

Erdgasheizung im Gartenbau

1 Einführung

Im Unterglasgartenbau ist Energie ein bedeutender Faktor. Die Energiekosten werden in erster Linie durch die Beheizung der Gewächshäuser bestimmt. In Abhängigkeit von den angebauten Kulturen betragen die Aufwendungen für die Wärmeversorgung bis zu 20 % des Umsatzes, in Einzelbetrieben sogar mehr. Daher entscheidet heute nicht zuletzt der optimale Energieeinsatz über die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.

Dieses Arbeitsblatt setzt den Schwerpunkt auf die wirtschaftliche Gewächshausbeheizung mit dem Brennstoff Erdgas, wobei allgemeine Informationen zum Erdgas (Kap. 2) und gartenbauspezifischen Beheizungstechniken (Kap. 3) behandelt werden.

2 Grundlagen

2.1 Eigenschaften

Erdgas ist ein geruchloses, farbloses und ungiftiges Gas. Es entstand vor Millionen Jahren aus der Zersetzung organischer Bestandteile und enthält als Hauptbestandteil Methan (CH_4). Umrechnungsfaktoren in andere Energiegrößen können Tab. 1 entnommen werden.

Tab. 1: Energie-Umrechnungsfaktoren¹⁾

	Mrd. kWh Erdgas (H_8)	Mio. t SKE	Mrd. m ³ Erdgas	Mio. t OE	Peta (10 ¹⁵) Joule (H_8)
Mrd. kWh Erdgas (H_8)	1,0000	0,1109	0,0870	0,0776	3,6000
Mio. t SKE	9,0205	1,0000	0,7844	0,7000	32,4738
Mrd. m ³ Erdgas	11,5000	1,2749	1,0000	0,8924	41,4000
Mio. t OE	12,8864	1,4286	1,1206	1,0000	46,3911
Peta (10 ¹⁵) Joule (H_8)	0,2778	0,0308	0,0242	0,0216	1,000

¹⁾ Rechenbeispiele:

30,0 Mrd. kWh Erdgas x 0,0870 Mrd. m³ Erdgas/Mrd. kWh Erdgas
= 2,61 Mrd. m³ Erdgas
2,61 Mrd. m³ Erdgas x 11,5000 Mrd. kWh Erdgas/Mrd. m³ Erdgas
= 30,0 Mrd. kWh Erdgas

Erdgas fließt von den Förderquellen bis zum Endverbraucher durch unterirdische Pipelines und entlastet so konventionelle Transportwege. Da Erdgas beim Endverbraucher unmittelbar als Primärenergie eingesetzt wird, werden Energieverluste

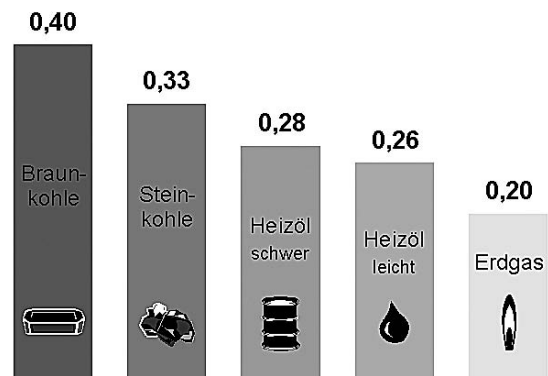


Abb. 1: CO₂-Bildung bei der Verbrennung fossiler Energieträger (in kg CO₂/kWh Brennstoffeinsatz).

Quelle: Schlussbericht der Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“, 1994

te und Schadstoffbelastungen, wie sie bei einer Umwandlung in eine Sekundärenergie entstehen, vermieden. Daraus resultieren eine gute Primärenergiebilanz sowie günstige CO₂-Emissionen.

Durch den niedrigen Kohlenstoffgehalt im Erdgas ergeben sich bei der Verbrennung die geringsten spezifischen CO₂-Emissionen aller fossilen Energieträger (Abb. 1). Das gilt auch für andere Emissionen, wie Untersuchungen des Umweltbundesamtes und anderer Institutionen zeigen. Weil der Brennstoff gasförmig ist,

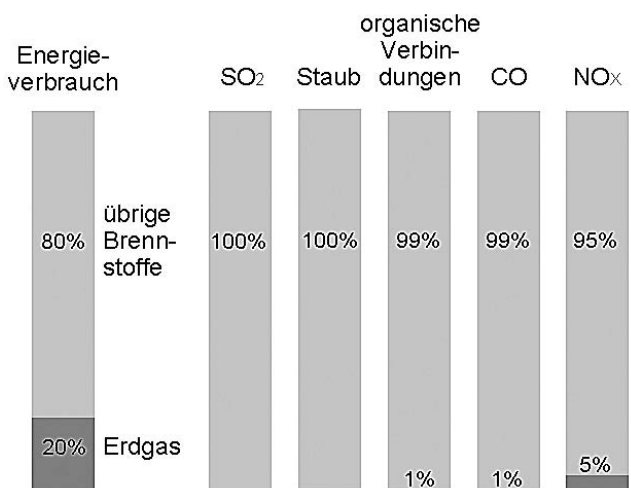
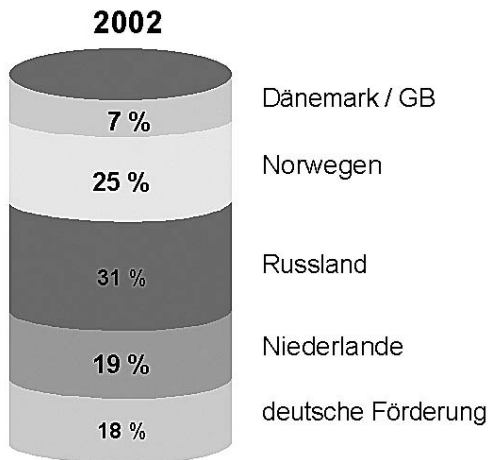


Abb. 2: Anteil des Erdgases am emissionsverursachenden Energieverbrauch und Schadstoffausstoß (alte Bundesländer, ohne Prozesse).

Quelle: Umweltbundesamt



Erdgasaufkommen in Deutschland: 94 Mrd. m³

Abb. 3: Erdgasbezugsquellen Deutschlands

können sich Brenngas und Verbrennungsluft gleichmäßig vermischen. Dies bietet gute Möglichkeiten für eine annähernd vollständige Verbrennung und ist somit Garant für niedrige Schadstoffemissionen.

Bei der Verbrennung von festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen entstehen zwangsläufig Stickstoffoxide (NO_x). Aufgrund der Brennstoffeigenschaften – Erdgas enthält keinen gebundenen Stickstoff – ist eine Stickoxidbildung nur mit dem Stickstoff der Verbrennungsluft denkbar. Diese lässt sich jedoch durch heutige Verbrennungstechniken beherrschen, sodass die NO_x-Emissionen minimal sind.

2.2 Erdgas in Deutschland

Das Erdgasaufkommen in Deutschland stammte 2002 zu 18 % aus deutscher Produktion, zu 51 % aus westeuropäischen Quel-

len und zu 31 % aus Russland (Abb. 3). Das gesamte Jahresaufkommen von 94 Mrd. m³ Erdgas diente zur Deckung des Inlandsverbrauchs (83 Mrd. m³) sowie zur Belieferung von Kunden im Ausland und zur Speicherung.

Deutschland ist in das europäische Erdgasverbundsystem integriert (Abb. 4). Dieser Verbund umfasst Fernleitungen von rd. 44.000 km Länge. Diese wiederum sind an die nationalen Leitungsnetze mit insgesamt etwa 1,5 Mio. km Länge angeschlossen.

2.3 Erdgasreserven und -ressourcen

Bei der Bewertung der Verfügbarkeit ist zwischen sicher und wirtschaftlich gewinnbaren Reserven und potenziellen Ressourcen zu unterscheiden. Bei gleich bleibendem Verbrauch reichen die bekannten Welt-Erdgasreserven bis zum Jahre 2065 (statische Reichweite, vgl. Abb. 5). Ergänzt man die sicher gewinnbaren Reserven um zurzeit nicht wirtschaftlich gewinnbare Lagerstätten, so erhöht sich die Reichweite auf 160 bis 200 Jahre. Hinzu kommen weitere potenzielle Quellen, zu denen u. a. Erdgashydrate gehören. Dies sind feste Verbindungen aus Wasser und Methan, die in großen Tiefen unter hohem Druck existieren. Entsprechend aufwändig und teuer wäre die Förderung. Die Kapazität dieser Quellen übersteigt die heute bekannten Methan- bzw. Erdgasreserven um ein Vielfaches.

3 Erdgastechnik zur Beheizung, CO₂-Düngung und Eigenstromerzeugung

Um die Anforderungen an die kulturgerechte Beheizung der Gewächshäuser sicherzustellen, werden unterschiedliche Systeme eingesetzt. Hierbei wird nach der Art der Wärmeübertragung und -übertragung auf die Kulturen unterschieden. Details zur CO₂-Anreicherung und zur Kraft-Wärme-Kopplung im Gartenbau können Lecker (1998) bzw. Gudehus (1993) entnommen werden.

3.1 Wasserheizsysteme

Wasserheizsysteme mit Wärmeerzeuger und nachgeschalteter Rohrheizung sind im Gartenbau am häufigsten anzutreffenden. Die

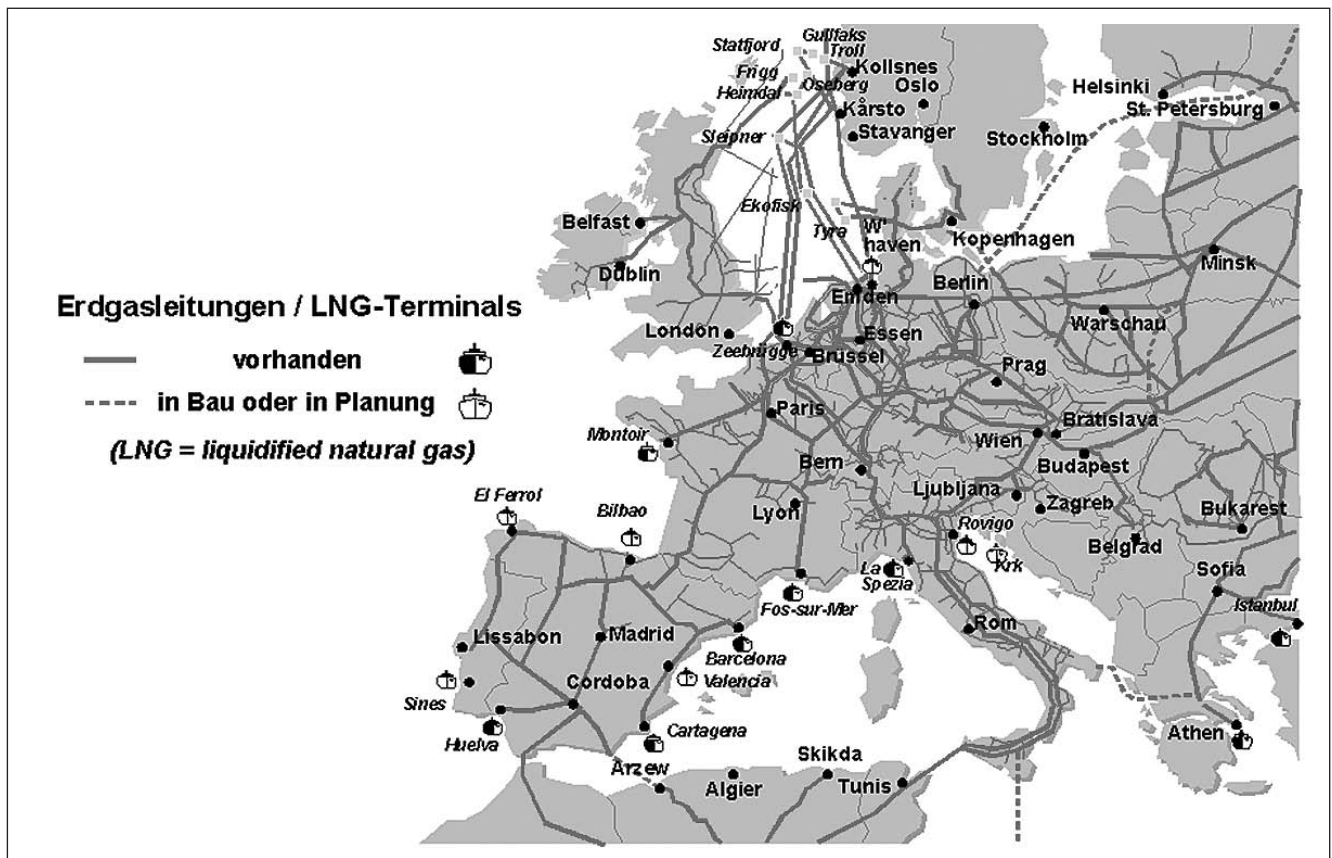


Abb. 4: Europäischer Erdgasverbund (Stand 2002).

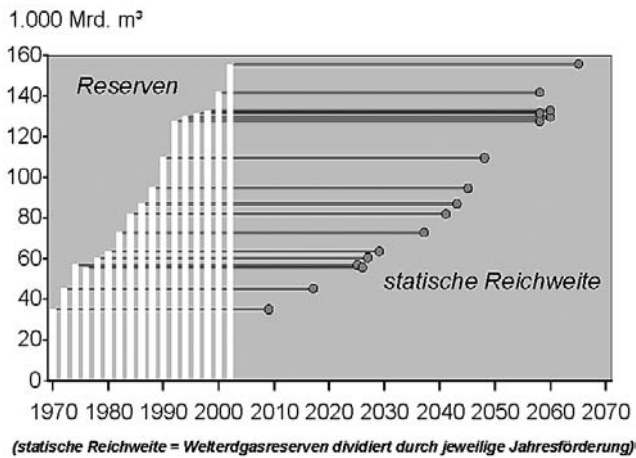


Abb. 5: Sicher gewinnbare Welt-Erdgasreserven und statische Reichweite.

Heizrohre können zwischen den Pflanzreihen, unter den Pflanzreihen, an den Gewächshauswänden oder als hohe Rohrheizung installiert werden. Die Heizkessel werden in verschiedenen Bauformen und mit unterschiedlichen Kesselkörpern angeboten.

Bei modernen Niedertemperaturkesseln werden die Brenner mit einer modulierenden oder zweistufig gleitenden Brennerregelung ausgerüstet. Dies und die Betriebsweise mit gleitender Kesselwassertemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur oder dem Wärmebedarf der Gewächshäuser führt zu einer deutlichen Reduzierung der Abstrahlungs- und Betriebsbereitschaftsverluste. Der daraus resultierende höhere Jahresnutzungsgrad wirkt sich direkt senkend auf den Erdgasverbrauch und die jährlichen Energiekosten aus.

Bei sogenannten Brennwertkesseln werden die Abgase soweit abgekühlt, dass der enthaltene Wasserdampf aus der Verbrennung auskondensiert. Das geschieht bei Temperaturen um etwa 60 °C. Die hierbei frei werdende sogenannte Kondensationswärme wird im Kessel genutzt, sodass sich ein insgesamt höherer Wirkungsgrad ergibt, was zu einer deutlichen Energieeinsparung führt (Abb. 6).

Diese Art der zusätzlichen Wärmenutzung lässt sich entweder mit einem Brennwertkessel realisieren oder mit einem nachgeschalteten

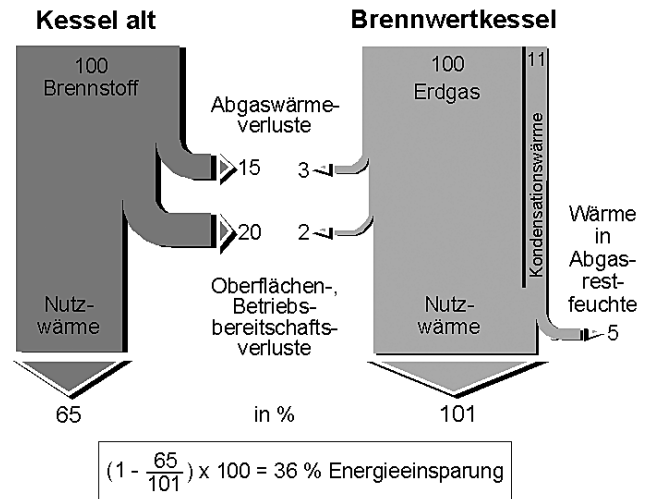


Abb. 6: Energieersparnis durch Brennwertnutzung mit Erdgas.

teten Brennwert-Wärmeaustauscher, der auch nachgerüstet werden kann (Abb. 7).

Die Abgaswege müssen bei der Brennwertnutzung wasserdicht, feuchteunempfindlich und korrosionsfest ausgeführt werden. Es werden daher üblicherweise Edelstähle, Aluminium und Kunststoffe eingesetzt. Für die Kondensation und die optimale Ausnutzung des Erdgas-Brennerts ist ein Niedertemperatur-Rücklauf, zum Beispiel aus einer Vegetations- oder Bodenheizung, von großem Vorteil.

Moderne Brennwert- oder Niedertemperatur-Heizkessel mit schadstoffarmen Brennern eignen sich heute immer zur CO₂-Nutzung. Das Abgas kann nach der Abkühlung unter den Taupunkt und der Verdünnung mit Luft bei den meisten Anlagen zur Erhöhung der CO₂-Konzentration in das Gewächshaus eingeleitet werden. Die Kondensation in einem Brennwert-Wärmeaustauscher ist zum einen erforderlich, damit das Abgas kontrolliert und nutzbringend von der enthaltenen Feuchtigkeit befreit wird und nicht in den Verteilungsleitungen ausfällt. Zum anderen ist eine Abgastemperatur unterhalb von 60 °C sehr vorteilhaft, da dann auch handelsübliche Kunststoffe zur preiswerten Fortleitung über längere Strecken eingesetzt werden können.

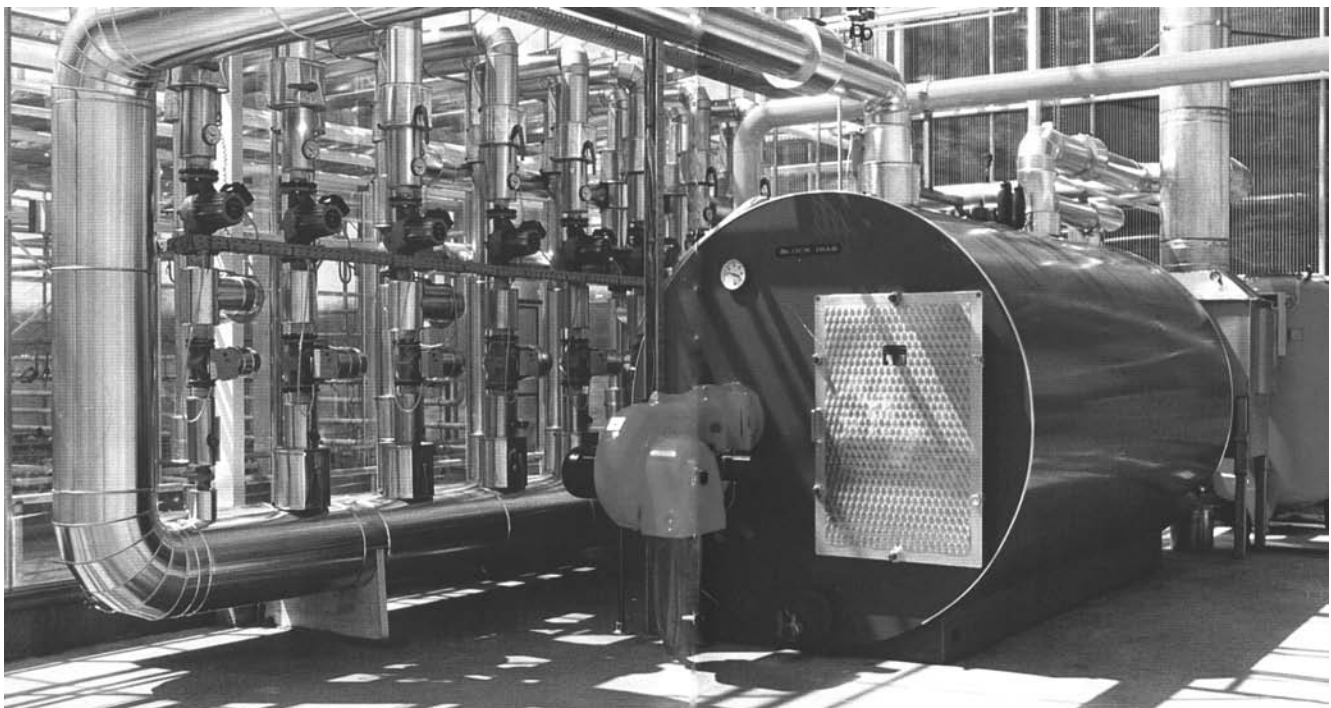


Abb. 7: Dreizugkessel mit nachgeschaltetem Brennwert-Wärmeaustauscher.



Abb. 8: Direkter Gaswärmeerzeuger

3.2 Luftheizsysteme

Direkte Luftheizsysteme

Bei direkten Luftheizsystemen mit Erdgas werden die warmen Verbrennungsgase mit einem wesentlich größeren Umluftstrom vermischt und direkt ins Gewächshaus geleitet. Bei den heutigen schadstoffarmen Low- NO_x -Brennern und einer von der Gewächshausluft unabhängigen Verbrennungsluftansaugung ist diese direkte Einleitung ohne Pflanzenschäden möglich. Vorteile dieser Technik sind neben den vergleichsweise geringen Investitionskosten ein hoher Wirkungsgrad und die integrierte CO_2 -Düngung. Es muss beachtet werden, dass der bei der Erdgasverbrennung entstehende Wasserdampf teilweise an den Hüllflächen des Gewächshauses auskondensiert. Um unerwünschte Kondensation an den Kulturen zu vermeiden, sollte das Gewächshaus regelmäßig abgelüftet werden.

Bekannteste Vertreter dieser Gruppe sind die direkten Gaswärmeerzeuger, die wegen ihrer typischen Bauform auch CO_2 -Kanonen genannt werden (Abb. 8). Sie eignen sich sowohl zur vollständigen Beheizung von Gewächshäusern als auch zur CO_2 -Anreicherung der Gewächshausluft in Verbindung mit indirekten Systemen. Bei der vollständigen Beheizung (z. B. im Gemüsebau) ist eine automatische Lüftung vorzusehen, damit der CO_2 -Gehalt beim Heizbetrieb 5.000 ppm nicht übersteigt.

Indirekte Luftheizsysteme

Neben den direkten Luftheizsystemen stehen heute auch indirekte Warmluftheizgeräte zur Verfügung, die Verteilungssysteme mit Heizungswasser überflüssig machen und die Gewächshausluft ohne Zwischenmedien und zusätzliche Verluste erwärmen.

Die Verbrennungsluft wird üblicherweise von außen angesaugt und verbrennt mit dem Erdgas in einer abgeschlossenen und gegen die Gewächshausluft dichten Brennkammer. Die Abgaswärme wird auf einen großen Umluftstrom übertragen und ins Gewächshaus geleitet. Die Verbrennungsgase selbst gelangen über die Abgasleitung ins Freie (Abb. 9 und 10).



Abb. 10: Indirekter Luftherhitzer in runder Ausführung.

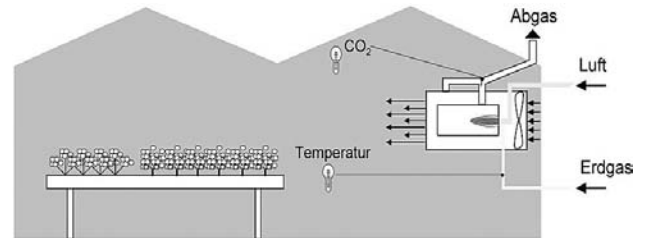


Abb. 9: Funktionsweise indirekter Luftherhitzer.

Bei entsprechender CO_2 -Anforderung eines Regelgerätes oder eines Klimacomputers kann der Abgasstrom nach dem Durchlaufen des Luft/Luft-Wärmeaustauschers und vor dem Eintritt in den Abgaskamin auch in das Gewächshaus geleitet werden. Eine besonders gute CO_2 -Verteilung ergibt sich, wenn der Abgasstrom dem wesentlich größeren Umluftstrom beigemischt wird.



Abb. 11: Strahlungsheizung in einem Foliengewächshaus.

Bei den Geräteausführungen lassen sich stationäre und hängende Bauarten unterscheiden, wobei letztere zumeist eine runde Bauform aufweisen.

3.3 Strahlungsheizungen

Eine vergleichsweise neue und indirekte Heizungstechnik stellt die Strahlungsheizung in Gewächshäusern dar. Hierbei wird das heiße Abgas kleiner Gasbrenner durch Strahlungsrohre geführt, die im Dachfirst angeordnet sind. Reflektorschirme leiten die Wärmestrahlung nach unten auf die Kulturen. Dabei werden vor allem die Pflanzen und das Substrat, nicht aber die ganze Gewächshausluft erwärmt (Abb. 11).

Da es keine wassergefüllten Heizungsrohre gibt, können einzelne Abteilungen im Winter vorübergehend außer Betrieb genommen werden. Ohne Trennwände lassen sich unterschiedliche Klimabedingungen in einem Haus realisieren. Erste Erfahrungen in Produktionsbetrieben und Versuchsanstalten haben unter bestimmten Bedingungen Vorteile sowohl hinsichtlich der Kulturführung als auch beim Energieverbrauch gezeigt.

Durch die Weiterentwicklung unter Beteiligung der Ruhrgas AG steht ein optimiertes System für den Agrarbereich zur Verfügung, das eine Nutzung des Abgas- CO_2 auch bei dieser innovativen Heiztechnik ermöglicht.

3.4 Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Gasmotoren wird seit vielen Jahren im Gartenbau zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme genutzt. Insbesondere im Zusammenspiel mit einer Assimilationsbelichtung und einem Wärmespeicher können hohe

Strombezugskosten und ein Teil des Grundlastwärmebedarfs vermieden werden.

Bezogen auf den Erdgaseinsatz erreichen Blockheizkraftwerke (BHKW) einen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 34 % sowie einen thermischen Wirkungsgrad von bis zu 53 %. Somit ergeben sich Gesamtwirkungsgrade von bis zu 87 % (Abb. 12).

Auch bei einem BHKW kann ein zusätzlicher Abgaswärmetauscher zur Brennwertnutzung nachgeschaltet werden. Dies steigert den Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 94 %. Die Verwendung der Abgase zur CO₂-Düngung der Pflanzen ist bei BHKW mit gasmotorischem Antrieb nur mit speziellen Abgasbehandlungsverfahren möglich.

Heute werden neben den Gasmotoren auch Mikrogasturbinen eingesetzt, die mehrere Vorteile bieten. Gasturbinenanlagen weisen geringere Wartungskosten auf als Gasmotor-BHKW. Mit dem CO₂ im Abgas von Gasturbinen kann die Gewächshausluft direkt und ohne zusätzliche Behandlung angereichert werden. In Deutschland wurden mehrere Mikrogasturbinen installiert. Erste Anlagen im Gartenbau gingen 2002 in Schweden (Abb. 13) und in den Niederlanden in Betrieb.

Von besonderer Bedeutung bei kapitalintensiven Investitionen, wie sie die Kraft-Wärme-Kopplung darstellt, ist die individuelle Auslegung der Anlage, welche die technischen Rahmenbedingungen, die Wirtschaftlichkeit sowie ggf. Fördermöglichkeiten berücksichtigt. Gemäß dem „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ von 2002 werden insbesondere kleine KWK-Anlagen (bis 50 kWel) 10 Jahre lang durch die Vergütung des eingespeisten Stroms gefördert. Zudem ist der Brennstoff Erdgas von der Mineralölsteuer befreit und der eigenerzeugte Strom unterliegt derzeit nicht der Stromsteuer (gilt für Anlagen ≤ 2 MWel).

4 Zusammenfassung

Es zeigt sich eine weite und zunehmende Verbreitung von Erdgas im Unterglasgartenbau. Mit den umweltschonenden und ökonomischen Anwendungstechniken können die Gartenbaubetriebe den zunehmenden Anforderungen an einen effizienten Einsatz von Energie gerecht werden. Neben bewährten Heizsystemen in verschiedenen Bauweisen sind technisch ausgereifte neue Technologien wie Mikrogasturbinen und Strahlungsheizungen verfügbar.

In fortschrittlichen Gartenbaubetrieben wird neben der Beheizung auch das Abgas der Erdgasverbrennung zur CO₂-Düngung selbstverständlich genutzt, was mit geringem Investitionsaufwand und ohne zusätzliche Betriebskosten realisierbar ist.

Für den Gartenbaubetrieb wird die kompetente Energieberatung durch offizielle Stellen oder Energieversorgungsunternehmen immer wichtiger, da betriebseigene Kapazitäten zunehmend durch neue Produkte, veränderte Produktionsverfahren oder diversifizierte Absatzwege in Anspruch genommen werden.

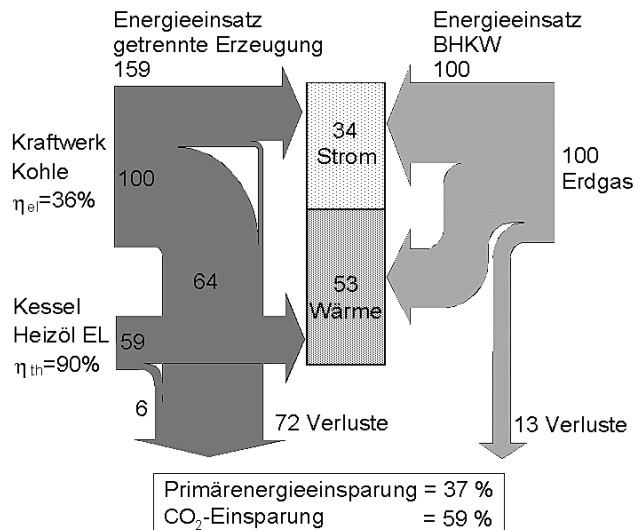


Abb. 12: Energieflussdiagramm BHKW

Literatur

- CORSTEN, H.-D. (1998): Erdgas im Gartenbau, 4. Aufl., Ruhrgas, Essen
- DIN 4793 (1984): Gasbefeuerte Geräte für die CO₂-Anreicherung der Raumluft in Gewächshäusern. Beuth, Berlin
- DVGW-Arbeitsblatt G 633 (1983): Anlagen zur CO₂-Anreicherung in Gewächshäusern. WVGW, Bonn
- GUDEHUS, H.-C. (1993): Die Kraft-Wärme-Kopplung im Gartenbau. KTBL, Darmstadt (KTBL-Arbeitsblatt Gartenbau 651)
- HOOFT, E.; UTGENANNT, R. (2003): Mikro-Gasturbinen im Gartenbau. TASPO-Magazin 4, Nr. 1, S. 43 – 45
- KÖHLER, L.; LECKER, F. (1997): Wirkung von CO₂ und NO_x auf Gewächshauspflanzen. FH Weihenstephan, Weihenstephan
- LECKER, F. (1998): CO₂-Anreicherung und Heizen mit Feuerungsabgasen, KTBL, Darmstadt (KTBL-Sonderveröffentlichung 24)
- Sicherheitsdatenblatt „Erdgas getrocknet“ gemäß EG-Richtlinie (91/155/EWG)/§14 GefStoffV (kann vom zuständigen Gasversorgungsunternehmen bezogen werden)
- UTGENANNT, R. (2002): Neue Entwicklungen bei der Kraft-Wärme-Kopplung, ZVG Gartenbau Report 28, Nr. 9, S. 32 – 33
- UTGENANNT, R.: Erdgastechnik zur CO₂-Nutzung aus Abgas, Gärtnerbörse 103, Nr. 6, S. 45



Abb. 13: Mikrogasturbine mit einer elektrischen Leistung von 100 kW.

Anhang: Erdgas-Durchschnittswerte¹⁾ 2002

Benennung		Einheit	Nordsee- Erdgas H	Misch- Erdgas H	Russis. Erdgas H	Holland- Erdgas L	Verbund- Erdgas L	
Analysewerte ²⁾								
CO ₂	Kohlendioxid	Vol.-%	1,67	1,56	0,06	1,51	1,74	
		Mol.-%	1,67	1,57	0,06	1,52	1,75	
N ₂	Stickstoff	Vol.-%	0,94	1,32	0,87	10,39	9,26	
		Mol.-%	0,94	1,32	0,87	10,36	9,24	
O ₂	Sauerstoff	Vol.-%	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		Mol.-%	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
CH ₄	Methan	Vol.-%	86,72	87,79	98,05	82,58	84,70	
		Mol.-%	86,60	87,70	98,04	82,53	84,66	
C ₂ H ₆	Ethan	Vol.-%	8,10	7,89	0,68	4,22	3,35	
		Mol.-%	8,15	7,94	0,69	4,25	3,37	
C ₃ H ₈	Propan	Vol.-%	2,03	1,17	0,23	0,91	0,70	
		Mol.-%	2,07	1,19	0,23	0,93	0,71	
C ₄ H ₁₀	Butane	Vol.- %	0,44	0,22	0,08	0,28	0,18	
		Mol.-%	0,47	0,23	0,08	0,29	0,19	
C ₅ H ₁₂	Pentane	Vol.-%	0,07	0,03	0,02	0,07	0,04	
		Mol.-%	0,07	0,03	0,02	0,07	0,04	
C ₆ ⁺	Hexan + höhere KW	Vol.-%	0,03	0,02	0,01	0,04	0,03	
		Mol.-%	0,03	0,02	0,01	0,05	0,04	
Kennwerte								
Brennwert		<i>H</i> _{s,n}	kWh/m ³	11,955	11,684	11,088	10,373	10,323
Heizwert		<i>H</i> _{i,n}	kWh/m ³	10,813	10,559	9,996	9,368	9,318
Wärmewertverhältnis		<i>H</i> _i / <i>H</i> _s	–	0,9045	0,9037	0,9015	0,9031	0,9026
Normdichte		p	kg/m ³	0,8327	0,8151	0,7324	0,8392	0,8249
Dichteverhältnis (Luft = 1)		d	–	0,644	0,630	0,567	0,649	0,638
Wobbeindex		<i>W</i> _{s,n}	kWh/m ³	14,897	14,720	14,725	12,876	12,924
Wobbeindex		<i>W</i> _{i,n}	kWh/m ³	13,474	13,303	13,275	11,629	11,666
Methanzahl (± 2)		MZ	–	74	78	93	84	88
Luftbedarf, min		<i>L</i> ₀	m ³ /m ³	10,31	10,07	9,56	8,94	8,91
Sauerstoffbedarf, min.		O ₂	m ³ /m ³	2,165	2,115	2,008	1,877	1,871
spez. Luftbed. min. bez. auf <i>H</i> _{i,n}		<i>l</i> ₀	m ³ /kWh	0,953	0,954	0,956	0,954	0,956
Abgaszusammensetzung								
Abgasvolumen feucht			m ³ /m ³	11,17	10,92	10,36	9,80	9,76
CO ₂	Kohlendioxid		Vol.-%	10,1	10,0	9,7	9,9	9,9
H ₂ O	Wasserdampf		Vol.-%	17,7	17,8	18,2	17,7	17,8
N ₂	Stickstoff		Vol.-%	72,2	72,2	72,1	72,4	72,3
Taupunkt			°C	58,98	59,09	59,57	59,03	59,10
Abgasenthalpie		<i>h</i> ₀	kWh/m ³	1,070	1,070	1,070	1,058	1,058
Abgasvolumen trocken			m ³ /m ³	9,20	8,98	8,48	8,06	8,02
CO ₂	Kohlendioxid		Vol.-%	12,3	12,2	11,8	12,0	12,0
N ₂	Stickstoff		Vol.-%	87,7	87,8	88,2	88,0	88,0
Zündtemp. (m. Luft) DIN 51794			°C	584	585	619	599	604
Flammentemp. (ohne Diss.)			°C	2046	2042	2036	2025	2024
Flammengeschwindigkeit			m/s	0,43	0,43	0,43	0,41	0,41
Zündgrenze (DIN 51649)		<i>Z</i> _u	Vol.-%	4,0	4,1	4,3	4,6	4,6
(Gas in Luft)		<i>Z</i> _o	Vol.-%	15,8	15,9	16,2	16,0	16,1

¹⁾ Einzelne Durchschnittswerte unterschiedlicher Gase dürfen rechnerisch nicht verknüpft werden. Die Kennwerte beziehen sich auf stöchiometrische Verbrennungen.

²⁾ Analysenwerte < 0,01 Vol.-% werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Eine Festlegung von Streubreiten bei den Einzelkomponenten ist nicht durchführbar.

Ersetzt das KTBL-Arbeitsblatt 0650 von 1992