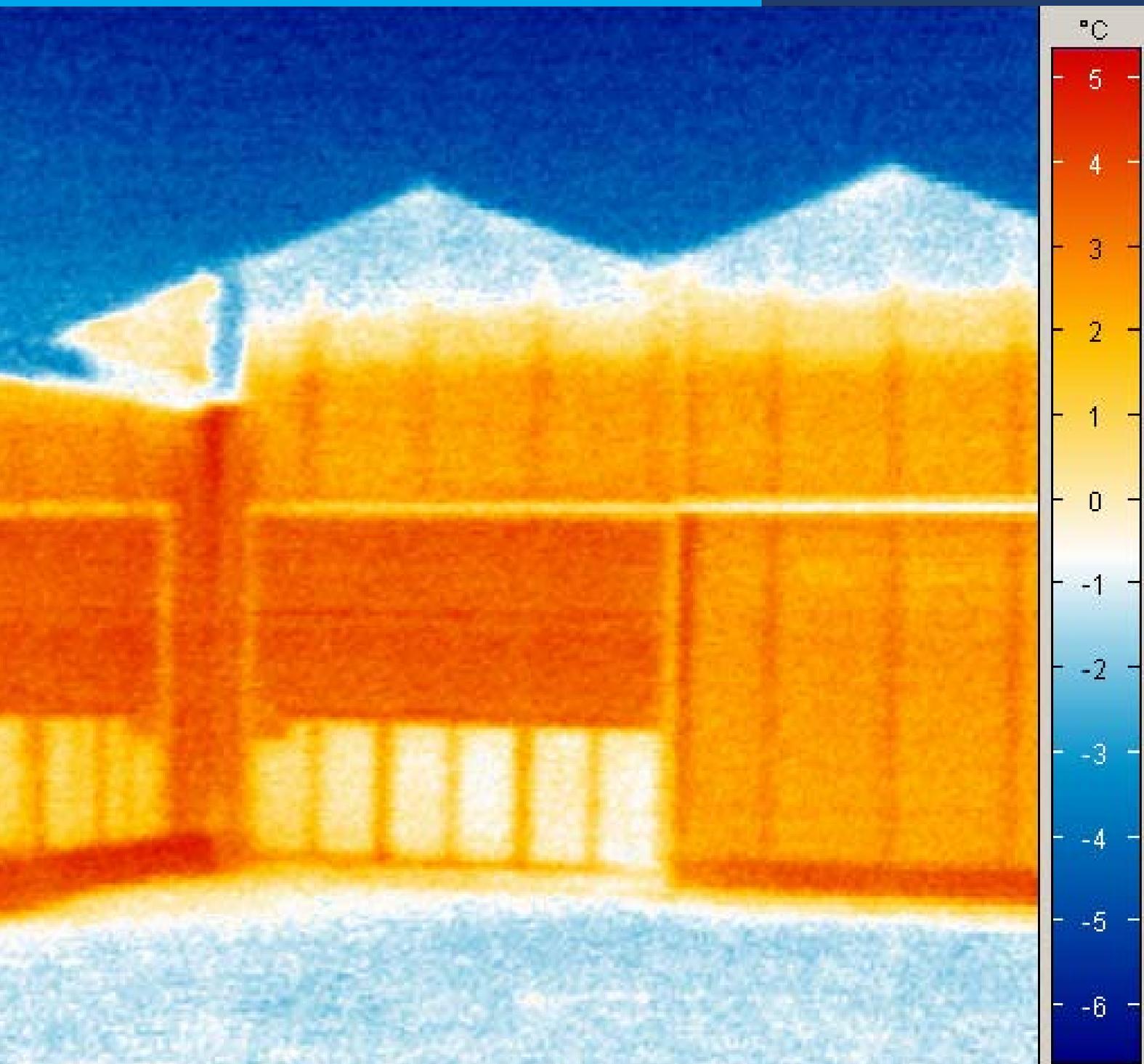


Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern

KTBL-Workshop
17. September 2008 in Worms



KTBL-Workshop
17. September 2008 in Worms

Bericht zur Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern

Herausgeber

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) | Darmstadt

Autoren

Professor Dr. Andreas Bertram, Cornelia Kobienia, Diedrich Wilms | Fachhochschule Osnabrück | Osnabrück
Dr. Wolfgang Brunko, Holger Dröge | GEFOMA GmbH | Großbeeren
Professor Dr. Uwe Schmidt | Humboldt-Universität zu Berlin | Berlin
Otto Domke | Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen | Straelen
Dr.-Ing. Burkhard von Elsner, Professor Dr. Thomas Rath, Professor Dr. Hans-Jürgen Tantau |
Leibniz Universität Hannover | Hannover
Christian Reinhold | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) | Darmstadt
Professor Dr. Joachim Meyer | Technische Universität München | Freising
Stephan Wartenberg | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie | Dresden-Pillnitz

In Zusammenarbeit mit der KTBL-Arbeitsgruppe „Daten und Information zur nachhaltigen Energieerzeugung im Gartenbau“.

Projektbetreuung

Christian Reinhold | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) | Darmstadt

Für Entscheidungen, die auf Basis der Angaben in der Fachinformation getroffen werden,
und deren Folgen schließt das KTBL jegliche Haftung aus.

© 2010

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 (0) 6151 7001-0 | Fax +49 (0) 6151 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

Redaktion

Dr.-Ing. Norbert Fröba, Monika Pikart-Müller, Christian Reinhold | KTBL

Titelfoto

Diana Wenzel

Vertrieb

KTBL | Darmstadt

Druck

Scheuermann Druck | Gernsheim

Printed in Germany

Vorwort

Die energetische Bewertung von Gebäuden rückt in den Mittelpunkt der Bautechnik, der Betriebswirtschaft und der Gesetzgebung, bedingt durch hohe Energiekosten und begrenzte fossile Energievorräte. Dies gilt auch für Gewächshäuser.

Aus diesem Grund ist es wichtig, die Wärmemenge richtig zu messen und den Energiebedarf für Neu- und Umbauten richtig einzuschätzen. Dafür sind standardisierte Messverfahren notwendig. Nur mit verlässlichen Messwerten können Gewächshäuser miteinander verglichen oder Modelle auf andere Gewächshäuser übertragen werden.

Dieses ist Thema des KTBL-Workshops „Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs von Gewächshäusern“ gewesen, der am 17. September 2008 in Worms stattgefunden hat. Dabei sind die vorhandenen Messmethoden zusammengefasst, die Einflüsse auf die Messung analysiert und die Fehlerquellen benannt worden. Die Forschung, Beratung und Praxis beschreiten unterschiedliche Wege, um den Energiebedarf zu bestimmen und zu bewerten. In einer abschließenden Diskussion erarbeiteten die Teilnehmer eine praxisreife Methodik der Messung und Bewertung.

Dieser Bericht umfasst die Ergebnisse des Workshops sowie Projekte und Lösungsansätze, die daraus entstanden sind. Er dokumentiert die Verständigung auf eine einheitliche Art und Weise der Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfes von Gewächshäusern.

Wir danken der KTBL-Arbeitsgemeinschaft „Technik und Bauwesen im Gartenbau“, die den Workshop initiiert hat, der KTBL-Arbeitsgruppe „Daten und Information zur nachhaltigen Energieerzeugung im Gartenbau“, die die Planung übernommen hat und allen Referenten des Workshops, die zudem als Autoren für dieses Buch tätig waren.

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)

DR. HEINRICH DE BAHEY-ERNSTEN
Hauptgeschäftsführer

Leibniz Institut für Agrartechnik
Potsdam Bornim (ATB)

DR. MARTIN GEYER
Vorsitzender der KTBL-Arbeitsgemeinschaft
Technik und Bauwesen im Gartenbau

Inhalt

1	Einleitung	7
	DR.-ING. BURKHARD VON ELSNER	
2	Zielgrößen	8
2.1	Sicht der Praxis und Beratung	8
	OTTO DOMKE	
2.2	Sicht der Planung	9
	DR. WOLFGANG BRUNKO, HOLGER DRÖGE	
2.3	Sicht der Wissenschaft	11
	PROF. DR. ANDREAS BERTRAM	
3	Nomenklatur und Definitionen	14
	PROF. DR. JOACHIM MEYER	
3.1	Einleitung	14
3.2	Verwendete Abkürzungen und Indices	14
3.3	Wärmeströme	16
3.3.1	Strahlung	16
3.3.2	Leitung	17
3.3.3	Konvektion	17
3.3.4	Verdunstung/Transpiration	18
3.3.5	Kondensation	18
3.3.6	Luftwechsel	19
3.4	Wärmebedarf und Wärmeverbrauch	19
3.4.1	Berechnung des Wärmebedarfs	19
3.4.2	Berechnung des Wärmeverbrauchs	20
4	Wärmeverbrauchsmessung - Einflussfaktoren	23
	PROF. DR. HANS-JÜRGEN TANTAU	
4.1	Art und Darstellung der Wärmeübertragung	23
4.2	Einflussfaktoren bei der Wärmeübertragung	24
4.2.1	Innerer Wärmeübergang	25
4.2.2	Äußerer Wärmeübergang am Gewächshausdach	25
4.2.3	Messort der Innentemperatur im Gewächshaus	26
4.2.4	Wärmespeicherung	27
4.2.5	Undichtigkeiten (Lüftung, Verglasung)	28
4.3	Abhängigkeiten des Wärmeverbrauchskoeffizienten	29
4.4	Fazit	30
5	Wärmeverbrauchsmessungen - Anforderungen an die Genauigkeit	31
	DR.-ING. BURKHARD VON ELSNER	
5.1	Theoretische Grundlagen	31
5.1.1	Wärmemengenmessung	31
5.1.2	Bestimmung des spezifischen Wärmeverbrauchskoeffizienten	32
5.2	Messverfahren und Messgeräte	33
5.3	Wärmemengenmessungen im Gewächshaus	37
5.3.1	Fehlergrenzen	37
5.3.2	Empfehlungen für die Wärmemengenmessung	39

5.4	Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten von Gewächshäusern.	40
5.4.1	Fehlergrenzen	40
5.4.2	Messung in den Nachtstunden.	43
5.4.3	Integrationsgrenzen.	43
5.4.4	Abhängigkeiten des Wärmeverbrauchscoeffizienten	43
5.4.5	Empfehlungen für die Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten	45
5.5	Fazit	46
6	Energieverbrauch – Statistische Bewertung.	47
	PROF. DR. THOMAS RATH	
6.1	Einleitung	47
6.2	Stand der Technik	47
6.3	Zielsetzung	47
6.4	Entwicklung eines Bewertungsverfahrens	48
6.4.1	Schritt 1: Einsatz originärer Maßzahlen.	48
6.4.2	Schritt 2: Einsatz normierter Maßzahlen	49
6.4.3	Schritt 3: Optimierung durch Einbeziehung komplexer Modelle	50
6.4.4	Schritt 4: Bestimmung der Vergleichsmaßzahl durch Simulation.	51
6.5	Fazit	52
7	Das besondere Problem der Feuchte	53
	PROF. DR. UWE SCHMIDT	
7.1	Transport latenter Wärme im Gewächshaus.	53
7.2	Etablierung eines neuen Berechnungsverfahrens.	57
7.3	Einführung eines Korrekturfaktors.	58
8	Wärmeverbrauchsmessung – die Praxis.	61
8.1	Sicht der Leibniz Universität Hannover.	61
	PROF. DR. HANS-JÜRGEN TANTAU	
8.2	Sicht der Fachhochschule Osnabrück.	62
	PROF. DR. ANDREAS BERTRAM, CORNELIA KOBENIA, DIEDRICH WILMS	
8.3	Sicht des Gartenbauzentrum Straelen	70
	OTTO DOMKE	
8.4	Sicht des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.	72
	STEPHAN WARTENBERG	
9	Ableitung einer praxisreifen Methodik	76
	CHRISTIAN REINHOLD	
9.1	20-Punkte-Plan für die Praxis.	76
9.2	Checkliste U_{cs} -Wert-Messung	78
10	Literatur.	81
	Autorenverzeichnis	82
	KTBL-Veröffentlichungen	83

1 Einleitung

DR.-ING. BURKHARD VON ELSNER, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Anfang der 1960er-Jahre verbreitete sich der Gebrauch von Heizöl als Heizmaterial, da sowohl die Heiztechnik als auch das Heizöl kostengünstig zur Verfügung standen. Insbesondere die Regelung der Wärmeerzeugung und -verteilung förderte die Verbreitung dieser Technik auch im Gartenbau; es entfiel das nächtliche Entaschen und Befüllen der Kohlekessel im Gewächshaus. PAUL KANTHAK (1970) untersuchte Mitte der 60-Jahre den Energieverbrauch von Gewächshäusern. Der von ihm eingeführte „k'-Wert“ als Wärmeverbrauchsbeiwert in Anlehnung an den Wärmedurchgangswert von Bauteilen ist heute noch richtungweisend in der Gartenbautechnik. Der Wärmeverbrauchsbeiwert wurde von ihm so erweitert, dass das komplexe „Bauteil Gewächshaus“ umfassend beschrieben werden kann.

Durch Energieverteuerung und Ressourcenknappheit sowie Fortschritte in der Rechen- und wissenschaftlichen Methodik ist die energetische Bewertung von Gebäuden Gegenstand der Bau- und Versorgungstechnik, der Betriebswirtschaft und der Gesetzgebung geworden. So gibt die Gesetzgebung mit verschärften Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) auch neue Berechnungsmethoden vor, die Anwendung in Form des Energieausweises finden. Bevor ein Energieausweis erteilt werden kann, muss eine systematische Datenerhebung zur Beschreibung des Gebäudes und der Energieversorgung erfolgen, um dann eine strukturierte Energiebilanz durchzuführen, deren Ergebnis an bestehenden Standards und gesetzlichen Vorgaben gemessen wird.

Dieser Systematik genügt das bisherige Vorgehen in der Energiebewertung für Gewächshäuser nicht, da der „k'-Wert“ und in seiner Nachfolge der „ U_{CS} -Wert“ keine Einzelbilanzen aufweisen.

Das bisherige Instrumentarium des „ U_{CS} -Werts“ genügt bei Weitem nicht den Anforderungen, die man z. B. aus den Normen DIN EN ISO 13790 und DIN EN ISO 13789 ableiten kann. Dies ist jedoch erklärbar: Das „System Gewächshaus“ stellt besondere Herausforderungen an die Modellbildung und Erfassung der Systemparameter, bedingt durch den solaren Energieeintrag und die Nutzung zur Pflanzenproduktion. Es ist daher notwendig, Schritte zur besseren Bilanzierung des Energiebedarfs beheizter Gewächshäuser zu unternehmen, damit die Bewertung einfacher wird und die Schwachstellen schneller erfasst und beseitigt werden, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Dabei kann die DIN EN ISO 13790 als Vorlage dienen.

Das erste Kapitel des Buches widmet sich dem Ist-Zustand der Bewertung des Energiebedarfs und den beschriebenen Forderungen aus Sicht der Beratung, Planung und Wissenschaft. Die folgenden Kapitel erklären die Grundlagen der Thermodynamik und stellen die Mess- und Gerätetechnik vor; alles zugeschnitten auf die Belange in einem Gewächshaus. Es werden die gängigen Messmethoden analysiert, die Einflüsse auf die Messungen detailliert beschrieben und die Fehlerquellen benannt. Ein weiteres Kapitel beschäftigt sich mit den Methoden der Fehlerabschätzung. Aus verschiedenen Blickrichtungen werden die Probleme bei einer Gewächshausbewertung in der Praxis veranschaulicht. Das letzte Kapitel ist eine Zusammenfassung und Schlussfolgerung der gewonnenen Informationen. Dabei ist es gelungen, für dieses komplexe Thema, eine Checkliste und ein Plan auszuarbeiten, anhand deren, ein systematisches Vorgehen in der energetischen Bewertung und dem Vergleich von Gewächshäusern möglich wird.

2 Zielgrößen

2.1 Sicht der Praxis und Beratung

OTTO DOMKE, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, STRAELEN

Problemstellung

Für eine korrekte Bewertung des wirtschaftlichen Kulturerfolges müssen die Betriebsleiter die genaue Energieverbrauchsmenge ihrer Gewächshausanlagen kennen. Liegen diese Werte in den Betrieben nicht vor, wird die Gartenbauberatung nach genauen Zahlen gefragt. So werfen beispielsweise die modernen Gewächshäuser mit höherer Stehwand, erheblich besseren Energieschirmen und einer dichterem Bauweise immer wieder die Frage nach aktuellen belastbaren Messergebnissen des Energieverbrauchs für diese Haustypen auf. An dieser Stelle muss die Frage gestellt werden, ob die vorhandenen Literaturdaten extrapoliert werden können oder ob aktuelle Werte durch neue Messungen ermittelt werden müssen. Zur Einschätzung neuer Systeme, Materialien und Einbauten ist die Kenntnis der richtigen systemspezifischen Wärmeverbrauchswerte unerlässlich.

Neben den „Labor“-Untersuchungen in Versuchsbetrieben sind die Daten unter Praxisbetriebsbedingungen zu bestätigen. Ein solcher Test ist jedoch von vielfältigen Fehlerquellen begleitet. Gleich ist in der Praxis nicht wirklich gleich, d.h., für einen Betrieb erfasste Energieverbräuche sind nicht immer übertragbar, da sich verschiedene Einflüsse gegenseitig mindern oder verstärken können!

Praxis-Situation durch Schnelltest erfassen

Ein Schnelltest für die Beratung ist gefragt. Wichtig ist, eine Standardisierung zu verabreden, die dann mit geringstem Aufwand gute Ergebnisse liefert. Im Gartenbauzentrum Straelen wurde dafür eine Methode entwickelt, die in der Praxis sehr gut aufgenommen wurde.

Es handelt sich um eine Schwachstellenanalyse als Energie-Check für die horizontale und vertikale Temperaturverteilung. Dabei ist der Ablauf der Messung genau definiert und darf sich nicht allein auf die von der Klimaregelung erfassten Messwerte berufen. Zusätzlich muss für diese Schnellmessmethode eine Sprungfunktion im Zeit-/Temperaturverlauf provoziert werden. Diese ist relativ einfach mit dem Ein- und Ausschalten von Umluftventilatoren zu erzielen. Schon nach weniger als einer Woche liefert diese Praxismethode belastbare Ergebnisse, deren Interpretation wertvolle Hinweise zur Funktion der Heizung und Qualität der Gewächshaushülle gibt.

Zielplanung

Grundsätzlich sind Praxismessungen mit großen Unsicherheiten behaftet, da nur ein beschränkter Aufwand für Sensoren geboten ist und die laufende Pflanzenproduktion nicht eingeschränkt werden darf. Deshalb empfiehlt es sich, nach einfachen, integrativen Messmethoden zu suchen.

Ein wichtiger Aspekt ist, dass in der Praxis ein gewisses Potenzial der betriebseigenen Messungen oft nicht ausgeschöpft wird. Die fortlaufenden Klimamessungen durch die Klimaregelung bleiben noch weitgehend unbeachtet, da eine Verknüpfung nicht stattfindet und so die wirklich erzielten Innentemperaturwerte keine Beachtung finden. Der Praktiker hat einen größeren Nutzen davon, wenn er die wirklich an den Pflanzen wirkenden Klimabedingungen erfasst und bewertet und nicht die angezeigten Messwerte seines Klimacomputers als absolut ansieht. Es gilt zu bedenken, dass die eingesetzten Rege-

leinrichtungen nicht immer ideal arbeiten; die auftretenden Temperatur- und Luftfeuchteunterschiede gilt es vorrangig im Gewächshaus auszugleichen, um dann mit den Messwerten der Regelcomputer fehlerfrei arbeiten zu können.

Für die Beratung ergibt sich die Forderung nach einfach durchzuführenden, standardisierten Messmethoden, die in der Praxis angewandt werden können, um den Energieverbrauch von Gewächshäusern überprüfen zu können. Anhand der Untersuchungen und dem Vergleich mit den Betriebsmessungen kann anschließend die Beratung Empfehlungen aussprechen.

2.2 Sicht der Planung

DR. WOLFGANG BRUNKO, HOLGER DRÖGE, GEFOMA GMBH, GROSSBEEREN

Problemstellung

Bei der Vorbereitung eines Neubaus oder der Modernisierung von Gewächshäusern steht die Planung an erster Stelle. Der Planungsprozess beginnt mit der Bedarfsplanung, das heißt, mit der methodischen Ermittlung der pflanzenbaulichen und technischen Anforderungen an das Gewächshaus, die in der weiteren Planung umgesetzt werden.

In der Phase der Bedarfs- und Entwurfsplanung wird der Energiebedarf des Gewächshauses ermittelt. Es werden die technischen Voraussetzungen geplant, um den späteren Energieverbrauch zu erfassen und ggf. zu kontrollieren und zu bewerten. Weiterhin sollen auf Grundlage der Gewächshausnutzung Rückschlüsse zum Energiebedarf für die Planung zukünftiger Gewächshausprojekte gezogen werden.

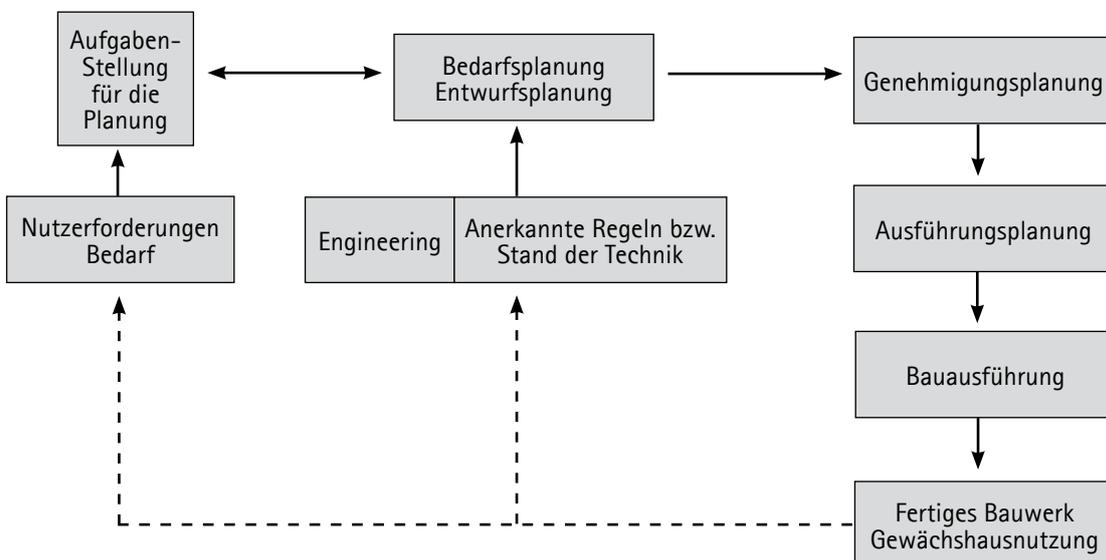


Abb. 1: Zusammenwirken zwischen Nutzer und Planer im Planungsprozess

Tab. 1: Ermittlung Energiebedarf und -verbrauch

	Ermittlung des Energiebedarfs in der Planungsphase	Ermittlung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase
Ziel	Ermittlung des Bedarfs an Wärme-, Kälte- und Elektroenergie unter vorgegebenen Bedingungen (Baukörper, technische Ausrüstung, Nutzung sowie äußere und innere Belastungen des Baukörpers)	Ermittlung des Verbrauchs an Wärme-, Kälte- und Elektroenergie zur Deckung des Energiebedarfs (i. d. R. Abweichung zu den Bedarfskennwerten)
Ermittlung	durch Berechnungen	durch Messungen
Mittel	z. B. mit HORTEX ^(c) 4.1, DIALux	z. B. mit Wärmemengenzähler, Elektrozähler
Anmerkung	Beurteilung der Energieeffizienz nur mit beiden Kenngrößen (Interpretation der Abweichungen durch Analysen von nicht standardisierbaren Randbedingungen)	

Die ermittelten Bedarfskennzahlen aus der Planung sowie die gemessenen Verbrauchswerte während der Nutzung des Gewächshauses sind Kennwerte mit denen die energetische Qualität des Gewächshauses beurteilt werden kann.

Tab. 2: Anwendung von Energiekennzahlen in der Planungs- und Nutzungsphase

Anwendung von Energiekennzahlen in der Planungsphase	Anwendung von Energiekennzahlen in der Nutzungsphase
<p>Bedarfskennzahlen zur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auslegung von technischen Systemen (Heizung, Kühlung, Belichtung) • Bereitstellung von Planungsrichtwerten zur Ermittlung der Nutzungskosten • Beurteilung der energetischen Qualität des Entwurfs (Problem: die Vergleichbarkeit anhand standardisierter Werte) • Beurteilung unterschiedlicher Lösungen eines Entwurfs 	<p>Verbrauchskennzahlen zur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrolle der Einhaltung von Bedarfskennzahlen (Problem: die Interpretation der Abweichungen durch Witterungsverlauf, Nutzerverhalten, eventuelle Mängel u. Ä.) • Energiekostenkontrolle und -abrechnung als Jahres-, Monats-, Tages- oder Stundenmengen (Problem: die Anzahl der Messstellen zur Zuordnung der Verbräuche zu einzelnen Kostenstellen)

Stand der Technik

Die derzeitige Situation der Erfassung des Energieverbrauchs in Gewächshäusern ist aus Sicht der Planung in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Energieverbrauchserfassung im Gewächshaus

Gewächshäuser	Energieverbrauchserfassung
Im Erwerbsgartenbau	Messung des Wärmeverbrauchs bei Fernwärme oder Wärmecontracting Messung der Elektroenergieabnahme durch Energieversorgungsunternehmen (EVU)
Als Sonderbauten	Messung des Verbrauchs von Wärme-, Kälte- und Elektroenergie sowie von Brauchwasser, Trinkwasser, VE-Wasser u. a. für einzelne Abnehmer oder Raumeinheiten im Gewächshaus Die Verbrauchswerte werden vorrangig für Abrechnungszwecke erfasst.

Die Vergleichbarkeit der energetischen Qualität von Gewächshäusern hängt von folgenden Faktoren ab:

1. Wärmetechnischer Zustand der Gewächshauskonstruktion und -hülle
2. Effizienz der technischen Ausrüstungen des Gewächshauses
3. Witterungseinflüsse
4. Nutzereinflüsse (Temperaturabweichungen, geänderte Nutzungen u. a.)

Zielplanung

Zur Realisierung eines sinnvollen Vergleichs der energetischen Eigenschaften des Gewächshauses sind mindestens die o. a. Faktoren 3 und 4 in Hinblick auf die Möglichkeit ihrer Standardisierung zu betrachten: zum Beispiel die Festlegung eines Referenzstandortes und die Festlegung einer Referenzinnentemperatur.

Ableitend aus der Energieeffizienzanalyse können für die Planung verwertbare Informationen (Kennziffern) zu Entscheidungen im Planungsprozess gewonnen werden. Für die Entscheidungsfindung ist ein systematischer Vergleich von Kennzahlen des geplanten Objektes mit Kennzahlen vergleichbarer Objekte notwendig.

Grundlage dafür könnten Energiebedarfswerte für Modellgewächshäuser (ausgewählte Baukörperformen und ausgewählte technische Ausrüstungen) unter Annahme normierter Randbedingungen (Referenzstandort/ -innentemperatur) mit Korrekturfaktoren zur Standortanpassung sein. Diese Modellenergiebedarfswerte sollten im Interesse einer umfassenden Bewertung der Wirtschaftlichkeit mit den jeweiligen Baukostendaten kombiniert werden.

2.3 Sicht der Wissenschaft

PROF. DR. ANDREAS BERTRAM, FACHHOCHSCHULE OSNABRÜCK

Problemstellung

Die Optimierung der wärmetechnischen Eigenschaften von Gewächshausanlagen gewinnt aufgrund der Energiepreise und Klimaerwärmung zunehmend an Bedeutung. Die grundsätzliche Problematik der Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs ist seit den ersten Untersuchungen aus den 70er-Jahren bekannt. Bisher aber ist es nicht gelungen, standardisierte Verfahren für die vergleichende Einordnung der wärmetechnischen Eigenschaften von Gewächshausanlagen zu finden. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass bei Gewächshausanlagen die inneren (Heizungssystem, Pflanzenbestand, Energieschirm) und äußeren (Luftbewegung, Wärmestrahlung der Atmosphäre) Randbedingungen den U_{cs} -Wert beeinflussen, im Gegensatz zu gut isolierten (opaken) Gebäuden. Den am weitesten entwickelten Lösungsansatz stellt das Planungsprogramm HORTEX^(c) dar. Es berechnet auf der Basis der bisher verfügbaren Messergebnisse und bauphysikalischen Rechenansätze die energie- und heizungstechnisch relevanten Kennwerte für Gewächshausanlagen. Das Programm hat sich in der Praxis für die Abschätzung von Einspareffekten und die Auslegung von Heizungsanlagen bewährt. Für eine Nutzung des Programms im Hinblick auf eine vergleichende Einordnung der wärmetechnischen Eigenschaften von Gewächshäusern bleiben noch Fragen offen.

Projekt - Erhöhung der Effizienz von Energieschirmen

Der Energieschirm wurde in den 70er-Jahren entwickelt und eingeführt und ist bis heute die effektivste energiesparende Maßnahme (Meyer, 1981; Müller, 1987). Für die Berücksichtigung eines Energieschirms im Planungsprogramm HORTEX^(c) liegen aber beispielsweise keine wirklich vergleichbaren Kennwerte vor. Für die aktuell am Markt verfügbaren Energieschirme kann nur auf die Herstellerangaben zurückgegriffen werden. Da kein einheitliches standardisiertes Messverfahren existiert, stellt sich das Problem der Vergleichbarkeit der Werte. Dieser Fragestellung wurde an der Fachhochschule Osnabrück im Rahmen des

Forschungsprojekts „Erhöhung der Effizienz von Energieschirmen“ nachgegangen (Bertram et al. 2005). Das Projekt wurde gefördert von AGIP (Arbeitsgruppe Innovative Projekte der angewandten Hochschulforschung beim Ministerium für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen). Die Projektziele waren:

- Entwicklung eines vereinfachten Messverfahrens zur Bestimmung des Einsparpotenzials von Energieschirmen.
- Untersuchung des Einflusses des Energieschirms auf die relative Luftfeuchtigkeit und damit auf die Pflanzenentwicklung.
- Beurteilung des Einflusses der Kondensation am Schirm auf die physikalischen Eigenschaften der Schirmoberfläche.

Die Untersuchungen wurden an vier Standorten durchgeführt: in einer Messbox, in einem Gewächshaussegment, in einem Kühllager und in zwei Gewächshausabteilen im Lehr- und Versuchsbetrieb Gartenbau der Fachhochschule Osnabrück. Bei den Untersuchungen wurde deutlich, dass es kein allgemein gültiges „objektives“ Messverfahren geben kann. Die inneren und äußeren Randbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf das gemessene Einsparpotenzial eines Energieschirms. Je „praxisnäher“ die Untersuchungen durchgeführt werden, desto besser bildet das Ergebnis den Einzelfall ab, desto schwieriger ist aber eine Generalisierung. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die tatsächlichen Randbedingungen nicht in der erforderlichen Genauigkeit erfasst und eingeordnet werden können. Ein Rückschluss auf die Wirkung einzelner Systemkomponenten ist mit diesem Ansatz nahezu unmöglich. Im Gegensatz dazu lassen sich mit zunehmender Standardisierung die Randbedingungen reproduzieren und zumindest die vergleichende Beurteilung der Wirkung einzelner Systemkomponenten verbessern, gleichzeitig wird aber die Übertragung auf eine konkrete Gewächshausanlage in der Praxis schwieriger. Die notwendige Einigung auf ein einheitliches Messverfahren steht noch aus.

Bei den Untersuchungen in dem Gewächshaussegment im Kühllager (Venlo, 4 m Stehwandhöhe, 3,2 m Kappenbreite, Einfachglas) wurde unter anderem auch der Einfluss der Einbauhöhe des Energieschirms untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei einer niedrigeren Einbauhöhe (3 m statt 4 m) der U_{cs} -Wert um knapp 20 % niedriger lag. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die Luftzirkulation im Gewächshaus den U_{cs} -Wert wesentlich beeinflusst. Es stellt sich automatisch die Frage: Ist eine Korrektur für die inneren Wärmeübergangswiderstände an den immer höheren Stehwänden notwendig? Eine erhöhte Anströmung der Grenzflächen müsste im Ergebnis zu einer Erhöhung des inneren Wärmeübergangswiderstandes (R_i , $m^2 K W^{-1}$) führen.

Gleiches gilt für die Berücksichtigung des latenten Wärmestroms. Die Untersuchungen zeigten deutlich die Abhängigkeit des U_{cs} -Wertes von den Verdunstungsbedingungen auf der Kulturfläche. Wassersparende Bewässerungssysteme sorgen heute für weitgehend trockene Kulturflächen und vermindern den durch Kondensation verursachten latenten Anteil des U_{cs} -Wertes. Dies müsste im Ergebnis zu einer Verringerung des inneren Wärmeübergangswiderstandes (R_i , $m^2 K W^{-1}$) führen.

Projekt – Bauphysikalische Eigenschaften von Gewächshäusern unter Praxisbedingungen

Die den Berechnungen in HORTEX^(c) zugrunde liegenden Kennzahlen wurden in Versuchsgewächshäusern in den 70er- und 80er-Jahren ermittelt. Die Gewächshausanlagen haben sich inzwischen weiterentwickelt. Es stellt sich die Frage, ob diese Ansätze uneingeschränkt auf die heutigen Bauformen und Kultursysteme übertragen werden können. Dieser Fragestellung wird an der Fachhochschule Osnabrück

nachgegangen; dies geschieht im Rahmen des von AGIP geförderten Forschungsprojekts „Bauphysikalische Eigenschaften von Gewächshäusern unter Praxisbedingungen“.

Die Projektziele sind:

- Analyse der systemspezifischen U_{cs} -Werte unter besonderer Berücksichtigung der Bauweise und der Inneneinrichtung.
- Identifikation von Produktionssystemen mit systemspezifisch hohem und systemspezifisch niedrigen U_{cs} -Werten und Vergleich mit den HORTEX^(c)-Erwartungswerten.
- Erprobung eines mobilen Messsystems für die Bestimmung des systemspezifischen U_{cs} -Wertes unter Praxisbedingungen (Ultraschalldurchflusssensor).

Im Projekt wird über einen Zeitraum von 3 Jahren der systemspezifische U_{cs} -Wert einer möglichst großen Anzahl von „alten“ und „modernen“ Gewächshäusern gemessen. Der systemspezifische U_{cs} -Wert bezieht sich analog zu dem für Gebäude entwickelten Energieausweis auf die Grundfläche des Gewächshauses. Der Vergleich mit den berechneten HORTEX^(c)-Erwartungswerten soll Aufschluss darüber geben, ob eine Anpassung der bauphysikalischen Kennwerte, die dem Planungsprogramm HORTEX^(c) zugrunde liegen, notwendig ist.

Zielsetzung – Der Energieausweis für Gewächshäuser

Für eine weitergehende Verringerung des Energieverbrauchs von Gewächshäusern müssen die wärmetechnischen Eigenschaften der Gesamtanlagen verbessert werden. Dabei müssen alle Teilkomponenten, von der Wärmeerzeugung bis zur Wärmeverteilung und Wärmeausbringung berücksichtigt werden. Eine zwingende Voraussetzung wäre die Einführung eines Energieausweises für alle Gewächshäuser analog dem Beispiel für Gebäude (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle), um erzielte Effekte abzuschätzen und zu dokumentieren.

Die positive Wirkung eines solchen Energieausweises wäre vielfältig:

- Der Betreiber einer Gewächshausanlage wäre in der Lage die Energiekosten seiner Gewächshäuser vergleichend einzuordnen und seine Produktionsplanung entsprechend darauf abzustimmen. Er wäre auch in der Lage, die ökonomischen und ökologischen Effekte von energiesparenden Maßnahmen in der bestehenden Anlage oder bei einem Neubau besser einzuordnen.
- Die Forschung könnte die im Wettbewerb entwickelten Ideen für energiesparende Produktionssysteme vergleichend einordnen.
- Die Beratung könnte für die gewünschten Produktionseigenschaften einer Gewächshausanlage gute und schlechte Systeme besser identifizieren und zielgerechter beraten.
- Der Anbieter von Gewächshausanlagen könnte die Weiterentwicklungen hinsichtlich der wärmetechnischen Eigenschaften besser sichtbar machen.
- Der Staat könnte die Wirkung von Fördermaßnahmen besser planen und die tatsächlich erzielten Einsparungen besser dokumentieren.

Als Basis für eine entsprechende Weiterentwicklung bietet sich das Planungsprogramm HORTEX^(c) an. Die richtige Berechnung der systemspezifischen U_{cs} -Werte wäre hier eine wichtige Voraussetzung. Die anschließende Berechnung der Vergleichswerte (Energieverbrauch in $\text{kWh m}^{-2} \text{a}^{-1}$) würde dann auf der Basis eines standardisierten Nutzungsprofils erfolgen. Darauf aufbauend könnte die Wirkung energiesparender Maßnahmen in der bestehenden Anlage oder in einem Neubau berechnet und dargestellt werden – analog zum Energieausweis für Gebäude.

3 Nomenklatur und Definitionen

PROF. DR. JOACHIM MEYER, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, FREISING

3.1 Einleitung

Der Energieverbrauch eines Gewächshauses ist von den Umweltbedingungen, der technischen Ausrüstung und von den kulturtechnischen Anforderungen an Temperaturführung und Innenklima abhängig. Eine Vorhersage des Energieverbrauchs im Einzelfall ist daher außerordentlich problematisch und kann auch erhebliche Fehler enthalten. Durch internationale Kooperationen hat sich die Notwendigkeit ergeben, die Berechnungs- und Messverfahren möglichst weitgehend abzustimmen und die verwendete Nomenklatur zu vereinheitlichen. Dabei soll auch der Versuch unternommen werden, die erarbeiteten Ergebnisse an den internationalen Standard anzupassen. Die verwendeten Formeln, Abkürzungen und Indices sind daher auf englischsprachige Grundformen angepasst worden.

3.2 Verwendete Abkürzungen und Indices

Tab. 4.1: Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung (Deutsch/Englisch)	Dimension
A	Fläche area	m ²
c	spezifische Wärmekapazität specific heat capacity	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Δ	Differenz; difference	
E	Einstrahlung irradiance	W m ⁻²
ε	Emissionskoeffizient emissivity	-
Φ	Energiefluss, Wärmestrom, thermische Leistung energy flux	W; J s ⁻¹
h	Wärmeübergangskoeffizient energy transfer coefficient	W m ⁻² K ⁻¹
h	Enthalpie enthalpy	kJ kg ⁻¹
λ	spezifische Leitfähigkeit conductivity	W m ⁻¹ K ⁻¹
η	Wirkungsgrad efficiency	-
Q	Wärme, Energiemenge	MJ; kWh a ⁻¹
q	Energieflussdichte, Wärmestromdichte, spezifischer Wärmebedarf energy flux density	W m ⁻²
θ	Temperatur Celsius temperature	°C
R	Wärme-Transmissions-/Übergangs-/Durchlass-Widerstand energy transmission/transfer resistance	m ² K W ⁻¹
ρ	Dichte density	kg m ⁻³

Fortsetzung nächste Seite

Abkürzung	Beschreibung (Deutsch/Englisch)	Dimension
s	Gewächshauspezifischer Faktor	-
T	absolute Temperatur absolute temperature	K
t	Zeit (Sekunde, Stunde, Tag, Jahr) time	s; h; d; a
τ	Durchlässigkeit transmissivity	-
U	Wärmedurchgangskoeffizient energy transmission coefficient	$W m^{-2} K^{-1}$
U_{cs}	Wärmeverbrauchs-koeffizient energy consumption coefficient	$W m^{-2} K^{-1}$
v	Strömungsgeschwindigkeit velocity	$m s^{-1}$
ξ	Wasserbedeckungsfaktor der Fläche	-

Tab. 4.2: Indices

Index	Beschreibung (Deutsch/Englisch; Ableitung fett & unterstrichen)
<i>a</i>	angrenzende Umgebung; a mbient
<i>air</i>	auf Luft bezogen; a ir
<i>cd</i>	Leitung; c on d uction
<i>cs</i>	Verbrauch; c on s umption
<i>cv</i>	Konvektion; c on v ection
<i>e</i>	außen; e xterior
<i>g</i>	Boden, Erdreich; g round
<i>i</i>	innen; i nside
<i>L</i>	Luft, Luftwechsel; l eakage
λ	Leitfähigkeit; energy/heat conductivity
<i>p</i>	Druck; p ressure
<i>r</i>	Strahlung; r adiation
<i>s</i>	Oberfläche; s urface
<i>sk</i>	Himmel betreffend; s ky
<i>tr</i>	Wärmedurchgang, energy t ransmission
τ	Transmission; t ransmission (griechisches kleines Tau)
<i>v</i>	Wasserdampf; v apour (condensation)
<i>w</i>	Wind; w ind
<i>w</i>	Wasser; w ater

3.3 Wärmeströme

Der Energieverbrauch eines Gewächshauses wird durch die Bilanz aller einfallenden und austretenden Wärmeströme beschrieben (Abbildung 2) Diese werden im Folgenden beschrieben und die Berechnungsformeln in allgemeiner Form dargestellt.

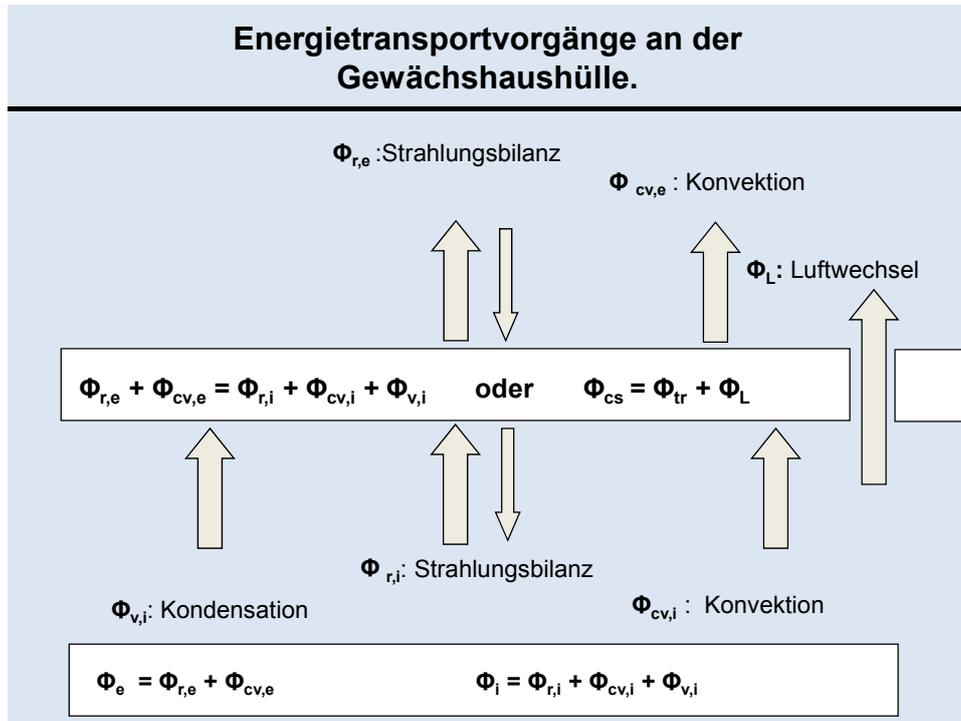


Abb. 2: Bilanz der Wärmeströme an der Gewächshaushülle

3.3.1 Strahlung

Jeder Körper sendet in Abhängigkeit von seiner Oberflächentemperatur Energie in Form von Strahlungswärme aus.

$$\Phi_r = \sigma_r \varepsilon AT^4 \quad [W]$$

mit:	Φ_r	= Wärmestrom durch Strahlung	[W]
	ε	= Emissionsverhältnis	[-]
	σ_r	= Stefan-Boltzmann-Konstante	[W m ⁻² K ⁻⁴]
	A	= Fläche	[m ²]
	T	= Oberflächentemperatur	[K]

Das Emissionsverhältnis gibt dabei das durch die Oberflächengestaltung bestimmte Abstrahlungsverhalten an, dass im Verhältnis zum maximal möglichen Abstrahlungsvermögen eines "schwarzen Strahlers" bei gleicher Temperatur steht. Normalerweise stehen Flächen im Strahlungsaustausch mit den umgebenden Flächen; deshalb ist die übertragene Wärmemenge stets eine Bilanz der Strahlungsströme der Einzelstrahler, beispielsweise zwischen Gewächshausdach und dem Pflanzenbestand.

3.3.2 Leitung

Bestehen Temperaturunterschiede innerhalb eines ruhenden Mediums, fließt entlang des Temperaturgefälles ein Wärmestrom. Typische Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind Metalle, z.B. Kupfer und Aluminium. Geringe Wärmeleitfähigkeiten findet man in stehender Luft, den bekannten Isoliermaterialien oder in trockenem Erdreich.

$$\Phi_{cd} = \frac{\lambda}{d} A \Delta T \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_{cd}	= Wärmestrom durch Leitung	[W]
	A	= Fläche	[m ²]
	d	= Schichtdicke	[m]
	ΔT	= Temperaturdifferenz innerhalb der Schicht	[K]
	λ	= spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W m ⁻¹ K ⁻¹]

Der Wärmestrom durch Leitung ist abhängig von der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Der Faktor λ/d [W m⁻² K⁻¹] wird Wärmedurchlasskoeffizient genannt; sein Kehrwert Wärmedurchlasswiderstand R_{cd} [m² K W⁻¹]. Damit wird obige Gleichung zu:

$$\Phi_{cd} = \frac{1}{R_{cd}} A \Delta T \quad [\text{W}]$$

3.3.3 Konvektion

Unter Konvektion versteht man die Wärmeabgabe oder Wärmeaufnahme an einer festen Oberfläche durch strömende Gase oder Flüssigkeiten. Man spricht von freier Konvektion, wenn die Strömung durch die Temperaturdifferenzen selbst beeinflusst wird; erzwungene Konvektion entsteht durch externe Antriebe, z.B. Ventilatoren oder Pumpen.

$$\Phi_{cv} = h_{cv} A (\theta_s - \theta_a) \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_{cv}	= Wärmestrom durch Konvektion	[W]
	h_{cv}	= konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
	A	= Fläche	[m ²]
	θ_s	= Oberflächentemperatur	[°C]
	θ_a	= Umgebungstemperatur	[°C]

3.3.4 Verdunstung/Transpiration

Die Transpiration ist eine leistungsfähige Kühlmöglichkeit für Pflanzen. Darüber hinaus enthält der Wasserdampf einen wesentlichen Teil des Energiegehaltes der Luft (der latente, d. h. nicht fühlbare Teil) und ist damit ein bedeutsamer Faktor für den Energieverlust durch Luftwechsel. Für das Verdampfen von Wasser ist Energie notwendig. Diese wird der Umgebung in Form von Wärme entzogen. Weiterhin kommt dem latenten Wärmestrom eine besondere Bedeutung zu, da er gleichzeitig einen Teil des Wasserhaushalts darstellt (s. Kapitel 7.1).

$$\Phi_v = \frac{h_{cv}}{c_{pL}} \xi A r_0 (x_L - x_{sat}) \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_v	= Wärmestrom durch Verdunstung	[W]
	ξ	= Wasserbedeckungsfaktor der Fläche	[-]
	r_0	= Verdunstungsenthalpie	[kJ kg ⁻¹]
	h_{cv}	= konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
	c_{pL}	= spezifische Wärme der Luft	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
	A	= Fläche	[m ²]
	x_L	= aktueller Wassergehalt der Luft	[kg kg ⁻¹]
	x_{sat}	= Sättigungswassergehalt bei Oberflächentemperatur	[kg kg ⁻¹]

3.3.5 Kondensation

Beim Kondensieren von Wasser wird Energie freigesetzt. Wie bei der Verdunstung, kommt auch diesem Wärmestrom eine zusätzliche Bedeutung als Massenstrom zu, da er gleichzeitig einen Teil des Wasserhaushalts darstellt. Er ist deshalb für den Feuchtehaushalt des Gewächshauses von erheblicher Bedeutung (s. Kapitel 7.1). Die Kondensation begrenzt den Luftfeuchteanstieg im Gewächshaus, solange kalte Flächen zur Verfügung stehen. Wenn das nicht der Fall ist, kann die Feuchte stark ansteigen, z. B. bei warmen Außentemperaturen oder warmen Innenflächen durch Isolierbedachungen.

$$\Phi_v = \frac{h_{cv}}{c_{pL}} A r_0 (x_L - x_{sat}) \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_v	= Wärmestrom durch Verdunstung	[W]
	r_0	= Verdunstungsenthalpie	[kJ kg ⁻¹]
	h_{cv}	= konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
	c_{pL}	= spezifische Wärme der Luft	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
	A	= Kondensationsfläche	[m ²]
	x_L	= aktueller Wassergehalt der Luft	[kg kg ⁻¹]
	x_{sat}	= Sättigungswassergehalt bei Oberflächentemperatur	[kg kg ⁻¹]

3.3.6 Luftwechsel

Ein Gewächshaus verliert durch Undichtigkeiten oder gezielten Luftwechsel Energie an seine Umgebung. Der Lüftungswärmestrom hängt vom ausgetauschten Luftvolumen und der Temperaturdifferenz ab:

$$\Phi_L = \dot{V}_L \rho \Delta h \quad [\text{W}]$$

Dieser Energieverlust umfasst sowohl fühlbare (sensible) als auch latente Energie. Die oben stehende Gleichung kann durch Umformen in den sensiblen und latenten Anteil aufgeteilt werden:

$$\Phi_L = \dot{V}_L \rho (c_{pL} (\theta_i - \theta_e) + r_0 (x_i - x_e)) \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_L	= Wärmestrom durch Luftwechsel	[W]
	\dot{V}_L	= Luftvolumenstrom	[m ³ s ⁻¹]
	c_{pL}	= spezifische Wärme der Luft	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
	Δh	= Enthalpiedifferenz der Austauschluft	[kJ kg ⁻¹]
	ρ	= Dichte der Luft	[kg m ⁻³]
	θ_i	= Innentemperatur	[°C]
	θ_e	= Außentemperatur	[°C]
	r_0	= Verdunstungsenthalpie	[J kg ⁻¹]
	x_i	= Wassergehalt innen	[kg kg ⁻¹]
	x_e	= Wassergehalt außen	[kg kg ⁻¹]

3.4 Wärmebedarf und Wärmeverbrauch

Der Bedarf sind die rechnerisch ermittelten Größen für Wärme- und Energiemengen unter Zugrundelegung festgelegter Randbedingungen (DIN V 4108-6:2003-6). Dagegen bezeichnet der Verbrauch die erfassten Wärme- oder Energiemengen in einem realen Gebäude.

3.4.1 Berechnung des Wärmebedarfs

Die Berechnung des Wärmebedarfs eines Gewächshauses ist die notwendige Voraussetzung für die Auslegung von Gewächshausheizungen oder der Kesselauslegung. Sie stellt sicher, dass sowohl das Leistungsangebot im Kesselhaus als auch die Heizungsanlage im Gewächshaus so dimensioniert sind, dass bei Auslegungsbedingungen ausreichend Heizleistung zur Verfügung steht. Wird der Wärmebedarf über eine bestimmte Heizperiode (HP) ermittelt, spricht man vom Heizbedarf gemessen in [kWh HP⁻¹] oder [kWh a⁻¹].

Für die Bestimmung des Wärmebedarfs wird zwischen dem Transmissionswärmebedarf und dem Wärmebedarf für Luftwechsel unterschieden. Der Transmissionswärmestrom berücksichtigt alle Energietransportvorgänge an den Oberflächen des Gewächshauses und innerhalb der Bedachung.

$$\Phi_T = \frac{1}{R_T} A_s (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W}]$$

Der Wärmestrom für Luftwechsel kann durch Umformen der unter Kap. 3.3.6 genannten Formel, wie folgt, geschrieben werden.

$$\Phi_L = \frac{1}{R_L} A_s (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W}]$$

Der Gesamtwärmebedarf ist die Summe aus den Werten der beiden Wärmeströme

$$\Phi_{cs} = \Phi_T + \Phi_L \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ_{cs}	= Gesamtwärmebedarf	[W]
	Φ_T	= Transmissionswärmebedarf	[W]
	Φ_L	= Luftwechselwärmebedarf	[W]
	R_T	= Wärmedurchgangswiderstand	[m ² K W ⁻¹]
	R_L	= Luftwechselwiderstand	[m ² K W ⁻¹]
	A_s	= Fläche	[m ²]
	θ_i	= Auslegungsinntemperatur	[°C]
	θ_e	= Auslegungsaußentemperatur	[°C]

Der Transmissionswiderstand R_T ergibt sich aus der Summe der inneren und den äußeren Wärmeübergangswiderstände sowie aus dem Wärmeleitwiderstand der Bedachung.

$$R_T = R_{s,i} + R_\lambda + R_{s,e} \quad [\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}]$$

Die Berechnung des Auslegungswärmebedarfs erfolgt, indem die Temperaturdifferenz der Gewächshaushülle mit den Kennzahlen der Wärmeübertragung verrechnet wird. Die Temperaturdifferenz der Hülle errechnet sich aus der vom Gärtner geforderten Innentemperatur und der Auslegungstemperatur des Standortes. Ein Wärmegewinn durch Solarstrahlung oder aus dem Boden wird nicht berücksichtigt. Ebenso bleibt die Umwandlung von Heizwärme in Wasserverdunstung unberücksichtigt.

3.4.2 Berechnung des Wärmeverbrauchs

Der aktuelle Wärmeverbrauch eines Gewächshauses ergibt sich entsprechend der technischen Ausführung, des Innen- und Außenklimas und aus dem Energieumsatz innerhalb des Gewächshauses während der Messperiode von z.B. 1 Stunde. Dabei ist es erforderlich, auch den solaren Wärmegewinn zu beachten. Die Temperaturerhöhung ist nicht proportional zur Sonneneinstrahlung, weil ein Teil der Energie zur Verdunstung benötigt wird (latente Wärme). Die einzelnen Stundenwerte werden für den Jahresheizbedarf aufsummiert.

$$Q_{cs} = \sum_{t=1}^{8760} (U_{cs} A_s (\theta_i - \theta_e) - A_g q_{r,e} T_r \eta_r)$$

[kWh a⁻¹]

mit:

Q_{cs}	= Wärmeverbrauch	[kWh a ⁻¹]
U_{cs}	= Wärmeverbrauchsbeoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
A_s	= Hüllfläche	[m ²]
A_g	= Grundfläche	[m ²]
θ_i	= Innentemperatur	[°C]
θ_e	= Außentemperatur	[°C]
$q_{r,e}$	= Globalstrahlung außen	[W m ⁻²]
T_r	= Durchlässigkeit für Globalstrahlung	[-]
η_r	= Wirkungsgrad der Energieumsetzung in fühlbare Wärme (Temperaturerhöhung)	[-]
t	= Zeit (8 760 h = 1 a)	[h]

Der Wirkungsgrad der Umsetzung von zugeführter Globalstrahlung zu fühlbarer Wärme ist unterschiedlich hoch. Das macht die Berechnung des Heizbedarfs für den Tag recht unsicher. Für die nächtlichen Verbrauchsermittlungen entfällt dieser Teil der Formel, bedingt durch die fehlende Einstrahlung.

Oft ist es geraten, den Heizbedarf flächenbezogen zu berechnen; die vorgenannte Formel wird dann zu:

$$q_{cs} = \sum_{t=1}^{8760} (U_{cs} \frac{A_s}{A_g} (\theta_i - \theta_e) - q_{r,e} T_r \eta_r)$$

[Wh m⁻² a⁻¹]

mit:

q_{cs}	= spezifischer Wärmeverbrauch, Heizbedarf	[Wh m ⁻² a ⁻¹]
U_{cs}	= Wärmeverbrauchsbeoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
A_s	= Hüllfläche	[m ²]
θ_i	= Innentemperatur	[°C]
θ_e	= Außentemperatur	[°C]
A_g	= Grundfläche	[m ²]
$q_{r,e}$	= Globalstrahlung außen	[W m ⁻²]
T_r	= Durchlässigkeit für Globalstrahlung	[-]
η_r	= Wirkungsgrad der Energieumsetzung	[-]
t	= Zeit	[h]

Für die experimentelle Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten wird die nächtliche Wärmezufuhr in das Gewächshaus gemessen, die Formel lautet:

$$U_{cs} = \frac{\sum_{\text{Nacht}} Q_{cs}}{A_s / A_g (\theta_i - \theta_e) t} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

mit:

Q_{cs}	= Energieverbrauch	[Wh]
U_{cs}	= Wärmeverbrauchscoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
A_s	= Hüllfläche	[m ²]
A_g	= Grundfläche	[m ²]
θ_i	= Innentemperatur	[°C]
θ_e	= Außentemperatur	[°C]
t	= Zeit	[h]

Der U_{cs} -Wert gibt an, welche Energiemenge bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin zwischen der Gewächshausinnentemperatur und der Außentemperatur durch eine 1 m² große Gewächshaushüllfläche abgegeben wird.

4 Wärmeverbrauchsrechnung – Einflussfaktoren

PROF. DR. HANS-JÜRGEN TANTAU, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

4.1 Art und Darstellung der Wärmeübertragung

Bei Wärmeverbrauchsrechnungen müssen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Zur Erklärung werden die Wärmeströme in einem beheizten Gewächshaus betrachtet (Abb. 3).

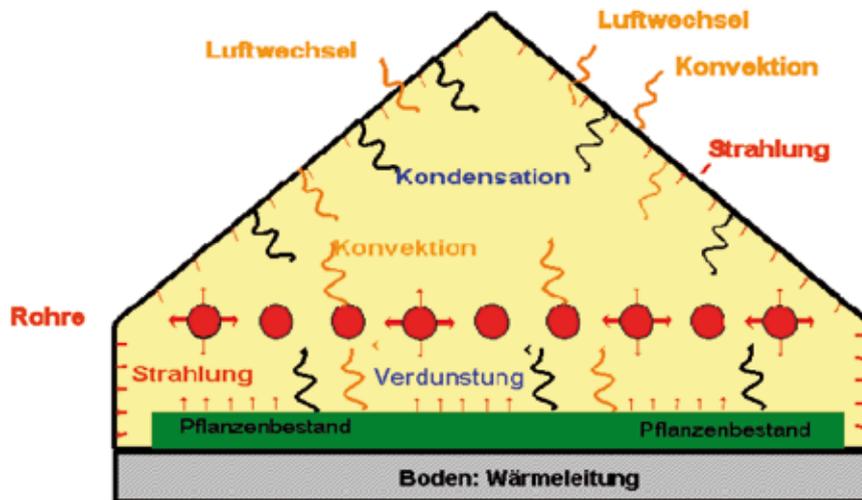


Abb. 3: Wärmeströme in einem Gewächshaus, nachts

Im Gewächshaus wird Wärme vom Heizungssystem durch Konvektion und langwellige Wärmestrahlung abgegeben (Abb. 3). Ein Teil der vom Heizungssystem abgegebenen Wärme wird von den Pflanzen aufgenommen und als Wasserdampf der Gewächshausluft zugeführt. An der Dachinnenseite wird diese Wärme durch Konvektion, Wärmestrahlung und Kondensation übertragen. Die Kondensation wird maßgeblich durch die Höhe der Verdunstung der Pflanzen und der feuchten Oberflächen im Gewächshaus beeinflusst und kann damit in einem größeren Bereich schwanken. Die Konvektion wird z. B. durch das Heizungssystem und Ventilatoren beeinflusst. An den Wärmeströmen im Gewächshaus ist auch der Boden beteiligt, der nennenswerte Wärmemengen speichern und wieder abgeben kann.

An der Außenseite der Gewächshausbedachung wird die Wärme durch Konvektion (Wind) und durch langwellige Wärmestrahlung (Wolken, Himmel) übertragen. Man kann das Zusammenwirken der unterschiedlichen Arten der Wärmeübertragung auch in Analogie zur Elektrizität als ein Netzwerk von Widerständen beschreiben (Abb. 4):

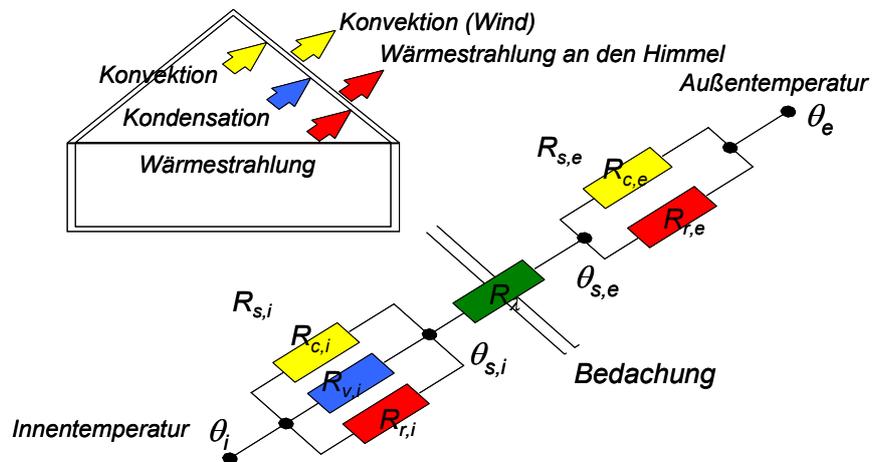


Abb. 4: Wärmeübertragung Widerstandsnetzwerk

Sind die Widerstände der Wärmeübertragung bekannt, lässt sich daraus der Wärmedurchgangskoeffizient für Transmission (U_T -Wert) berechnen:

$$R_T = R_{s,i} + R_\lambda + R_{s,e} \quad [\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}]$$

$$U_T = \frac{1}{R_T} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$$

mit:

R_T = Transmissionswiderstand [$\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$]

$R_{s,i}$ = innerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$]

$R_{s,e}$ = äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$]

R_λ = Wärmeleitwiderstand
(Bedachungsmaterial z. B. Glas und Sprosse) [$\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$]

4.2 Einflussfaktoren bei der Wärmeübertragung

Anhand des Widerstandsmodells lassen sich die Einflussgrößen auf den U-Wert ableiten.

4.2.1 Innerer Wärmeübergang

Für den inneren Wärmeübergang kann man einen Wärmeübergangskoeffizienten $h_{s,i}$ definieren, der sich aus den Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung, Konvektion und Kondensation zusammensetzt:

$$h_{s,i} = \frac{1}{R_{s,i}} = h_{cv,i} + h_{r,i} + h_{v,i} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$$

mit:

$h_{s,i}$ = Wärmeübergangskoeffizient, innen [W m⁻² K⁻¹]

$h_{cv,i}$ = Wärmeübergangskoeffizient, innen, für Konvektion (Rohr-, Luftheizung) [W m⁻² K⁻¹]

$h_{r,i}$ = Wärmeübergangskoeffizient, innen, für Strahlung
(Rohrheizung, Strahlungsheizung) [W m⁻² K⁻¹]

$h_{v,i}$ = Wärmeübergangskoeffizient, innen, für Kondensation
(Bewässerungssystem, Pflanzen) variabel, bis ca. 50 % Anteil! [W m⁻² K⁻¹]

In Tabelle 5 sind als Beispiel für den Einfluss des Heizungssystems gemessene U_{cs} -Werte dargestellt. Die U_{cs} -Werte der Tabelle zeigen, dass die Wahl und die Anordnung des Heizungssystems einen großen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch des Gewächshauses haben.

Tab. 5: Einfluss der Heizungssysteme auf den U_{cs} -Wert (hohe Rohrheizung = 100 %) (Tantau, 1982)

Heizungssystem	U_{cs} -Wert [W m ⁻² K ⁻¹]	U_{cs} -Wert (relativ)
hohe Rohrheizung	8,2	100
Untertischheizung	7,4	90
Wandrohrheizung	8,1	99
niedrige Rohrheizung	6,7	82
Luftheizung, 1. Stufe	9,9	121
Luftheizung, 2. Stufe	7,1	87
Luftheizung, 3. Stufe	8,0	97
Konvektoren	7,8	95
LH mit Folienschlauch	7,0	85

4.2.2 Äußerer Wärmeübergang am Gewächshausdach

Für den äußeren Wärmeübergang kann man einen Wärmeübergangskoeffizienten $h_{s,e}$ definieren:

$$h_{s,e} = \frac{1}{R_{s,e}} = f(v_w, \theta_{sk}) \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$$

Der äußere Wärmeübergang wird von der Windgeschwindigkeit (v_w) (Konvektion) und der Bewölkung (Himmelstemperatur, (θ_{sk}) (Strahlung) beeinflusst. Bei guter Wärmedämmung der Hüllfläche kann die langwellige Wärmeabstrahlung der Bedachung (bei klarem Himmel) größer sein als die von innen übertragene Wärmemenge. Dann kühlt sich die Außenseite der Bedachung unter die Lufttemperatur ab. Es wird der Bedachung konvektiv von der Außenluft Wärme zugeführt. Damit kann es zur Kondensati-

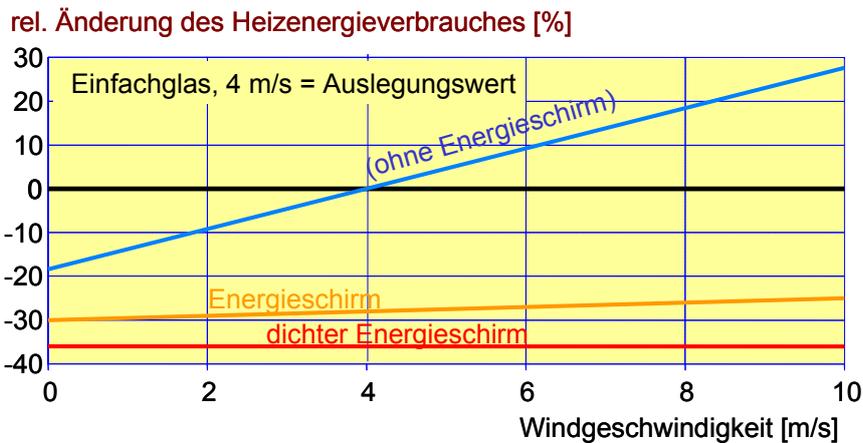


Abb. 5: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Energieverbrauch (relativ, U_{cs} -Wert) eines Gewächshauses (Beispiele) (TANTAU, 1996)

on von Wasserdampf kommen (Taupunktunterschreitung) und bei Frost zur Reifbildung auf dem Dach. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den U_{cs} -Wert ist beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt.

Die Beispiele in Abbildung 5 zeigen, dass bei einem einfach verglasten Gewächshaus (ohne Energieschirm) die Abhängigkeit des U_{cs} -Wertes von der Windgeschwindigkeit am größten ist. Bei guter Wärmedämmung der Hüllfläche (dichter Energieschirm) ist der U_{cs} -Wert nahezu unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Daraus ergibt sich die Frage, für welche Windgeschwindigkeit wird die Energieeinsparung angegeben. In Abbildung 5 ist als Bezugswert (= Wert für die Auslegung) eine Windgeschwindigkeit von $v_w = 4 \text{ m/s}$ angesetzt. Je nach Standort kann die mittlere Windgeschwindigkeit von diesem Wert abweichen.

Hieraus wird deutlich, dass der jeweils aktuelle Wärmeverbrauch, der dem Witterungsverlauf folgt, auch einen witterungsabhängigen U_{cs} -Wert zur Folge hat. Werden nun mit dem Ziel der Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen Wärmeverbrauchsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse windgeschwindigkeitsabhängig sind, ist große Sorgfalt notwendig, die Referenzsituation zu definieren und einzuhalten. Andernfalls werden nicht zusammengehörige U_{cs} -Werte miteinander verglichen und keine korrekten Einsparzahlen deklariert.

4.2.3 Messort der Innentemperatur im Gewächshaus

Zur Berechnung des U_{cs} -Wertes ist die Luftinnentemperatur wichtig. Da in einem Gewächshaus horizontal und vertikal größere Temperaturgradienten auftreten können, muss der „richtige Messort“ festgelegt werden. Dabei sollte auch die Anzahl der Messorte festgelegt werden. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind Beispiele für horizontale und vertikale Temperaturgradienten dargestellt.

In diesem Zusammenhang muss auch darauf hingewiesen werden, dass die Lufttemperatur nicht die entscheidende Größe für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen ist. Die Blatttemperatur wäre als Bezugsgröße für den U_{cs} -Wert stärker auf die Pflanze bezogen und damit „richtiger“. Allerdings haben Probleme bei der Messung der Blatttemperatur und die größere Heterogenität im Vergleich zur Lufttemperatur bisher dazu geführt, dass die Blatttemperatur zwar häufig in wissenschaftlichen Untersuchungen gemessen, aber nicht zur Berechnung des U_{cs} -Wertes herangezogen wird, zumal die Übertragung auf die praxisüblichen Klimaregelgeräte nicht möglich ist.

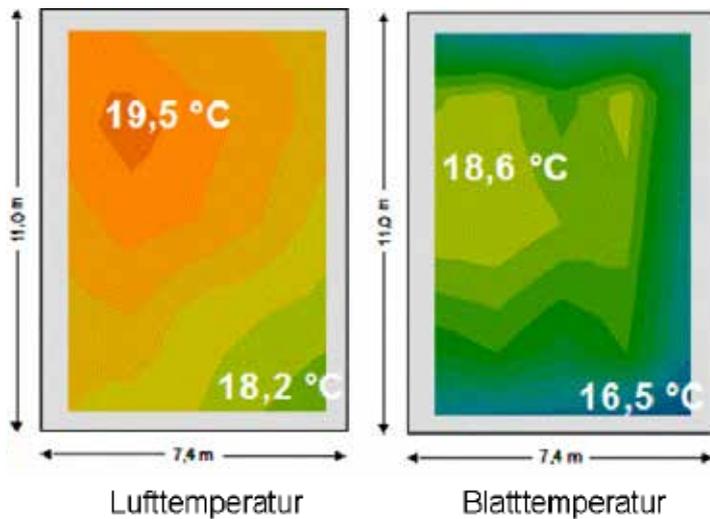


Abb. 6: Gewächshaus mit Rohrheizung: Horizontale Gradienten der Lufttemperatur (links) und der Blatttemperatur (rechts), (RATH 2002)

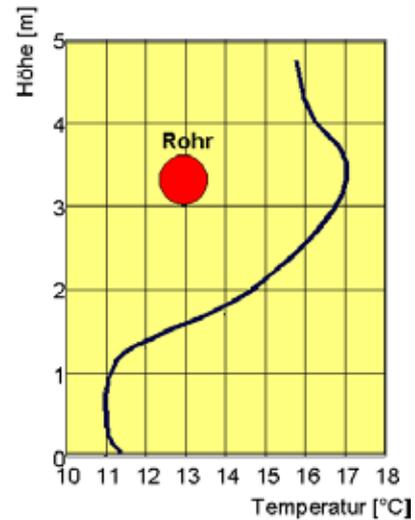


Abb. 7: Hohe Rohrheizung: vertikaler Temperaturgradient (TANTAU 1982, verändert)

4.2.4 Wärmespeicherung

Die Wärmespeicherung – besonders im Boden – ist eine weitere Einflussgröße auf den gemessenen U_{CS} -Wert. Dabei ist die Tag-Nacht-Amplitude der Gewächshausinnentemperatur und der Strahlungsabsorption des Bodens wichtig. RATH (1994) hat das Speicherverhalten ungeheizter Gewächshäuser untersucht und einen empirischen Ansatz zur Berechnung der Wirkung auf die Innentemperatur entwickelt (Abbildung 8).

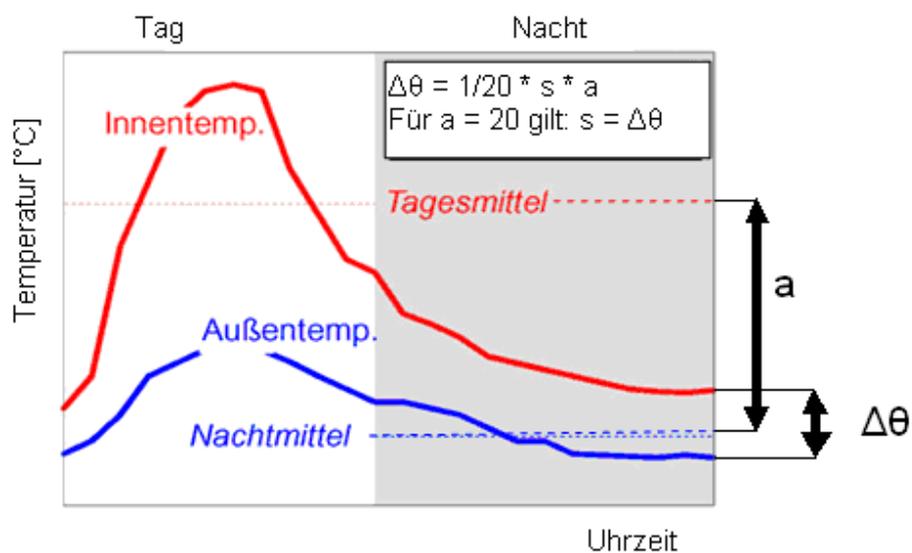


Abb. 8: Einfluss der Wärmespeicherung am Tage auf die Lufttemperatur nachts in einem ungeheizten Gewächshaus (s = Gewächshauspezifischer Wert, meistens zwischen 2 und 10 K) (RATH 1994)

Die nächtliche Erhöhung der Lufttemperatur im ungeheizten Gewächshaus über die Außentemperatur (θ_e) ist abhängig von der Differenz des vorangegangenen Tagesmittels der Innentemperatur zum folgenden Nachtmittel der Außentemperatur. Der Zusammenhang ist gewächshauspezifisch und wird mit dem Faktor s beschrieben. Mit a wird die Differenz der Temperaturen zwischen Tagesmittel und Nachtmittel beschrieben.

Wichtig für das Speicherverhalten ist auch das Heizungssystem. In Abbildung 9 sind für verschiedene Heizungssysteme „Aufheizzeiten“ angegeben. Die „Aufheizzeit“ ist eine theoretische Größe, die angibt, wie lange es dauert, bis das Wasser in den Heizungsrohren mit Auslegungsheizleistung auf Betriebstemperatur gebracht ist. Für nicht stationäre Wärmeverbrauchsmessungen sind Rohrheizungen mit Rohrdurchmessern über 50 mm als besonders kritisch anzusehen.

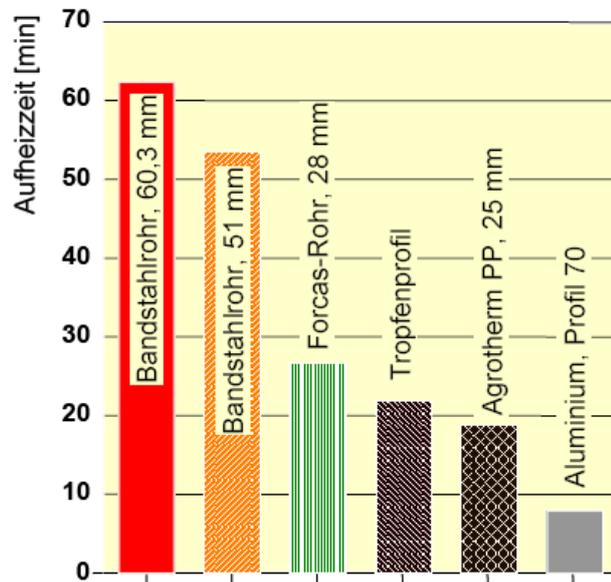


Abb. 9: Aufheizzeit von Heizungsrohren (HEISE, 1992)

4.2.5 Undichtigkeiten (Lüftung, Verglasung)

Der U_{cs} -Wert kann als Summe der Verlustkoeffizienten für die Transmission durch die Bedachung (U_T -Wert) und den Luftwechsel (U_L -Wert) definiert werden. Der U_L -Wert gibt maßgeblich die Undichtigkeiten des Gewächshauses an.

$$U_{cs} = U_T + U_L \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

Der U_L -Wert ist abhängig von der Spaltbreite und der Spaltlänge. Beides ist an einem Gewächshaus schwer abschätzbar. Die Spalte an der Lüftungsklappe können zudem je nach Unter- oder Überdruck entsprechend der jeweiligen Windrichtung unterschiedlich groß sein. Der U_L -Wert ist von der Windgeschwindigkeit abhängig. Messtechnisch wird der Luftwechsel bei Gewächshäusern mithilfe der Abklingkurve ermittelt; dafür werden Indikatorgase eingebracht und bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten gemessen. Diese Maßnahme kann bei großen Gewächshausanlagen jedoch nur schwer durchgeführt werden, da einerseits die gleichmäßige Verteilung der Anfangskonzentration schwierig und die Kosten für Indikatorgas sehr hoch liegen. Daher wurde die exakte Ermittlung nur bei relativ kleinen Versuchsgewächshäusern in der Praxis durchgeführt.

4.3 Abhängigkeiten des Wärmeverbrauchscoeffizienten

Wie beschrieben, spielt die Windgeschwindigkeit für die Wärmeabgabe eines beheizten Gewächshauses eine bestimmende Rolle. Dabei lassen sich der Einfluss der Erhöhung des äußeren Wärmeüberganges und die Erhöhung des Luftwechsellverlusts nicht exakt voneinander trennen. Daher wird der Windeinfluss auf den Wärmeverbrauchscoeffizient häufig mithilfe einer statistischen Regressionsberechnung ermittelt.

$$U_{cs} = U_T + v_w \cdot b \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

mit:

U_{cs}	= Wärmeverbrauchscoeffizient	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
U_T	= Wärmedurchgangskoeffizient (Achsenabschnitt)	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
v_w	= Windgeschwindigkeit	$[\text{m s}^{-1}]$
b	= Steigung der Geraden	$[\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}]$

Den Einfluss des Bodenwärmestromes versucht man bei einer Messung gering zu halten, indem Messwerte erst einige Stunden nach Sonnenuntergang zur Bestimmung herangezogen werden. Da in der Regel Wärmeverbrauchsmessungen zur Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten im Winter bei geringen Einstrahlungen und bei konstanten Innentemperaturen stattfinden, ist der Bodenwärmestrom von untergeordneter Bedeutung. Für die Berechnung des Wärmeverbrauchs mit dem Programm HORTEX^(c) wird der Bodenwärmestrom, wie oben beschrieben, berücksichtigt.

Der „richtige“ Messort für die Lufttemperaturmessung ist auf 1 m Höhe über dem Boden definiert worden, indem vereinfachend angenommen wird, dass die Blätter sowohl höherer Kulturen in Grundbeeten als auch von Tischkulturen hier wachsen. Dabei nimmt man in Kauf, dass sowohl niedrige Grundbeetkulturen wie Salat oder auf dem Boden stehende Beet- und Balkonpflanzen als auch bei hochwachsenden Gurken- und Tomatenkulturen Abweichungen zur Lufttemperatur in Blattnähe auftreten.

Als Messorte für die Außentemperatur ist die strahlungsgeschützte Lufttemperatur in 2 m Höhe festgelegt worden und für die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in ungestörter Umgebung des Gewächshauses.

Der Einfluss des Wärmeverlustes des Gewächshausdaches infolge von Strahlungswärmeverlust an die Umwelt ist messtechnisch noch nicht zuverlässig bestimmt worden und verbleibt in der Streuung der ermittelten Wärmeverbrauchswerte. In Tabelle 6 sind beispielhaft einige Werte für den Wärmeverbrauchscoeffizienten angegeben. Die Wertespanne ist bedingt durch unterschiedliche Heizungssysteme, Undichtigkeiten in der Hüllfläche oder Wärmestrahlungsdurchlässigkeit.

Tab. 6: Wärmeverbrauchscoeffizienten für verschiedene Bedachungsmaterialien bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s (VON ZABELTITZ 1995).

Material	U_{cs} [W m ⁻² K ⁻¹]
Einfachglas	6,0–8,8
Doppelglas	4,2–5,2
Stegdoppelplatten (Acrylglas) SDP 16 (16 mm)	4,2–5,0
Stegdreifachplatten S3P (32 mm)	3,0–3,5
Einfachfolie	6,0–7,8
Doppelfolie	4,2–5,5
Energieschirme unter Einfachglas	
Einfachschild, Schattierung	4,1–4,8
Doppellagige Energieschirme	3,4–3,9
Aluminisierte Energieschirme	3,4–3,9

4.4 Fazit

Verschiedene Faktoren beeinflussen das Ergebnis der Wärmeverbrauchsmessungen. Da die Spanne des U_{cs} -Wertes bei Einfachbedachungen größer ist als bei gut wärmedämmten Eindeckungen, ergibt sich das Problem, relative Energieeinsparungen anzugeben.

Wichtig ist eine Standardisierung der Wärmeverbrauchsmessungen zum Beispiel bei:

- der Messzeit und Zahl der Wiederholungen,
- der Messung der Lufttemperatur innen (repräsentativer Messort, Zahl der Messfühler, Verteilung),
- Messung der Windgeschwindigkeit (Messort, Höhe),
- Messungen mit oder ohne Pflanzen (Einfluss der Verdunstung und Kondensation)

Alternativ zur Messung sollte man auch die Möglichkeit der Berechnung der U_{cs} -Werte mithilfe von Rechenmodellen überlegen. Eventuell sind dabei die Fehler bei der Parameterabschätzung geringer als die zu erwartenden Messfehler bei ungünstigen Messbedingungen. Der Aufwand für eine Berechnung ist zudem wesentlich geringer als bei einer Messung.

Für die energetische Beurteilung von Gewächshäusern ist der Wärmeverbrauchscoeffizient (U_{cs} -Wert) von besonderer Bedeutung. Um die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Gewächshäusern, energiesparenden Maßnahmen oder Betriebsweisen zu gewährleisten, sollen die Wärmeverbrauchswerte bei 4 m/s Windgeschwindigkeit herangezogen werden. Auch wenn der Mittelwert einer umfangreicheren Wärmeverbrauchsmessung nicht bei 4 m/s liegen sollte, ist mithilfe der zu ermittelnden Regressionsbeziehung der Referenzwert für 4 m/s anzugeben und zu verwenden. Für die Auslegungsberechnung der Heizleistung wird empfohlen die Wärmeverbrauchscoeffizienten bei der Windgeschwindigkeit von 4 m/s einzusetzen.

Als Endergebnis der Bestimmung der relativen Energieeinsparung wird ein Wert erwartet, was angesichts der vielfältigen Einflussgrößen schwierig ist. Zu beachten sind bei allen Messungen mögliche Messfehler, die unter ungünstigen Versuchsbedingungen (z. B. zu kleine Temperaturdifferenzen), gravierend sein können (s. Kapitel 5).

5 Wärmeverbrauchsmessungen – Anforderungen an die Genauigkeit

DR.-ING. BURKHARD VON ELSNER, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Grundlage der Wärmeverbrauchsbestimmung ist die Ermittlung der innerhalb eines festgesetzten Zeitraums ausgebrachten Wärmemenge. Dies ist von Betriebsmessungen zu unterscheiden, die den Heizmaterialverbrauch des Gewächshauses ganztägig dokumentieren sollen. Dabei spielt weder die Qualität der Temperaturverteilung noch ein solarer Wärmegewinn eine Rolle, da eine solche Messung in der Regel der Kostenzuordnung oder -abrechnung der Heizwärme dient. Andere Anforderungen herrschen für wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zum spezifischen Wärmeverbrauch von Gewächshäusern. Die Einflüsse und Randbedingungen sind bereits beschrieben worden. Sowohl für Betriebsmessungen als auch wissenschaftliche Untersuchungen werden die gleichen Durchfluss- und Wärmemengenmessgeräte eingesetzt, wobei die Genauigkeitsanforderungen unterschiedlich sind. Bei Messungen zum spezifischen Wärmeverbrauch kommt die möglichst exakte Erfassung und qualitative Bewertung der Umgebungsbedingungen hinzu, die den Wärmeverbrauch verursachen.

5.1 Theoretische Grundlagen

5.1.1 Wärmemengenmessung

Unter der Maßgabe, dass keine externen Wärmequellen auftreten, gilt, dass die vom Gewächshaus abgegebene Wärme der zugeführten entspricht.

$$Q_{zu} = Q_{ab}$$

Geht man von einem beheizten Gewächshaus aus, so kann angenommen werden, dass Q_{zu} der zugeführten Wärmemenge durch die Heizung (Q_{Heiz}) entspricht.

$$Q_{Heiz} = Q_{zu} = Q_{ab}$$

Bei der Wärmemengenmessung wird der Wärmefluss des Heizmediums – in der Regel Heizungswasser – über den Messzeitraum von Anfangszeit (t_0) bis Endzeit (t_1) gemessen.

$$Q_{Heiz} = \int_{t_0}^{t_1} q_m \Delta h dt \quad [J]$$

mit:	Q_{Heiz}	= zugeführte Wärmemenge	[J]
	q_m	= Massendurchfluss der Wärmeträgerflüssigkeit durch den Wärmezähler	[kg s ⁻¹]
	Δh	= Differenz der spezifischen Enthalpien der Wärmeträgerflüssigkeit bei den Vor- und Rücklauftemperaturen	[J kg ⁻¹]
	t	= Zeit	

Mit geeigneten Volumenstrommessern wird der Durchfluss gemessen.

$$q_m = \rho \dot{V} \quad [\text{J kg}^{-1}]$$

mit:	q_m	= Massendurchfluss der Wärmeträgerflüssigkeit durch den Wärmezähler	$[\text{kg s}^{-1}]$
	ρ	= Dichte	$[\text{kg m}^{-3}]$
	\dot{V}	= Volumenstrom	$[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$

Besondere Beachtung gilt der Temperaturmessung des Heizmediums, weil sie sowohl in die Bestimmung der Dichte, spezifischen Wärmekapazität und der Enthalpie des Vor- und Rücklaufwassers ein- geht.

$$\Delta h = c_p \theta_f - c_p \theta_r \quad [\text{J kg}^{-1}]$$

mit:	Δh	= Differenz der spezifischen Enthalpien der Wärmeträgerflüssigkeit bei den Vor- und Rücklauftemperaturen	$[\text{J kg}^{-1}]$
	c_p	= Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
	θ_f	= Vorlauftemperatur	$[\text{°C}]$
	θ_r	= Rücklauftemperatur	$[\text{°C}]$

Damit sind die Messgrößen der Wärmeverbrauchsmessung definiert – Zeit, Volumenstrom und Temperaturen.

5.1.2 Bestimmung des spezifischen Wärmeverbrauchscoeffizienten

Die Energiebilanz eines Gewächshauses ist jedoch nicht so einfach zu erfassen, wie in obiger Gleichung dargestellt. Als zugeführte Energie ist nicht nur die Heizenergie zu betrachten, sondern auch der solare Energieeintrag. Dieser wird an der Pflanze und dem Boden in Verdunstungswärme umgewandelt und als Kondensation am Dach oder im Luftwechsel transportiert. Ein Teil kann auch im Boden gespeichert und als verzögerte Wärmezufuhr bei der „Ausspeicherung“ aus dem Boden dem Gewächshausraum wieder zugeführt werden. Zusätzlich wird Energie sowohl im Innern als auch vom Dach zum Himmel durch langwellige Wärmestrahlungsaustausch übertragen. Mit welchen Wechselwirkungen sich die Wärmeströme einstellen, wird wesentlich vom Bauteil „Bedachung“ mit seinen Eigenschaften bestimmt. Mithilfe des spezifischen Wärmeverbrauchscoeffizienten soll diese wärmetechnische Eigenschaft beschrieben werden, um Bedachungssysteme und Betriebsbedingungen (z.B. Einfluss eines beweglichen Energieschirms) beschreibbar und vergleichbar zu machen. Bekanntermaßen wird die Größe des Wärmeverbrauchscoeffizienten von den Witterungsbedingungen wie Windgeschwindigkeit und Bewölkung beeinflusst, sodass die Ermittlung und Beschreibung mit einer feststehenden Zahl nicht erfolgen kann. Da jedoch das komplexe System des Wärmeverbrauchs eines Gewächshauses möglichst einfach beschrieben werden soll, wird es auf die wirksame Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Freiland reduziert und der Wärmeverbrauchscoeffizient als U_{cs} -Wert definiert. Es handelt sich dabei um einen

speziellen Wärmedurchgangskoeffizienten und nicht nur um die „einfache“ Transmission durch eine Glasscheibe. Die Vorgänge des Luftwechsels, des latenten Wärmetransportes (Transport von Energie in Form von Wasserdampf), des Wärmestrahlungsaustauschs und der Wärmespeicherung im Gewächshausboden werden dabei berücksichtigt.

Bei der Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten wird vereinfachend angenommen, dass die innerhalb einer Messperiode über die Systemgrenzen abgegebene Leistung derjenigen der Heizung des Gewächshauses entspricht.

$$Q_{\text{Heiz}} = Q_{\text{ab}} = A_S U_{\text{cs}} \int_{t_0}^{t_1} (\theta_i - \theta_e) dt \quad [\text{J}]$$

mit:	Q_{Heiz}	= zugeführte Wärmemenge	[J]
	A_S	= Hüllfläche des Gewächshauses	[m ²]
	U_{cs}	= Wärmeverbrauchscoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
	θ_i	= Innentemperatur	[°C]
	θ_e	= Außentemperatur	[°C]
	t	= Zeit	

Durch Umformen der Gleichung kann der Wärmeverbrauchscoeffizient berechnet werden:

$$U_{\text{cs}} = \frac{Q_{\text{Heiz}}}{A_{\text{System}} \int_{t_0}^{t_1} (\theta_i - \theta_e) dt} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

Wärmespeichereffekte, zusätzliche Wärmequellen und -senken, Verdunstungs- und Kondensationsvorgänge und der Wärmestrahlungsaustausch werden vernachlässigt. Der Vorgang des Wärmeverbrauchs wird auf die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen reduziert, wobei stillschweigend vorausgesetzt wird, dass der U_{cs} -Wert nicht von der Temperatur abhängt und innerhalb des Messzeitraums von t_0 bis t_1 konstant bleibt. Deutlich wird, dass für die verlässliche Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten neben der exakten Wärmemengenmessung auch eine ausreichende Genauigkeit der Messung der Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft erforderlich ist.

5.2 Messverfahren und Messgeräte

Zur Messung der Temperaturen kann grundsätzlich jedes Messverfahren eingesetzt werden, welches eine ausreichende Genauigkeit garantiert. Es ist somit nicht ausschlaggebend, ob dafür Thermoelemente, Widerstandsthermometer oder temperaturempfindliche Halbleiter verwendet werden.

Für die Wärmemengenmessung gilt, die genauesten Messfühler einzusetzen, da schon geringste Messfehler zu großen Ungenauigkeiten führen. In der Industriemesstechnik gilt die Messung mit Platin-Widerstandsthermometern (Pt100 oder Pt1000) von 100 Ohm (bzw. 1000 Ohm) bei 0 °C als das Verfahren der Wahl, da die Genauigkeit hoch, die Kalibrierung langfristig stabil, verschiedenste Bauformen realisiert und die temperaturabhängige Widerstandsänderung in der DIN IEC 60751 genormt sind. Um dabei den Anforderungen der Temperaturdifferenzmessung für die Wärmemengenmessung gerecht zu

werden, werden die benötigten Fühler gepaart herausgesucht, um gleichgerichtete Eigenschaften zu garantieren und Messfehler zu minimieren. Damit der Wärmeübergang vom Trägermedium auf den Messfühler gut und genau erfolgt, sollte der Messfühler im Gegenstrom vom Messmedium umflossen werden und die verwendete Tauchhülse (nach DIN 1434) im Rohr mit Öl oder Wärmeleitpaste gefüllt sein, damit nicht eine isolierende Luftschicht den Wärmefluss verringert. Zusätzlich muss der Messort gegen die Umgebung wärmeisoliert werden. Dies ist dann notwendig, wenn aus Kostengründen nur ein Oberflächentemperaturfühler auf das Heizungsrohr aufgebracht wird. Die erforderliche Genauigkeit dieser Temperaturdifferenzmessung liegt bei $\pm 0,05$ K (Kelvin, entspricht hier °C).

Als Durchflussmesser stehen verschiedene Messverfahren zu Verfügung. In der Vergangenheit wurden vornehmlich Flügelrad- oder Turbinenzähler eingesetzt, wie sie in der Haustechnik üblich sind. Ihr Nachteil liegt in einer Messunsicherheit bei geringem Durchfluss, wobei der Minimaldurchfluss wegen der schlechten Ansprechempfindlichkeit der beweglichen Teile bei etwa 2 % des Nenndurchflusses liegt. Dies ist jedoch von der gewählten Genauigkeitsklasse abhängig, sodass als Regel mindestens die Klasse 2 gelten sollte. Die Messunsicherheit liegt im Arbeitsbereich bei ± 3 % des Messwertes und steigt bei Unterschreiten des Minimaldurchflusses unkontrolliert hoch an.

Eine höhere Messempfindlichkeit bieten magnetisch-induktive Messwertgeber. Das Messprinzip beruht auf der Messung einer induzierten kleinen Spannung innerhalb eines Magnetfeldes durch elektrisch leitende Bestandteile des Messmediums. Hierfür wird ein Rohrstück mit definiertem Rohrdurchmesser in die Heizleitung eingebaut und so die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Als untere Messgrenze wird hier 0,3 m/s angesehen, die Nenngeschwindigkeit sollte bei 1–3 m/s liegen und kann bei Maximaldurchfluss 10–12 m/s betragen. Im Auslegungsvorgang muss der Messwertaufnehmer entsprechend ausgelegt werden, d.h., der Rohrdurchmesser muss möglicherweise für den Durchflussmesser mit Ein- und Auslaufstrecke verkleinert werden. Im Arbeitsbereich hat der Durchflussgeber eine Messunsicherheit von 0,3–0,4 % des Messwertes. In einem speziellen Messwertumformer wird das Messsignal aufbereitet und kann als digitales oder analoges Normsignal weiterverarbeitet werden.

Als weiteres modernes Messverfahren bietet sich die Ultraschalldurchflussmessung an. Dabei werden durch Ultraschallwandler Signale in das mediendurchflossene Rohr gesendet, deren Laufzeit zu einem versetzt angeordnetem Empfänger gemessen und ausgewertet wird. Entsprechend der Fließgeschwindigkeit wird das Signal beschleunigt oder verzögert und ist somit ein Maß für die Durchflussgeschwindigkeit. Als Messstrecke wird entweder ein definiertes Rohrstück in den Heizungskreislauf eingebaut oder – und darin liegt sein Vorteil für zeitlich begrenzte, mobile Messungen – ein passendes Ultraschallmessgerät wird auf die Rohrleitung mit bekanntem Durchmesser und Wandstärke aufgeschnallt. Wenn ein intensiver Kontakt des Messgerätes mit der Rohroberfläche gewährleistet ist, kann so ohne teure Umbauarbeiten die Messung mit einer Messunsicherheit von kleiner als 0,5 % durchgeführt werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit von $> 0,5$ m/s und einer Reynoldszahl $> 10\,000$ sichergestellt ist. Im Kapitel 5.3 werden die speziellen Probleme der Gewächshausanwendung dargestellt.

Jedes der Messverfahren liefert nur dann exakte Messwerte, wenn die Messwertgeber entsprechend den Hinweisen der Hersteller eingebaut werden. So ist es in der Regel erforderlich, bestimmte Abstände zu Rohrkrümmern, Ventilen oder Pumpen oder die Einbaulage und Entfernung des Messwertgebers zum Messumformer einzuhalten.

Checkliste für die Auslegung einer Durchflussmessanlage:

1. Aus der Auslegungsheizleistung der Gewächshausabteilung und der Auslegungstemperaturdifferenz den Nennvolumenstrom errechnen.
2. Den Rohrdurchmesser für den Nennbetrieb mit 3 m/s (für magnetisch-induktive Messung) bzw. 5 m/s (Ultraschallmessung) ermitteln. (Eventuell Rohrverjüngung vornehmen.)
3. Den nächsten Normdurchmesser zur Auswahl des Messumformers ermitteln.
4. Die technischen Daten des passenden Durchflussmessers zusammenstellen: Bauform (mit Flansch oder Gewinde; kompaktes oder getrenntes Rechenwerk, Druckverlust, Einbaulage, Beruhigungslängen vor/nach dem Durchflussmesser).
5. Ort für Wärmemengenmessung in der Heizungsanlage festlegen:
 - Beruhigungsstrecken,
 - Schweißnippel für die Tauchhülsen,
 - Evtl. Schmutzfänger und Strömungsgleichrichter,
 - Auswerteeinheit des Wärmezählers (Maximallänge der Pt100-Anschlussleitung beachten.),
 - Signalleitungen zum Klimaregler,
6. Wärmeisolierung der Wärme abgebenden Rohrleitungen außerhalb der Messstrecke im Raum, einschließlich der Temperaturfühler (Wärmeableitung vermeiden.).

Aus den Temperatur- und des Durchflussmesswerten wird in einem Wärmezähler-Rechenwerk die Wärmemenge berechnet. Die temperaturabhängigen Eigenschaften der Dichte und der Wärmekapazität des Wassers (Abbildung 10) werden dabei berücksichtigt.

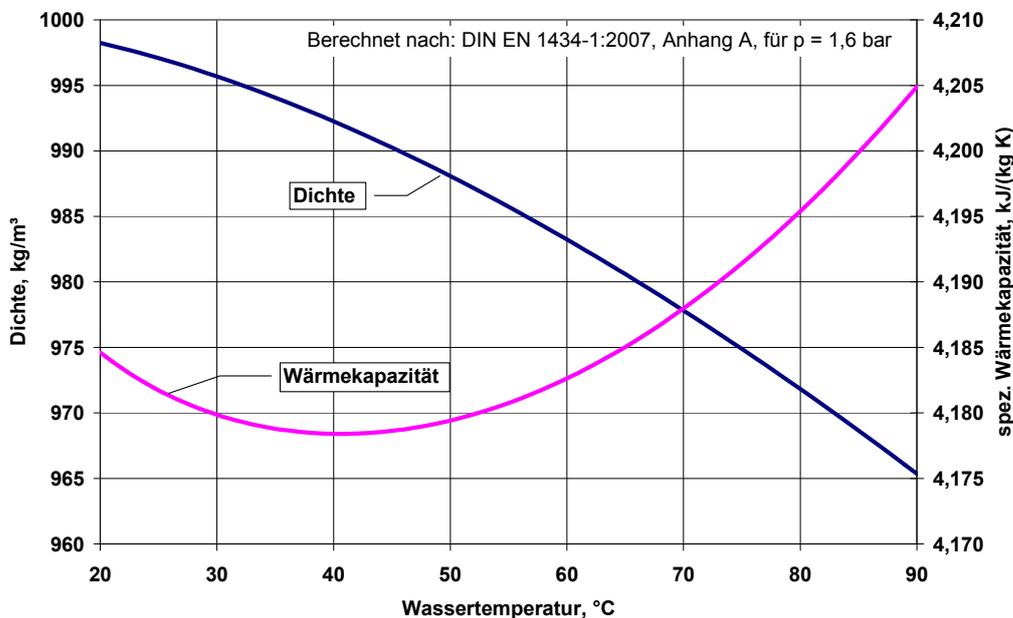


Abb. 10: Temperaturabhängige Dichte und Wärmekapazität von Wasser

Wenn eine Einzelmessung ohne Rechenwerk erfolgt und in einem Datenerfassungssystem die Wärmemenge errechnet wird, müssen die Stoffwerte entsprechend Abbildung 10 berücksichtigt werden. Dabei spielt es auch eine Rolle, ob der Durchfluss in der Vor- oder der Rücklaufleitung gemessen wird, wie es beispielhaft in Tabelle 7 gezeigt wird.

Tab. 7: Beispiel für den Einfluss der Durchflussmessung im Vor- bzw. Rücklauf auf die Stoffwerte der Wärmemengenmessung (DIN 1434-1, 2007, Anhang A); Normauslegung der Gewächshausheizung mit 90 °C Vorlauf- und 70 °C Rücklauf-temperatur bei 1,6 bar

Stoffwerte	Einheit	Durchfluss, gemessen in der Vorlauf-Rohrleitung (90 °C)	Durchfluss, gemessen in der Rücklauf-Rohrleitung (70 °C)
Dichte	[kg m ⁻³]	966,002	978,438
Spezifische Wärmekapazität	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	4,201689	4,184824
Spezifische Enthalpie Vorlauf	[kJ kg ⁻¹]	378,152	378,152
Spezifische Enthalpie Rücklauf	[kJ kg ⁻¹]	294,301	294,301
Wärmeoeffizient	[MJ m ⁻³ K ⁻¹]	4,050333	4,10261

Als Beispiel für die zu erwartenden Kosten einer Wärmemengenmessung soll hier für die Auslegung einer 1000-m²-Gewächshausabteilung die Messtechnik aufgeführt werden (Preisstand Sommer 2008).

Tab. 8: Beispiel der Kosten für Wärmezähler DN 100/125 (ohne Einbau – keine Marktübersicht)

Flügelrad: Fa. Aquametro, Bremen	Σ 2851 €
Woltmann-Warmwasserzähler RUBIN WPDH, DN 125, Q _p 100 m ³ /h	1711 €
Impulsgeber	148 €
Temperaturfühler (PT100 gepaart) Typ PLH 100/175 & Tauchhülsen	231 €
Wärmezähler Rechenwerk CALEC MB-4S	761 €
Magnetisch-induktiver Durchflussmesser: Fa. Krohne, Duisburg	Σ 1551 €
OPTIFLUX 1000, DN 100 Durchflussmessumformer Typ IRC 100 C	862 €
Temperaturfühler (PT100 gepaart) & Tauchhülse	220 €
Wärmemengenrechner AF 5000, Typ CALEC ST Netz	469 €
Ultraschalldurchflussmesser: Fa. Krohne, Duisburg	Σ 3032 €
Ultraschalldurchflussmesser Aufschnall-Version OPTISONIC 6000 Durchflussumformer Typ UFC 300 W	2343 €
Temperaturfühler (PT100 gepaart) & Tauchhülse	220 €
Wärmemengenrechner AF 5000, Typ CALEC ST Netz	469 €

In Tabelle 8 wird eine Auswahl möglicher Hersteller und Fabrikate gezeigt und sollte daher nur als beispielhafte Bewertung für die Messverfahren herangezogen werden. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, verursacht die magnetisch-induktive Messung die geringsten Kosten und Ultraschalldurchflussmessung mit mobilem Aufschnallfühler die höchsten. Bei einer Einbauversion liegen die Kosten niedriger.

5.3 Wärmemengenmessungen im Gewächshaus

5.3.1 Fehlergrenzen

Bei jeder Messung treten zufällige (statistische) und möglicherweise auch systematische Messfehler auf. Diese lassen sich nicht vorhersehen und sind nur durch eine sorgfältige Planung und Durchführung der Temperatur- und Durchflussmessung zu begrenzen. Hilfe dabei kann die Abschätzung der Fehlermöglichkeiten durch die Betrachtung der Messunsicherheiten der Messtechnik und deren Auswirkungen auf das Messergebnis bieten. Messunsicherheiten sind Fehler, die auftreten können jedoch nicht zwangsläufig auftreten müssen. Die Gerätehersteller geben meistens die Fehlergrenzen für die Messung an, bei definierten Einsatzbedingungen der Geräte. Mitunter werden sie als Genauigkeitsklassen bezeichnet, wobei z.B. Klasse 1 meist ein Prozent, die Klasse 2 dann zwei Prozent Messfehlergrenze bedeuten. Für die Wärmemengenmessung sollte mindestens die Geräteklasse 2 erfüllt werden. Die Auswirkung dieser möglichen Messungenauigkeiten kann mithilfe der Fehlerfortpflanzungsrechnung (z.B. entsprechend der VDI/VDE-Richtlinie 2620) für die zu ermittelnde Wärmemenge berechnet werden. Dabei unterscheidet die Abschätzung bei multiplikativer Verkettung der Einzelgrößen zwischen der maximalen relativen Fehlergrenze und der relativen statistischen Fehlergrenze des Ergebnisses. Die maximale relative Fehlergrenze ergibt sich aus der Addition der relativen Einzelfehler. Für eine 1 000-m²-Gewächshausabteilung wurden beispielhaft die Messeinrichtungen für einen magnetisch-induktiven Messumformer (MID) und eine Ultraschallmessung (US) ausgelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tab. 9: Zusammenstellung der maximalen Messunsicherheiten für eine angepasste Gewächshaus-Wärmemengenmessung bei Nenn- und minimaler Heizleistung nach DIN EN1434-1

Messfühler	Messfehlergrenze (MPE = maximal possible error)	Beispiel: Ausleg. 90 °C/70 °C	
		$\Delta\theta = 20 \text{ K}$ $q = q_p$	$\Delta\theta_{\min} = 3 \text{ K}$ $q_{\min} = 0,1 q_p$
Rechenwerk	$E_c = \pm \left(0,5 + \frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta\theta} \right)$	±0,6 %	±1,15 %
Pt100, gepaart nicht gepaart	$\Delta\theta_d - \Delta\theta_c = \pm 0,05 \text{ K}$ $\Delta\theta_d - \Delta\theta_c = \pm 0,48 \text{ K}$ $E_t = \frac{\Delta\theta_d - \Delta\theta_c}{\Delta\theta_c} 100 \%$	±0,25 % ±2,4 %	±1,7 % ±10,6 %
KROHNE OPTIFLUX 1100 (MID)	$E_f = \pm 0,4 \% \pm 1 \frac{mm}{s}$	$v_p = 3 \text{ m/s}$ ±0,5 %	$v_{\min} = 0,3 \text{ m/s}$ ±1,8 %
KROHNE OPTISONIC 6300 (US)	$E_f = \pm 1 \% \pm 0,2 \%$	$v_p = 5 \text{ m/s}$ ±1,2 %	$v_{\min} = 0,5 \text{ m/s}$ ±1,2 %
Kombiniertes Gerät	$E \leq (E_c + E_t + E_f)$		
	MID Pt1000,05K: MID-Pt1000,48K ¹⁾ : US Pt1000,05K: US-Pt1000,48K ¹⁾ :	±1,2 % ±3,5 % ¹⁾ ±2,0 % ±4,2 % ¹⁾	±5,0 % ±13,9 % ¹⁾ ±4,4 % ±13,3 % ¹⁾

¹⁾ Reduzierung des Messfehlers bei Nenndurchfluss bei Messung mit gepaarten Temperaturfühlern

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der mögliche maximale Fehler stark von der Genauigkeit der Temperaturfühler abhängt. Es ist zwingend, dass mit gepaarten Temperaturfühlern gemessen wird. Dadurch wird der Messfehler bei Nenndurchfluss und magnetisch-induktiver Messung von 3,5 % auf 1,2 % verringert und bei der Ultraschallmessung von 4,2 % auf 2,0 %. Bei minimalem Durchfluss verringert sich die Fehlergrenze von 13,9 % auf 5,0 % bzw. von 13,3 % auf 4,4 %. Diese Werte zeigen sehr deutlich, dass die Messunsicherheiten lastabhängig sind. Bei der Wärmemengenmessung im Praxisbetrieb mit variablen Volumenströmen und Temperaturdifferenzen muss dieser Umstand unbedingt beachtet werden.

Für ein typisches 1000-m²-Gewächshaus der Zierpflanzenproduktion mit Beet- und Balkonpflanzen wird eine Auslegungsheizleistung von etwa 250 kW benötigt. Bei einer konventionellen Heizung mit 90 °C Vorlauf- und 70 °C Rücklauf-temperatur, die mit einer Einspritzregelung ausgerüstet ist, wird eine Wärmemengenmessung mit magnetisch-induktivem Durchflussmesser der Genauigkeitsklasse 1 eingesetzt. Für die wärmebedarfsabhängige Regelung wird die Vorlauftemperatur gemindert bis zu einer minimalen Temperaturdifferenz von 3 K zwischen Vor- und Rücklauf. Weiter sollte die Temperaturdifferenz nicht abfallen, weil sonst die Temperaturmessgenauigkeit nicht mehr ausreicht. Danach wird der Durchfluss mittels einer drehzahlgeregelten Pumpe von 100 % über 50 %, 30 % bis auf 10 % reduziert, um die Wärmemengenmessung zu ermöglichen; dabei sollte die 10-Prozent-Grenze zur Erhaltung einer hinreichenden Messgenauigkeit nicht unterschritten werden. Liegt der Wärmebedarf niedriger, wird die Messung abgeschaltet, wodurch der mögliche Fehler für die Jahreswärmemenge unter 2 % liegt.

In Abbildung 11 ist dazu die Jahresdauerlinie des stündlichen Wärmebedarfs zusammen mit der Temperaturdifferenz bei Pumpenregelung zur Sicherstellung von mindestens 3 K dargestellt. Es wird deutlich, dass etwa 3 100 Stunden der 5 100 Jahresheizstunden über 3 K Temperaturdifferenz des Vor-/

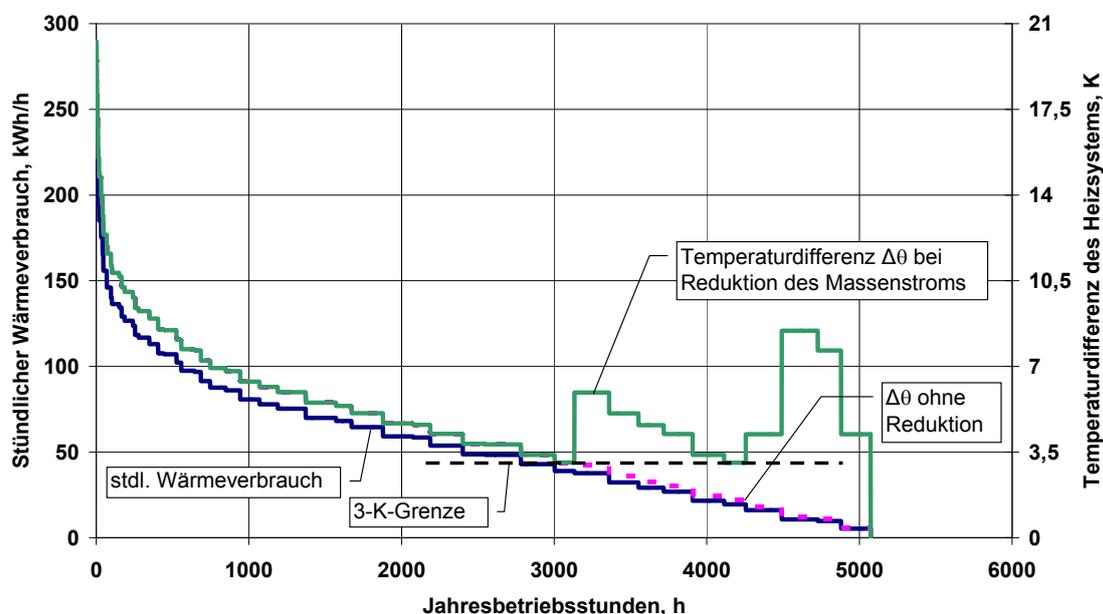


Abb. 11: Jahresdauerlinie des stündlichen Wärmebedarfs für das Gewächshausbeispiel (s. Text) und mit der Temperaturdifferenz Vor-/Rücklauf, wenn 3 K Differenz durch Pumpenregelung (100 % / 50 % / 30 % / 10 %) nicht unterschritten wird.

Rücklaufs bei voller Pumpenleistung aufweisen. Wird für weitere 2000 Stunden der Durchfluss auf minimal 10 % des Nenndurchflusses heruntergeregt, steigt bei abnehmender Heizleistung die Temperaturdifferenz beim Wärmetransport wieder über die 3-Kelvin-Grenze.

Ist die Messeinrichtung entsprechend dem obigen Beispiel ausgelegt, wird die in Abbildung 12 dargestellte relative statistische Messunsicherheit erreicht. (In der Praxis wird dieser Kurvenverlauf häufig nicht zu realisieren sein, da die Heizungssysteme häufig zu groß dimensioniert sind, sodass nur eine Temperaturdifferenz von ~ 10 K im Auslegungsfall erreicht wird.) Bei höherer Teillast als 16 % der Nennleistung wird die 3-Kelvin-Temperaturdifferenzgrenze nicht unterschritten. Wird der Durchfluss mittels der Pumpenregelung reduziert, kann die Heizleistung bis 2 % reduziert werden, ohne dass die Grenzen der relativen statistischen Messunsicherheit ± 5 % überschreitet.

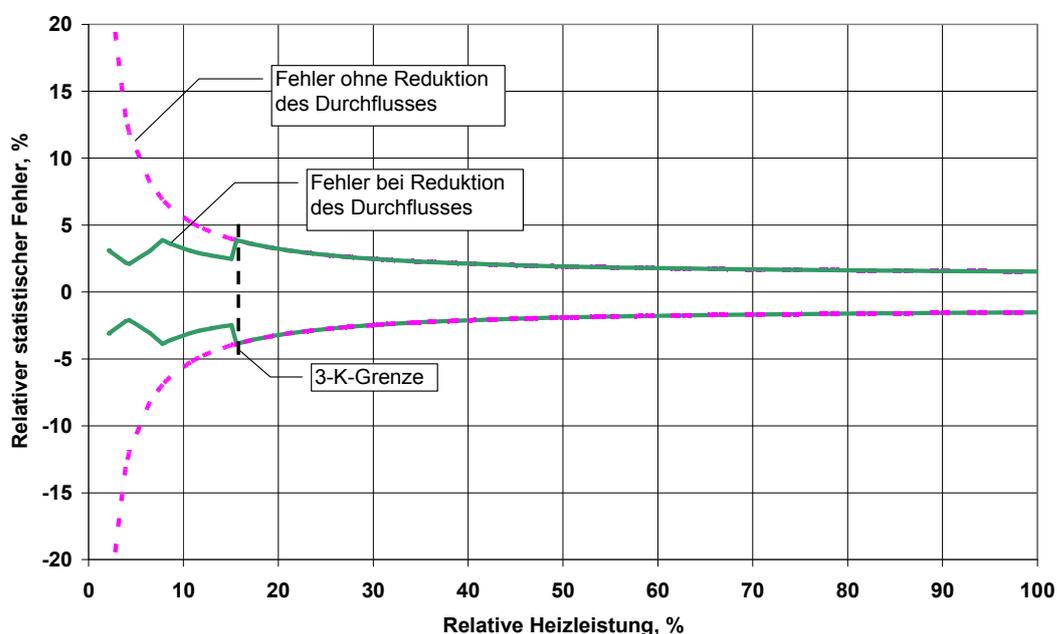


Abb. 12: Relative statistische Messunsicherheit bei wärmebedarfsabhängiger Regelung und Einhaltung von mindestens 3 K sowie Durchflussregelung bis minimal 10 % des Nenndurchflusses (100 % = Nenn-/Auslegungsleistung)

5.3.2 Empfehlungen für die Wärmemengenmessung

Für die Wärmemengenmessung in der Praxis kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

- Es muss ein Wärmezähler der Genauigkeitsklasse 1 eingesetzt werden.
- Für die Vor- und Rücklauf-Temperatur müssen gepaarte Temperaturfühler (Messunsicherheit $< 0,05$ K) verwendet werden. Die Temperaturfühler sollen in Tauchhülsen mit Wärmeleitpaste eingebaut sein.
- Die Heizungsregelung muss sicherstellen, dass keine Wärmemengenmessung bei weniger als 3 K Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf erfolgt.
- Der Durchflussmesser muss entsprechend den Regeln und Hinweisen des Herstellers ausgelegt und eingebaut sein.

- Die Heizungsregelung muss die Heizungspumpe so regeln, dass der kleinste Durchfluss nicht weniger als 10 % des Nenndurchflusses beträgt.
- Bei Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf von weniger als 3 K und geringerem Durchfluss als 10 % findet keine Wärmemengenmessung statt. Unter diesen Bedingungen ist sichergestellt, dass die statistische Messunsicherheit der Wärmemengenmessung nicht mehr als $\pm 5\%$ betragen wird.

5.4 Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten von Gewächshäusern

5.4.1 Fehlergrenzen

Grundlage der Wärmeverbrauchsmessung eines Gewächshauses ist eine exakte Wärmemengenmessung. Die Hinweise des vorherigen Kapitels müssen sorgfältig beachtet werden, da die Ergebnisse einer solchen Messung in die Auslegung und Bewertung von Gewächshauskonstruktionen oder Wärmeschutzanlagen eingehen. Als weitere Messgrößen kommen die Außen- und die Innentemperatur hinzu.

Für die Genauigkeit der Lufttemperaturmessung innerhalb und außerhalb des Gewächshauses ist der Anspruch von 0,05 K wie bei der Wärmemengenmessung nicht zu realisieren. Auch hier sollte das Fühlerlement möglichst exakt messen, jedoch liegt die Fehlerquelle in der Bestimmung des repräsentativen Messortes. In einem Gewächshaus ist immer mit Temperaturgradienten zu rechnen. Bewirkt wird die ungleiche Temperaturverteilung durch Fehler in der Heizungsanlage mit örtlich ungleichmäßiger Wärmezufuhr, auftriebsbedingter Luftzirkulation bei großen Gewächshausanlagen mit Gefälle oder durch Undichtigkeiten. Diese Temperaturunterschiede können in großen Gewächshäusern bis zu 1,5 K und mehr betragen, sodass die Wahl des Messortes für die Qualität der Messung entscheidend ist. Abhilfe schafft der Einsatz mehrerer Temperaturfühler, wobei die Wahl von 5 Messorten empfehlenswert ist: In den Eckbereichen außerhalb des Randeinflusses durch Stehwände bedingt und in der Gewächshausmitte für eine repräsentative Mittelwertbildung der Innentemperaturmessung. Als Bauart des Fühlers sollte in jedem Fall ein ventiliertes und strahlungsgeschütztes Gehäuse gewählt werden. Die Außentemperatur muss außerhalb des Einwirkungsbereichs des Gewächshauses oder der Betriebsgebäude erfasst werden. Vorzüglich wäre ein Messort über einer freien Grasfläche in 2 m Höhe in einem ventilierten Gehäuse. Die Bauart und das Sensorelement sollten der Innentemperaturmessung gleichen.

Wenn eine Genauigkeit der Lufttemperaturdifferenzmessung von $<\pm 0,5$ K erreicht wird, so ist von einer sehr guten Messung zu sprechen. Sinnvoll wäre es, auch hier eine „Paarung“ der inneren und äußeren Messfühler dadurch vorzunehmen, dass die Fühler vor dem Messeinsatz an einem gemeinsamen Ort bei unterschiedlichen Temperaturen auf Gleichgängigkeit überprüft und gegebenenfalls ausgetauscht oder durch Korrekturfaktoren abgeglichen werden.

Es bleibt noch das Problem des „Repräsentativen Messortes“ als Unsicherheit bestehen. Im Folgenden sind die Messfühler mit der maximalen Messunsicherheit der Temperaturmessung (MUT = Addition der maximal möglichen Fehler) gekennzeichnet, um die Falluntersuchungen eindeutig zu unterscheiden. Die Fehlergrenzen sind jedoch diejenigen für die relativen statistischen Fehler.

Wie Abbildung 13 zeigt, steigen die relativen statistischen Messfehlergrenzen einerseits mit der Messunsicherheit der Innen-Außen-Temperaturdifferenzmessung (MUT) und andererseits mit geringer werdender Temperaturdifferenz, da dann die Messungenauigkeiten der Fühler relativ stärker durchschlagen. Geht man von einer sorgfältigen Auswahl und Aufstellung der Messfühler aus, sodass die maximale Messunsicherheit durch die Messfühler (MUT) nur $\pm 0,5$ K betragen würde, so

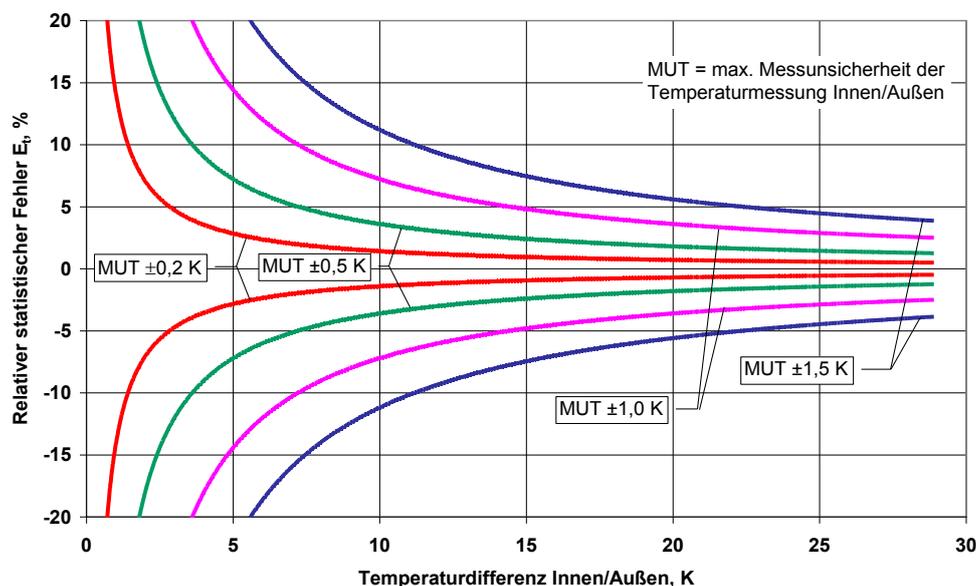


Abb. 13: Relative statistische Messfehlergrenze der Innen-/Au\ss en-Temperaturmessung bei maximaler Messunsicherheit (MUT) der Messf\ss hler und der Temperaturdifferenz am Gew\ss chshaus

kann man eine akzeptable Messunsicherheit nur bei Temperaturdifferenzen Innen/Au\ss en $> 7,5$ bis 10 K gew\ss hrleisten!

F\ss r die Bestimmung des W\ss rmeverbrauchscoeffizienten werden zwei unsichere Messergebnisse miteinander verrechnet – die W\ss rmemengenmessung und die Messung der Temperaturdifferenz Innen/Au\ss en. Auch hier wird f\ss r die Kennzeichnung der Varianten die Temperaturf\ss hlerklassifizierung mithilfe ihrer maximalen Messunsicherheit (MUT) vorgenommen. F\ss r die Berechnungen der gesamten Mess-Fehlergrenzen der W\ss rmemengen und Innen-/Au\ss en-Temperaturdifferenzen sind jedoch nicht die maximalen, sondern die jeweils relativen statistischen Ergebnisfehlergrenzen der Messungen von W\ss rmemenge und Temperaturdifferenz Innen/Au\ss en eingesetzt worden. Als Ergebnis zeigt Abbildung 14 den Verlauf der Fehlergrenzen in Abh\ss ngigkeit von der Heizleistung. Die Heizleistung variiert w\ss rmebedarfsabh\ss ngig; sie ist im Wesentlichen von der Au\ss entemperatur abh\ss ngig, da von ihr bei ann\ss hernd konstanter Innentemperatur die zugef\ss hrte W\ss rmemenge abh\ss ngt.

In Abbildung 14 werden die Ergebnisse der Abbildungen 12 und 13 zusammengef\ss hrt und man erkennt im Vergleich zur Abbildung 13 den starken Einfluss der Innen-/Au\ss en-Temperaturdifferenzmessung. Die Messunsicherheiten steigen mit fallender Heizleistung und gr\ss erer MUT. Ist z.B. die F\ss hlerunsicherheit $MUT \pm 1,5 \text{ K}$, so muss selbst bei Nennbetrieb, also unter Volllast der Heizung, eine Messunsicherheit von mehr als $\pm 5 \%$ in Kauf genommen werden. Will man also ausreichend Messzeit erreichen und dabei einen relativen statistischen Fehler von 5% nicht \ss berschreiten, so muss die relative Heizleistung gr\ss er als 30% – 40% mit einer Innen-/Au\ss en-F\ss hlerkombination von $MUT < \pm 0,2 \text{ K}$ bis $< \pm 0,5 \text{ K}$ zusammenkommen. Das bedeutet, dass keine Messung in die Auswertung aufgenommen werden darf, die bei einer Temperaturdifferenz Innen/Au\ss en mit weniger als 10 K ermittelt wurde. Daher ist zu schlussfolgern, dass die repr\ss entativen Innen- und Au\ss entemperaturen mit h\ss chstm\ss glicher Pr\ss zision erfasst werden m\ss ssen.

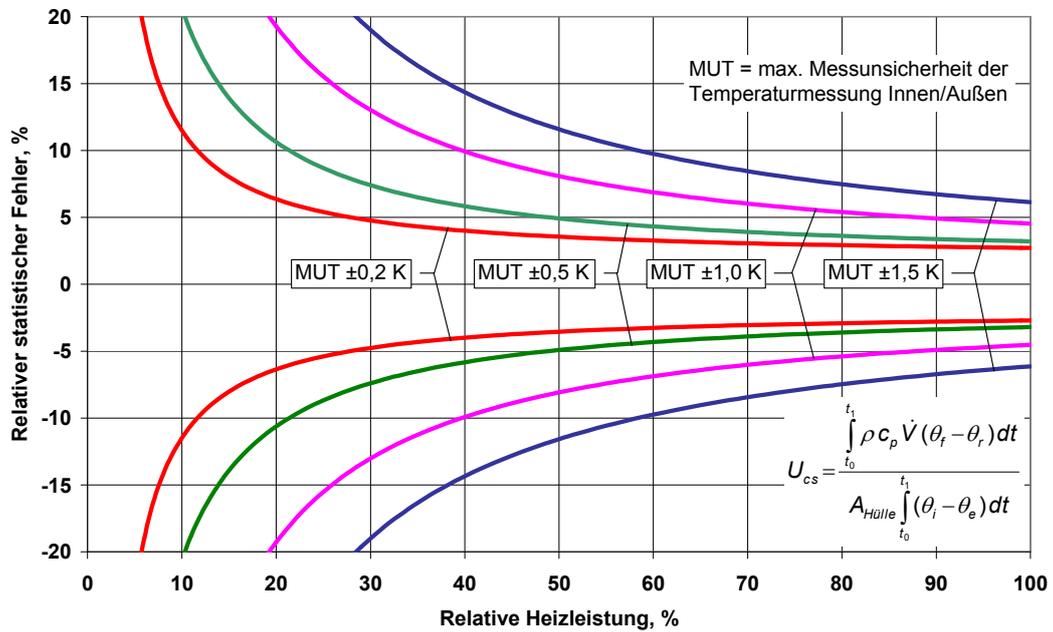


Abb. 14: Relative statistische Fehlergrenzen des W\u00e4rmeverbrauchscoeffizienten U_{cs} in Abh\u00e4ngigkeit von der Heizleistung der Gew\u00e4chshausheizung (100 % = Nenn-/Auslegungsleistung)

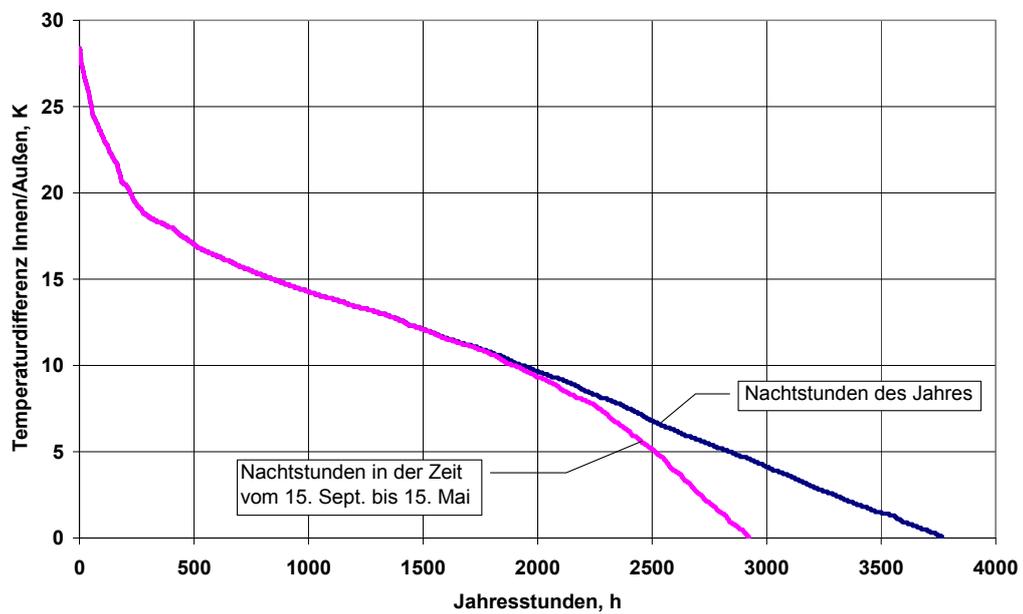


Abb. 15: Jahresdauerlinie der n\u00e4chtlichen Temperaturdifferenzen eines Gew\u00e4chshauses mit kulturtypischen Innentemperaturen f\u00fcr die Zierpflanzenproduktion (Hauptkulturen: Beet- & Balkonpflanzen, Weihnachtsstern)

5.4.2 Messung in den Nachtstunden

Die Forderung nach ausschließlicher Messung bei mehr als 10 K Temperaturdifferenz hat weitreichende Auswirkungen: Sie beschränkt die zeitliche Möglichkeit Wärmeverbrauchsmessungen durchzuführen. Häufig ist die Außentemperatur zu hoch, bzw. die Innentemperatur zu niedrig. Die Freilandtemperatur ist durch den saisonalen Witterungsverlauf unabänderlich. Die Innentemperatur könnte durch verstärkte Heizung angehoben werden, um eine höhere Temperaturdifferenz zu erreichen. Werden jedoch Kulturen für den Verkauf oder mit einer bestimmten kulturgebundenen Versuchsfrage angebaut, kann die Innentemperatur nicht beliebig angehoben werden. Für diese Art der Messungen sind nur Nachtstunden geeignet. Wie die Messmethodik es vorzeichnet, dürfen nur Zeiten ohne innere Wärmequellen und -senken im Gewächshaus für die Messung genutzt werden. Dadurch scheidet auch die ersten Nachtstunden aus, weil die Nachwirkungen solarer Wärmespeicherung abklingen müssen.

Wie aus Abbildung 15 ersichtlich, sind nur etwa 1 800 h im Jahr für eine Wärmeverbrauchsmessung geeignet, wenn die Bedingung von mehr als 10 K Temperaturdifferenz erfüllt sein soll. Diese Anzahl wird noch geringer, wenn die frühen Nachtstunden berücksichtigt werden.

5.4.3 Integrationsgrenzen

Ein Problem bereitet auch die Festlegung des Integrationsintervalls für die Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten. Durch die Zusammenfassung der Gleichungen für die Heizwärme und den Wärmeverbrauchscoeffizienten kann Folgendes geschrieben werden:

$$U_{cs} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \rho c_p \dot{V} (\theta_f - \theta_r) dt}{A_{H\ddot{u}lle} \int_{t_0}^{t_1} (\theta_i - \theta_e) dt} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

Sowohl die im Zähler der Gleichung stehende Wärmemengemessung, als auch die im Nenner stehende Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenbedingungen geschieht während eines festgelegten, gleichen Zeitintervalls t_0 bis t_1 . In der Praxis verändern sich die Witterungsbedingungen ständig und die nicht perfekte Klimaregelung versucht die Wärmezufuhr dem Bedarf anzupassen. Eine verlässliche U_{cs} -Wert-Bestimmung kann nur bei längeren Zeitintervallen und Anpassung der Auswerteziträume (s. Kapitel 4) an die Periode möglicher Regelschwingungen erfolgen.

5.4.4 Abhängigkeiten des Wärmeverbrauchscoeffizienten

Die in Messungen ermittelten U_{cs} -Werte müssen auf ihre Plausibilität geprüft und Fehlmessungen und Fehlinterpretationen möglichst ausgeschlossen werden. Dabei ist es hilfreich, die Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Einfach- und Mehrfachbedachungen unterscheiden sich in ihrem Wärmedurchlasswiderstand je nach Anzahl der Materiallagen und Dicken der Luft- oder Gasschichten. So wird eine Mehrfachbedachung stets einen geringeren U_{cs} -Wert aufweisen als eine Einfachbedachung. Die Folge ist eine höhere Glasinnentemperatur, wodurch die mögliche Kondensation herabgesetzt wird, da der Taupunkt erst bei deutlich niedrigeren Außentemperaturen eintritt. Wenn weniger Wasserdampf kondensiert, wird nicht nur die Luftfeuchte potenziell erhöht, sondern auch der Wärmedurchgang erheblich reduziert, da mit dem Kondensationsvorgang ein sehr effizienter Wärmetransport, auch Wärmeverlust, hervorgerufen wird.

Andererseits bedingen ein stark verdunstender Pflanzenbestand und möglicherweise feuchte Tisch- und Bodenoberflächen einen verstärkten Wärmetransport an die Hüllflächeninnenseite und erhöhen somit den U_{cs} -Wert. Dieser Effekt wird jedoch während der Nacht gemindert, weil das Licht die Verdunstung in der Pflanze steuert. Die relative Luftfeuchte ist als Verdunstungsmaß nicht brauchbar, da sie sich entsprechend der Wasserdampfung an den Blättern und der Wasserdampfabfuhr durch Kondensation und Luftwechsel an der Gewächshaushülle als Gleichgewichtsfeuchte einstellt. So kann sich eine hohe relative Luftfeuchte einstellen, wenn nur wenig Verdunstungsleistung vorliegt, aber die Glastemperatur hoch und der natürliche Luftwechsel niedrig ist. Andererseits bedeutet eine niedrige relative Luftfeuchte nicht, dass der latente Wärmestrom gering sei, da infolge einer starken Entfeuchtungsleistung an der Glasinnenseite/Wärmebrücken oder durch starken Luftwechsel die Wärmeverluste beträchtlich ansteigen sein können, was sich in einem erhöhten U_{cs} -Wert widerspiegeln wird.

Wie bereits erwähnt, erhöhen Undichtigkeiten den U_{cs} -Wert beträchtlich, insbesondere bei höheren Windgeschwindigkeiten, die den Luftaustausch befördern.

Einen großen Einfluss auf den Wärmeverbrauch hat die nächtliche Verwendung eines Energieschirms, der den Pflanzen-Standraum möglichst dicht vom Dachraum trennt. Damit werden der innenseitige Luftaustausch aus dem Pflanzenbestand zum Dach und der Wärmestrahlungsaustausch reduziert. Die Glasinnentemperatur wird gesenkt, der Windeinfluss auf den Undichtigkeitswärmeverlust wird vermindert. Der zusätzliche Wärmetransportwiderstand von der Gewächshaushülle zum Freiland mindert den U_{cs} -Wert.

Der Verlauf der Witterung beeinflusst den U_{cs} -Wert maßgeblich. Der Windeinfluss auf den Luftwechsel wurde bereits erwähnt. Zusätzlich erhöht zunehmender Wind den Wärmeübergang an der Dachaußenseite. Dies jedoch weniger bei Mehrfachbedachungen, da die Glasinnentemperatur weniger stark beeinflusst wird und häufig bei energiesparenden Mehrfachbedachungen mehr konstruktiver Aufwand für die Dichtigkeit von Gewächshäusern getrieben wird.

Auch die Bewölkung beeinflusst den Wärmeverbrauch von Gewächshäusern. Bei klarem Himmel verliert die Hüllfläche Wärme durch Abstrahlung an die kalten Gegenstrahlungsflächen der oberen Luftschichten. Es stellt sich eine niedrigere Glasinnentemperatur ein. Dies wird weniger der Fall sein, wenn eine Mehrfachbedachung eingesetzt wird, bei der sogar Wärme aus der Umgebungsluft zugeführt werden kann, was bei Bereifung (Kondensation der Außenluftfeuchte und Gefrieren) auch sichtbar wird. Auch der Einsatz einer emissionsmindernden Beschichtung der Glasaußenseite reduziert den Wärmeverlust, insbesondere bei klarem Himmel, weniger bei Bewölkung und gar nicht bei Regen, weil das Wasser die strahlende Oberfläche mit einem höheren Emissionsfaktor bildet.

Insgesamt zeigt die Glasinnentemperatur im Verhältnis zur Innen- und Außenlufttemperatur am besten an, in welche Richtung sich der U_{cs} -Wert bei den sich ändernden Einsatzbedingungen bewegt.

Wegen des großen Einflusses der Windgeschwindigkeit auf den Wärmeverbrauch werden die gemessenen U_{cs} -Werte eines Gewächshausversuches im Allgemeinen mittels eines linearen Regressionsansatzes in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ausgewertet. Tatsächlich streuen die Messwerte je nach Witterungs- und der anderen Einflussfaktoren um die Regressionsgerade. Dabei wird deutlich, dass bei Mehrfachbedachungen der Regressionskoeffizient und auch der Korrelationskoeffizient wegen der geringeren Abhängigkeit gegen Null gehen. Die verbleibenden Streuungen um die annähernd horizontal verlaufende Gerade sind durch andere Einflussfaktoren bedingt.

Um verschiedene Gewächshaussysteme zu vergleichen, wird meist als Bezugswert der U_{cs} -Wert bei 4 m/s Windgeschwindigkeit herangezogen.

5.4.5 Empfehlungen für die Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten

Vorraussetzungen für eine brauchbare Messung zur Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten eines Gewächshauses sind:

- einhalten der Empfehlungen für die Wärmemengemessung (S. 39).
- Messungen werden in der Nacht, nach Abklingen der Strahlungszufuhr während des Tages, bei möglichst stationären Betriebsbedingungen ausgewertet.
- Es müssen gleichartige, möglichst gepaarte Messfühler mit geringer maximaler Messunsicherheit für die Innen- und Außentemperatur eingesetzt werden.
- Die Innentemperaturmessung sollte aus der Mittelwertbildung von 5 Messfühlern in den Ecken und in der Mitte des Gewächshauses bestehen. Die Aufhängenhöhe sollte bei Grundbeet- und Tischkulturen in 1 m Höhe vorgenommen werden.
- Um die Messunsicherheiten klein zu halten, sollten Messungen nur mit einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur mit mehr als 10 K, bzw. bei mehr als 30–40 % der Auslegungsheizleistung vorgenommen werden.
- Während der Messungen darf keine Assimilationsbelichtung durchgeführt werden; dies wäre eine zusätzliche Wärmezufuhr.
- Die Einzelmesswerte der Wärmemenge und der Temperaturdifferenzen werden vor der Berechnung des U_{CS} -Wertes zu Mittelwerten über eine Periode aggregiert. Die Länge der Periode richtet sich nach den Regelschwankungen der Heizungsregelung, Wärmezufuhr und Innentemperatur und liegt erfahrungsgemäß im Bereich von mehr als 2 Stunden.
- Die gewonnenen Wärmeverbrauchscoeffizienten werden mittels einer Regressionsanalyse in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ausgewertet. Dazu muss eine ausreichend große Anzahl von auswertbaren Messstunden vorliegen, die sich über einen hinreichend großen Windgeschwindigkeitsbereich verteilen. Für Systemvergleiche wird im Allgemeinen der U_{CS} -Wert von 4 m/s Windgeschwindigkeit verwendet. Als Bezugshöhe für die Windgeschwindigkeitsmessung gelten 10 m.
- Zur Erklärung der Versuchsbedingungen, der Messergebnisse und ihrer Streuungen sollte der Pflanzenbestand und das Kultursystem dokumentiert, die Verdunstungsrate als „gering“, „mittel“ und „hoch“ klassiert werden. Hilfreich ist weiterhin die Beobachtung und Klassierung der nächtlichen Bewölkung als „klar“, „teilweise bewölkt“, „bedeckt“, „Regen“, „Dach außen betaut“ oder „bereift“, sowie das Ausmaß der Kondensation an der Dachinnenseite visuell einzustufen und festzuhalten. Daraus ergeben sich möglicherweise Korrekturfaktoren für den gemessenen U_{CS} -Wert.
- Wenn möglich, sollte die Glasinnentemperatur in etwa der Hälfte bis oberen Drittel der Dachseite durch einen aufgeklebten Messfühler gemessen werden.
- Eine Analyse der Undichtigkeit des Gewächshauses (Abklingkurve Indikatorgas, Blower-Door-Verfahren nur bei kleinen Anlagen möglich) in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit kann helfen, den Luftwechselwärmeverlust zu quantifizieren.
- Wenn ausreichend Datenmaterial vorliegt, sollten Korrekturen für die Einflüsse der nicht weiter untersuchten Witterungsbedingungen und Kultur- und Systemparameter vorgenommen werden. Ein physikalisch-technisch basiertes Gewächshausmodell kann helfen, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu erklären und den U_{CS} -Wert aufzubereiten.

5.5 Fazit

Die Wärmemengenmessungen im Gewächshausbetrieb werden zukünftig eine größere Rolle spielen, um die Wirtschaftlichkeit bestimmter Kulturen, Kulturverfahren und Betriebsweisen der Gewächshäuser zu ermitteln. Die verfügbare Messtechnik und deren Einsatz wurde beschrieben, wobei die Anforderungen und verbleibenden Messunsicherheiten abgeschätzt werden müssen. Es ist zu betonen, dass es sich um eine Abschätzung der möglichen Auswirkungen von gerätebedingten Ungenauigkeiten handelt. Diese Fehler können auftreten, müssen es aber nicht. Die Abschätzung dient dazu, die Treffsicherheit, Aussagefähigkeit und Abgrenzung von Systemalternativen zu ermöglichen.

Bei Messungen zur Bestimmung des Wärmeverbrauchscoeffizienten (U_{cs} -Wert) eines Gewächshauses steigen die Messunsicherheiten aufgrund der Schwierigkeit den repräsentativen Messort der Innentemperatur festzulegen. Hier müssen genauere Anforderungen an die Durchführung gestellt werden. Die Auswertung ergibt erfahrungsgemäß eine große Streuung der Einzelmesswerte gegenüber der in einer linearen Regressionsanalyse gefundenen Windabhängigkeitsgeraden. Die Streuungen sind bei einfachbedachten, undichten Gewächshäusern größer als bei gut isolierten. Die theoretischen Kenntnisse des Wärmeabstrahlungs- und Verdunstungs-/Kondensationseinflusses, sowie der unterschiedlichen Dichtigkeit der Gewächshaushülle sind derzeit noch nicht hinreichend mit praktischen Messungen quantifiziert worden. Hier ist noch ein erheblicher Forschungsbedarf, um bei der Gewächshausheizung ein höheres Maß der Energieeffizienz zu erreichen. Die Untersuchung der Messunsicherheit zur Bestimmung des U_{cs} -Werts wirft die Frage auf: Ist mit dieser Messmethodik überhaupt genug Trennschärfe erreichbar, um die Einflüsse anderer Faktoren als der Windgeschwindigkeit - vor allem bei Mehrfachbedachungen und Luftwechsel - messen zu können oder zu müssen? Hier könnten differenzierte und validierte Simulationsmodelle weiterhelfen.

6 Energieverbrauch – Statistische Bewertung

PROF. DR. THOMAS RATH, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

6.1 Einleitung

Zur Berechnung des Energieverbrauchs von Gewächshäusern liegen umfangreiche Rechenansätze vor, die in Normen, Handbüchern und Methodensammlungen verzeichnet sind. Softwaresysteme zur Umsetzung dieser Berechnungsverfahren stehen zur Verfügung und werden eingesetzt (z.B. HORTEx^(c)).

Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die notwendigen Kennzahlen solcher Berechnungsverfahren ermittelt werden sollen, bzw. wenn bestehende Gewächshäuser oder Kulturverfahren energetisch verglichen werden müssen. Hier existieren nur uneinheitliche Methoden, die einen Vergleich und damit die Nutzbarkeit der erzielten Messwerte erschweren. Aufgrund der Relevanz energietechnischer Fragen auf der einen Seite sowie den vielen technischen Neuerungen auf der anderen muss dieser Mangel dringend beseitigt werden.

6.2 Stand der Technik

Die energietechnische Bewertung von Gewächshausanlagen kann vereinfacht in zwei Verfahrensprinzipien unterschieden werden:

1. Das Gewächshaus wird als Gesamtsystem energetisch vermessen, d. h., es werden spezifische Wärmeverbrauchskennzahlen eines kompletten und im Betrieb befindlichen Gewächshaussystems versuchsstechnisch ermittelt. Am Ende der Untersuchungen werden die Messergebnisse durch den Zahlenvergleich mit anderen Gewächshäusern verallgemeinert. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass das Gewächshaussystem als ganzes und vor allen Dingen in praxisähnlichen Situationen bewertet werden kann. Nachteilig ist, dass aufgrund der hohen Spezifität der Messung (Jahreszeit, Kultur, Gewächshausgröße etc.) nur selten eine Übertragung auf allgemeine Praxissituationen erfolgen kann. Ein Vergleich mit anderen Messungen, die an anderem Ort und zu einer anderen Zeit stattfanden, sind eigentlich nicht oder nur sehr begrenzt zulässig.
2. Das Gewächshaussystem wird in Komponenten zerlegt, die jeweils einzeln oder im direkten Vergleich energetisch vermessen werden (z.B. Energieschirme, Klimaregelstrategien, Bedachungsmaterialien). Eine Bewertung des Gesamtsystems erfolgt, indem die Einzelkennzahlen mit mathematischen Verfahren zu einem Gesamtgewächshaussystem zusammengesetzt und simuliert werden. Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass der Vergleich einzelner Komponenten einfach und kostengünstig gestaltet werden kann. Zudem können z.T. Verfahrensvorschriften aus dem Hochbau zum Einsatz kommen (z.B. Normen zur Bestimmung von U-Werten oder Lichttransmissionskennzahlen). Nachteilig ist, dass eine Einbeziehung der Praxisbedingungen nahezu unmöglich ist und dass hierdurch eine begrenzte Übertragbarkeit auf andere Systeme existiert.

6.3 Zielsetzung

Im Folgenden werden Verfahren diskutiert, die oben aufgeführte Ansätze kombinieren. Dabei wird der Fokus auf die statistische Aussagekraft und Auswertung der Kennzahlen gelegt unter Verwendung der klassischen Parameter Mittelwert, Erwartungswert, Streuung und Messwertverteilung. Es ergeben sich folgende Anforderungen:

1. Die in der Praxis vorkommenden Gewächshäuser oder deren Einzelkomponenten müssen in Gruppen zusammengefasst werden, die energietechnisch ähnliche Systeme bzw. Komponenten darstellen. Dabei ist nicht nur die technische Ausrüstung der Gewächshäuser zu berücksichtigen, sondern alle mit dem Energieverbrauch in Verbindung stehenden Betriebsvarianten (einschließlich Klimaregelstrategien, Kulturen etc.). Der Vergleich der Gewächshaussystemgruppen muss mit numerischen Maßzahlen erfolgen, die messtechnisch oder theoretisch nach festen Regeln ermittelt werden. Die Anzahl und Auswahl der Maßzahlen müssen den Versuchsbedingungen angepasst werden.
2. Die Gruppeneinteilung und die Maßzahlen müssen so gewählt werden, dass die Streuung aller in der Praxis vorkommenden Gewächshausvarianten einer Gruppe möglichst klein ist. Ferner sollten die unter unterschiedlichen Bedingungen erzielten Maßzahlen der Gewächshäuser einer Gruppe möglichst dem tatsächlichen Mittelwert (Erwartungswert) dieser Gruppe entsprechen.
3. Die Gruppeneinteilung und die Maßzahlen müssen so gewählt werden, dass sie eine möglichst gute Trennung und Einteilung der verschiedenen Gewächshaussysteme ermöglichen („scharfe“ Unterschiede zwischen den Gruppen).

Beispielhaft werden nachfolgend die statistischen Kennzahlen auf ein Gewächshaus übertragen. Der Begriff Schnittblumen charakterisiert eine bestimmte Nutzung des Gewächshauses. Genauso unterstellt der Begriff Venlo eine bestimmte technische Ausstattung.

- Gewächshausgruppe: Schnittblumenvenlohäuser
- Maßzahl: Wärmeverbrauchswert U_{CS}
- Erwartungswert: Mittelwert aller U_{CS} -Werte der Schnittblumenvenlohäuser
in der Praxis
- Streuung: U_{CS} -Werte, die für alle Schnittblumenvenlohäuser gemessen wurden

6.4 Entwicklung eines Bewertungsverfahrens

Im Folgenden werden schrittweise auf der Basis der aufgeführten Zielsetzungen notwendige Grundzüge eines Bewertungsverfahrens entwickelt.

6.4.1 Schritt 1: Einsatz originärer Maßzahlen

In der ersten Spezifizierungsstufe des Verfahrens werden zur energetischen Bewertung Wärmemengemessungen über einen längeren Zeitraum im Gewächshaus durchgeführt. Die ermittelten Daten werden direkt zur Gewächshauscharakterisierung verwendet. Beispiel 1 stellt eine resultierende Bewertung dar.

Beispiel 1: Gewächshausbewertung mit originären (unbearbeiteten) Maßzahlen

Die Messung des Wärmeverbrauchs eines Gewächshaussystems im Winter in der Praxis ergab 5000 kWh/Monat. Dasselbe Gewächshaussystem benötigte im Herbst 500 kWh/Monat. Eine Forschungsanstalt testete das gleiche Gewächshaus und erzielte bei Messungen im Winter einen Energieverbrauch von 389 kWh/Monat.

Offensichtlich haben gleiche Gewächshausssysteme vollkommen unterschiedliche Ergebnisse erzeugt, obwohl sie technisch ähnlich konzipiert waren. Bei einem guten Verfahren hätten daher drei ähnliche große Maßzahlen erzielt werden müssen, die nahe am Erwartungswert für die jeweilige Gewächshausgruppe liegen müssten. (Wahrscheinlich hatte die Forschungsanstalt ein wesentlich kleineres Gewächshaus als der Praxisbetrieb.) Es kann also eine Fehlergleichung für das Verfahren aufgestellt werden:

$$\text{Ermittelte Maßzahl} = \text{Erwartungswert} + \text{Verfahrensfehler} + \text{Messfehler} + \text{Fehler (sonstige)}$$

Hierbei wird der Fehler durch eine falsche Gruppenbildung, durch die Wahl einer unzureichenden Maßzahl oder das Bewertungsverfahren an sich als „Verfahrensfehler“ zusammengefasst. Der Ausdruck „Messfehler“ charakterisiert den durch die Messung bedingten Fehler (Ungenauigkeit, Ausfall, fehlende oder unrepräsentative zeitliche und räumliche Auflösung). Alle darüber hinaus nicht näher differenzierbaren Abweichungen zwischen Erwartungswert und ermittelter Maßzahl werden mit „Fehler (sonstige)“ beschrieben.

6.4.2 Schritt 2: Einsatz normierter Maßzahlen

Das unbefriedigende Bewertungsverfahren wird verbessert, indem die Messungen normiert wird und sich auf standardisierte Größen (Zeitperiode, Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, Hüllfläche des Gewächshauses etc.) bezieht. Beispiel 2 fasst dies zusammen.

Beispiel 2: Gewächshausbewertung mit normierten Maßzahlen

Die Messung des Wärmeverbrauchscoeffizienten eines Gewächshausystems im Winter unter Praxisbedingungen ergab bei einer mittleren Temperaturdifferenz von 20 K (zwischen innen und außen) pro m² Hüllfläche über einen Messzeitraum von 3 Stunden im Mittel 300 Wh. Zur weiteren Normierung der Ergebnisse wurden anschließend die Daten auf 1 Stunde und auf eine Temperaturdifferenz von 1 K bezogen. Es ergab sich somit ein normierter Wärmeverbrauchscoeffizient von 5 Wh m⁻² K⁻¹ h⁻¹. Gleiche Messungen im Herbst ergaben 4,6 Wh m⁻² K⁻¹ h⁻¹. Beim Test in einer Versuchsanstalt wurden jedoch im Winter nur 3 Wh m⁻² K⁻¹ h⁻¹ gemessen.

Die Normierung hat die Vergleichbarkeit der Maßzahl deutlich verbessert. Trotzdem stellt sich die Frage, ob das Verfahren in dieser Stufe geeignet ist, quantitative Unterschiede zwischen Gewächshäusern messtechnisch herauszuarbeiten. Zumindest die offensichtlich fehlerhafte Übertragbarkeit von der Versuchsanstalt auf die Praxis muss analysiert werden. Hierzu wird wieder die Fehlergleichung des Verfahrens betrachtet:

$$\text{Ermittelte Maßzahl} = \text{Erwartungswert} + \text{Verfahrensfehler} + \text{Messfehler} + \text{Normierungsfehler} + \text{Fehler (unbekannt)}$$

Durch die Normierung der Maßzahl auf einheitliche Bezugsgrößen wurde der Verfahrensfehler deutlich verringert. Zusätzlich zu den bisherigen Fehlern trat ein weiterer möglicher Fehler durch eine unzureichende Normierung auf. In dem vorliegenden Fall wurden lineare Normierungen vorgenommen, die keine Wechselbeziehungen der Normierungsfaktoren voraussetzen. Ein lineares Einflussverhalten

der Temperaturdifferenz, der Hüllfläche und der Messdauer ist sicherlich in erster Näherung möglich. Im Einzelfall kann diese Linearisierung jedoch zur massiven Erhöhung des Gesamtfehlers führen. Zum Beispiel bedingen Gewächshäuser mit einer großen Hüllfläche ein vollkommen anderes thermisches Verhalten als kleine Versuchsgewächshäuser. Ebenso verändert sich das Grund-Hüllflächen-Verhältnis in der Regel nicht linear. Es ist kein Problem, schon auf dieser Verfahrensstufe die unvollständigen Standards physikalisch und technisch in Frage zu stellen. Trotzdem werden diese im Prinzip „nicht vollkommen logischen“ Normierungen seit Jahren eingesetzt, um die Gewächshaussysteme überhaupt miteinander vergleichen zu können.

6.4.3 Schritt 3: Optimierung durch Einbeziehung komplexer Modelle

In den bisherigen Schritten erfolgte noch keine Einbeziehung von Einflussfaktoren und Praxissituationen. Zur Verbesserung der Verfahren müssen noch weitergehende Standardisierungen integriert werden, die jedoch im Gegensatz zum vorherigen Schritt stark gekoppelt und nicht linear sind. Komplexe Normierungsmodelle werden notwendig. Dabei sollten besonders die nachfolgenden Faktoren berücksichtigt werden:

- Globalstrahlung und Wärmespeicherung
- Tag- und Nachtbetrieb
- Verdunstung und Feuchte
- Windgeschwindigkeit
- Bestandes- und Kulturführung

Beispiel 3 zeigt vereinfacht die Verwendung von Normierungsmodellen, ohne auf die Modelle selber einzugehen.

Beispiel 3: Integration von Normierungsmodellen

Der Wärmeverbrauch des Gewächshaussystems wurde, wie gefordert, ermittelt: Es wurden die zusätzlichen Randbedingungen der Messungen erfasst. Anschließend wurden die Werte mit Modellen auf standardisierte Bezugsgrößen umgerechnet (Hüllfläche = 10 000 m², Temperaturdifferenz zwischen innen und außen = 20 K, Messperiode = 45 h, relative Feuchte = 80 %, Windgeschwindigkeit = 4 m/s, Nachtbetrieb) durch spezifische Modelle.

Es ergab sich ein durchschnittlicher Wärmeverbrauchsbeiwert von 6 Wh m⁻² K⁻¹ h⁻¹. Dieser Wert galt in der Nacht für eine relative Luftfeuchte von 85 % und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

Durch diese Erweiterung des Verfahrens wurde erreicht, dass der Verfahrensfehler weiter verringert wurde. Die potenziellen Messfehler erhöhen sich jedoch, da weitere Daten erhoben werden müssen. Zusätzlich ergibt sich auch ein Fehler, der aus fehlerhaften Modellen resultiert. Die neue Fehlergleichung kann somit vereinfacht, wie folgt, beschrieben werden:

Messwert = Erwartungswert + Verfahrensfehler + Messfehler + Normierungsfehler + Modellfehler + Fehler (unbekannt)

Es wird deutlich, dass das letzte Verfahren eine wichtige Verbesserung gegenüber dem Ausgangsverfahren darstellt.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass der standardisierte Messwert möglichst nahe an dem Erwartungswert liegt, wenn möglichst viele Randbedingungen erfasst werden. In einigen Fällen führt aber das Hinzunehmen von neuen Parametern zu großen Problemen, da die Standardisierungsmodelle zu komplex, oder unscharf werden oder nicht auf die jeweilige Messsituation übertragbar sind. Hier ist der neue Modellfehler plus die Erhöhung des Messfehlers größer als die Reduktion des Verfahrensfehlers. Eine Hinzunahme solcher Messwerte scheint daher kontraproduktiv. Welche Faktoren, Modelle und Randbedingungen optimale Trennschärfen zwischen Gewächshausgruppen ermöglichen, ist noch nicht vollständig geklärt. Es gibt folgende grundsätzliche Überlegungen:

Hüllfläche a) bei Messung so groß wie möglich b) Werte auf 1 m ² normieren c) Untergrenze evtl. 500 m ²	Temperaturdifferenz a) bei Messung so groß wie möglich b) Werte auf 1 K normieren c) Untergrenze evtl. 15 K
Messdauer a) bei Messung so groß wie möglich b) am Ende Werte auf 1 h verdichten c) Untergrenze evtl. 100 h	Globalstrahlung a) bei Messung so klein wie möglich b) nur Nachtmessungen berücksichtigen c) Obergrenze evtl. 0 W m ⁻²
Wärmespeicherung a) bei Messung so klein wie möglich b) nur späte Nachtabschnitte berücksichtigen c) Obergrenze evtl. 5 h	Windgeschwindigkeit a) bei Messung möglichst keine Extremwerte b) Werte auf Mittelwert normieren c) angestrebter Mittelwert evtl. 3 m s ⁻¹
Verdunstung, Luftfeuchte a) so gering wie möglich b) Messung (wenn möglich) ohne Kulturen c) Messwerte auf standardisierte Feuchte, Kulturen umrechnen	Energieschirme a) System mit geschlossenem Energieschirm wie eigenes System behandeln b) alle Maßzahlen müssen für Tag und Nacht getrennt bestimmt werden c) Übertragung auf Nacht/Tagsituation mit Simulationen

6.4.4 Schritt 4: Bestimmung der Vergleichsmaßzahl durch Simulation

Werden die Faktoren berücksichtigt, ergeben sich Kennzahlen, die einen Vergleich von Gewächshausystemen ermöglichen. Um diese Kennzahlen auf Praxisbedingungen zu übertragen, muss in einem letzten Schritt mithilfe von Simulationsrechnungen ein einheitlicher Ganzjahreswert ermittelt werden (siehe Beispiel 4). Erst mit diesem Wert ist ein Vergleich mit anderen Systemen möglich.

Beispiel 4: Bestimmung der Vergleichsmaßzahl durch Simulation

In einer Versuchsstation wurden die Wärmeeigenschaften eines Gewächshautypes über eine Winterperiode ermittelt. Die Daten wurden gemittelt, normiert und mit Modellen auf Standardbedingungen umgerechnet. Anschließend wurde mit einem Simulationsprogramm eine Bewertungsmaßzahl für einen Standardstandort berechnet, die für das Gewächshaus unter vorgegebenen Betriebsbedingungen (z.B. Topfpflanzenganzjahreskultur) gilt. Es ergaben sich $234 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Dieser Verbrauchswert kann mit anderen verglichen werden, die nach exakt dem gleichen Bewertungsverfahren bestimmt werden. Detailwerte der Messungen können für eine tiefer gehende Parametrisierung und Kennzeichnung verwendet werden.

Erst nach der Realisierung der vier Schritte ist die Messung für praxisrelevante vergleichende Aussagen verwertbar. Die zur Durchführung der Schritte notwendige Gruppierung der Gewächshäuser und der zugrunde liegenden Betriebsbedingungen ergibt sich aus der eingesetzten Technik. Unterschiedliche Betriebsbedingungen müssen jedoch zu charakteristischen Gruppen zusammengefasst werden. Beispiele von Kulturprogrammen oder Betriebsgruppen existieren in der Literatur.

6.5 Fazit

Aufgrund der teilweise großen Spezifität bisheriger Messungen, ist ein Handeln hinsichtlich der Standardisierung von Gewächshausbewertungsverfahren notwendig. Ansonsten werden weiterhin Messungen durchgeführt, die aber z. T. unbrauchbar und nicht vergleichbar sind. Größere Probleme treten jedoch bei der Spezifizierung der Einflussfaktoren auf, da sich viele der Faktoren an der schwierig zu erfassenden Pflanze-Technik-Schnittstelle befinden. Bisher ist es nicht gelungen, ein in sich logisches und auf einer wissenschaftlichen Theorie aufgebautes Gesamtgebilde zu entwerfen. Diese unbefriedigende Situation wird durch heterogene Einschätzungen notwendiger Abstraktions- und physikalisch-biologischer Differenzierungsstufen verstärkt. Zukünftige Lösungen müssen daher wahrscheinlich auch weiterhin pragmatische Lösungen entwickeln. Auf jeden Fall sollte diese Stagnation überwunden werden.

7 Das besondere Problem der Feuchte

PROF. DR. UWE SCHMIDT, HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

7.1 Transport latenter Wärme im Gewächshaus

Zur Abschätzung des Wärmebedarfs von Gebäuden wird als treibende Kraft des Wärmeverlustes die Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur verwendet. Gewächshäuser verlieren neben der fühlbaren (sensiblen) Wärme auch Wärmeenergie durch den Verlust an Wasserdampf (Kapitel 3.3). Diese versteckte (latente) Wärme entsteht dadurch, dass bei der Verdunstung von Wasser der Oberfläche (Pflanzenblätter, feuchte Tisch- oder Bodenflächen), eine Energiemenge von ca. 2 500 kJ kg⁻¹ verdunstenden Wassers entzogen wird. Dieser latente Energiestrom steigt auf, wegen der geringeren Dichte von Wasserdampf gegenüber trockener Luft und entweicht durch Undichtigkeiten in der Bauhülle. Bei sehr dichten Häusern sammelt sich die Feuchte im Gewächshausraum, sodass die Taupunkttemperatur der Hüllflächen schnell ansteigt. Sind die Bedeckungsmaterialien kalt, so kommt es zur Kondensation. Die latente Wärme wird in sensible zurückgewandelt und über Wärmeleitung durch das Bedeckungsmaterial nach außen abgeleitet.

Latente Wärme ist im Gewächshaus fast immer ein Prozess des Wärmeverlustes. Der Heizleistungsbedarf eines Gewächshauses wird nach folgender Gleichung (VON ZABELTITZ, 1986) berechnet, wobei Φ die notwendige Heizleistung ist, um die Temperaturdifferenz zu Außenluft ($\theta_i - \theta_e$) aufrechterhalten wird.

$$\Phi = \frac{1}{R_{CS}} \cdot A_S \cdot (\theta_i - \theta_e) - A_g \cdot q_{r,e} \cdot T_r \cdot \eta_r \quad [\text{W}]$$

mit:	Φ	= Wärmestrom	[W]
	A_S	= Hüllfläche des Gewächshauses	[m ²]
	A_g	= Grundfläche	[m ²]
	$1/R_{CS}=U_{CS}$	= Wärmeverbrauchs­koeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
	$q_{r,e}$	= Energieflussdichte Globalstrahlung	[W m ⁻²]
	T_r	= Durchlässigkeit für Globalstrahlung	[-]
	η_r	= Wirkungsgrad der Energieumsetzung in fühlbare Wärme (Temperaturerhöhung)	[-]
	θ_i	= Innentemperatur	[°C]
	θ_e	= Außentemperatur	[°C]

Die Heizleistung wird am Tage um die durch Transmission T_r und Wärmewirksamkeit η_r veränderte Globalstrahlung $q_{r,e}$ gemindert. Im Wärmeverbrauchs­koeffizient R_{CS}^{-1} (früher k' -, jetzt U_{CS} -Wert) werden alle baulichen und betrieblichen Einflussgrößen berücksichtigt. Während der Einfluss des Windes auf den Wärmeverlust durch empirische Gleichungen einbezogen wird, wird der latente Energietransport bisher vernachlässigt. Ob dies zulässig ist, kann nur abgeschätzt werden, indem der Unterschied zwi-

schen dem Energiehaushalt eines leeren Gewächshauses und dem eines mit Pflanzen gefüllten Hauses ermittelt und bewertet wird.

Zur Einbeziehung beider Energieformen (sensible und latente Wärme) in die Wärmebedarfsrechnung ist die Nutzung der Enthalpie geeignet. Diese thermodynamische Zustandsgröße wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$h_{LD} = c_{pL} \cdot t_{LD} + x \cdot (c_{pD} \cdot t_D + r_0) \quad [\text{kJ kg}^{-1}]$$

mit:	h_{LD}	= spezifische Enthalpie der feuchten Luft	$[\text{kJ kg}^{-1}]$
	c_{pL}	= spezifische Wärmekapazität von trockener Luft	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
	c_{pD}	= spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
	r_0	= spezifische Verdunstungsenthalpie	$[\text{J kg}^{-1}]$
	t_{LD}	= Temperatur von feuchter Luft	$[\text{K}]$
	t_D	= Temperatur von Wasserdampf	$[\text{K}]$
	x	= Wassergehalt	$[\text{kg kg}^{-1}]$

Die Größe x beschreibt die Menge an Wasserdampf, deren latenter Energieanteil sich über diese Verdunstungsenthalpie in der Gewächshausluft befindet. Zur Visualisierung und zum besseren Verständnis dieser Zusammenhänge ist die Verwendung des Mollier-h,x-Diagramms für feuchte Luft sehr hilfreich. In diesem Phasendiagramm des Wasserdampf/Luftgemisches können Luftzustände dargestellt, Veränderungen durch Verschiebung des Zustandspunktes aufgezeigt sowie die Änderung des Energiezustandes von Luftmassen beschrieben werden.

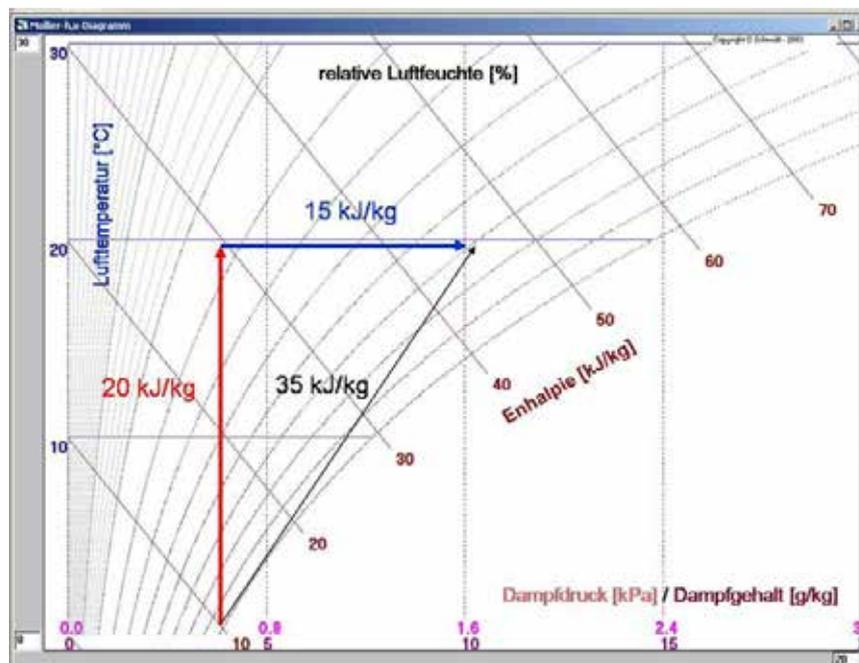


Abb. 16: Veränderung des Luftzustandes beim Heizen im Mollier-h,x-Diagramm

Steigt die Temperatur an, so erhöht sich auch die Dampfdruckdifferenz stark. Im Raum vorhandene feuchte Oberflächen, wie zum Beispiel hygroskopische Wände, Decken und Fußböden geben Wasserdampf ab und verbrauchen dafür einen Teil der für die Raumerwärmung benötigten Energie.

In Gewächshäusern können diese Verdunstungsmengen durch die Transpiration der Pflanzen große sensible Energiemengen binden.

Der Faktor η_r wird mit 0,5 angesetzt und zeigt, dass ca. die Hälfte der Globalstrahlungsenergie nicht wärmewirksam ist, d.h., nicht in sensible Wärme umgewandelt wird. Der größte Teil davon ist die, durch die Temperaturdifferenzmethode nicht erfasste, latente Energie (Kapitel 3.3).

So zeigt Abbildung 16, dass für die Erwärmung eines Gewächshauses von 0 °C auf 20 °C ohne Pflanzen 20 kJ kg⁻¹ Luft benötigt werden. In einem Haus mit einer Kultur mit hohem Blatt-/Grundflächenindex und einer relativen Luftfeuchte von über 70 % (in der Nacht durchaus üblich) sind jedoch 35 kJ kg⁻¹ notwendig.

Dies deutet darauf hin, dass die Pflanzentranspiration und die dabei freigesetzte latente Wärme nicht vernachlässigt werden darf. Die Frage nach der für die Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Temperaturdifferenz notwendigen Heizleistung kann nur durch Bewertung der Verluste an sensibler und latenter Wärme erfolgen. Je undichter ein Gewächshaus ist, umso mehr Wärme muss je Zeiteinheit eingetragen werden, um die notwendige Enthaldifferenz aufrechtzuerhalten.

Durch die Wahl der Temperaturdifferenz wird diese zwar technisch vorbestimmt, die Menge an entstehender latenter Wärme kann jedoch kaum gesteuert werden. Hier wirken die physikalisch treibenden Kräfte und die Größe der verdunstenden Flächen.

Abbildung 17 zeigt, dass auch in der Nacht Transpirationen von 2–3 mg m⁻² Blattfläche je Sekunde gemessen werden können. Die Anbautechnologie hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Nachttranspiration. Eine Transpirationsrate von durchschnittlich 3 mg m⁻² s⁻¹ ergibt bei einem Blatt-/Grundflächen-Verhältnis von 3 m² m⁻² eine latente Wärmemenge von 1 000 kJ m⁻² Grundfläche (Abbildung 18). Mit dieser Wärmemenge könnte die Temperatur eines pflanzenlosen Gewächs-

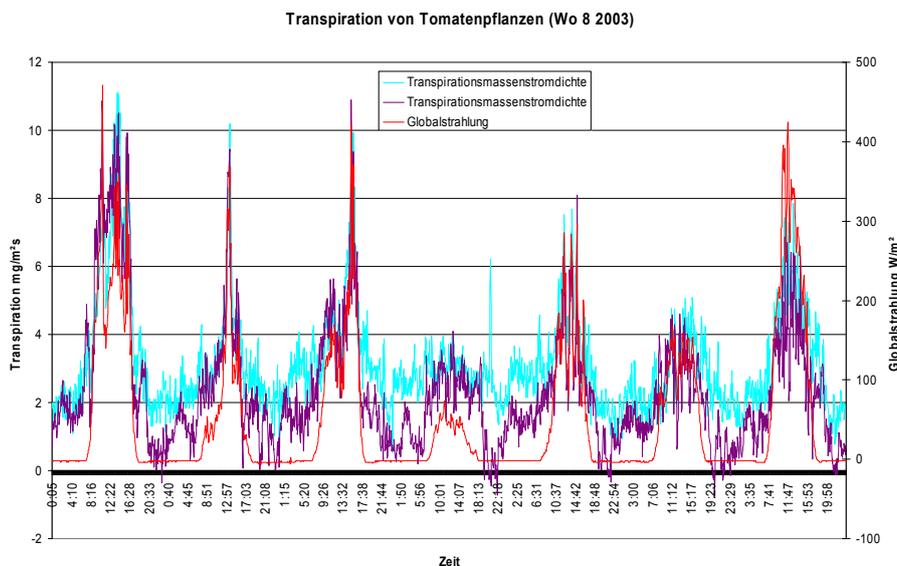


Abb. 17: Transpirationen in Tomatenbeständen; dunkelblau: Tomatenanbau in der Bodenrinne; hellblau: Tomatenanbau in der hohen Rinne

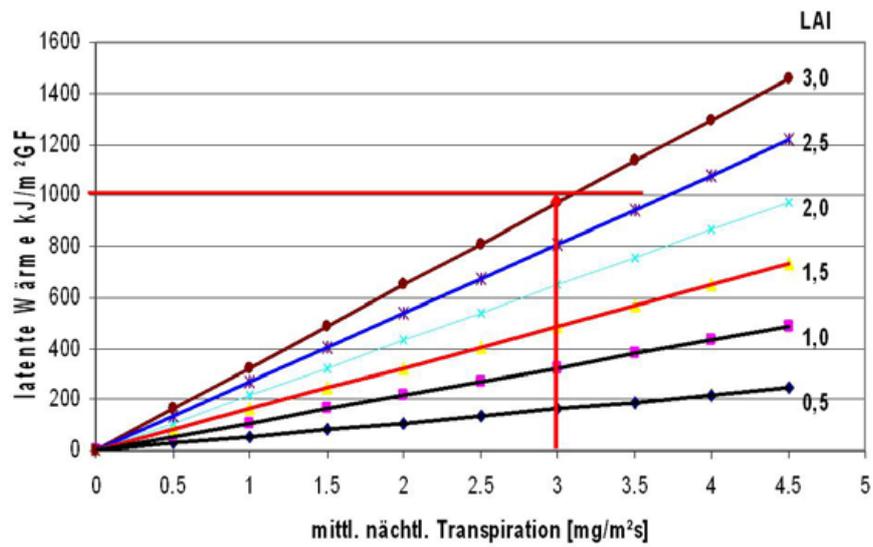


Abb. 18: Latente Wärme der Nachttranspiration einer Tomatenkultur bei verschiedenen Blatt/Grundflächenverhältnissen

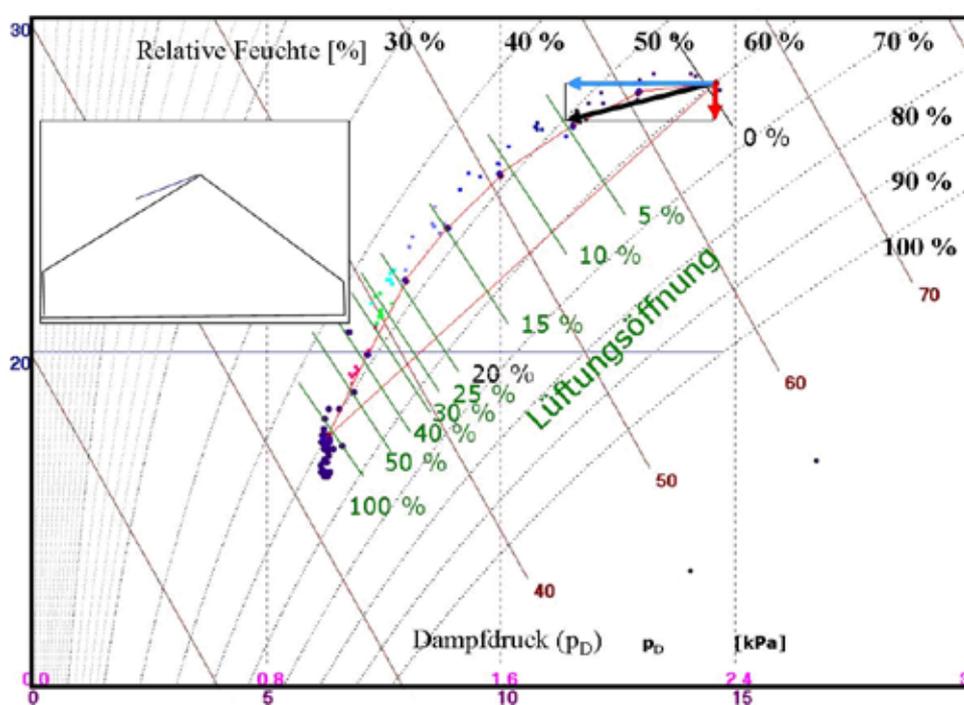


Abb. 19: Verschiebung des Zustandspunktes der Innenluft eines Gewächshauses beim Öffnen der Lüftung

hauses mit einem U_{cs} -Wert von $4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ um 6 K angehoben werden. Wichtig ist auch die Dynamik der Energieströme. Aus der Literatur und eigenen Messungen ist bekannt, dass bei relativ hohen Temperaturen und Feuchten der latente Energiegehalt beträchtlich ist. So wird bei Zumischung trockener, kalter Luft die latente Wärme stärker beeinflusst als die sensible. Abbildung 19 zeigt den Mischvorgang zwischen Außen- und Innenluft während der Öffnung einer Lüftungsklappe. Deutlich sichtbar ist, dass bereits bei kleinen Öffnungsweiten zunächst nur der Wasserdampf abgelüftet wird, während die sensible Wärme erst bei größeren Öffnungsweiten entweicht und die Temperatur stärker sinkt.

Dies führt dazu, dass auch durch Undichtigkeiten in der Bauhülle große Mengen an Wasserdampf entweichen und damit latente Energie verloren geht.

Für die exakte Kenntnis des notwendigen Wärmebedarfs ist außer dem Wärmedurchgang auch die Höhe der im Heizfall abgegebenen Wasserdampfmenge in Betracht zu ziehen. Auch ohne konkrete Messungen der Transpirationsmengen kann aus der Lage der Zustandspunkte bei baugleichen Gewächshäusern mit unterschiedlichen Kulturen eine Abhängigkeit der Verschiebung des mittleren nächtlichen Zustandspunktes bestimmt und daraus die Enthalpiedifferenz berechnet werden.

Die energetische Bewertung eines Gebäudes hängt dann von der Enthalpiemenge ab, die je Zeiteinheit in das Gebäude eingetragen werden muss, um einen gewünschten energetischen Zustand (Lage des Zustandspunktes im Phasendiagramm) aufrechtzuerhalten.

Um zukünftig die Wirkung des latenten Energieverlustes auf den Wärmebedarf von Gewächshäusern besser berücksichtigen zu können, gibt es zwei verschiedene Wege, die im Rahmen zukünftiger Projekte geprüft werden sollten.

7.2 Etablierung eines neuen Berechnungsverfahrens

Mit einer neu einzuführenden Größe (Enthalpieladezahl) ergibt sich damit der Wärmebedarf eines Gewächshauses aus dem Quotienten der Heizleistung Φ zur Enthalpiedifferenz zwischen Innen- und Außenluft ($h_{LD_i} - h_{LD_e}$).

$$\tau = \frac{\Phi}{L_g \cdot (h_{LD_i} - h_{LD_e})} \quad [1 \text{ h}^{-1}]$$

mit:	τ	= Enthalpieladezahl	[1 h ⁻¹]
	Φ	= Heizleistung	[W]
	h_{LD_i}	= spezifische Enthalpie der feuchten Luft, innen	[kJ kg ⁻¹]
	h_{LD_e}	= spezifische Enthalpie der feuchten Luft, außen	[kJ kg ⁻¹]
	L_g	= flächenspezifische Luftmasse	[kg m ⁻²]

Für die Umrechnung des luftmassenbezogenen Energiewechsels auf die jeweilige Gewächshausgrundfläche ist die flächenspezifische Luftmasse zu ermitteln:

$$L_g = \frac{m_L}{A_g} \quad [\text{kg m}^{-2}]$$

mit:	L_g	= flächenspezifische Luftmasse	[kg m ⁻²]
	m_L	= Luftmasse	[kg]
	A_g	= Grundfläche des Gewächshaus	[m ²]

Die Heizlast eines Gewächshauses ergibt sich dann aus der zeitlich aufrechtzuerhaltenden Enthalpiedifferenz.

$$\Phi = \tau \cdot L_g \cdot (h_{LD_i} - h_{LD_e}) \quad [\text{W}]$$

mit:	τ	= Enthalpieladezahl	[1 h ⁻¹]
	Φ	= Heizleistung	[W]
	h_{LD_i}	= spezifische Enthalpie der feuchten Luft, innen	[kJ kg ⁻¹]
	h_{LD_e}	= spezifische Enthalpie der feuchten Luft, außen	[kJ kg ⁻¹]
	L_g	= flächenspezifische Luftmasse	[kg m ⁻²]

Mit der Enthalpieladezahl τ werden dabei die Verluste an sensibler und latenter Wärme durch die Bauhülle beschrieben. Außer Konvektion, Wärmeleitung und sensibler Wärmeverlust über Luftaustausch (Vorgänge die der U_{cs} -Wert berücksichtigt) wird mit dem τ -Wert Modell auch die Kondensation und die Exfiltration von Wasserdampf erfasst (Abbildung 20).

Zur Ermittlung der latenten Energieumsätze in Gewächshäusern müssen Falluntersuchungen mit Kulturen unterschiedlich großer Blatt-/Grundflächen-Verhältnissen in vergleichbaren Gewächshäusern durchgeführt werden. Mit diesen Untersuchungen kann dann abgeschätzt werden, ob ein alternativer Berechnungsmodus erforderlich ist oder die entsprechenden Abweichungen durch einen Korrekturfaktor zum U_{cs} -Wert kompensiert werden können.

7.3 Einführung eines Korrekturfaktors

Unter Beibehaltung des für Hochbauten standardisierten Berechnungsverfahrens für den Wärmebedarf von Gewächshäusern ergibt sich die Notwendigkeit, die Berechnung nach dem U_{cs} -Wert um einen Korrekturfaktor zu ergänzen. Dieser sollte die nutzungsspezifischen Erhöhungen des Wärmebedarfs bei unterschiedlichen Kulturen gegenüber einem Gewächshaus ohne Pflanzen widerspiegeln. Eine erste Abschätzung hat bereits gezeigt, dass gegenüber leeren Häusern der Wärmebedarf bei Kulturen mit hohem Blatt-/Grundflächenanteil um 40–60 % steigen kann (Abbildung 21). Unter Berücksichtigung

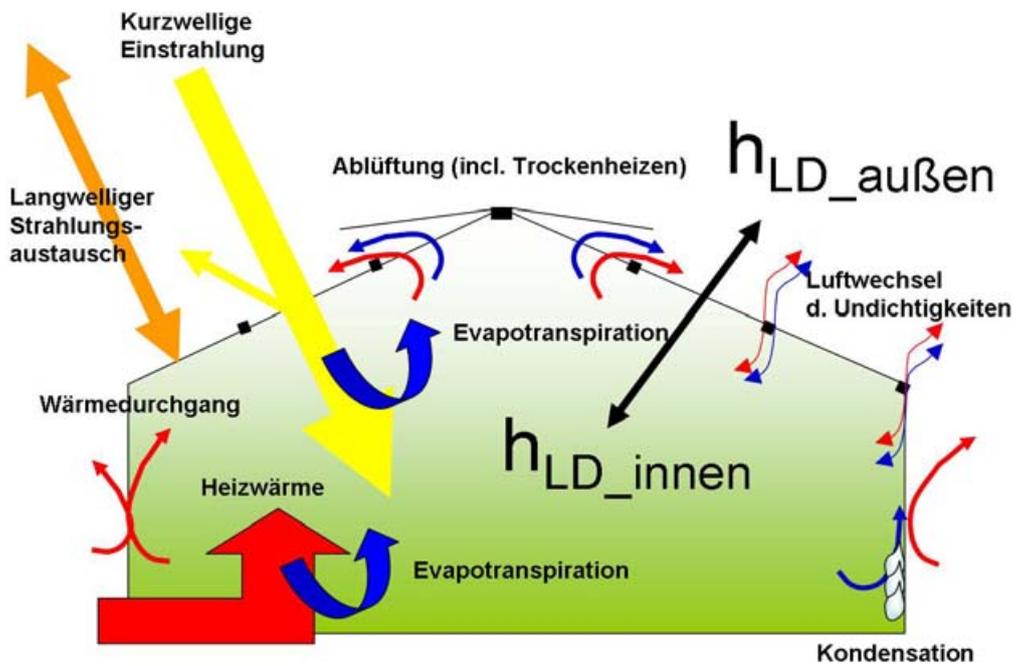


Abb. 20: Energiebilanz eines Gewächshauses basierend auf Enthalpiedifferenzen

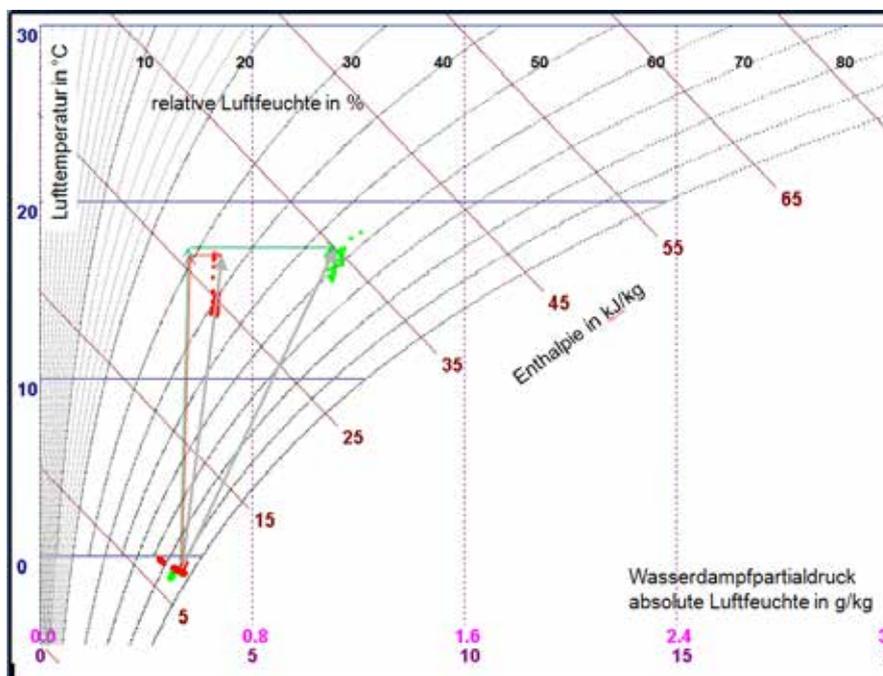


Abb. 21: Vergleich der Enthalpiedifferenzen in einem Gewächshaus mit Tomatenkulturen (grün) und ohne Pflanzen (rot) bei gleicher Innentemperatur

der Außentemperaturen können Korrekturfaktoren für unterschiedliche Kulturen abgeschätzt werden (Abbildung 22).

Inwiefern geänderte Berechnungsverfahren oder Zuschlagswerte die Präzision von Wärmelastberechnungen verbessern könnten, kann nur experimentell abgeschätzt werden. Dafür müssen Wärmeverbrauchsmessungen unter vereinheitlichten Bedingungen durchgeführt werden und die Werte von leeren Gewächshäusern mit den Werten von Gewächshäusern, in denen Pflanzen stehen, verglichen werden. Es ist zu ermitteln, ob sich bei den ergebenden Zuschlagsfaktoren Gruppierungen für verschiedene Kulturverfahren bilden lassen. Damit könnte bei gegebener technischer Beschreibung des Hauses und seiner Inneneinrichtungen der Heizenergiebedarf für die verschiedenen Kulturen besser abgeschätzt werden.

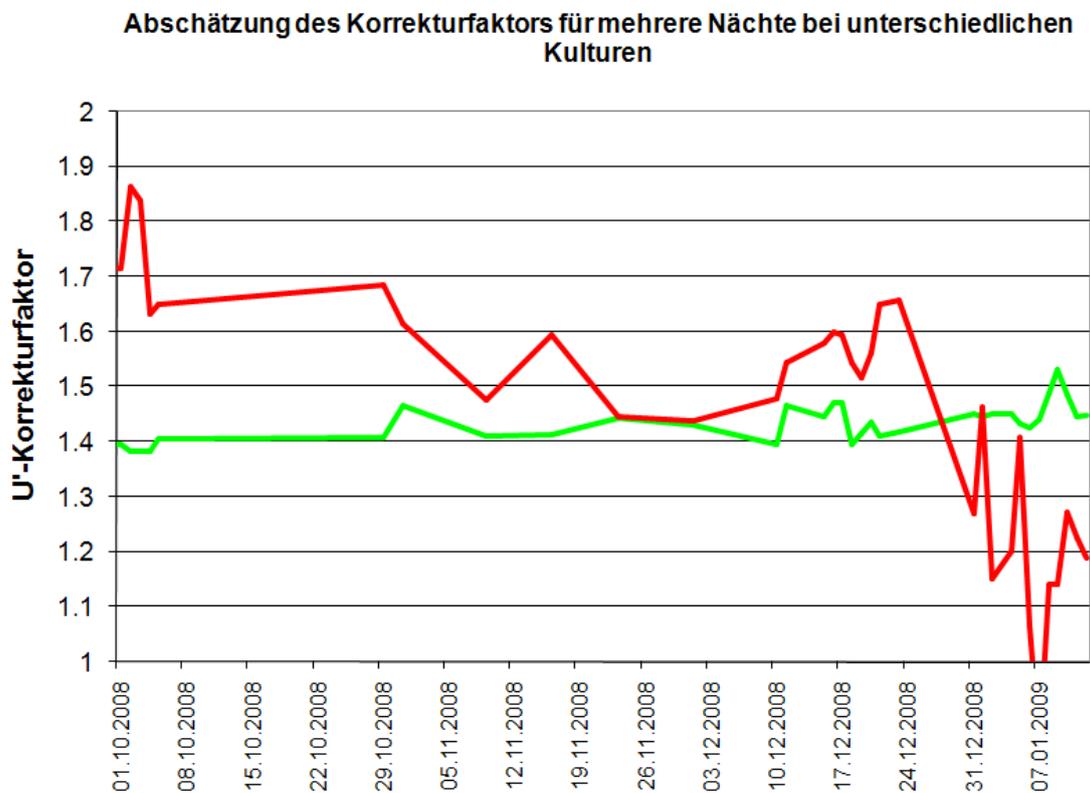


Abb. 22: Geschätzte Korrekturfaktoren des Wärmeverbrauchs bei einer Tomatenkultur (rot) und einer Poinsettienkultur (grün) gegenüber einem leeren Gewächshaus

8 Wärmeverbrauchsmessung – die Praxis

8.1 Sicht der Leibniz Universität Hannover

PROF. DR. HANS-JÜRGEN TANTAU, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Wärmeverbrauchsmessungen haben heute Bedeutung für die

- Energetische Bewertung neuer Bedachungsmaterialien (z. B. Glas-Folien-Kombination)
- Bewertung von Energieschirmsystemen
- Bewertung neuer Regelstrategien
- Bewertung energiesparender Systemansätze der Gewächshausnutzung

Energetische Bewertung neuer Bedachungsmaterialien

Es sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- ausreichende Genauigkeit
- Standardisierung
- Übertragbarkeit
- vergleichende Bewertung

Um diese Anforderungen zu erfüllen, sollten die Messungen nachts (möglichst) ohne Regelung bei ausreichender Temperaturdifferenz innen zu außen und bei eingestellter Heizleistung im Bereich kleinster Messfehler der Wärmemengenmessung durchgeführt werden. Alternativ sind auch Modellmessungen oder mathematische Modellberechnungen (z. B. HORTEX^(c)) denkbar.

Bewertung von Energieschirmsystemen

Es werden ähnliche Anforderungen an die Genauigkeit wie bei Bedachungsmaterialien gestellt. Allerdings ist hierbei auch das Langzeitverhalten während eines Jahres mit den Tag-Nacht-Wechseln und eventuellen Strategien zur Regelung der Luftfeuchte von Bedeutung. Deshalb müssen die Wärmeverbrauchsmessungen kontinuierlich durchgeführt werden. Daraus ergeben sich Probleme mit der Messgenauigkeit, wenn die Temperaturdifferenzen zu klein werden. Als Lösung bietet sich eine Kombination von Messung und Berechnung an. So können nachts bei geschlossenem Energieschirm Praxismessungen zur Ermittlung der Energieeinsparung durchgeführt werden. Mit diesen Daten erfolgt dann die Simulation des Verhaltens im Jahresverlauf (z. B. HORTEX^(c)).

Bewertung neuer Regelstrategien

Beim Einsatz neuer Regelstrategien können die Einsparungen klein sein, sodass eine erhöhte Messgenauigkeit erforderlich ist. Beim Betrieb der Wärmemengenmessung mit Regelung über einen langen Zeitraum muss aber mit größeren Messfehlern gerechnet werden; deshalb ist eine Messung kritisch zu bewerten. Besser ist eine Simulation der neuen Regelstrategien. Damit lassen sich mit ausreichender Genauigkeit auch Aussagen zu den geringen Differenzen im Heizenergieverbrauch machen.

Bewertung energiesparender Systemansätze

Hierbei treten ähnliche Probleme wie bei der Bewertung neuer Regelstrategien auf. Allerdings handelt es sich bei der Bewertung von Systemansätzen meist um multifaktorielle Untersuchungen, sodass die Bewertung des Einflusses einzelner Komponenten schwierig ist. Bei dieser Aufgabenstellung erscheint es erfolgreicher, zunächst unter definierten Bedingungen einzelne Systemkomponenten zu untersuchen. Anhand dieser Messergebnisse müsste das entsprechende Simulationsprogramm angepasst werden. Mit dem Simulationsprogramm lassen sich dann unterschiedliche Szenarien rechnen, um das Systemverhalten zu analysieren und auf ähnliche Systeme übertragbar zu machen. So lassen sich mit vertretbarem Aufwand bessere Aussagen zum Systemverhalten machen als mit langwierigen Messungen. Das Simulationsprogramm lässt sich eventuell auch einsetzen, um den Systemansatz zu optimieren.

Fazit

Wärmeverbrauchsmessungen sind auch weiterhin erforderlich. Wichtig ist eine sorgfältige Planung mit einer Fehlerabschätzung, gefolgt von einer sorgfältigen Auswertung und – falls erforderlich – einer Fehlerkorrektur (z. B. Fehlstellen). Bei komplexeren Fragestellungen sind Modellansätze (auch Modellmessungen) besser geeignet. Zur Untersuchung von Systemansätzen sind Simulationsprogramme besser geeignet als langwierige Messungen. Allerdings sind Praxismessungen erforderlich, um die Modellansätze zu parametrisieren und validieren.

8.2 Sicht der Fachhochschule Osnabrück

**PROF. DR. ANDREAS BERTRAM, CORNELIA KOBENIA, DIEDRICH WILMS,
FACHHOCHSCHULE OSNABRÜCK**

Problemstellung

Der Wärmestrom durch die Gewächshaushülle entzieht sich aufgrund der Vielzahl der äußeren und inneren Einflussfaktoren einer direkten Messung in einem standardisierten Prüfstand (MEYER 1981, MÜLLER 1987, MEYER und BERTRAM 2005). Das Heizungssystem hat die Aufgabe den Wärmeverlust durch die Gewächshaushülle (Transmission, Luftwechsel) durch die Wärmeabgabe in den Innenraum auszugleichen. Die Bestimmung der bauphysikalischen Eigenschaft der Hülle erfolgt deshalb indirekt über die Messung der Wärmeabgabe des Heizungssystems.

Um von der Wärmeabgabe der Heizung auf den Wärmestrom durch die Gewächshaushülle schließen zu können, darf während der Messung kein zusätzlicher Wärmestrom aus dem Boden oder den Bauteilen an den Innenraum abgegeben werden. Dies bedeutet, dass vor Beginn der Messperiode diese thermischen Massen abgekühlt sein müssen, falls der Innenraum durch direkte Sonneneinstrahlung erwärmt worden ist. Dies bedeutet auch, dass während der Messperiode die Innentemperatur konstant bleiben muss.

Der systemspezifische $U_{cs,g}$ -Wert bezieht sich auf die Grundfläche des Gewächshauses und erlaubt so eine vergleichende Einordnung der wärmetechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Gewächshäuser. Die Berechnung erfolgt in drei Schritten.

- **Messung:** Bei einer Warmwasserheizung durchströmt aufgewärmtes Wasser aus der Kesselanlage das Heizungssystem im Gewächshaus und gibt dabei Wärme (Strahlung, Konvektion) an den Innenraum ab. Durch die Messung des Massenstroms des Wassers und der Temperaturdifferenz zwischen Vor-

und Rücklauf lässt sich die aktuelle Wärmeabgabe der Heizung berechnen. Für die weitere Verrechnung wird ein Mittelwert über eine definierte Messperiode (Integrationszeitraum) gebildet.

- Berechnung: Für die Berechnung eines Einzelwertes, um den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert des Gewächshauses zu ermitteln, benötigt man im zweiten Schritt die Temperaturdifferenz (K) zwischen dem Innenraum und dem Außenraum und die Gewächshausfläche (m^2).
- Bewertung: Zum Abschluss muss aus einer für die angestrebte Trennschärfe ausreichenden Anzahl von Einzelwerten der systemspezifische $U_{cs,g}$ -Wert für das betrachtete Gewächshaus berechnet werden.

Messverfahren

Durchfluss:

Die Durchflussmessverfahren werden übersichtlich in Kapitel 6 behandelt. Hier soll vertiefend auf das Ultraschallmessverfahren eingegangen werden, da es die Messung in Praxisbetrieben mit vergleichsweise geringem Messaufwand ermöglicht.

Um den Durchfluss möglichst schnell messen zu können, wurde ein mobiles Ultraschalldurchflussmesssystem verwendet: das Optisonic® 6300 der Firma Krohne Messtechnik. Der Vorteil ist, dass die Messung ohne Kontakt mit der Flüssigkeit erfolgt und dadurch vor Korrosion, Druck und Verunreinigung des Messstoffes geschützt ist. Außerdem kann dieses Gerät ohne Unterbrechung des Heizprozesses installiert und in Betrieb genommen werden. Das Gerät besteht aus dem Aufschnallsensor Optisonic 6000, welcher direkt mit Spannbändern auf den Heizrohren befestigt wird. Dieser besteht aus zwei Ultraschallköpfen, die jeweils als Sender und/oder Empfänger dienen und die Werte direkt dem Durchflussumformer UFC 300 W zusenden. Mithilfe von Rohrschellen werden die zwei Sensorköpfe direkt auf die Rücklaufrohre des Heizsystems montiert und am Umformer wird der gemessene Durchfluss in - je nach Einstellung - in l/s, l/min, m^3/h angegeben. Der Umformer schickt die Daten per Impuls unmittelbar zur

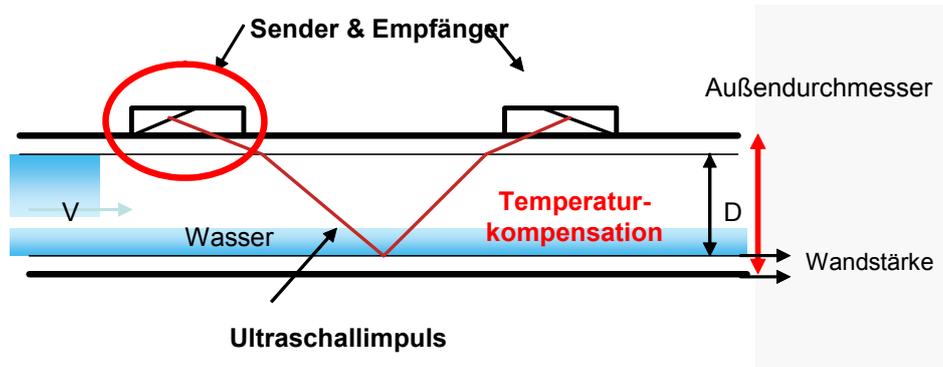


Abb. 23: Messprinzip eines Ultraschalldurchflusssensors

Messdatenerfassung. Der Messfehler für den Volumenstrom wird vom Hersteller mit $< 3\%$ bei 2"-Rohren und mit $< 1\%$ bei kleineren Rohren angegeben.

Der Ultraschalldurchflusssensor besteht aus zwei Messköpfen, die beide als Sender und als Empfänger dienen (Abbildung 23). Das Prinzip der Messung ist das sogenannte Laufzeit-Differenzverfahren. Dabei werden zwei Ultraschallwellen in das zu messende Medium geschickt. Die Schallwelle (S1) breitet sich in Fließrichtung schneller aus als die Schallwelle (S2) in entgegen gesetzter Richtung. Beide Lauf-

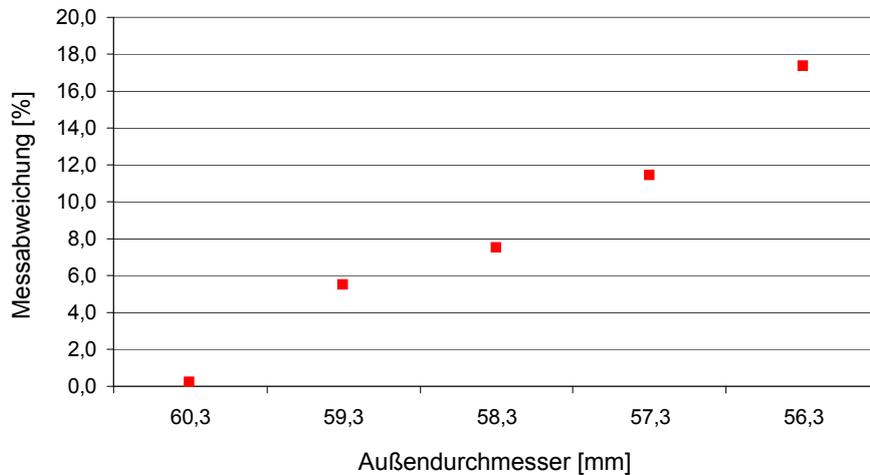


Abb. 24: Ultraschalldurchflussmessung: Messabweichung in Prozent bei Berücksichtigung eines falschen Außendurchmessers des Rohrs (richtiger Wert 60,3 mm)

zeiten werden kontinuierlich gemessen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit des Mediums ist proportional zur Laufzeitdifferenz der beiden Schallwellen (S2-S1). Um das Durchflussvolumen pro Zeit zu ermitteln, wird die mittlere Fließgeschwindigkeit mit dem Durchmesser des Rohrs multipliziert. Für die Berechnung des Massenstroms wird die Dichte des Mediums in Abhängigkeit von der Temperatur benötigt.

Um ein verwertbares Signal zu bekommen, ist es wichtig, auf einen guten Kontakt zwischen den Messköpfen und dem Rohr zu achten. Dafür werden eventuelle Lacktropfen abgefeilt und es wird ausreichend Koppelfett aufgebracht. Eine Kontrolle des Kontakts nimmt das Messgerät durch die Ausgabe der aktuellen „Signalstärke“ selbst vor. Je Heizungskreislauf wird ein Sensor im Rücklauf angebracht. Um die Sensoren regelmäßig vor Ort zu überprüfen, werden diese vor jedem Messzyklus in Reihe auf ein Heizungsrohr angebracht und die Messwerte verglichen.

Für die Berechnung des Durchflusses wird zusätzlich der Innendurchmesser des Rohrs benötigt. Dies erfolgt indirekt über die Messung des Außendurchmesser und der Wandstärke. Messfehler führen zu erheblichen Messabweichungen bezüglich des errechneten Durchflusses (Abbildung 24). Der Außendurchmesser wird deshalb im aktuellen Forschungsprojekt mit einer Schublehre gemessen und der Messwert dann anschließend mit der entsprechenden DIN für nahtlose Stahlrohre (DIN EN 10220) abgeglichen. Bei Abweichungen (z. B. Lackierung) wird der nächstliegende Wert der DIN Tabelle genommen.

Für die Messung der Wandstärke wird ein Messgerät auf Ultraschallbasis verwendet (UTG-Alpha®, SaluTron®-Messtechnik GmbH). Messfehler haben auch hier einen deutlichen Einfluss auf den errechneten Durchfluss (Abbildung 25). Deshalb wird der Messwert mit der maßgeblichen DIN für nahtlose Stahlrohre (DIN EN 10220) verglichen und gegebenenfalls an den nächstliegenden Normwert angeglichen.

In der weitergehenden Verrechnung der Messwerte wird noch eine Korrektur der Wasserdichte in Abhängigkeit von der Wassertemperatur vorgenommen (VDI Wärmeatlas 2006).

Für die Messung der Temperatur kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren in Frage. Wegen ihrer hohen Genauigkeit werden im aktuellen Forschungsprojekt Thermoelemente eingesetzt.

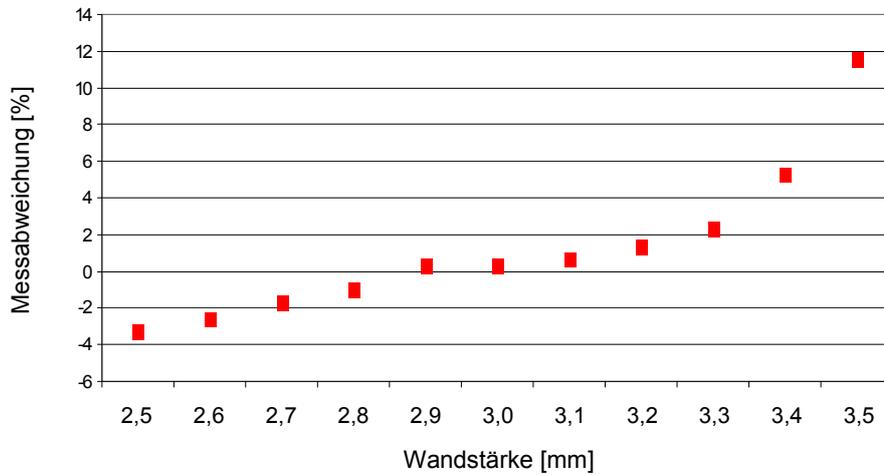


Abb. 25: Ultraschalldurchflussmessung: Messabweichung in Prozent bei Berücksichtigung einer falschen Wandstärke des Rohrs (richtiger Wert 3,0 mm, Rohraußendurchmesser 60,3 mm)

Die Messung der Wassertemperatur des Vor- und Rücklaufs des Heizungssystems kann direkt über eine Tauchhülse oder indirekt über einen angelegten Sensor (Anlegefühler) gemessen werden. Bei einem Anlegefühler sollte auf einen guten Kontakt des Sensors mit dem Rohr geachtet werden. Um Ableitungsverluste des Thermoelementdrahts zu minimieren, sollte dabei nicht nur die Messspitze sondern auch ein Stück des Drahts (im aktuellen Projekt > 10 cm) Kontakt zum Rohr haben. Eine darüber angebrachte Isolierung (im aktuellen Projekt 3,0 cm) sorgt dafür, dass sich die Temperatur des Thermoelements der Wassertemperatur im Rohr nahezu annähert (Abbildung 26).

Mit dem Anlegefühler lässt sich der Messfehler gegenüber einer Tauchhülse minimieren. Bei ausgesuchten, gepaarten Messfühlern für die Vor- und Rücklauftemperaturmessung tritt ein möglicher Messfehler

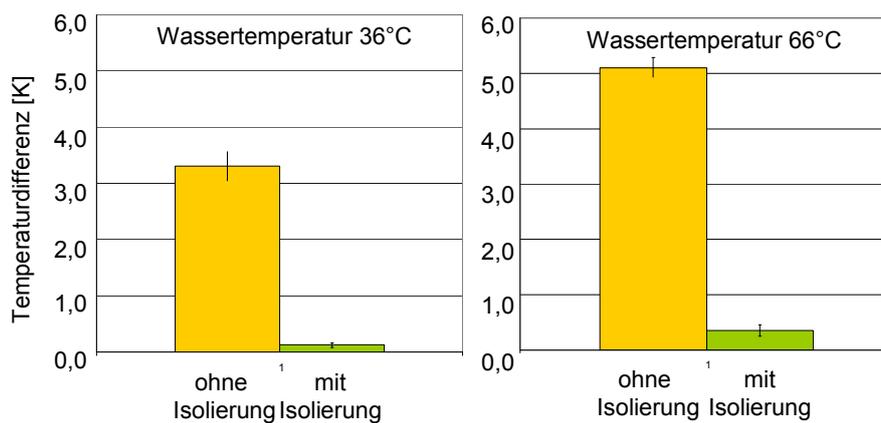


Abb. 26: Messabweichung in Kelvin zwischen der Temperaturmessung mit einer Tauchhülse und einem unisolierten bzw. einem isolierten Anlegefühler (Thermoelement) bei unterschiedlichen Rohrtemperaturen

artig auf. Somit verringert sich der Einfluss eines systematischen Fehlers bei der Wärmemengenberechnung, da die Temperaturdifferenz zur Anwendung kommt.

Für die Messung der Lufttemperatur werden zur Minimierung der Messfehler strahlungsgeschützte und ventilierte Sensoren empfohlen. Im Freiland lässt sich die Ventilation des Sensors nur mit erheblichem Aufwand sicherstellen. Da für die Berechnungen nur die nächtlichen Werte benötigt werden, wurde bei den Messungen auf eine aktive Belüftung der Sensoren verzichtet. Der Sensor ist an einer Wetterstation in 2 m Höhe angebracht. Bei den Messungen wurde für die Beurteilung der Wärmestrahlung der Atmosphäre an der Wetterstation zusätzlich ein ungeschützter, auf einem Styroporblock aufgebrachter freier Sensor eingesetzt. Der Styroporblock schirmt den Sensor von der Wärmestrahlung des Bodens ab. Dadurch kühlt der Sensor mit abnehmender Wärmestrahlung der Atmosphäre zunehmend unter die Lufttemperatur ab. Ein klarer Himmel sorgt so für vergleichsweise hohe Temperaturdifferenzen zwischen dem geschützten und dem ungeschützten Sensor. Damit soll im Forschungsprojekt der Einfluss des Bewölkungsgrads des Himmels auf den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert beurteilt werden. Für die Messung der Wärmestrahlung der Atmosphäre gibt es entsprechend präzise Sensoren. Da es sich im Rahmen dieses Forschungsprojekts um einen Testversuch bezüglich dieses Einflussfaktors handelte, wurde aus Kostengründen mit einem nicht standardisierten Sensor gearbeitet.

In Praxisbetrieben kommt es im Heizungsfall meist zu horizontalen Temperaturunterschieden. Damit wird es notwendig, zur Bestimmung der Innentemperatur mehrere Messsensoren über die Gewächshausfläche zu verteilen. In den aktuellen Messungen werden deshalb 5 Sensoren in Würfelanordnung (4 Eckpunkte, 1 Mittelpunkt) unmittelbar über dem Pflanzenbestand angebracht.

Die Windgeschwindigkeit wird mit einem Windwegmesser in 10 m Höhe auf der Wetterstation gemessen.

Berechnung

Bei der Berechnung der systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Werte müssen grundsätzlich die Randbedingungen im Außen- und im Innenraum berücksichtigt werden.

Bereits aus früheren Forschungsprojekten ist bekannt, dass die Witterungsbedingungen im Außenraum den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert eines Gewächshauses beeinflussen können. Die sind insbesondere die Luftbewegung und die Wärmestrahlung der Atmosphäre. Zumindest für die Berücksichtigung der Luftbewegung wurde deshalb ein statistisches Verfahren für die Berechnung des systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes entwickelt. Dieses Verfahren erfordert allerdings eine große Anzahl an Messwerten und führt zu einem enormen personellen und zeitlichen Aufwand. Es ist aber auch bekannt, dass bei geschlossenen Energieschirmen zumindest der Einfluss der Windgeschwindigkeit stark abnimmt. Die systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Werte werden in dem aktuellen Forschungsprojekt deshalb nur für Gewächshäuser mit geschlossenem Energieschirm bestimmt. Die Windgeschwindigkeit wird mitgemessen, um den vermuteten geringen Einfluss auf den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert auch belegen zu können.

Für die Berechnung des systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes muss die notwendige Mindestanzahl der Messungen und ein geeigneter Integrationszeitraum für einen Einzelwert festgelegt werden. Bisher ist es üblich, für den Integrationszeitraum eine Messnacht festzulegen. Eine Verkürzung des Messzeitraums (mehrere Messwerte pro Messnacht) könnte den Aufwand für die Bestimmung eines systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes für ein Gewächshaus verringern. In dem Forschungsprojekt soll daher überprüft werden, ob es dafür Lösungsansätze gibt. Eine statistisch begründete, notwendige Mindestanzahl von Messungen gibt es bisher nicht. Im Projekt wurde für die Bestimmung eines systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes für ein

Gewächshaus von einer Messperiode von 2 Wochen mit wenigsten 10 verwertbaren Messnächten ausgegangen. Eine Messnacht ist dann verwertbar, wenn die mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem Innen- und Außenraum größer als 10 K und die mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem Vor- und dem Rücklauf des Heizungssystems größer als 3 K war. Damit soll der Einfluss der Messfehler auf das Ergebnis begrenzt werden.

An einem Beispiel einer Messnacht soll diese Gesamtproblematik der Berechnung des systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes verdeutlicht werden. In der Abbildung 27 sind die maßgeblichen Temperaturverläufe dargestellt. Es wurde dabei jede Sekunde gemessen und alle 10 Minuten ein Mittelwert gebildet und abgespeichert. Während die Innentemperatur relativ stabil bleibt, wird für dieses Gewächshaus eine deutliche Schwingung der Vor- und Rücklaufemperatur des Heizungssystems sichtbar. Dies lässt auf eine nicht optimale Reglereinstellung schließen. Die Temperaturdifferenz liegt in diesem Beispiel mit

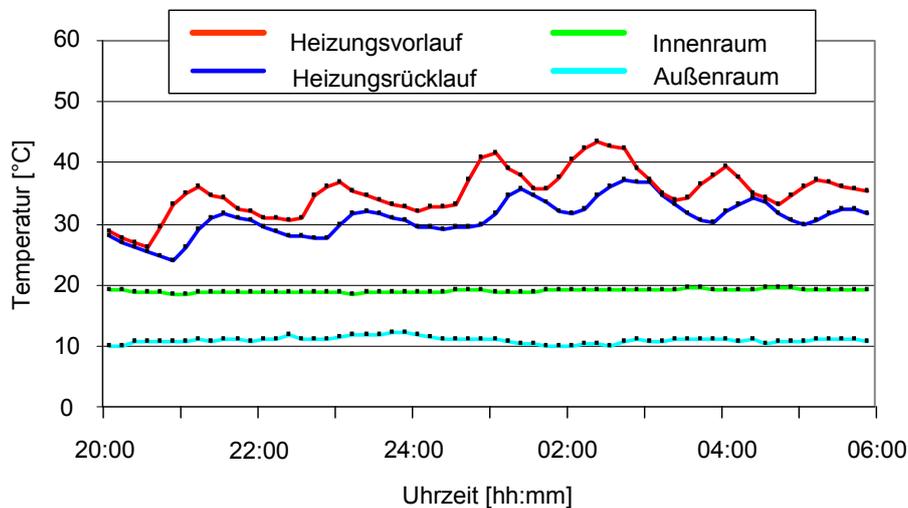


Abb. 27: Temperaturverläufe während einer Messnacht in einem beheizten Gewächshaus

rund 9 K knapp unter den geforderten Randbedingungen. Das Beispiel eignet sich aber hervorragend für die Verdeutlichung der Zusammenhänge.

Die Heizleistung weist aufgrund der Temperaturschwankungen erwartungsgemäß ebenfalls starke Schwankungen auf (Abbildung 28).

Um den Einfluss des Integrationszeitraums auf den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes zu zeigen, erfolgt die Berechnung in dieser Darstellung kumulativ: Jeder dargestellte Wert ist der Mittelwert der vorangegangenen Messwerte. Es wird deutlich, dass die anfangs starken Schwankungen mit zunehmender Integrationsdauer abnehmen. Dieses Ergebnis stützt auf dem ersten Blick die Schlussfolgerung, eine komplette Messnacht als Integrationszeitraum festzulegen. Es wirft aber auch die Frage auf, ob es sinnvoll ist, den Integrationszeitraum ausschließlich über die Uhrzeit zu definieren. Die beobachteten starken periodischen Schwankungen der Heizleistung lassen zumindest für dieses Beispiel eine zusätzliche Anpassung auf vollständige Schwingungszyklen sinnvoll erscheinen. In diesem Beispiel wäre dies von 20:30 Uhr bis 05:50 Uhr (Abbildung 29).

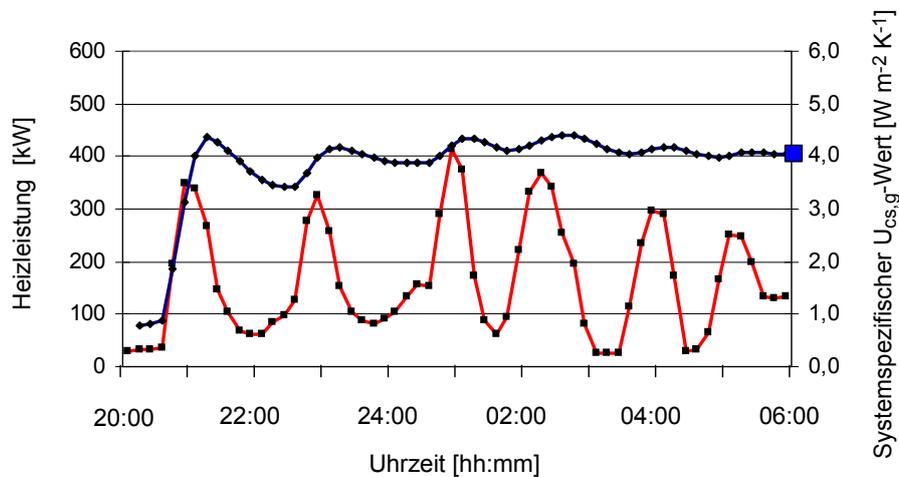


Abb. 28: Verlauf der Wärmeabgabe der Gewächshausheizung und des kumulativ errechneten systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes während einer Messnacht

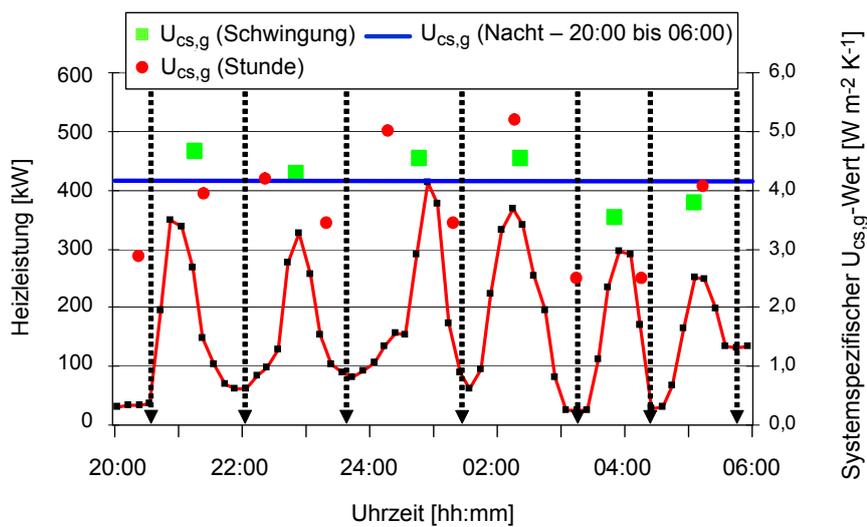


Abb. 29: Verlauf der Wärmeabgabe der Gewächshausheizung (rote Kurve) und des errechneten systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes während einer Messnacht für verschiedene Integrationszeiträume

Im Folgenden sollen die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Verkürzung des Integrationszeitraums aufgezeigt werden. Dabei kann als Bezug entweder ein fester Zeitraum, in diesem Beispiel 1 Stunde, oder eine vollständige Schwingung der Heizleistung genommen werden. In dem betrachteten Beispiel hat das Heizungssystem in 8 h insgesamt 6 vollständige Schwingungen durchlaufen. Es wird auch ohne statistische Auswertung deutlich, dass ein fester Zeitraum im Vergleich zu den Schwingungen zu deutlich größeren Streuungen führt. Ob die Verkürzung des Integrationszeitraums auf eine Schwingung der Heizleistung tatsächlich im Ergebnis zu einer Verringerung des Messaufwandes für die Bestimmung

eines systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wertes für ein Gewächshaus führt, muss im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes geklärt werden. Dabei muss auch geklärt werden, ob das gewählte Beispiel mit den deutlich ausgeprägten Schwingungen der Heizleistung der Normal- oder der Ausnahmefall ist.

Für die Festlegung der weiteren Verrechnung der integrierten Einzelwerte zu einem systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert ist es wichtig, die äußeren Einflussfaktoren zu betrachten. Es ist seit langem bekannt, dass bei aller messtechnischen Sorgfalt die während einer Messperiode erfassten Einzelwerte eines Gewächshauses erheblich schwanken können. Sind die entsprechenden Zusammenhänge bekannt, so ist es grundsätzlich möglich diese in die weitere Verrechnung mit einzubeziehen. Nicht erklärbare Einflüsse erfordern für eine definierte Trennschärfe zwischen den betrachteten Gewächshäusern eine ausreichende Anzahl an Einzelwerten. Eine statistische Aufarbeitung dieses Zusammenhangs steht aber noch aus.

Die Abbildung 30 zeigt den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den systemspezifischen $U_{cs,g}$ -Wert bei geschlossenem Energieschirm.

Jeder Wert stellt den Integrationswert einer nach vollständigen Schwingungen ausgewerteten Messnacht dar. Deutlich ist die verbliebene Streuung der Einzelwerte zu erkennen. Wie erwartet, wird unter den spezifischen Bedingungen eines geschlossenen Energieschirms kein Einfluss der Windgeschwindigkeit sichtbar. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Wärmestrahlung der Atmosphäre. Durch die Differenz zwischen dem strahlungsgeschützten und dem offenen, zum Boden hin abgeschirmten Sensor wird dies sichtbar. In dem Beispiel deutet sich ein entsprechender Zusammenhang an (Abbildung 31). Im laufenden Forschungsprojekt muss aber noch geklärt werden, ob es sich hier um einen Zufall oder tatsächlich um einen abgesicherten Zusammenhang handelt.

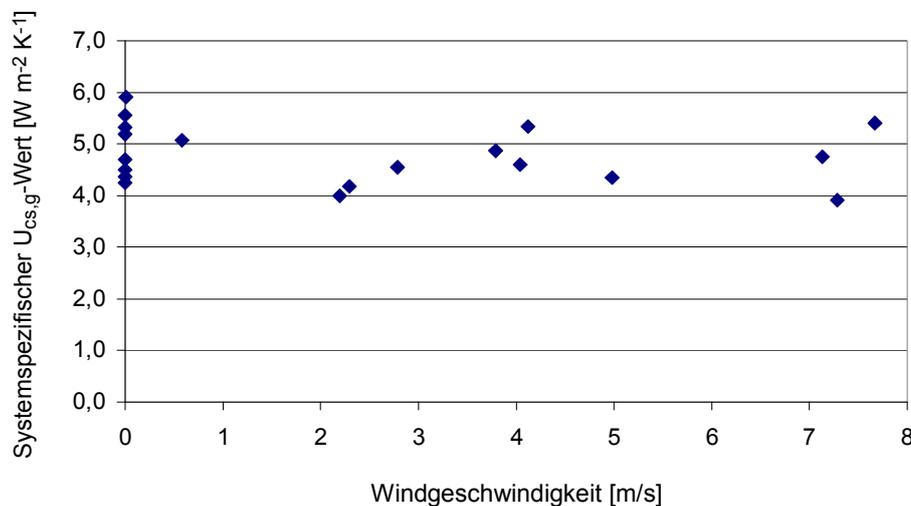


Abb. 30: Systemspezifischer $U_{cs,g}$ -Wert für ein Gewächshausabteil in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (19 Messnächte)

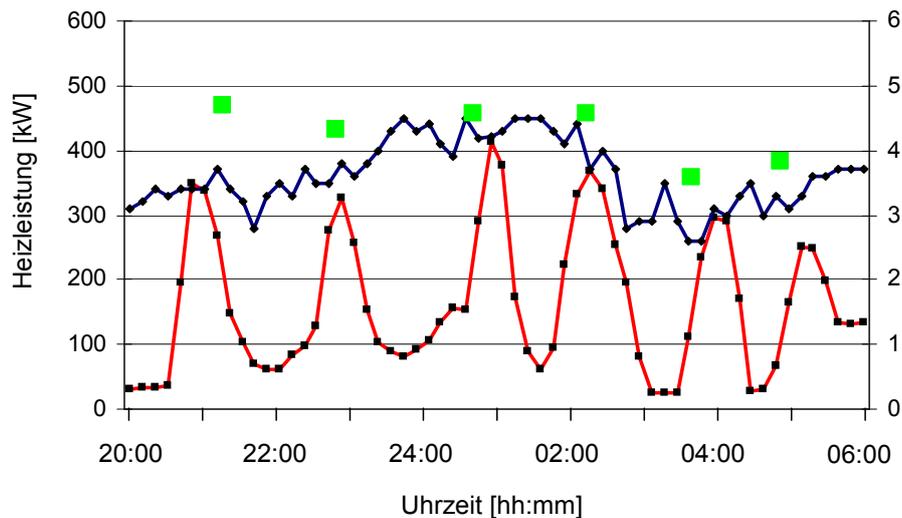


Abb. 31: Verlauf der Wärmeabgabe der Gewächshausheizung (rote Kurve) und der Temperaturdifferenz (blaue Kurve) zwischen der geschützt und der ungeschützt gemessenen Lufttemperatur (Wetterstation) (grünes Quadrat: $U_{cs,g}$ -Wert bezogen auf die Einzelschwingung der Wärmeabgabe)

8.3 Sicht des Gartenbauzentrum Straelen

OTTO DOMKE, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN, STRAELEN

Das Versuchsprojekt „Optimierung des Energieeinsatzes im Unterglasgartenbau durch innovative Gewächshauseindeckungen und Anpassung der Klima- u. Kulturführung an die veränderten Bedingungen“ (kurz: 4HausProjekt) bietet die Möglichkeit, vier gleiche Gewächshäuser zu untersuchen.

Für die technische Vergleichbarkeit wurde in jedem Gewächshaus in jeden Heizkreis ein geprüfter Wärmemengenzähler installiert. Wie die Heizwärme in die Häuser transportiert wird, muss genau kontrolliert werden, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Nicht nur für den Pflanzenbauer im Allgemeinen, sondern auch für die richtige Zuordnung der Wärmeströme, ist eine genaue Kontrolle der Wärmeverteilung innerhalb des Gewächshauses nötig. Deshalb sind im Gewächshaus pflanzennah Temperatursensoren, Bodenfeuchtemesser, Luftfeuchtemesser und Lichtmessgeräte verteilt. Nur wenn die angebotene Wärme gleichmäßig auf die Gesamtfläche des Hauses einwirkt, erhält man einen plausiblen Messwert für die Wärmemenge; dieser Wert kann zum Hausvergleich herangezogen werden.

Alle erfassten Daten der Klimaregelung und der speziellen Sensoren zur Beurteilung des Mikroklimas werden in einer Datenbank zusammengefasst und können einzeln oder in sinnvoller Zuordnung aus einem oder vergleichend aus den vier Häusern abgerufen werden. Unregelmäßigkeiten im Ablauf, die die Datenauswertung verfälschen würden, sind somit früh erkennbar und zu beheben. Wärmemengen müssen unter dem Blickwinkel der Vergleichbarkeit der technischen Ausrüstung betrachtet werden. Anhand der vier Vergleichshäusern wurde deutlich, wie schwer es ist, die gleichen Temperaturen im Pflanzenbestand wirken zu lassen. Ohne ständige Kontrolle der Einzelhäuser könnten Abweichungen nicht festgestellt und korrigiert werden. Ein Unterschied von ein bis zwei Grad im Pflanzenbereich ist dabei keine Seltenheit. Durch den hohen Messaufwand gelingt es, Abweichungen zu erkennen und zu

korrigieren und somit eine gute Gleichmäßigkeit zu erzielen. Das System besitzt dazu über 900 Mess- und Datenpunkte.

Nach einem intensiven Grundabgleich der Betriebsweise und Kennlernen der Einzelhäuser konnten Haus- und Materialvergleichsmessungen durchgeführt werden.

Nach Anpassung der Regelcomputerparameter für einen gleichmäßigen Betrieb wurden die Wärmemengen unter definierten Bedingungen bestimmt. Der Untersuchungszeitraum wurde so gewählt, dass die Außentemperatur, die mindestens erforderliche Differenz von 10 K (Innen- / Außentemperatur) aufwies. Die Wärmemengenauswertung wurde dann unter folgenden Bedingungen vorgenommen:

- geregelte Heizungssysteme
- nächtliche Messungen
- über 10 K Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur
- zwei eingegrenzte Nachtzeiträume zur Verifizierung der Daten

Diese Werte wurden mit einem statistischen Verfahren verifiziert, sodass für die vier Haustypen

- Normalglas, einschalig
- Mikrostrukturiertes Glas, einschalig
- Plexi-Stegdoppelplatte, zweischalig
- Folie (F-Clean), zweischalig

praxisnahe Wärmeverbräuche erarbeitet werden konnten.

In einem ersten Schritt wurde der spezifische Wärmeverbrauchsbeiwert für Normalglas eingesetzt als Relation des Verbrauchs von Normalglas ausgedrückt. Aufgrund der Fehlerabschätzung könnten dann die entsprechenden U_{cs} -Werte abgeleitet werden.

In den Versuchshäusern konnten keine Heizungssysteme mechanisch verändert, wohl aber die Wirkung verschiedener Schirme geprüft werden. So standen die Varianten „Energieschirm“ – „Verdunkelung“ – „Gleichzeitigkeit beider Anlagen“ im Vergleich.

Bei niedriger Außentemperatur ergaben sich ausreichend große Zeiträume, um praxisrelevante Messdaten für die Schirmanwendung zu bekommen. Auch hier konnte aufgrund der Datenmenge und Absicherung der Einsatzbedingungen ein Vergleich der relativen Energieverbräuche durchgeführt und der spezifische U_{cs} -Wert vorgestellt werden. Die Relationen zueinander dürften von hoher Präzision sein. Der absolute Wert ist aber mit Vorsicht zu betrachten, weil die Hausabmessungen klein sind und mit hohem Stehwandanteil an der Außenhüllfläche.

Durch die Vielzahl der miterfassten Daten kann eine kontinuierliche Verbesserung der Wärmeverbrauchsdaten erfolgen, um praxisnahe U_{cs} -Werte zu erhalten.

Anhand der Versuche kann festgestellt werden, dass vergleichende Wärmeverbrauchsrechnungen äußerst kritisch einzustufen sind, wenn kein Abgleich der Verteilgenauigkeit und Qualitäten der Regelungen der Einzelabteilungen stattfindet.

8.4 Sicht des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

STEPHAN WARTENBERG, SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, DRESDEN-PILLNITZ

Seit 2002 wurden am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Untersuchungen zu energie sparenden Heizungsstrategien im Zierpflanzenbau unter Glas durchgeführt. Entwickelt und getestet wurden Steuerungsmodelle mit einer Reihe von Programmbausteinen, die Heizungs- und Lüftungswerte flexibilisieren. Dazu zählten in Kombination mit „diff“- und „cool-morning“-Basisstrategien die lineare und dynamische Außentemperaturkorrektur, verschiedene Modelle zur Temperatursummenkontrolle, die Windkorrektur sowie die dynamische Lichtkorrektur. Ziel aller Strategien: Das Ausnutzen des Wärmeintegrationsvermögens der Pflanzen, um den Wärmebedarf so weit wie möglich nach Zeiten mit einer energetisch günstigeren Situation des Gewächshauses zu verschieben, ohne dass dadurch Kulturzeitverlängerungen oder Qualitätsverluste eintreten. Zur vergleichenden Bewertung der neuen Heizungssteuerungsprogramme waren dabei möglichst genaue Messungen der eingesetzten Heizenergie jeweils über die gesamte Kultur- bzw. Versuchsdauer erforderlich. Für die Versuche wurden sechs weitgehend baugleiche Gewächshausabteile (Deutsches Normgewächshaus, Einzelschiffbauweise) genutzt. Jedes Gewächshausabteil verfügt über eine stationäre Wärmemengenmessung durch Temperaturmessungen im Vor- und Rücklauf sowie ein Durchflussmessgerät. Die Primärdaten werden im Steuer- und Regelungssystem RAM CC600 für die Wärmemengenmessung verknüpft und mit einer zeitlichen Auflösung von 12 Minuten als kumulierter Tagesverbrauch im Langzeitdatenspeicher abgelegt. Das Zurücksetzen der Zählerwerte erfolgt jeweils um 0 Uhr.



Abb. 32: Lage der für die Versuche zu den Heizungssteuerungsprogrammen genutzten Gewächshausabteile in der Pillnitzer Versuchsgewächshausanlage (LfULG Dresden-Pillnitz)

Tab. 10: Kalibrierungsfaktoren für den Heizenergieverbrauch im Vergleich zu den Bezugshäusern 10.1 und 11.1 (Lfl/LfULG Dresden-Pillnitz, Versuchszeitraum 2005–2008)

Berechnet mit Hortex	Haus 10.2	Haus 10.3	Haus 11.2	Haus 11.3
		1,00	0,86	1,00
empirische Korrekturfaktoren				
Schnittcyclamen 05/06	0,90	0,74		
Poinsettien 05			1,09	0,78
Balkonpflanze 06	0,84	0,66	0,99	0,75
Poinsettien 06			0,98	0,73
Topfcyclamen 06	0,80	0,66		
Balkonpflanzen 07			1,00	0,78
Poinsettien 07	0,87	0,80		
Poinsettien 07 mit Noppenfolie	0,93	0,84		
Schnittcyclamen 07/08			0,98	0,82
Schnittcyclamen 07/08 mit Noppenfolie			1,01	0,86
Balkonpflanzen 08			1,01	0,73
Balkonpflanzen 08 mit Noppenfolie			1,00	0,78

Auch bei gleichen Einstellwerten wurde aufgrund der unterschiedlichen Position der Gewächshausabteile in der Gesamtanlage (Abbildung 32) Unterschiede im Heizenergieverbrauch erwartet. Die Unterschiede stellen hinsichtlich des Vergleichs der Heizungsstrategien einen systematischen Fehler dar. Dieser Fehler wurde einerseits mit dem HORTEX-Programm abgeschätzt und andererseits empirisch ermittelt. In der Tabelle 10 sind die entsprechenden Kalibrierungsfaktoren für eine Reihe von Versuchen dargestellt. Korrigiert wurde relativ zu den „inneren“ Gewächshausabteilen 10.1 bzw. 11.1. Da das HORTEX-Programm im Wesentlichen die baulichen Unterschiede der Gewächshausabteile berücksichtigt, war danach nur für die jeweils äußeren Gewächshausabteile (10.3 bzw. 11.3) ein höherer Energiebedarf zu erwarten. Durch gegenseitige Abschattung, unterschiedliche Windexposition, systematische Messfehler und andere Einflüsse wichen die empirisch ermittelten Kalibrierungsfaktoren jedoch davon ab und waren auch von Versuch zu Versuch verschieden. Neben jahreszeitlichen Einflüssen spielen hier Unterschiede im Basisprogramm („diff“, „cool morning“), der Schirmsteuerung, dem Einsatz der Verdunklungsschirme usw. eine Rolle. Diese Einflüsse wurden nicht im Einzelnen untersucht, sondern durch wiederholte Wärmeverbrauchsmessungen bei genau gleichen Basis-Einstellwerten der Gewächshausabteile als Gesamtfaktor ermittelt. Diese Kalibrierung der Wärmemessungen fand jeweils vor und nach den Versuchen statt. Auch einzelne Tage während der Versuche wurden für die Überprüfung der Plausibilität der Kalibrierungsfaktoren genutzt, und zwar Tage an denen die Korrekturprogramme zu keinen Änderungen der Basissollwerte führten. Bezogen auf die konkrete Versuchssituation lieferten die einzelnen Messungen auch bei unterschiedlichen Messniveaus eine enge lineare Korrelation zwischen dem Energieverbrauch der einzelnen Häuser, sodass mit einfachen Faktoren gearbeitet werden konnte (Abbildung 33). Um die realistische Einschätzung der Energieeinsparung der neuen Heizungssteuerungsprogramme weiter abzusichern, wurden diese den Gewächshausabteilen unterschiedlich zugeordnet – in den einzelnen Jahren und Versuchen.

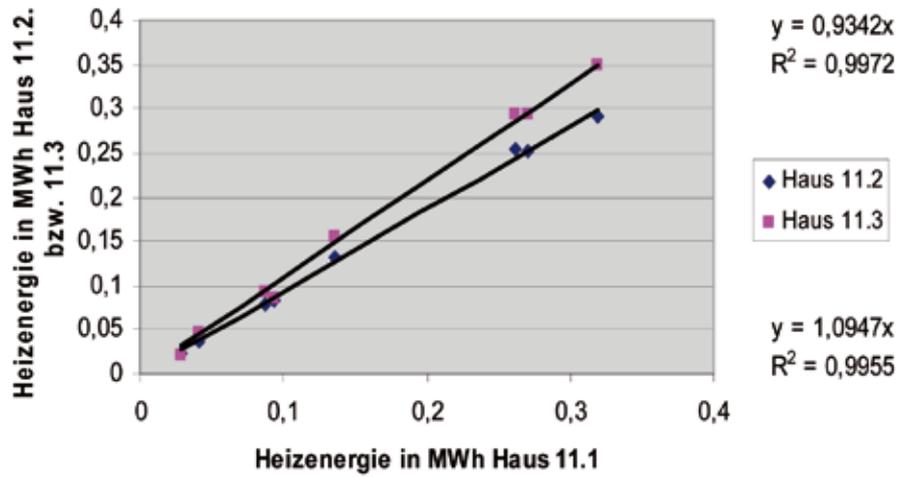


Abb. 33: Die enge lineare Korrelation zwischen den Energieverbräuchen der Gewächshausabteile bei gleichen Einstellwerten rechtfertigt die Verwendung linearer Kalibrierungsfaktoren (LfL Dresden-Pillnitz, November 2007)

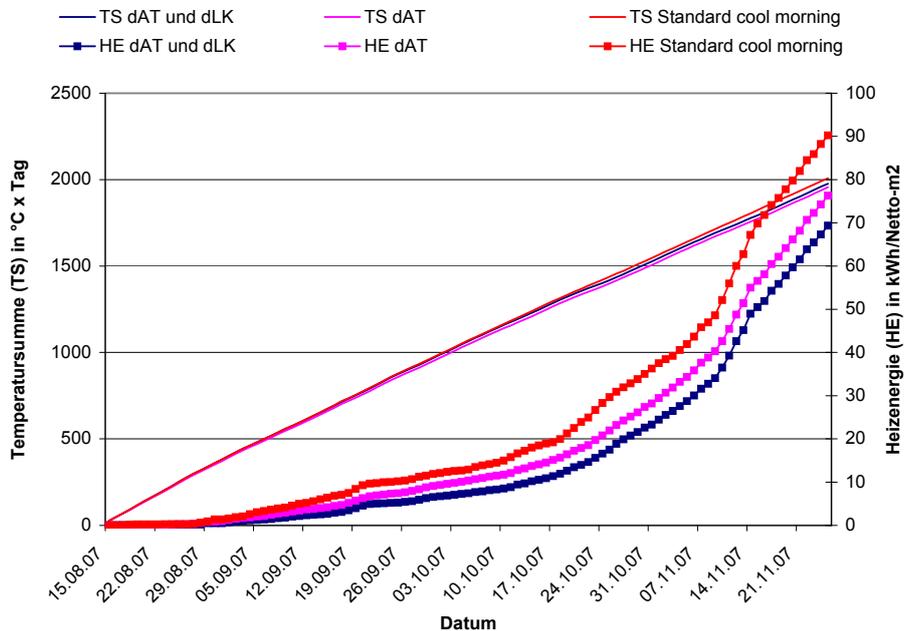


Abb. 34: Verlauf der Temperatursumme und des kumulierten Heizenergieverbrauchs bei Heizungssteuerungsprogrammen mit dynamischer Außentemperaturkorrektur (dAT) und dynamischer Lichtkorrektur (dLK) im Vergleich zum Basisprogramm mit „cool morning“ (Poinsettien, LfL Dresden-Pillnitz 2007)

In Abbildung 34 ist der typische Verlauf des kumulierten Heizenergieverbrauchs einer Herbstkultur wiedergegeben. Die Korrektur des systematischen Fehlers für die Position der einzelnen Gewächsabteile ist hier bereits eingearbeitet, sodass eine direkte Beurteilung des Heizenergieverbrauches der Versuchsvarianten möglich ist. Bei weitgehend gleicher Entwicklung der Temperatursummen lassen sich durch die dynamische Außentemperaturkorrektur (dAT) und die dynamische Lichtkorrektur (dLK) wesentliche Einsparungen an Heizenergie erreichen. Gut zu erkennen ist auch, dass mehr als die Hälfte des gesamten Energieeinsatzes in den letzten 3 bis 4 Kulturwochen aufgebracht werden muss.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch kalibrierte Wärmeverbrauchsmessungen einzelner Gewächshausabteile eine vergleichende Bewertung des Wärmeverbrauchs unterschiedlicher Heizungsstrategien mit einer akzeptablen Qualität möglich ist und zu reproduzierbaren Ergebnissen führt.

9 Ableitung einer praxisreifen Methodik

CHRISTIAN REINHOLD, KTBL, DARMSTADT

9.1 20-Punkte-Plan für die Praxis

Im Folgenden wird das Ziel der Verständigung der gartenbaulichen Wissenschaft auf eine einheitliche Methodik der Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfes von Gewächshäusern dargestellt. Dadurch sind klare Aussagen zum Energiebedarf von Gewächshäusern bei unterschiedlicher Konstruktion und Bauweise möglich und Untersuchungen verschiedener Versuchsansteller vergleichbar. Aufbauend auf der Formulierung der Anforderungen aus Sicht der Beratung, Forschung und Planung und der Beschreibung des Status quo wurde eine praxisreife Methodik der Messung und Bewertung des Energiebedarfs erarbeitet.

Für eine einheitliche Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfes von Gewächshäusern ist folgender 20-Punkte-Plan einzuhalten:

1. Vor jeder Messung ist eine genaue Beurteilung des Messobjektes (z. B. Funktion der Anlagen, Alter, baulicher Zustand, etc.) durchzuführen.
2. Es ist eine Checkliste zu führen, um das Vorgehen zu dokumentieren (inkl. zeichnerischer Darstellung von Maßen und Lage der Messstellen).
3. Es wird die gesamte Außenfläche verwendet ohne Anbauten/Verbinder und Böden. Damit wird gewährleistet, dass die Hüllfläche (A_s) bei Messungen so groß wie möglich berücksichtigt wird. Ausnahmen stellen sehr gut isolierte Gewächshäuser mit einer Doppelverglasung und Mehrfach energieschirm dar. Bei ihnen werden auch die Böden als Innenfläche berücksichtigt. In Nachbar kabinen bzw. Nachbarhäusern müssen die Raumlufitemperaturen gemessen werden.
4. Es muss an mindestens 5 Stellen im Gewächshaus eine Temperaturmessung mit belüfteten Sensoren durchgeführt werden, wobei im Haus maximale Temperaturunterschiede von 3 K vorliegen dürfen. Die Messung muss in einem Abstand von 2 m zu den Wänden und in Pflanzennähe 1 m über dem Boden durchgeführt werden. Die Sensoren müssen eine Genauigkeit von 0,1 K bei 0 °C aufweisen.
5. Die Außentemperatur wird in 2 m Höhe außerhalb des Einflussbereichs des Gewächshauses oder der Betriebsgebäude mit belüfteten Fühlern gemessen.
6. Als Messzeitraum wird die Zeit von 22 bis 6 Uhr festgelegt mit mindestens 10 Wiederholungen pro Messung. Die Ergebniswerte werden bei Regelschwingungen aus ganzen Perioden ermittelt und sind auf 1 h zu verdichten.
7. Die Temperaturdifferenz ($\theta_i - \theta_a$) ist bei einer Messung so groß wie möglich zu wählen. Ergebniswerte sind auf 1 K zu relativieren. Die Temperaturdifferenz sollte 10 K nicht unterschreiten.
8. Die Globalstrahlung muss bei einer Messung 0 sein, d.h., es werden nur Nachtmessungen durchgeführt. Die Unterschiede von Tag/Nacht-Werten werden nicht berücksichtigt. Die Effekte von Wärmespeichern sollten bei einer Messung keinen bzw. so gut wie keinen Einfluss ausüben, da her werden nur späte Nachtabschnitte berücksichtigt. Während der Messungen darf keine Assimilationsbelichtung durchgeführt werden, da dies eine zusätzliche Wärmezufuhr ist.

9. Es muss ein Wärmehähler der Genauigkeitsklasse 1 eingesetzt werden.
10. Für die Vor- und Rücklaufemperatur müssen gepaarte Temperaturfühler (Messunsicherheit $< 0,05$ K) verwendet werden. Die Temperaturfühler sollen in Tauchhülsen mit Wärmeleitpaste eingebaut sein.
11. Die Heizungsregelung muss sicherstellen, dass keine Wärmemengenmessung bei weniger als 3 K Temperaturdifferenz erfolgt.
12. Der Durchflussmesser muss entsprechend den Regeln und Hinweisen des Herstellers ausgelegt und eingebaut sein.
13. Die Heizungsregelung muss die Heizungspumpe so regeln, dass der kleinste Durchfluss nicht weniger als 10 % des Nenndurchflusses beträgt.
14. Bei Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf von weniger als 3 K und geringerem Durchfluss als 10 % findet keine Wärmemengenmessung statt. Unter diesen Bedingungen ist sichergestellt, dass die statistische Messunsicherheit der Wärmemengenmessung nicht mehr als ± 5 % betragen wird.
15. Wenn möglich, sollte die Glasinnentemperatur in etwa der Hälfte bis oberen Drittel der Dachseite durch einen aufgeklebten Messfühler gemessen werden.
16. Eine Analyse der Undichtigkeit des Gewächshauses (Abklingkurve Indikatorgas, Blower-Door-Verfahren nur bei kleinen Anlagen möglich) in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit kann helfen, den Luftwechselwärmeverlust zu quantifizieren.
17. Um den Einfluss der Verdunstung zu bewerten, ist eine Dokumentation des Status quo der zu untersuchenden Anlage (Kultur, Bestandsarchitektur, Alter, Bewässerungsdokumentation) erforderlich. Zur Erklärung der Versuchsbedingungen, der erzielten Ergebnisse und Streuungen sollte der Pflanzenbestand und das Kultursystem dokumentiert, die Verdunstungsrate als „gering“, „mittel“ und „hoch“ klassiert werden. Hilfreich ist weiterhin die Beobachtung der nächtlichen Bewölkung als „klar“, „teilweise bewölkt“, „bedeckt“, „Regen“, „Dach außen betaut“ oder „bereift“, sowie die Kondensation an der Dachinnenseite visuell einzustufen und festzuhalten. Daraus ergeben sich möglicherweise Korrekturfaktoren auf den gemessenen U_{CS} -Wert.
18. Die Windgeschwindigkeit (v_w) ist bei jeder Messung zu berücksichtigen. Sie muss im Außenbereich in einer Referenzhöhe von 10 m gemessen oder ggf. bei anderen Höhen auf die Referenzhöhe zurückgerechnet werden. Im Gewächshaus sollten die Luftbewegungen möglichst unter 0,5 m/s liegen. Hier muss ebenfalls über die o. a. Checkliste dokumentiert werden, wie die Luftbewegungen durch den Innen- und Außenbereich beeinflusst werden.
19. Eine regelmäßige Wartung und Kalibrierung der Messtechnik wird vorausgesetzt.
20. Wenn ausreichend Datenmaterial vorliegt, sollten Korrekturen für die Einflüsse der nicht weiteruntersuchten Witterungsbedingungen und Kultur- und Systemparameter vorgenommen werden. Ein physikalisch-technisch basiertes Gewächshausmodell kann helfen, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu erklären und den U_{CS} -Wert aufzubereiten. Eine HORTEx(c)-Vergleichsrechnung ist parallel zur Messung durchzuführen und bei der Auswertung der Messergebnisse heranzuziehen.

9.2 Checkliste U_{cs}-Wert-Messung

Beurteilung des Messobjektes (Gewächshaus: innerer und äußerer Zustand)

Gewächshausdaten			
Gewächshaustyp, Baujahr			
Maße (L x B)			
Stehwandhöhe			
Kappenzahl, Kappenbreite			
Grundfläche			
Lüftung (wechselseitig/durchgehend)			
Gewächshaushülle			
Material			
Eindeckung (Dach)			
Eindeckung (Stehwände)			
Zusätzliche Isoliermaßnahmen			

Zustand Gewächshaushülle			
		✓	✗
Verglasung (Bedachung, Stehwände)			
Scheiben ...	in Ordnung	verrutscht, kaputt	
Scheiben ...	sauber	verschmutzt	
Verkittung ...	dicht	fehlt oder schadhaft	
Lüftung			
Klappen schließen ...	dicht (Abdichtprofil)	undicht	
Klappen öffnen ...	gleichmäßig	ungleichmäßig	
Zugseile gespannt ...	gleichmäßig	ungleichmäßig	
Türen/Tore			
Schließen ...	vollständig, leicht	unvollständig, schwer	
Heizungsanlage			
Heizungssystem			
Anzahl der Rohre, Rohrdurchmesser			

Zustand der Heizungsanlage			
		✓	✗
Heizkessel			
Manometer ...	in Ordnung	defekt	
Druckprüfung (Manometer) ...	in Ordnung	zu niedrig/zu hoch	
Absperrventile ...	beweglich	lecken oder fest sitzen	
Wasserverlust ...	ja	nein	
Schwitzwasserspuren ...	nicht vorhanden	vorhanden	
Kesselisolierung ...	vollständig	unvollständig	
Rauchgaszüge ...	gereinigt/dicht	nicht gereinigt/undicht	
Brennwerttechnik (Gas) ...	vorhanden	nicht vorhanden	
Ölleitungen ...	dicht	undicht	
Lufterhitzer			
Wartung und CO-Kontrolle ...	durchgeführt	nicht durchgeführt	

Fortsetzung nächste Seite

Zustand der Heizungsanlage		✓	✗
Verteilanlagen			
Drosselklappen u. Handmischer ...	beweglich		festgesetzt
Isolierung ...	vorhanden		nicht vorhanden
Schieber ...	dicht		undicht
Umwälzpumpen ...	geregelt		nicht geregelt
Schmutzfänger ...	gereinigt		nicht gereinigt
Zu- und Ringleitungen			
Vorregelung ...	vorhanden		ungeregelt
Isoliermaterial ...	in Ordnung		beschädigt
Wärmeverteilung			
Ventile und Handmischer ...	beweglich		feststehend
Entlüftungsschrauben ...	in Ordnung		feststehend
Anstrich/Rohre ...	gut erhalten		rostig
Anordnung Heizungssystem ...	pflanzennah		hohe Rohrheizung

Beschreibung der Inneneinrichtung	Situation gut, wenn	✓	Situation schlecht, wenn	✗
Wassersparende Bewässerungssysteme				
Verdunstungsminderung (z. B. Mattenabdeckung mit Gewebe oder Nadelfolie) ...	vorhanden		fehlt	
Bewässerungssteuerung				
Nach Einstrahlung oder Feuchte ...	erfolgt		keine Steuerung	
Keine Bewässerung nachts ...	eingestellt		nicht eingestellt	
Umluftventilatoren				
Abbau von Temperaturprofilen ...	vorhanden		nicht vorhanden	
Energieschirm/Schattierung				
Anzahl Energieschirme				
Rollschirme an Stehwänden	ja		nein	
Gewebe ...	nicht beschädigt		beschädigt	
Schließt allgemein ...	dicht		undicht	
Am Zugband/Gitterbinder, Giebel ...	dicht		undicht	
Schürzen an Stehwand ...	dicht		undicht	
Schirmpakete, wenn offen ...	klein		groß	
Belichtung				
Art der Belichtung				
Anzahl				

Mess- und Regeltechnik	Situation gut, wenn	✓	Situation schlecht, wenn	✗
Klimacomputer				
Funktion und richtige Positionierung der Messfühler, Messbox ...	in Ordnung		defekt, Fehlfunktion	
Kontrolle Wetterstation ...	durchgeführt		nicht durchgeführt	
Überprüfung der eingestellten Sollwerte auf Einhaltung ...	korrekt		Abweichungen	

Voraussetzungen für die Messung

Voraussetzungen	Situation gut, wenn	✓	Situation schlecht, wenn	✗
Messpunkte				
5 verschiedene Stellen im Gewächshaus	vorhanden		fehlen	
Temperaturmessung mit belüfteten Sensoren	vorhanden		fehlt	
Maximale Temperaturunterschiede von 3 K	eingehalten		nicht eingehalten	
Abstände (2 m zu Wand, 1 m zu Boden)	eingehalten		nicht eingehalten	
Genauigkeit der Sensoren 0,1 K bei 0 °C	eingehalten		nicht eingehalten	
Messdauer 22.00–6.00 Uhr	eingehalten		nicht eingehalten	

Zusätzliche Voraussetzungen und Messwerte:

Voraussetzungen	Situation gut, wenn	✓	Situation schlecht, wenn	✗
Windgeschwindigkeit				
Referenzhöhe Messpunkt 10 m	eingehalten		nicht eingehalten	
Windgeschwindigkeit beträgt:				
Luftbewegung im GH liegt unter 0,5 m/s	eingehalten		nicht eingehalten	
Globalstrahlung				
Globalstrahlung = 0 W/m ²	eingehalten		nicht eingehalten	
Außentemperatur				
Temperaturdifferenz ($\theta_i - \theta_a$)	eingehalten		nicht eingehalten	
Temperaturdifferenz beträgt:				
Minimale Temperaturdifferenz beträgt 10 K	eingehalten		nicht eingehalten	

10 Literatur

- Berliner, P. (1979): Psychrometrie: Die Thermodynamik der lufttechnischen Prozesse. Verlag Karlsruhe: Müller
- Bertram, A.; Bettin, A.; Wilms, D.; Rehrmann, P. (2005): Erhöhung der Effizienz von Energieschirmen. Abschlussbericht, Fachhochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, Eigenverlag
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, www.online-energieausweis.org, Zugriff am 23.04.2010
- DIN 10220 (2003): Nahtlose und geschweißte Stahlrohre - Allgemeine Tabellen für Maße und längenbezogene Maße. Berlin, Beuth Verlag
- DIN EN 673, 2003-06: Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren
- DIN EN ISO 10077-1, 2006-12: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines
- DIN EN ISO 13789, 2008-04: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren
- DIN EN ISO 13790, 2008-09: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung
- DIN IEC 60751, 2009-05: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren
- DIN EN 1434-1, 2007-05: Wärmehähler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- DIN EN 1434-2, 2007-05: Wärmehähler - Teil 2: Anforderungen an die Konstruktion
- DIN V 4108-6, 2003-06: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 6
- Fachhochschule Osnabrück, www.al.fh-osnabrück.de/protec.html, Zugriff am 23.04.2010
- Heise, P. (1992): Rohre für die Gewächshausheizung. Deutscher Gartenbau 46, S. 2256-2259
- HORTEX^(c), www.bgt.uni-hannover.de/HORTEX.html, Zugriff am 23.04.2010
- Kanthak, P. (1970): Der Einfluss von Heizungssystemen mit unterschiedlichem Strahlungsanteil auf das Klima und den Wärmehaushalt von Hallenbauten mit großen Glasflächen, speziell Gewächshäusern. VDI-Fortschrittsberichte 6(26)
- Meyer, J. (1981): Bewegliche Energieschirme. Forschungsberichte zur Biosystem- und Gartenbautechnik, Universität Hannover
- Meyer, J.; Bertram, A. (2005): Bewegliche Energieschirme - Grundlagen und Anwendungshinweise. KTBL-Arbeitsblatt 26715, Darmstadt
- Müller, G.J. (1987): Energieschirme unter Praxisbedingungen - Bewertung und Optimierung im Hinblick auf Energieverbrauch und Klimaführung. Forschungsberichte zur Biosystem- und Gartenbautechnik, Universität Hannover
- Rath, T., (1994): Einfluss der Wärmespeicherung auf die Berechnung des Heizenergiebedarfes von Gewächshäusern mithilfe des k'-Modells. Gartenbauwissenschaft 59 (1), S. 39-44
- Rath T., Masemann, S. (2002): Dunkelstrahler im Praxistest - Ergebnisse technischer Untersuchungen. Das Taspo-Magazin 5, S. 25-28
- Tantau, H.-J. (1982): Heizungssysteme im Gewächshaus, Berechnung - Auslegung - Konstruktion. Gartenbautechnische Informationen, Heft 1, 3. Aufl. Herausgeber: Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, TU Hannover

Tantau, H.-J. (1996): Energiesparstrategien. Temperaturregelstrategien. Forschungsanstalt Geisenheim, Thaler Medien, S. 28–36

VDI/VDE 2620, Technische Regel, Entwurf, 1998-12: Unsichere Messungen und ihre Wirkung auf das Messergebnis

VDI Wärmeatlas (2006): Stoffwerte von Wasser, Dba 5, Tabelle 4, Berlin, Springer-Verlag, 10. Aufl.

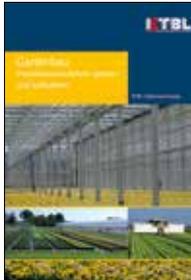
von Zabeltitz, C. (1986): Gewächshäuser: Planung und Bau. Stuttgart, Ulmer-Verlag

von Zabeltitz, C. (1995): Energieeinsparung und alternative Energiequellen im Gartenbau. Stuttgart, Ulmer-Verlag

Autorenverzeichnis

Prof. Dr. Andreas Bertram (Kap. 2.3 und 8.2) Fachhochschule Osnabrück 49090 Osnabrück	Prof. Dr. Thomas Rath (Kap.6) Leibniz Universität Hannover 30419 Hannover
Dr. Wolfgang Brunko (Kap. 2.2) GEFOMA GmbH 14979 Großbeeren	Christian Reinhold (Kap. 9) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V 64289 Darmstadt
Otto Domke (Kap. 2.1 und Kap.8.3) Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 47638 Straelen	Prof. Dr. Uwe Schmidt (Kap. 7) Humboldt-Universität zu Berlin 10099 Berlin
Holger Dröge (Kap. 2.2) GEFOMA GmbH 14979 Großbeeren	Prof. Dr. Hans-Jürgen Tantau (Kap. 4 und 8.1) Leibniz Universität Hannover 30419 Hannover
Dr.-Ing. Burkhard von Elsner (Kap. 1 und 5) Leibniz Universität Hannover 30419 Hannover	Stephan Wartenberg (Kap.8.4) Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 01326 Dresden-Pillnitz
Cornelia Kobienia (Kap. 8.2) Fachhochschule Osnabrück 49090 Osnabrück	Diedrich Wilms (Kap. 8.2) Fachhochschule Osnabrück 49090 Osnabrück
Prof. Dr. Joachim Meyer (Kap. 3) Technische Universität München 85354 Freising	

KTBL-Veröffentlichungen



Gartenbau

Produktionsverfahren planen und kalkulieren
2009, 600 S., 25 €, ISBN 978-3-939371-79-9
(Best.-Nr. 19493)

Das Standardwerk bietet Planungs- und Kalkulationsdaten ausgewählter Produktionsverfahren für Freilandgemüsebau, Zierpflanzenproduktion und Containerbaumschule. Für Betriebsplaner aus Praxis, Ausbildung, Beratung und Verwaltung ist dieses Buch ein unverzichtbarer Wegbegleiter bei ihrer täglichen Arbeit.



Containerbaumschule

Betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Kalkulationen
2010, 140 S., 24 €, ISBN 978-3-939371-89-2
(Best.-Nr. 19496)

Das Standardwerk bietet Planungs- und Kalkulationsdaten ausgewählter Produktionsverfahren für Containerbaumschulen. Für Betriebsplaner aus Praxis, Ausbildung, Beratung und Verwaltung ist sie ein unverzichtbarer Wegbegleiter bei ihrer täglichen Arbeit.



BAUKOST-Gewächshäuser

Online-Anwendung
2009, Kosten: 12 Monate für 15 €
(Best.-Nr. 30009)

Mit Baukost-Gewächshäuser können Sie Investitionsbedarf und Jahreskosten online berechnen. Die Online-Anwendung enthält 162 Gebäudemodelle für Folientunnel, Folienhäuser, Venlohäuser und Breitschiffhäuser jeweils mit Baubeschreibung und Planungskennzahlen.

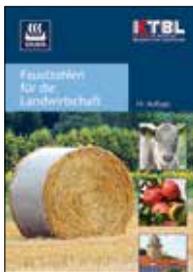
Sie finden Baukost -Gewächshäuser unter www.ktbl.de „Kalkulationsdaten“.



Köhler, L., Lecker, F., Prucker, D.: CO₂-Anreicherung in Gewächshäusern

2006, 56 S., 18 €, ISBN 978-3-939371-04-5
(Best.-Nr. 11440)

Gartenbaubetreiber werden über den Einsatz von Heizsystemen mit CO₂-Anreicherung und der Wirkung der Abgase auf das Pflanzenwachstum informiert.



Faustzahlen für die Landwirtschaft

Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen

2009, 14. Auflage, 1180 S., 30 €, ISBN 978-3-939371-91-5
(Best.-Nr. 19494)

Auf über 1000 Seiten beinhaltet das Buch die wichtigsten Daten und Fakten zu vielen Bereichen der landwirtschaftlichen Erzeugung, zum Freilandgartenbau, zu erneuerbaren Energien und zur Betriebswirtschaft. Es ist das Standardwerk für alle, die sich mit Landwirtschaft befassen.



Faustzahlen Biogas

2009, 2. Auflage, 240 S., 19 €, ISBN 978-3-941583-28-3
(Best.-Nr. 19497)

Das Nachschlagewerk enthält alle relevanten Daten und Fakten zu Biogas in der Landwirtschaft. Es erläutert die Entwicklung des Biogassektors und die technisch-biologischen Grundlagen ebenso wie Substratbereitstellung, Gasausbeute, Gärrestverwertung, Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen.



Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen

2008, 44 S., 9 €, ISBN 978-3-939371-64-9
(Best.-Nr. 40079)

Das Heft fasst den aktuellen Wissensstand zur Produktion von Pappeln und Weiden zusammen. Es gibt Informationen zur Anpflanzung, Pflege, Ernte, Transport und Lagerung der Kulturen sowie zu Kosten und Erträgen.



Heizen mit Getreide

und was man darüber wissen muss
2007, 48 S., 8 €, ISBN 978-3-939371-50-2
(Best.-Nr. 40074)

Dieses Heft bietet einen Überblick über das Thema Getreideverbrennung. Es zeigt die Vor- und Nachteile, erläutert die rechtlichen Rahmenbedingungen und stellt die Anlagentechnik mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit vor.

Bestellhinweise

Porto- und Verpackungskosten werden gesondert in Rechnung gestellt. Preisänderungen vorbehalten.
Wir freuen uns auf Ihre Bestellung. Senden Sie diese bitte an

KTBL, Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt | Tel.: 06151 7001-189 |
Fax: 06151 7001-123 | E-Mail: vertrieb@ktbl.de | www.ktbl.de

Sämtliche KTBL-Produkte finden Sie unter www.ktbl.de „KTBL-Shop“

