



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Ermittlung des Wärmegewinnes von Räumen unter Berücksichtigung von thermischen und optischen Eigenschaften von Verglasungen und technischen Lichtquellen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic

durchgeführt am

E206

Institut für Hochbau und Technologie
Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Kirchweger
Matr.Nr.: 9625860
Hermannngasse 18/10
1070 Wien

Wien, im November 2008

Danksagung

Mit dieser Diplomarbeit wurde mir die Möglichkeit eröffnet, in einem sehr zukunftssträchtigen und interessanten Gebiet, der sommerlichen Überwärmung von Räumen, tätig zu werden.

Meine ersten Dankeszeilen möchte ich Herrn a.o. Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Thomas Bednar Leiter des Zentrums für Bauphysik und Bauakustik am Institut für Hochbau und Technologie der TU-Wien widmen, der mir die Chance gab, diese Diplomarbeit durchzuführen. Durch Kompetenz und größtes Engagement half er mir, Probleme schnell zu lösen und alle Schwierigkeiten, die sich im Laufe meiner Arbeit ergaben, so gut wie möglich zu bewältigen.

Weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der Abteilung für Bauphysik und Bauakustik, die mir beim Versuchsaufbau sowie bei technischen Schwierigkeiten geholfen und mich unterstützt haben, und mir so die Bearbeitung und Lösung der in dieser Diplomarbeit aufgeworfenen Fragestellungen ermöglicht haben.

Außerdem möchte ich allen danken, die mir bei der Ausfertigung dieser Arbeit geholfen haben und mir in fachlichen, inhaltlichen wie auch stilistischen Fragen zur Seite standen.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit dem Energieeintrag zur sommerlichen Erwärmung eines Raumes, sowohl bei offenen Jalousien als auch bei geschlossenen Jalousien und inneren technischen Lichtquellen. Ziel ist es, diese zwei verschiedenen Wärmequellen zu untersuchen und ihre Auswirkungen auf den Energieeintrag zu bewerten.

Bei Sonneneinstrahlung wird die Leistung der Sonne durch den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), des Fensters sowie eventuell vorhandenen Sonnenschutzvorrichtungen gemindert.

Diese Arbeit behandelt die kalorimetrische Ermittlung des Energiedurchlassgrades der bestehenden Verglasung und zweier verschiedener Einstellungen der vorhandenen Sonnenschutzvorrichtung (Jalousien).

Durch unterschiedliche Parameter wie die Größe des Fensters oder die Dimension des Raumes ergibt sich eine Verteilung der Beleuchtungsstärke im Raum, die in Richtung Fenster zunimmt. Da zum Beispiel in Büroarbeitsstätten eine Lichtstärke von 500 Lux an der Schreibtischoberfläche gefordert ist, ergibt sich aufgrund des Tagesganges der solaren Einstrahlung ein Zeitpunkt, ab dem das Zuschalten von technischen Lichtquellen erforderlich ist. Abhängig ist dieser sowohl vom Abstand des Schreibtisches zum Fenster als auch von den verschiedenen Jalousieeinstellungen.

Die technische Lichtquelle gibt Energie in den Raum ab und trägt somit zur Erwärmung des Raumes bei. Dies ist im Sommer bei hohen Temperaturen unerwünscht.

In dieser Arbeit werden exemplarisch für den gemessenen effektiven g-Wert von 0,74, die Energieeinträge zweier Abstände des Arbeitsplatzes zum Fenster und verschiedene Jalousiebenützungsarten verglichen.

Als Resultat wird anhand des Versuchsobjektes aufgezeigt, dass der Energieeintrag bei einem Abstand von drei Metern und ständig angepasster, effizienter Jalousiestellung dem bei durchgehend geschlossener Jalousie und quasi immer aktiven Leuchtstofflampen entspricht.

Ist allerdings der Arbeitsplatz fünf Meter vom Fenster entfernt, so sollen zum Erreichen einer möglichst niedrigen sommerlichen Raumtemperatur der Sonnenschutz ständig geschlossen und die technischen Lichtquellen aktiv sein.

Niedrige g-Werte bei hohen Lichtdurchlasskoeffizienten können allerdings das Bild des hohen Energieeintrages der Sonne verbessern. Andererseits wird im Winter der Energieeintrag der Sonne sogar erwünscht.

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang aber auch die ständige Forschung und Weiterentwicklung der Licht-Technologie; so haben beispielsweise Leuchtdioden einen höheren Wirkungsgrad als Leuchtstofflampen.

Abstract

In this master thesis, two scenarios investigating the effects of internal summer overheating are examined: on the one hand solar heat gains from incoming sunshine and open blinds; on the other hand internal heat gains from artificial lighting when blinds are closed. The goal is to investigate the two different heat sources and to assess their effects on the total energy input of a building.

When the sun shines, the power of the incoming solar radiation is reduced by the window total energy transmittance (g-value) and existing window shades.

This study considers the calorimetric exploration of a window's total energy transmittance and two different positions of the existing window shades.

The light intensity in a room increases towards the windows and depends upon several different parameters as the window size or room dimensions. For example, a luminosity of 500 lx on work surfaces is required in offices. For certain periods of the day, it is necessary to turn on artificial lights due to a combination of the sun's daily path, window spacing and the position of window shades.

Artificial lighting releases heat into a room and contributes to overall room heating, which is undesirable in summer when high internal temperatures already exist.

In this investigation, using a measured effective g-value of 0.74, two different distances toward the window and different behaviour of using window shades are compared.

Measurements taken from a depth of three metres away from the window with the most effective shading position for internal heat gains show similar results to permanently closed blinds and constantly illuminated fluorescent lamps.

However, the workspace that was put five meters towards the room's centre exhibited the lowest room temperature of the test subject when the shading was constantly closed and thus the fluorescent lighting was always illuminated.

Windows with low g-values and high light transmittance coefficient can certainly increase the potential of high passive solar energy absorption. Otherwise, passive solar heat gains are desirable in winter.

In this context furthermore it is worth to mention, that there is a progressive development of light technology and for example light emitting diodes are more efficient than fluorescent lamps.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Sonnenstrahlung	3
2.2	Licht	6
2.3	Wärmetransport	6
2.3.1	Wärmeleitung	7
2.3.2	Wärmekonvektion	7
2.3.3	Wärmestrahlung	8
2.3.4	Wärmeübergang	9
2.3.5	Ruhende Luftschichten	10
2.3.6	Wärmedurchgangskoeffizient	10
2.4	Numerische Berechnung des Wärmetransportes	11
2.5	Isolierverglasung	11
2.6	Gesamtenergiedurchlassgrad	13
2.7	Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen	13
2.8	Entwicklung kalorimetrischer Messmethoden	14
3	Versuchsaufbau und –ablauf	16
3.1	Grundsätzliches	16
3.2	Sensoren	18
3.2.1	Strahlungsmessung	18
3.2.2	Temperaturmessung	18
3.2.3	Lichtmessung	18
3.3	Glaseigenschaften	19
3.3.1	Beschichtung	19
3.3.2	Glasaufbau	20
3.4	Kalorimeter	21
3.4.1	Heizwiderstand	23
3.4.2	Rührgerät	23
3.5	Leistungsmessung Kalorimeter	24
3.6	Berechnung Gesamtenergiedurchlassgrad	24
3.6.1	Eingangswerte	24
3.6.2	Aufbau Kalorimeter	25
3.6.3	Berechnung Energieeintrag	26

3.7	Simulation mit den Eingangswerten	33
3.7.1	Sonnenstand	33
3.8	Berechnung des Abminderungsfaktor der Abschattungsvorrichtung	36
3.9	Lichtmessung	37
3.9.1	Natürliche Lichtquelle	37
3.9.2	Technische Lichtquelle	38
4	Messergebnisse und Diskussion	39
4.1	Messergebnisse Gesamtenergiedurchlassgrad	39
4.1.1	Allgemeines	39
4.1.2	Rechnerische Ermittlung des Temperaturanstiegs im Kalorimeter	40
4.1.3	Messung des g-Wertes	46
4.1.4	Diskussion	50
4.2	Ergebnisse Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen	51
4.2.1	Allgemeines	51
4.2.2	z-Wert bei Sperrstellung	51
4.2.3	z-Wert bei Waagstellung	57
4.2.4	Diskussion Abminderungsfaktor für Abschattungsvorrichtungen	63
4.3	Licht Messergebnisse	64
4.3.1	Allgemeines	64
4.3.2	Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 5,01m	65
4.3.3	Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 4,37m	66
4.3.4	Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 2,86m	67
4.3.5	Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 2,20m	68
4.3.6	Zusammenhang Umrechnungsfaktor – Abstand zum Fenster	69
4.4	Vergleich Wärmeenergieeintrag	70
4.4.1	Ergebnisse in 3m Abstand	71
4.4.2	Ergebnisse in 5m Abstand	73
4.4.3	Diskussion der Wärmeenergieeinträge	75
5	Zusammenfassung	76
5.1	Gesamtenergiedurchlassgrad	76
5.2	Beleuchtungsenergieeintrag	76
6	Literaturverzeichnis	77
7	Nomenklatur	79

1 Einleitung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einem Teilaspekt der sommerlichen Erwärmung von Räumen.

Die sommerliche Temperatur von Räumen hängt lt. ÖNorm 8110-3 ab von:

- dem Sonnenschutz
- der Raumlüftung, insbesondere der Nachtlüftung
- der speicherwirksamen Masse der raumumschließenden Bauteile sowie der Einrichtung
- der Orientierung der strahlungsdurchlässigen Flächen
- der inneren Wärmequellen

In dieser Arbeit wird vor allem auf den Sonnenschutz und auf seinen Zusammenhang mit der Beleuchtung als innere Wärmequelle eingegangen.

Der Sonnenschutz besteht in diesem Fallbeispiel aus einsetzbaren Abschattungs-Maßnahmen, als auch aus den Verglasungseigenschaften.

Der erste Teil beschäftigt sich mit der Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrades einer Verglasung. Dieser kann auf folgende zwei verschiedene Arten ermittelt werden:

1. Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrades nach ÖNorm EN 410: Diese gilt nur für Verglasungen bei senkrechtem Strahlungseinfall. Darüber hinaus werden genormte Wärmeübergangswiderstände zwischen Glasscheibe und Luft angesetzt, die unter bestimmten Umständen der Realität nicht entsprechen [ift Rosenheim (2001)]
2. Kalorimetrische Ermittlung des Gesamtenergiedurchlassgrades: Hier wird ein Kalorimeter an der Glasscheibe befestigt, dessen Erwärmung ein Maß für den g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) ist. Mit dieser Methode wird der g-Wert direkt bestimmt und es können auch unterschiedlichste andere Einflüsse mit untersucht werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der kalorimetrischen Ermittlung des g-Wertes in einem exemplarischen Raum, und zusätzlich werden optische Daten über die Beleuchtungsstärke in der Höhe von Schreibtischen gesammelt, die nachfolgend für die Aktivierung beziehungsweise Deaktivierung eines eventuellen Sonnenschutzes (hier Jalousien) ausschlaggebend sind.

Zusätzlich dazu wird der totale effektive g-Wert für den Wirkungsgrad von zwei verschiedenen Jalousiestellungen ermittelt. Mit diesen Daten wird ein einfacher Zusammenhang zwischen der Entfernung vom Fenster, der Bestrahlungsstärke auf das Fenster und der Beleuchtung von Schreibtischen innerhalb des Raumes ermittelt.

Damit wird der effektive Energieeintrag an einem exemplarischen Vormittag, bestehend aus dem Eintrag durch das Sonnenlicht und den eventuell aktivierten technischen Lichtquellen (hier Leuchtstofflampen), ermittelt.

Dafür werden vier verschiedene Möglichkeiten der Jalousiebenützung aufgestellt, aufgrund derer es zu vier unterschiedlichen Wärmeeinträgen in den Raum kommt; diese werden quantitativ verglichen.

2 Grundlagen

2.1 Sonnenstrahlung

Das Strahlungsspektrum des Sonne- Erde- Systems besteht aus zwei scharf voneinander abgegrenzten Anteilen: Dem von der Sonne stammenden kurzwelligen Anteil und dem langwelligen Teil, der durch die langwellige Wärmestrahlung der Erde zustande kommt.

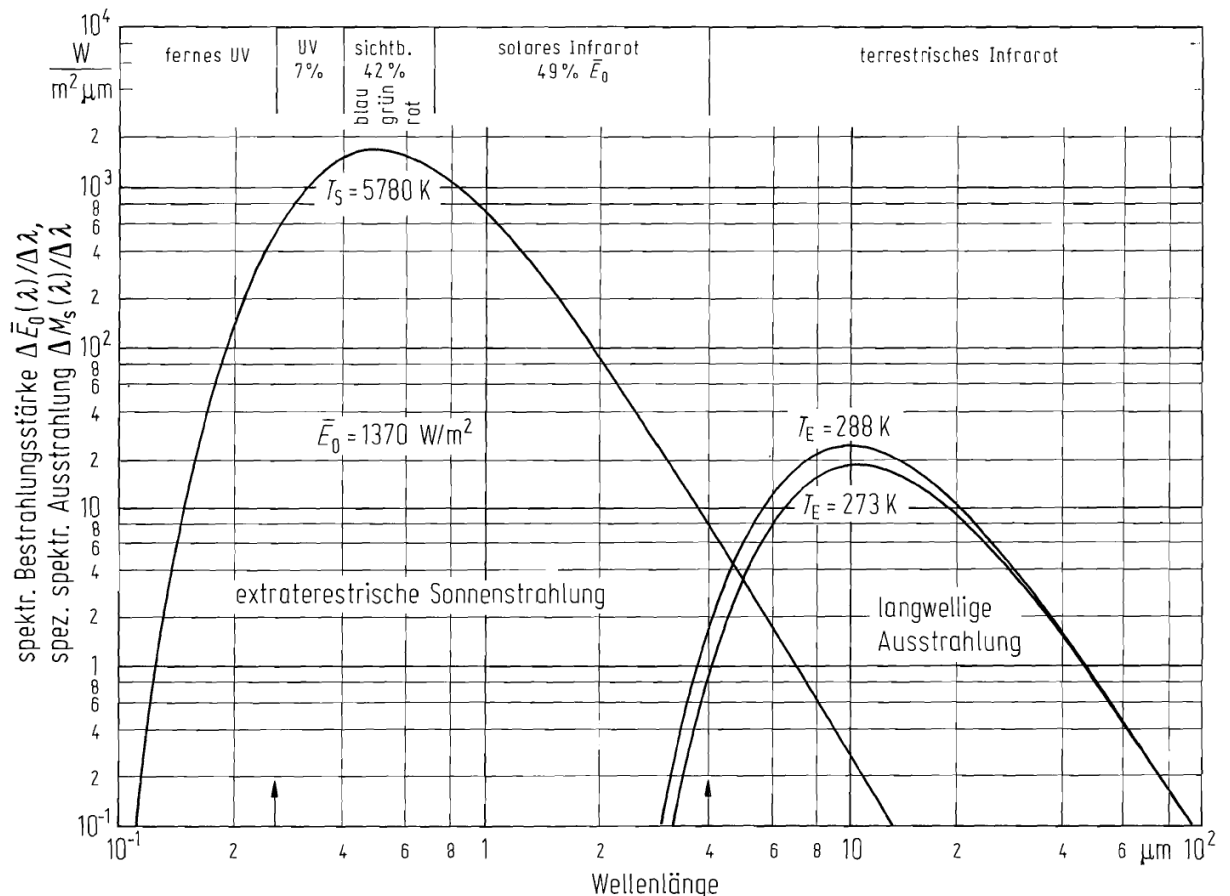


Abbildung 1: Das Spektrum der kurzwelligen extraterrestrischen Sonnenstrahlung und dasjenige der langwelligen Ausstrahlung des Systems Erde + Atmosphäre bei zwei Temperaturen [Rietschel H. (1994)]

Die Integration des extraterrestrischen Sonnenspektrums über alle Wellenlängen liefert die

Solarkonstante:

$$\bar{E}_0 = 1370 \text{ W/m}^2$$

[Rietschel H. (1994)]

Die Sonne kreist, von der Erde aus gesehen, aufgrund der Schiefstellung der Erdachse je nach Jahreszeit unter verschiedenen Höhenwinkeln (h) um die Erde. Die Ausrichtung der Sonne nach den Himmelsrichtungen wird Azimut (a) genannt. Die Sonne bewegt sich auf der Nordhalbkugel von Norden (Mitternacht) ($a = 0^\circ$) nach Osten (Sonnenaufgang bzw. Vormittag) ($a = 90^\circ$), nach Süden (Mittag) ($a = 180^\circ$), nach Westen (Nachmittag bzw. Sonnenuntergang) ($a = 90^\circ$) und abschließend wieder gegen Norden. Diese Erklärung des

Azimuts dient lediglich der Veranschaulichung, da sie aufgrund der Zeitungenauigkeit (1 Jahr $\approx$ 365,2422 Tage), der aktuellen Position (Längengrad) und der Zeitverschiebung aufgrund der eventuellen Sommerzeit sehr ungenau ist.

Um den Sonnenstand zu berechnen, werden hier für diese Arbeit genügend genaue Formeln angeführt:

Errechnung der Zeitvariable n_S , die die Anzahl der Tage seit dem Standardäquinoktium J2000 (1.Jänner 2000 12.00). darstellt, mit JD als Julianische Tageszahl des gewünschten Zeitpunkts:

$$\text{Zeitvariable } n_S: \quad n_S = \text{JD} - 2451545,0 \quad [1]$$

$$\text{Ekliptikale Länge } L_S \text{ der Sonne:} \quad L_S = 280,460^\circ + 0,9856474^\circ \cdot n_S \quad [2]$$

$$\text{Mittlere Anomalie } g_S: \quad g_S = 357,528^\circ + 0,9856003^\circ \cdot n_S \quad [3]$$

$$\text{Ekliptikale Länge } \Lambda_S: \quad \Lambda_S = L_S + 1,915^\circ \cdot \sin(g_S) + 0,020^\circ \cdot \sin(2g_S) \quad [4]$$

$$\text{Schiefe der Ekliptik } \varepsilon_S: \quad \varepsilon_S = 23,439^\circ - 0,0000004 \cdot n_S \quad [5]$$

$$\text{Rektaszension } \alpha_S: \quad \alpha_S = \arctan \left(\frac{\cos(\varepsilon_S) \cdot \sin(\Lambda_S)}{\cos(\Lambda_S)} \right) \quad [6]$$

$$\text{Deklination } \delta_S: \quad \delta_S = \arcsin(\sin(\varepsilon_S) \cdot \sin(\Lambda_S)) \quad [7]$$

[AstAlm (2006)]

Anhand der Rektaszension α_S und der Deklination δ_S , den beiden Äquatorial-Koordinaten, können, mithilfe der geographischen Breite und Länge, sowohl Azimut und als auch Höhe errechnet werden.

Julianische Tageszahl JD_0 (Julianische Tageszahl für 0.00h): $T_0 = \frac{JD_0 - 2451545,0}{36525}$ [8]

Mittlere Sternzeit θ_G : $\theta_G = 15. (6,697396 + 2400,05134 \cdot T_0 + 1,002738 \cdot T)$ [9]

Frühlingspunkt θ_S mit der geographischen Länge λ_S : $\theta_S = \theta_G + \lambda_S$ [10]

Stundenwinkel τ_S der Sonne für jenen Ort: $\tau_S = \theta - \alpha_S$ [11]

Azimut a_S mit der geograph. Breite φ_S : $a_S = \arctan \left(\frac{\sin(\tau_S)}{\cos(\tau_S) \cdot \sin(\varphi_S) - \tan(\delta_S) \cdot \cos(\varphi_S)} \right)$ [12]

Höhe h_S : $h_S = \arcsin(\cos(\delta_S) \cdot \cos(\tau_S) \cdot \cos(\varphi_S) + \sin(\delta_S) \cdot \sin(\varphi_S))$ [13]

[Meeus (2000)]

Aufgrund der Lichtbrechung in der Atmosphäre kann noch die Refraktion R_S , die dann zur korrigierten Höhe h_{RS} führt, berechnet werden.

Refraktion R_S : $R_S = \frac{1,02}{\tan \left(h_S + \frac{10,3}{h_S + 5,11} \right)}$ [14]

Korrigierte Höhe h_{RS} : $h_{RS} = h_S + R_S/60$ [15]

[Meeus (2000)]

2.2 Licht

Sonnenlicht ist der sichtbare Anteil der elektromagnetischen Strahlung der Sonne. Der sichtbare Wellenlängenbereich der Sonne geht von 380 nm bis 780 nm. Die Maßeinheit für die Beleuchtungsstärke, dem sichtbaren Teil der Bestrahlungsstärke, ist Lux [lx].

Ausreichend Licht ist notwendig, um zu sehen und Aufgaben zu erledigen. So wird in der deutschen Arbeitsstättenverordnung für Büroarbeitsstätten eine Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich von 500 lx gefordert. Falls das Sonnenlicht dafür nicht ausreicht, müssen technische Lichtquellen zugeschaltet werden.

Es werden heute im Wesentlichen folgende zwei verschiedene Arten von technischen Lichtquellen eingesetzt.

- Glühlampen sind Lampen, die mit erhitztem Glühfaden leuchten.
- Gasentladungslampen sind Leuchtkörper, bei denen das beinhalten Gas zum Leuchten angeregt wird. Sie besitzen ein elektromagnetisches Spektrum abhängig vom verwendeten Gas.

Da bei Gasentladungslampen naturgemäß auf das Maximum des Spektrums im Lichtbereich geachtet wird, haben diese einen höheren Wirkungsgrad als Glühlampen und somit eine niedrigere Wärmestrahlung bei gleicher Lichtmenge. Der Wirkungsgrad einer Leuchtstofflampe, bezogen auf die Lichtausbeute, ist zum Beispiel in etwa fünf Mal so hoch wie der einer vergleichbaren Glühlampe.

2.3 Wärmetransport

Es wird zwischen drei Arten des Wärmetransportes unterschieden:

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung
- Wärmekonvektion

Eine Kombination aus diesen drei Wärmetransporten findet am Übergang zwischen festen und gasförmigen Stoffen statt, dem sogenannten Wärmeübergang.

2.3.1 Wärmeleitung

Die Schwingungsenergie der Atome/Moleküle ist proportional zu deren Temperatur. Durch eine Wechselwirkung untereinander wird diese Schwingungsenergie an die nächstliegenden Atome/Moleküle übertragen. Es entsteht ein masseloser Energietransport, die Wärmeleitung.

Ein Maß für die Geschwindigkeit dieser Wärmeleitung vom Stoffbeginn zu dessen Ende ist die Wärmeleitfähigkeit und natürlich auch die Dicke der Stoffschichten.

Nach dem Ansatz von Fourier ist die Wärmestromdichte infolge der Wärmeleitung proportional zu dem Temperaturgefälle in Richtung des Wärmestroms $d\vartheta/dz$ und der Wärmeleitfähigkeit λ . [Rietschel H. (1994)]

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dz} \quad [\text{W}] \quad [16]$$

Das negative Vorzeichen bedeutet, dass der Wärmestrom in Richtung abnehmender Temperatur erfolgt.

2.3.2 Wärmekonvektion

Die Wärmekonvektion ist die Weiterleitung der Wärme durch bewegliche Teilchen. Aufgewärmte Teilchen werden zum Beispiel durch Wind oder den Dichteunterschied der erwärmten Materie weitertransportiert. Der Energietransport erfolgt über einen Materietransport.

2.3.3 Wärmestrahlung

Die in einem Atom befindlichen elektrischen Ladungen bewegen sich beschleunigt und senden dabei elektromagnetische Strahlung ab. Diese Art der Energieübertragung kann sich auch im Vakuum ausbreiten.

Die Fähigkeit eines Stoffes, Wärme abzustrahlen, wird mit dem Emissionsgrad ε beschrieben. Diese Konstante ist der Quotient der abgestrahlten Energie eines „realen“ Körpers und der abgestrahlten Energie eines „ideal schwarzen“ Körpers.

Die dadurch entstehende Emission wird durch das Stefan-Bolzmannsche-Gesetz beschrieben:

$$\dot{W} = \varepsilon \sigma T^4 A \quad [\text{W}] \quad [17]$$

Dabei ist ε der Emissionsgrad, σ die Stefan-Bolzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^8$), T die absolute Temperatur und A die Fläche.

Der Absorptionsgrad α beschreibt das Aufnahmevermögen eines Körpers und ist somit der Quotient aus der einfallenden Energie mit der absorbierten Energie.

Bei gleichen Wellenlängen ist der Absorptionsgrad gleich dem Emissionsgrad.

Die Sonne strahlt mit einer mittleren Wellenlänge von zirka $\lambda_s \approx 0,8 \mu\text{m}$, während die der Umgebungsstrahlung zirka $\lambda_s \approx 15 \mu\text{m}$ beträgt. Das führt zu wesentlich unterschiedlichen Emissions- beziehungsweise Absorptionsgraden. Diese sind im Bezug zur kleineren Wellenlänge je nach Oberfläche kleiner bis wesentlich kleiner als die der längeren Wellenlänge. Tabelle 1 schafft einen Überblick über den Unterschied zwischen dem solaren Absorptionsgrad, der Strahlung kürzerer Wellenlänge und dem Emissionsgrad bei zirka 20°C.

Baustoff	Solarer Absorptionsgrad α	Emissionsgrad ε
Beton	0,55	0,96
Dachpappe	0,90	0,90
Gips	0,32	0,90
Putz, weiß	0,36	0,97
Putz, grau	0,65	0,97
Holz	0,40	0,94
Ziegelstein, rot	0,55	0,93
Floatglas (6mm)	0,12	0,91
Emaillack, schwarz	0,90	0,95

Tabelle 1: Beispiel von Absorptionsgraden und Emissionsgraden von Bauteilen bei verschiedenen Wellenlängen [Hohmann R. (1993)]

2.3.4 Wärmeübergang

Der Wärmeübergang gibt die Bedingung nach außen, den Wärmeübergang von der Stoffschicht auf die Umgebungsluft wieder. Er wird durch die Wärmeübergangszahl α beschrieben.

Im Bauwesen wird die Wärmeübergangszahl im Allgemeinen fixiert, und es wird unterschieden zwischen:

- einem Wärmeübergangskoeffizient gegen Außenluft α_a
- einem Wärmeübergangskoeffizient in einen Raum α_i

Diese werden von der Richtung des Wärmestromes beeinflusst (horizontal – vertikal).

Der Wärmeübergangskoeffizient nach außen ist durch die in der Regel stärkere Luftbewegung höher und wird für horizontale Wärmeströme, ebene Flächen und unbeschichtetes Natron-Kalkglas laut ÖNorm EN 410 und ÖNorm EN 673 mit

$$\alpha_a = 23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

festgelegt.

Der Übergangskoeffizient nach innen beträgt für ebene Flächen im Allgemeinen

$$\alpha_i = 8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Der Wärmeübergangswiderstand ist der Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten α .

2.3.5 Ruhende Luftschichten

Eine Luftschicht gilt als ruhend, wenn der Luftraum von der Umgebung abgeschlossen ist. Aufgrund der bei stärkeren Schichten entstehenden Konvektion und der Wärmestrahlung, kann man diese nicht einfach durch den Wärmeleitkoeffizient und die Dicke der Schicht bemessen. In Tabelle 2 sind Bemessungswerte des Wärmedurchlasswiderstandes angegeben. Diese gelten für horizontale Wärmeströme, einer Abweichung um je 30° und Oberflächen mit hohem Emissionsgrad.

Dicke der Luftschicht	Wärmedurchlaßwiderstand
0 mm	0,00 m².K/W
5 mm	0,11 m².K/W
7 mm	0,13 m².K/W
10 mm	0,15 m².K/W
15 mm	0,17 m².K/W
25 mm	0,18 m².K/W
50 mm	0,18 m².K/W

Tabelle 2: Wärmedurchlasswiderstand von ruhenden Luftschichten – Oberflächen mit hohem Emissionsgrad [EN ISO 6946 (2008)]

Andere Gasmischungen haben aufgrund deren Wärmeeigenschaften unterschiedliche, von ihren Schichtdicken abhängige Wärmedurchlasswiderstände, aber die Art der entstehenden Funktion ist gleich.

2.3.6 Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) eines Stoffaufbaus aus homogenen Schichten setzt sich aus dem Kehrwert der Summe der einzelnen Wärmedurchlasswiderstände und der Wärmeübergangswiderstände zusammen.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_i R_{ti} + \frac{1}{\alpha_a} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad [18]$$

Dies ist der wesentliche Wert für die Bewertung von Stoffaufbauten wie Wandaufbauten von Bauwerken.

Der Wärmetransport im stationären Zustand (gleichbleibender Temperaturunterschied zwischen innen und außen) und von opaken Stoffen setzt sich zusammen aus dessen U-Wert U , und der Temperaturdifferenz Δt der angrenzenden Stoffe.

$$q_{\text{heat}} = U \cdot \Delta t \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad [19]$$

2.4 Numerische Berechnung des Wärmetransportes

Für den Wärmetransport pro Flächeneinheit der Grenzschicht nach außen ergibt sich folgende Differentialgleichung [Patankar S. (1980)]:

$$c p d_1 \cdot \dot{T}_1 = h_c (T_{\text{air}} - T_1) - \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} (T_1 - T_2) + q_{\text{rad}} \quad [20]$$

h_c ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient (vgl. α_a und α_i), $K_1 = \frac{\lambda_1}{d_1}$, $K_{i>1} = \frac{2\lambda_i}{d_i}$, T_i ist die Absolut-Temperatur der i-ten Schicht und q_{rad} ist die abgestrahlte Energiemenge.

Der Wärmetransport zwischen den opaken Stoffen selbst ergibt sich zu [Patankar S. (1980)]:

$$c p d_i \cdot \dot{T}_i = \frac{K_{i-1} \cdot K_i}{K_{i-1} + K_i} (T_{i-1} - T_i) - \frac{K_i \cdot K_{i+1}}{K_i + K_{i+1}} (T_i - T_{i+1}) \quad [21]$$

2.5 Isolierverglasung

Verglasungen mit ihrem meist mehrglasigen Aufbau lassen Energie sowohl aufgrund von Wärmedurchgang, wie auch Wärmestrahlung durch. Zwischen den Gläsern selbst treten alle Formen des Wärmetransportes auf.

Isolierglas besteht aus zwei Schichten Glas und einer darin ruhenden Gasschicht. Diese ist aufgrund des geringen Abstands der Scheiben (bis zirka 16 mm) fast ohne innere Luftbewegung und so wegen der kleinen Masse relativ gut wärmedämmend. Es gibt mehrere eingesetzte Gase unterschiedlicher Qualität. Beispiele dafür sind entwässerte Luft, Argon und andere Edelgase. Um eine noch bessere Wärmedämmung zu erreichen wird oft auf der Innenscheibe gasseitig eine Metallschicht aufgedampft, die die Emission dieser Glasscheibe mindert. Es wird versucht, die Strahlung längerer Wellenlängen, der Sonnenstrahlung, durch den Glasaufbau hindurch zuzulassen, die Strahlung kürzerer Wellenlängen der Gegenstände im Raum (bis zirka 300 nm) der im Raum befindlichen Gegenstände aber in diesen zurückzuspiegeln.

Je nach dem Winkel, mit dem die Sonnenstrahlung auf das Fenster auftritt, ändert sich – auch aufgrund der Brechung des Lichtes an der Grenzfläche – die Dicke der von der Strahlung zu durchdringenden Glasschicht. Deswegen sind der Lichttransmissionsgrad und der Absorptionsgrad der einzelnen Glasscheiben winkelabhängig.

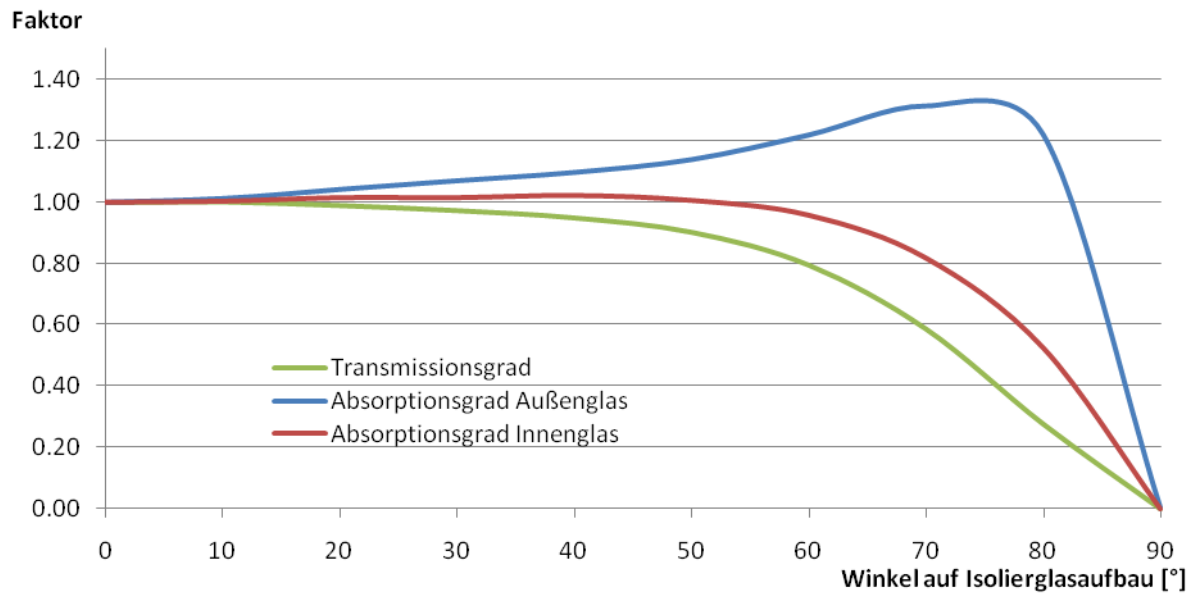


Diagramm 1: Beispiel für die Änderung des Transmissionsgrades und der Absorptionsgrade durch einen Isolierglasaufbau

Das Diagramm 1 zeigt ein Beispiel für diese Änderung des Transmissionsgrades und der Absorptionsgrade für den betreffenden Einfallswinkel der Sonne. Null Grad bedeutet, dass die Strahlungsquelle normal auf die Isolierglasscheibe steht, während bei 90 Grad die Strahlung genau in Scheibenebene verläuft und so keine Strahlung mehr das Glas treffen kann.

2.6 Gesamtenergiedurchlassgrad

Der g-Wert, der Energiedurchlassgrad, ist definiert als der Prozentsatz der solaren Strahlung, der im Raum als Wärmeenergie auftritt.

Er kann durch die Summe der direkten Transmissionsstrahlung und durch die an den Gläsern absorbierte und weitergeleitete Energie beschrieben werden. [Bednar T. (2003)]

$$g = \tau + \frac{q_{in}}{I} \quad [22]$$

τ ist der Strahlungstransmissionskoeffizient, q_{in} die Wärmestromdichte an der Innenseite des Innenglases und I die gesamte auftreffende Solarstrahlung, also die direkte, diffuse und reflektierte Sonnen- und Umgebungsstrahlung. Der zweite Teil dieser Summe wird auch sekundärer Wärmeabgabegrad genannt.

Der g-Wert kann entweder aus den Eigenschaften der Verglasung berechnet oder direkt kalorimetrisch gemessen werden. [Fraunhofer (2008)]

Aufgrund der Winkelabhängigkeit der Strahlungsabsorption und der Strahlungstransmission ist auch der g-Wert vom Winkel der Sonneneinstrahlung abhängig.

Misst man den g-Wert kalorimetrisch für einen Zeitpunkt oder bildet man einen mittleren g-Wert für einen Zeitabschnitt und kann so auch projektspezifische Randbedingungen mit einfließen lassen, so spricht man von einem „effektiven g-Wert“ (g_{eff}) [Fraunhofer (2008)].

2.7 Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen

Wenn die Sonnenstrahlung durch ein Fenster zu groß wird, kommt es am Arbeitsplatz zu Blendungen, die unbedingt vermieden werden sollen.

Abschattung kann durch Jalousien, innenliegende Vorhänge aber auch durch bauliche Maßnahmen wie Dachvorsprünge, Überstände usw. erreicht werden.

Durch Abschattung der Fenster kommt weniger Licht und somit auch weniger Strahlung in einen Raum, indem sie einen Teil der Strahlung des Lichts widerspiegelt oder vom Fenster abhält. Der Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen (z-Wert) ist der Faktor, der als Produkt mit dem g-Wert der Verglasung den totalen Gesamtenergiedurchlassgrad ergibt.

$$g \cdot z = g_{tot} \quad [23]$$

Der z-Wert ist also ein Maß für die Effektivität der Abschattung.

2.8 Entwicklung kalorimetrischer Messmethoden

Das Forschungsvorhaben REGES behandelt die Entwicklung kalorimetrischer Messmethoden von Gesamtenergiedurchlassgraden. Diesbezüglich wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit drei Prüfstände gebaut und sowohl miteinander als auch mit der Berechnung nach DIN EN 410 (gleichbedeutend der ÖNorm EN 410) verglichen. Diese wurden am

- ift Rosenheim
- Fraunhofer ISE
- ZAE Bayern

errichtet. Zwei dieser Prüfstände sind Messanlagen innerhalb von Gebäuden, die mit technischer Beleuchtung betrieben werden. Der Prüfstand des ZAE Bayern ist auf dem Dach eines Gebäudes montiert und verwendet als einziger die Sonne direkt als Wärme- und Strahlungsquelle.

Bei allen Prüfständen ist, wie in dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens REGES [Sack N. (2001)] berichtet, die stationäre Einstrahlrichtung der Bestrahlung auf 0° von der Flächennormalen vorgesehen, um eine Vergleichbarkeit mit der ÖNorm Berechnung zu erreichen. Beim außenliegenden System des ZAE Bayern wird deshalb der Prüfstand auf einem Heliostaten montiert.

Diese Prüfstände bestehen aus Kästen mit einer Außentemperatur und einer Innentemperatur. Der g-Wert ergibt sich demnach zu:

$$g_{\text{exp}} = \frac{Q_{\text{net}} + U_{\text{exp}} \cdot A \cdot (\theta_{\text{ni}} - \theta_{\text{ne}})}{E \cdot A} \quad [24]$$

Wobei g_{exp} der experimentell ermittelte g-Wert, Q_{net} der Nettoenergiegewinn, der am Kalorimeter gemessen wird, U_{exp} der experimentell ermittelte U-Wert, A die Absorberfläche, E die Bestrahlungsstärke, θ_{ni} die Innentemperatur im Prüfstand und θ_{ne} die Außentemperatur ist. Das System wird ohne Energieeintrag durch Bestrahlung kalibriert, d.h. der experimentelle U-Wert wird ermittelt.

Problematisch bei den innenliegenden Systemen ist die Verwendung von technischen Lichtquellen (hier Halogen- Metalldampflampen), die weder parallele Strahlung noch ein mit dem Sonnenlicht identisches Spektrum haben. Zusätzlich muss der Übergangswiderstand Außen durch eine Winderzeugung emuliert werden.

Beim außenliegenden System dagegen ist der Wind zeitabhängig und so wieder wenig direkt vergleichbar mit der ÖNorm-Berechnung. Außerdem ist das Sonnenlicht eventuell durch Wolken oder Dunst abgeschwächt, wodurch sich wieder andere Spektren ergeben. Zudem ist die Temperatur des Messapparates nicht konstant; der U-Wert des Messapparates und vor allem jener der Verglasung ändern sich. Aus diesen beiden Gründen kann ein wirklich stationärer Zustand nicht erreicht werden.

Die Vorteile dieser Verfahren sind:

- All diese Messverfahren gehen, wie schon angedeutet, von einem stationär gehaltenen Zustand aus, d.h. man wartet solange ab, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Dadurch können höhere Genauigkeiten erreicht werden.
- Der Temperaturunterschied zwischen innen und außen wird durch Klimatisierung sehr klein gehalten. So wird der Term des Temperaturverlustes (Formel 24) klein gehalten und seine Auswirkung ist nicht so hoch. Weiters kann aus der Klimatisierung, wie beim Prüfgerät des ift Rosenheim angewendet, die eingebrachte Leistung bestimmt werden.
- Die Vergleichbarkeit mit der Berechnung laut ÖNorm ist gegeben ($\pm 0,02$).

Die Nachteile dieser Verfahren sind:

- Bei all diesen Experimenten wird der g-Wert nur durch konstant gehaltenen Winkel der Bestrahlung gemessen. Der natürliche Lauf der Sonne bleibt unberücksichtigt.
- Auch die Einbausituation des Fensters wird vernachlässigt.

Diese Versuche an den drei Forschungsanstalten sind gut für die Vergleichbarkeit von Verglasungen untereinander geeignet, aber der beim eingebauten Fenster entstehende, tatsächliche Wärmeeintrag, kann mit ihnen nicht direkt ermittelt werden.

3 Versuchsaufbau und –ablauf

3.1 Grundsätzliches

Als Versuchsraum wurde ein rund 5,35m langes, 2,50m breites und 3,48m hohes Zimmer verwendet. Auf einer Breitseite befindet sich das Fenster, auf der anderen die Zugangstür. Die Fensterorientierung weicht etwas von Osten in Richtung Süden ab.



Abbildung 2, 3 und 4: Versuchs-Fenster, Versuchsraum

- Der Versuchsraum ist weiß gestrichen.
- Die Fensterarchitekturlichte beträgt 1,32 x 1,96m
- Die Parapethöhe beträgt 1,03m
- Die Verglasungsfläche ist 1,085 x 1,725m

Im Raum wurde ein Kalorimeter an die Glasscheibe gestellt, dessen Erwärmung ein Maß für den g-Wert ist.

Für Temperatur, Strahlung und Licht wurde eine Reihe von Sensoren platziert.

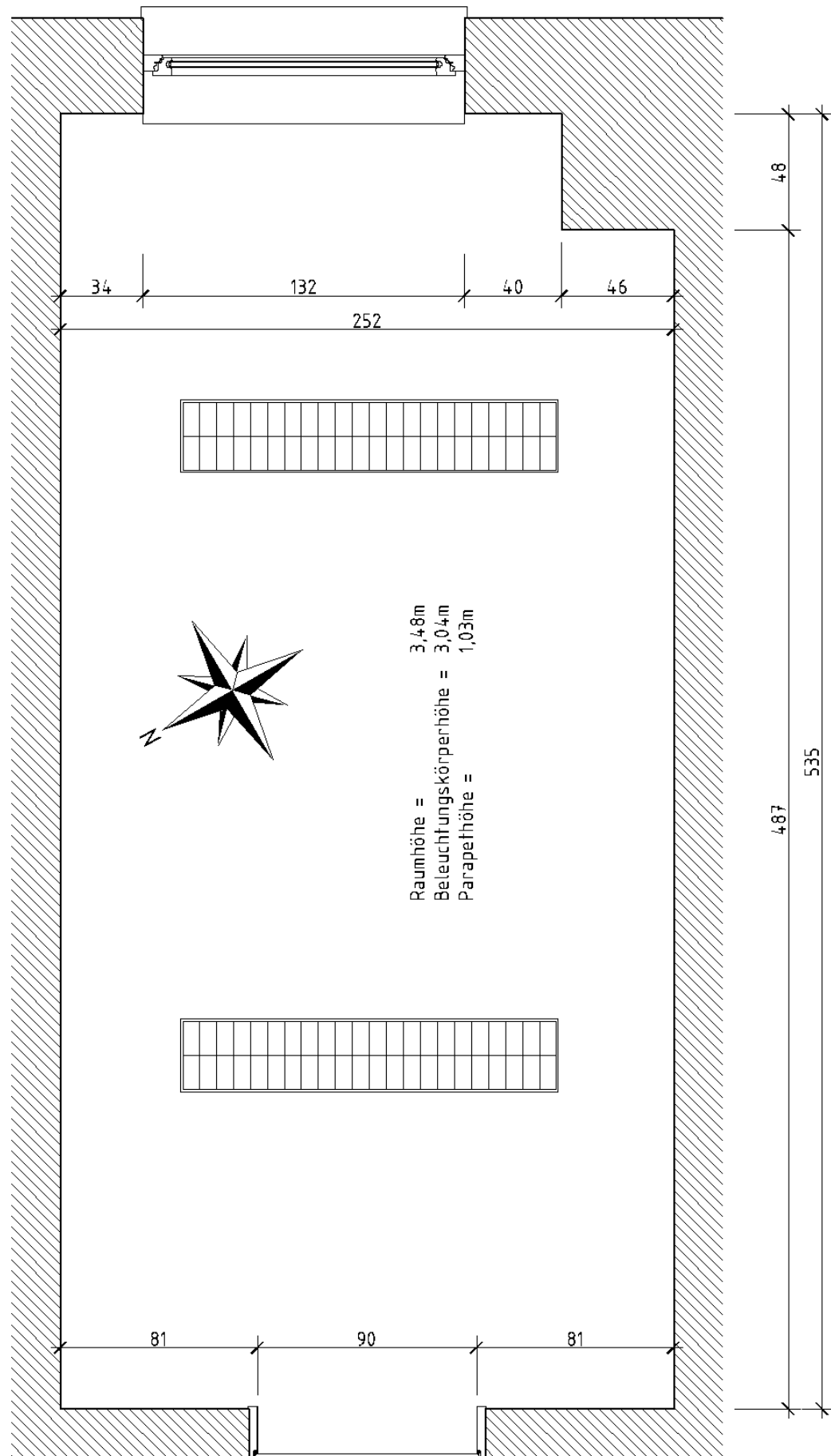


Abbildung 5: Skizze des Versuchsraums

3.2 Sensoren

3.2.1 Strahlungsmessung

Die Bestrahlungsstärkemessung wird von Pyranometern durchgeführt. Sie sind folgendermaßen platziert:

- Horizontal außen an der Attika-Verblechung (Q3)
- Vertikal außen an der Attika (Q2)
- Vertikal innen an der Fensterscheibe (Q1)

Die äußeren Pyranometer wurden für die globale Himmelsstrahlung sowie für die Bestrahlungsstärke auf die senkrechte Fassadenfläche/Fensterfläche verwendet. Das innere Pyranometer ist für die auf eine senkrechte Fläche auftreffende Strahlung, die durch das Fenster durchtritt, bestimmt.

3.2.2 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung dient dazu, den Wärmestrom von und zur Box aufgrund von Temperaturunterschieden zu bestimmen. Im Kalorimeter wird durch zwei Steckfühler mit Thermoelementen (TC2, TC3) die Temperatur gemessen. Mit anderen Temperatursensoren werden die Außentemperatur (TC4) und die Innentemperatur (TC5, TC6) ermittelt.

3.2.3 Lichtmessung

Die Lichtmessung wird mit fünf Beleuchtungsstärke-Messgeräten durchgeführt, die jeweils in Schreibtischhöhe in verschiedenen Abständen zum Fenster aufgelegt sind. Die Abstände zum Fenster betragen:

- 5,01m (Lux1)
- 4,37m (Lux2)
- 2,86m (Lux3)
- 2,20m (Lux4)
- 1,34m (Lux5)

3.3 Glaseigenschaften

Da keine Informationen über die verwendete Verglasung des Fensters aufzufinden waren, wurden diese von den Versuchsergebnissen und anderen Hilfsmitteln abgeleitet.

Ein Problem besteht darin, dass sich die Wärmeleiteigenschaft bei Temperaturveränderungen ändert. Dies konnte im Versuchsaufbau nicht verhindert werden, könnte jedoch auch laufend bei bekannten Glaseigenschaften mitberechnet werden, sodass eine noch genauere Analyse möglich wäre.

3.3.1 Beschichtung

Eine wesentliche Eigenschaft einer Isolierverglasung in Bezug zu dessen U-Wert und g-Wert ist die vorhandene oder nicht vorhandene Metallbedampfung der beiden Gläser. Eine leicht anzuwendende Methode dazu ist der Feuerzeugtest [Schmidt Reuter (2007)]. Vor dem Glas wird eine Flamme entzündet, die sich an den Grenzschichten spiegelt. Anhand der Farbe der gespiegelten Flammen kann man eine Beschichtung gut erkennen, da die Metallschicht andere Frequenzen reflektiert.



Abbildung 6-7: Feuerzeugtest von der Innenseite und Außenseite der Verglasung

In den Abbildungen 6 und 7 kann man aufgrund der Farbänderung der Flamme erkennen, dass das innere Glas, auf der Außenseite beschichtet ist.

Der Strahlungstransmissionskoeffizient τ ist der Quotient aus der Bestrahlungsstärke auf dem Fenster und der Bestrahlungsstärke hinter dem Fenster und kann bei steilen Winkeln der Sonne gegenüber der Verglasung direkt bestimmt werden. (siehe Diagramm 1)

3.3.2 Glasaufbau

Die Glas- und Glaszwischenraumstärken wurden mithilfe einer Messlehre, die über die Spiegelungen an den Glasgrenzen Schatten auf die Messtabelle wirft, bestimmt. Nach diesen Messwerten besteht die Verglasung aus 2x 4mm Glas und 1x 16mm Gasschicht.

Aus dem Strahlungstransmissionskoeffizienten der (vorhandenen) Beschichtung, der Glas- und Gasstärke und dem ungefähr ermittelten relativ hohen g-Wert wurde mithilfe der Software „WINDOW 5“ (Fa. LBNL) ein Aufbau zusammengestellt, der der Verglasung relativ gut entsprechen könnte.

	Hersteller	Produkt / Gas	Schichtstärke
Außenglas	PPG Industries	Clear Glas	4mm
Zwischenraum		90% Argon; 10% Luft	16mm
Innenglas	PPG Industries	Sungate 500 on Clear	4mm

Tabelle 3: Gewählter Verglasungsaufbau

Aufgrund von allfälliger Verschmutzung der Scheiben und etwas anderen Berechnungswerten wurden diese noch weiter angepasst.

Folgende Eigenschaften wurden für das Glas angenommen:

- Wärmedurchlasskoeffizient $\Lambda = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Strahlungstransmissionskoeffizient $\tau = 0,58$
- Absorptionsgrad Innenscheibe $\text{AbsI} = 0,13$
- Absorptionsgrad Außenscheibe $\text{AbsA} = 0,15$

3.4 Kalorimeter

Im Raum ist am Fenster eine wassergefüllte Box aus Plexiglas montiert, die gegen den Innenraum mit 5cm XPS ummantelt ist. Auf der Fensterseite ist anstelle des Plexiglasses eine mattschwarz lackierte Blechplatte angebracht. Diese Blechplatte hat einen Abstand von zirka 6mm zur Glasscheibe. Dieser Abstand sichert einen ähnlichen Wärmeleitwiderstand zur Blechplatte wie die Wärmeübergangszahl Innen. Um ein Durchströmen des Zwischenraumes Fensterglas – Blechplatte mit Luft zu verhindern, ist rundum ein wärmedämmendes Dichtband angebracht.

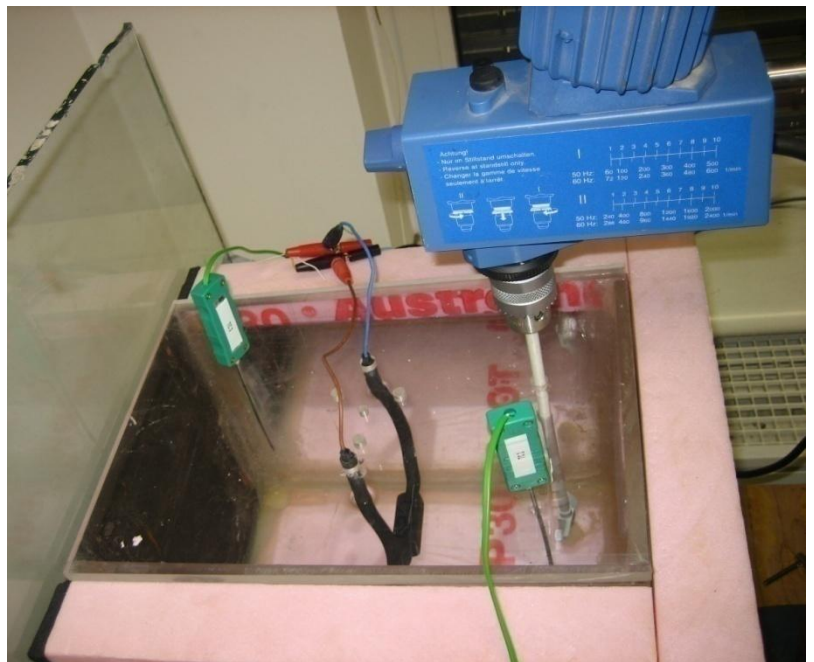


Abbildung 8-9: Kalorimeter am Fenster und Einsicht in den oben geöffneten Kalorimeter

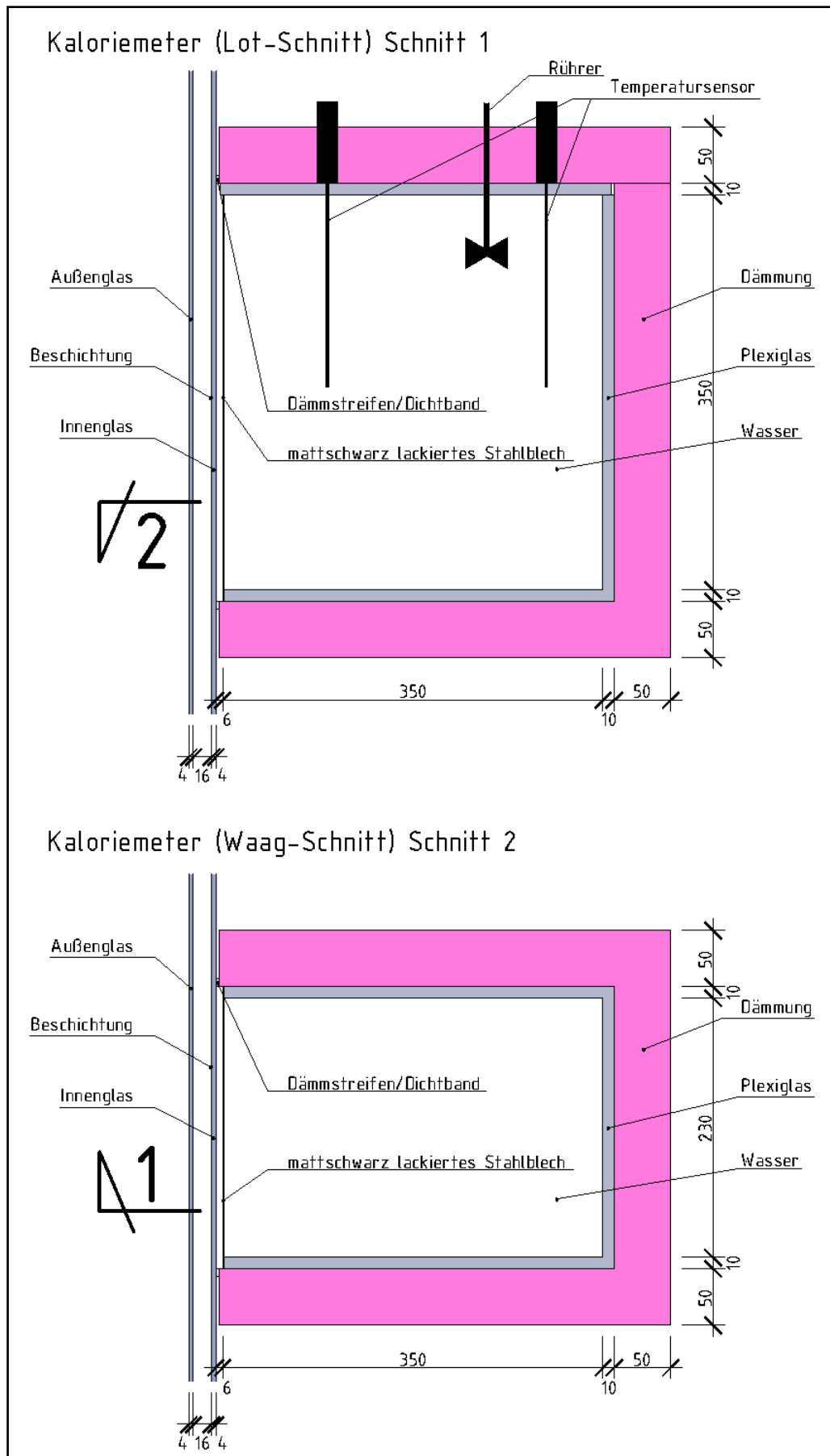


Abbildung 10: Geometrie Kalorimeter

Abbildung 10 zeigt die Geometrie des Kalorimeters. Die Längenangaben des Lot- und Waagschnittes sind in Millimeter angegeben.

Für das mattschwarz lackierte Stahlblech, das die Strahlung aufnehmen soll, wird vereinfacht der Absorptionsgrad eines schwarzen Strahlers von $\alpha = 1,00$ angenommen.

Da es bei nicht eben zusammengesetzten Stoffaufbauten, mit innenliegender Wärmequelle, in der Kante aufgrund von kleinerer wärmeaufnehmender Fläche zu größerer wärmeabgebender Fläche zu einem Kühlrippeneffekt kommt, wird der Wärmeverlust der gesamten Konstruktion in Bezug zu dessen Fläche erhöht. Dieser Effekt wird geometrische Wärmebrücke genannt. Um den Wärmeverlust dennoch für einen gleich bleibenden Stoffaufbau und somit gleichen U-Wert zu beschreiben, wird für die Berechnung statt der geometrischen Fläche eine äquivalente Fläche verwendet.

Für stoffliche Wärmebrücken, die aufgrund verschiedener Stoffeigenschaften verschiedene Leitwerte besitzen, zum Beispiel die Stechfühler der Maßsensoren und Löcher in der Kalorimeterwand, ist ein eigener nahezu kapazitätsloser, gut wärmeleitender Stoffaufbau vorgesehen.

3.4.1 Heizwiderstand

Um die Wärme-Eigenschaften des Kalorimeters zu bestimmen, wurde ein Heizwiderstand in das Wasser des Kalorimeters gehängt, um über die Temperaturveränderung des Wassers die Wärmeleitfähigkeit des Kalorimeter-Wandaufbaus zu bestimmen. Dieser Heizwiderstand ist auch teilweise während des Versuchs aktiv, um während der Nacht die Wärmekapazität des Wassers und die Wärmeleiteigenschaften des Kalorimeters bestimmen zu können, da seine Leistung durch das Messen der Spannung und Stromstärke bekannt ist. Für die Berechnung des g-Wertes aber wird die Leistung aus der Berechnung des Energieeintrages automatisch herausgenommen.

3.4.2 Rührgerät

Durch das eingebaute Rührgerät werden eventuelle Temperaturschichtungen verhindert, außerdem wird dadurch ein eventueller Wärmeübergangswiderstand zwischen Wasser und Blechplatte minimiert, da das Wasser durch die Rührbewegung ständig an der Blechplatte vorbeiströmt. Der angenommene Energieeintrag durch das Rührgerät beträgt 1,45W.

3.5 Leistungsmessung Kalorimeter

Der Kalorimeter ist das zentrale Versuchsinstrument für diesen Versuch. Die Temperaturveränderung des Wassers im Kalorimeter bestimmt gemeinsam mit der Außentemperatur und der Raumtemperatur über die Wärmeleiteigenschaften der Kalorimeterwände die Leistung, die in die Box eingebracht wird. Diese Leistung ergibt mit der Sonnenstrahlung auf das Fenster den effektiven g-Wert der Verglasung.

3.6 Berechnung Gesamtenergiedurchlassgrad

3.6.1 Eingangswerte

Die gemessenen Werte sind:

- Sonnenstrahlung; Ost Innen Q1
- Sonnenstrahlung; Ost Außen Q2
- Sonnenstrahlung; Global Außen Gesamt Q3
- Temperatur Wasser; Mittelwert aus TC 2 und TC 3
- Temperatur Innen; Mittelwert aus TC5 und TC6
- Temperatur Außen; TC4 (zu Vergleichszwecken)
- Heizenergie

Um alle erforderlichen Werte für die Berechnung des effektiven g-Wertes zu erhalten, wurden die Wetterdaten der nahegelegenen und zur Institutsabteilung gehörenden Wetterstation herangezogen. Diese Daten beinhalten:

- Die Globalstrahlung
- Die Diffuse Sonnenstrahlung
- Die Außenlufttemperatur

Mithilfe der Globalstrahlung und der Diffusen Sonnenstrahlung kann durch Subtraktion die direkte Sonnenstrahlung berechnet werden; die Außenlufttemperatur wird für den Wärmeverlust der Kalorimeterwand gegen die Außenluft benötigt.

3.6.2 Aufbau Kalorimeter

Der berechnete Wandaufbau des Kalorimeters besteht aus dem Aufbau Richtung Außenluft und zwei sich unterscheidenden Aufbauten Richtung Innenraum.

Der Wandaufbau in Richtung Außenluft besteht aus:

- 1mm Stahlplatte
- 6mm Luftschicht
- 4mm Glasscheibe
- 12mm Argon-Gasfüllung
- 4mm Glasscheibe

Die Schichten werden in Teilschichten aufgeteilt, deren Wärmeeigenschaften folgend aufgelistet sind:

Baustoff	Dicke d [m]	Wärmekapazität c J/(kg.K)	Dichte ρ kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m.K)
Stahlblech	0.0005	444	7850	80.200
Stahlblech	0.0005	444	7850	80.200
Luftschicht	0.002	1000	1.2	0.060
Luftschicht	0.002	1000	1.2	0.060
Luftschicht	0.002	1000	1.2	0.060
Glasscheibe	0.004	840	2500	1.000
Gasschicht	0.004	1000	1.2	0.029
Gasschicht	0.004	1000	1.2	0.029
Gasschicht	0.004	1000	1.2	0.029
Glasscheibe	0.003	840	2500	1.000
Glasscheibe	0.001	840	2500	1.000

Tabelle 4: Wandaufbau Richtung Außenluft

Die Wärmeleitzahl der Gasschicht wurde über den U-Wert der Verglasung angenähert, um die Eigenschaft der Metallbeschichtung in einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand umzurechnen.

Ein Wandaufbau des Kalorimeters in Richtung Innenraum besteht aus:

- 1cm Plexiglas (Acrylglas)
- 5cm Dämmung (XPS)

Die Schichten werden wieder aufgeteilt und deren Wärmeeigenschaften einzeln aufgezeigt:

Baustoff	Dicke d [m]	Wärmekapazität c J/(kg.K)	Dichte ρ kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m.K)
Acrylglas	0.005	1170	1200	0.190
Acrylglas	0.005	1170	1200	0.190
XPS	0.010	1404	35	0.035
XPS	0.010	1404	35	0.035
XPS	0.010	1404	35	0.035
XPS	0.010	1404	35	0.035
XPS	0.010	1404	35	0.035

Tabelle 5: Wandaufbau Richtung Innenraum

Da die Kalorimeterwand Richtung Innenraum aufgrund eingeführter Messfühler und des Rührgerätes durchlöchert ist, wird ein dritter Materialaufbau, der die masselose Wand – die stofflichen Wärmebrücken – besser beschreiben soll, angenommen. Die gewählten Eigenschaften dieses Stoffaufbaus bestehen aus zwei Luftschichten:

Baustoff	Dicke d [m]	Wärmekapazität c J/(kg.K)	Dichte ρ kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m.K)
Luftschicht	0.05	1000	1.2	1.000
Luftschicht	0.05	1000	1.2	1.000

Tabelle 6: Wandaufbau stoffliche Wärmebrücke Richtung Innenraum

3.6.3 Berechnung Energieeintrag

Um den Gesamtenergieeintrag durch das Fenster zu bemessen, wird eine Simulation mit „SIMULINK“ verwendet, einem Zusatzprogramm der Software „MATLAB“.

Abbildung 11 zeigt das Hauptfenster für die Berechnung des Energieeintrages.

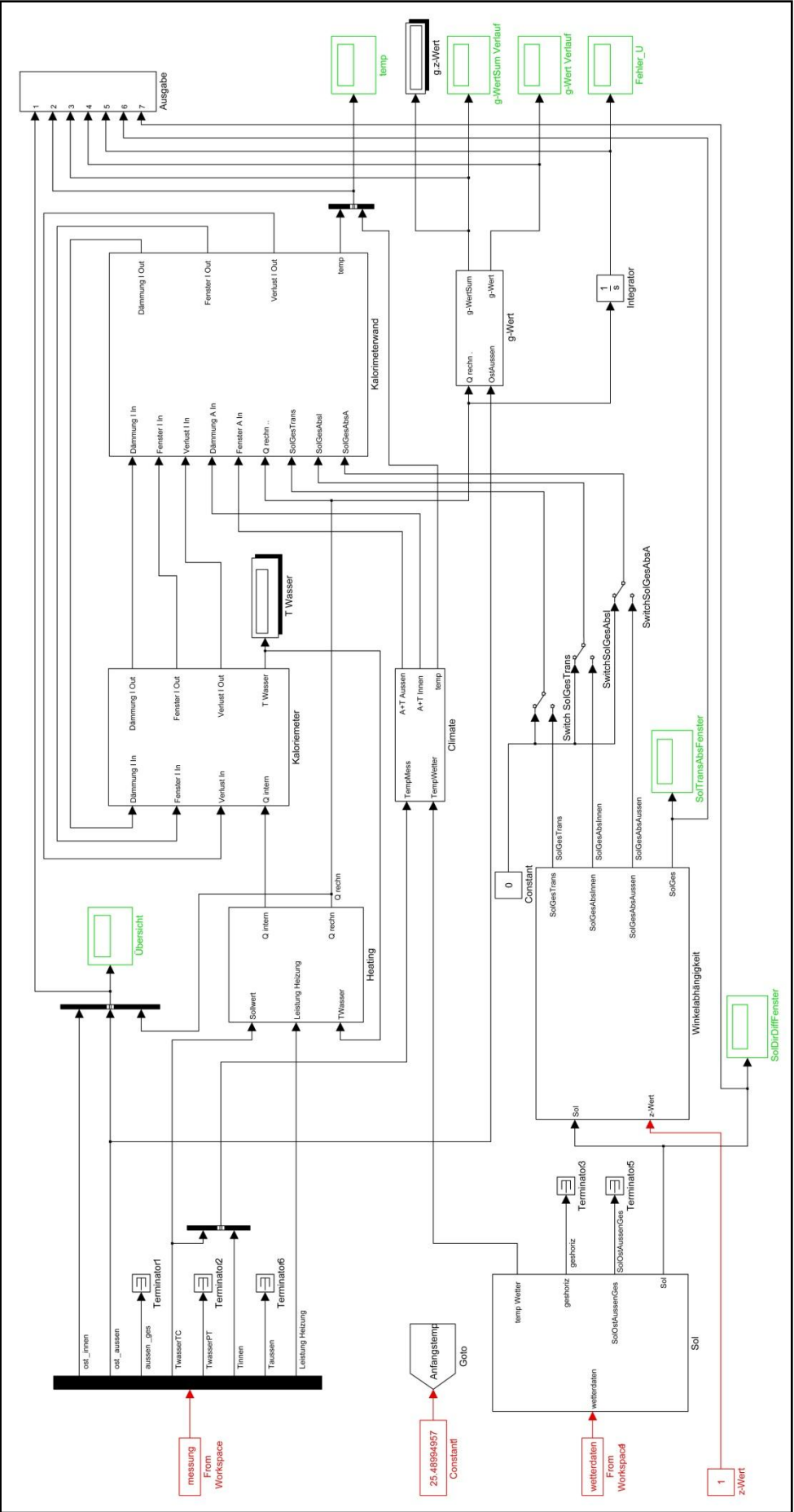


Abbildung 11: Hauptfenster für die Berechnung des Energieeintrages

Die Abbildung 12 zeigt das Simulink-Berechnungsfenster „Kalorimeter“, in dem durch die Energieeinträge der Kalorimeterwände und der inneren Energiequellen die theoretische Wassertemperatur ermittelt wird.

In der oberen Mitte der Abbildung 12 werden das Volumen des Wassers und die Wassereigenschaften angegeben. Zudem ist hier eine Luftschicht von einem Zentimeter Stärke angeführt, da man das Kalorimeter-Becken nicht vollständig mit Wasser füllen kann.

In diesem Berechnungsfenster werden auch die äquivalenten Flächen den einzelnen verschiedenen Außenschichten zugeteilt.

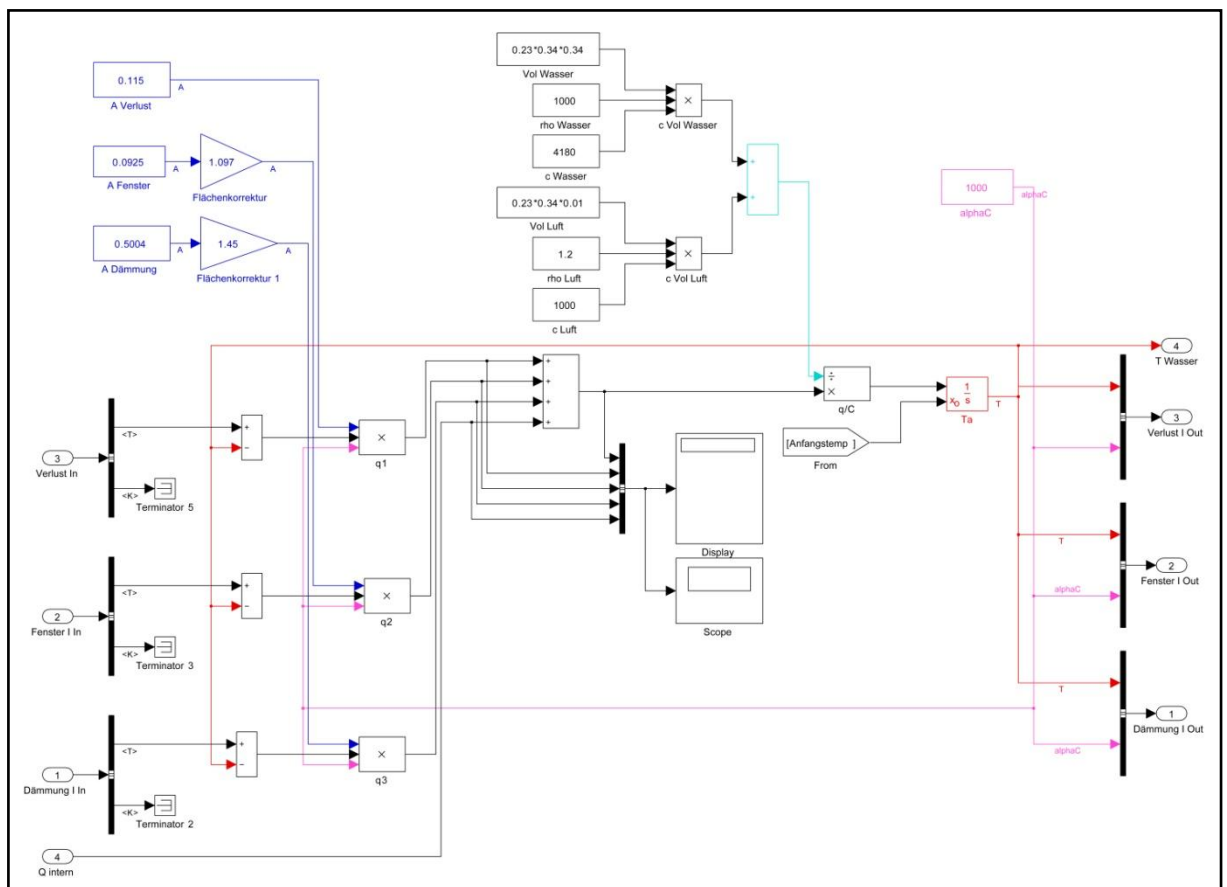


Abbildung 12: Berechnung der Kalorimeter-Wassertemperatur

In Abbildung 13 wird eine Differenz von der gemessenen Temperaturveränderung des Kalorimeterwassers und der rechnerischen Kalorimetertemperatur gebildet, die in der Berechnungsbox Abbildung 12 berechnet wird. Diese wird vervielfacht, und bildet so den Energieeintrag der Sonnenstrahlung in das Kalorimeter.

Der interne Energieeintrag kommt vom elektrischen Widerstand, der zeitweise als Heizung dient, sowie dem Rührgerät.

Der Energieeintrag durch den elektrischen Widerstand und das Rührgerät wird dem Wasser direkt zugeführt, während der Energieeintrag der Sonne der äußeren Blechschicht (siehe Abbildung 15) zugeführt wird.

Durch diese Rechenannahme werden sowohl die Verluste durch die Kalorimeterwände, als auch eventuelle Energieeinträge, wie der sekundäre Wärmeeintrag des Isolierglasaufbaus, berücksichtigt.

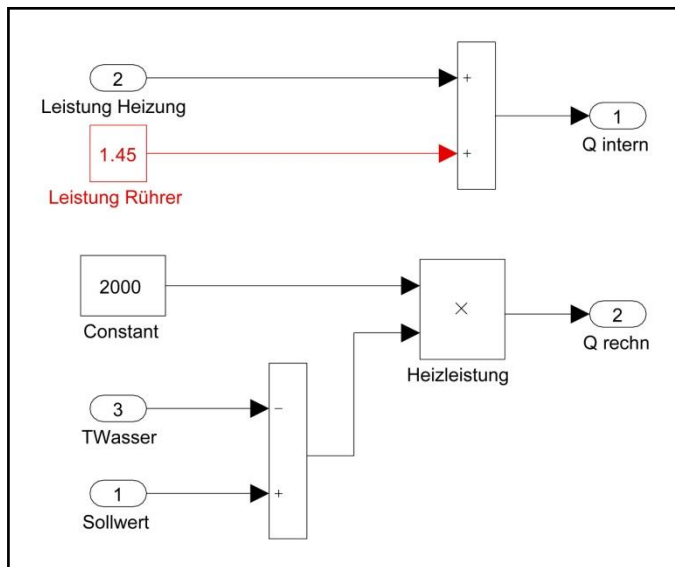


Abbildung 13: Berechnung des Energieeintrages in den Kalorimeter und das Kalorimeter-Blech

Die Temperatur der Kalorimeterwand-Schichten wird in der Rechenbox Kalorimeterwände selbst berechnet. Dafür wird die Wassertemperatur, die Außentemperatur (siehe Abbildung 14) mit den Übergangswiderständen, aber auch der berechnete Energieeintrag an diese geleitet.

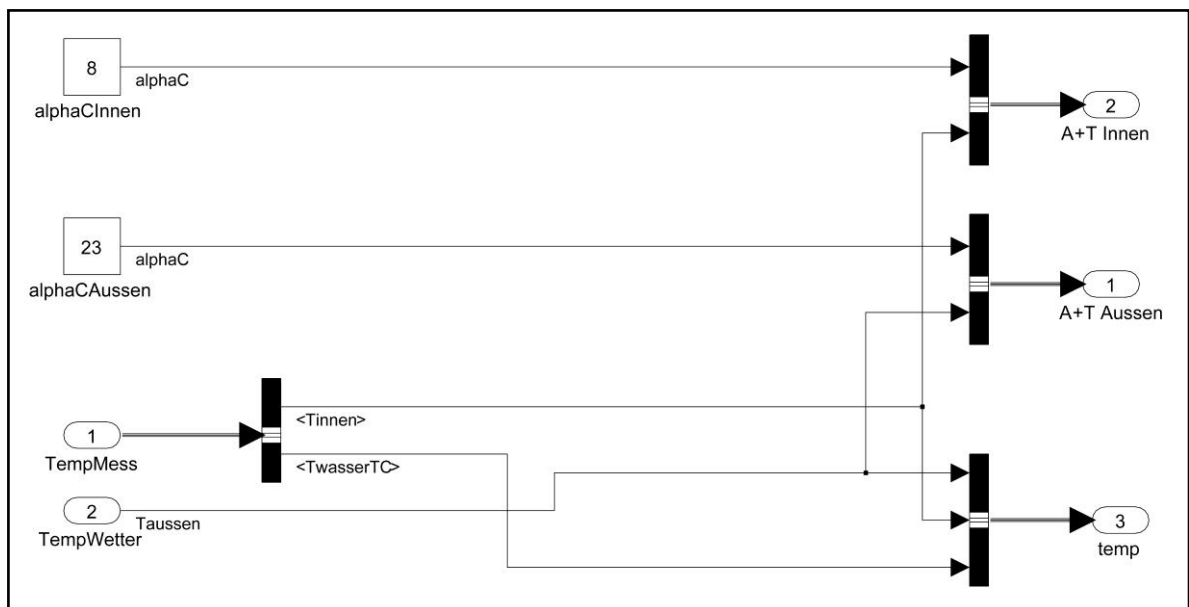


Abbildung 14: Festlegung der äußeren Bedingungen des Kalorimeters

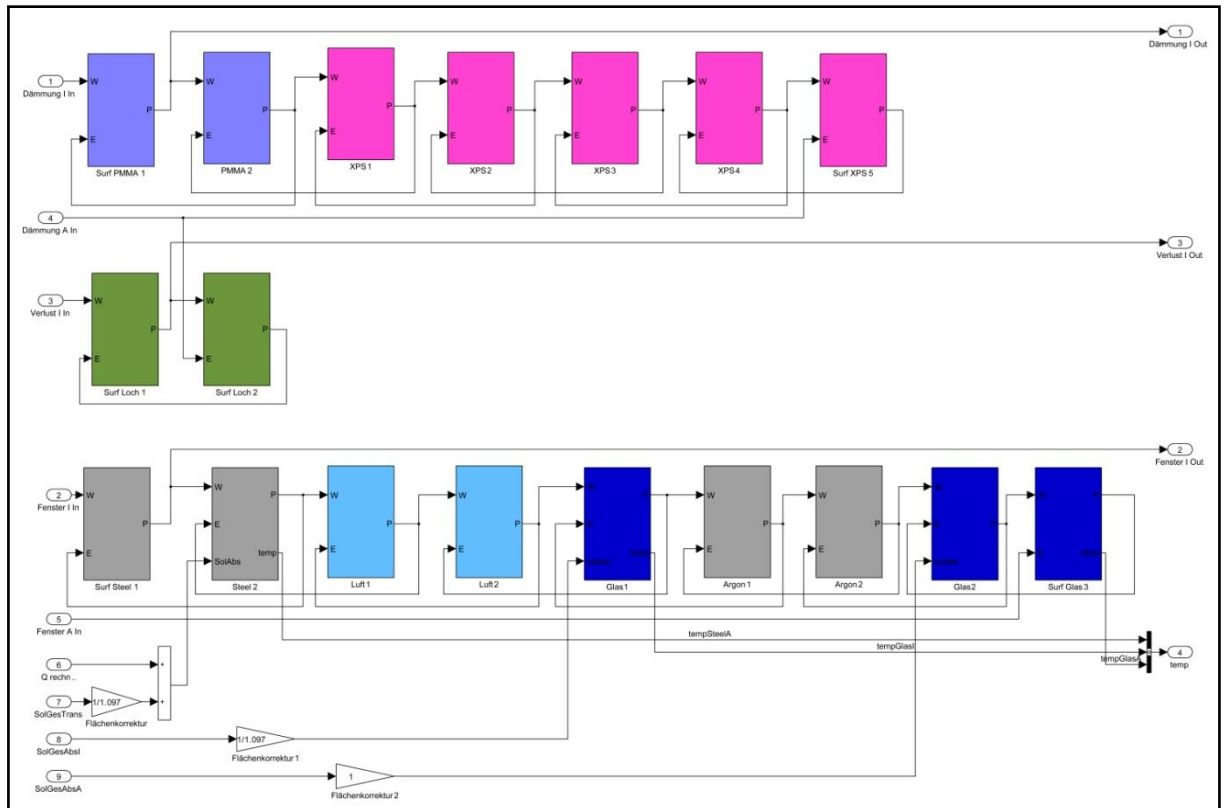


Abbildung 15: Berechnung der Kalorimeterwand-Temperaturen

Da die Wärmeleiteigenschaften des Kalorimeters aufgrund der Wärmebrücken sehr schwierig zu ermitteln sind, werden die Flächen solange korrigiert, bis die theoretische Temperatur mit der gemessenen Temperatur nachts übereinstimmt. Da es zu dieser Zeit keinen unbekannten Energieeintrag gibt, darf auch kein rechnerischer Sonnen-Energieeintrag entstehen. So können die äquivalenten Flächen ermittelt werden.

Die jeweilige Temperatur einer Schicht wird in den farblich gekennzeichneten Boxen nach Abbildung 16 oder 17 berechnet.

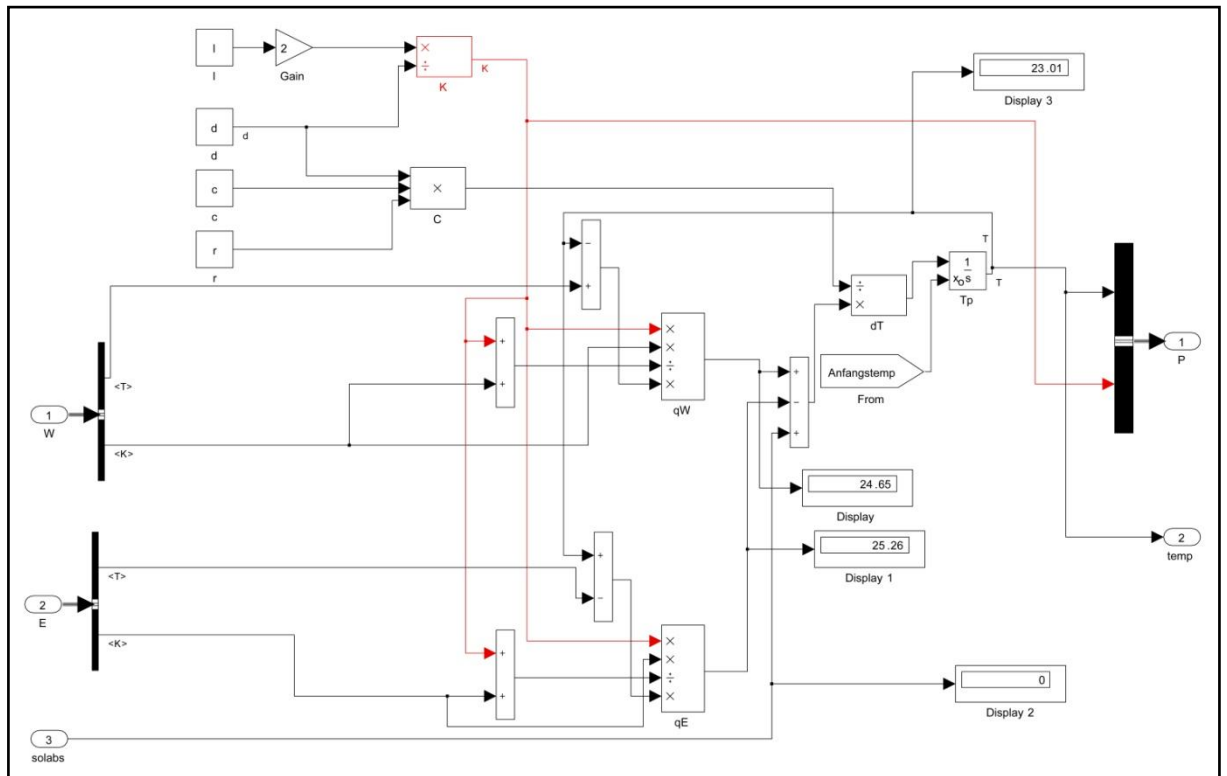


Abbildung 16: Berechnung der Temperatur einer Schicht in der Kalorimeterwand

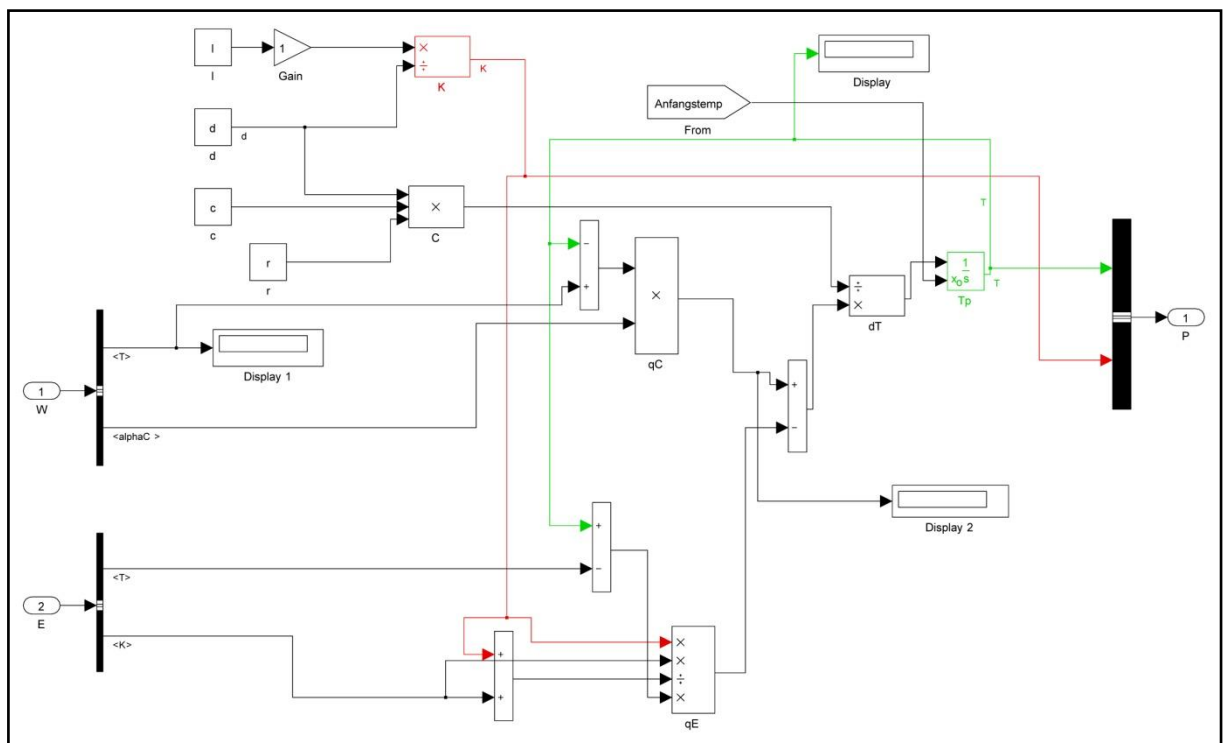


Abbildung 17: Berechnung der Temperatur einer Grenzschicht der Kalorimeterwand

Der Energieeintrag aus der Differenzbildung der theoretischen mit der gemessenen Wassertemperatur wird durch die Bestrahlungsstärke an der Gebäudeaußenseite dividiert und somit wird für ein in Abbildung 18 eingegebenes Zeitfenster laufend ein effektiver g-Wert gebildet. Dieser Wert ist, aufgrund des der Temperaturveränderung nachhinkend berechneten Sonnen-Energieeintrages, teilweise ungenau.

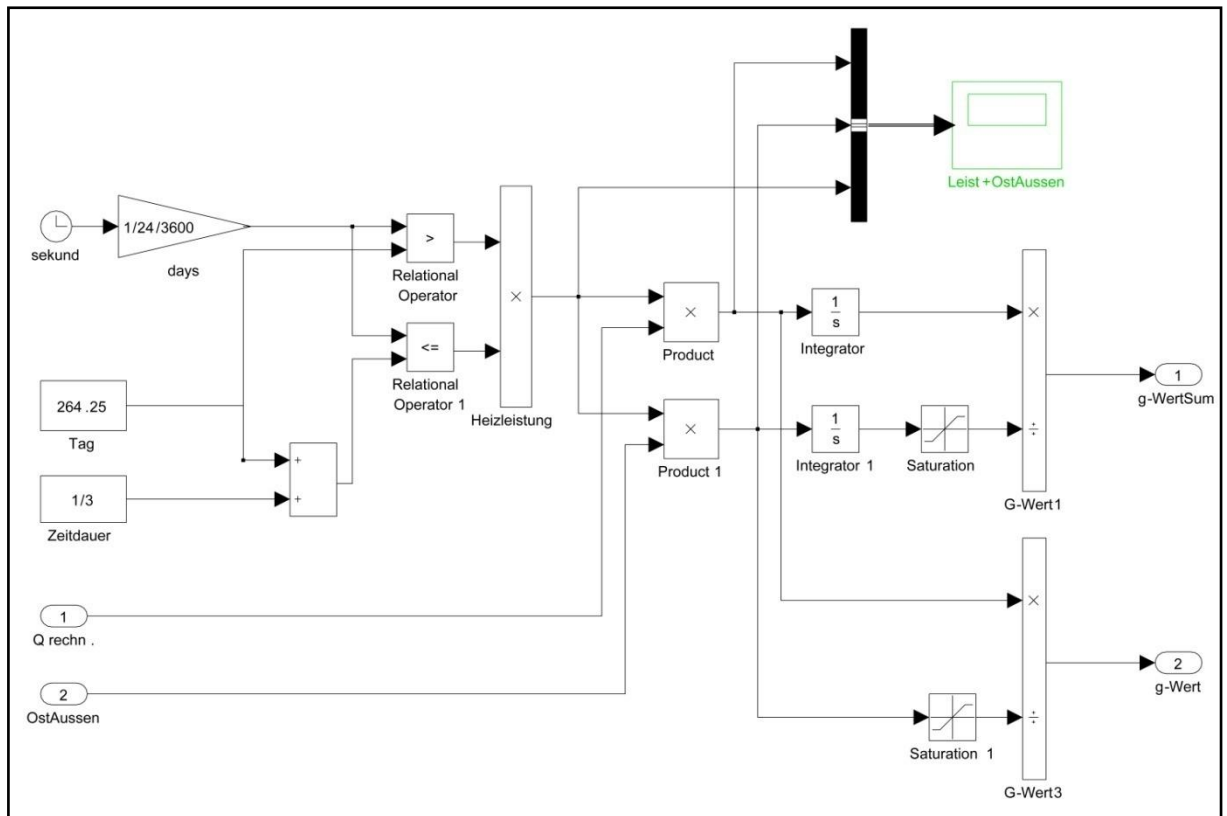


Abbildung 18: Festlegung des Beobachtungszeitraumes für die Berechnung des g-Werts

Um das Ergebnis zu verbessern, werden der Energieeintrag und die Bestrahlungsstärke auf der Außenseite des Fensters integriert, und anschließend wird der Quotient berechnet.

Dadurch wird ein „effektiver g-Wert“ der berechneten Zeitperiode gebildet. Wird der Sonnenschutz aktiviert, entsteht der „effektive totale g-Wert“ dieser Zeitperiode.

3.7 Simulation mit den Eingangswerten

Damit das oben genannte System nachvollzogen werden kann, wird das ganze System auch theoretisch nachgebaut und kann mit einer Simulation berechnet werden.

Die Sonnenstrahlung auf das Fenster wird berechnet und die Energie den jeweiligen Schichten zugeführt.

Der berechnete Wärmeeintrag durch die Sonne nach Berechnung 3.6.3 ist dann eine Abweichung zu jedem Zeitpunkt, der durch Ungenauigkeiten oder falschen Annahmen entsteht.

3.7.1 Sonnenstand

Aufgrund der in den Grundlagen angeführten Formeln wird, dargestellt in der Berechnungsbox Abbildung 19, zu jedem Zeitpunkt der Simulation am Versuchsstandort ein Sonnenstand ermittelt.

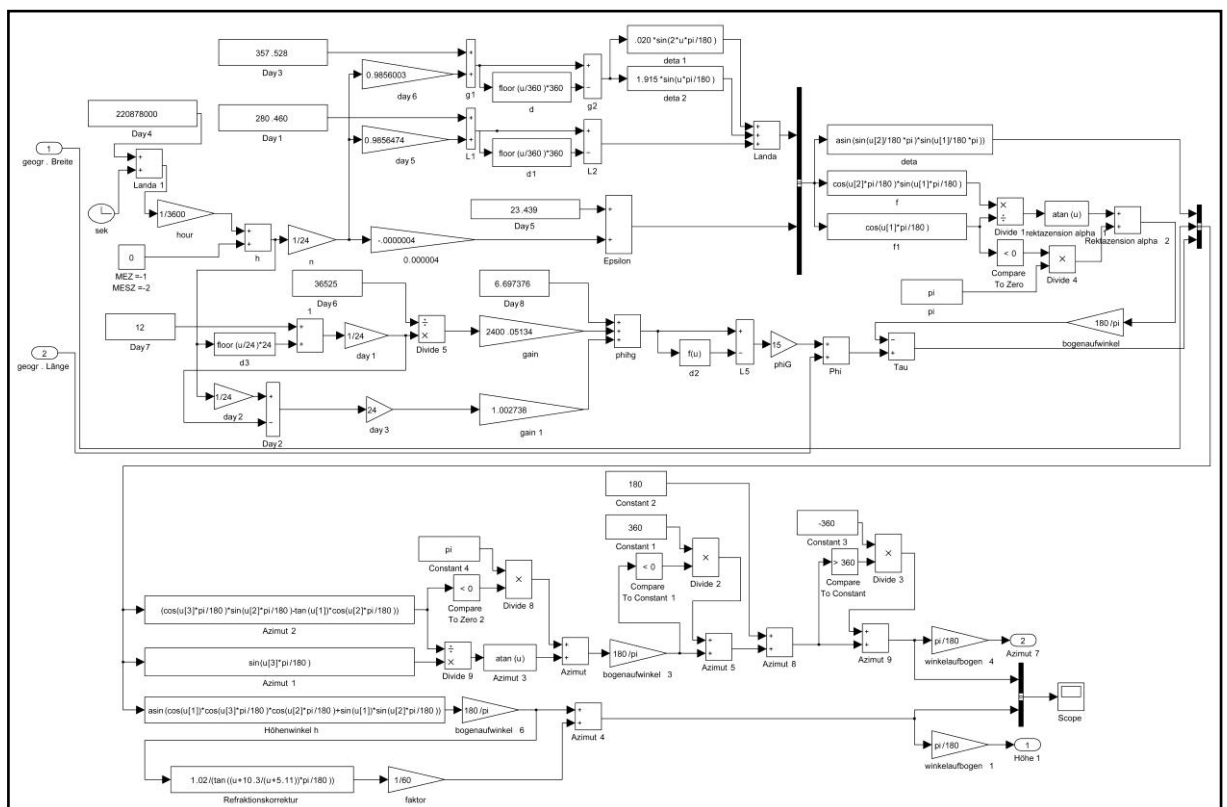


Abbildung 19: Berechnung des Sonnenstandes abhängig vom Zeitpunkt

Der Standpunkt des Gebäudes ist:

Geographische Breite:

48°11'20''

Geographische Länge:

16°23'46''

Der Winkel zwischen der Normale auf die Fassade des Gebäudes und der Nordrichtung beträgt:

Winkel von der Nordrichtung:

$$\alpha_F = 121^\circ$$

Das Fenster liegt also zwischen den Himmelsrichtungen der Bezeichnung Ostsüdost OSO und Südost SO.

Mithilfe der aus der Wetterstation erhaltenen Werte, der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung wird die direkte Strahlung ermittelt. Die direkte und die diffuse Strahlung wirken auf die Fensterfläche ein.

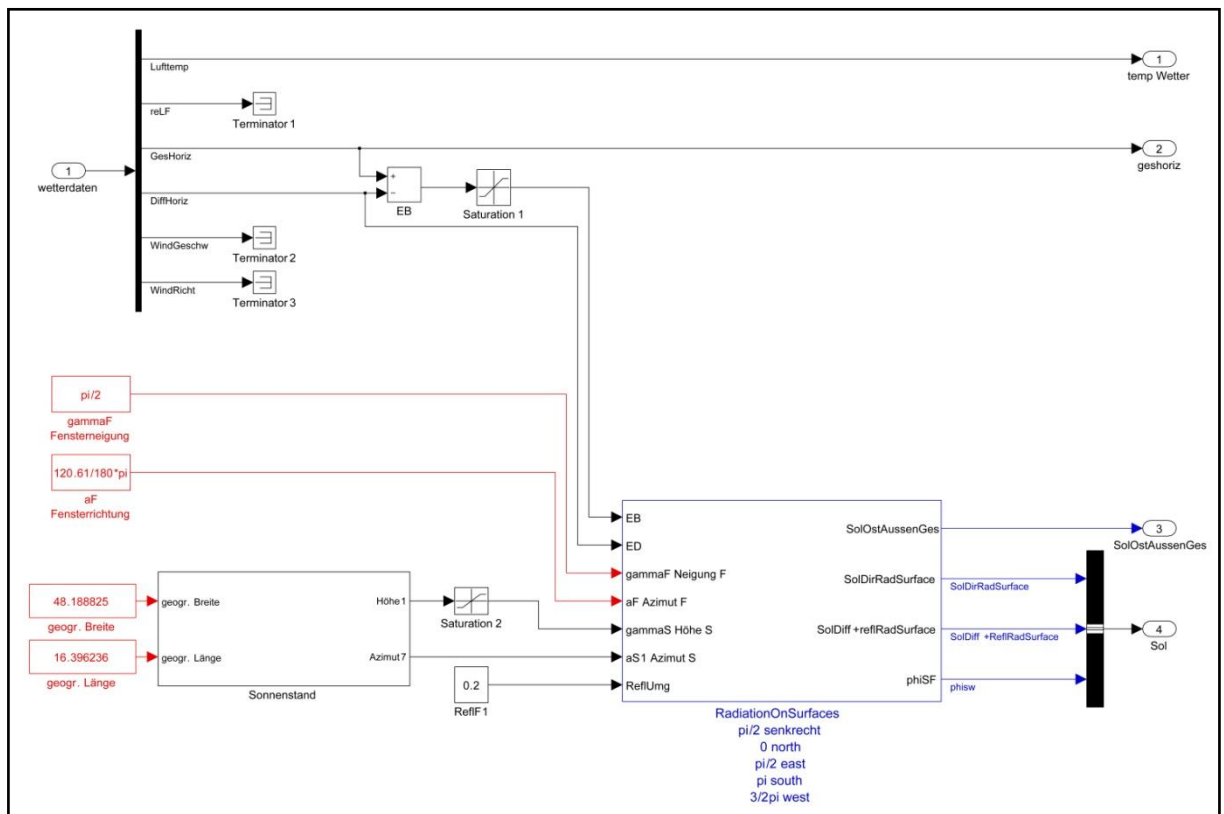


Abbildung 20: Bestimmung der Bestrahlungsstärke auf das Versuchs-Fenster

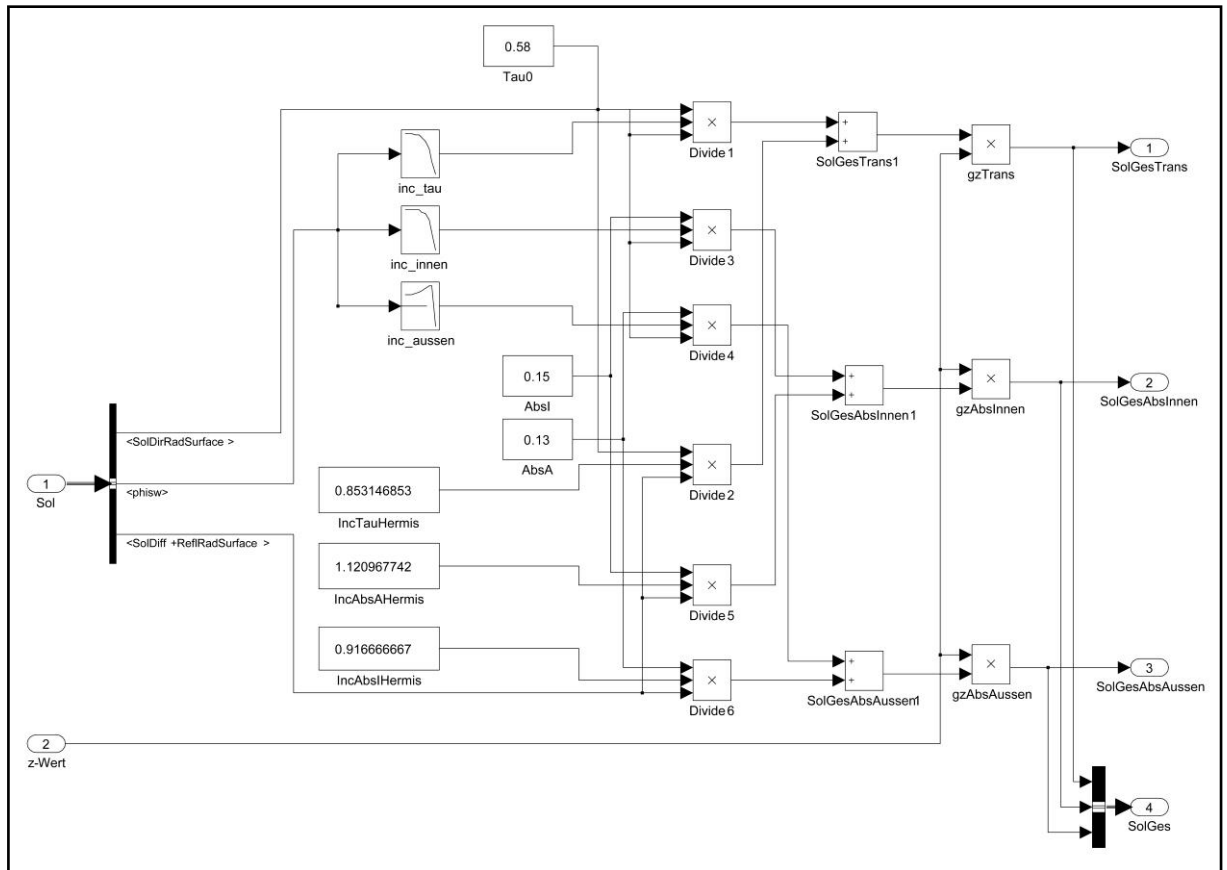


Abbildung 21: Umrechnung der Sonnenstrahlung durch den Glasaufbau des Versuchsfensters

Diese Strahlung wird, wie in Abbildung 21 dargestellt, aufgeteilt in die Transmissionsstrahlung τ und in die Absorptionsstrahlung der Außenscheibe AbsA sowie die Absorptionsstrahlung der Innenscheibe AbsI. Dann wird diese mit den zugehörigen Faktoren zu deren Winkel zur Flächennormalen γ_{SF} , multipliziert und die Strahlung an den zugehörigen Stoff weitergeleitet: die Transmissionsstrahlung an die erste Stahlschicht von außen und die Absorptionsstrahlungen an die Außen- beziehungsweise die Innenscheibe.

3.8 Berechnung des Abminderungsfaktor der Abschattungsvorrichtung

Um den z-Wert der Abschattungsvorrichtung zu erhalten, wird der totale effektive Gesamtenergiedurchlassgrad, der in der selben Zeitspanne ermittelt wird (von 6:00 – 12:00), in der Form $g_{\text{eff, Jalousiestellung}}$ aus der Simulation (vgl. 3.6.3) ermittelt und durch den schon bekannten Gesamtenergiedurchlassgrad g_{eff} dividiert. Dadurch erhält man die Effektivität der Abschattung.

Da durch die Jalousien ein anderer Wärmeübergangskoeffizient nach außen entsteht, wird diese Konstante in der Berechnung auf einen realistischeren Wert geändert. Auch die äquivalente Fläche der Wärmebrücke (siehe Punkt 3.6.2) wird den Bedingungen angepasst, bis der berechnete Wärmeeintrag in der Nacht verschwindet. Der angepasste Wärmeübergangskoeffizient hat wenig mit dem praktisch vorhandenen Wärmeübergangskoeffizienten zu tun, da der Wärmeübergangskoeffizient bei der g-Wert Ermittlung nicht gemessen wird.

Es werden z-Werte von zwei verschiedenen Stellungen der Jalousien ermittelt.

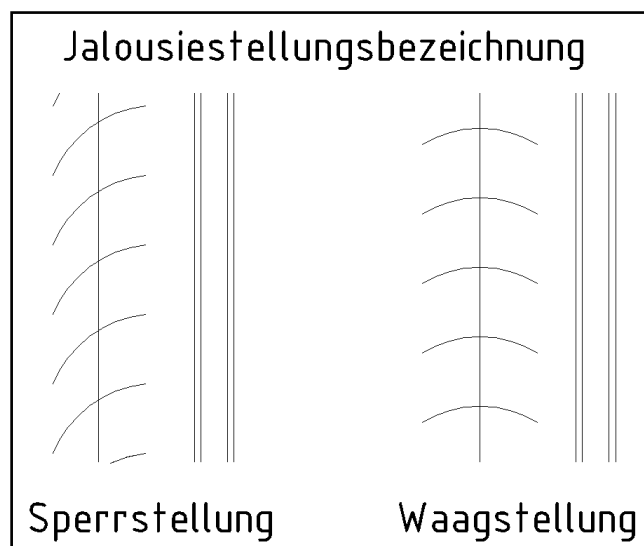


Abbildung 22: Jalousie-Stellungen

- Die erste Stellung wird in dieser Arbeit als Sperrstellung bezeichnet. (Jalousie ist soweit als möglich geöffnet, ohne dass Strahlung beziehungsweise Licht direkt in den Raum gelangen kann. Das heißt, die Unterkante jeder oberen Lamelle überschneidet im Waagschnitt geringfügig die Oberkante der unteren Lamelle.)
- Die zweite Stellung wird in dieser Arbeit als Waagstellung bezeichnet. (Die Lamellen stehen weitgehend waagrecht.)

3.9 Lichtmessung

Für die Lichtmessung wurden Luxmeter auf die waagrechte Tischoberfläche gelegt. Während der Messung für den Energieeintrag durch das Fenster lieferten die fünf Luxmeter immer die aktuellen Lichtdaten an deren jeweiliger Position.

3.9.1 Natürliche Lichtquelle

Die Sonne dient als natürliche Lichtquelle. Durch das Fenster wird ein Teil der Strahlung absorbiert und reflektiert. In den Raum gelangt deshalb ein unterschiedliches Spektrum elektromagnetischer Strahlung. Die fünf Luxmeter auf den Tischen messen immer bei geschlossenem Fenster, und es wird vereinfacht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke Außen [W/m^2] und der Beleuchtungsstärke Innen [lx] hergestellt.

Die eventuell vorhandene Verschattungs-Maßnahme, die Jalousie, verändert weitgehend den Frequenzgang der Strahlung nicht, sodass die erhaltenen Abminderungsfaktoren der Abschattungsvorrichtung des Energieeintrages auch für die Schwächung des Lichtes angenommen werden.

Die Größe der Glasfläche beträgt 1,085m in der Breite und 1,725m in der Höhe. Der Energieeintrag der natürlichen Lichtquelle ist also die Bestrahlungsstärke abgemindert durch den totalen g-Wert der Verglasung und der Abschattungsvorrichtung, multipliziert mit der Glasfläche von 1,87m².

3.9.2 Technische Lichtquelle

Die technische Beleuchtung besteht aus 2x2 Leuchtstofflampen (Phillips TLD 58W/33) mit verspiegeltem Hintergrund, wie in Abbildung 23 dargestellt ist.



Abbildung 23: Technische Lichtquelle im Versuchsraum

Diese Beleuchtung erzeugt an den Tischoberflächen (zirka 75cm Höhe) eine Beleuchtungsstärke von rund 500lx, was der Mindestforderung für Büroarbeitsstätten entspricht.

Die Nennleistung der Leuchtstofflampen beträgt $4 \times 58\text{W} = 232\text{W}$.

4 Messergebnisse und Diskussion

4.1 Messergebnisse Gesamtenergiedurchlassgrad

4.1.1 Allgemeines

Die Messungen für den Gesamtenergiedurchlassgrad wurden in der Zeit von 31.08.07, 14:00 bis 02.09.07, 12:15 durchgeführt. Der erste halbe Tag wird für die Kalibration der Simulation verwendet. Diese Daten sind daher nicht verwendbar und werden in Folge vernachlässigt.

Der erste Versuchstag (01.09.07) war bewölkt. Am nächsten Vormittag herrschte klares Wetter, und erst nachmittags wurde der Himmel immer mehr bedeckt und schließlich der Versuch abgebrochen.

4.1.2 Rechnerische Ermittlung des Temperaturanstiegs im Kalorimeter

4.1.2.1 Vergleich der Bestrahlungsstärken Außen

Diagramm 2 zeigt den Vergleich der gemessenen Gesamtstrahlung auf das Fenster und die aus der Globalstrahlung und der diffusen Globalstrahlung mit dem Sonnenwinkel berechneten direkten und diffusen, beziehungsweise der berechneten Gesamtstrahlung auf das Fenster. Am Vormittag des 1. September gibt es einen kleinen Unterschied zwischen der berechneten und der gemessenen Gesamtstrahlung auf das Fenster, der am Vormittag des zweiten Tages deutlich größer ist. Allerdings ist die Differenz genau gegenläufig, aber zirka 9:00h vormittags stimmen beide wieder sehr gut überein. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich an der sehr schwierigen Umrechnung der diffusen Strahlung, da es sehr viele beeinflussende Faktoren gibt.

Im Wesentlichen aber stimmen die gemessene und berechnete Gesamtstrahlung gut überein.

Bestrahlungsstärke in W/m^2

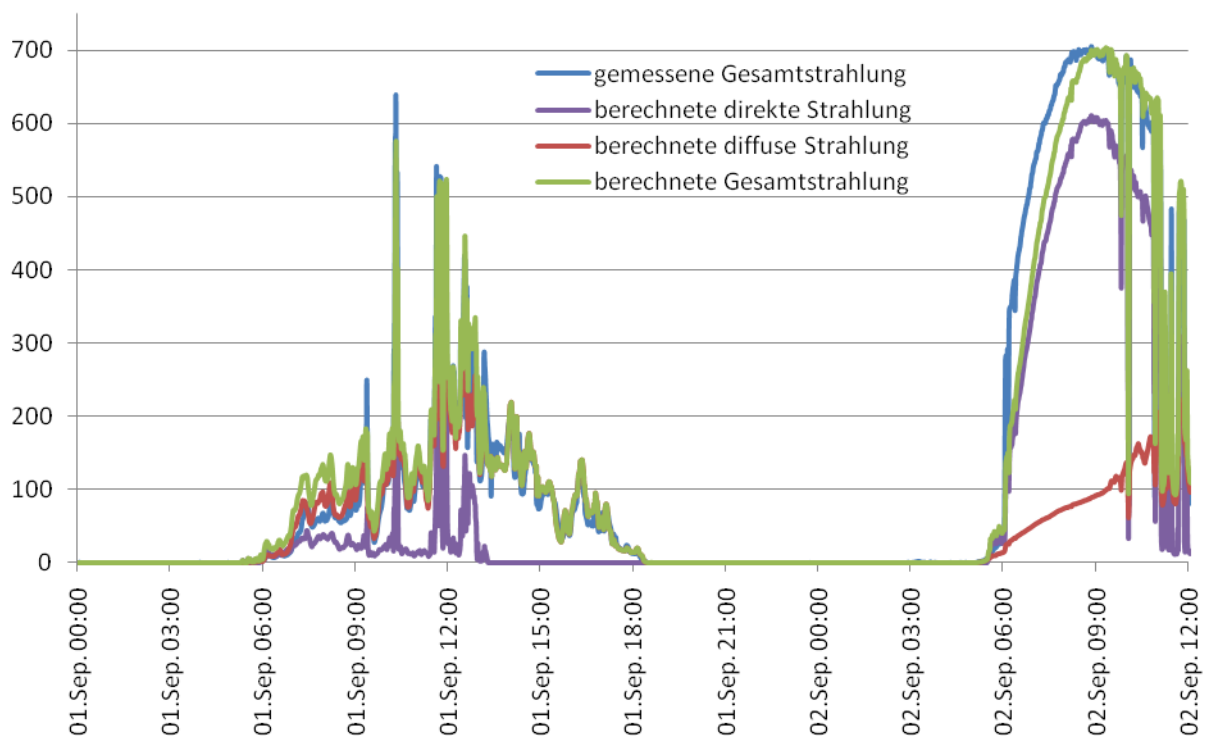


Diagramm 2: Vergleich der berechneten und der gemessenen Sonnenbestrahlungsstärke auf das Fenster

4.1.2.2 Vergleich der Bestrahlungsstärken Fenster

Im folgenden Diagramm 3 werden sowohl die berechnete wie auch die gemessene Bestrahlungsstärke, die durch den Verglasungsaufbau hindurchgeht, sowie die absorbierte Bestrahlungsstärke beider Gläser dargestellt.

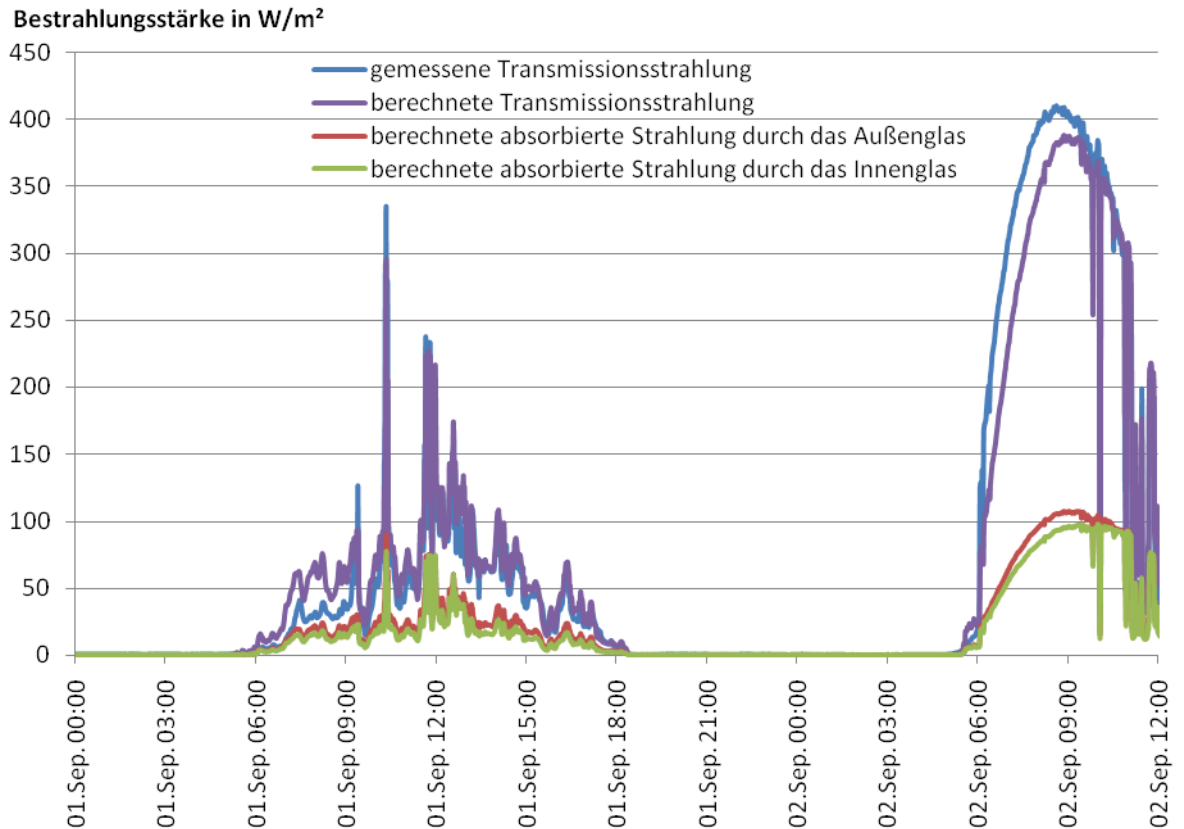


Diagramm 3: Darstellung der berechneten Transmissions- und Absorptionsstrahlung im Vergleich zur gemessenen Transmissionsstrahlung

Die berechnete und die gemessene Transmissionsstrahlung haben, nachdem die gemessene durch einen vom Einstrahlungswinkel abhängigen Faktor multipliziert worden ist, eine ähnliche Differenz wie die Bestrahlungsstärke vor dem Fenster. Dieser Zusammenhang ist also ziemlich gut ablesbar.

4.1.2.3 Kalibrierung des Systems

Für die äquivalenten Flächen werden folgende Werte angenommen:

- Fläche zum Raum: 0,726m²
- Fläche gegen Außenluft: 0,101m²
- Fläche der Wärmebrücke zum Raum: 0,049m²

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden nach ÖNorm EN 410 angesetzt.

Diagramm 4 zeigt die über die Zeit integrierte Abweichung des berechneten vom gemessenen Wärmeeintrag.

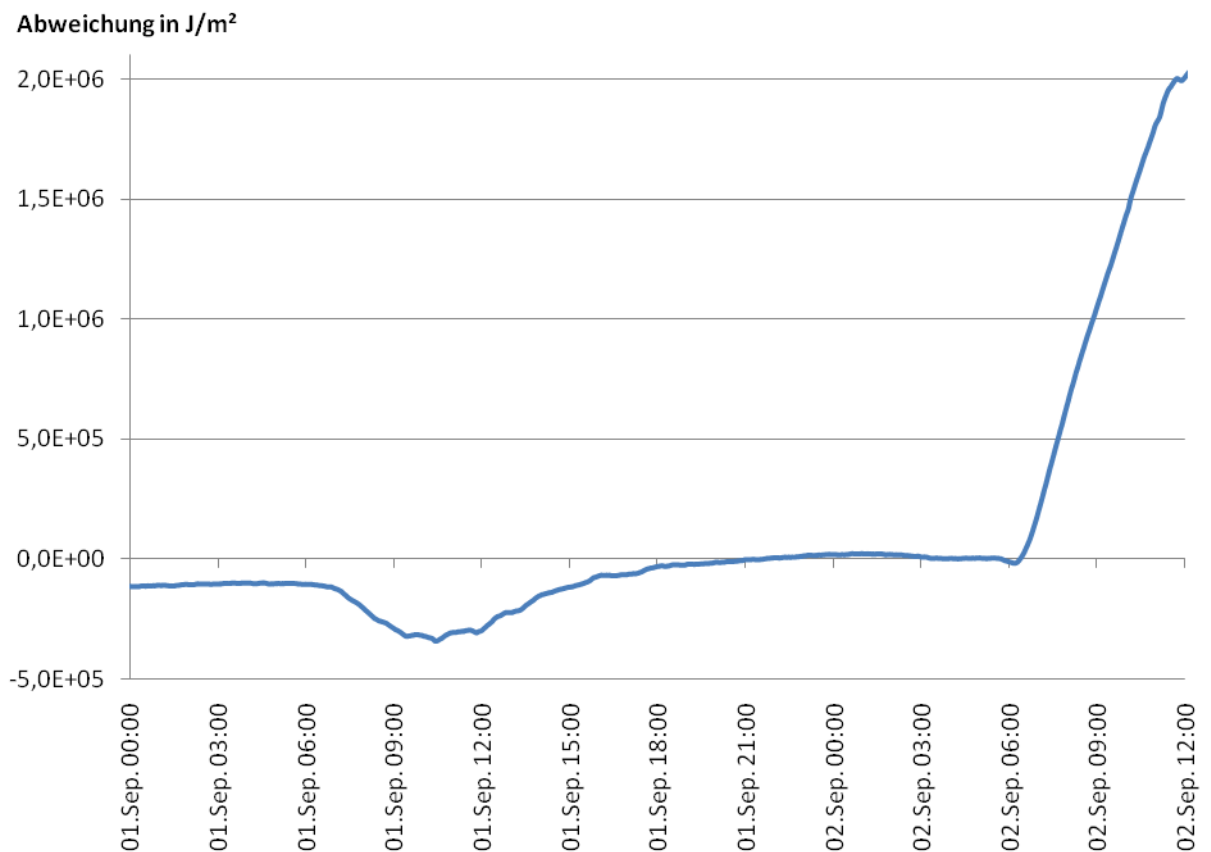


Diagramm 4: Abweichung des berechneten über die Zeit integrierten Energieeintrags

Da in der Nacht die Abweichung nahezu konstant ist, sind die Wärmedurchgangseigenschaften und die äquivalenten Flächen der Aufbauten in der Berechnung recht gut an die realen Verhältnisse angepasst.

Man kann gut erkennen, dass am ersten Versuchstag bis zirka 10:30 zu viel Energie berechnet wird, während in der zweiten Hälfte dieses Tages und vor allem am zweiten Versuchstag viel zu wenig Energie berechnet wird.

4.1.2.4 Temperaturen

Das nachfolgende Diagramm 5 zeigt gemessene (Wasser, Raum, Außen) wie auch daraus in der Simulation berechnete (Stahlplatte, Innenglas, Außenglas) Temperaturen.

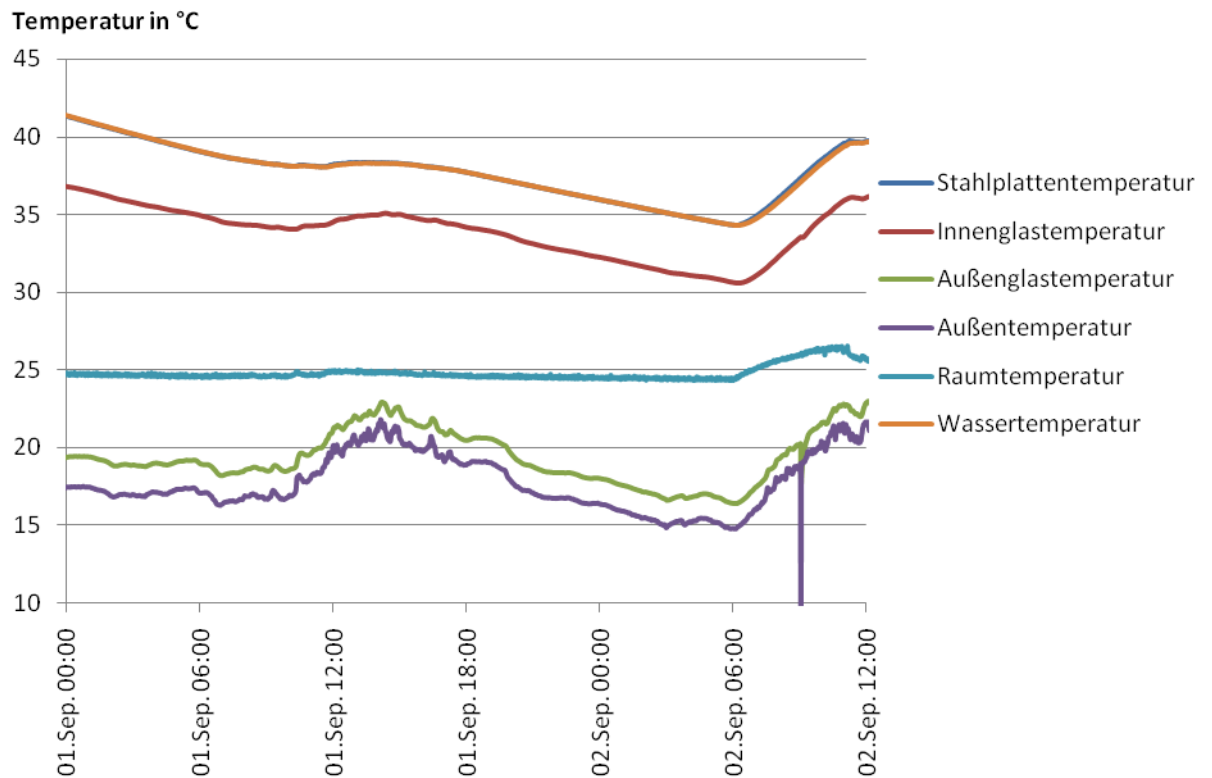


Diagramm 5: berechnete und gemessene, entstehende Temperaturen an den verschiedenen Stellen

Es stellt sich aufgrund dieser Temperaturkurven die Frage, ob die Außenglastemperatur eigentlich nicht höher sein müsste. Da aber der Übergangswiderstand nach außen relativ niedrig, als Konstante nach ÖNorm EN 410 angesetzt wird, ergibt sich dieser Verlauf. Tatsächlich hängt der Übergangswiderstand nach außen von der Windgeschwindigkeit, aber auch von der Windrichtung, der Einbautiefe und folglich auch von den Abmessungen von Fenstern ab.

4.1.2.5 Bestimmung der Abweichung der berechneten von der gemessenen Leistung

Diagramm 6 zeigt die Menge der Abweichung in W/m^2 , die aufzubringen ist, damit die Temperatur im Kalorimeter auf jenem Wert bleibt, der zu jener Zeit gemessen wurde.

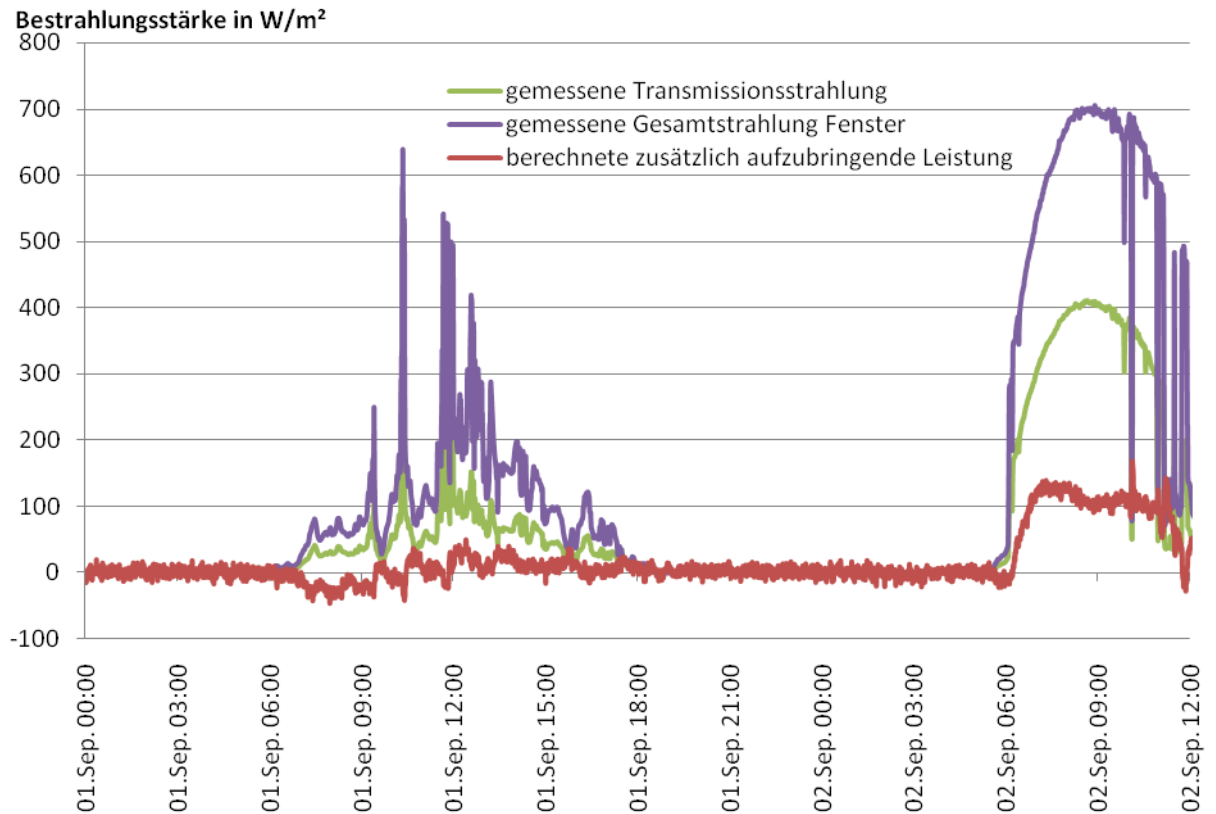


Diagramm 6: Gesamtstrahlung, Transmissionsstrahlung, zusätzlich aufgebrachte Energie für Wassertemperaturerhalt

Während der erste Messungstag noch ziemlich mit der Abweichung, die durch die Umrechnung der Sonnenstrahlung entstand, zu erklären ist, weicht der zweite Tag wesentlich (um ca. 100W/m^2) von der zu erwarteten Ergebnismenge ab. Für diese Auffälligkeit konnte leider keine Erklärung gefunden werden.

Dieses Diagramm zeigt auch das wesentliche Merkmal, das in der Nacht aufgrund der fehlenden Einstrahlung entsteht. Da in dieser Zeit keine Bestrahlung stattfindet, fließt nur Wärme durch den Wandaufbau ab. Die zusätzlich aufgebrachte Leistung läuft, wie man hier gut erkennen kann, immer entlang der Nulllinie.

4.1.2.6 Diskussion

Diese Art der Berechnung stellte sich als relativ ungenau dar. Der entstandene Fehler beträgt 100W/m^2 von maximal 700W/m^2 Gesamtstrahlung auf das Fenster. Mögliche Gründe dafür könnten sein:

- *Fehler in der Berechnungsmethode:* Die Berechnung der Wärmestrahlung der einzelnen Schichten wird vernachlässigt, die Beschichtung des Isolierglasaufbaus wird vereinfacht einer gewissen Erhöhung des Wärmeleitwiderstandes des gasgefüllten Hohlraumes des Isolierglasaufbaus zugewiesen. Da aber in der Beschichtung höhere Temperaturen wahrscheinlich sind, könnte das zu einer zusätzlichen Erwärmung des Kalorimeterwassers führen.
- *Ungenauigkeiten in der Umrechnung der Bestrahlungsstärke:* Während die Umrechnung der Direktstrahlung von der Globalstrahlung auf die flächengerichtete Strahlung mathematisch leicht zu lösen ist, bereitet die Umrechnung der Diffusstrahlung Schwierigkeiten, da Faktoren wie Himmelstrübung miteinbezogen werden sollten. Darauf wurde in diesem Fall allerdings verzichtet.
- *Durch die Laibung, Umgebung,... entstandene unberücksichtigte Reflexionsstrahlung:* Der Reflexionsgrad der Umgebung wurde zwar angepasst, aber durch nicht berücksichtigte Spiegelflächen für manche Zeiten eventuell zu niedrig gewählt. Dieses Phänomen wurde untersucht ohne fehlerhafte Ergebnisse feststellen zu können.
- *Der Übergangskoeffizient nach außen ist zu hoch:* Nach diversen Untersuchungen könnte dies nur eine von mehreren möglichen Fehlerquellen sein, aber vielleicht doch eine nicht Unwesentliche.
- *Die Pyranometer liefern bei niedrigen Winkeln falsche Ergebnisse:* Den darüber gefundenen Daten nach, ist dies nur sehr untergeordnet bis nicht der Fall.
- *Ungenauigkeiten bei der Berechnung des U-Wertes des Isolierglasaufbaus:* Der U-Wert ändert sich mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, hier aber wird er als Konstante angenommen.

4.1.3 Messung des g-Wertes

Um den tatsächlichen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrad zu erhalten, wird die berechnete Sonneneinstrahlung auf und durch die Verglasung aus der Berechnung herausgenommen, sodass die Abweichung nach Diagramm 6 die tatsächlich durch die Sonne eingebrachte Wärmemenge liefert. Man kann erkennen, dass sich diese recht gut zwischen der Transmissionsstrahlung und der gemessenen Gesamtstrahlung auf das Fenster befindet, auch wenn sie durch die Berechnungsart etwas verzögert dargestellt wird.

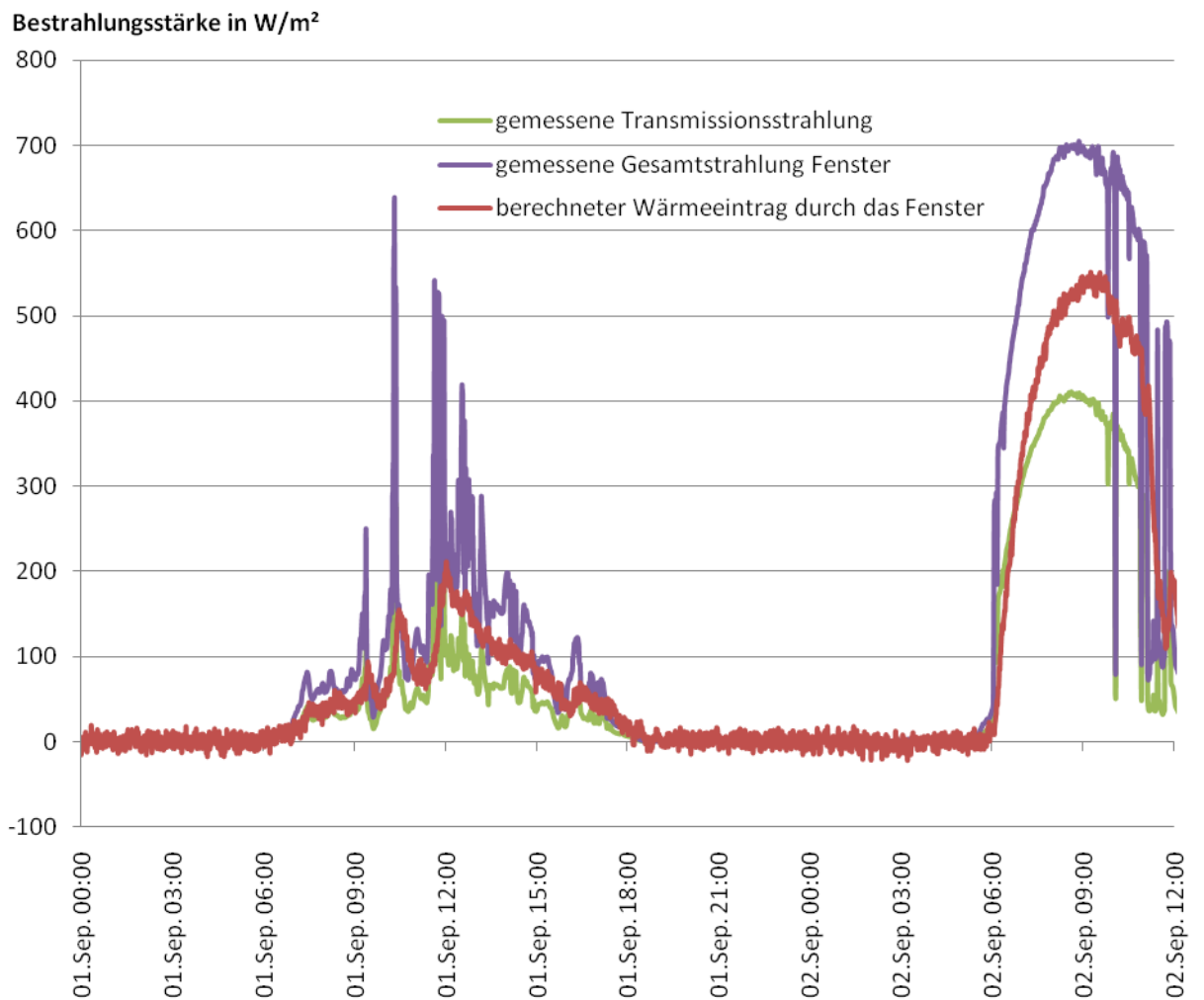


Diagramm 7: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung

Aus diesem Diagramm 8 ist dann der g-Wert zu jeder dargestellten Tageszeit zu finden und es ist auch erkennbar, wann dieser nicht gültig sein kann. So ist er in der Zeit von 6:00 bis zirka 7:00 nicht gültig, da die aufzubringende Bestrahlungsstärke unter der Transmissionsstrahlungsstärke liegt.

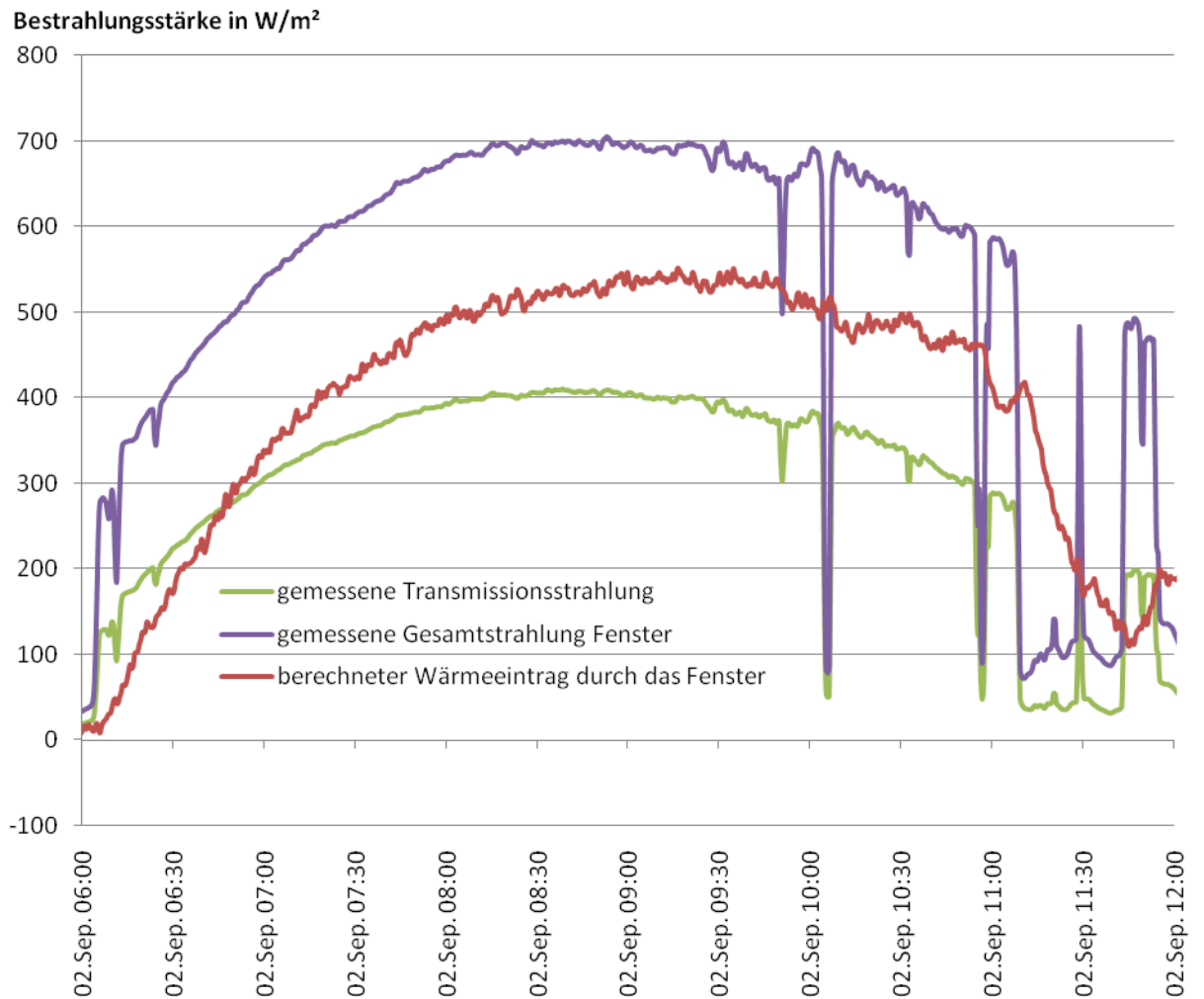


Diagramm 8: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung im Laufe des Vormittags am 02. September 2007

Im Diagramm 9 ist zu dieser Zeit (ca. 6:00 bis 7:00) ein sehr niedriger effektiver g-Wert zu beobachten. Um dennoch einen möglichst genauen Wert zu erhalten wird – wie beschrieben – sowohl die Bestrahlungsstärke auf das Fenster, wie auch der Energieeintrag über die Zeitspanne integriert, und laufend der Quotient daraus gebildet.

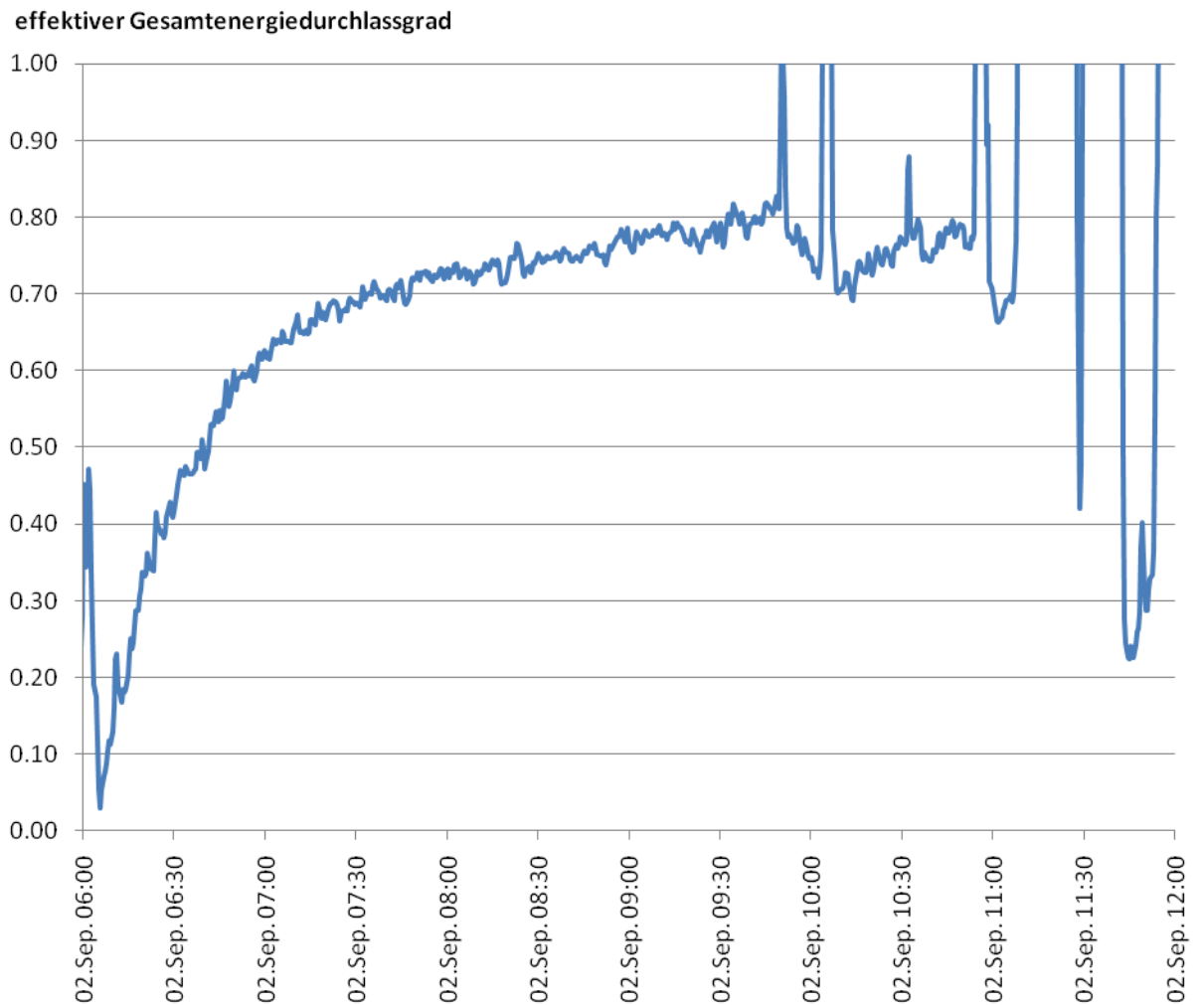


Diagramm 9: g-Wert im Laufe des Vormittags am 02. September 2007

Dadurch bekommen höhere Werte mehr Gewicht, und im nachfolgenden Diagramm 10 kann man sehen, wie sich dieser Wert einem endgültigen g-Wert annähert.

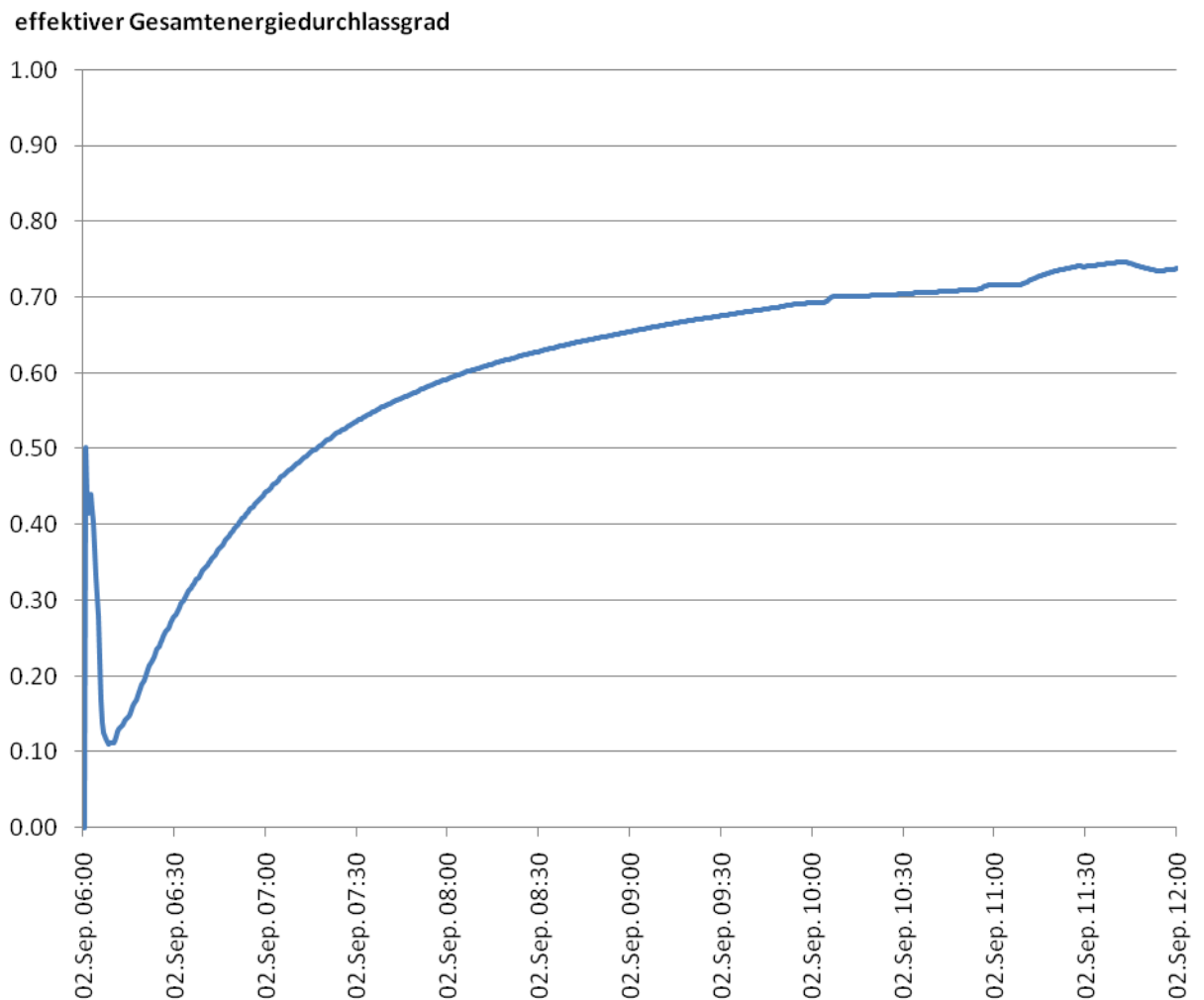


Diagramm 10: Quotient aus der Integration des Energieeintrages durch und der Gesamtstrahlung auf die Verglasung im Laufe des Vormittags am 02. September 2007

Der Endwert dieses Diagramms ist der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung dieses Zeitabschnitts.

Gesamtenergiedurchlassgrad

$g_{eff} = 0,74$

4.1.4 Diskussion

Diese gesamten Versuchsergebnisse werfen einige interessante Fragen auf. So ist der ermittelte Gesamtenergiedurchlassgrad mit einem Wert von 0,74 sehr hoch bzw. laut Vergleichsfenstern viel zu hoch. Beschichtete Gläser haben in der Regel einen g-Wert von ca. 0,5 bis 0,6. Das Ergebnis, der effektive g-Wert von 0,74, gleicht eher dem eines unbeschichteten Glasaufbaus. Dennoch steht, unter Annahme, dass die gemessenen Werte der Realität entsprechen, der Energieeintrag fest. Lediglich die Oberflächentemperatur des Außenglases scheint zu niedrig. Bei höherer Außenglastemperatur würde aufgrund des dann niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten der Wärmeverlust nach außen stark absinken und der rechnerische Verlust geringer, und demnach auch der berechnete Wärmeeintrag durch die Sonne niedriger. Das würde diesen hohen Gesamtenergiedurchlassgrad erklären. Andererseits besteht der Anspruch auf ein vergleichbares Resultat, und deshalb kann ein eventuell größerer angenommener Wärmeübergangswiderstand nicht das Ergebnis verbessern. Der tatsächliche Einbauzustand des Fensters kann natürlich ein Grund dafür sein, dass mehr Energie in den Beobachtungsraum gelangt.

Es stellt sich aber nach wie vor die Frage, ob man in diesem Fall nicht eventuell den Übergangswiderstand nach außen korrekter zu ermitteln hätte, um diesen Umstand nicht den Eigenschaften der Verglasung anzulasten.

4.2 Ergebnisse Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen

4.2.1 Allgemeines

Die Versuchstage für die Messung des Abminderungsfaktors von Abschattungsvorrichtungen sind der 13. bis 14. September 2007 für die eine, und der 21. bis 22. September 2007 für die zweite Stellung der Jalousien. Die Messung startet jeweils einen halben Tag zuvor, diese Ergebnisse werden aber vernachlässigt, da in dieser Zeit die Kalibration der Stofftemperaturen erfolgt.

4.2.2 z-Wert bei Sperrstellung

4.2.2.1 Messung des g-Wertes

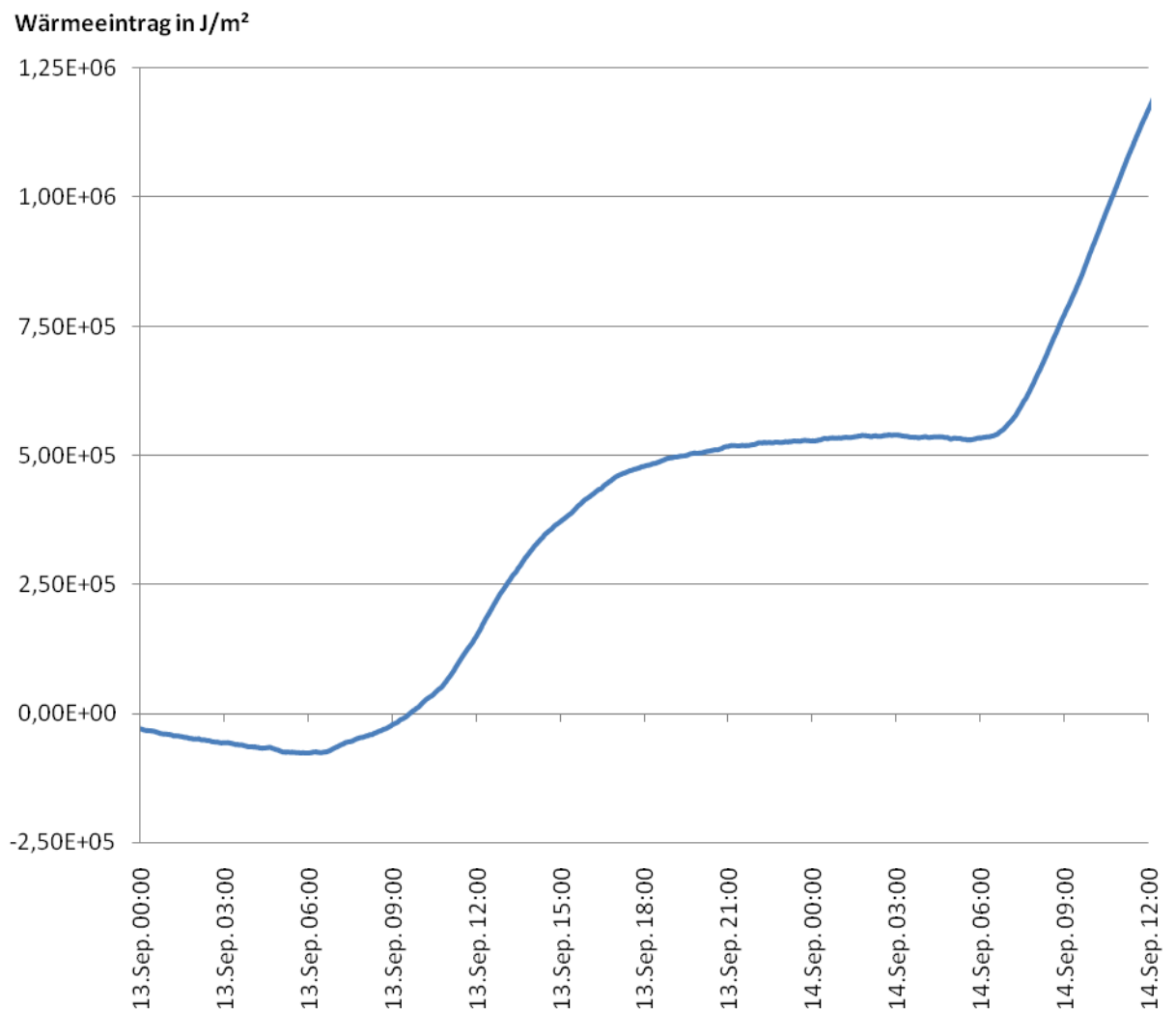


Diagramm 11: Integration des Wärmeeintrages

Um das System zu kalibrieren wird die eingebrachte Energie während der Nacht minimiert. So ergibt sich ein angenommener Wärmeübergangskoeffizient nach Außen α_a von $14 \text{ W/m}^2\text{K}$ und eine äquivalente Fläche der Wärmebrücke (siehe Punkt 3.6.2) von $0,032 \text{ m}^2$.

Diagramm 11 zeigt das Ergebnis der Kalibration, der Wärmeeintrag in der Nacht ist nahezu konstant.

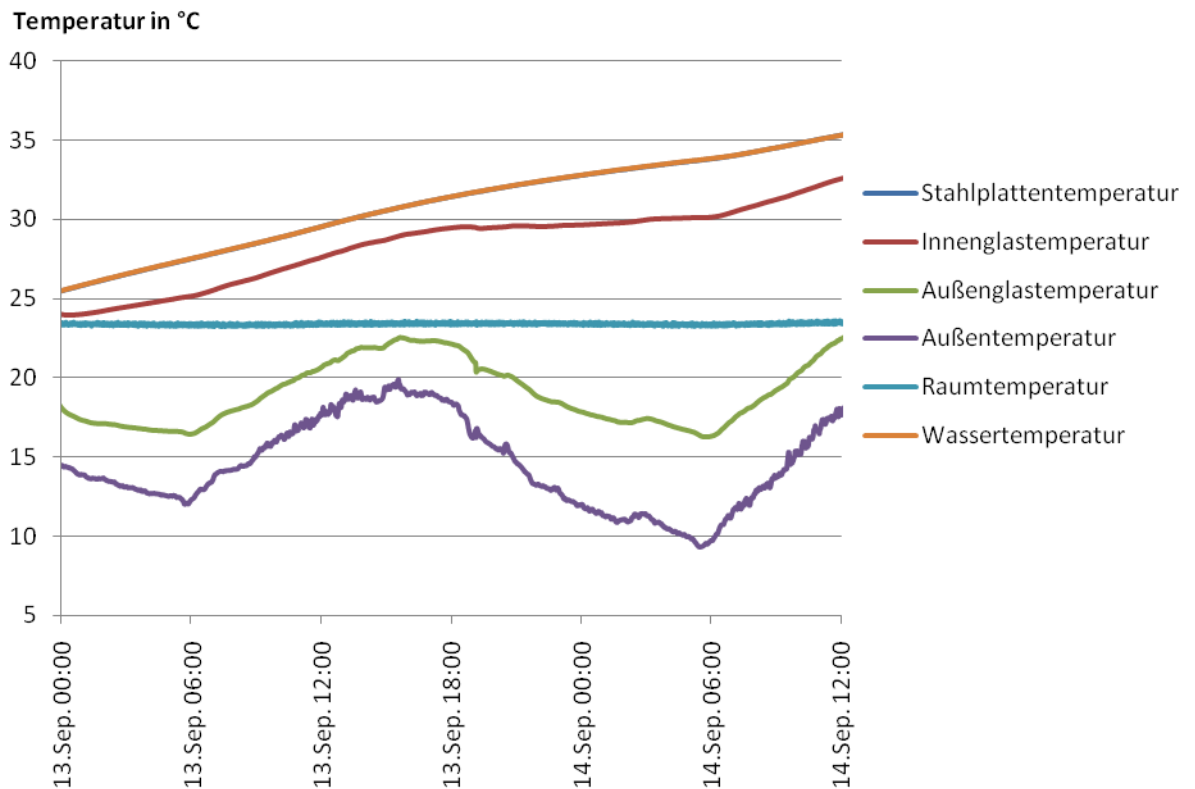


Diagramm 12: berechnete und gemessene entstehende Temperaturen an den verschiedenen Stellen

Das Diagramm 12 zeigt die in diesem Versuch und gemessenen und berechneten Temperaturen. Da in diesem Zeitraum der elektrische Widerstand im Kalorimeter das Wasser aufwärmt steigt die Wassertemperatur stetig. Dennoch ist am ersten wie auch am zweiten Versuchsvormittag eine leichte Erhöhung des Temperaturanstieges zu beobachten.

Folgendes Diagramm 13 zeigt den mit den Temperaturen und den Kalorimeter-Eigenschaften berechneten Wärmeeintrag durch die Sonne und die dazugehörigen gemessenen Bestrahlungsstärken. Der Wärmeeintrag ist aufgrund der Jalousiestellung sehr gering.

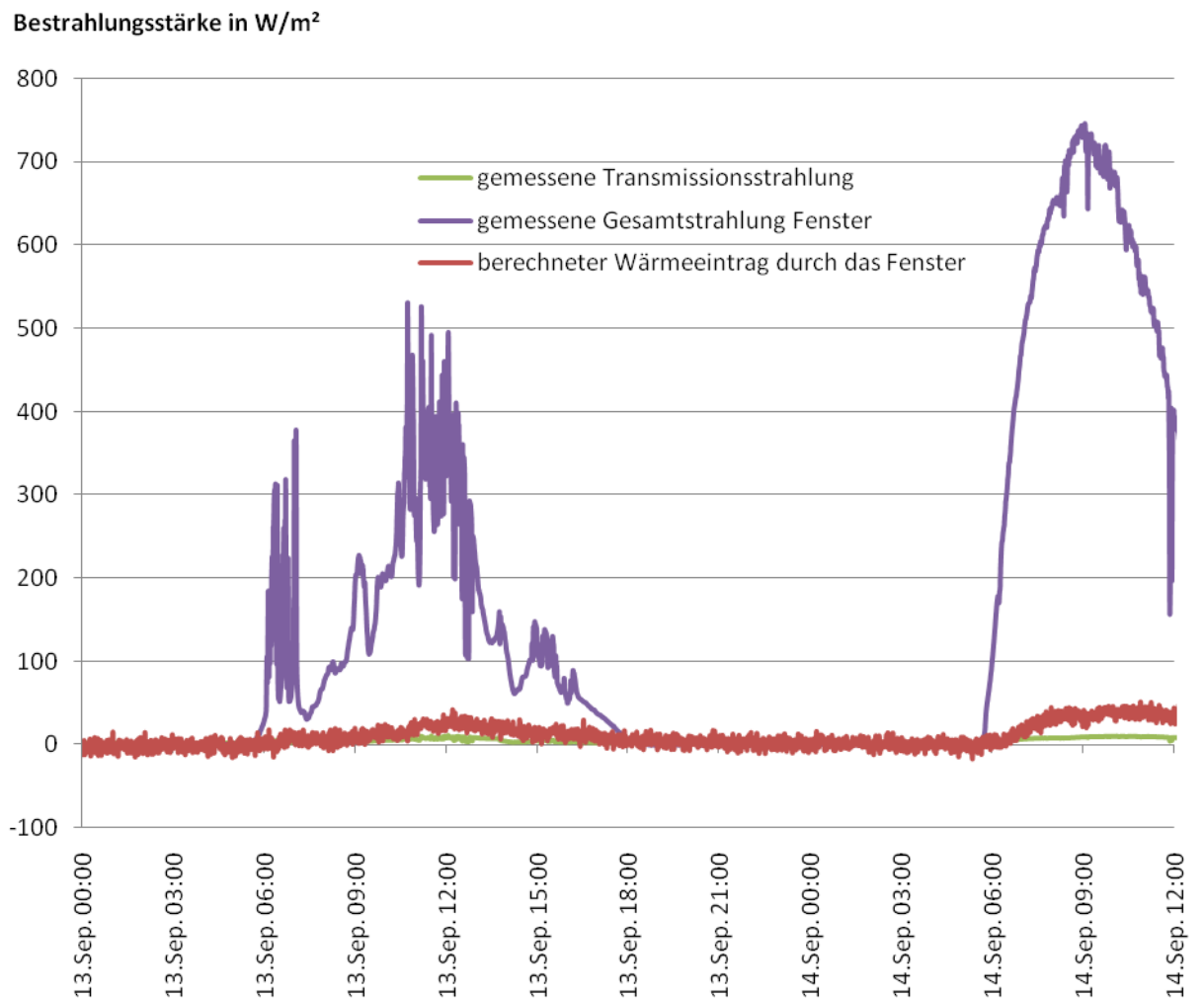


Diagramm 13: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung

Man kann im Diagramm 14 genauer erkennen, wie die Jalousie fast keine Transmissionsstrahlung und keinen Wärmeeintrag durchlässt.

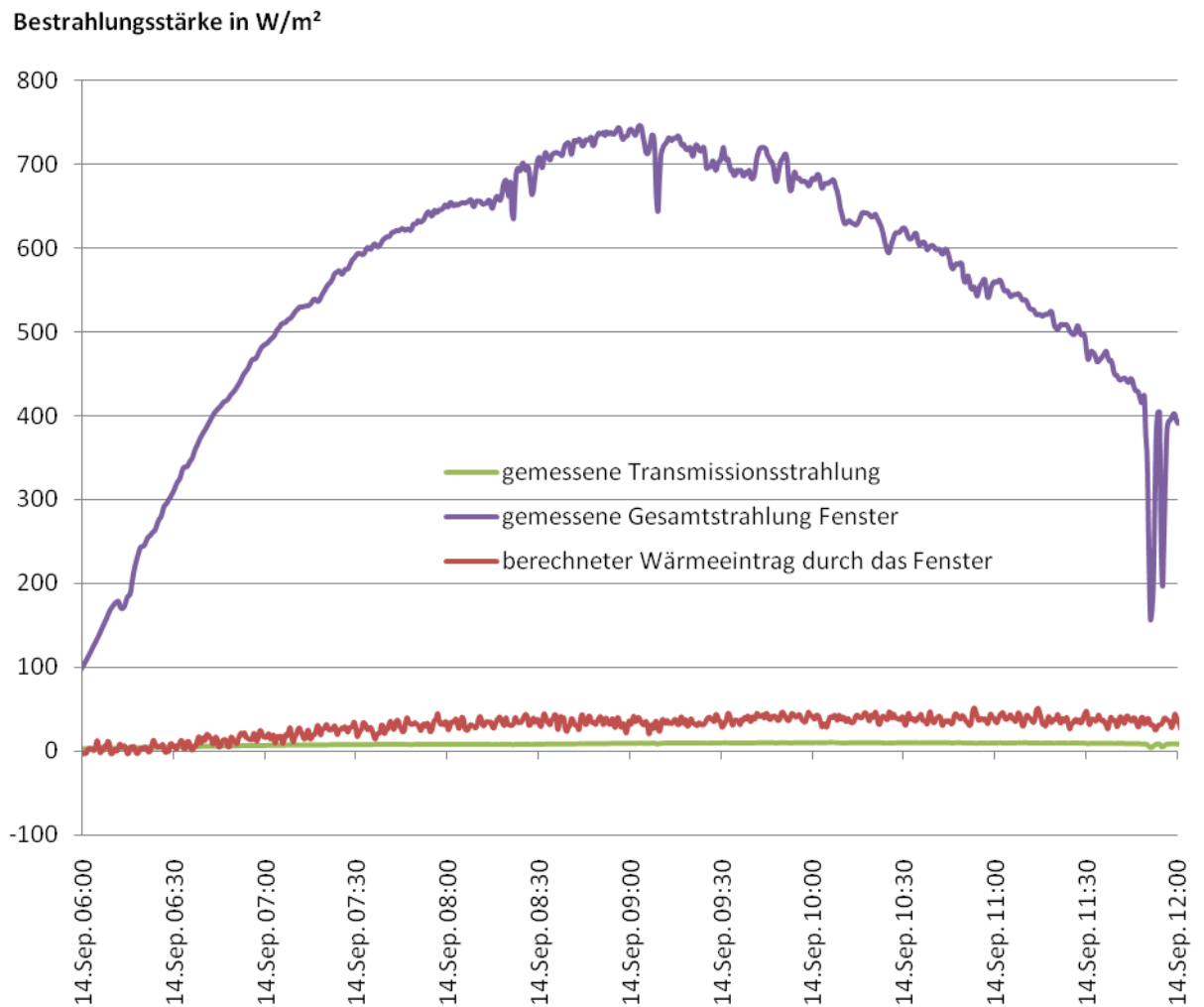


Diagramm 14: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung im Laufe des Vormittags am 14. September 2007

In Diagramm 15 ist der effektive totale Gesamtenergiedurchlassgrad zu jedem Versuchszeitpunkt dargestellt. Der g-Wert ist – durch die niedrigen Werte – sehr von einer Störfunktion betroffen, die durch die Berechnungsmethode (siehe Punkt 3.6.3) entsteht.

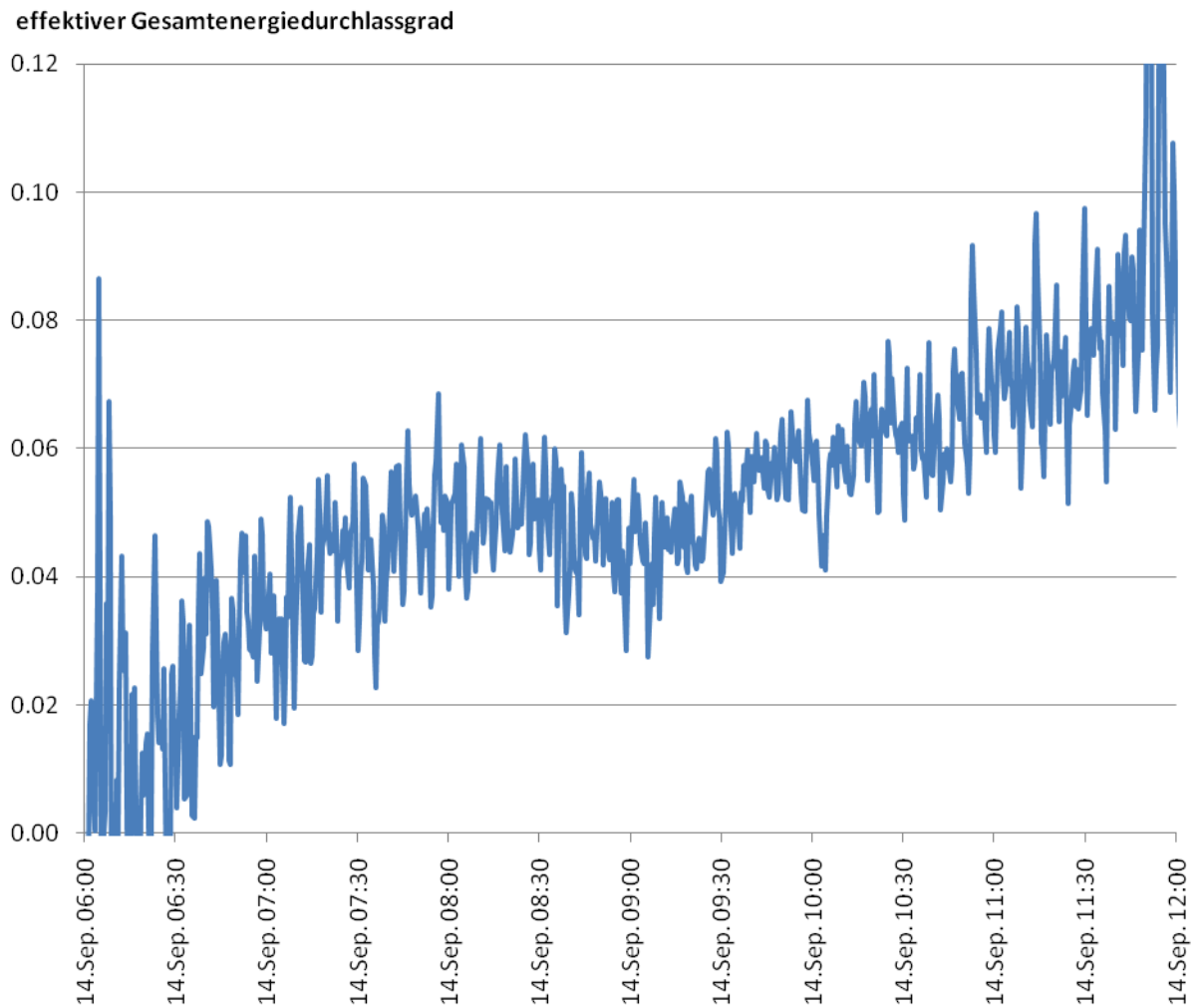


Diagramm 15: g-Wert im Laufe des Vormittags am 14. September 2007

Das Diagramm 16 zeigt den Quotienten aus der Integration des Energieeintrages und der Gesamtstrahlung. Der Endwert dieses Diagramms ist der effektive totale g-Wert der abgeschatteten Verglasung.

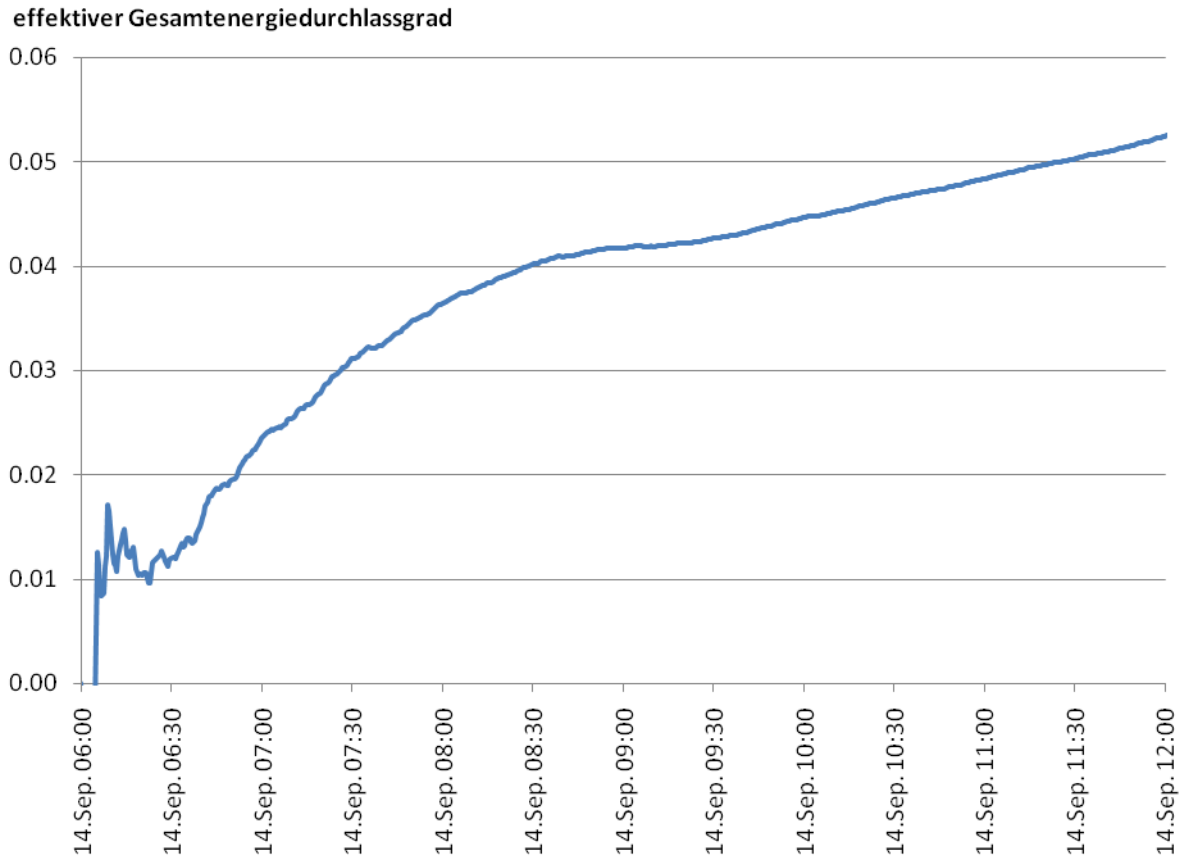


Diagramm 16: Quotient aus der Integration des Energieeintrages und der Gesamtstrahlung auf die Verglasung im Laufe des Vormittags 14. September 07

Effektiver totaler Gesamtenergiedurchlassgrad

$g_{eff,Sperr} = 0,052$

$$z_{Sperr} = g_{eff,Sperr} / g_{eff} = 0,052 / 0,74 =$$

Abminderungsfaktor für Abschattungsvorrichtungen

$z_{Sperr} = 0,070$

4.2.3 z-Wert bei Waagstellung

4.2.3.1 Messung des g-Wertes

Diagramm 17 zeigt das Integral des Wärmeeintrages nach Anpassung der Wärmeleiteigenschaften des Kalorimeters.

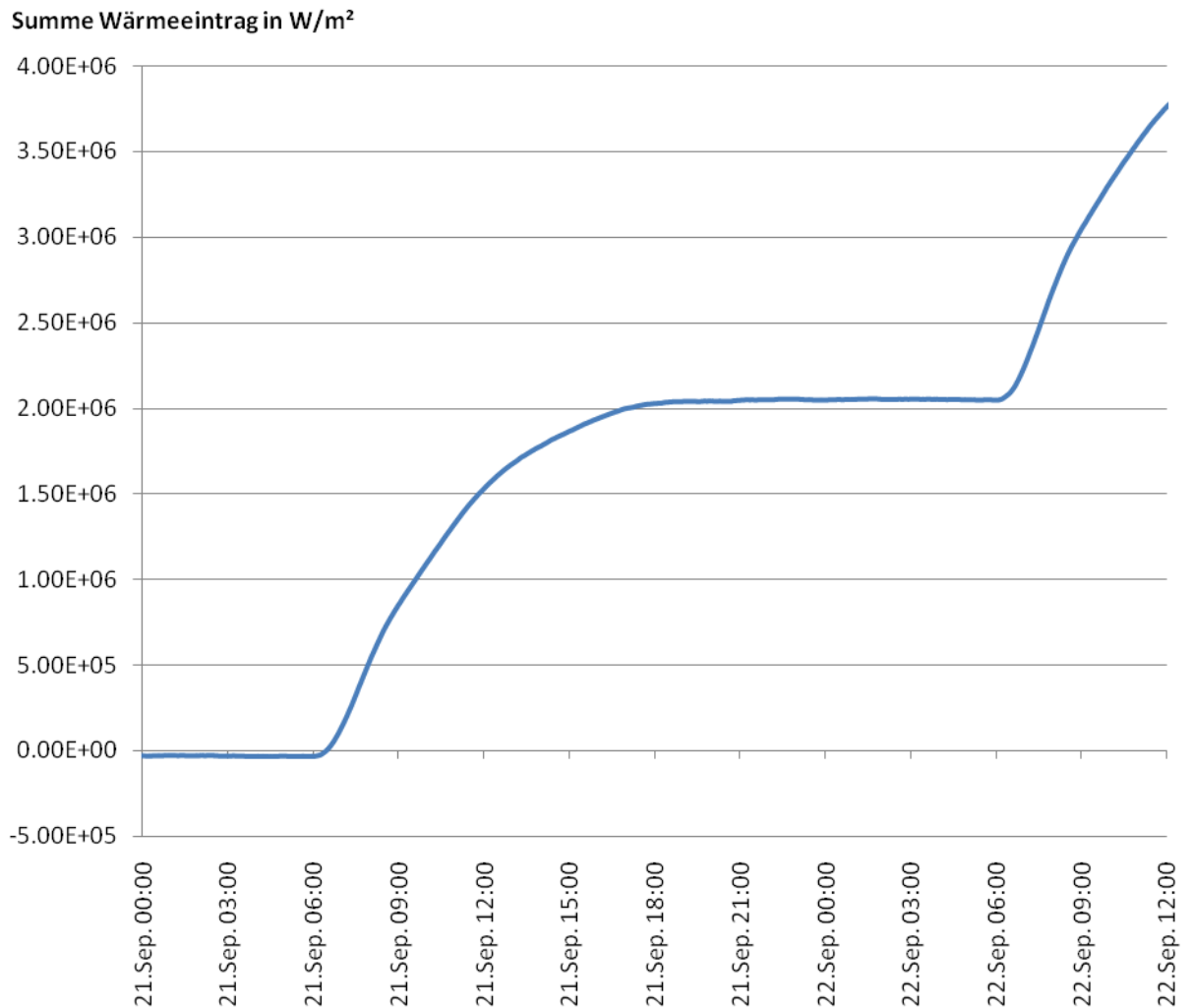


Diagramm 17: Integration des Wärmeeintrages

Um die eingebrachte Energie während der Nacht zu minimieren, wird für den Wärmeübergangskoeffizient nach Außen $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ gewählt. Die Fläche der Wärmebrücke wird auf $0,113 \text{ m}^2$ angepasst. Der Grund für den stark erhöhten Wert könnte sein, dass sich die Dichtigkeit der Kalorimeterwand an der Glasscheibe etwas verringert hat, womit sich die zusätzlichen Verluste erklären lassen.

Das Diagramm 18 zeigt die in diesem Versuch und gemessenen und berechneten Temperaturen. Am ersten wie auch am zweiten Versuchsvormittag ein Temperaturanstieg zu erkennen.

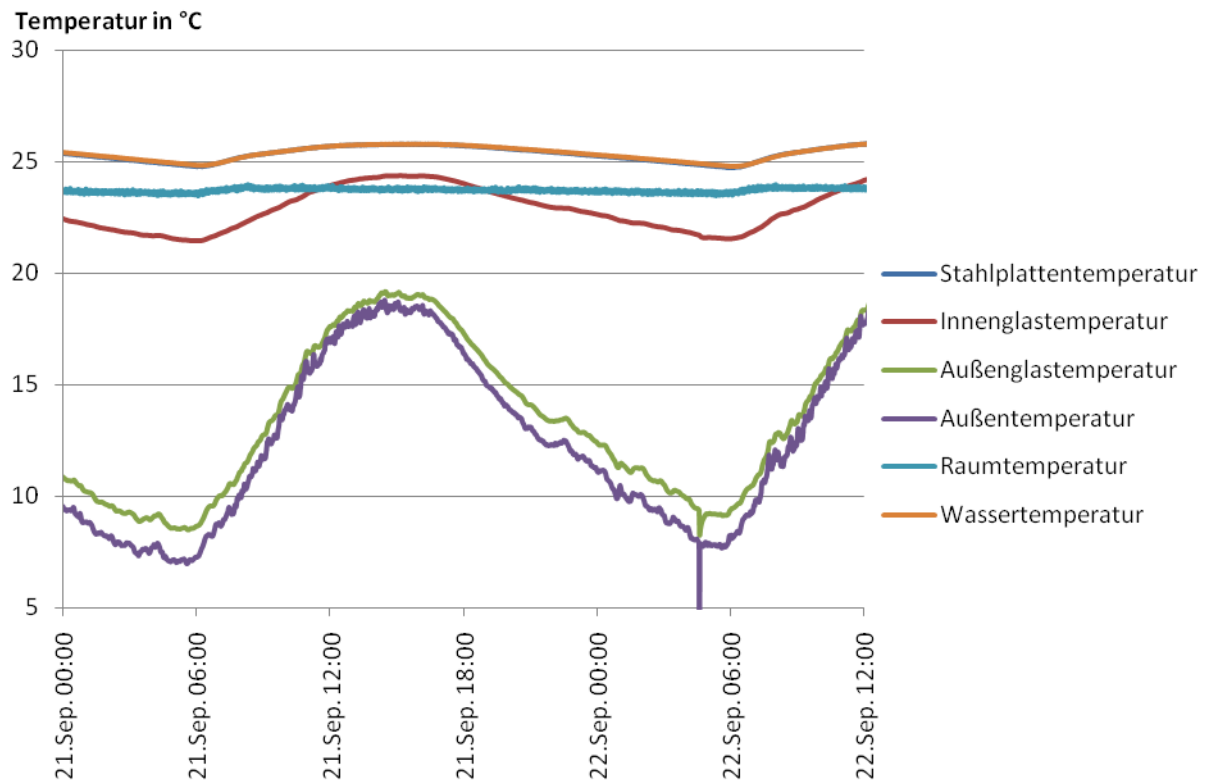


Diagramm 18: berechnete und gemessene entstehende Temperaturen an den verschiedenen Stellen

Diagramm 19 zeigt die Gesamtstrahlung auf das Fenster, die dazugehörige Transmissionsstrahlung und den berechneten Wärmeeintrag während der Versuchstage. Man kann erkennen, wie durch die Waagstellung der Jalousien das Sonnenlicht nur zu einer bestimmten Zeit im Raum durch die Transmissionsstrahlung nachgewiesen wird.

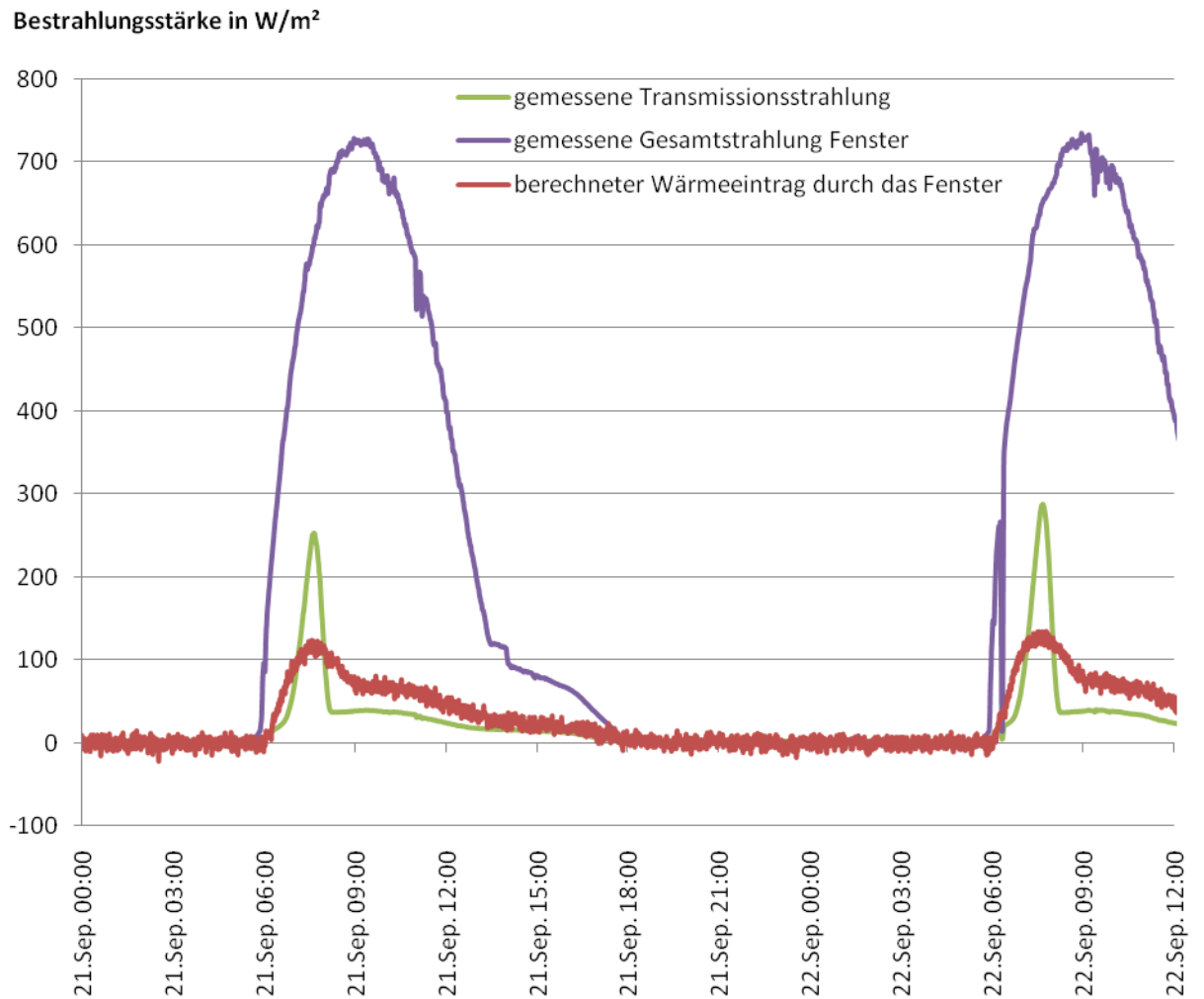


Diagramm 19: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung

Am zweiten Tag, der für die Auswertung benützt wird, kann man anhand des Diagramms 20 sehen, wie sich der in der Simulation berechnete Wärmeeintrag nur relativ ungenau mit der Transmissionsstrahlung mitbewegt. Die Wärmeeintragslinie muss sich theoretisch immer oberhalb der Transmissionsstrahlungslinie befinden. In diesem Fall sitzt der Pyranometer Q1 an einer Stelle, die nur sehr kurz direktes Sonnenlicht erhält. Der Kalorimeter aber erhält aufgrund der größeren Fläche länger einen gut abgeschwächten Energieeintrag.

Bestrahlungsstärke in W/m^2

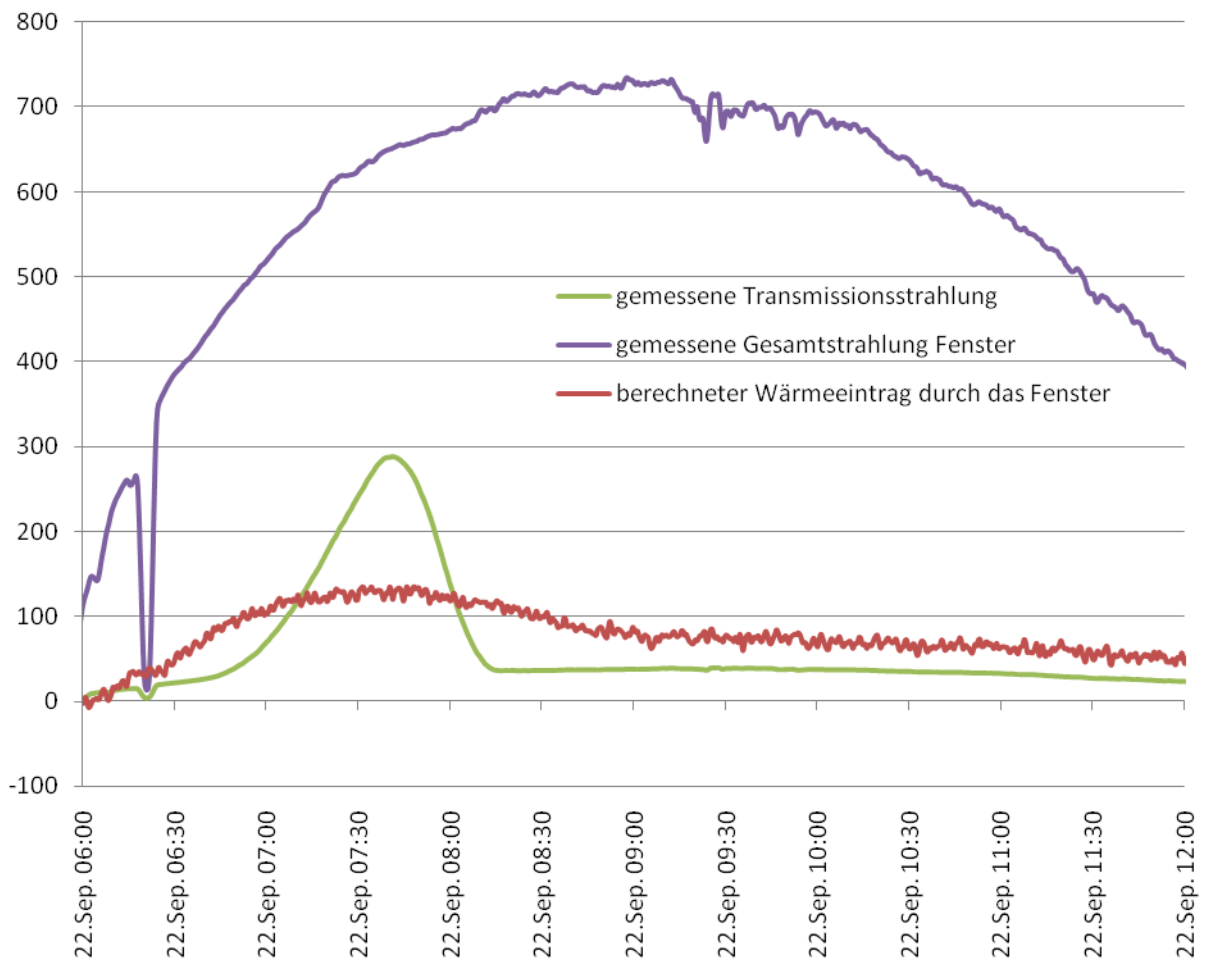


Diagramm 20: Darstellung des Energieeintrags durch die Verglasung im Vergleich zur Gesamtstrahlung und Transmissionsstrahlung im Laufe des Vormittags am 22. September 2007

Aus der Form der g-Wert-Linie in Diagramm 21 kann man gut erkennen zu welcher Zeit die Jalousie der Sonne die Möglichkeit gibt direkt auf die Verglasung zu scheinen.

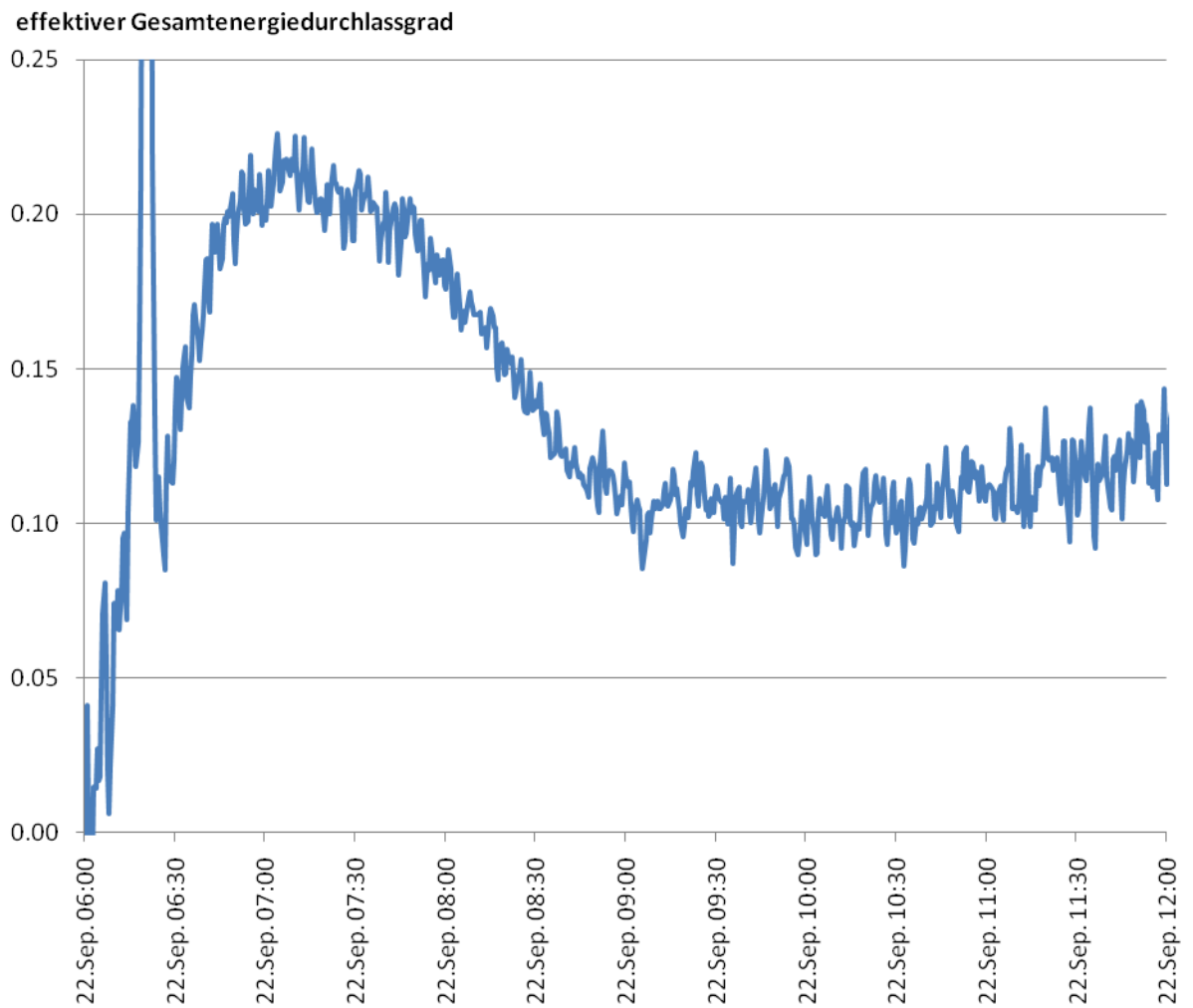


Diagramm 21: g-Wert im Laufe des Vormittags am 22. September 2007

Das Diagramm 22 zeigt den Quotienten aus der Integration des Energieeintrages und der Gesamtstrahlung. Der Endwert dieses Diagramms ist der effektive totale g-Wert der abgeschatteten Verglasung.

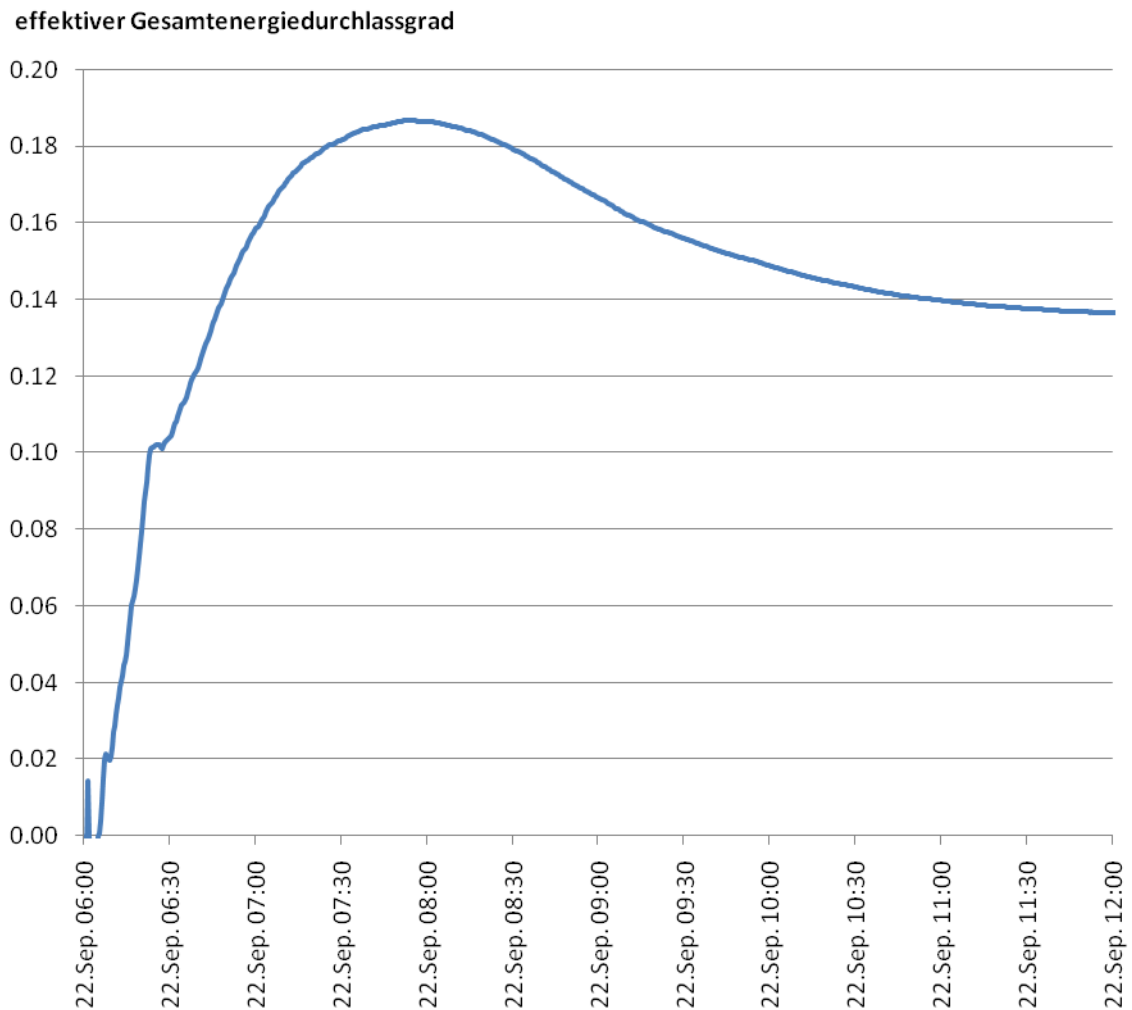


Diagramm 22: Quotient aus der Integration des Energieeintrages und der Gesamtstrahlung auf die Verglasung im Laufe des Vormittags des 22. September 07

Effektiver totaler Gesamtenergiedurchlassgrad

$g_{eff,Waag} = 0,136$

$$z_{Waag} = g_{eff,Waag} / g_{eff} = 0,136 / 0,74 =$$

Abminderungsfaktor der Abschattungsvorrichtung

$z_{Waag} = 0,18$

4.2.4 Diskussion Abminderungsfaktor für Abschattungsvorrichtungen

Oben beschriebene Versuche haben einen Abminderungsfaktor für Abschattungsvorrichtungen von $z = 0,07$ bei Sperrstellung und $z = 0,18$ bei Waagstellung ergeben. Ein noch kleinerer Abminderungsfaktor wäre möglich, da die Jalousieblätter noch weiter in die senkrechte Lage zu drehen wären. Bei dieser Stellung aber lässt der Sonnenschutz fast kein Licht mehr durch. Der Abminderungsfaktor bei Sperrstellung ist niedriger als die Werte, die in der ÖNorm B8110 Teil 3 zu vermerkt sind.

4.3 Licht Messergebnisse

4.3.1 Allgemeines

Für die Licht-Messergebnisse wurde die Zeit vom 2. September von 6:00 bis 12:00 herangezogen – somit derselbe Zeitraum, der für die Messung des Gesamtenergie-durchlassgrades verwendet wurde.

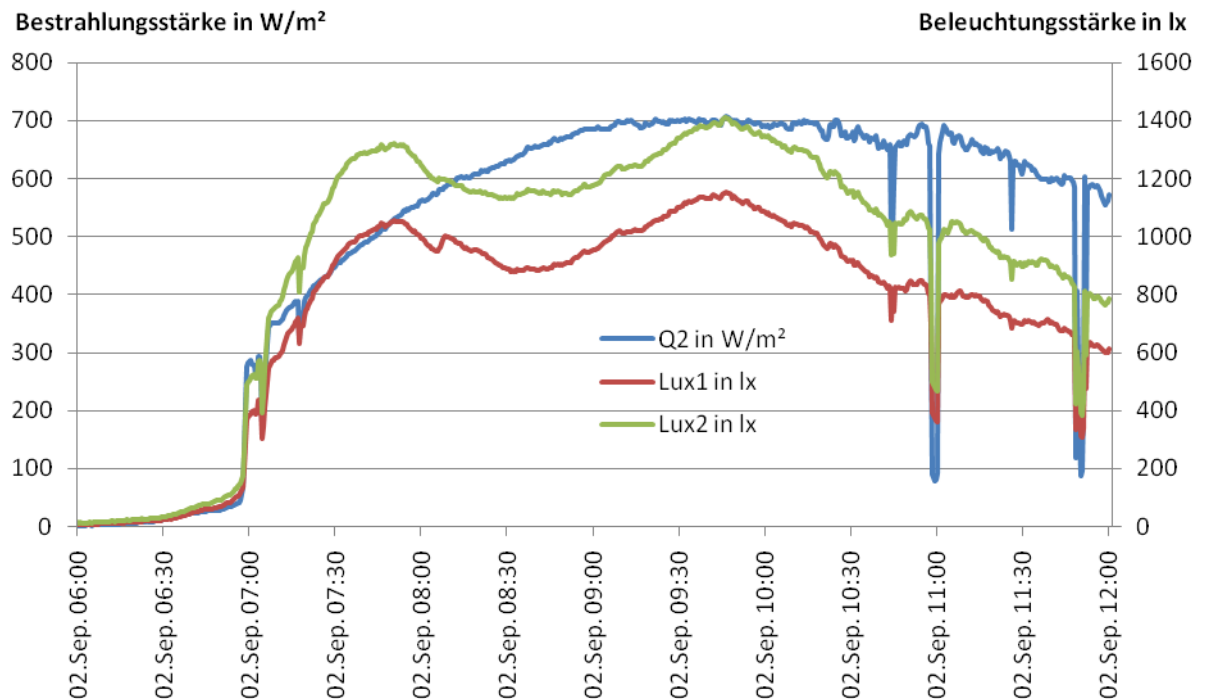


Diagramm 23: Darstellung der Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Q2 ist die Bestrahlungsstärke auf das Fenster Außen und Lux1 und Lux2 die Beleuchtungsstärke der Messgeräte in 5,01m und 4,37m Entfernung.

Da sich die Beleuchtungsstärke über weite Teile ähnlich der Bestrahlungsstärke verhält wird vereinfacht angenommen, dass zwischen beiden ein direkter Zusammenhang besteht.

$$E_v = F \cdot E \quad [25]$$

Wobei E_v die Beleuchtungsstärke in Lux, E die Bestrahlungsstärke auf das Fenster in W/m^2 und F ein zu bestimmender Faktor ist.

4.3.2 Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 5,01m

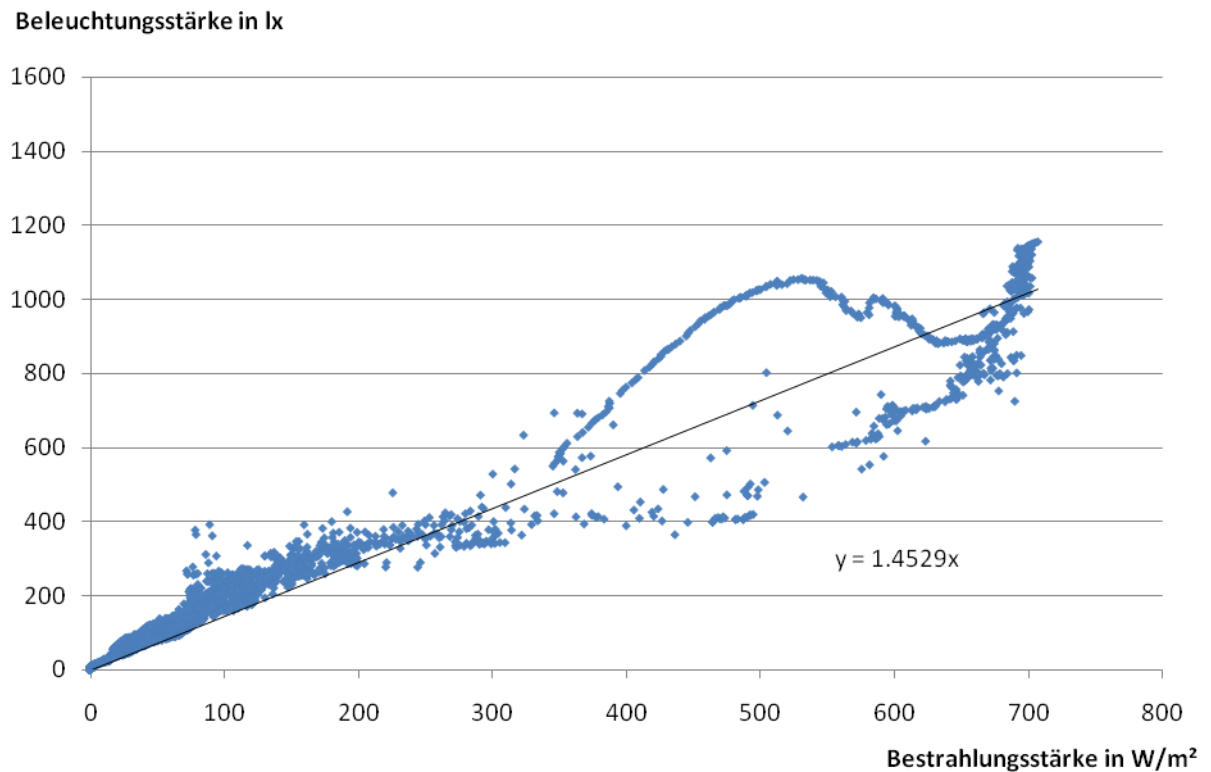


Diagramm 24: Zusammenhang Gesamtstrahlung auf Fenster und Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe (Lux1) im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Diagramm 24 zeigt den mittleren Zusammenhang zwischen der Gesamtstrahlung außen auf das Fenster und der Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe in 5,01m Entfernung vom Fenster.

Die Umrechnung erfolgt nach der Formel:

$$E_v = 1,4529 \cdot E$$

E_v ist die Beleuchtungsstärke in Lux und E die Bestrahlungsstärke in W/m² auf das Fenster.

4.3.3 Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 4,37m

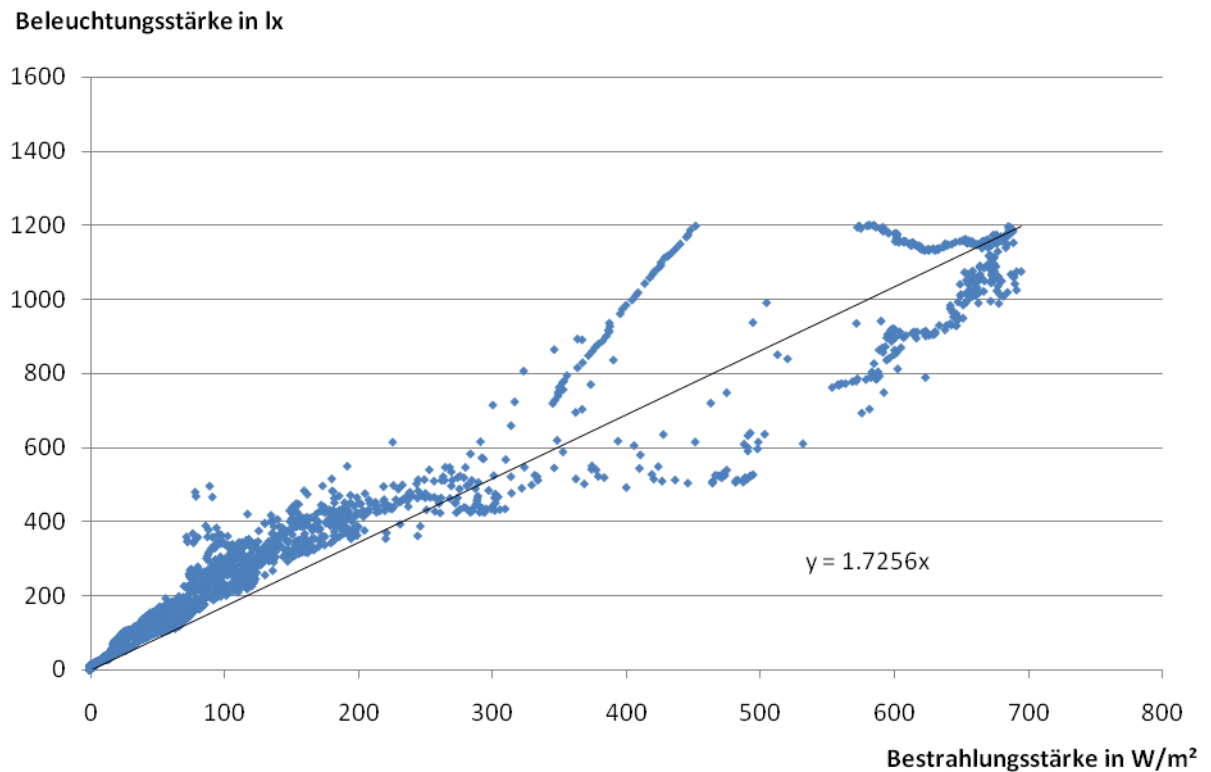


Diagramm 25: Zusammenhang Gesamtstrahlung auf Fenster und Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe (Lux2) im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Diagramm 25 zeigt den mittleren Zusammenhang zwischen der Gesamtstrahlung außen auf das Fenster und der Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe in 4,37m Entfernung vom Fenster.

Die Umrechnung erfolgt nach der Formel:

$$E_v = 1,7256 \cdot E$$

E_v ist die Beleuchtungsstärke in Lux und E die Bestrahlungsstärke in W/m² auf das Fenster.

4.3.4 Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 2,86m

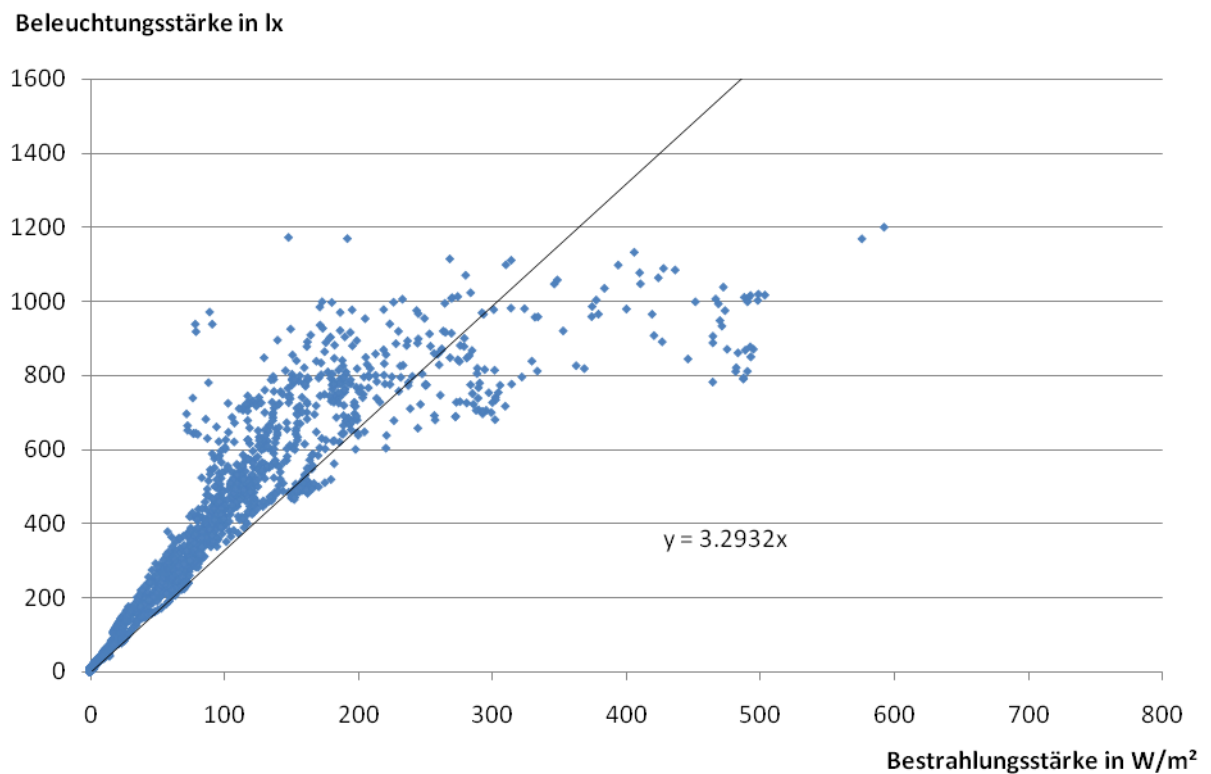


Diagramm 26: Zusammenhang Gesamtstrahlung auf Fenster und Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe (Lux3) im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Diagramm 26 zeigt den mittleren Zusammenhang zwischen der Gesamtstrahlung außen auf das Fenster und der Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe in 2,86m Entfernung vom Fenster.

Die Umrechnung erfolgt nach der Formel:

$$E_v = 3,2932 \cdot E$$

E_v ist die Beleuchtungsstärke in Lux und E die Bestrahlungsstärke in W/m² auf das Fenster.

4.3.5 Zusammenhang Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke 2,20m

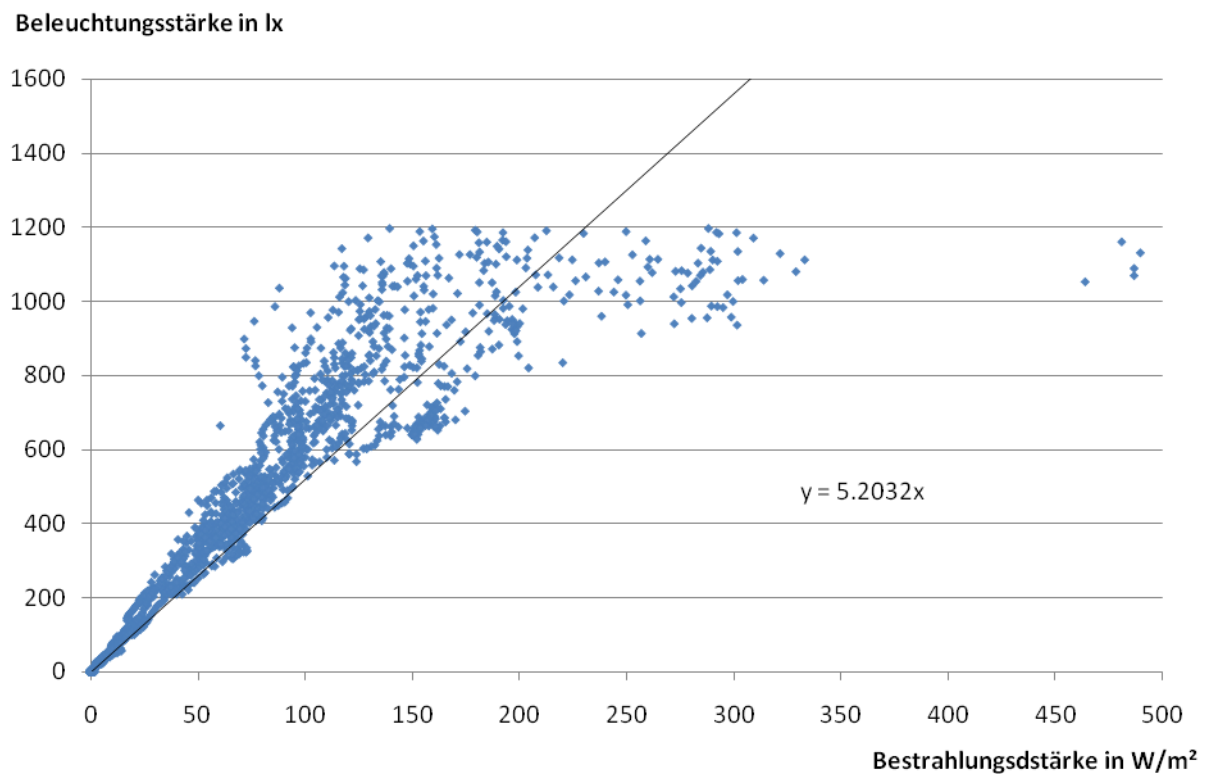


Diagramm 27: Zusammenhang Gesamtstrahlung auf Fenster und Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe (Lux4) im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Diagramm 27 zeigt den mittleren Zusammenhang zwischen der Gesamtstrahlung außen auf das Fenster und der Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe in 2,20m Entfernung vom Fenster.

Die Umrechnung erfolgt nach der Formel:

$$E_v = 5,2032 \cdot E$$

E_v ist die Beleuchtungsstärke in Lux und E die Bestrahlungsstärke in W/m² auf das Fenster.

4.3.6 Zusammenhang Umrechnungsfaktor – Abstand zum Fenster

Um dieses Ergebnis für alle Abstände vom Fenster zu bekommen, werden diese Faktoren mit ihren Abständen zum Fenster in einem Diagramm aufgezeichnet, und eine gut dazu passende Trendlinie wird dazu gesucht.

Unter der Annahme, dass die gesuchte Formel dazu eine Exponentialfunktion ist, ergibt sich nach Diagramm 27 die Funktion abhängig von x , dem Abstand zum Fenster in Meter:

$$F = 12,922e^{-0,448 \cdot x} \quad [26]$$

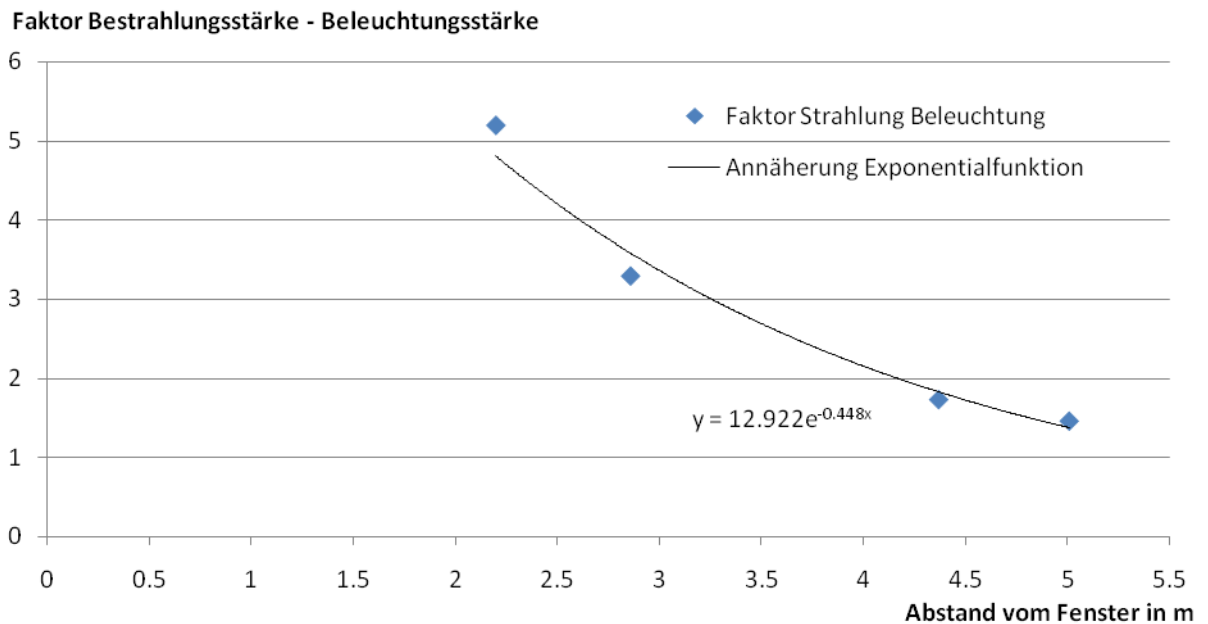


Diagramm 28: Zusammenhang Faktor Bestrahlungsstärke - Beleuchtungsstärke und Abstand vom Fenster im Laufe des Vormittags am 2. September 2007

Der Faktor für 3m Abstand beträgt demnach:

$$F = 12,922e^{-0,448 \cdot 3} = 3,37$$

Der Faktor für 5m Abstand beträgt demnach:

$$F = 12,922e^{-0,448 \cdot 5} = 1,38$$

4.4 Vergleich Wärmeenergieeintrag

Als Versuchszeit wird wie für den Zusammenhang zwischen der Strahlung Außen und der Beleuchtung Innen der 2. September 07 vormittags von 6:00 bis 12:00 gewählt, und es werden jeweils vier Fälle untersucht.

1. Die Jalousien stehen offen, es wird aber bei zu wenig Beleuchtungsstärke die technische Lichtquelle zugeschaltet.
2. Die Jalousien sind jeweils der Beleuchtungsstärke angepasst, ist diese zu gering, wird die technische Lichtquelle zugeschaltet.
3. Die Jalousien sind nur bei genügend Beleuchtungsstärke so wenig wie möglich geöffnet, ansonsten geschlossen, und die technische Lichtquelle zugeschaltet.
4. Die Jalousien sind immer in Sperrstellung, bei zu wenig Licht wird die technische Lichtquelle zugeschaltet.

Als maximal geschlossener Zustand der Jalousien wird die Sperrstellung (siehe Seite 36) verwendet, das heißt der kleinste mögliche Abminderungsfaktor für die Abschattungsvorrichtung ist 0,07.

4.4.1 Ergebnisse in 3m Abstand

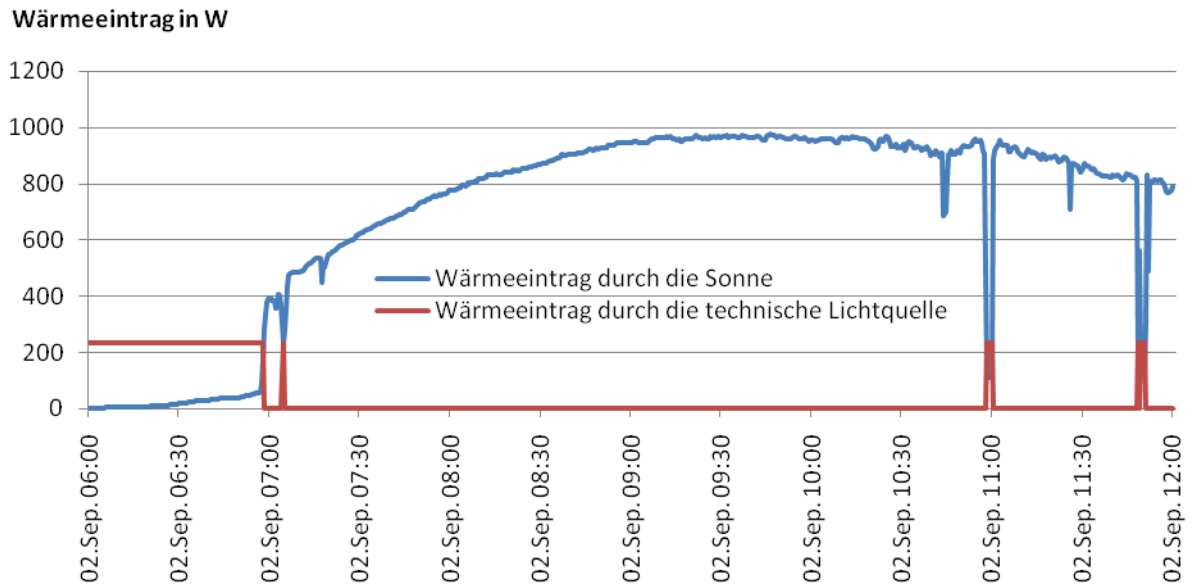


Diagramm 29: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 3m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 1*

Diagramm 29 verdeutlicht, wie stark die Sonne ohne Verwendung der Jalousien Wärme in den Raum einbringt. Der eingetragene Wärmeeintrag beträgt für diese sechs Stunden:

$$Q = 4,43 \text{ kWh}$$

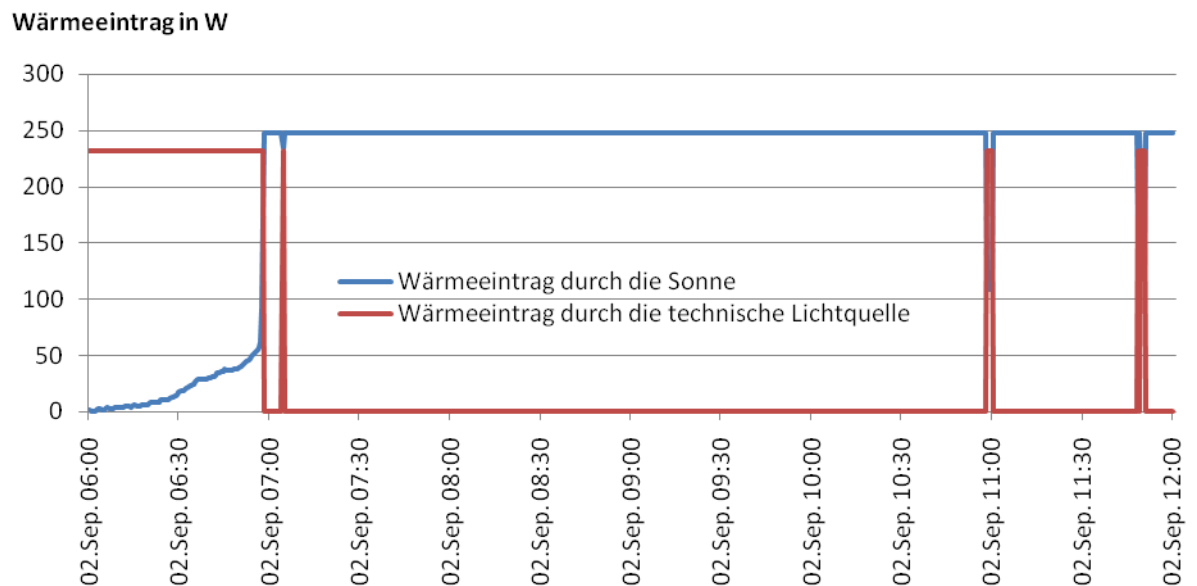


Diagramm 30: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 3m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 2*

In diesem Diagramm 30 wird der Lichteinfall durch die Sonne möglichst hoch, aber nicht über den 500lx gehalten. Der Wärmeeintrag beträgt „nur“ noch:

$$Q = 1,50 \text{ kWh}$$

* Jalousiefälle auf Seite 70

Wärmeeintrag in W

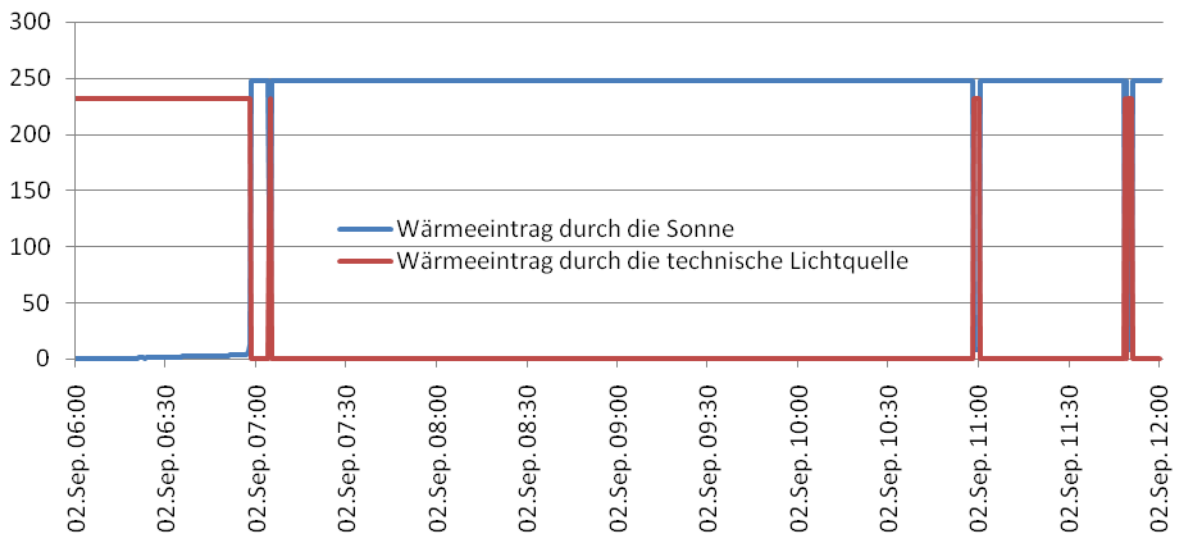


Diagramm 31: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 3m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 3*

Beim Schließen der Jalousien, wenn die Sonne nicht die ausreichende Beleuchtungsstärke liefert, wird der Wärmeeintrag natürlich noch kleiner. Da aber die Sonne noch in großem Maße als Lichtquelle genutzt wird, ist der Energieeintrag nur geringfügig kleiner:

$$Q = 1,47 \text{ kWh}$$

Wärmeeintrag in W

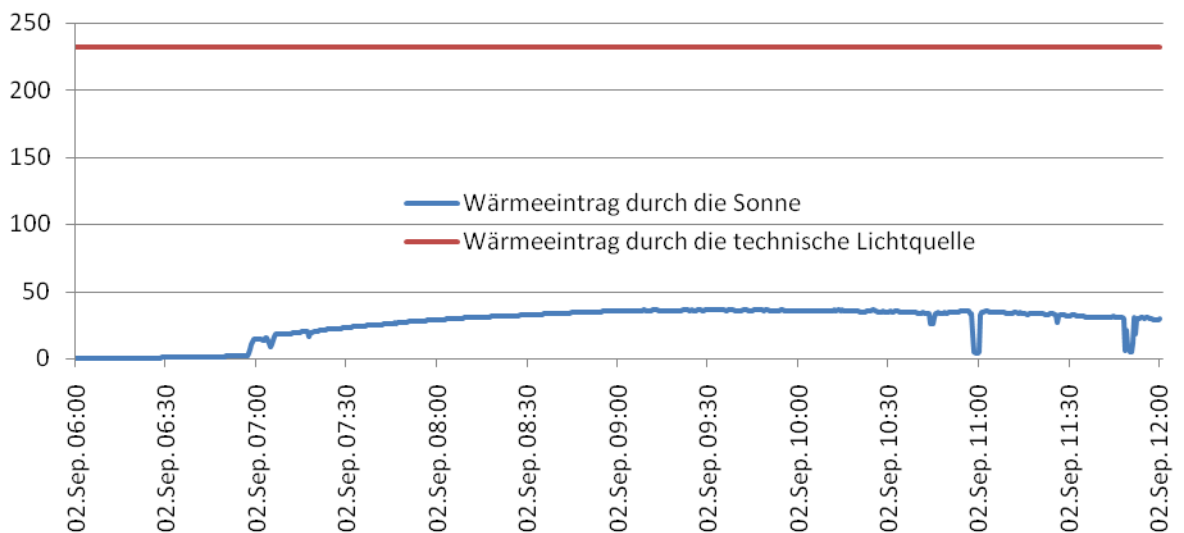


Diagramm 32: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 3m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 4*

Bei geschlossenen Jalousien (Sperrstellung) ist die technische Lichtquelle immer aktiv, der Wärmeeintrag ist in diesem Fall am geringsten:

$$Q = 1,55 \text{ kWh}$$

* Jalousiefälle auf Seite 70

4.4.2 Ergebnisse in 5m Abstand

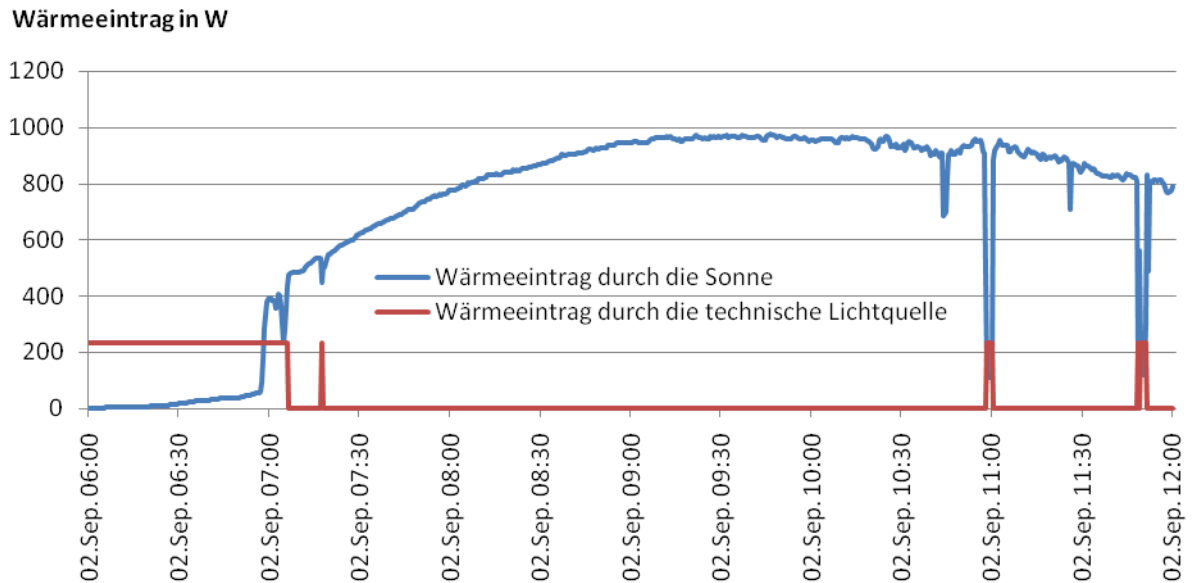


Diagramm 33: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 5m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 1*

In 5m Abstand zum Fenster ist das einfallende Licht schon um einiges geringer, die technische Lichtquelle muss öfters und länger verwendet werden. Die Wärmemenge für diese sechs Stunden beträgt:

$$Q = 4,46 \text{ kWh}$$

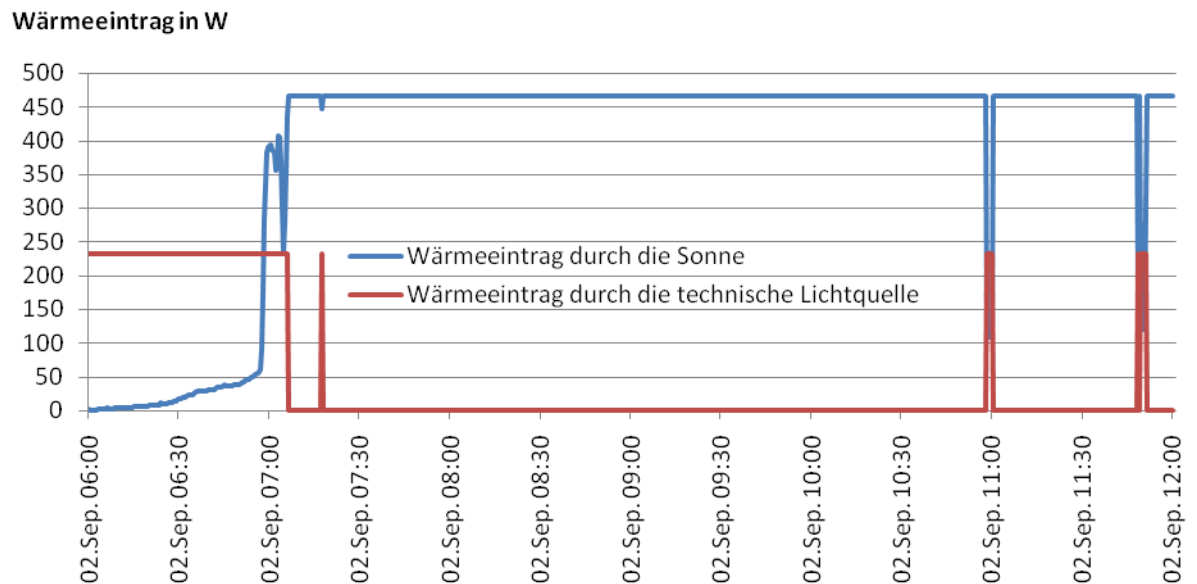


Diagramm 34: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 5m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 2*

Diagramm 34 zeigt den Wärmeeintrag für den Jalousiefall 2. Der Wärmeeintrag beträgt:

$$Q = 2,59 \text{ kWh}$$

* Jalousiefälle auf Seite 70

Wärmeeintrag in W

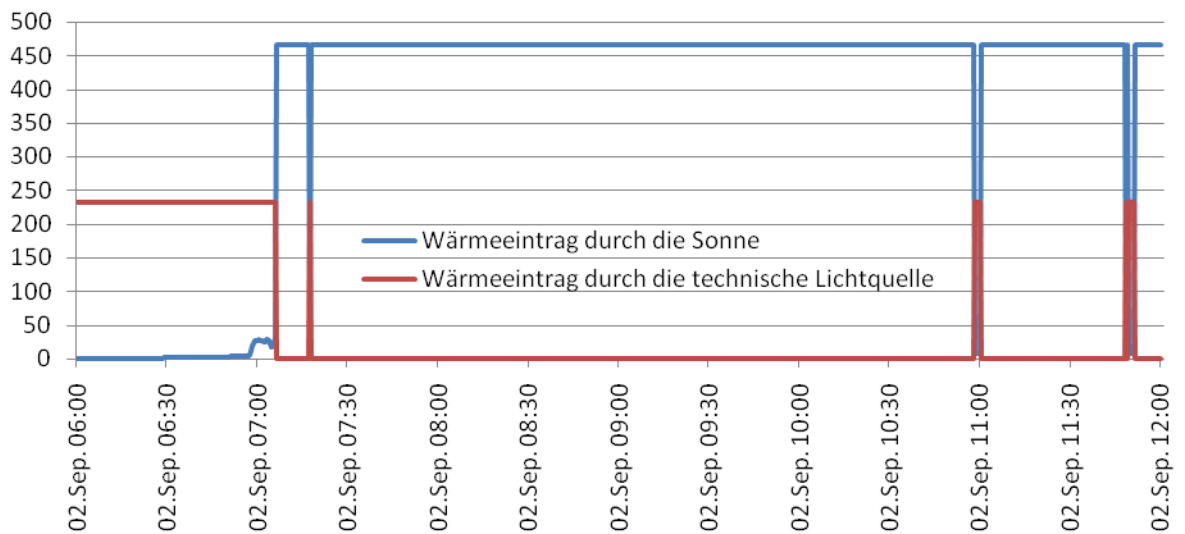


Diagramm 35: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 5m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 3*

Diagramm 35 zeigt den Wärmeeintrag für den Jalousiefall 3. Der Wärmeeintrag beträgt:

$$Q = 2,51 \text{ kWh}$$

Wärmeeintrag in W

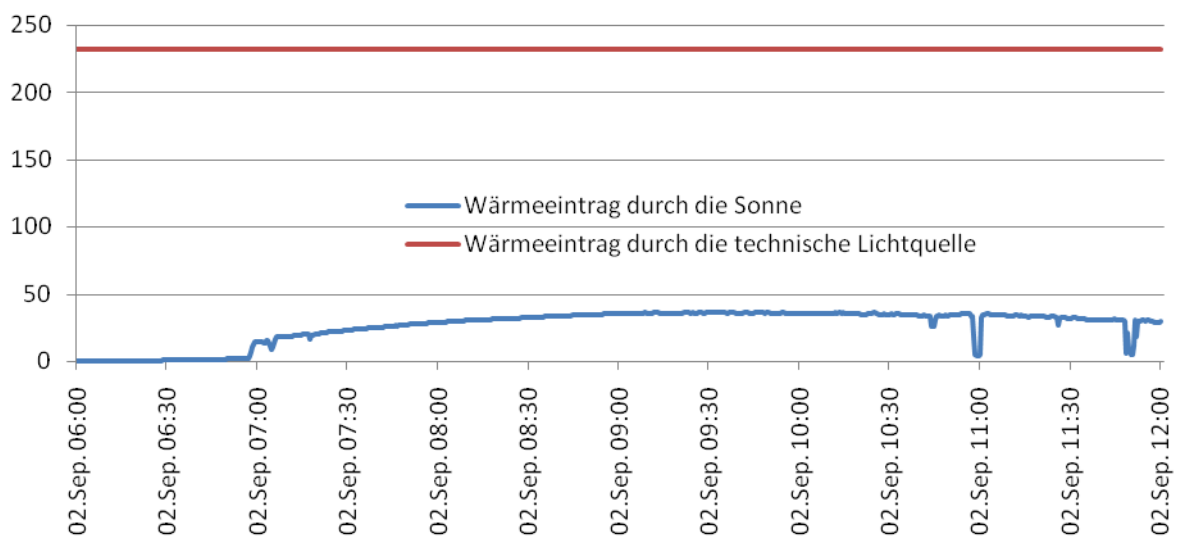


Diagramm 36: Wärmeeintrag bei Beleuchtungsstärkenmessung in 5m Abstand zum Fenster – Jalousiefall 4*

Das Diagramm 36 ist aufgrund der gewählten Jalousieeinstellung äquivalent zum Fall 4, der Wärmeeintragsmessung bei drei Metern Arbeitsplatzabstand. Der Wärmeenergieeintrag beträgt wieder:

$$Q = 1,55 \text{ kWh}$$

* Jalousiefälle auf Seite 70

4.4.3 Diskussion der Wärmeenergieeinträge

In Tabelle 7 wird dargestellt, wie viel Energie in diesen Versuchsraum während des Versuchszeitraumes durch die Lichtbedingung (mindestens 500lx an der Arbeitsfläche) kommt.

	3m Fall 1	3m Fall 2	3m Fall 3	3m Fall 4	5m Fall 1	5m Fall 2	5m Fall 3	5m Fall 4
q_{Sol}	700 W	210 W	205 W	26 W	700 W	388 W	374 W	26 W
q_{tL}	41 W	41 W	41 W	232 W	46 W	46 W	46 W	232 W
Q	4444 Wh	1501 Wh	1472 Wh	1550 Wh	4477 Wh	2602 Wh	2523 Wh	1550 Wh

Tabelle 7: Wärmeenergieeinträge bei den verschiedenen Jalousiefällen und Abständen vom Fenster

q_{Sol} ist der Mittelwert der Sonnenleistung, q_{tL} die Leistung der technische Lichtquelle und Q der summierte Energieeintrag.

Der Energieeintrag ist bei 3m Arbeitsplatzentfernung vom Fenster im Fall 2, 3 und 4 sehr ähnlich. Praxisgerechterweise sollte aber davon ausgegangen werden, dass sich diese optimale immer wieder korrigierte Jalousiestellung nicht oder nur durch automatisierte Systeme, verwirklichen lässt.

In 5m Entfernung zum Fenster haben Leuchtstofflampen schon einen wesentlichen Vorteil gegenüber der Belichtung durch Sonnenlicht.

Erst bei besserem g-Wert wäre das Fenster in der Lage, den Wärmeenergieeintrag soweit zu beschränken, dass es besser wäre, bei Überwärmungsproblemen das Sonnenlicht in den Raum zu lassen. Vorausgesetzt ist aber, dass sich der Lichttransmissionsgrad nicht in demselben Maß verringert.

Der Gesamtenergieeintrag der Sonne beträgt ohne Sonnenschutzeinrichtung über den berechneten Zeitraum 4201Wh. Aus den berechneten Wärmeeinträgen kann man einen effektiven z-Wert errechnen, in dem die Lichtleistung der benötigten technischen Beleuchtung inbegriffen ist.

So betragen die gemittelten z-Werte bzw. der gemittelte totale effektive g-Wert und der effektive Abminderungsfaktor von Abschattungsvorrichtungen (z^* -Wert) für die berechneten Fälle:

	3m Fall 1	3m Fall 2	3m Fall 3	3m Fall 4	5m Fall 1	5m Fall 2	5m Fall 3	5m Fall 4
g-Wert	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
z-Wert	1.00	0.43	0.27	0.05	1.00	0.65	0.65	0.05
g_{tot} -Wert	0.74	0.32	0.20	0.04	0.74	0.48	0.48	0.04
z^* -Wert	1.06	0.36	0.35	0.37	1.07	0.62	0.60	0.37

Tabelle 8: gemittelte Gesamtenergiedurchlassgrade und Abminderungsfaktoren von Abschattungsvorrichtungen für die verschiedenen berechneten Fälle

5 Zusammenfassung

5.1 Gesamtenergiedurchlassgrad

Der g-Wert der untersuchten Verglasung wurde kalorimetrisch untersucht und ein effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad von 0,74 ermittelt. Dieser kann aber im Zuge dieser Diplomarbeit nicht durch die Simulation bestätigt werden. So ist dieser Wert als relativ ungenau anzusehen. Vor allem die korrekte Temperatur der Oberfläche Außenscheibe, wie aber auch die mittlere Temperatur der Oberfläche des Kalorimeters Richtung Innenraum, könnte diesen Wert noch etwas verändern. Diese Werte konnten im Rahmen dieser Arbeit aber nicht gemessen werden. Basierend auf dem effektiven Gesamtenergiedurchlassgrad wurden auch zwei unterschiedliche Jalousiestellungen kalorimetrisch untersucht. Die erhaltenen Abminderungsfaktoren für die Abschattungsvorrichtung von 0,07 für die Sperrstellung und 0,18 für die Waagstellung sind realistische Werte für diese Art von Jalousien. Korrekte Oberflächentemperaturen sind aber auch bei diesen Versuchen unabdingbar.

5.2 Beleuchtungsenergieeintrag

Durch die bei den Versuchen verwendeten fünf Luxmeter auf Schreibtischhöhe wird eine bestrahlungsabhängige Beleuchtungsfunktion vom Fenster bis zur fensterabgewandten Wand ermittelt. So beträgt die Formel für diesen Faktor $F = 12,922e^{-0,448 \cdot x}$, wobei x den Abstand zum Fenster darstellt.

Mithilfe der Ergebnisse des Gesamtenergiedurchlassgrades und der Jalousiesperrstellung als maximale Abschattungsart wurden vier Varianten der Jalousiebenützung gebildet, wobei sich die Jalousien von 100% (=Sperrstellung) auf 0% (=offen) variabel lichtabhängig einstellen lassen. Eine eventuelle Blendung wurde nicht berücksichtigt und ist im Zuge dieser Arbeit auch irrelevant.

In 3m Entfernung zum Fenster ist im gegebenen Fall mit optimalster Jalousiebenützung der Energieeintrag durch natürliche Beleuchtung in etwa gleich hoch wie der durch das Schließen der Jalousien und das ausschließliche Nutzen von Leuchtstofflampen als Lichtquelle.

In 5m Entfernung zum Fenster sind das Schließen der Jalousien und das Einschalten der technischen Lichtquelle erforderlich, um den Energieeintrag – als Beitrag zur sommerlichen Überwärmung – zu minimieren.

6 Literaturverzeichnis

- Bednar T.** (2003): *Research in Building Physics*, Carmeliet, Hens & Vermeir (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN: 90 5809 565 7
- Rietschel H.** (1994): *Raumklimatechnik*, 16. Auflage, herausgegeben von Horst Esdorn, ISBN: 3-540-54466-6
- Schmidt Reuter** (2007): *Leitfaden für Energiebedarfsausweise im Nicht-Wohnungsbau*; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Berlin
- Fraunhofer** (2008): (Fraunhofer Gesellschaft Solar Building Innovation Center SOBIC) *Sonnenschutz, Schutz vor Überwärmung und Blendung*, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-8167-7413-6
- Sack N.** (2001): Sack N., Kuhn T., Beck A.(ift Rosenheim); *Forschungsvorhaben Reges: Entwicklung einer Referenzmethode zur kalorimetrischen Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades von transparenten u. transluzenten Bauteilen*
- Cammerer Walter F.** (1995): *Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie* 5. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; ISBN: 3-540-57426-3
- AstAlm** (2006): *The Astronomical Almanac For The Year 2006*, The Stationery Office, London 2004, ISBN: 0-11-887333-4, zitiert in Wikipedia 08 <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstand>
- Meeus J.** (2000): *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Richmond 2000 (2nd ed., 2nd printing), ISBN: 0-943396-61-1 zitiert in Wikipedia 08 <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstand>
- Hohmann R.** (1993): Hohmann Tainer / Setzer Max J., *Bauphysikalische Formeln und Tabellen*; Werner Verlag GmbH; ISBN: 3-8041-2017-2

- EN ISO 6946** (2008): Österreichisches Normungsinstitut; *ÖNorm EN ISO 6946: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*
- EN 410** (1998): Österreichisches Normungsinstitut; *ÖNorm EN 410: Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*
- EN 673** (1998): Österreichisches Normungsinstitut; *ÖNorm EN 673: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) Berechnungsverfahren*
- B8110-3** (1999): Österreichisches Normungsinstitut; *ÖNorm B8110-3: Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse*
- Patankar S.** (1980): *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*; Hemisphere Publishing Corporation; ISBN: 0-89116-522-3

7 Nomenklatur

A	... Fläche	$[m^2]$
λ	... Wärmeleitkoeffizient	$[W/(m.K)]$
d	... Schichtstärke	$[m]$
Λ	... Wärmedurchlasskoeffizient	$[W/(m^2.K)]$
R_t	... Wärmedurchlasswiderstand	$[(m^2.K)/W]$
$\dot{w}$	... Energiestromdichte	$[W]$
ε	... Emissionsgrad	$[-]$
α	... Absorptionsgrad	$[-]$
σ	... Stefan Boltzmann Konstante ($5,6704 \cdot 10^{-8}$)	$[W/(m^2.K)]$
T	... absolute Temperatur ($0^\circ K = -273,15^\circ C$)	$[^\circ K]$
α_a	... äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$[W/(m^2.K)]$
α_i	... innerer Wärmeübergangskoeffizient	$[W/(m^2.K)]$
U	... Wärmedurchgangskoeffizient	$[W/(m^2.K)]$
q	... Wärmestromdichte	$[W/m^2]$
ρ	... Dichte	$[kg/m^3]$
t	... Temperatur	$[^\circ C]$
τ	... Strahlungstransmissionskoeffizient	$[-]$
g	... Gesamtenergiedurchlasskoeffizient (Fenster)	$[-]$
E / I	... Bestrahlungsstärke auf die ebene Fläche	$[W/m^2]$
E_v	... Beleuchtungsstärke	$[lx]$
λ_s	... Wellenlänge der Sonne	$[\mu m]$
a_s	... Azimut	$[^\circ]$
h_s	... Sonnenhöhe	$[^\circ]$
JD	... Julianische Tageszahl	$[d]$
JD_0	... Julianische Tageszahl für 0:00h	$[d]$
n_s	... Zeitvariable	$[d]$
L_s	... Ekliptikale Länge der Sonne	$[^\circ]$
g_s	... Mittlere Anomalie	$[^\circ]$
Λ_s	... Ekliptikale Länge	$[^\circ]$
ε_s	... Schiefe der Ekliptik	$[^\circ]$
α_s	... Rektazension	$[^\circ]$

δ_S	... Deklination	[°]
λ_S	... geographische Länge	[°]
φ_S	... geographische Breite	[°]
θ_G	... mittlere Sternzeit	[d]
θ_S	... Frühlingspunkt	[°]
τ_S	... Stundenwinkel	[°]
R_S	... Refraktion	[°]
h_{RS}	... korrigierte Höhe	[°]
q_{Sol}	... Mittelwert der Sonnenleistung	[W]
q_{tL}	... Mittelwert der Leistung der techn. Lichtquelle	[W]