

Niedrigenergiegewächshäuser

Ergebnisse des ZINEG-Verbundprojektes

KTBL-Schrift 509



Fachliche Begleitung

KTBL-Arbeitsgruppe „ZukunftsInitiative NiedrigEnergieGewächshaus (ZINEG)“

Prof. Dr. Henning Bredenbeck (Vorsitz) | Prof. Dr. Rembert Burmann | Dr. Wolfgang Graf |
Gabriele Hack | Peter Heise | Christian Reinhold | Prof. Dr. Andreas Ulbrich

Die Anschriften der Mitwirkenden sind im Anhang aufgeführt.

Projektförderung

Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie der Landwirtschaftlichen Rentenbank unter Federführung des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz mit Unterstützung der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.

Förderzeitraum: 2009-2014

Die Informationen der vorliegenden Schrift wurden vom KTBL und den Autoren nach dem Stand des Wissens zusammengestellt. Das KTBL und die Autoren übernehmen keinerlei Haftung für die bereitgestellten Informationen, deren Aktualität, inhaltliche Richtigkeit, Vollständigkeit oder Qualität.

© 2015

Herausgeber und Vertrieb

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 7001-0 | Fax +49 6151 7001-123 | E-Mail: ktbl@ktbl.de
vertrieb@ktbl.de | Telefon Vertrieb +49 6151 7001-189
www.ktbl.de

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

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.

Redaktion

Dr. Wolfgang Graf, Dr.-Ing. Norbert Fröba | KTBL, Darmstadt

Satz

Team Herstellung | KTBL, Darmstadt

Titelfoto

Melanie Horsch | Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover

Druck und Bindung

Silber Druck oHG | Niestetal

Printed in Germany

ISBN 978-3-945088-14-2

Inhalt

1	Einleitung	
	WERNER ACHILLES.....	11
2	Einsatz von Solarkollektorgewächshäusern zur Minderung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen sowie zur Qualitätserhaltung von Gemüse im geschützten Anbau	
	UWE SCHMIDT, DENNIS DANNEHL, INGO SCHUCH, THORSTEN ROCKSCH, CHRISTINE BECKER, HANS-PETER KLÄRING.....	12
2.1	Zielsetzung.....	12
2.2	Gewächshaus und Technik	13
2.2.1	Gewächshausversuchsanlage.....	15
2.2.1.1	Solarkollektorgewächshaus	15
2.2.1.2	Kühlsystem	16
2.2.1.3	Wärmespeicher	17
2.2.1.4	Einbindung der Wärmepumpe	18
2.2.1.5	Prozessautomatisierung	19
2.2.2	Bewertung der eingesetzten Komponenten des Solarsystems	20
2.2.2.1	Gewächshaus	20
2.2.2.2	Kühlleistung und Qualität der Kühlung.....	20
2.2.2.3	Wärmespeicherung und solarer Deckungsgrad.....	21
2.2.2.4	Energetische und produktspezifische Berechnungen	21
2.2.3	Phytomonitoring.....	22
2.3	Pflanzenbauliche Untersuchungen	23
2.3.1	Pflanzenbauliche Versuche an der HU Berlin	23
2.3.1.1	Kulturprogramm	23
2.3.1.2	Pflanzenmorphologische und -physiologische Parameter.....	23
2.3.1.3	Klimaregel- und Bewässerungsstrategien.....	24
2.3.2	Pflanzenbauliche Versuche am IGZ Großbeeren	26
2.3.2.1	Zielstellung der Versuche.....	26
2.3.2.2	Versuchsaufbau und Untersuchungsmethoden.....	27
2.3.2.3	Versuchspläne.....	28
2.4	Technische Ergebnisse und Ressourceneinsparungen.....	29
2.4.1	Energie	29
2.4.1.1	Wärmeverbrauchsbeiwert U_{CS} -Wert	29
2.4.1.2	Elektrische Energie, Arbeitszahl und Primärenergienutzungsgrad	30
2.4.1.3	Solarer Deckungsgrad	32
2.4.1.4	Produktspezifischer Energieverbrauch.....	33
2.4.1.5	Energieeinsparpotenzial mittels Phytomonitoring	34

2.4.2	Wasser	37
2.4.2.1	Wasserbilanzierung.....	37
2.4.2.2	Produktspezifischer Wasserverbrauch.....	38
2.4.2.3	Präzise Steuerung der Bewässerung durch Phytomonitoring.....	39
2.4.3	Mikroklimatische Veränderungen.....	40
2.4.3.1	Lichtverhältnisse	40
2.4.3.2	Temperatur, relative Luftfeuchte und CO ₂	41
2.4.3.3	Mikroklima unter Kühlbedingungen	43
2.4.3.4	Produktion unter hohen Luftfeuchtebedingungen	46
2.5	Pflanzenbauliche Ergebnisse	50
2.5.1	Pflanzenbauliche Ergebnisse an der HU Berlin	50
2.5.1.1	Phytomonitoring.....	50
2.5.1.2	Netto-Photosynthese und Transpiration.....	51
2.5.1.3	Pflanzenwachstum und -entwicklung	52
2.5.1.4	Erträge.....	54
2.5.1.5	Fruchtqualität.....	55
2.5.2	Pflanzenbauliche Ergebnisse am IGZ Großbeeren.....	59
2.5.2.1	Wirkung hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei Gurke und Tomate	59
2.5.2.2	Wirkung niedriger Temperatur bei Gurke und Tomate.....	60
2.5.2.3	Wirkung transparenter Energieschirme bei Gurke und Tomate	62
2.5.2.4	Wirkung von Temperatur und Bestrahlungsstärke bei Salat.....	64
2.6	Wirtschaftlichkeit.....	65
2.6.1	Investitionen.....	65
2.6.2	Ertragsanstiege	67
2.6.3	Minderung der Kosten für die Wärmeerzeugung	67
2.6.4	Amortisationszeiten.....	69
2.7	Fazit.....	72
2.8	Literatur.....	76
3	Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung – ZINEG-Haus-Hannover	
	GÖKHAN AKYAZI, BERNHARD BESSLER, MELANIE HORSCHT, KLAUS KNÖSEL, DIRK LUDOLPH, HANS-JÜRGEN TANTAU	80
3.1	Zielsetzung.....	80
3.2	Gewächshaus und Technik	80
3.2.1	Wärmedämmung.....	82
3.2.2	Solarenergienutzung	82
3.2.3	Assimilationsbelichtung und CO ₂ -Düngung	84
3.2.4	Messtechnik	84
3.3	Messmethodik und Ergebnisse	85

3.3.1	Luftwechsel durch Undichtigkeiten.....	85
3.3.2	Wärmeverbrauchscoeffizient.....	87
3.3.3	Energieeinsparung.....	89
3.3.4	Langwellige Wärmeabstrahlung.....	89
3.3.5	V _{Luft} -Wert.....	91
3.3.6	Energieversorgung, Solarenergienutzung und Wirkungsgrade.....	92
3.3.7	Licht-/PAR-Durchlässigkeit.....	99
3.3.8	Evapotranspiration.....	100
3.4	Pflanzenbauliche Untersuchungen.....	103
3.4.1	Temperaturregelprogramme und Klimabedingungen im ZINEG-Haus-Hannover in Abhängigkeit von der Jahreszeit.....	105
3.4.1.1	Frühjahr.....	106
3.4.1.2	Herbst.....	108
3.4.1.3	Sommer.....	112
3.4.1.4	Winter.....	113
3.4.2	Veränderungen der klimatischen Wachstumsfaktoren und Auswirkungen auf die Topfpflanzenkultur.....	115
3.4.2.1	Temperatur.....	115
3.4.2.2	Relative Luftfeuchtigkeit.....	116
3.4.2.2.1	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Nährstoff- und Wasseraufnahme.....	117
3.4.2.2.2	Wirkungen hoher Luftfeuchte auf Qualität und Haltbarkeit von Topfpflanzen.....	121
3.4.2.2.3	Hohe Luftfeuchte und Pflanzengesundheit.....	122
3.4.2.3	CO ₂ -Konzentration.....	123
3.4.2.4	Einfluss der Lichtminderung auf Wachstum und Qualität.....	125
3.4.3	Bewertung der Zierpflanzenqualität.....	126
3.5	Phytomonitoring.....	127
3.5.1	Zielsetzung.....	127
3.5.2	Beschreibung der Versuchsanlage.....	128
3.5.3	Kulturversuche und Ergebnisse.....	128
3.5.3.1	CO ₂ -Konzentration.....	129
3.5.3.2	Temperatur.....	131
3.5.4	Schlussfolgerungen.....	133
3.6	Ökonomische Bewertung des ZINEG-Hauses-Hannover.....	134
3.6.1	Investitionen.....	134
3.6.2	Cashflow.....	136
3.7	Ökologische Bewertung.....	137
3.8	Fazit.....	139
3.9	Literatur.....	141

4	CO₂-neutrale Beheizung von Gewächshäusern mit biogenen Feststoffen	
	JOACHIM MEYER, ALEXANDRA KREUZPAINTNER, MATTHIAS SCHLÜPEN, KARL SCHOCKERT, NORBERT LAUN	144
4.1	Zielsetzung.....	144
4.2	Material und Methoden.....	145
4.2.1	Bauausführung.....	145
4.2.1.1	Konstruktion und Bedachung	145
4.2.1.2	Energieschirme.....	146
4.2.1.3	Wärmeversorgung und Wärmeverteilung.....	149
4.2.1.4	Klimaregelung und Datenerfassung.....	151
4.2.1.5	Kulturtechnische Ausstattung.....	152
4.2.2	Messtechnische Grundlagen	152
4.2.2.1	Messung des Wärmeverbrauches	152
4.2.2.2	Wärmespeicherung im Gewächshaus	154
4.2.2.3	Strahlungsbedingungen im Gewächshaus.....	155
4.2.2.4	Feuchte im Gewächshaus.....	156
4.2.2.5	Prozessdokumentation	159
4.2.2.5.1	Darstellung der erfassten Ressourcen für die ökologische Bewertung.....	160
4.2.2.5.2	Datenquellen und Datentransfer.....	160
4.2.2.5.3	Grundauswertung.....	161
4.2.2.5.4	Durchführung der ökologischen Bewertung	164
4.2.2.5.5	Definition und Bestimmung der funktionellen Einheit	164
4.2.2.5.6	Bewertung des Ressourcenverbrauches	165
4.3	Durchgeführte Messungen, Ergebnisse und Diskussion	167
4.3.1	Wärmeverbrauchscoeffizient	167
4.3.1.1	Messungen ohne Pflanzenbestand	168
4.3.1.2	Messungen mit Pflanzenbestand	170
4.3.1.3	Messungen mit aufliegenden Energieschirmen	172
4.3.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den U _{CS} -Werten	173
4.3.2	Einsparpotenzial während der Kulturperiode.....	174
4.3.2.1	Typische Verläufe der Luftfeuchte	175
4.3.2.2	Das Gewächshaus als Wärmespeicher.....	178
4.3.3	Strahlungsdurchlässigkeit.....	182
4.3.4	Ergebnisse der Prozessdokumentation.....	185
4.3.4.1	Einmalige Ernte.....	185
4.3.4.2	Mehrmalige Ernte	188
4.3.4.3	Betriebsinterner Vergleich der Tomatenkulturen 2011 und 2012	195
4.3.4.4	Vergleich der CO ₂ -Äquivalente beim Einsatz von fossilen und erneuerbaren Energieträgern	197

4.4	Ökonomische Betrachtungen und Praxisempfehlungen.....	199
4.4.1	Ausführung der Hauptbaugruppen nach dem ZINEG-Modell TUM/DLR	200
4.4.1.1	Gewächshaushülle	200
4.4.1.2	Ausstattung mit Energieschirmen	200
4.4.1.3	Heizungsanlage im Gewächshaus.....	200
4.4.1.4	Inneneinrichtung	201
4.4.1.5	Regelung	201
4.4.1.6	Wärmeerzeugung	201
4.4.2	Kostenbetrachtungen.....	202
4.5	Fazit.....	204
4.6	Literatur.....	204
5	Prüfung von Wärmeschutzglas als Bedachungsmaterial für die Zierpflanzenproduktion DIEDRICH WILMS, HANS-PETER RÖMER, PETER REHRMANN, ANDREAS BETTIN.....	205
5.1	Zielsetzung.....	205
5.2	Material und Methoden.....	205
5.2.1	Versuchsanlage.....	205
5.2.2	Versuchsprogramm	208
5.2.2.1	Kulturen, Kulturprogramm	208
5.2.2.2	Regelstrategien.....	208
5.2.3	Versuchsauswertung.....	209
5.3	Technische Ergebnisse.....	209
5.3.1	Energieverbrauch und Einsparpotenzial	209
5.3.2	Klimaveränderungen im Gewächshaus.....	210
5.3.2.1	Licht.....	210
5.3.2.2	Luftfeuchtigkeit.....	210
5.3.3	Verhalten bei Schnee und Frost.....	212
5.4	Pflanzenbauliche Ergebnisse.....	213
5.4.1	Phytomonitoring.....	213
5.4.2	Kulturzeit	214
5.4.3	Qualität	214
5.4.4	Erlöse.....	216
5.5	Schätzung der Kosten.....	217
5.5.1	Investitionen.....	217
5.5.2	Amortisationsdauer der Mehrkosten	218
5.6	Fazit.....	220
5.7	Literatur.....	220

6	Ökonomische Bewertung der Produktion in Niedrigenergiegewächshäusern	
	JOCHEN FLENKER, WOLFGANG BOKELMANN	222
6.1	Zielsetzung.....	222
6.2	Material und Methoden.....	222
6.2.1	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	222
6.2.2	Datenmaterial und Bewertungsvorgang	223
6.3	Bewertungsmodelle.....	224
6.3.1	Kostenvergleichsrechnung für die Zierpflanzenproduktion...	224
6.3.2	Gewinnvergleichsrechnung für eine Tomatenproduktion	226
6.4	Kostenvergleichsrechnung (Zierpflanzen)	229
6.4.1	Osnabrück	229
6.4.1.1	Gewächshäuser Osnabrück	229
6.4.1.2	Zierpflanzenproduktionsverfahren am Standort Osnabrück..	231
6.4.1.3	Fazit Kostenvergleichsrechnung ZINEG-Gewächshaus Typ „Osnabrück“	233
6.4.2	Hannover	233
6.4.2.1	Gewächshäuser Hannover	233
6.4.2.2	Zierpflanzenproduktionsverfahren am Standort Hannover ...	233
6.4.2.3	Fazit Kostenvergleichsrechnung ZINEG-Gewächshaus Typ „Hannover“	239
6.4.3	Zusammenfassende Übersicht der Zierpflanzenproduktion mit ZINEG-Technologien	240
6.5	Gewinnvergleichsrechnung (Tomatenproduktion).....	241
6.5.1	Gewächshäuser.....	241
6.5.2	Tomatenproduktionsverfahren in den ZINEG-Gewächshäusern Typ „Schifferstadt“	244
6.5.3	Fazit Gewinnvergleichsrechnung ZINEG-Konzepte Typ „Schifferstadt“	246
6.6	Literatur.....	247
7	Fazit	
	HENNING BREDENBECK, GABRIELE HACK, PETER HEISE.....	248
	Anhang	
	Abkürzungen.....	251
	Mitwirkende	252

1 Einleitung

WERNER ACHILLES

In Deutschland werden die meisten gewerblich genutzten Gewächshäuser mit fossiler Energie beheizt. In dem Projekt ZINEG wurden Niedrigenergiegewächshäuser als Alternative zu herkömmlichen Gewächshäusern erforscht; aus dem Projekt leitet sich auch der Name ZukunftsInitiative NiedrigEnergieGewächshaus (ZINEG) ab.

Untersucht wurden pflanzenbauliche Grundsatzfragen, neue Bauweisen und angepasste Bewirtschaftungskonzepte.

In Berlin-Dahlem wurde ein Solarkollektorgewächshaus errichtet, dessen Solarwärme das Gewächshaus selbst und bei Überschuss weitere Gewächshäuser beheizt. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf Entfeuchtungsstrategien und die Gewinnung und Speicherung von Solarenergie mittels Wärmepumpen gelegt. Als Versuchskultur wurden Tomaten ausgewählt.

In Hannover wurde geklärt, wie sich maximale Wärmedämmung auf Topfpflanzen auswirkt. Dabei standen die Verwendung und Steuerung von drei Schirmen sowie die Optimierung der Kulturführung bei vermindertem Lichtangebot und erhöhter Luftfeuchte im Mittelpunkt.

Der Frage der Energieeffizienz wurde in einem mit Holzpellets beheizten Gewächshaus mit Doppelfolieneindeckung in Schifferstadt nachgegangen. Für den ökologischen Gemüsebau im gewachsenen Boden wurde ein Softwarekonzept zur weitgehend automatischen Dokumentation der Produktionsprozesse entwickelt und die Klimaführung optimiert.

Wie sich Wärmeschutzgläser auf die Kultivierung von Zierpflanzen mit hohen Licht- und Temperaturanforderungen auswirken, wurde in Osnabrück untersucht. Dabei waren vor allem der Einfluss der geringen Lichtdurchlässigkeit des Spezialglases auf die Entwicklung der Pflanzen und die Steuerung der Lichtverhältnisse von Interesse.

In dieser Schrift werden Erkenntnisse aus über vier Jahren Forschungsarbeit vorgestellt und ökonomisch sowie ökologisch bewertet. Gärtnern, Beratern, Entwicklern alternativer Energietechniken und Wissenschaftlern bietet die Schrift einen umfassenden Überblick über die Ergebnisse von ZINEG.

3 Gewächshaus mit maximaler Wärmedämmung – ZINEG-Haus-Hannover

GÖKHAN AKYAZI, BERNHARD BESSLER, MELANIE HORSCHT, KLAUS KNÖSEL,
DIRK LUDOLPH, HANS-JÜRGEN TANTAU

3.1 Zielsetzung

Gesamtziel des Verbundvorhabens ist es, den Verbrauch fossiler Energie für die Pflanzenproduktion in Gewächshäusern und damit die (fossilen) CO₂-Emissionen möglichst auf null zu reduzieren. Um dieses Ziels zu erreichen, ist ein systemorientierter Ansatz durch Kombination technischer und kulturtechnischer Maßnahmen erforderlich. Ziel der Konzeption in Hannover war die Entwicklung und Untersuchung eines Niedrigenergiegewächshauses mit maximaler Wärmedämmung und möglichst geschlossener Betriebsweise zur Solarenergienutzung (ZINEG-Haus-Hannover). Dazu wurde das Versuchsgewächshaus im Dach mit einem antireflexbeschichteten Isolierglas eingedeckt und zusätzlich mit einem Tagesschirm, einem Energieschirm und einer Verdunklung ausgestattet. Für die Solarenergienutzung wurde ein Konzept realisiert, bestehend aus einem Kalt- und einem Warmwasserspeicher mit einer Wärmepumpe und Niedertemperatur-Gebläsekonvektoren im Gewächshaus. Wichtig ist dabei eine Technik, die für die Produktion von Topfpflanzen optimiert ist, da bei allen Ansätzen zur Energieeinsparung die Qualität der produzierten Topfpflanzen nicht reduziert werden darf. Es können am Markt nur qualitativ hochwertige Topfpflanzen abgesetzt werden. Das gilt insbesondere für dynamische Regelstrategien, die in einem Niedrigenergiegewächshaus ein zusätzliches Energiesparpotenzial bieten. Für den Einsatz energiesparender Temperatursummenstrategien muss das Kompensationspotenzial der verschiedenen Kulturen ermittelt werden. Durch die Kombination der technischen und kulturtechnischen Maßnahmen soll eine Energieeinsparung bis 90 % erreicht werden.

3.2 Gewächshaus und Technik

Um die Ziele zu erreichen, wurde ein Niedrigenergiegewächshaus für eine Topfpflanzenproduktion konzipiert und gebaut. Das ZINEG-Haus-Hannover ist in Venlobauweise ausgeführt und in zwei Abteilungen unterteilt (Abb. 3.1). Die Konstruktion wurde für volle Schneelast (0,75 kN) ausgelegt, um sicherzustellen, dass bei starkem Schneefall keine statischen Probleme auftreten. Das Gewächshaus hat eine Länge von 36 m, eine Gesamt-

breite von 24 m und eine Stehwandhöhe von 5 m zzgl. 0,2 m Sockel. Abweichend von der Venlobauweise ist eine beidseitig durchgehende Dachlüftung vorhanden. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Für pflanzenbauliche Versuche sind die Abteilungen mit je 432 m² relativ groß. Es sollten aber die Randeffekte durch die 5 m hohe Stehwand möglichst minimiert werden, damit die Versuchsergebnisse auf größere Produktionsgewächshäuser übertragen werden können. Im Norden schließt sich ein 4 m breiter Verbinder an das Versuchsgewächshaus an.



Abb. 3.1 ZINEG-Haus-Hannover mit Kurzzeitwärmespeicher für das Solarspeichersystem (Quelle: Horscht)

Tab. 3.1: Abmessungen des Versuchsgewächshauses mit zwei Abteilungen

	Einheit	Abteilung	Gesamtanlage
Breite	m	12,0	24,0
Gewächshauslänge	m	36,0	36,0
Stehwandhöhe	m	5,0	5,0
Sockelhöhe	m	0,2	0,2
Dachfläche	m ²	464,4	928,8
Fläche Giebelwand, gesamt	m ²	124,9	249,7
Fläche Außenstehwand	m ²	180,0	360,0
Hüllfläche	m ²	769,3	1.538,5
Grundfläche (Bruttofläche)	m ²	432,0	864,0
Nettokulturfläche	m ²	275,0	550,0
Verhältnis Hüllfläche : Grundfläche	-	1,8	1,8
Verhältnis Dachfläche : Grundfläche	-	1,1	1,1
Verhältnis Dachfläche : Stehwand	-	1,5	1,5
Verhältnis Nettofläche : Bruttofläche	-	0,6	0,6