

Forschungsprojekt „Climacubes“

Auswirkungen verschiedener Bauweisen
auf Raumklima und Energieverbrauch

BACHELORARBEIT 1

zur Erlangung des akademischen Grades
„Bachelor of Science in Engineering“

Studiengang

„Umwelt-, Verfahrens- und Energietechnik“

Management Center Innsbruck

Betreuer:

Dr. Ing. Aldo Giovannini, MCI

Verfasser:

Dietmar Holzner

Matrikelnummer: 0910494034

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

„Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

DECLARATION IN LIEU OF OATH

I hereby declare, under oath, that this bachelor thesis has been my independent work and has not been aided with any prohibited means. I declare, to the best of my knowledge and belief, that all passages taken from published and unpublished sources or documents have been reproduced whether as original, slightly changed or in thought, have been mentioned as such at the corresponding places of the thesis, by citation, where the extent of the original quotes is indicated.

The paper has not been submitted for evaluation to another examination authority or has been published in this form or another.

Meran, am 9. Mai 2012

Danksagung

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei folgenden Personen für ihre Unterstützung während des Studiums und bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit:

Herrn Dr. Ing. Aldo Giovannini für seine Hinweise und Hilfestellungen sowie die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Dr. Franz Josef Oberstaller, Direktor der Technologischen Fachoberschule „Oskar von Miller“, Meran für seine Unterstützung im Allgemeinen und sein Zuvorkommen bei der Gestaltung der Arbeitszeiten im Speziellen. Ebenso geht in dieser Hinsicht mein Dank an meine Fachkollegen der Schule.

Danke an Magdalena und ihren Freunden für die Unterkunft in Innsbruck. Ganz lieben Dank meiner besonderen Lektorin Claudia. Danke auch an Edith, Martina und Toni.

Der größte Dank gilt meinen Jungs, Johannes und Laurin, die meine Launen so wunderbar ausgehalten haben.

Kurzfassung

Leichtbau, Massivbau, verschiedene Verglasungsarten, Wärmeschutzmaßnahmen sowie Maßnahmen gegen die Überhitzung der Räume im Sommer beeinflussen wesentlich das Raumklima und den Energieverbrauch in Gebäuden.

Mit dem Projekt „Climacubes“ wurden diese Einflüsse in einem Feldversuch untersucht. Durchgeführt wurde es auf Initiative des Autors an der Technologischen Fachoberschule „Osakar von Miller“ in Meran in Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsfachoberschule „F. Kafka“ und der Landesberufsschule „Dipl.-Ing. Luis Zuegg“. Dazu wurden im Laufe des Projektes zwölf würfelförmige Gebäudemodelle in der Größe von jeweils einem Kubikmeter gebaut, mit verschiedenen Materialien verkleidet und auf das Dach des Schulgebäudes gestellt. Diese „Climacubes“ wurden mit Messsensoren ausgestattet, um Faktoren wie Oberflächentemperaturen, Luftfeuchtigkeit und Raumlufttemperatur zu erfassen. Ebenso wurde ein eigenes Heizmodul mit integriertem Stromzähler installiert, um die Auswirkung auf den Energieverbrauch zu untersuchen. Eine Wetterstation in unmittelbarer Nähe der Cubes erfasste die Wetterdaten. Die gesamte Anlage war von November 2008 bis Mai 2011 in Betrieb. Die Messwerte wurden in Echtzeit auf einem Webserver gespeichert und auf der Projekthomepage www.climacubes.it in Echtzeit veröffentlicht.

Die vorliegende Bachelorarbeit stellt das Konzept und den Verlauf des Projektes dar und fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen. Diese betreffen den Heizenergieverbrauch von Gebäuden im Winter und das thermische Verhalten im Sommer. Große Dämmstärken sind die wichtigste Maßnahme zur *Reduzierung des Heizwärmebedarfs*. Speicherwirksame Oberflächen auf der Innenseite reduzieren den Heizwärmebedarf für die Nachtbeheizung deutlich, sie ersetzen aber nicht die Dämmung. Die Wahl des Dämmstoffes spielt für den Heizwärmebedarf hingegen eine untergeordnete Rolle. Großzügige Südfenster reduzieren den Heizwärmebedarf um etwa 10%. Bei geringer oder fehlender Speichermasse der raumumschließenden Flächen treffen übliche vereinfachte Wärmebedarfsberechnungen, wie sie von den nationalen und europäischen Energieeinsparverordnungen vorgeschlagen werden, nicht zu. Gegen *sommerliche Überhitzung* ist die Verwendung von großen flächenbezogenen innenseitigen Massen von entscheidender Bedeutung. Die Wahl des Dämmstoffes spielt eine wesentliche Rolle. Dämmstoffe mit geringer Speicherfähigkeit müssen mit speicherfähigen Baustoffen ergänzt werden (sonst nützt auch eine große Dämmstärke wenig). Dies ist insbesondere im Leichtbau wichtig, wo der Dämmstoff den größten Teil des Baustoffvolumens ausmacht.

Die Größen *Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV)* und *Phasenverschiebung (PV)* unterscheiden sich zwar teilweise deutlich von den im Projekt gemessenen Werten, für eine qualitative Beurteilung eines Bauteils sind die beiden Größen aber durchaus geeignet. Großzügige unverschattete Südfenster tragen deutlich zur Überhitzung bei. Sie müssen tagsüber verschattet werden.

Abstract

Light-weight or solid construction, various types of glazing, thermal insulation measures as well as measures against overheating in summer essentially effect energy consumption and the indoor climate of buildings. These influences have been surveyed by a field experiment through the research project „Climacubes“. It was performed on the authors initiative at the polytechnic *Technologische Fachoberschule „Oskar von Miller“* of Merano in co-operation with the commercial highschool *Wirtschaftsfachoberschule „F.Kafka“* and the vocational college *Landesberufsschule „Dipl.-Ing. Luis Zuegg“*. In the course of the project, students and teachers produced 12 cube-shaped building models, each the size of a cubic meter and placed them on the roof of the school building. These „Climacubes“ were equipped with several sensors to measure surface temperatures, air humidity and air temperature. Furthermore a heating element with a cable-connected electricity-counter was installed to monitor the energy consumption. In the immediate proximity of the cubes, a weatherstation was installed to register the weather data. The whole plant was in operation from November 2008 to May 2011. The measured data was captured and published in real-time on the project website *www.climacubes.it* every five minutes.

Gross insulation thicknesses are the most important measures to reduce heating energy consumption. The choice of the type of insulation material is of secondary importance. Storage-effective surfaces on the inside can significantly reduce the nocturnal energy consumption but they can not substitute the insulation. Using large south-oriented windows helps reduce the energy consumption by approximately 10 per cent. In case of bad insulation or less storage mass of the building, common simplified calculation methods, proposed by national and international energy conservation regulations, do not apply.

The use of storage-effective surfaces on the inside is important to prevent overheating in summer. The type of insulation material is essential. Materials of lesser thermal storage capacity have to be integrated with solid construction materials (otherwise also gross insulation thicknesses do not help). This is particularly important in constructions where the insulation constitutes the largest part of the materials, eg. light-weight or roof constructions.

Although the calculated TAV and PV values significantly differ from the measured values, they are suitable parameters to evaluate the quality of a building component.

Large, shadeless, south-oriented windows substantially contribute to overheating in summer. They have to be shaded during the day.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Wärmeschutz	2
2.1.1	Transmissionsverluste	2
2.1.2	Lüftungswärmeverluste	4
2.1.3	Solare Wärmegewinne	5
2.1.4	Interne Wärmegewinne	6
2.1.5	Heizwärmebedarf	7
2.1.6	Heizwärmebedarf der Climacubes	7
2.2	Sommerlicher Hitzeschutz	8
2.2.1	Sonneneintragskennwert (DIN 4108-2:2003-07)	9
2.2.2	Temperatur-Amplituden-Verhältnis und Phasenverschiebung	9
3	Methodik und geplante Vorgangsweise	11
3.1	Idee	11
3.2	Aufbau der Cubes	12
3.3	Anlagentechnik und Messgrößen	14
3.3.1	Ausstattung der Cubes	14
3.3.2	Heizung	17
3.3.3	Wetterstation	18
3.4	Lagerplatz	19
3.5	Projekthomepage	20
4	Experimentelle Untersuchungen	21
4.1	Ermittlung des Stromverbrauchs für Heizung	21
4.2	Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen	21
4.3	Wetterdaten	21
5	Ergebnisse	22
5.1	Heizwärmebedarf	22
5.2	Instationäre Temperaturverläufe	25
5.2.1	Aufheiz- und Abkühlverhalten im Winter	25
5.2.2	Überhitzung im Sommer - TAV und PV	28

5.3	Zusätzliche Untersuchungen	34
5.3.1	Feuchtigkeit	34
5.3.2	Wetterstation	36
5.3.3	Infrarot-Thermografie	37
6	Interpretation der Ergebnisse	39
6.1	Heizwärmebedarf	39
6.1.1	Jährlicher Heizwärmebedarf	39
6.1.2	Vergleich Heizenergieverbrauch berechnet - gemessen	40
6.2	Instationäres Verhalten im Winter	40
6.2.1	Aufheiz- und Abkühlvorgänge	40
6.2.2	Fenster	41
6.3	Instationäres Verhalten im Sommer - TAV und PV	41
6.4	Zusätzliche Untersuchungen	42
7	Zusammenfassung	43
7.1	Fazit Wärmeschutz und Heizwärmebedarf	43
7.2	Fazit Sommerlicher Hitzeschutz	44
8	Ausblick	45
	Literatur- und Quellenverzeichnis	46
	Abbildungsverzeichnis	VII
	Tabellenverzeichnis	IX
	Formelverzeichnis	X
A	ANHANG	XI
A.1	Auswertung TAV und PV (berechnet und gemessen)	XII
A.2	Tabellen	XXIII

1 Einleitung

Primäres Ziel des Projektes war die Untersuchung der Auswirkungen verschiedenen Bauweisen und Materialien auf das Raumklima und den Heizwärmebedarf. Im Vordergrund standen dabei die Beobachtung üblicher bautechnischer Größen wie Stromverbrauch für die Beheizung, Raum- und Oberflächentemperaturen sowie Aufheiz- und Abkühlvorgänge im Winter und im Sommer. Die Messungen erfolgten im 5-Minuten-Takt und wurden über die Projekthomepage *www.climacubes.it* in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Die gesamte Anlage war von November 2008 bis Mai 2011 in Betrieb, wobei aus anlagetechnischen Gründen nur der Zeitraum von März 2009 bis März 2010 lückenlos erfasst wurde. Die Daten können auf der Projekthomepage derzeit (Mai 2012) noch mit einem von Schülern programmierten Diagrammgenerator grafisch dargestellt oder als Excel- oder CSV-Datei zur eigenen Verwendung heruntergeladen werden. Die Auswertungen liefern Antworten zu wichtigen Fragestellungen:

- Vor- und Nachteile von Massivbau- und Leichtbauweise
- Unterschiede zwischen verschiedenen Dämmstoffen
- Auswirkung verschiedener Dämmstärken
- Auswirkung verschiedener Fenstertypen
- Verhalten neuartiger, in der Praxis noch wenig verwendeter Materialien (PCM, Vakuumdämmstoffe)

Aus den Erkenntnissen der Auswertungen können verschiedene Zielgruppen einen direkten und indirekten Nutzen ziehen:

- Schüler gewinnen einen praktischen Bezug zum Theorieunterricht und tauchen ein in wissenschaftliches Arbeiten
- Bautechniker und Planer erhalten eine praktische Bestätigung und/oder Widerlegung gängiger Theorien
- Den Baustofflieferanten und Baufirmen bieten sich Verkaufsargumente an
- Forschungseinrichtungen können digitale thermodynamische Simulationen anhand effektiver Messwerte überprüfen

Die vorliegende Arbeit dokumentiert den Aufbau der Versuchsanlage, erläutert die experimentellen Untersuchungen und deren Ergebnisse und versucht, diese zu interpretieren. Die technische Beschreibung der Versuchsanlage wird dabei so weit ausgeführt, wie sie für das Verständnis der Ergebnisse erforderlich ist.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Wärmeschutz

Im Wesentlichen geht es beim Wärmeschutz von Gebäuden darum, durch geeignete Maßnahmen den Energiebedarf zur Beheizung im Winter zu minimieren. Dieser ist abhängig von den klimatischen Bedingungen sowie von der Größe und der thermischen Qualität der Bauteile. Wärmeverluste treten durch Wärmeleitung (Transmissionsverluste) und durch Konvektion (Lüftungsverluste) auf. Durch die solare Strahlung auf Fensterflächen sowie durch zusätzliche Wärmequellen im Inneren eines Gebäudes werden auch Wärmegewinne erzielt. Über die Bilanzierung von Verlusten und Gewinnen berechnet sich schließlich der erforderliche Heizwärmebedarf. Die Berechnungsmethoden sind in europäischen und nationalen Normen geregelt [1][2][3].

2.1.1 Transmissionsverluste

Die Transmissionsverluste setzen sich zusammen aus Wärmeleitung über ebene Bauteile sowie über geometrische und konstruktive Wärmebrücken. Der Einfluss der Wärmebrücken wird für die Erstellung von Energieausweisen (z.B. Klimahaus-Zertifikat [3]) üblicherweise pauschal oder bei genaueren Berechnungen über sogenannte „Wärmebrückenkataloge“ ermittelt.

Transmissionsverluste über ebene Bauteile werden über deren Wärmedurchgangskoeffizienten U , allgemein U-Wert genannt, quantifiziert. Er ist der Reziprokwert des Wärmedurchgangswiderstandes R_T , der sich wiederum aus der Summe der Wärmeübergangswiderstände innen und außen ($R_{Si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$ und $R_{Se} = 0,04 \frac{m^2K}{W}$ [4]) und dem Wärmedurchlasswiderstand R der Bauteilschichten zusammensetzt. Der Wärmedurchlasswiderstand R ist die Summe der Widerstände der einzelnen Bauteilschichten, die wiederum der Quotient aus Schichtdicke und Wärmeleitfähigkeit sind.

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (2.1)$$

R ..Wärmedurchlasswiderstand mehrschichtiger Bauteile $\left[\frac{m^2 K}{W} \right]$

d_i ..Dicke der i .ten Bauteilschicht $[m]$

λ_i ..Wärmeleitfähigkeit der i .ten Bauteilschicht $\left[\frac{W}{mK} \right]$

$$R_T = R_{Si} + R + R_{Se} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (2.2)$$

$$U = \frac{1}{R_T} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.3)$$

Besteht ein Baukörper aus Bauteilen mit unterschiedlichen U-Werten, so berechnet sich der mittlere U-Wert U_m über die flächenmäßige Gewichtung der Einzel-U-Werte. Obwohl [4] eine etwas genauere Approximationsrechnung angibt, ist diese vereinfachende Annahme hinreichend genau, um die im Projekt erfassten Messergebnisse interpretieren zu können.

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i}{A_{ges}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.4)$$

Die klimatischen Bedingungen eines Standortes werden durch die Heizgradtage HGT ausgedrückt. Sie sind die aufsummierten Temperaturdifferenzen zwischen der Soll-Innentemperatur von 20°C und dem langzeitlichen Tagesmittelwert der Außentemperatur im Laufe einer Heizperiode. Dabei werden nur jene Tage berücksichtigt, deren mittlere Außentemperatur die untere Heizgrenztemperatur von 12°C unterschreitet. Stehen nur Monatsmittelwerte zur Verfügung, so können die Heizgradtage laut [1] mit Formel 2.5 berechnet werden.

$$HGT = \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{e,i}) \cdot t \quad (2.5)$$

$$HGT \dots \text{Heizgradtage} \left[\frac{Kd}{a} \right]$$

$$\theta_i \dots \text{Soll-Innentemperatur (z.B. 20)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{e,i} \dots \text{Mittelwert der Außentemperatur [}^\circ\text{C]}$$

$$t \dots \text{Anzahl Tage pro Jahr} \left[\frac{d}{a} \right]$$

Die jährlichen Transmissionsverluste eines Baukörpers berechnen sich nun wie folgt:

$$Q_T = U_m \cdot A_{ges} \cdot HGT_{20/12} \cdot \frac{24h}{d} \cdot \frac{1k}{1000} \left[\frac{kWh}{a} \right] \quad (2.6)$$

2.1.2 Lüftungswärmeverluste

Lüftungsverluste entstehen durch den Austausch der warmen Innenraumluft durch kalte Außenluft. Die Luftwechselrate n gibt Auskunft darüber, wie oft das Raumluftvolumen stündlich durch kalte Außenluft ersetzt wird. In Wohngebäuden ist hierfür aus hygienischen Gründen ein Mindestwert von $n = 0,5 \frac{1}{h}$ anzunehmen. Die jährlichen Lüftungswärmeverluste sind also die über die Masse der Raumluf abtransportierte Wärme und werden wie folgt berechnet:

$$Q_V = V_L \cdot c_L \cdot \rho_L \cdot n \cdot HGT \cdot \frac{24h}{d} \cdot \frac{1k}{1000} \quad (2.7)$$

$$Q_V \text{..Lüftungswärmeverluste} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$V_L \text{..Beheiztes Luftvolumen} [m^3]$$

$$c_L \text{..Spez. Wärmekapazität der Luft } 0,28 \left[\frac{Wh}{kgK} \right]$$

$$\rho_L \text{..Dichte der Luft } 1,20 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$n \text{..Luftwechselrate} \geq 0,5 \left[\frac{1}{h} \right]$$

$$HGT \text{..Heizgradtage} \left[\frac{Kd}{a} \right]$$

2.1.3 Solare Wärmegewinne

Solare Gewinne werden über die Globalstrahlung durch transparente Bauteile erzielt. Diese kann allerdings nicht vollständig genutzt werden, sondern hängt von der Art und der Ausrichtung der Verglasung sowie der Verschattungssituation ab. Je nach Aufbau und Anzahl der Scheiben einer Verglasung ändert sich der *Energiedurchlassgrad* g , der ein Maß für die Durchlässigkeit einer Verglasung für - senkrecht einfallende - solare Wärmestrahlung ist. Entsprechende Werte sind Tabellen oder dem Prüfzeugnis des Herstellers zu entnehmen. Aufgrund von Verschmutzung und nicht senkrechtem Strahlungsdurchgang wird der g -Wert zum *Gesamtenergiedurchlassgrad* g_w korrigiert. Der in [3] angegebene Berechnungsleitfaden basiert auf [1], gibt aber zusätzlich die erforderlichen Korrekturfaktoren mit hinreichender Genauigkeit an.

$$Q_S = \sum_{j=1}^n I_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n A_g \cdot f_s \cdot g_w \right) \quad (2.8)$$

Q_S ..Solare Wärmegewinne $\left[\frac{kWh}{a} \right]$

I_j ..Globalstrahlung auf j.te Himmelsrichtung lt. Messdaten oder Tabellen $\left[\frac{kWh}{m^2 \cdot a} \right]$

A_g ..Wirksame Kollektorfläche $[m^2]$

f_s ..Korrekturfaktor für Verschattung (0,9=unverschattet - 0,6=verschattet [3]) $[]$

g_w ..Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung $[]$

mit

$$g_w = 0,9 \cdot g \quad (2.9)$$

g ..Energiedurchlassgrad der Verglasung (laut Tabellen oder Prüfzeugnis) $[]$

0,9..Korrekturfaktor für Verschmutzung und nicht senkrechtem Strahlungsdurchgang $[]$

2.1.4 Interne Wärmegewinne

Interne Wärmegewinne entstehen durch zusätzlich zum Heizsystem bestehende Wärmequellen im Inneren eines Gebäudes:

- Abwärme von Personen
- Elektrische Geräte und Beleuchtungskörper
- Sonstige Abwärmequellen (Warmwasserleitungen, Abwassersysteme)

Interne Gewinne werden pauschal nach Formel 2.10 berechnet, wobei die *mittlere Wärmestromdichte* q_i je nach Gebäudenutzung variiert und Tabellen entnommen wird. [1] [3]

$$Q_I = q_i \cdot NGF_B \cdot HT \cdot \frac{24h}{d} \cdot \frac{1k}{1000} \quad (2.10)$$

$$Q_I \dots \text{Interne Wärmegewinne} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$q_i \dots \text{Mittlere Wärmestromdichte, abh. von der Gebäudenutzung} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$HT \dots \text{Anzahl der Heiztage} \left[\frac{d}{a} \right]$$

2.1.5 Heizwärmebedarf

Der gesamte Heizwärmebedarf Q_h eines Gebäudes ergibt sich aus der Bilanzierung von Transmissions- und Lüftungsverlusten sowie solaren und internen Gewinnen. In welchem Ausmaß die Wärmegewinne genutzt werden können, hängt von der Bauweise des Gebäudes ab. Schwere und massive Bauteile können die Gewinne besser zwischenspeichern als leichte. Über einen pauschalen Nutzungsgrad η wird dieser Tatsache Rechnung getragen.

$$Q_h = Q_T + Q_V - \eta \cdot (Q_S + Q_I) \quad (2.11)$$

$$Q_h \dots \text{Heizwärmebedarf} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$Q_T \dots \text{Transmissionsverluste} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$Q_V \dots \text{Lüftungsverluste} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$Q_S \dots \text{Solare Wärmegewinne} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$Q_I \dots \text{Interne Wärmegewinne} \left[\frac{kWh}{a} \right]$$

$$\eta \dots \text{Nutzungsgrad für Wärmegewinne lt. Tabellen [3] []}$$

2.1.6 Heizwärmebedarf der Climacubes

Bei der *Berechnung des Heizwärmebedarfs* für die Climacubes war es notwendig, einige Vereinfachungen anzunehmen sowie bestimmte Größen gesondert zu betrachten, um die Berechnungen mit den Messwerten vergleichen zu können:

1. *Keine Lüftungsverluste* ($Q_V = 0$). Die Cubes waren außen allseitig mittels einer Unterdachbahn luftdicht verkleidet und die innenliegende OSB-Konstruktion durchgehend verleimt, sodass Luftaustausch durch reine Diffusion erfolgte und damit vernachlässigt werden kann.
2. *Keine internen Wärmegewinne* ($Q_I = 0$). Im Inneren der Cubes waren keine zusätzlichen Wärmequellen vorhanden.
3. *Transmissionsverluste* und *solare Gewinne* wurden über mehrjährige effektive Messdaten [8][9] ermittelt, anstatt über pauschal berechnete Tabellenwerte (z.B. in [3]).
4. Nachdem die Heizungssteuerung so eingestellt ist, dass tagsüber für 12 Stunden auf eine Soll-Innentemperatur von 20°C beheizt wird und nachts für ebenfalls 12 Stunden auf 13°C abgesenkt wird, wurde eine mittlere gewichtete Soll-Innentemperatur angenommen:

$$\theta_i = \frac{20^\circ\text{C} \cdot 12h + 13^\circ\text{C} \cdot 12h}{24h} = 16,5^\circ\text{C} \quad (2.12)$$

θ_i ..Mittlere Soll-Innentemperatur [$^\circ\text{C}$]

5. Der Heizwärmebedarf wurde über monatliche Bilanzen ermittelt, d.h. er wurde für jeden Monat mit den jeweiligen Klimadaten berechnet und anschließend aufsummiert. Dabei wurden nur jene Monate berücksichtigt, deren mittlere Außentemperatur θ_e kleiner oder gleich der mittleren Soll-Innentemperatur von $16,5^\circ\text{C}$ ist. Es sind dies die Monate Oktober bis April. Damit erhöhen sich auch die solaren Globalstrahlungswerte im Vergleich zu den Werten in [3], da die Heizperiode um einen halben Monat im Oktober und einen halben Monat im April länger wird.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 5.4 auf Seite 25 sowie in Tabelle A.2 im Anhang ersichtlich.

2.2 Sommerlicher Hitzeschutz

Für eine aussagekräftige Beurteilung des sommerlichen Hitzeschutzes eines Gebäudes gibt es unterschiedliche Ansätze. Während [4] die DIN 4108-2:2003-07 zitiert und die sommerliche Überhitzung ausschließlich über den sogenannten *Sonneneintragskennwert* beurteilt, wird in der Praxis häufig die Bewertung der raumumschließenden Bauteile über das *Temperatur-Amplituden-Verhältnis TAV* und die *Phasenverschiebung PV* (oder φ) angewandt.

2.2.1 Sonneneintragskennwert (DIN 4108-2:2003-07)

Der Sonneneintragskennwert S ist das Verhältnis zwischen der Summe aller transmissionswirksamen Verglasungsflächen bezogen auf die Nettogrundfläche eines Raumes [4].

$$S = \frac{\sum_{j=1}^n A_{w,j} \cdot g_{total,j}}{A_G} \quad (2.13)$$

S ..Sonneneintragskennwert []

$A_{w,j}$..Fensterfläche in der jeweiligen Himmelsrichtung [m^2]

A_G ..Nettogrundfläche des betrachteten Raumes [m^2]

mit

$$g_{total} = g \cdot F_C \quad (2.14)$$

g_{total} ..Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung inkl. Abschattungsvorrichtungen []

g ..Energiedurchlassgrad der Verglasung (laut Tabellen oder Prüfzeugnis) []

F_C ..Abminderungsfaktor für Sonnenschutzeinrichtungen (laut Tabellen) []

Der Abminderungsfaktor F_C ist abhängig von der Beschaffenheit der Sonnenschutzvorrichtungen und darf einen Höchstwert S_{zul} nicht überschreiten. Dieser Höchstwert ist wiederum von den klimatischen Verhältnissen des Standortes, der wirksamen Speicherfähigkeit der Bauteile, dem Lüftungsverhalten sowie der Ausrichtung der Verglasungsflächen abhängig. Zur Einhaltung des zulässigen Sonneneintragskennwertes reicht es also aus, dass Fensterflächen genügend klein (oder keine vorhanden) sind, unabhängig davon, welche Speicherfähigkeit die raumumschließenden Bauteile haben.

2.2.2 Temperatur-Amplituden-Verhältnis und Phasenverschiebung

Während die Annahme eines stationären Temperaturgefälles zwischen innen und außen zur Beurteilung des winterlichen Wärmeschutzes eines Gebäudes ausreicht, ist dies für die Temperaturschwankungen im Sommer nicht mehr zulässig. Für die Analyse solcher instationärer Wärmeströmungsvorgänge sind zum Teil aufwändige Berechnungsmethoden (Finite-Elemente-Berechnungen, analytische Lösungen mittels Laplace-Transformation u.a.[7]) not-

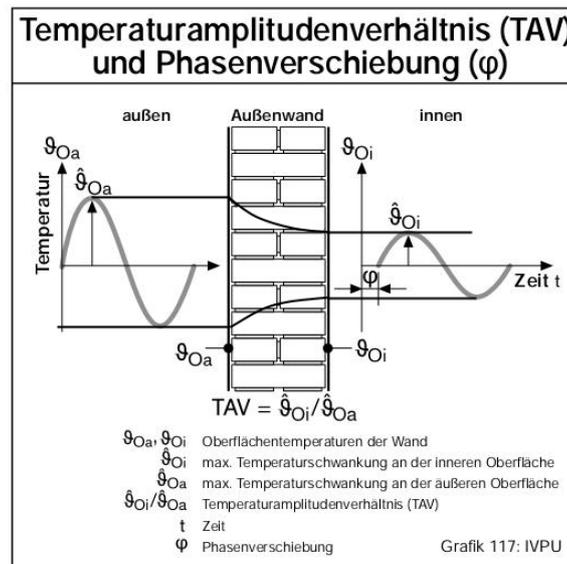


Abbildung 2.1: Dämpfung (Temperatur-Amplituden-Verhältnis) und zeitliche Verzögerung (Phasenverschiebung) der auf der Außenseite einer Wand auftreffenden sinusförmigen Temperaturwelle; Quelle: [5], modifiziert durch den Autor

wendig und können nur mit Rechnerunterstützung bewältigt werden.

Eine vereinfachte und trotzdem aussagekräftige Methode zur thermischen Grobbeurteilung eines Bauteils hat Heindl [6] entwickelt. Dabei werden die Temperaturschwankungen eines Tag-Nacht-Zyklus als periodische Sinusschwingung idealisiert. Diese Temperaturschwankungen, die auf der Außenseite eines Bauteils mit einer bestimmten Amplitude auftreten, treten auf der Innenseite gedämpft und zeitlich verzögert auf. Die Dämpfung wird durch das *Temperatur-Amplituden-Verhältnis TAV* und die zeitliche Verzögerung durch die *Phasenverschiebung φ* dargestellt. Beide Größen werden mit dem Matrizen-Multiplikations-Verfahren, welches Heindl entworfen hat, ermittelt. Eingangsgrößen bei der Berechnung sind:

- Materialspezifische Kenngrößen der Bauteilschichten (Rohdichte ρ , spezifische Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ)
- Schichtenfolge
- Betrag der Temperaturschwankung (Amplitude)

Alle weiteren Einflüsse wie z.B. Beschaffenheit und Farbe der Oberflächen, schwankende Klimadaten, Verschattungen, Benutzerverhalten, Speicherfähigkeit der übrigen raumumschließenden Bauteile usw. werden nicht berücksichtigt. Die Periode wird durch die Dauer eines Tag-Nacht-Zyklus mit 24 Stunden festgelegt. Ergebnis der Berechnung ist schlussendlich der Faktor, um welchen die Temperaturamplitude gedämpft wird, dargestellt durch das *Temperatur-Amplituden-Verhältnis* (was der Kehrwert der Dämpfung ist), sowie die Zeit in Stunden (*Phasenverschiebung*), nach der die Temperaturwelle auf der Innenseite des Bauteils auftritt.

3 Methodik und geplante Vorgangsweise

3.1 Idee

Idee des Projektes war, anhand von Messungen an einfachen Gebäudemodellen, genannt „Climacubes“, Erkenntnisse über bauphysikalische und thermodynamische Vorgänge zu gewinnen, Theorien zu bestätigen (oder gegebenenfalls auch zu widerlegen), und diese Erkenntnisse einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Bei den Messungen handelte es sich im Wesentlichen um die Erfassung von Temperaturverläufen und des Stromverbrauches zur Beheizung. Wesentlicher Bestandteil des Projektkonzeptes war die Echt-Zeit-Veröffentlichung der Messdaten. Dazu wurde eine mySQL-Datenbank eingerichtet und über die Projekthomepage zugänglich gemacht.

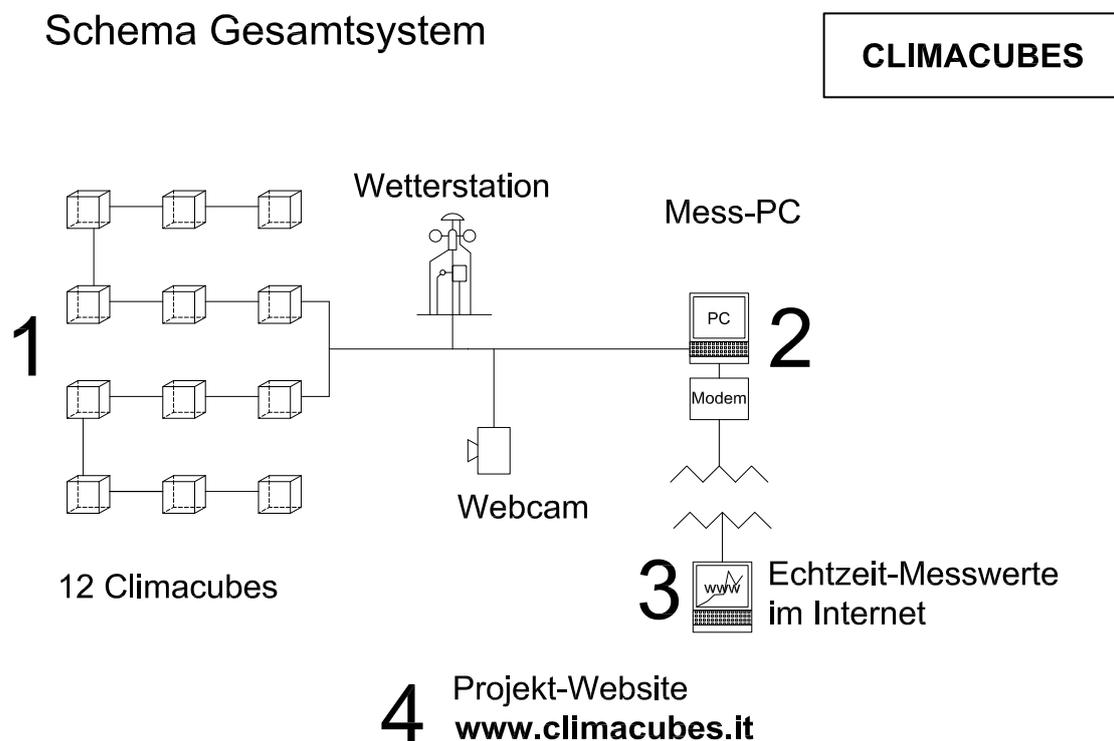


Abbildung 3.1: Gesamtschema der Messanlage: 1) Cubes 2) Mess-PC 3) Internetanschluss 4) Projekthomepage

3.2 Aufbau der Cubes

Die Cubes bestanden aus einer Grundkonstruktion aus 2 cm dicken OSB-Bauplatten und wurden außen mit verschiedenen Dämmmaterialien und Dämmstärken versehen. Als Dämm- und Baustoffe wurden einerseits einige der häufigsten eingesetzten verwendet; andererseits wurden auch Materialien untersucht, die in der Praxis noch wenig erprobt sind. Den Wetterschutz übernahm eine diffusionsoffene und UV-beständige Unterdachbahn. Cube 1 und 2 waren identisch aufgebaut, um eine gewisse Systemsicherheit zu gewährleisten, d.h. diese beiden Würfel sollten mehr oder weniger dieselben Ergebnisse liefern.¹ Die restlichen Cubes waren in Form, Größe und Ausführung so gewählt, dass sich zwei Würfel jeweils nur in genau einem Parameter voneinander unterscheiden. So gab es beispielsweise mehrere Würfel mit verschiedenen Dämmmaterialien derselben Stärke, umgekehrt verschiedene Dämmstärken desselben Materials. Zwei Cubes besaßen zudem ein Fenster. Somit waren zwei Konstruktionen direkt miteinander vergleichbar und Unterschiede in den Messreihen folglich auf genau den Einfluss der unterschiedlichen Bauweise zurückzuführen.

Tabelle 3.1: Aufbau der Cubes

<i>Cube Nr.</i>	<i>Name</i>	<i>Konstruktiver Aufbau</i>
1	Alice	2cm OSB+4cm WF
2	Alice's Reference	identischer Aufbau wie Cube 1
3	Pamela	2cm OSB+12cm WF
4	Alfred	2cm OSB+12cm EPS
5	Pumuckl	2cm OSB+12cm MW
6	Danny	2cm OSB+12cm MF
7	VakuuStar	2cm OSB+3cm VIP
8	Sandy	12cm PUR, ohne OSB-Unterkonstruktion
9	Natasha	2cm OSB+4cm WF, Innenauskleidung mit 5,5cm Vollziegel
10	Cordiale	2cm OSB+4cm WF, Innenauskleidung mit 1,5cm PCM
11	Gonzo	2cm OSB+12cm WF, 2WSV, $U_g = 1,1W/m^2K$, $g = 0,55$
12	Kleebblatt	2cm OSB+12cm WF, 3WSV, $U_g = 0,6W/m^2K$, $g = 0,48$

Legende (Kurzbezeichnungen tlw. nach [4]):

OSB..OSB-Bauplatte (Oriented Strand Board), *WF*..Holzweichfaserplatte (Wood Fibre), *EPS*..Expandiertes Polystyrol (Expanded Polystyrol), *MW*..Steinwolle (Mineral Wool), *MF*..Mineralschaumplatte

¹Cube 2 fiel allerdings bald nach Inbetriebnahme der Anlage durch einen technischen Defekt an der Datenleitung aus und konnte nicht wieder in Betrieb genommen werden.

(Mineral Foam Board), *VIP*..Vakuumpaneele (Vacuum Insulated Panel), *PUR*..Polyurethan-Sandwichpaneel (Polyurethane), *PCM*..Phasenwechselmaterial (Phase Change Material), *2WSV*..2fach-Wärmeschutzverglasung 4/18/4 mm, Argonfüllung, 50x50cm nach Süden ausgerichtet, *3WSV*..3fach-Wärmeschutzverglasung 50x50cm 4/10/4/10/4 mm, Kryptonfüllung, nach Süden ausgerichtet.

Tabelle 3.2: Technische Daten der Cubes

<i>Cube</i>	<i>Name</i>	U_m	m_A	A_m	Φ_{max}	P_{el}
<i>Nr.</i>		[W/m ² K]	[kg/m ²]	[m ²]	[W]	[W]
1	Alice	0,73	19	6,26	160	175
2	Alice's Reference	0,73	19	6,26	160	175
3	Pamela	0,29	30	7,38	75	113
4	Alfred	0,27	16	7,38	70	113
5	Pumuckl	0,29	31	7,38	75	113
6	Danny	0,33	29	7,38	85	113
7	VakuuStar	0,12	19	6,14	26	35
8	Sandy	0,18	17	7,61	48	64
9	Natasha	0,69	107	5,67	137	175
10	Cordiale	0,69	31	6,09	147	175
11	Gonzo	0,32	30	7,38	88	113
12	Kleblatt	0,30	30	7,38	83	113

Legende:

Name..Die Namen der Cubes wurden von Schülern vergeben; U_m ..mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient, m_A ..flächenbezogene Masse der Cubewand, A_m ..mittlere Verlustfläche (Mittelwert zwischen Innen- und Außenoberfläche), Φ_{max} ..maximale Wärmeverlustleistung laut Formel 3.1, P_{el} ..installierte elektrische Heizleistung lt. Formel 3.2.



Abbildung 3.2: Bau der Cubes am Beispiel von Cube 6: die tragende Unterkonstruktion aus 2cm starken OSB-Bauplatten wird gedämmt (hier mit 12 cm starken Mineral-schaumplatten) und anschließend mittels UV-beständiger und wasserdichter Unterdachbahn wettergeschützt.

3.3 Anlagentechnik und Messgrößen

3.3.1 Ausstattung der Cubes

In jedem Cube waren sechs Sonden eingebaut, die folgende Messwerte lieferten:

Tabelle 3.3: Installierte Messsonden

Messgröße	Beschreibung
T_1	Raumlufttemperatur in Cubemitte
T_2	Äußere Oberflächentemperatur auf der Südseite
T_3	Innere Oberflächentemperatur auf der Südseite
T_4	Innere Oberflächentemperatur auf der Nordseite
T_5	Äußere Oberflächentemperatur auf der Nordseite
φ	Relative Feuchtigkeit der Innenluft in Cubemitte

An jedem Cube hing ein Microcontroller, der alle fünf Minuten die Messsonden abfragt und die Messwerte mittels Kabelverbindung an den Mess-PC sendet. Auf diesem PC lief eine Software, welche die Messwerte einlas und mittels Internetverbindung in die MySQL-

Datenbank schrieb.

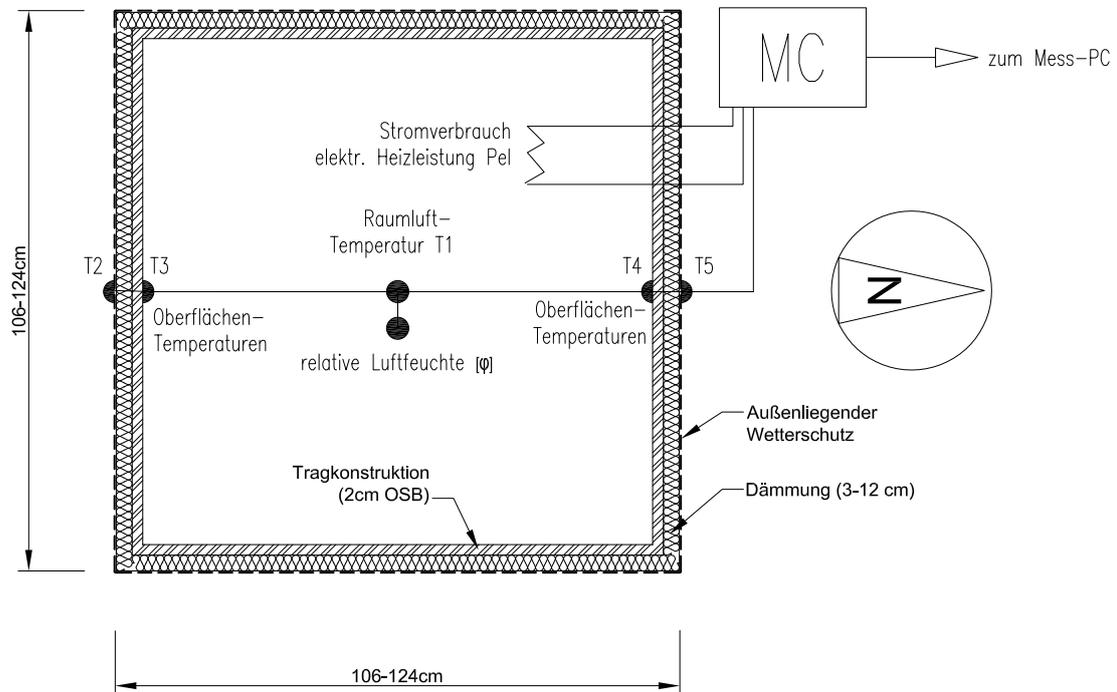


Abbildung 3.3: Ausstattung der Cubes: Schema Konstruktion und Messeinrichtungen

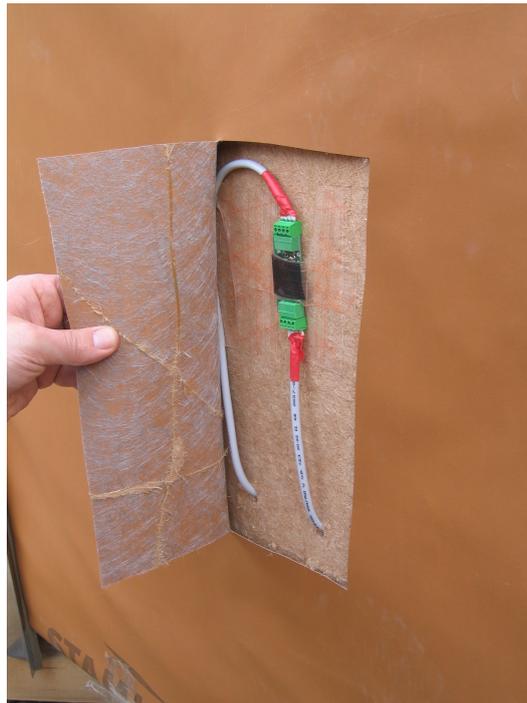


Abbildung 3.4: Außenliegende Temperatursonde. Die Sonde wurde an der Außenoberfläche der Dämmung fixiert und die Wetterschutzfolie anschließend luft- und wasserdicht abgeklebt.



Abbildung 3.5: Innenausstattung der Cubes: Messsonden für Oberflächentemperaturen süd- und nordseitig, Sonde für Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit und Heizmodul

3.3.2 Heizung

Alle Cubes besaßen eine Heizung. Auf einer Kühlrippe wurden 3 bis 4 elektrische Heizwiderstände in Reihe geschaltet und erbrachten je nach Cube eine Heizleistung von 35 bis 175 Watt (siehe Tabelle 3.2). Sie wurden mittels 48-Volt-Gleichspannung betrieben. Der Microcontroller berechnete aufgrund der Einschaltdauer und der installierten elektrischen Leistung den Energieverbrauch in Wattsekunden. Der aufsummierte Wert wurde mit den Temperaturmesswerten zeitgleich in die Datenbank geschrieben. Zur Ermittlung der erforderlichen Heizleistung, die nötig war, um auch am kältesten Tag des Jahres die Innenraumtemperatur auf 20°C zu halten, war zunächst die Ermittlung der maximalen Wärmeverlustleistung der einzelnen Cubes erforderlich.

$$\dot{\Phi}_{max} = U_m \cdot A_m \cdot (t_i - t_{ne}) = 0,73 \frac{W}{m^2K} \cdot 6,26m^2 \cdot (20^\circ C - (-15^\circ C)) = 160W \quad (3.1)$$

$\dot{\Phi}_{max}$..Maximale Wärmeverlustleistung [W]

U_m ..Mittlerer U-Wert lt. Formel 2.4 $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

A_m ..Mittlere Verlustfläche [m^2]

t_i ..Maximale Sollinnentemperatur [$20^\circ C$]

t_{ne} ..Normaußentemperatur des Standortes (Meran) lt. Klimadaten [$-15^\circ C$]

Zur Realisierung der Heizmodule wurden Drahtwiderstände in Aluminiumgehäuse vom Typ HS50 der Firma ARCOL verwendet. Diese wurden auf eloxierten Aluminiumkühlkörper vom Typ „SK 136/150/SA“ der Firma „Fischer elektronik“ in Reihe montiert und an eine 48V-Kleinspannung angeschlossen. Durch sinnvolle Kombination der Nennwiderstände von 3,3 Ω , 6,8 Ω , 12 Ω und 22 Ω wurde versucht, die Heizleistung so genau wie möglich der in Gleichung 3.1 ermittelten Wärmeverlustleistung anzupassen.

$$P_{el} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R_{ges}} = \frac{48V^2}{4 \cdot 3,3\Omega} = 175 [W] \quad (3.2)$$

P_{el} ..Installierte elektrische Heizleistung

U ..Gleichspannungsversorgung 48 [V]

I ..Stromstärke [A]

R_{ges} ..Gesamtwiderstand der in Reihe geschalteten Widerstände [Ω]



Abbildung 3.6: Heizmodul der Cubes: Reihenschaltung von Elektrowiderständen, montiert auf Alu-Kühlkörper zur Optimierung der Wärmeabgabe. Das Heizmodul war an 48V-Kleinspannung angeschlossen und erbrachte Leistungen von 35 bis 175 W.

Die Heizung war so gesteuert, dass alle Cubes von 8 Uhr morgens bis 20 Uhr abends auf eine Innentemperatur T_1 von 20°C beheizt waren. In der restlichen Zeit von 20 Uhr abends bis 8 Uhr des folgenden Tages wurde die Innentemperatur auf 13°C abgesenkt.

3.3.3 Wetterstation

Die Umgebungsbedingungen am Standort wurden von einer Wetterstation gemessen. Diese lieferte folgende Daten:

- Lufttemperatur [$^{\circ}C$]
- relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Windgeschwindigkeit [m/s] und -richtung
- Absoluter Luftdruck [$hPa = mbar$]
- Niederschlagsmenge [mm], aufsummiert für verschiedene Zeiträume

Die Wetterdaten wurden in regelmäßigen Abständen von etwa 10-14 Tagen aus dem internen Speicher der Wetterstation abgerufen und in die Online-Datenbank geschrieben.



Abbildung 3.7: Die Wetterstation am Standort erfasst im Abstand von fünf Minuten die klimatischen Bedingungen

3.4 Lagerplatz

Die Cubes wurden mittels Autokran auf das Dach des Schulgebäudes gehoben und dort so verteilt, dass sie sich möglichst nicht gegenseitig beeinflussten und alle dieselben klimatischen Bedingungen hatten.



Abbildung 3.8: Der Lagerplatz der Cubes befand sich auf dem unverschatteten Schuldach (im Bild kurz vor der Abmontage, Cube 12 ganz rechts wurde bereits entfernt)

3.5 Projekthomepage

Die eigens eingerichtete Projekt-Website <http://www.climacubes.it> ist zum aktuellen Zeitpunkt (März 2012) noch aktiv und dient der technischen Dokumentation des Projektes und der Veröffentlichung der Messdaten. Mehrere mit PHP programmierte Module wie der Diagrammeditor oder das Modul "cubeVIEW" erlauben detaillierte Online-Darstellungen der Messergebnisse. Weiters können die Messergebnisse über eine Zeitauswahl heruntergeladen werden, um sie mit Tabellenkalkulationsprogrammen weiterzuverarbeiten. Eine Webcam zeigte während der Messphase online alle 60 Sekunden einen aktualisierten Blick auf die Cubes und auf das Wetter am Standort.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Ermittlung des Stromverbrauchs für Heizung

Um den Stromverbrauch für die Beheizung der Cubes zu ermitteln, wurde dem jeweiligen Mikrocontroller die mit Formel 3.2 auf Seite 18 ermittelte Heizleistung einprogrammiert. Jede Sekunde kontrollierte die Elektronik, ob die Heizung eingeschaltet war, multiplizierte gegebenenfalls den Leistungswert mit der Zeit und addierte dieses Teilergebnis zum bisherigen dazu. Das Ergebnis war der gesamte bisherige Stromverbrauch in Wattsekunden. Der Mess-PC holte sich diesen Wert zusammen mit den Werten der Temperatursonden von jedem der 12 Steuereinheiten und schrieb sie in die `mysql`-Datenbank. Wollte man nun den Stromverbrauch für einen bestimmten Zeitraum wissen, so musste die Differenz der Stromzählerwerte zwischen Ende und Anfang gebildet werden.

4.2 Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen

Mit den in Tabelle 3.3 auf Seite 14 angegebenen Messsonden wurde das thermische Verhalten der Cubes überwacht. Durch die bewusste Anordnung der Sonden zwischen Süd- und Nordseite sowie in Cubemitte sollten detaillierte Analysen und Unterschiede zwischen der direkt besonnten und der abgeschatteten Seite ermöglicht werden. Das Sondenmodul in Cubemitte erfasste auch die relative Luftfeuchtigkeit. Alle Messwerte wurden wie der Stromverbrauch in 5-Minuten-Intervallen ermittelt und in der Datenbank gespeichert.

4.3 Wetterdaten

Die Wetterdaten wurden von einer Funkwetterstation vom Typ PCE-FWS 20 der Firma PCE Deutschland GmbH, Meschede erfasst. Die Daten waren nur manuell über die mitgelieferte Software abrufbar. Der Datenbuffer hatte eine Speicherkapazität von 4080 Datensätzen und musste somit bei einem Messintervall von fünf Minuten mindestens alle 14 Tage entleert werden. Die Messwerte wurden über die Administratorplattform „`phpMyAdmin`“ per Fernwartung in die Wettertabelle der Datenbank geschrieben.

5 Ergebnisse

5.1 Heizwärmebedarf

Jährlicher Heizwärmebedarf

Abbildung 5.1 auf Seite 23 stellt den gemessenen Stromverbrauch zur Beheizung der Cubes für ein vollständiges Kalenderjahr dar. Erwartungsgemäß haben die Cubes mit der geringsten Wärmedämmung (Cube 1, 9 und 10) den größten Heizwärmebedarf. Alle drei Cubes haben einen ähnlich hohen Tages-Heizwärmebedarf (heller Balkenteil). Cube 1 hat insgesamt den größten Heizenergiebedarf, weil der Heizwärmebedarf in der Nacht deutlich über dem der anderen beiden liegt.

Die Cubes 3,4,5,6 und 8 haben annähernd denselben Verbrauch. Die U-Werte unterscheiden sich bis auf Cube 8 kaum voneinander. Cube 8 hat zwar einen deutlich kleineren U-Wert, aber trotzdem denselben Energieverbrauch. Allerdings unterscheidet sich die Verteilung auf Tag- und Nachtverbrauch: Cube 8 hat einen deutlich geringeren Tages-Heizwärmebedarf als die anderen, dafür einen deutlich höheren Heizwärmebedarf in der Nacht.

Der Energieverbrauch der Cubes 11 und 12 ist bei gleicher Dämmung, aber zusätzlichem Fenster, insgesamt um ca. 10% niedriger als der von Cube 3. Der Tagesenergiebedarf ist um etwa 20% niedriger als bei Cube 3, in der Nacht allerdings doppelt so groß. Der Gesamtenergiebedarf der beiden Fenster-Cubes ist annähernd identisch, unabhängig von der Art der Verglasung (2fach- oder 3fach-Verglasung). Cube 7 hat den mit Abstand geringsten Energieverbrauch.

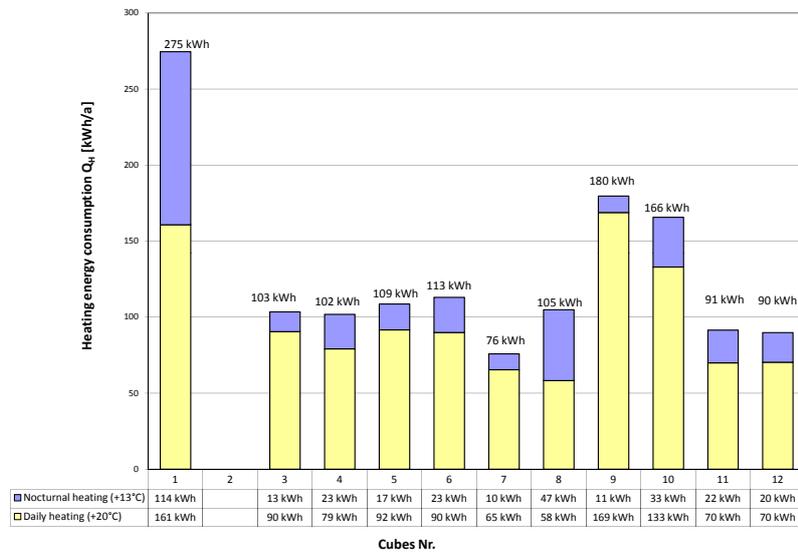


Abbildung 5.1: Gemessener Heizwärmebedarf aller Cubes für ein vollständiges Jahr - getrennt nach Tag- und Nachtverbrauch

Heizwärmebedarf für eine Kälteperiode

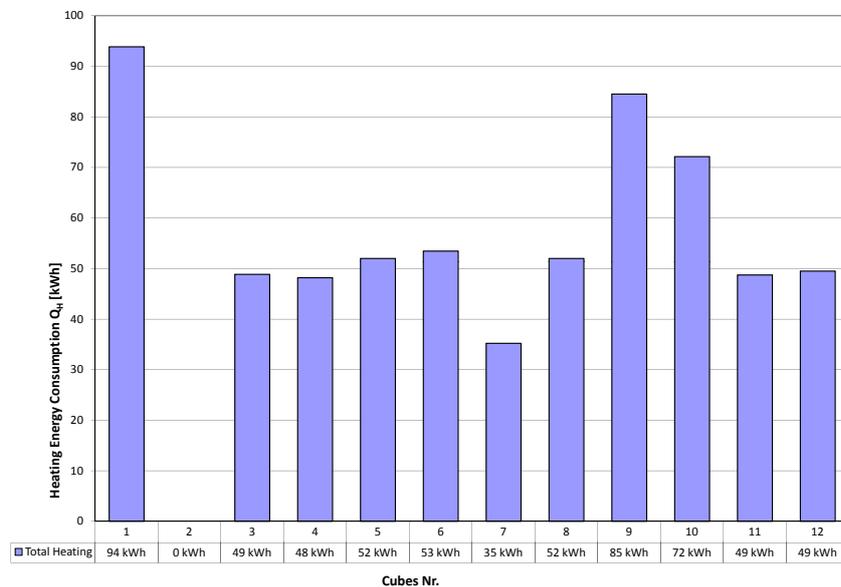


Abbildung 5.2: Gemessener Heizwärmebedarf aller Cubes für eine intensive Kälteperiode (Dezember 2009 und Jänner 2010)

Heizwärmebedarf im Sommer

Der Energieverbrauch, um im Sommer die eingestellten Innentemperaturen (20°C am Tage und 13°C in der Nacht) zu halten, ist im Vergleich zum Energieverbrauch eines Jahres verschwindend gering. Bemerkenswerterweise haben Cube 1 mit dem schlechtesten Dämmstandard und Cube 8 mit dem zweitbesten den größten Energieverbrauch, während die Fenster-Cubes 11 und 12 im Sommer den geringsten Energiebedarf haben. Cube 9 verzeichnet im Sommer überhaupt keinen Heizwärmebedarf.

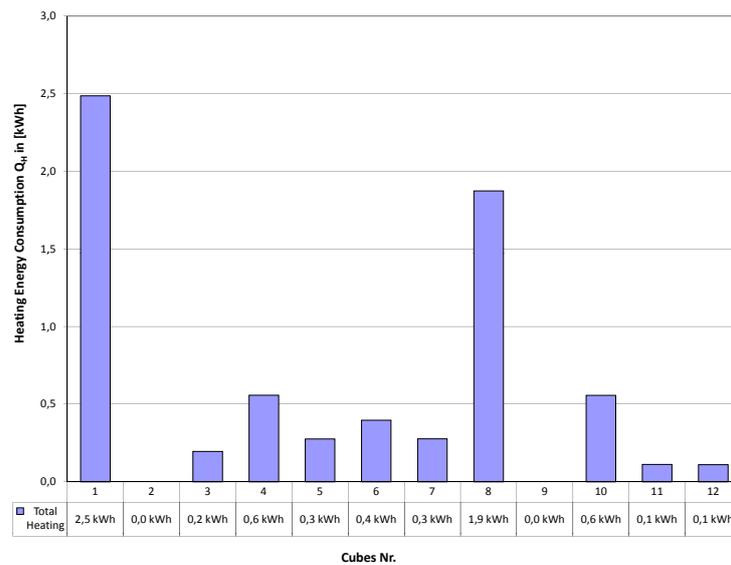


Abbildung 5.3: Gemessener Heizwärmebedarf aller Cubes für eine Sommerperiode (27. Mai bis 1. Sept. 2009)

Vergleich Heizwärmebedarf berechnet - gemessen

Grundsätzlich stimmen die berechneten Werte annähernd mit den gemessenen überein, meist sind sie geringfügig niedriger als die gemessenen. Ausnahmen sind die Cubes 1, 7 und 8. Diese Cubes haben einen deutlich höheren gemessenen Verbrauch.

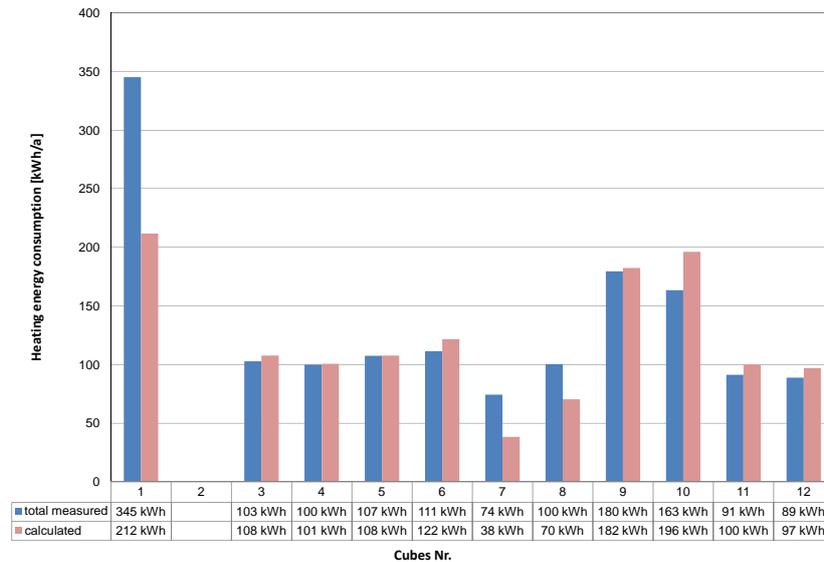


Abbildung 5.4: Vergleich des gemessenen und theoretisch berechneten Heizwärmebedarfs aller Cubes für ein vollständiges Jahr

5.2 Instationäre Temperaturverläufe

5.2.1 Aufheiz- und Abkühlverhalten im Winter

Aufheizvorgang

Cube 1 erfährt von allen Cubes ohne Fenster die schnellste Aufheizung. Cube 9 und 10 heizen sich bei ähnlichem Dämmstandard und gleich starkem Heizmodul aber deutlich langsamer auf: während Cube 10 zwar mit klarem Abstand, aber doch als nächster folgt, benötigt Cube 9 von allen Cubes die längste Zeitspanne, um auf 20°C zu kommen. Alle anderen Cubes mit gleichem hohen Dämmstandard verhalten sich annähernd identisch.

Gegen 9.30 Uhr am Vormittag geht am Lagerplatz die Sonne auf. Dies wirkt sich bei den beiden Fenster-Cubes 11 und 12 umgehend auf die Entwicklung der Innenraumtemperatur aus. Cube 11 mit 2fach-Wärmeschutzverglasung wird innerhalb einer Stunde von 16° auf 24° aufgeheizt, verliert aber sehr bald wieder die Temperatur und muss beheizt werden. Cube 12 hingegen wird verzögert aufgewärmt, kann die Übertemperatur aber deutlich länger halten. Trotzdem kühlt auch dieser Cube ab ca. 11 Uhr wieder ab (und muss bei Erreichen von 20°C erneut beheizt werden).

Zu beobachten ist auch eine Besonderheit von Cube 7: die Innentemperatur von 20° wird an kalten Tagen nie erreicht. Sie erreicht bis 17 Uhr eine Maximaltemperatur von 17°C. Nachher schafft es das Heizmodul nicht mehr.

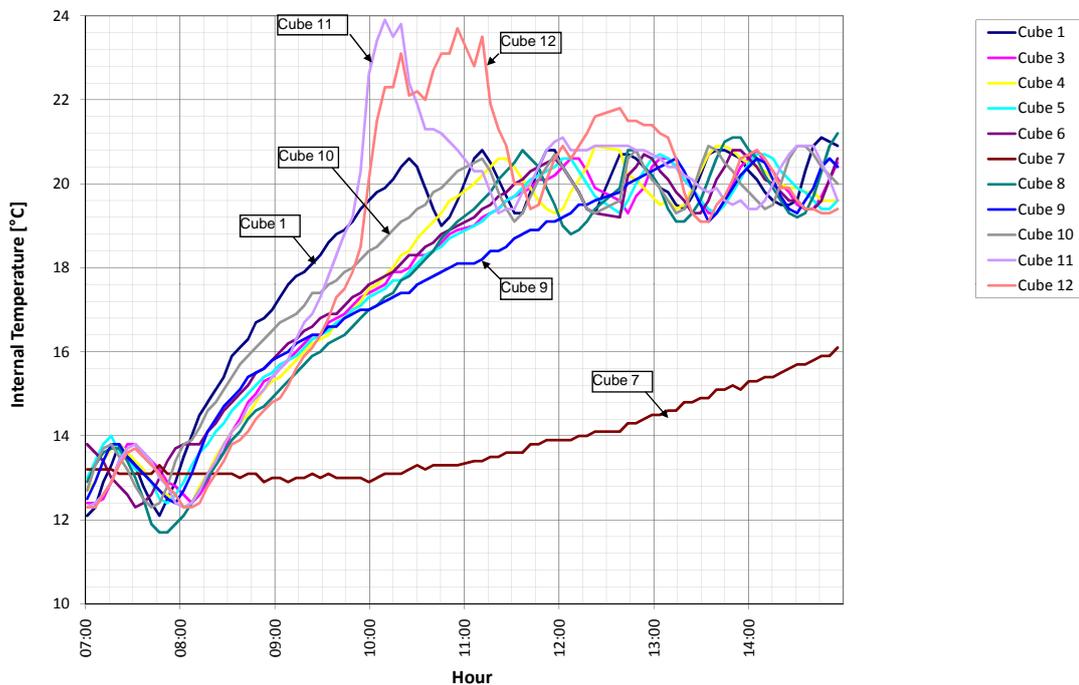


Abbildung 5.5: Verlauf der Innentemperaturen aller Cubes während des Aufheizvorganges von 13°C auf 20°C (ab 8 Uhr morgens)

Abkühlvorgang

Während die Aufheizvorgänge aufgrund unterschiedlicher installierter Heizleistungen unregelmäßig ablaufen und direkte Vergleiche nur zwischen Cubes mit gleichem Heizmodul (siehe Tab. 3.2) sinnvoll sind, folgen die Abkühlverläufe den erwarteten Abklingfunktionen.

Cube 8 erfährt von allen Cubes die schnellste Abkühlung und muss bereits eineinhalb Stunden nach Abschaltung der Heizung auf die Absenkttemperatur von 13° beheizt werden, trotz zweithöchstem Dämmstandard von allen.

Als nächstes folgt Cube 1 und mit Abstand Cube 10 (jeweils mit derselben geringen Dämmstärke). Die Cubes mit ähnlich hohen Dämmstärken von 12 cm weisen ähnliches Abkühlverhalten auf, mit Vorteilen für Cube 3. Cube 9 zeigt das mit Abstand trägste Verhalten und muss erst gegen 3 Uhr morgens wieder beheizt werden.

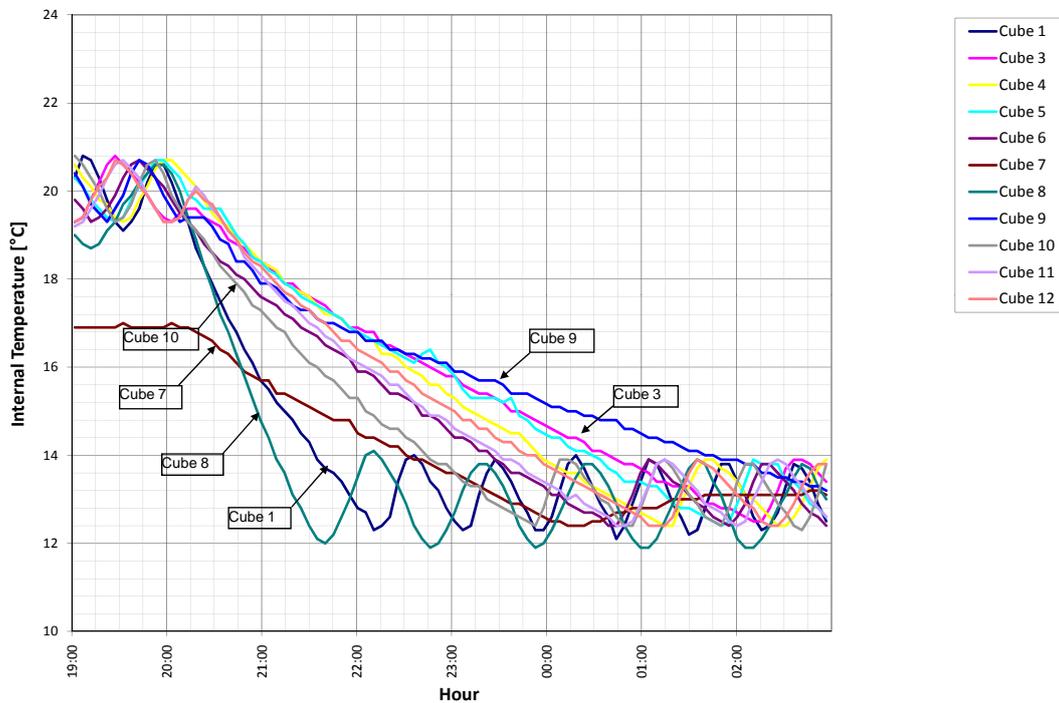


Abbildung 5.6: Verlauf der Innentemperaturen aller Cubes während des Abkühlvorganges von 20°C auf 13°C (ab 24 Uhr)

Temperaturverlauf bei Verglasungen

Abbildung 5.7 zeigt die beiden Fenstercubes 11 und 12 im Vergleich mit Cube 3 mit identischer Wärmedämmung im Verlauf eines kalten sonnigen Wintertages (14.12.2010). Dargestellt sind die Raumlufttemperaturen T_1 (durchgehende Linien) und die Innenoberflächentemperaturen T_3 auf der Südseite. Folgende Phänomene sind zu beobachten:

- Zwischen 9 und 15 Uhr scheint am Lagerplatz die Sonne. In dieser Zeit liegen die Raumlufttemperaturen der beiden Fenstercubes deutlich über der 20° -Grenze. Die Raumtemperatur von Cube 12 ist dabei höher als jene von Cube 11, obwohl die innere Oberflächentemperatur von Cube 11 viel höher ist.
- Die Raumtemperatur von Cube 3 (kein Fenster) wird über das Heizmodul auf dem einprogrammierten Mittelwert von 20°C gehalten.
- Die Oberflächentemperaturen T_3 sind bei allen Cubes tiefer als die Raumlufttemperatur. Das Ausmaß und der Verlauf der Temperaturdifferenz variiert allerdings zwischen den drei Cubes. Während bei der 2-fach-Verglasung (Cube 11) eine Differenz von ca. $1,5\text{K}$ vorliegt, sind es bei der 3-fach-Verglasung (Cube 12) nur etwa $0,5\text{K}$. Bei Cube 3 schwankt die Temperaturdifferenz zwischen $-0,5\text{K}$ und $+0,5\text{K}$, d.h. die Raumlufttem-

peratur ist zu manchen Zeiten niedriger als die Oberflächentemperatur.

- Beim Aufheizvorgang von Cube 3 sind die Oberflächentemperaturen noch ca. 1,5 bis 2°C kälter als die Raumlufttemperatur. Dieser Unterschied verringert sich auf ca. 0,5°C, sobald die Raumluft den Sollwert von 20°C erreicht hat.

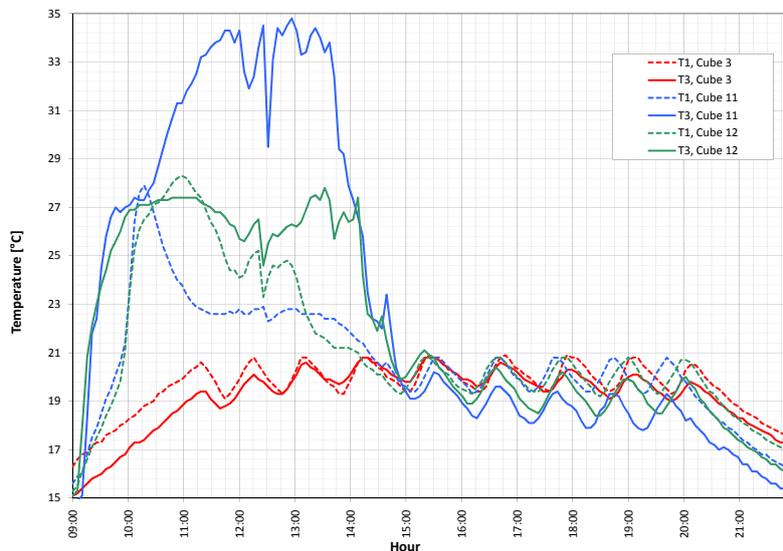


Abbildung 5.7: Verlauf der Innentemperatur bei identischer Dämmung (12 cm Holzweichfaser) im Vergleich mit und ohne Verglasung: Cube 3 (ohne Fenster), Cube 11 (2fach Wärmeschutzverglasung) und Cube 12 (3fach Wärmeschutzverglasung); T1=Raumlufttemperatur innen, T3=Oberflächentemperatur innen

5.2.2 Überhitzung im Sommer - TAV und PV

Verlauf der Raumtemperatur

Abbildung 5.8 zeigt den Verlauf der Innentemperatur aller Cubes an zwei aufeinanderfolgenden heißen Sommertagen. Das angestrebte Ziel, im Cubeinneren möglichst geringe Temperaturspitzen zu erreichen, bewältigen die Cubes sehr unterschiedlich. Hier die Reihung der Cubes von „Gut=niedere Temperaturspitzen“ bis „Schlecht=hohe Temperaturspitzen“ am mittleren der drei dargestellten Tage:

1. Cube 9 (31°C)
2. Cubes 3,5,6 und 7 (ca. 34°C)
3. Cube 4 und 10 (35°C).
4. Fenstercubes 11 und 12 (37°C)
5. Cube 1 (38°C)
6. Cube 8 (42°C)

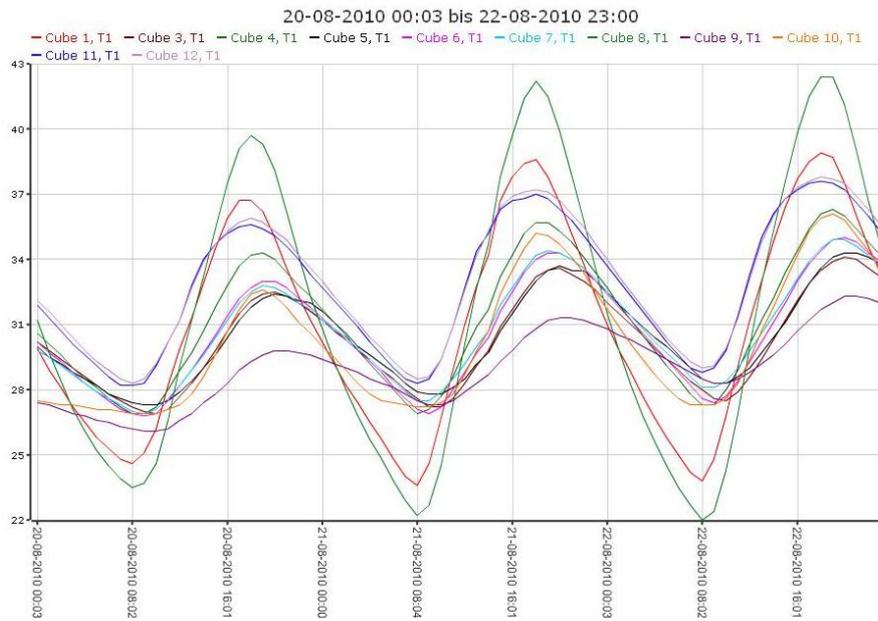


Abbildung 5.8: Verlauf der Innentemperatur an zwei aufeinanderfolgenden heißen Sommertagen (Messwerte vom 20.-22. Aug. 2010)[10]

Langzeitverhalten während einer Hitzeperiode

Sind die Cubes über einen längeren Zeitraum hohen Außentemperaturen ausgesetzt, steigt auch die mittlere Innentemperatur. Höchst- und Tiefsttemperaturen schwingen um diesen Mittelwert.

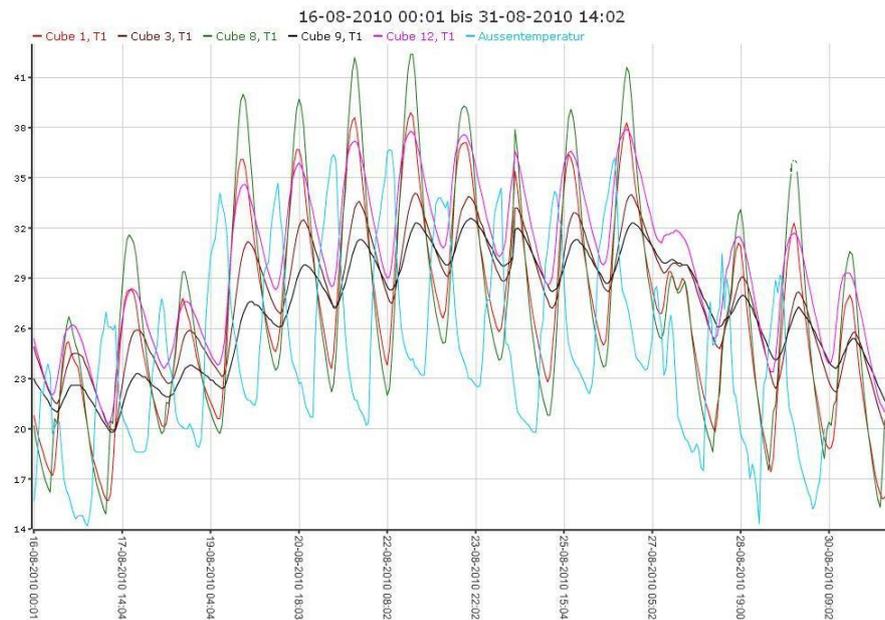


Abbildung 5.9: Innentemperatur im Sommer - Langzeitverhalten: Bei längerdauernden Hitzeperioden steigt auch die mittlere Innentemperatur. Höchst- und Tiefsttemperaturen schwingen um diesen Mittelwert [10].

TAV und PV

Aus den effektiven Temperaturverläufen außen und innen und der zeitlichen Verschiebung der Temperaturspitzen wurden TAV und PV messtechnisch ermittelt, und zwar sowohl für die südseitigen als auch für die nordseitigen Wände. Im Anhang ab Seite XII sind sämtliche gemessenen Temperaturverläufe im Vergleich mit den theoretischen Berechnungen dargestellt. Die Messergebnisse von Cubes 11 und 12 haben allerdings nur dokumentativen Charakter, weil der Heindl'sche Berechnungsalgorithmus bei Fenstern nicht anwendbar ist. Die Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen repräsentativ am Beispiel von Cube 1 die wellenförmigen Temperaturverläufe auf der südseitigen und nordseitigen Wand. Aus dem Verhältnis $\frac{\text{maximale Temperaturspreizung innen}}{\text{maximale Temperaturspreizung außen}}$ wird das TAV ermittelt, aus der zeitlichen Verschiebung $\text{Temperaturmaximum innen} - \text{Temperaturmaximum außen}$ die PV. Zum Vergleich werden zusätzlich die theoretisch berechneten Sinuskurven dargestellt. Im Anhang ab Seite XII sind die analogen Auswertungen aller Cubes dargestellt.

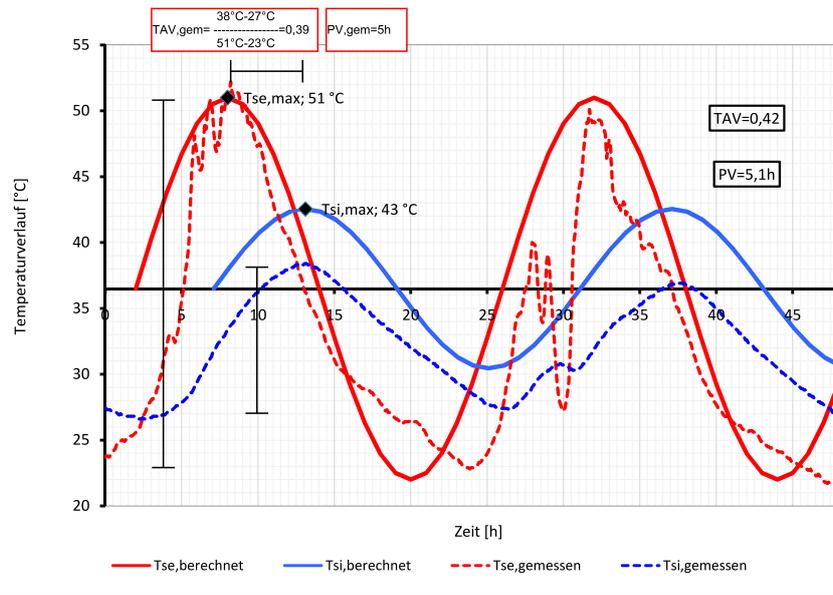


Abbildung 5.10: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen am Beispiel Cube 1, Messwerte Südseite

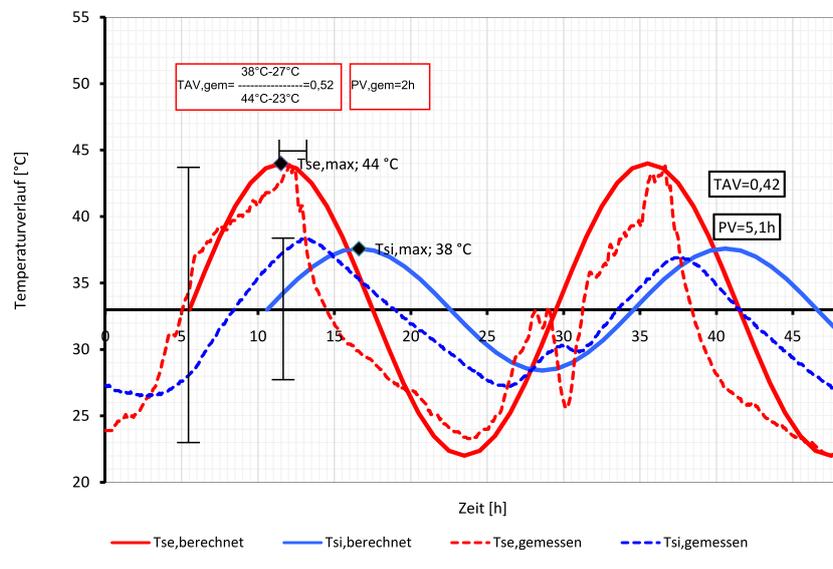


Abbildung 5.11: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen am Beispiel Cube 1, Messwerte Nordseite

Stellt man die theoretisch berechneten und die auf der Süd- und Nordseite der Cubes gemessenen Werte in einer Gesamtübersicht (siehe Abbildungen 5.12 und 5.13) dar, lässt sich Folgendes feststellen:

- Die Temperaturen folgen näherungsweise einer sinusförmigen Welle, deren Amplitude und Periodendauer den maximalen Temperatursprung und die Dauer eines Tag-Nacht-Zyklus von 24 Stunden darstellt. Der Verlauf der äußeren Oberflächentemperatur auf der Südseite weicht dabei am stärksten vom idealisierten Sinus-Verlauf ab.
- Die Messwerte für TAV und PV weichen auf der Nordseite wesentlich stärker vom theoretischen Wert ab als auf der Südseite. Während aber die nordseitig gemessenen Werte mit Ausnahme von Cube 9 durchwegs „ungünstiger“ sind, d.h. TAV ist größer und die PV kleiner als der Rechenwert, gibt es auf der Südseite keine klare Tendenz.
- Cube 3 und Cube 8 weichen am stärksten von den theoretischen Werten ab. TAV und PV werden in der Berechnung durchwegs zu „günstig“ bewertet.

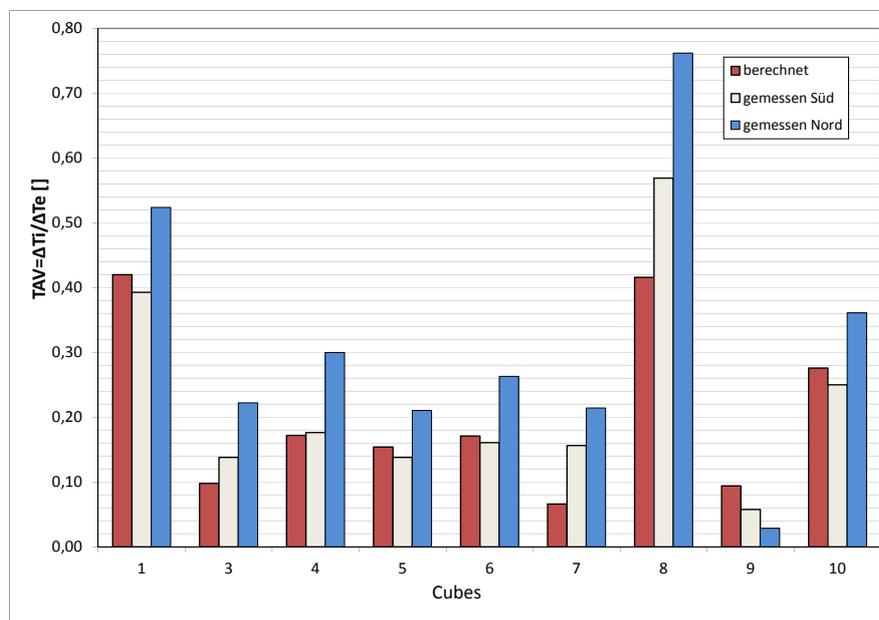


Abbildung 5.12: Übersicht Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) berechnet (nach [6]) und gemessen (lt. Auswertungen ab Seite XII)

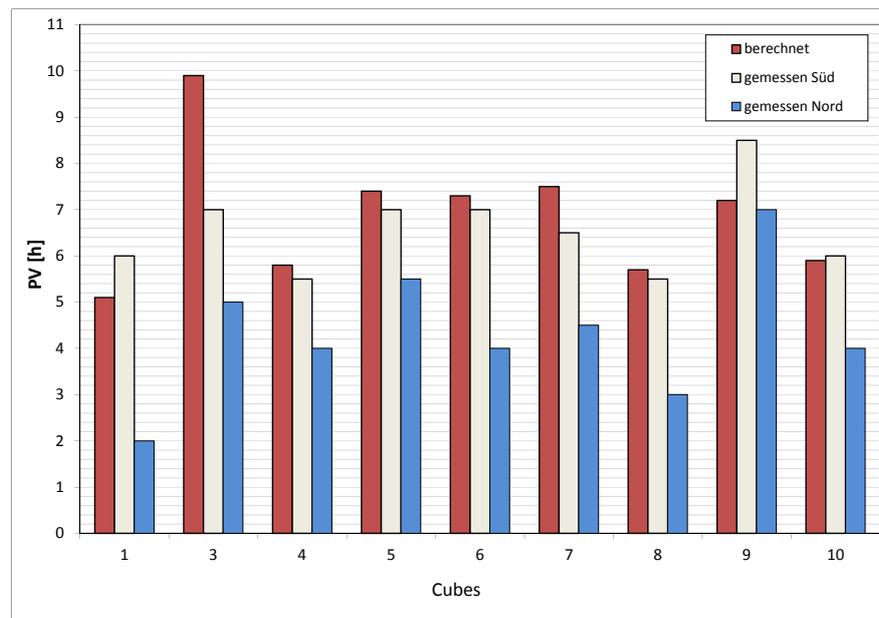


Abbildung 5.13: Übersicht Phasenverschiebung (PV) berechnet (nach [6]) und gemessen (lt. Auswertungen ab Seite XII)

Überhitzung durch Fenster

Aufgrund der Bedeutung von Fenstern für eine eventuelle Überhitzung der Innenräume ist es sinnvoll, die Fenstercubes 11 und 12 mit dem baugleichen, aber fensterlosen Cube 3 zu vergleichen (siehe Abbildung 5.14). Es ist ersichtlich, dass die Temperaturspitzen über die solare Strahlung etwa 3°C höher sind. Allerdings erfährt Cube 8 noch deutlich höhere Temperaturspitzen, obwohl dieser kein Fenster hat.

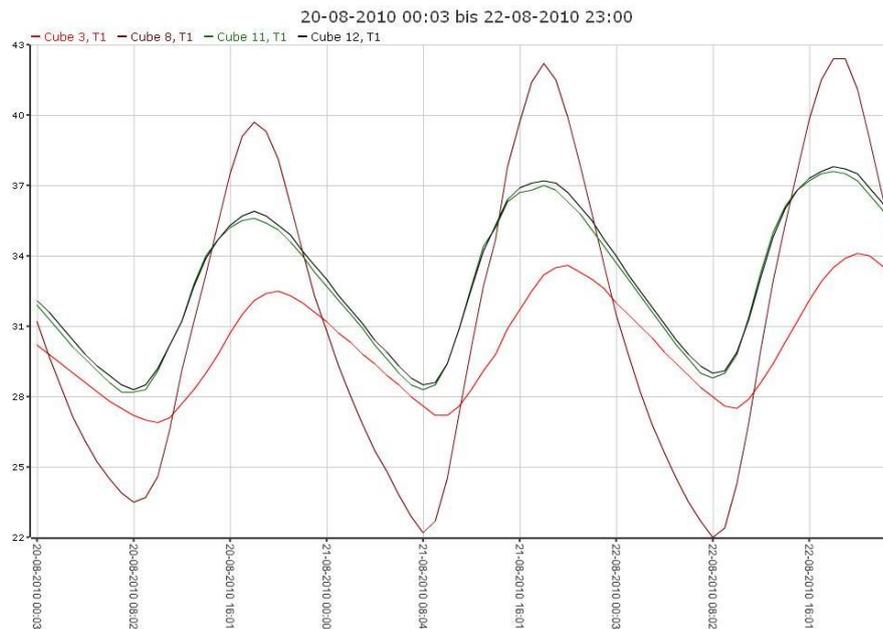


Abbildung 5.14: Verlauf der Innentemperatur im Sommer mit und ohne Fenster: Cube 3 (ohne Fenster), Cube 11 (2WSV) und Cube 12 (3WSV) vom 20.-22. Aug. 2010. Zusätzlich Cube 8 (Leichtbauweise) im Vergleich[10].

5.3 Zusätzliche Untersuchungen

5.3.1 Feuchtigkeit

Im Gegensatz zu Wohngebäuden, in denen durch die täglichen Aktivitäten der Bewohner ständig Feuchtigkeit produziert wird, gab es in den Climacubes keine Feuchtigkeitsquellen und sie wurden auch nicht zwangsbelüftet. Damit änderte sich der absolute Wassergehalt der Luft (Beladung) ausschließlich durch Dampfdiffusion vom höheren Partialdruck zum niederen. Je nach klimatischen Verhältnissen kann die Diffusion von innen nach außen oder von außen nach innen erfolgen. Die Mengen an Wasser, die über Diffusion transportiert wurden, sind allerdings sehr gering und sind auch nicht Gegenstand der Untersuchungen dieses Projektes. Die Beobachtung der relativen Luftfeuchtigkeit macht allerdings in zweierlei Hinsicht Sinn: Einerseits, um zu demonstrieren, wie sich die relative Luftfeuchtigkeit ändert, wenn sich die Temperatur ändert (und die Beladung annähernd konstant bleibt, siehe Abbildung 5.15). Andererseits konnte über die Feuchtigkeit die Unversehrtheit der Cubes überwacht werden. Ein deutlicher Anstieg der Feuchtigkeit wäre ein Hinweis auf eventuelle Wassereintritte gewesen. In der Tat trat ein solcher Fall im Februar 2009 bei Cube 12 auf, als nach einem Regen eine größere Menge Wasser durch eine undichte Stelle eindrang und die Raumfeuchte schlagartig anstieg (Abbildung 5.16). Die Leckstelle wurde daraufhin behoben. Der Verlauf der Feuchtigkeit zeigt, dass in den folgenden Monaten eine Austrocknung erfolgte und sich die relative Luftfeuchtigkeit wieder stabilisierte.



Abbildung 5.15: Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit bei Änderung der Temperatur: steigt bei gleichbleibender Beladung die Temperatur (braune Linie), dann sinkt die relative Luftfeuchtigkeit (rot) und umgekehrt. Eine wesentliche Änderung der Außenfeuchtigkeit (grün) hatte keinen Einfluss auf den Verlauf im Cubeinneren (Cube 8, Stundenmittelwerte vom 8. bis 11. Februar 2009 [10])

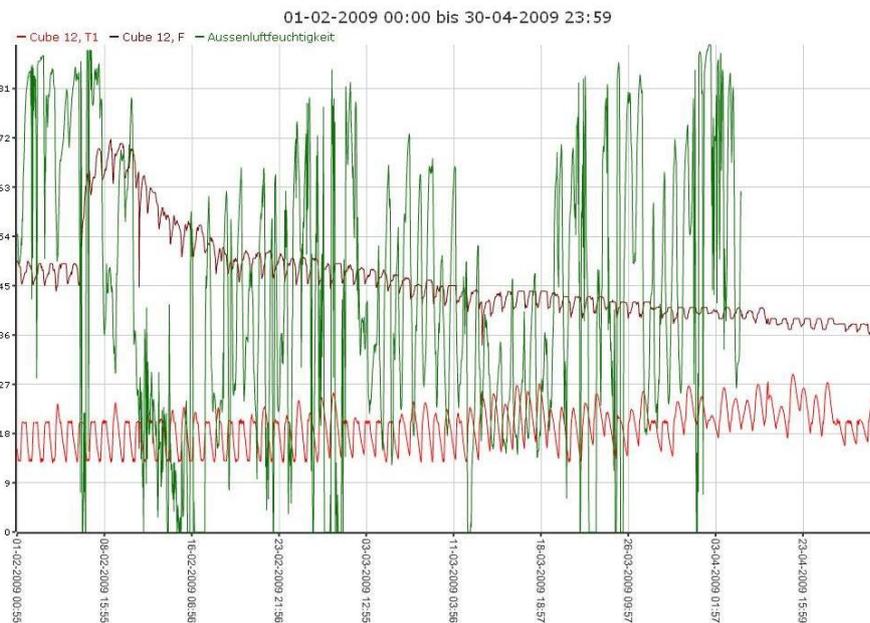


Abbildung 5.16: Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit bei Änderung der Beladung durch einen ungewollten Wassereintritt: Die relative Feuchtigkeit stieg schlagartig an und trocknete nach Behebung der Leckstelle langsam, aber kontinuierlich aus (Cube 12, Stundenmittelwerte vom 1. Februar bis 30. April 2009).[10]

5.3.2 Wetterstation

Die Messanlage erfasste die Wetterdaten nicht gleichzeitig mit den Cubedaten. Sie mussten manuell aus dem Bufferspeicher der Wetterstation in eine getrennte Wetterdatenbank geladen werden. Die Wetterdaten können damit nur getrennt von den Cubedaten über die Projekthomepage heruntergeladen werden. Für viele Auswertungen ist es aber wichtig, den Verlauf der Außenlufttemperatur zu kennen. Also müssen die beiden Datentabellen zusammengefügt werden, was einen nicht unerheblichen Aufwand erfordert. Unter bestimmten Umständen kann aber an Stelle der Außenlufttemperatur ersatzweise die Cubetemperatur T5 herangezogen werden. Diese wurde auf der nördlichen abgeschatteten Außenseite gemessen und nahm im Winter annähernd die Außentemperatur an (siehe Abbildung 5.17). Im Sommer hingegen (Abbildung 5.18) war die Außentemperatur tagsüber deutlich tiefer und T5 somit nur für Auswertungen mit Nachtmesswerten anwendbar.

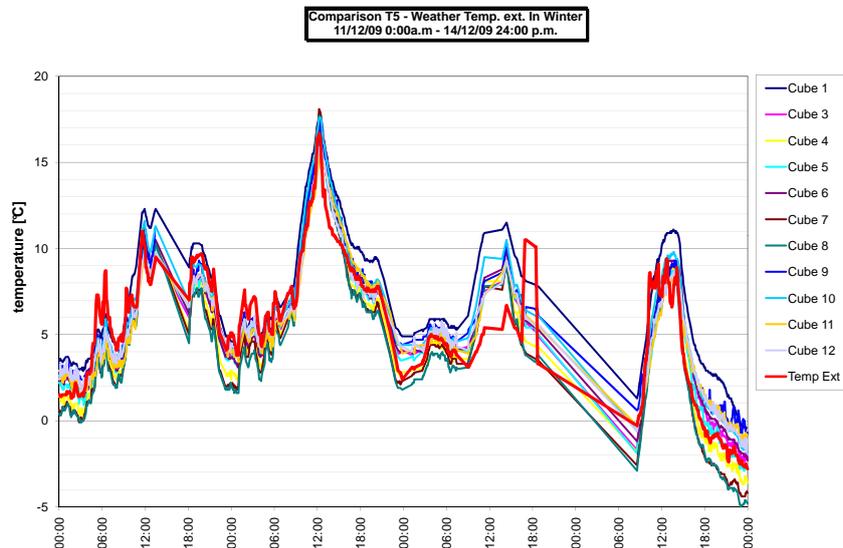


Abbildung 5.17: Vergleich T5 mit Außenlufttemperatur (Winter): T5 nahm annähernd die Werte der Außentemperatur an.

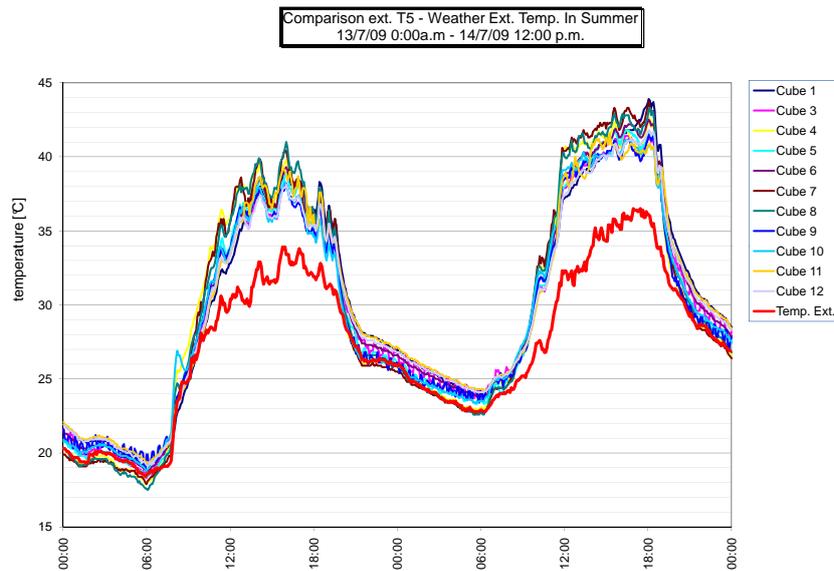


Abbildung 5.18: Vergleich T5 mit Außenlufttemperatur (Sommer): T5 war tagsüber deutlich höher als die Außentemperatur. Nachts glichen sich die beiden Temperaturen wieder an.

5.3.3 Infrarot-Thermografie

Eine Infrarotkamera stellte Oberflächentemperaturen in verschiedenen Farbabstufungen von blau (kalt) bis rot (warm) dar. Diese beiden Farben geben die untere und die obere Temperaturgrenze wieder, die an der Kamera eingestellt wurden.

Um Mitternacht vom 22. auf den 23. Jänner 2010 wurden mit einer Infrarotkamera vom Typ „875-1“ der Firma Testo Infrarotthermografien von allen Cubes aufgenommen. Die Außenlufttemperatur war ca. -14°C , die Temperaturskala darum auf $-15^{\circ}/-10^{\circ}\text{C}$ eingestellt.

Aus den Aufnahmen sind die unterschiedlichen Wärmeschutzstandards ersichtlich: Je kleiner der U-Wert, umso kleiner war der Wärmestrom von innen nach außen (und damit umso niedriger die äußere Oberflächentemperatur). Die Aufnahmen (Abbildung 5.19) stimmen gut mit den berechneten U-Werten von Tab. 3.2 auf Seite 13 überein.

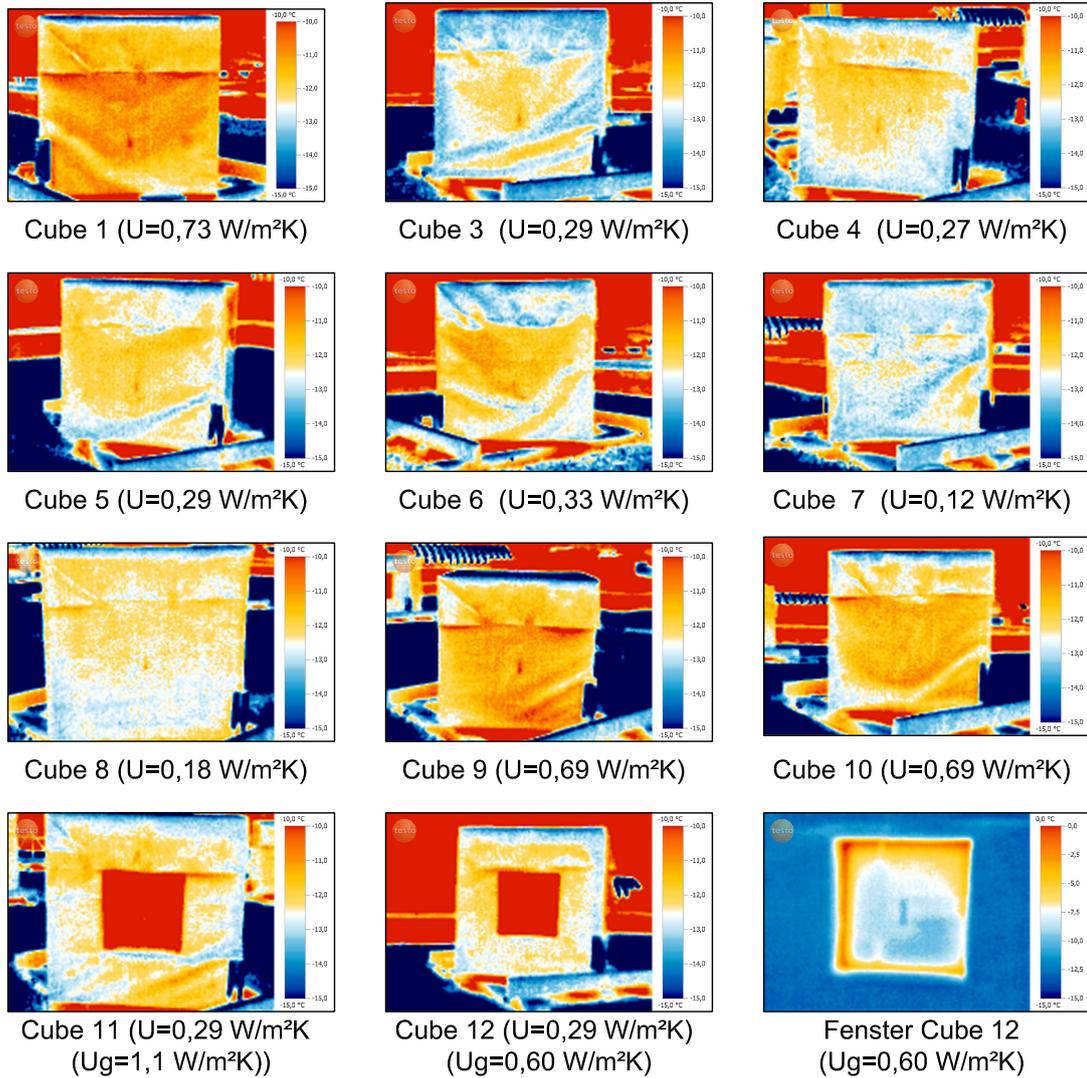


Abbildung 5.19: Infrarot-Thermografien aller Cubes. Je besser der Wärmeschutz, umso kälter (blauer) war die äußere Oberflächentemperatur. Aufnahmen vom 22./23. Jänner 2010 mittels Infrarotkamera vom Typ „875-1“ der Firma Testo.

6 Interpretation der Ergebnisse

6.1 Heizwärmebedarf

6.1.1 Jährlicher Heizwärmebedarf

Es bestätigt sich, dass durch die Wahl großer Dämmstärken der Heizwärmebedarf wesentlich reduziert werden kann. Alle Cubes mit 12 cm Wärmedämmung brauchten nur etwa ein Drittel der Energie von Cube 1, der mit 4 cm gedämmt war. Die Wahl des Dämmmaterials wirkte sich bei gleicher Dämmstärke nicht auf den Energieverbrauch aus, da das Maß des Wärmeverluststromes unter gleichen klimatischen Verhältnissen nur von der Dicke und der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe abhängt. Zusätzlich zur Dämmung konnte allerdings über speicherwirksame Oberflächen tagsüber Wärme gespeichert werden, die in der Nacht die Heizung entlasteten und somit zu einer weiteren Reduzierung des Energiebedarfs beitrugen. Wie der Vergleich zwischen Cube 9 und 10 belegt, genügten dafür nur wenige Zentimeter der inneren Oberfläche: Bei gleichem Wärmeschutz verbrauchte Cube 10 nur unwesentlich mehr Energie als der massive Cube 9.

Cube 8 war der einzige ohne Unterkonstruktion aus OSB und hatte somit wenig speicherwirksame Masse, dafür aber mit Polyurethan einen Dämmstoff mit hoher Dämmwirkung. Der Cube kann sehr schnell aufgeheizt werden, kühlte aber auch sehr schnell wieder aus (siehe auch Abbildungen 5.5 und 5.6 auf S. 27) und musste in der Nacht am längsten von allen auf Temperatur gehalten werden. Der Vorteil des geringen Energieverbrauchs am Tage wurde somit in der Nacht wieder zunichte gemacht. Wie Abbildung 5.3 zeigt, machte sich dieser Umstand auch bei längeren Schlechtwetterperioden im Sommer bemerkbar.

Die solaren Gewinne durch die 50x50cm-Verglasung bewirkten eine geringfügige Energieeinsparung von etwa 10%. Dabei spielte es bei Südfenstern keine Rolle, ob 2fach- oder 3fach-Verglasung verwendet wurde. Während die Energieverluste bei der 3fach-Verglasung kleiner waren, waren die Gewinne bei 2fach-Verglasung durch den höheren g-Wert größer. Allerdings waren die inneren Oberflächentemperaturen bei einer 3fach-Verglasung höher und damit für den Bewohner angenehmer (siehe Seite 41).

Cube 7 verzeichnete den geringsten Heizwärmeverbrauch. Die verwendeten Vakuumdämmplatten hatten eine bis zu 10fach geringere Wärmeleitfähigkeit als übliche Dämmstoffe. Das Heizmodul wurde über Formel 3.1 mit dem U-Wert ausgelegt, den die ungestörte Wand hatte. Die Wärmebrücken an den Plattenstößen und den Cube-Kanten erhöhten die Wärmeverlustleistung aber offensichtlich so stark, dass das Heizmodul die gewünschte Aufheizung auf 20°C

gar nicht schaffte. Bei entsprechender Auslegung der Heizung wäre der Heizenergiebedarf wohl deutlich abgestiegen.

6.1.2 Vergleich Heizenergieverbrauch berechnet - gemessen

Die Cubes 1, 7 und 8 verzeichneten einen deutlich höheren Heizenergieverbrauch als berechnet. So wie die Heizleistung wurden mit Formel 2.6 auch die Transmissionsverluste von Cube 7 ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken berechnet, was einen viel geringeren Heizwärmebedarf ergab als effektiv erforderlich war. Obwohl die Plattenstöße wie vom Hersteller angegeben mit Ortschaum ausgefüllt wurden, müssen sie in Berechnungen entweder durch eine pauschale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit oder durch Anwendung von Wärmebrückenkoeffizienten berücksichtigt werden.

Ohne die speicherwirksamen Massen von Cube 9 und 10 hatte Cube 1 einen deutlich höheren Energiebedarf als sein rechnerisch ermittelter. Auch Cube 8 fehlte ohne die OSB-Unterkonstruktion der Wärmespeicher. Es scheint also so zu sein, dass übliche vereinfachte Wärmebedarfsberechnungen, wie sie von den nationalen und europäischen Energieeinsparverordnungen vorgeschlagen werden, bei geringer oder fehlender Speichermasse der raumumschließenden Flächen nicht zutreffen.

6.2 Instationäres Verhalten im Winter

6.2.1 Aufheiz- und Abkühlvorgänge

Der Aufheizvorgang (siehe Abbildung 5.5, S. 26) hing einerseits von der speicherwirksamen Masse und der thermischen Qualität der raumumschließenden Flächen und andererseits von der Leistung der installierten Heizmodule ab. Je größer die Speichermasse und je kleiner die Heizleistung, umso länger dauerte es, bis die gewünschte Raumtemperatur erreicht wurde. Cube 9 erreichte die 20°C erst gegen 13 Uhr. Um aber zu den gewünschten Zeiten die 20°C zu erreichen, hätte keine oder eine nur sehr geringe Nachtabsenkung durchgeführt werden dürfen, was wiederum den Heizenergieverbrauch deutlich erhöht hätte. Die einzige sinnvolle Lösung wäre die Anbringung einer angemessenen Wärmedämmung und eventuell eine damit einhergehende geringe Nachtabsenkung gewesen. Cube 8 hätte aufgrund der besseren Dämmwirkung und geringeren thermischen Masse von Polyurethan eigentlich relativ schnell „aufheizbar“ sein sollen. Aufgrund der deutlich kleineren installierten Heizleistung brauchte er aber ungefähr gleich lang wie die anderen Cubes mit 12 cm Dämmung. Cube 7 schaffte die 20°C aufgrund des zu klein dimensionierten Heizmoduls gar nicht.

Der Abkühlvorgang von 20°C auf 13°C, der am Abend um 20 Uhr beginnt, verlief eindeutiger, weil keine Störquellen durch unterschiedliche Heizmodule oder Sonnenstrahlung vorlagen.

6.2.2 Fenster

In den Fenster-Cubes erfolgte bereits gegen 10.30 Uhr ein Temperaturabfall (siehe Abbildung 5.7, S. 28); zu einem Zeitpunkt also, an dem die Intensität der Solarstrahlung weiterhin stieg. Nachdem die innenseitigen Oberflächentemperaturen der Fenster ständig hoch blieben, könnte die Erklärung sein, dass die Raumluftsonde ab einem bestimmten Sonnenstand nicht mehr direkt besonnt wurde, während die Fensteroberflächen-Sonde ja ständig besonnt war. Nach Sonnenuntergang pendelte sich die Raumtemperatur bei jeweils 20°C ein. Die Oberflächentemperatur von Cube 11 war aufgrund des schlechteren U_g -Wertes der 2fach-Verglasung ca. 1K niedriger als jene der 3fach-Verglasung von Cube 12.

6.3 Instationäres Verhalten im Sommer - TAV und PV

Verglasungen tragen wesentlich zur Überhitzung der Raumtemperatur bei (siehe Abbildung 5.14, S. 34). Die Art der Verglasung scheint nach den Messergebnissen kaum Einfluss zu haben. Die Temperaturspitzen müssen durch geeignete Abschattungsmaßnahmen gedämpft werden.

Noch schwerwiegender als ein Fenster war aber eine fehlende Speicherfähigkeit der raumschließenden Flächen. Wie die Abbildungen 5.8, S. 29 und 5.14, S. 34 belegen, erfuhr der Leichtbau-Cube 8 die mit Abstand höchsten Temperaturspitzen. Besonders in Fällen, wo der Dämmstoff den größten Anteil eines Bauteils ausmacht (Dachwohnungen, Leichtbau), spielt die Wahl des Dämmstoffes eine wesentliche Rolle. Dämmstoffe mit geringer Speicherfähigkeit müssen mit speicherfähigen Baustoffen ergänzt werden (sonst nützt auch eine große Dämmstärke wenig). Phasenwechselmaterialien (PCM), z.B. in Gipsplatten eingearbeitet, bewirken eine deutliche Dämpfung der Temperaturspitzen. Sie sollten allerdings mit hohen Dämmstärken ergänzt werden, um hochwirksame Bauteile zu realisieren.

Bleibt ein Baukörper über längere Zeit hohen Außentemperaturen ausgesetzt, so steigt auch die mittlere Innentemperatur an (Abbildung 5.9, S. 30). Die mehr oder weniger günstigen Auswirkungen der verwendeten Bauweisen und -materialien bleibt auch in diesem Fall bestehen.

Vergleicht man die gemessenen und berechneten Werte für TAV und PV, sind teilweise deutliche Abweichungen zu erkennen. Eine schlüssige Erklärung für diese Abweichungen wurde nicht gefunden. Zu betonen ist aber, dass bei der Berechnung von TAV und PV von einer ebenen, ungestörten und unendlich großen Wand ausgegangen wird. Die Climacubes haben weder eine unendlich große noch eine ungestörte Wand: Eine Cubewand war ca. $1m^2$ groß und wird dauernd von Wärmeströmen und -strahlungen der umliegenden Wände beeinflusst. Vermutlich machten sich Störungen auf der Südseite weniger stark bemerkbar als auf der Nordseite, weil dort die Temperaturschwankungen viel größer waren. Trotzdem erscheinen TAV und PV für eine qualitative Beurteilung eines Bauteils als durchaus geeignet. Die Berechnung kann schnell und einfach durchgeführt werden und gibt das zu erwartende Verhalten eines Bauteiles gut erkennbar wieder. Die quantitativen Ergebnisse der Berechnung müssen

aber mit dem nötigen Vorbehalt beurteilt werden.

6.4 Zusätzliche Untersuchungen

Die im Kapitel 5.3 beschriebenen Untersuchungen hatten vorwiegend ergänzenden Charakter. Zusätzlich dienten sie dazu, die Systemsicherheit der Messanlage zu verfolgen.

Über den Anstieg der Feuchtigkeit wurden undichte Stellen der Wetterschutzfolie entdeckt. Die Infrarot-Thermografien bestätigen die unterschiedlichen thermischen Qualitäten der Cubes. Der Vergleich der über die Wetterstation gemessenen Außenlufttemperatur mit den Außentemperaturen der Cubes schließlich zeigt, ob und wann die Messwerte der Wetterstation durch jene der Cubes ersetzt werden können. Dadurch werden individuelle Auswertungen wesentlich einfacher, bzw. überhaupt erst möglich (siehe Seite 36).

7 Zusammenfassung

Die Größe der Climacubes, der Aufbau der raumumschließenden Flächen sowie die Tatsache, dass sie nicht bewohnt waren, unterscheidet sie wesentlich von realen Gebäuden. Eine Übertragung der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes auf Wohn- und andere Nutzgebäude kann deshalb nur mit Vorbehalt vorgenommen werden. Auch wurde in diesem Feldversuch nur das wärmetechnische Verhalten der verschiedenen Cube-Varianten untersucht. Nicht vergessen werden dürfen Anforderungen an den Schallschutz und den Brandschutz, das Feuchteverhalten und die ökologische Relevanz der Materialien von der Herstellung über den Einsatz bis zur Entsorgung.

Die thermischen Vorgänge, die mit diesem Projekt untersucht wurden, können aber bei der Optimierung von Bauteilkonstruktionen helfen und sollen hier nochmals zusammenfassend dargestellt werden. Eine weiterführende Diskussion ist ausdrücklich erwünscht.

7.1 Fazit Wärmeschutz und Heizwärmebedarf

- Große Dämmstärken sind die wichtigste Maßnahme zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs. Die Wahl des Dämmstoffes spielt bei gleicher Dämmwirkung (U -Wert) eine untergeordnete Rolle.
- Speicherwirksame Oberflächen reduzieren den Heizwärmebedarf für die Nachtbeheizung deutlich (ersetzen aber nicht die Dämmung).
- Großzügige Südfenster reduzieren den Heizwärmebedarf um etwa 10%. Die Art der Verglasung spielt dabei keine Rolle. Allerdings ist die Oberflächentemperatur bei einer 2fach-Verglasung im Winter etwa 1°C kälter als bei einer 3fach-Verglasung.
- Bei geringer Speichermasse der umschließenden Flächen treffen übliche Wärmebedarfsberechnungen nicht zu.
- Bei Vakuum- oder anderen hochwirksamen Dämmstoffen müssen die Wärmebrücken der Plattenstöße in Berechnungen berücksichtigt werden.
- Bei geringer oder fehlender Speichermasse der raumumschließenden Flächen treffen übliche vereinfachte Wärmebedarfsberechnungen, wie sie von den nationalen und europäischen Energieeinsparverordnungen vorgeschlagen werden, nicht zu.
- Die Regelung der Heizung ist der angewandten Bauweise anzupassen: je massiver die Bauweise, umso geringer das Maß einer Absenkung oder Unterbrechung.

7.2 Fazit Sommerlicher Hitzeschutz

- Große flächenbezogene innenseitige Massen wirken entscheidend. Die Wahl des Dämmstoffes spielt eine wesentliche Rolle. Dämmstoffe mit geringer Speicherfähigkeit müssen mit speicherfähigen Baustoffen ergänzt werden (sonst nützt auch eine große Dämmstärke wenig).
- TAV und PV erscheinen für eine qualitative Beurteilung eines Bauteils als durchaus geeignet. Allerdings weichen die berechneten Werte teilweise deutlich von den im Versuch ermittelten ab. Sie sind dementsprechend mit dem nötigen Vorbehalt zu beurteilen.
- Großzügige unverschattete Südfenster tragen deutlich zur Überhitzung bei. Sie müssen tagsüber verschattet werden.

8 Ausblick

Die Climacubes wurden im Mai 2011 abgebaut und das Projekt war damit abgeschlossen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Bachelorarbeit bestand die Aussicht, dass die Forschungseinrichtung „Europäische Akademie (EURAC)“, Bozen die gesamte Anlage übernimmt und die Untersuchungen weiterführt.

Aus logistischen und finanziellen Gründen musste die Anzahl der Cubevarianten auf 12 beschränkt werden. Nach den Erkenntnissen aus den bisherigen Ergebnissen, gäbe es noch eine Vielzahl an Varianten, Parametern und Materialien im Vergleich zu untersuchen:

- Installation einer aktiven Belüftung, um realitätsnähere Bedingungen zu schaffen und um den Energieverbrauch für Belüftung/Kühlung im Sommer zu erfassen. Dazu müsste ein kleiner Außenlüfter in die Cubewände eingebaut werden (die Steckplätze für die Steuerung und Stromversorgung sind bereits vorhanden).
- Weitere Untersuchungen, ob und wieviel Masse zur Energieeinsparung beiträgt
- Ausrichtung der Fenster
- Reihenfolge der Bauteilschichten (Dämmung außen/innen)
- Aktive Beschattung der Fenstercubes (geregelt oder manuell)
- Individuelle Änderung der Heizzeiten und -temperaturen, um den Heizwärmebedarf zu minimieren.
- Verwendung einer hellen Wetterschutzfolie (statt der bisherigen dunklen), um die Auswirkung auf die Überhitzung im Sommer zu beobachten
- Einfluss einer kontrollierten Luft-Undichtigkeitstelle auf Energieverbrauch und sommerliche Überhitzung
- Aktive Feuchteproduktion in Kombination mit der oben genannten aktiven Belüftung
- Passive Solarenergie (Trombewand, transparente Wärmedämmung)
- Variable Dampfbremse

Zusätzlich zu den geänderten Cubevarianten gibt es noch weitere Möglichkeiten, um die Messwerte des Projektes zu nutzen:

- Vergleich der Messergebnisse mit Ergebnissen üblicher Simulationsprogramme (TRN-SYS, Delphin, WuFI, u.a.)
- Erstellung von Ökobilanzen aller Cubes
- Installation einer professionelleren Wetterstation, um die Wetterdaten zeitgleich mit den Cube-Daten auszulesen und automatisch in die Datenbank zu schreiben)

Literatur- und Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] DIN - Deutsches Institut für Normung, *DIN EN832 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs Wohngebäude - Deutsche Fassung EN 832:1998 + Berichtigung AC:2002*, Sept. 1998 und Juli 2002
- [2] Norma Italiana UNI EN832:2001 Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento - Edifici residenziali, giugno 2001
- [3] Amt für Luft und Lärm der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol, *Berechnungsleitfaden „Klimahaus-Casaclima“*, Herbst 2003
- [4] Wetzell, Otto W. (Hrgbr.), *Wendehorst - Bautechnische Zahlentafeln*, Verlage Teubner und Beuth, 32. Auflage, 2007
- [5] Endres, E., Kindermann, P., *Sommerlicher Wärmeschutz - Die wichtigsten Einflussfaktoren*, Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V. (Hrgbr.), 1. Auflage, Dez. 2000.
- [6] Heindl, W., *Der Wärmeschutz einer ebenen Wand bei periodischen Wärmebelastungen (1. Teil)*, „Die Ziegelindustrie“, Heft 18, 1966, S. 685-693 (zitiert von ??)
- [7] Gertis, K. und Hauser, G.: *Instationäre Berechnungsverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz im Hochbau - Eine zusammenfassende Darstellung aufgrund des vorliegenden Schrifttums. Untersuchungen durchgeführt im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau*, Berichte aus der Bauforschung, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Heft 103/1975, S. 27-53.

Datenquellen

- [8] Hydrographisches Amt der Autonomen Provinz Bozen, *Monatliche und Jährliche Mittelwerte der Temperatur*, [http://www.provinz.bz.it/wetter/download/2320_-_TS_-_Merano_Quarazze_-_Meran_Gratsch\(2\).pdf](http://www.provinz.bz.it/wetter/download/2320_-_TS_-_Merano_Quarazze_-_Meran_Gratsch(2).pdf), 20120220.
- [9] Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, *Tabelle della radiazione solare*, Exceltabellen Solarstrahlungsdaten ausgewählter Gemeinden Italiens in $\frac{MJ}{m^2 \cdot d}$, <http://clisun.casaccia.enea.it/Dati/FilesXLS/Radanno.xls>, 20120220.

Bildquellen

- [10] Arbeitsgruppe Climacubes der TFO „Oskar von Miller“, Meran, *Diagrammeditor der Projekthomepage Climacubes*, URL: <http://www.climacubes.it/auswertung/v1/>, 20120212.
- [11] Arbeitsgruppe Climacubes der TFO „Oskar von Miller“, Meran, *Projekthomepage Climacubes*, URL: <http://www.climacubes.it>, 20110902.

Sämtliche Abbildungen und Tabellen, welche nicht ausdrücklich durch die Angabe einer anderen Quelle gekennzeichnet sind, stammen vom Autor. Die Rechte liegen ausschließlich beim Autor sowie der Arbeitsgruppe „Climacubes“ der Technologischen Fachoberschule „Oskar von Miller“, Meran. Die Verwendung ist unter Angabe der Quelle erlaubt.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Temperatur-Amplituden-Verhältnis und Phasenverschiebung	10
3.1	Gesamtschema der Anlage	11
3.2	Bau der Cubes	14
3.3	Ausstattung der Cubes - Messschema	15
3.4	Außenliegende Temperatursonde	16
3.5	Innenausstattung der Cubes	16
3.6	Heizmodul	18
3.7	Wetterstation	19
3.8	Lagerplatz der Cubes	20
5.1	Gemessener Heizwärmebedarf aller Cubes	23
5.2	Gemessener Heizwärmebedarf für eine Kälteperiode	23
5.3	Gemessener Heizwärmebedarf alle Cubes - Sommer	24
5.4	Vergleich Heizwärmebedarf gemessen - berechnet	25
5.5	Verlauf der Innentemperatur während des Aufheizvorganges	26
5.6	Verlauf der Innentemperatur während des Abkühlvorganges	27
5.7	Verlauf der Innentemperatur mit und ohne Verglasung	28
5.8	Verlauf der Innentemperatur - 2 heiße Sommertage	29
5.9	Innentemperatur im Sommer - Langzeitverhalten	30
5.10	TAV und PV berechnet und gemessen	31
5.11	TAV und PV berechnet und gemessen	31
5.12	Übersicht Temperatur-Amplituden-Verhältnis berechnet und gemessen	32
5.13	Übersicht Phasenverschiebung berechnet und gemessen	33
5.14	Innentemperatur im Sommer - mit und ohne Fenster	34
5.15	Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit bei Änderung der Temperatur	35
5.16	Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit bei Änderung der Beladung	35
5.17	Vergleich T5 mit Außenlufttemperatur (Winter)	36
5.18	Vergleich T5 mit Außenlufttemperatur (Sommer)	37
5.19	Infrarot-Thermografien aller Cubes	38
A.1	TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 1, Südseite)	XII
A.2	TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 1, Nordseite)	XII

A.3 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 3, Südseite)	XIII
A.4 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 3, Nordseite)	XIII
A.5 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 4, Südseite)	XIV
A.6 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 4, Nordseite)	XIV
A.7 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 5, Südseite)	XV
A.8 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 5, Nordseite)	XV
A.9 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 6, Südseite)	XVI
A.10 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 6, Nordseite)	XVI
A.11 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 7, Südseite)	XVII
A.12 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 7, Nordseite)	XVII
A.13 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 8, Südseite)	XVIII
A.14 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 8, Nordseite)	XVIII
A.15 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 9, Südseite)	XIX
A.16 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 9, Nordseite)	XIX
A.17 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 10, Südseite)	XX
A.18 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 10, Nordseite)	XX
A.19 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 11, Südseite)	XXI
A.20 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 11, Nordseite)	XXI
A.21 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 12, Südseite)	XXII
A.22 TAV und PV berechnet und gemessen (Cube 12, Nordseite)	XXII

Tabellenverzeichnis

3.1	Aufbau der Cubes	12
3.2	Technische Daten der Cubes	13
3.3	Installierte Messsonden	14
A.1	Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster U_W nach DIN EN ISO 10077-1:2000-11	XXIII
A.2	Berechnungstabelle „Rechnerische Ermittlung des Heizwärmebedarfs aus den thermischen und geometrischen Größen der Cubes sowie den Klimadaten am Standort Meran“ - Teil 1	XXIV
A.3	Berechnungstabelle „Rechnerische Ermittlung des Heizwärmebedarfs aus den thermischen und geometrischen Größen der Cubes sowie den Klimadaten am Standort Meran“ - Teil 2	XXV

Formelverzeichnis

(2.1) Wärmedurchlasswiderstand mehrschichtiger Bauteile	3
(2.2) Wärmedurchgangswiderstand mehrschichtiger Bauteile $R_T \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$	3
(2.3) Wärmedurchgangskoeffizient mehrschichtiger Bauteile $U \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	3
(2.4) Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient $U_m \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	3
(2.5) Heizgradtage $HGT \left[\frac{Kd}{a} \right]$	4
(2.6) Transmissionswärmeverluste $Q_T \left[\frac{kWh}{a} \right]$	4
(2.7) Lüftungswärmeverluste $Q_V \left[\frac{kWh}{a} \right]$	5
(2.8) Solare Wärmegewinne $Q_S \left[\frac{kWh}{a} \right]$	6
(2.9) Gesamtenergiedurchlassgrad $g_w \left[\right]$	6
(2.10) Interne Wärmegewinne $Q_I \left[\frac{kWh}{a} \right]$	7
(2.11) Heizwärmebedarf $Q_h \left[\frac{kWh}{a} \right]$	7
(2.12) Mittlere Soll-Innentemperatur $\theta_i \left[^\circ C \right]$	8
(2.13) Sonneneintragskennwert $S \left[\right]$	9
(2.14) Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{total} \left[\right]$	9
(3.1) Maximale Wärmeverlustleistung $\dot{Q}_{max} \left[W \right]$	17
(3.2) Installierte elektrische Heizleistung am Beispiel der Cubes 1,2,9 und 10 $P_{el} \left[W \right]$	18

A ANHANG

A.1 Auswertung TAV und PV (berechnet und gemessen)

Cube 1 - 2cm OSB+4cm WF

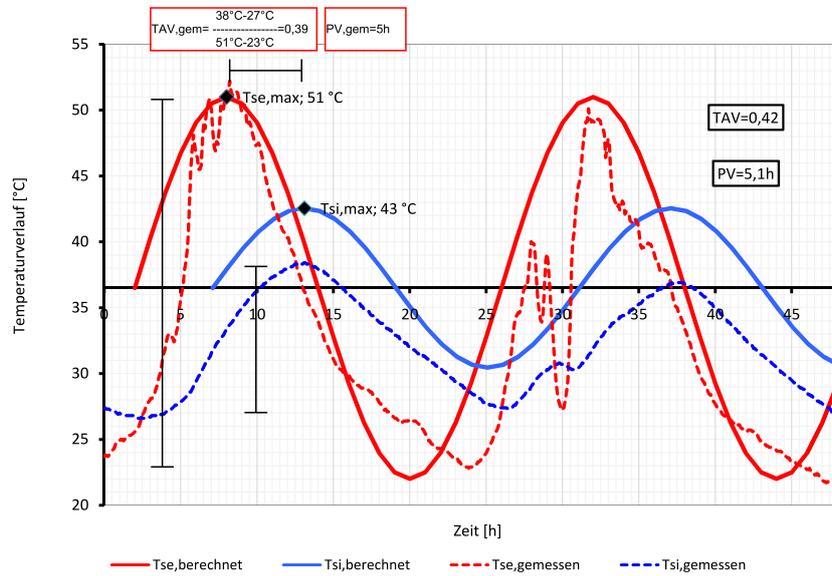


Abbildung A.1: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 1, Messwerte Südseite)

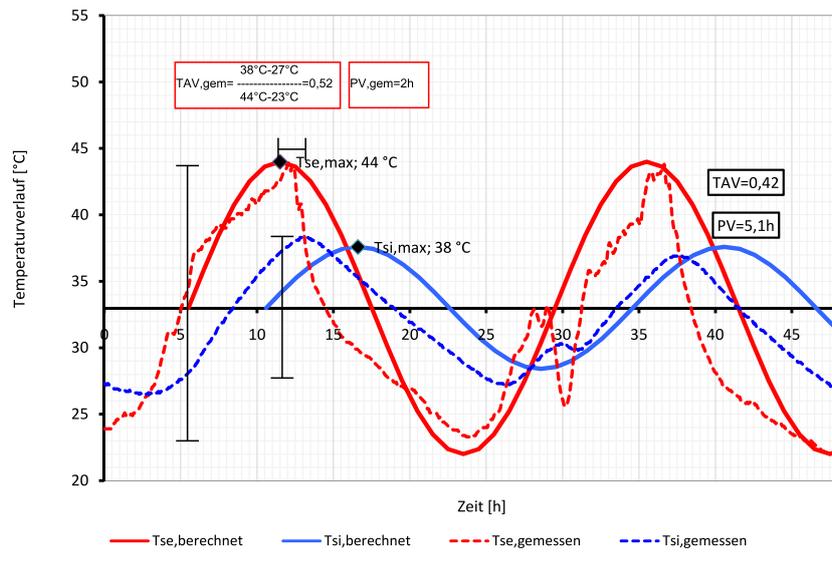


Abbildung A.2: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 1, Messwerte Nordseite)

Cube 3 - 2cm OSB+12cm WF

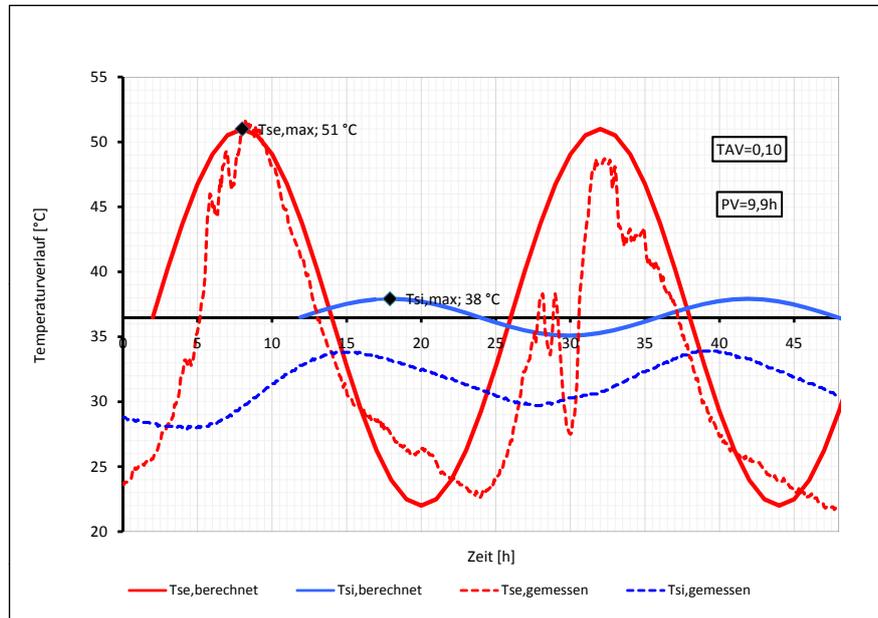


Abbildung A.3: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 3, Messwerte Südseite)

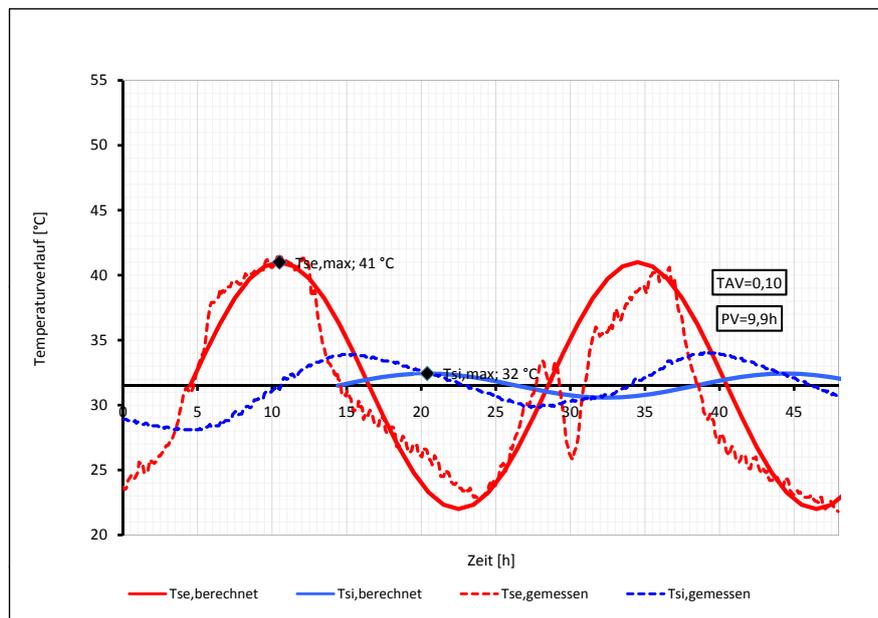


Abbildung A.4: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 3, Messwerte Nordseite)

Cube 4 - 2cm OSB+12cm EPS

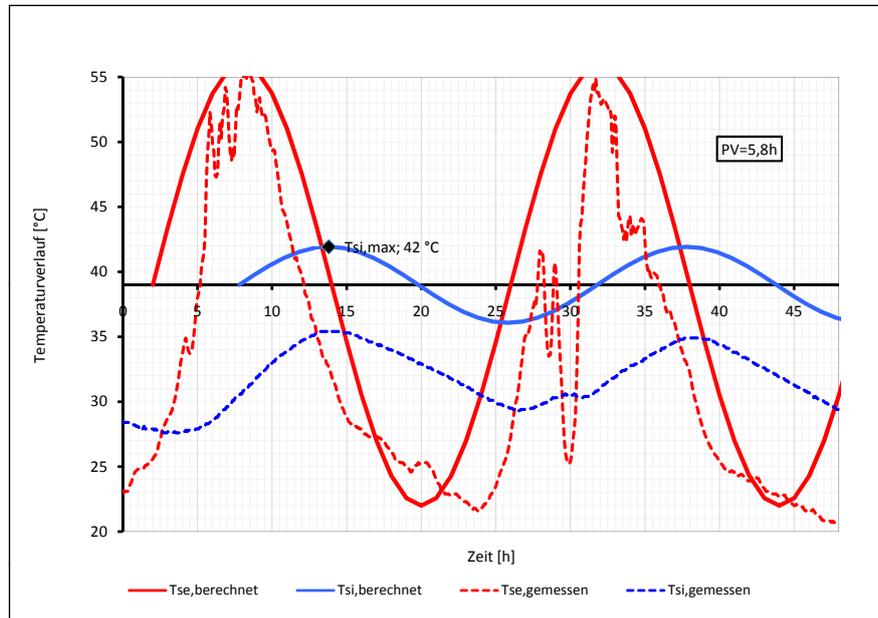


Abbildung A.5: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 4, Messwerte Südseite)

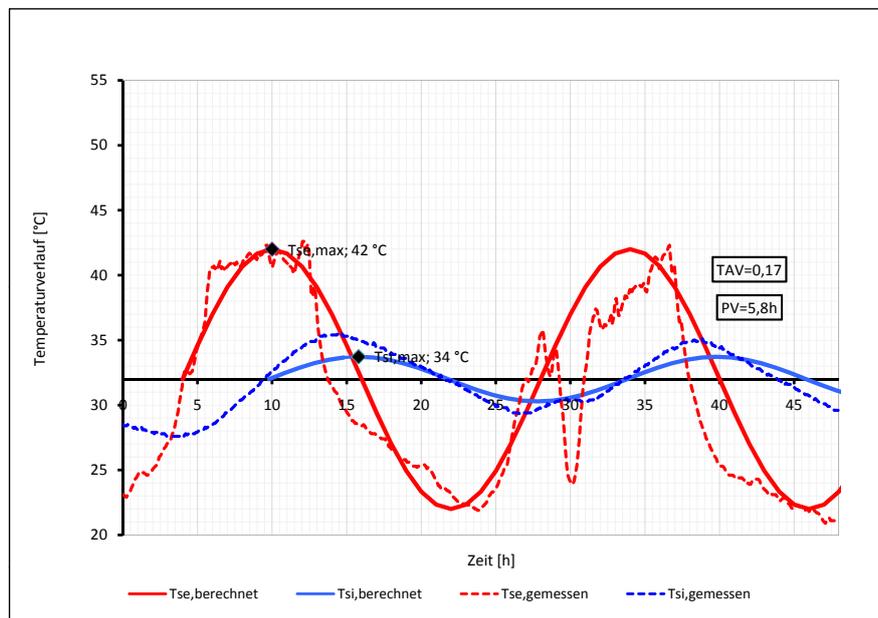


Abbildung A.6: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 4, Messwerte Nordseite)

Cube 5 - 2cm OSB+12cm MW

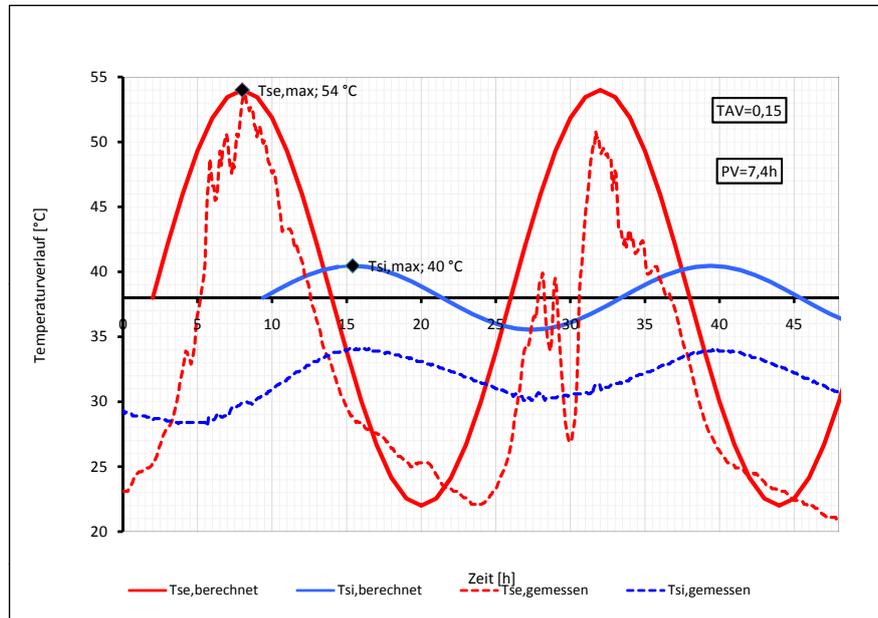


Abbildung A.7: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 5, Messwerte Südseite)

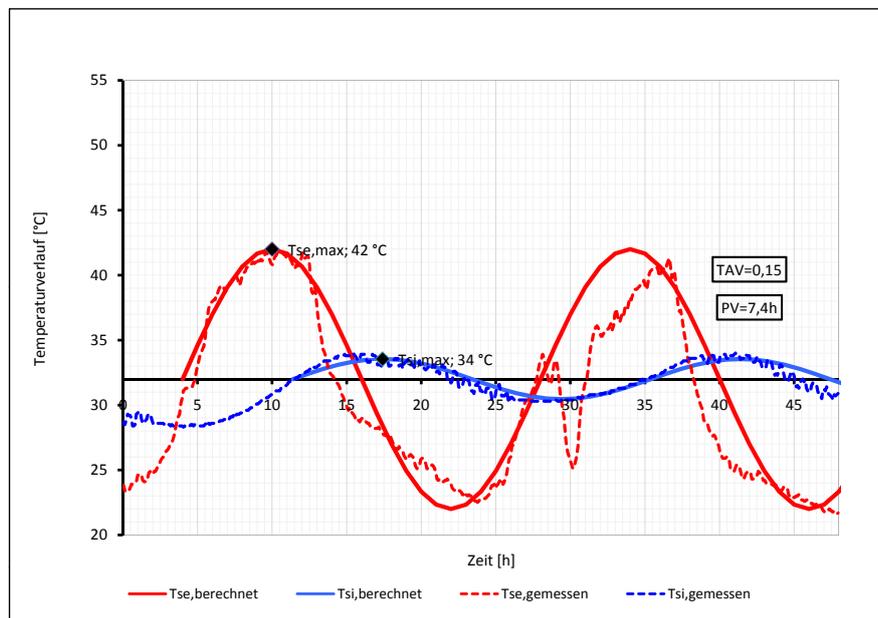


Abbildung A.8: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 5, Messwerte Nordseite)

Cube 6 - 2cm OSB+12cm MF

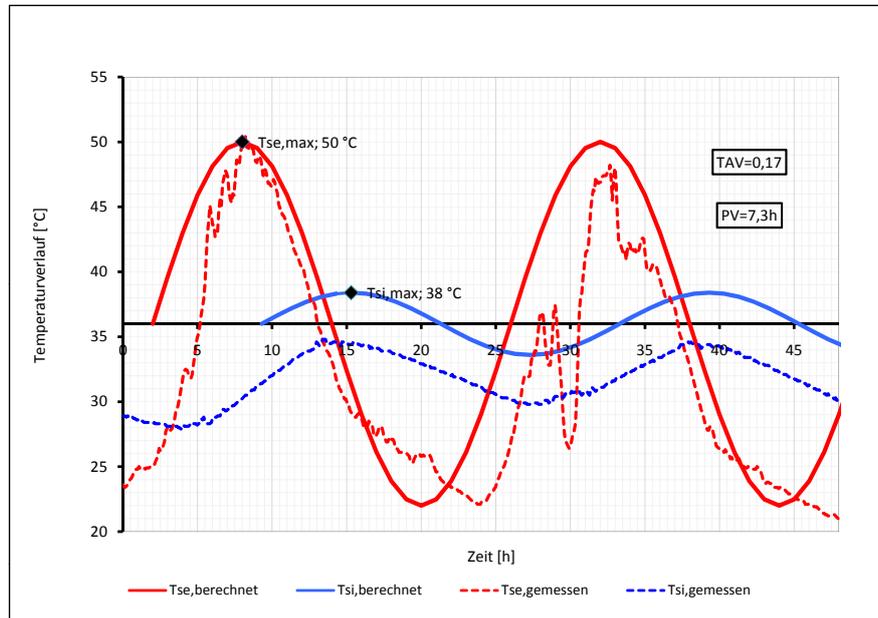


Abbildung A.9: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 6, Messwerte Südseite)

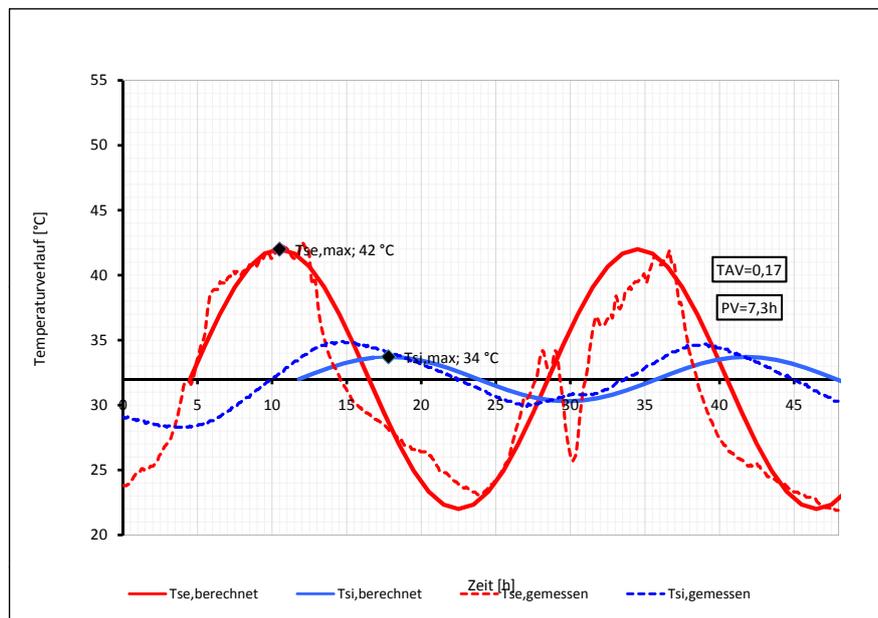


Abbildung A.10: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 6, Messwerte Nordseite)

Cube 7 - 2cm OSB+3cm VIP

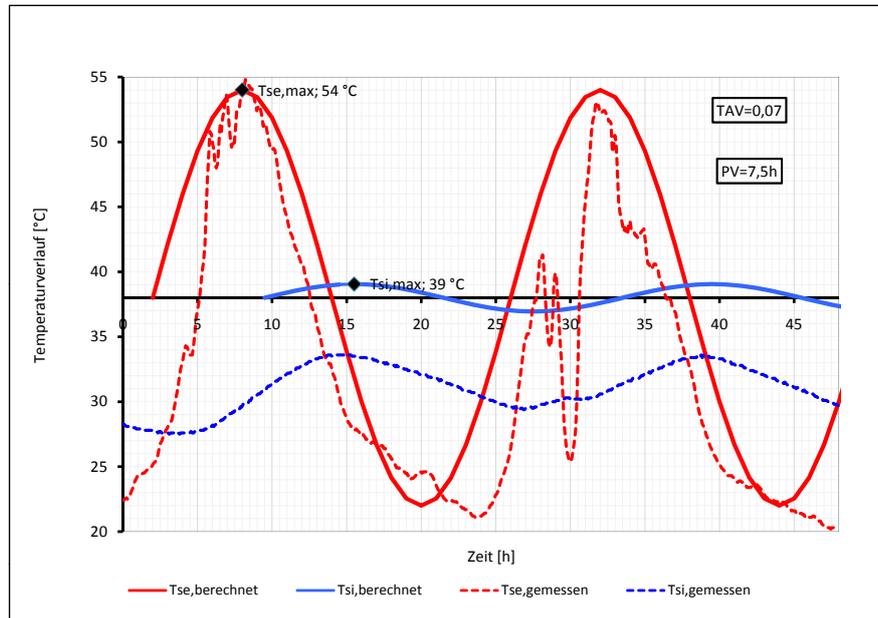


Abbildung A.11: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 7, Messwerte Südseite)

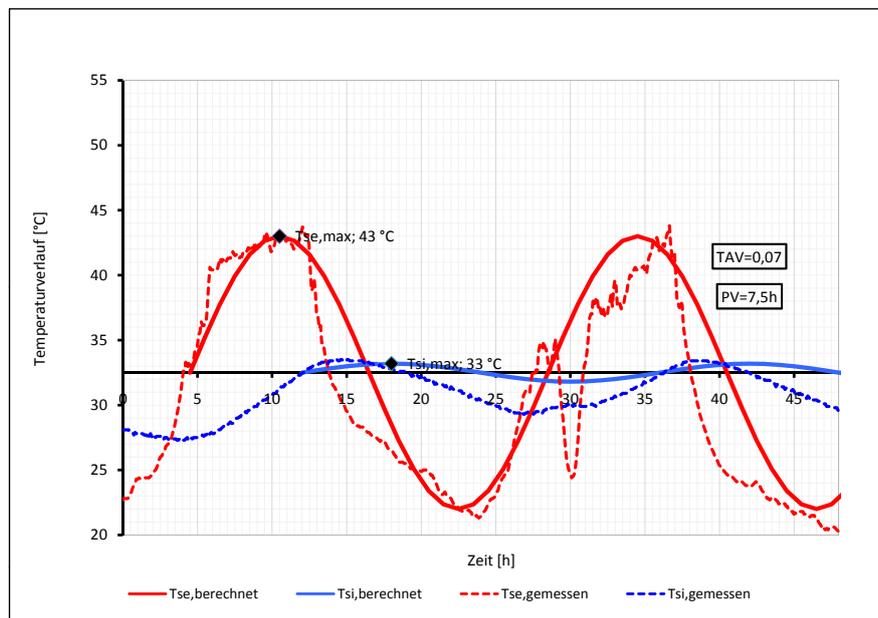


Abbildung A.12: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 7, Messwerte Nordseite)

Cube 8 - 12cm PUR, ohne OSB-Unterkonstruktion

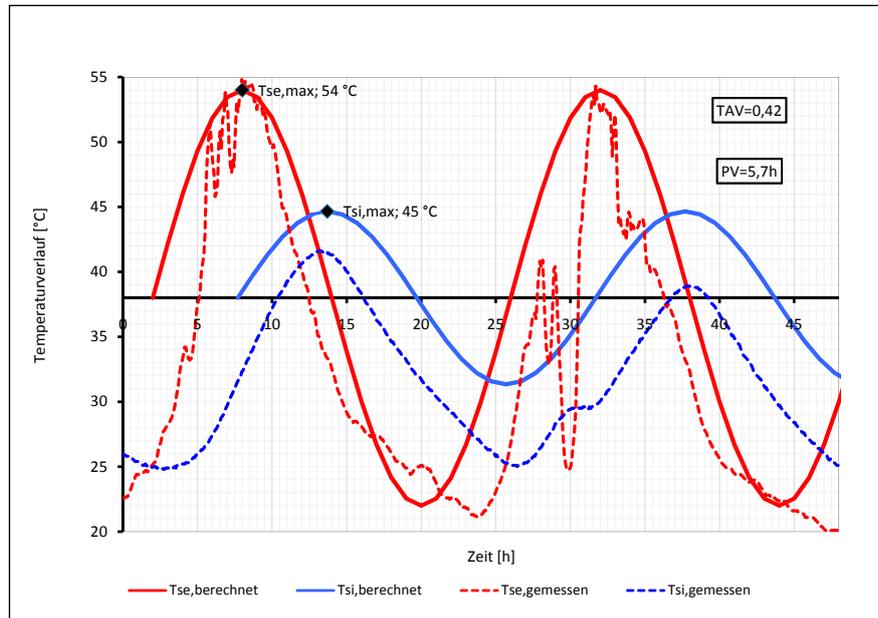


Abbildung A.13: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 8, Messwerte Südseite)

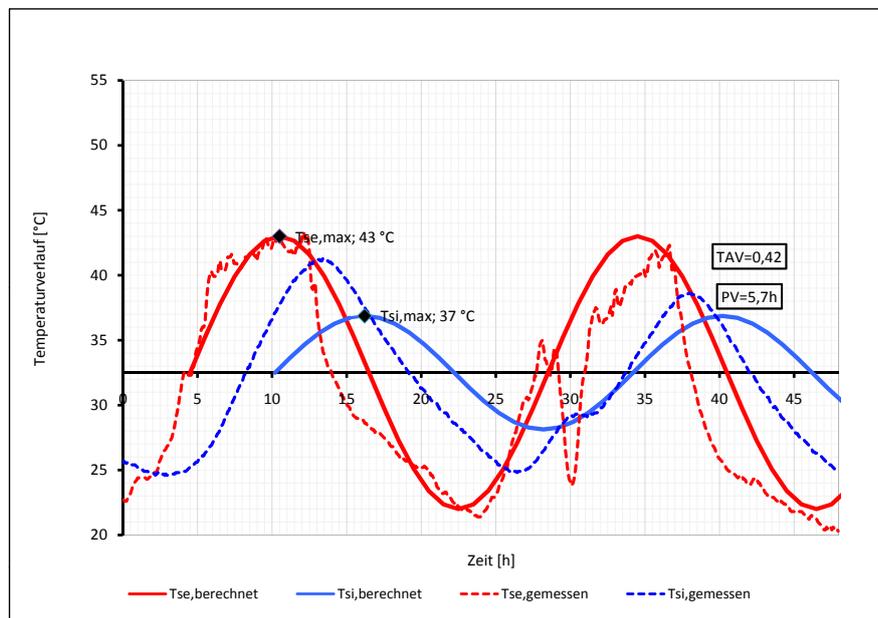


Abbildung A.14: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 8, Messwerte Nordseite)

Cube 9 - 2cm OSB+4cm WF, Innenauskleidung mit 5,5cm Vollziegel

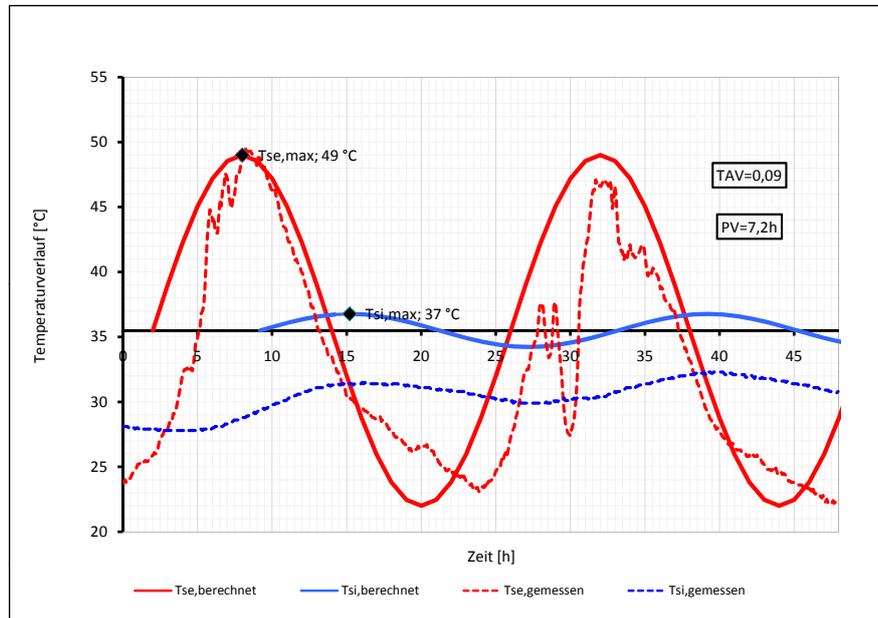


Abbildung A.15: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 9, Messwerte Südseite)

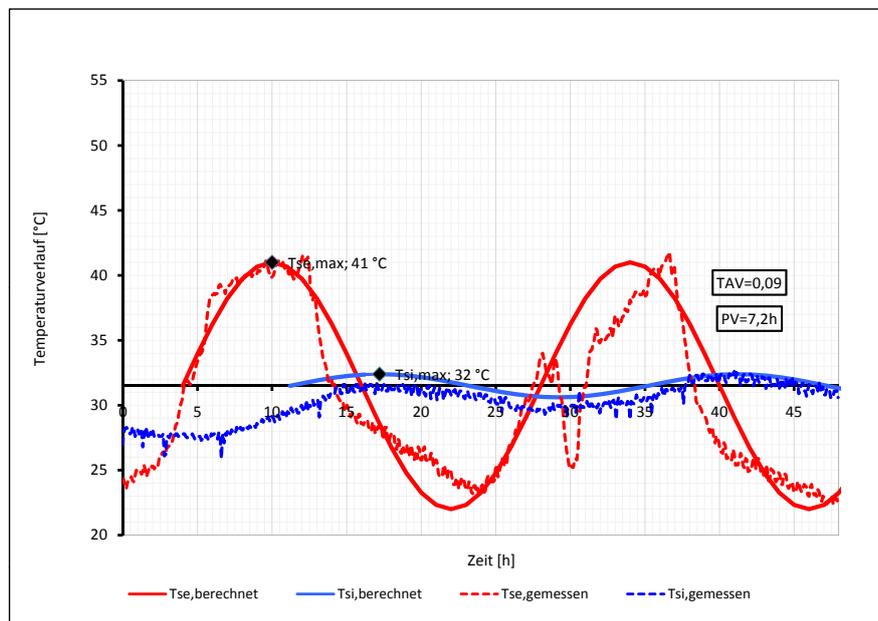


Abbildung A.16: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 9, Messwerte Nordseite)

Cube 10 - 2cm OSB+4cm WF, Innenauskleidung mit 1,5cm PCM

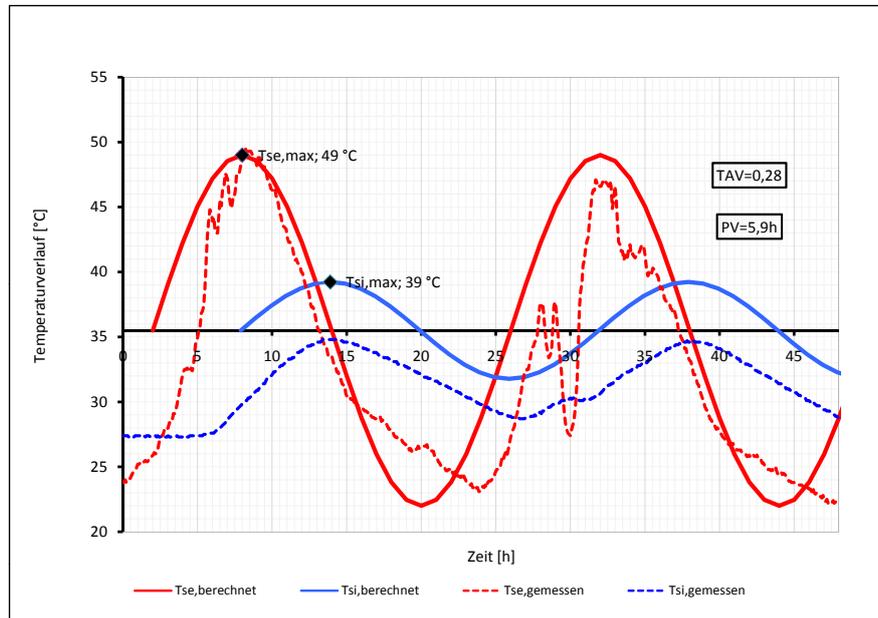


Abbildung A.17: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 10, Messwerte Südseite)

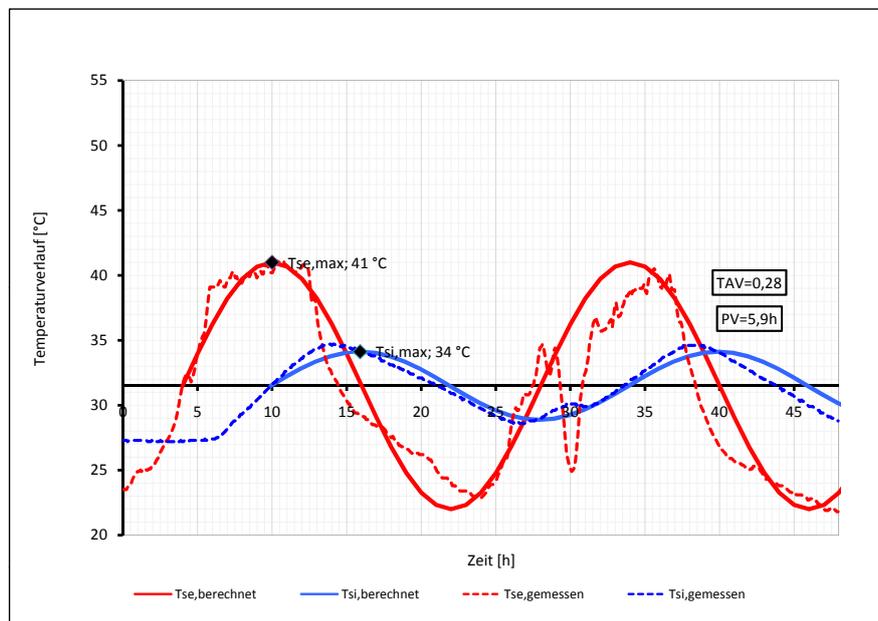


Abbildung A.18: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 10, Messwerte Nordseite)

Cube 11 - 2cm OSB+12cm WF, 2WSV, $U_g = 1,1W/m^2K$, $g = 0,55$

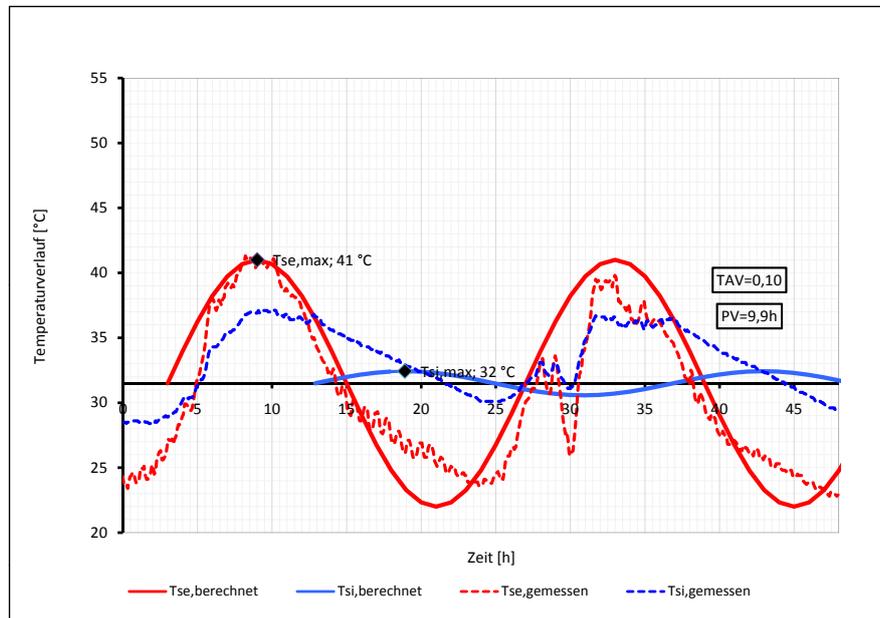


Abbildung A.19: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 11, Messwerte Südseite)

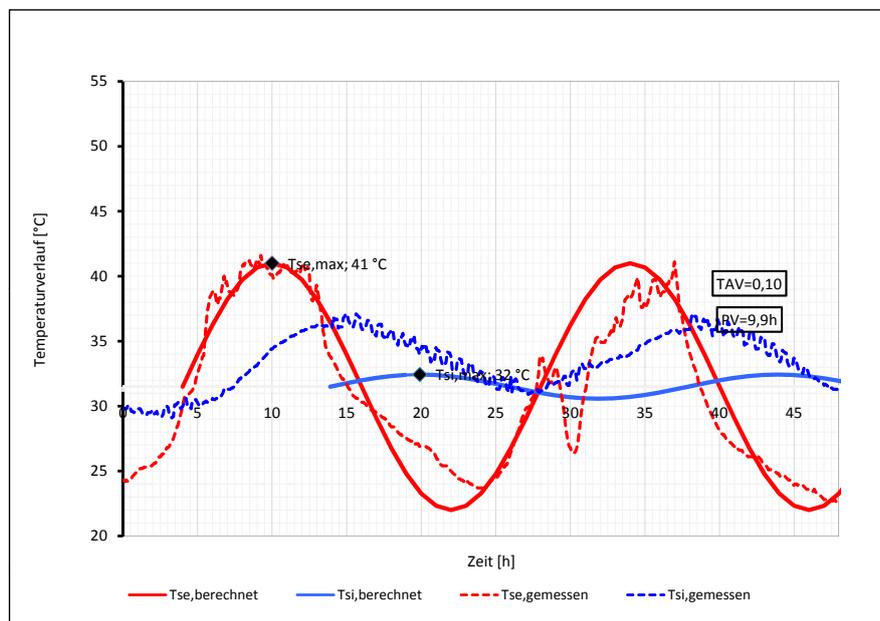


Abbildung A.20: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 11, Messwerte Nordseite)

Cube 12 - 2cm OSB+12cm WF, 3WSV, $U_g = 0,6W/m^2K$, $g = 0,48$

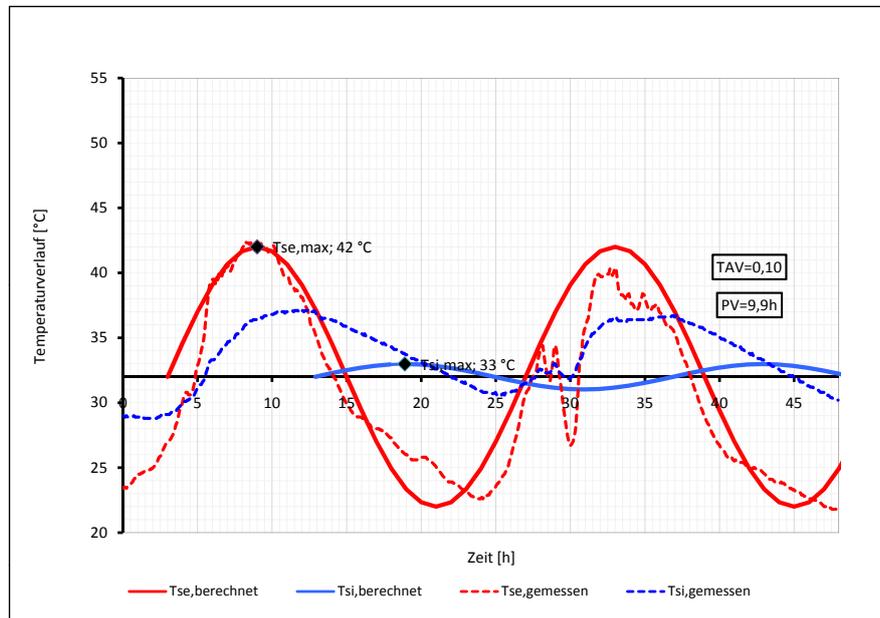


Abbildung A.21: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 12, Messwerte Südseite)

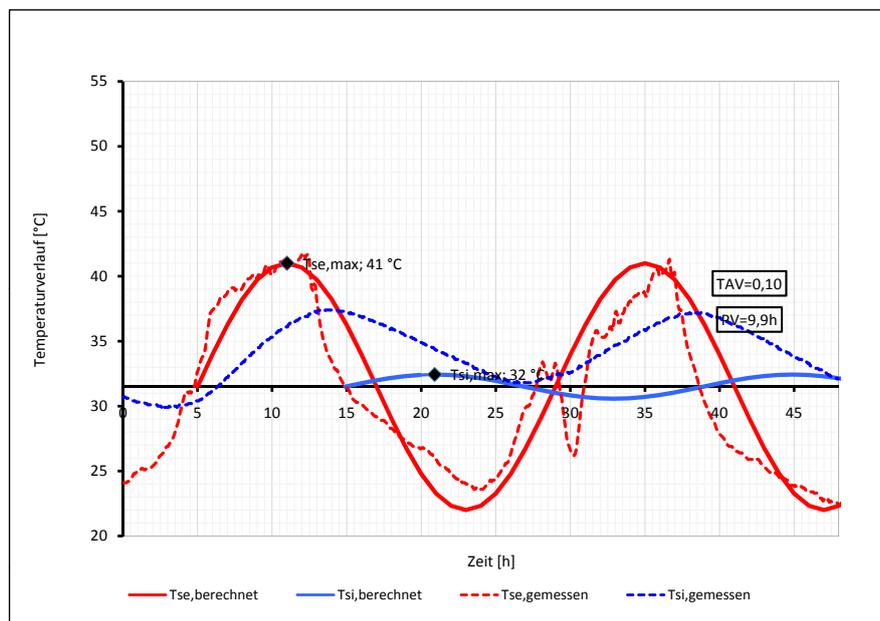


Abbildung A.22: Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV) und Phasenverschiebung (PV) berechnet und gemessen (Cube 12, Messwerte Nordseite)

A.2 Tabellen

Tabelle A.1: Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster U_W nach DIN EN ISO 10077-1:2000-11

Cube	Beschreibung	A_g	U_g	Ψ_{fg}	l_{fg}	U_w
Nr.	der Verglasung	$[m^2]$	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$	$[\frac{W}{m \cdot K}]$	$[m]$	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
Cube 11	2-fach WSV 4/18/4 mm, AR	0,25	1,1	0,08	2,12	1,8
Cube 12	3-fach WSV 4/10/4/10/4 mm, KR	0,25	0,6	0,08	2,12	1,3

A_g ..Verglasungsfläche, U_g ..U-Wert Verglasung, Ψ_{fg} ..Linearer Wärmedurchgangskoeffizient des Glasrandverbundes, l_{fg} ..Länge des Glasrandverbundes, U_w ..Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters, WSV..Wärmeschutzverglasung, AR..Argonfüllung, KR..Kryptonfüllung.

Tabelle A.2: Berechnungstabelle „Rechnerische Ermittlung des Heizwärmebedarfs aus den thermischen und geometrischen Größen der Cubes sowie den Klimadaten am Standort Meran“ - Teil 1

CUBES									
Cube Nr.	Beschreibung	mittl. U-Wert		η	Verlustfläche			Transmissionleitwert L_T	
		Ausnutzungs-grad solare Gewinne	innere oberfläche		äußere oberfläche	Mittlere Verlustfläche	Bauteile	Zuschlag $WB_{L_y+L_x}$	gesamt L_T
keine solaren Gewinne									
Cube 1	OSB+4cm HWF	0,73 W/m ² K	5,53 m	7,00 m	6,26 m ²	4,57 W/K	0,02 W/K	4,59 W/K	4,59 W/K
Cube 3	OSB+12cm HWF	0,29 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	2,14 W/K	0,20 W/K	2,34 W/K	2,34 W/K
Cube 4	OSB+12cm EPS	0,27 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	1,99 W/K	0,19 W/K	2,18 W/K	2,18 W/K
Cube 5	OSB+12cm RW	0,29 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	2,14 W/K	0,20 W/K	2,34 W/K	2,34 W/K
Cube 6	OSB+12cm MS	0,33 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	2,43 W/K	0,20 W/K	2,64 W/K	2,64 W/K
Cube 7	OSB+3cm Vak	0,12 W/m ² K	5,53 m	6,74 m	6,14 m ²	0,74 W/K	0,09 W/K	0,83 W/K	0,83 W/K
Cube 8	Sandw. 12 cm	0,18 W/m ² K	6,00 m	9,23 m	7,61 m ²	1,37 W/K	0,16 W/K	1,53 W/K	1,53 W/K
Cube 9	6 cm Vollziegel + OSB + 4cm HWF	0,69 W/m ² K	4,34 m	7,00 m	5,67 m ²	3,91 W/K	0,05 W/K	3,96 W/K	3,96 W/K
Cube 10	1,5 cm PCM + OSB + 4cm HWF	0,69 W/m ² K	5,19 m	7,00 m	6,09 m ²	4,20 W/K	0,05 W/K	4,26 W/K	4,26 W/K
Cube 11	2WSV + 12 cm HWF	0,34 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	2,52 W/K	0,21 W/K	2,72 W/K	2,72 W/K
Cube 12	3WSV + 12 cm HWF	0,32 W/m ² K	5,53 m	9,23 m	7,38 m ²	2,39 W/K	0,20 W/K	2,60 W/K	2,60 W/K

Mittlere Außentemperatur θ_e

Mittlere Innentemperatur in der Heizperiode θ_i

Anzahl Heiztage HT

Tabelle A.3: Berechnungstabelle „Rechnerische Ermittlung des Heizwärmebedarfs aus den thermischen und geometrischen Größen der Cubes sowie den Klimadaten am Standort Meran“ - Teil 2

HEIZWÄRMEBEDARF Q_{Ht}												
Monatlicher Heizwärmebedarf $Q_{Ht} = Q_{S-LT} \cdot HT \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot 0,024 - \eta \cdot (I_s \cdot A_g \cdot f_s \cdot g_w)$ [kWh/Monat]												
Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Cube Nr.
31	28	31	30	0	0	0	0	0	31	30	20	
1,3 °C	4,0 °C	8,6 °C	12,6 °C	17,3 °C	21,1 °C	22,5 °C	21,7 °C	17,1 °C	12,4 °C	6,1 °C	1,5 °C	
16,5 °C												
52,0	38,5	27,0	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	13,9	34,2	33,1	Cube 1
26,5	19,6	13,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	7,1	17,4	16,8	Cube 3
24,7	18,3	12,8	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,6	16,3	15,7	Cube 4
26,5	19,6	13,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	7,1	17,4	16,8	Cube 5
29,9	22,1	15,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	8,0	19,7	19,0	Cube 6
9,4	7,0	4,9	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	6,2	6,0	Cube 7
17,3	12,8	9,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,6	11,4	11,0	Cube 8
44,8	33,2	23,2	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,9	29,5	28,5	Cube 9
48,2	35,7	25,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,9	31,7	30,7	Cube 10
27,2	19,2	12,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,6	16,6	16,0	Cube 11
26,2	18,6	12,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,6	16,2	15,5	Cube 12

in den Monaten Mai bis Sept. ist die mittlere Außentemperatur höher als die mittlere Innentemperatur, wodurch in dieser Zeit keine Heizwärme zugeführt werden muss.