden KTBL-Veröffentlichung basieren auf dieser Forschungsarbeit.

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN  
 IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL)

Dr. Heinrich de Baey-Ernsten

## Verzeichnis der Formelzeichen, Symbole, Indizes und Abkürzungen

**Formelzeichen und Symbole**

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
A	Fläche	m <sup>2</sup>
D	Dichteverhältnis	–
H <sub>i,n</sub>	Heizwert	kWh/m <sup>3</sup>
H <sub>s,n</sub>	Brennwert	kWh/m <sup>3</sup>
L	Brennluftbedarf	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Gas
n	Luftwechsel	h <sup>-1</sup>
T <sub>z</sub>	Zündtemperatur	°C
V <sub>A</sub>	Lichtverlustfaktor	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
W	Wobbeindex	kWh/m <sup>3</sup>
Z	Zündgrenze	Vol.-% Gas in Luft
λ	Luftzahl Lambda	–
ρ	Dichte Rho	kg/m <sup>3</sup>

**Indizes**

G	gesamt
i	inferior
n	Normzustand
o	obere
s	superior
u	untere

**Abkürzungen**

Abt.	Abteilung
bez.	bezogen
BHKW	Blockheizkraftwerk
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
GJ	Gigajoule (10 <sup>9</sup> Joule)
GWE	Gaswärmeerzeuger
H	high (Erdgasgruppe)

h	Höhe
H <sub>2</sub> O	Wasser (Wasserdampf)
HNO <sub>2</sub>	salpetrige Säure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
Hs.	Haus
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
L	low (Erdgasgruppe)
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
max.	maximal
min.	minimal
MWh	Megawattstunden (10 <sup>6</sup> Watt)
N <sub>2</sub>	molekularer Stickstoff
nm	Nanometer (10 <sup>-9</sup> m)
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrit-Ion
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat-Ion
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
O <sub>2</sub>	molekularer Sauerstoff
O <sub>3</sub>	Ozon
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung
Pfl.	Pflanze
pH	pondus Hydrogenii (Maß für die Protonenkonzentration in Flüssigkeiten)
pKs	Maß für die Stärke einer Säure
ppm	parts per million
r.F.	relative Luftfeuchte
SCR	selektive katalytische Reduktion
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
Vol.	Volumen
vpm	volume parts per million
µE	Mikro-Einstein (10 <sup>-6</sup> Einstein)
µmol	Mikro-Mol (10 <sup>-6</sup> Mol)

## Inhaltsverzeichnis

1	Bedeutung der CO <sub>2</sub> -Anreicherung.....	9
2	Klimafaktoren und pflanzenphysiologische Vorgänge.....	10
2.1	Beleuchtungsstärke und Photosynthese.....	10
2.2	Temperatur und Photosynthese.....	12
2.3	Luftfeuchtigkeit und Transpiration.....	13
2.4	CO <sub>2</sub> -Konzentration und Photosynthese.....	13
2.5	CO <sub>2</sub> -Konzentration und Pflanzenentwicklung.....	16
3	Grundsätze der Gewächshausbeheizung.....	18
3.1	Heizungssysteme.....	18
3.2	Brenngase.....	18
3.2.1	Erdgas.....	18
3.2.2	Flüssiggase.....	19
4	Heizsysteme mit CO <sub>2</sub> -Anreicherung im Gewächshaus.....	21
4.1	CO <sub>2</sub> -Gaswärmeerzeuger.....	21
4.2	Zentrale Heizanlagen.....	25
4.3	Strahlungsheizungen.....	31
4.4	Technische Regeln und Normen.....	33
4.5	Einflussfaktoren auf das Gewächshausklima.....	34
4.5.1	Wärmeübertragung und Temperaturverteilung.....	34
4.5.2	Luftfeuchtigkeit und Transpiration.....	36
4.5.3	Licht.....	37
4.6	Messtechnik.....	37
4.6.1	Messverfahren.....	38
4.6.2	CO <sub>2</sub> -Messeinrichtungen für Gewächshäuser.....	40
5	CO <sub>2</sub> -Nutzung aus Kraftmaschinen.....	42
5.1	Gasbetriebene Verbrennungsmotoren.....	42
5.2	Mikro-Gasturbinen.....	43
6	Nutzung von technischem CO <sub>2</sub> .....	45

7	Vermeidung schädlicher Einwirkungen.....	47
7.1	Wirkung von Stickoxiden in Luft.....	47
7.2	Wirkung von Stickoxiden im Zusammenhang mit Wasser.....	48
7.3	Schadensfälle und Schadensverhütung.....	52
8	Zusammenfassung.....	54
	Literatur.....	55
	KTBL-Veröffentlichungen zum Themenbereich.....	56

## 1 Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Anreicherung

Kohlendioxid ist eine notwendige Voraussetzung, um unter Ausnutzung der Lichtenergie in der Pflanze Kohlenwasserstoffverbindungen aufzubauen. Dieser Vorgang wird als Photosynthese bezeichnet. Bei richtiger Anwendung führt eine CO<sub>2</sub>-Zudosierung in der Gewächshausluft zu stärkerem Pflanzenwachstum, zur Kulturzeitverkürzung, zu besserer Qualität und damit zu höheren Verkaufserlösen. Ursache hierfür ist die höhere Stoffwechselproduktion durch die CO<sub>2</sub>-Aufnahme, wobei die Strahlungsenergie des Sonnenlichtes einen wichtigen Faktor darstellt.

Ein Mangel an CO<sub>2</sub>, der in relativ dichten Gewächshäusern mit bodenunabhängigen Kulturverfahren und geschlossenem Pflanzenbestand auftreten kann, mindert das Wachstum. Maßnahmen zur Verhinderung eines CO<sub>2</sub>-Mangels und zur Konzentrationssteigerung werden seit Jahrzehnten angestrebt. Erst Verbesserungen in der Mess- und Regeltechnik haben Fortschritte gebracht.

Zur CO<sub>2</sub>-Versorgung von Gewächshäusern werden seit Jahren die Verbrennungsprodukte von Gasheizungen bzw. speziell hierfür eingesetzten Gasbrennern verwendet. Dies erfolgt entweder durch Anbringen der Brenner direkt im Gewächshaus, durch Abzweigen von Abgasen vor dem Schornstein einer zentralen Heizanlage oder durch Einleiten von motorischen Abgasen, die zur Reduktion von Schadgasen speziellen chemischen Prozessen unterzogen werden müssen.

Werden die Abgase direkt ins Gewächshaus geleitet, wird ein großer Teil des Wärmeinhalts dieser Gase genutzt. Die Energieeinsparung und eine vermehrte Aufnahme des angebotenen Kohlendioxids durch die Pflanzen führen zu einer Entlastung der Umwelt.

## 4 Heizsysteme mit CO<sub>2</sub>-Anreicherung im Gewächshaus

In Gewächshäuser dürfen nach DIN EN 12669 (2000) warme Abgase direkt eingeleitet werden, um neben der Beheizung gleichzeitig eine Anreicherung der Gewächshausluft mit Kohlendioxid zu bewirken. Vor allem in Gemüsebaubetrieben werden oftmals großflächige Gewächshausanlagen ausschließlich mit direkt gasbefeueten Heißluftgebläsen beheizt. Für diese Heißluftgebläse, die mit Erdgas oder Propan betrieben werden, hat sich der Begriff CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger in der gärtnerischen Praxis etabliert. Im Folgenden wird ausschließlich die Bezeichnung CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger verwendet.

Bis zu einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von 20 K können die Geräte unter Einbeziehung einer Zwangsluftwechseinrichtung als alleinige Heizung dienen. Bei höheren Temperaturansprüchen werden sie entweder zur Abdeckung des Grundwärmebedarfs oder als Zusatzheizung eingesetzt. Eine Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) von 5 000 vpm (ml/m<sup>3</sup>) ist bei Heizbetrieb immer vorzusehen. Dies kann mittels einer Zwangsluftwechseinrichtung erfolgen, die über eine CO<sub>2</sub>-Messeinrichtung gesteuert wird.

### 4.1 CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger

Angeboten werden CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger verschiedener Bauarten, die sich in der Zufuhr der Verbrennungsluft und der Art des Brenners unterscheiden (vgl. Abb. 13).

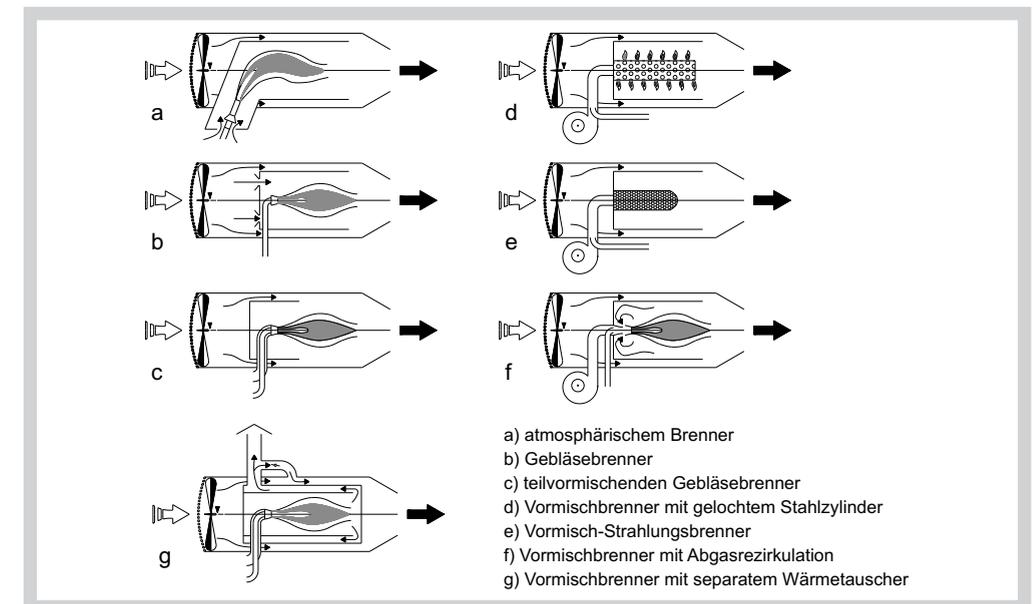


Abb. 13: CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger mit unterschiedlichen Brennern

Sind Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr richtig eingestellt, bilden sich bei der Verbrennung keine schädlichen Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) oder unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), sondern ausschließlich Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserdampf, die in der Regel nicht zur Schädigung von Pflanzen führen. Zusätzlich entstehen jedoch auch Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), die negative Einflüsse auf die Pflanze haben können. Menge und Zusammensetzung (NO und NO<sub>2</sub>) werden weitgehend von der Brennerkonstruktion und der Verbrennungstemperatur beeinflusst. Abbildung 14 zeigt Beispiele für maximale NO<sub>x</sub>-Emissionen in mg/kWh, wobei 200 mg/kWh etwa 164 mg/m<sup>3</sup> bei 5 % O<sub>2</sub> entsprechen.

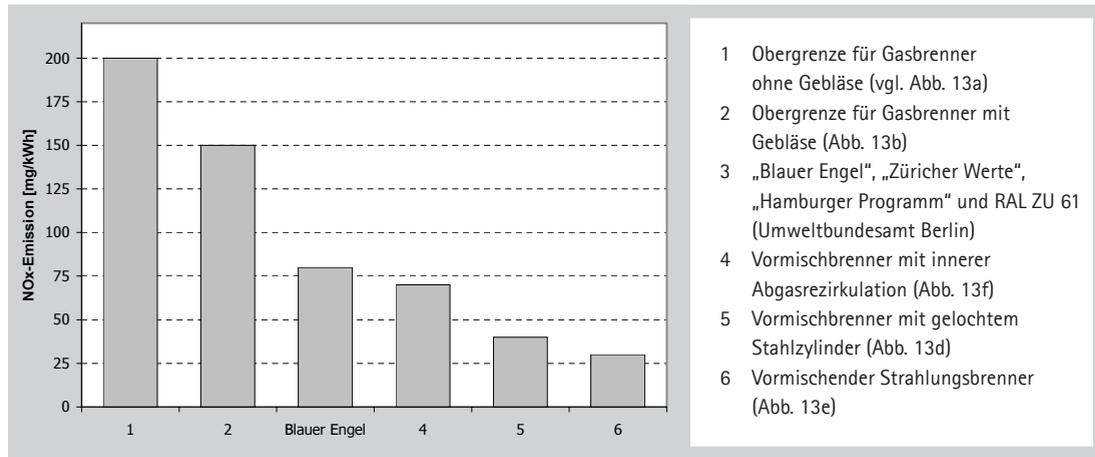


Abb. 14: NO<sub>x</sub>-Maximalwerte für Gasbrenner

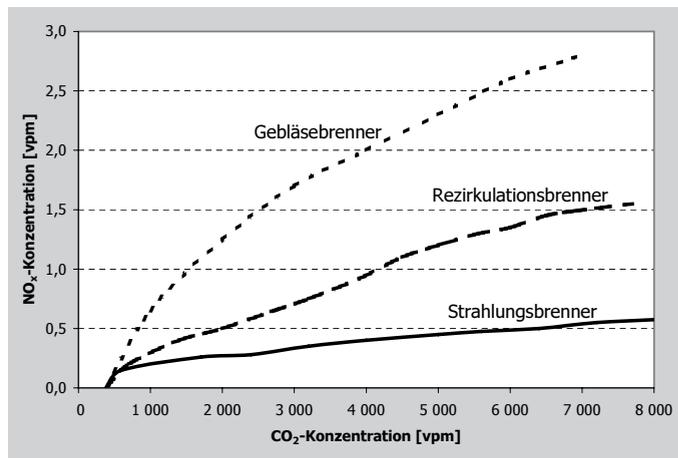


Abb. 15: NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Brennerbauart und der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Gewächshaus

In Abbildung 15 sind die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen verschiedener Brenner dargestellt, wie sie in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Gewächshaus auftreten. Die Werte wurden in einem 360 m<sup>2</sup> großen Venlo-Gewächshaus der Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan unter Praxisbedingungen ermittelt.

**Verbrennungsluft**

Der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff wird in der Regel

der Umgebungsluft entnommen. Die atmosphärische Sauerstoffkonzentration bodennaher Luftschichten liegt bei knapp 21 %. Geringere Konzentrationen können auftreten, wenn Gewächshäuser mit CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeugern direkt beheizt werden und die Gewächshausluft als Verbrennungsluft dient. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Brenngases nimmt die O<sub>2</sub>-Konzentration mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration ab. Abbildung 16 zeigt, dass bei Erdgasfeuerung der O<sub>2</sub>-Gehalt der Gewächshausluft bei Erreichen von 0,5 Vol.-% CO<sub>2</sub> (MAK-Wert) auf 20,1 Vol.-% sinkt. Bei 2,2 Vol.-% CO<sub>2</sub> beträgt der O<sub>2</sub>-Gehalt nur noch 17 Vol.-%. Das liegt daran, dass mit jedem Kubikmeter Abgas ein Kubikmeter Gewächshausluft verdrängt und damit 0,21 m<sup>3</sup> Sauerstoff abgeführt werden. Mit der Verbrennungsluft werden aber nur maximal 0,12 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (bei Erdgas) oder 0,14 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (bei Propan) zugeführt, woraus die deutlich größere Abnahme an O<sub>2</sub> resultiert.

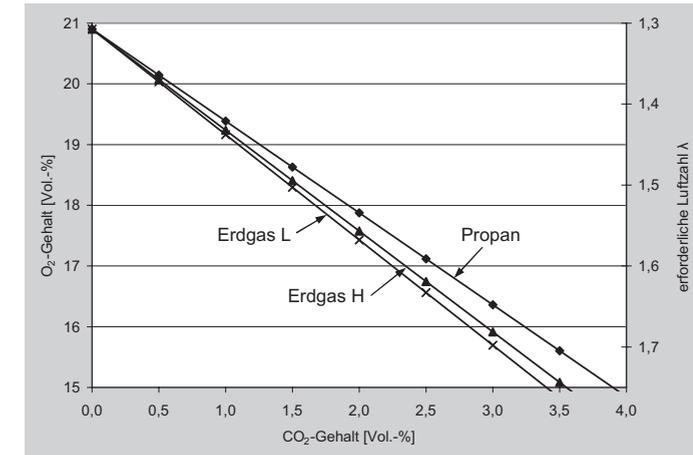


Abb. 16: Sauerstoffkonzentration der Gewächshausluft und die erforderliche Luftzahl in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Gewächshausluft

Für eine optimale Verbrennung ist eine ausreichende Sauerstoffzufuhr notwendig. Kennzeichen dafür ist die Luftzahl λ. Sie gibt das Verhältnis der tatsächlich benötigten Luftmenge zum theoretischen Luftbedarf an. Beim Einstellen der Brenner ist daher der aktuelle O<sub>2</sub>-Gehalt der Gewächshausluft zu berücksichtigen, wenn diese zur Verbrennung verwendet wird. Bei zu geringer Sauerstoffkonzentration in der Gewächshausluft ist eine Korrektur der Luftzahl notwendig (vgl. Abb. 16).

Grundsätzlich ist es aber immer vorteilhaft, dem Verbrennungsvorgang Außenluft zuzuführen. Der Energieaufwand für das Aufheizen der Außenluft ist dabei gering.

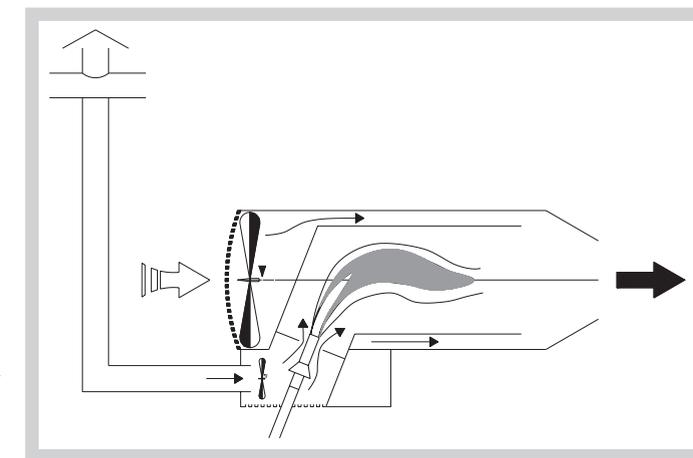


Abb. 17: Außenluftzufuhr bei einem CO<sub>2</sub>-Gaswärmeerzeuger mit atmosphärischem Brenner