

Fachbericht
ILK-B-31/06-3257
02.08.2006
Seitenzahl 22

Solarthermie2000plus: Messprogramm Solare Klimatisierung Berufsschule Rodewisch

Prof. Dr.-Ing. Uwe Franzke

Dipl.-Ing.(FH) Christian Friebe



Institut für Luft- und Kältetechnik
Gemeinnützige Gesellschaft mbH
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

Unterschrift des Projektleiters, Stempel

Zertifiziert nach ISO 9001

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH • Bertolt-Brecht-Allee 20 • 01309 Dresden
Geschäftsführer: Dr. rer. nat. habil. Ralf Herzog • Prokurist: Prof. Dr.-Ing. Uwe Franzke
Tel.: 0351/4081-520 • Fax 0351/4081-525 • E-Mail: gf@ilkdresden.de • <http://www.ilkdresden.de>
Commerzbank Dresden • Kto. 8 000 135 • BLZ 850 400 00 • Amtsgericht Dresden HRB 6118

Inhaltsverzeichnis

1 Arbeitspakete	5
1.1 Datenaufbereitung	5
1.2 Plausibilitätskontrollen	10
1.2.1 Kontrolle der Absorptionskältemaschine	10
1.2.2 Kontrolle Bereitstellung und Verbrauch Heizenergie Absorptionskältemaschine	11
1.3 Abgleich mit Simulationsmodellen	13
1.3.1 Überprüfung der Simulation der Strahlungsberechnung	13
1.3.2 Umrechnung der Strahlung von der gemessenen Strahlung auf die Horizontale auf beliebige Flächen	17
1.3.3 Überprüfung der Theorie zur äquivalenten Strahlungstemperatur	19
2 Literatur	22

Zwischenbericht

Zuwendungsempfänger:

Institut für Luft- und Kältetechnik

Gemeinnützige Gesellschaft mbH

Förderkennzeichen:

032 9605 B

Vorhabensbezeichnung:

Messprogramm solare Klimatisierung Berufsschule Rodewisch

Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2005 - 31.03.2008

Berichtszeitraum:

01.01.2006 - 30.06.2006

Stand und Ergebnisse

Einleitung

Der Neubau der Berufsschule für Wirtschaft und Technik in Rodewisch ist das deutschlandweit erste Schulprojekt mit einer dezentralen und fassadenintegrierten TGA-Technik. Diese Technik wird mit einem System der solaren Kühlung unter Nutzung weiterer heizungs- und kältetechnischer Backup-Systeme versorgt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind die besonderen Effekte der solaren Kühlung in Form einer experimentellen Untersuchung nachzuweisen. Dabei ist der Nachweis zu führen, dass auch derartig komplexe Energieversorgungssysteme den energetisch sinnvollen Einsatz der thermischen Solarenergie zu Kühlzwecken ermöglichen.

Stand der Bearbeitung

Im Berichtszeitraum wurden umfangreiche Daten über das Betriebsverhalten ermittelt. Das Messprogramm dient dem Nachweis des Verbrauchs in den dezentralen Geräten und der Ermittlung der aus den einzelnen Energiequellen bereitzustellenden Energiemengen.

Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung

Das Forschungsvorhaben wurde bislang in Übereinstimmung mit den geplanten Zielen realisiert.

Notwendige Veränderungen

keine Veränderungen

FuE-Ergebnisse von dritter Seite

Das im Forschungsvorhaben angestrebte Entwicklungsziel wird nach Kenntnis des ILK bislang von keiner anderen Stelle betrachtet, so dass es keine Einschränkungen hinsichtlich der Weiterführung des Forschungsvorhabens gibt.

Änderungen in der Zielstellung

keine

Erfindungen

keine

Spätere Verwertung

Die Entwicklungsergebnisse werden im Rahmen eigener Forschungsarbeiten des ILK vermarktet. Parallel wird das Ingenieurbüro Dr. Schlott bei seinen Planungsarbeiten die Erkenntnisse aus der Messdatenerfassung berücksichtigen und sich somit einen Wettbewerbsvorteil sichern.

1 Arbeitspakete

1.1 Datenaufbereitung

Zur Auswertung der Datenmengen wurde ein Programm erarbeitet, mit welchem die Messwerte aufbereitet und die zugehörigen Leistungen berechnet werden. Abbildung 1 zeigt die Ansicht des Programmes mit der Darstellung der Energieströme in der Zentrale.

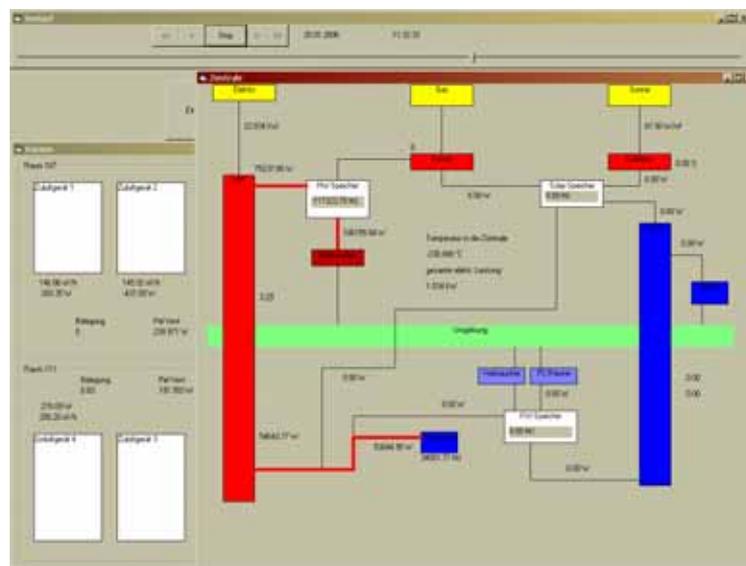


Abbildung 1 Darstellung des Auswertungsprogrammes, ersichtlich ist der Energiestrom zur Beheizung des Gebäude mittels der Wärmepumpe (Wärmequelle Erdsonden) am 20.01.2006 11:32

Aus den aufbereiteten Werten erfolgt die Darstellung der einzelnen Leistungen im Tagesverlauf (Abbildung 2), aus welchen Tagesmittel (Abbildung 3) und Monatsmittel (Abbildung 4) gebildet werden

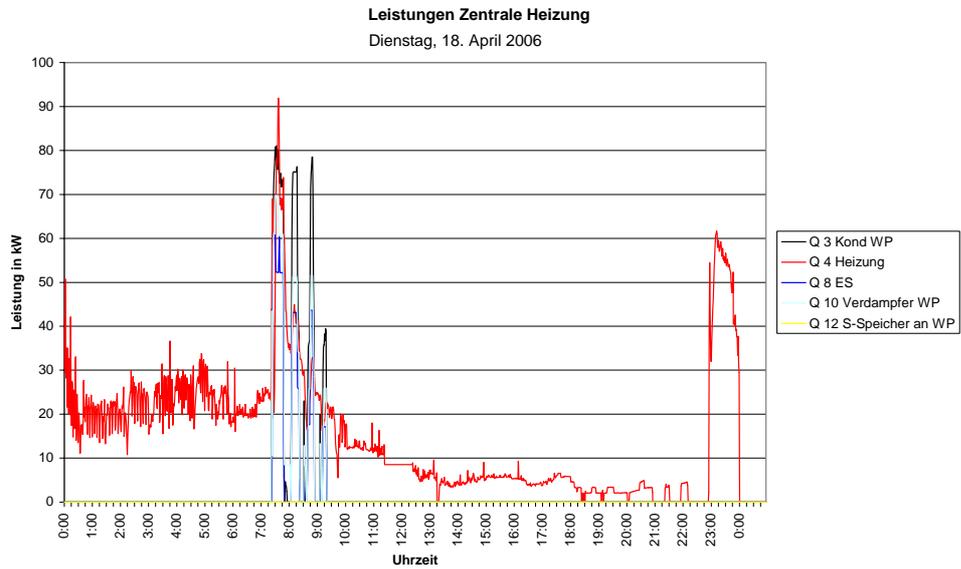


Abbildung 2 Leistung im Tagesverlauf für Energieströme, die der Beheizung des Gebäudes dienen (18.04.2006)

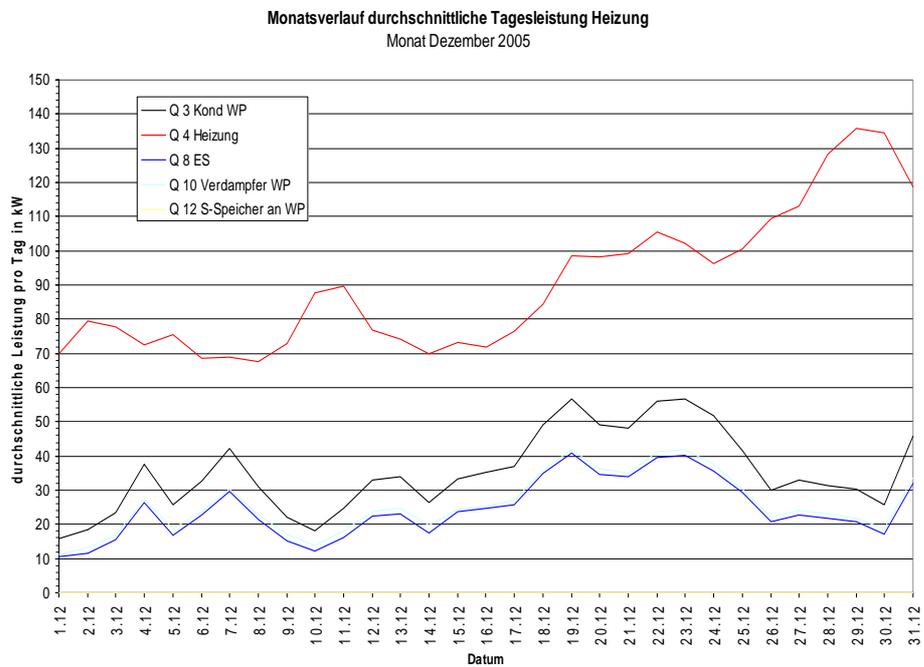


Abbildung 3 Verlauf der ermittelten Leistungen für die Beheizung des Gebäudes (Dezember 2005)

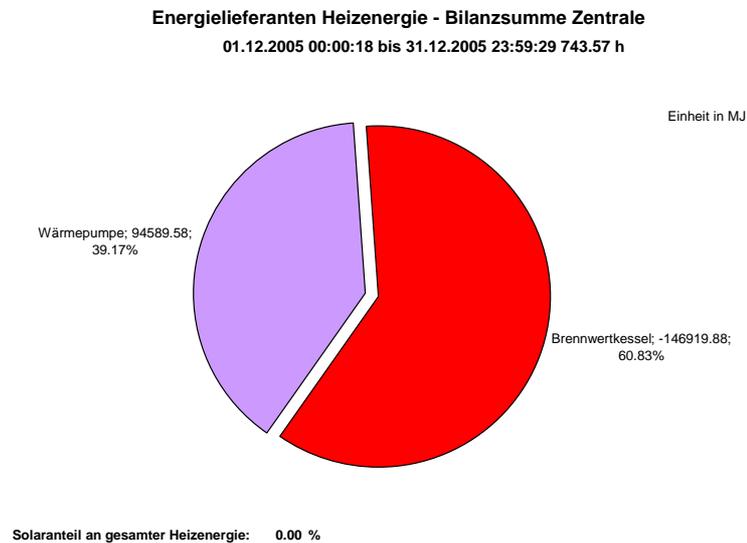


Abbildung 4 pro Monat erzeugte Energien und deren Aufteilung auf einzelne Lieferanten (am Beispiel Heizung im Dezember)

Aus den berechneten Leistungsverläufen können verschiedene Verhältnisse aufgestellt werden. Im Folgenden werden die bis zum jetzigen Zeitpunkt ermittelten Verhältnisse dargestellt.

Abbildung 5 zeigt das mittlere Wärmeverhältnis aus der zugeführten Energie zum Heizen und der gewonnenen Energie zum Kühlen der Absorptionskältemaschine pro Monat.

Aus Abbildung 6 geht der Anteil der Solarkollektoren an der Kälteerzeugung durch die Absorptionskältemaschine hervor. Die Werte Februar und März sind zu vernachlässigen, da in diesem Zeitraum keine Kälteerzeugung mittels AKM stattfand. In dieser Zeit wurde zwar mittels der Kollektoren die Temperatur des Solarspeichers angehoben, jedoch fand keine Nutzung dieser Wärme statt und es ist anzunehmen, dass diese Wärme über den Speicher dissipierte.

Abbildung 7 weist den Anteil der mit der Absorptionskältemaschine bereitgestellten Kälte an der gesamten Kälte aus. Neben der Absorptionskältemaschine kann mittels der Erdsonden Kühlwasser zur Klimatisierung bereitgestellt werden.

Aus Abbildung 7 und Abbildung 6 ergibt sich der Anteil der Solarkollektoren an der gesamten Kühlenergie (Abbildung 8).

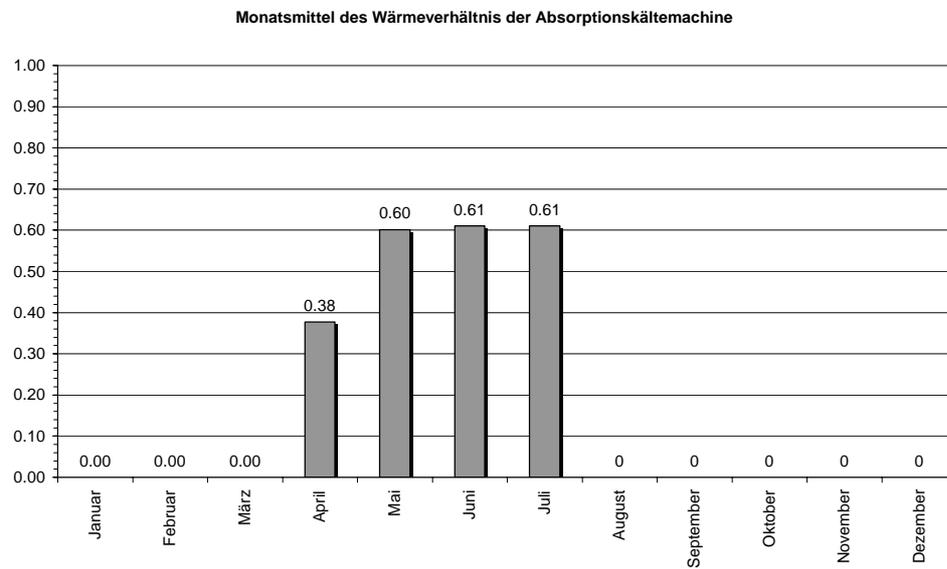


Abbildung 5 mittleres Wärmeverhältnis der Absorptionskältemaschine für den bis jetzt betrachteten Zeitraum

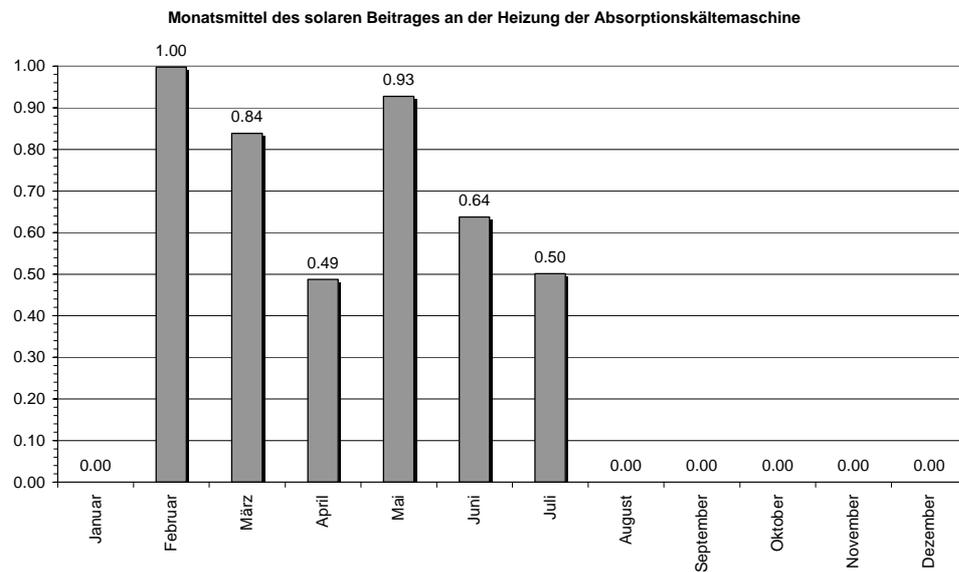


Abbildung 6 mittlerer monatlicher Anteil der Solarkollektoren an der Heizung der Absorptionskältemaschine.

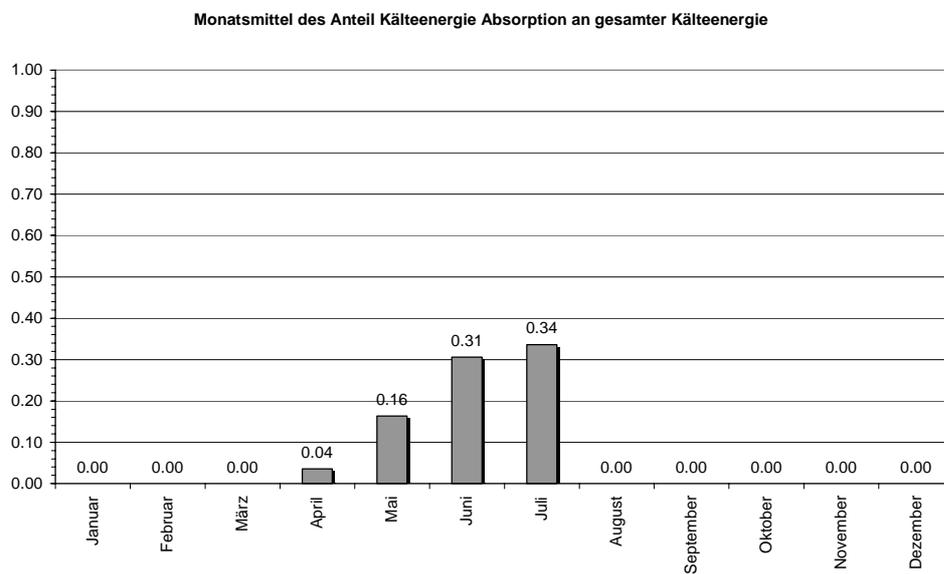


Abbildung 7 mittlerer monatlicher Anteil der AKM an der gesamten Kälteenergie für das Gebäude

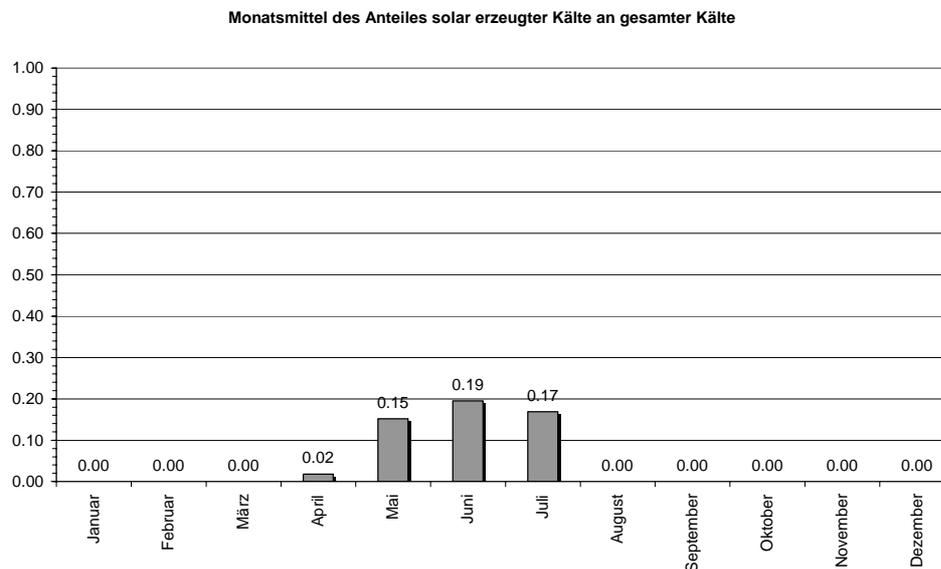


Abbildung 8 Anteil der mit Hilfe der Solarkollektoren ermöglichten Kälte an der gesamt bereitgestellten Kälte im Gebäude

1.2 Plausibilitätskontrollen

Es wurden verschiedene Kontrollen durchgeführt, welche dazu dienten, die Messwerte zu bestätigen und eine Abschätzung über Fehler treffen zu können.

1.2.1 Kontrolle der Absorptionskältemaschine

Die Bilanzierung aller ein- und ausgehenden Energieströme der Absorptionskältemaschine führen dazu, dass die durch die Heizung zugeführte und durch das verdampfende Kältemittel (Wasser) aufgenommene Energie über das Rückkühlwerk abgeführt werden muss. In Abbildung 9 ist ersichtlich, dass die gemessene Leistung des Rückkühlwerkes im Tagesmittel nahezu denkwertig mit der Summe aus der Kälte- und Heizleistung ist. Tendenziell liegt die Bilanzsumme leicht über der Angabe des Rückkühlwerkes. Dies kann mit den auftretenden Wärmeverlusten durch Rohrleitung etc. begründet werden.

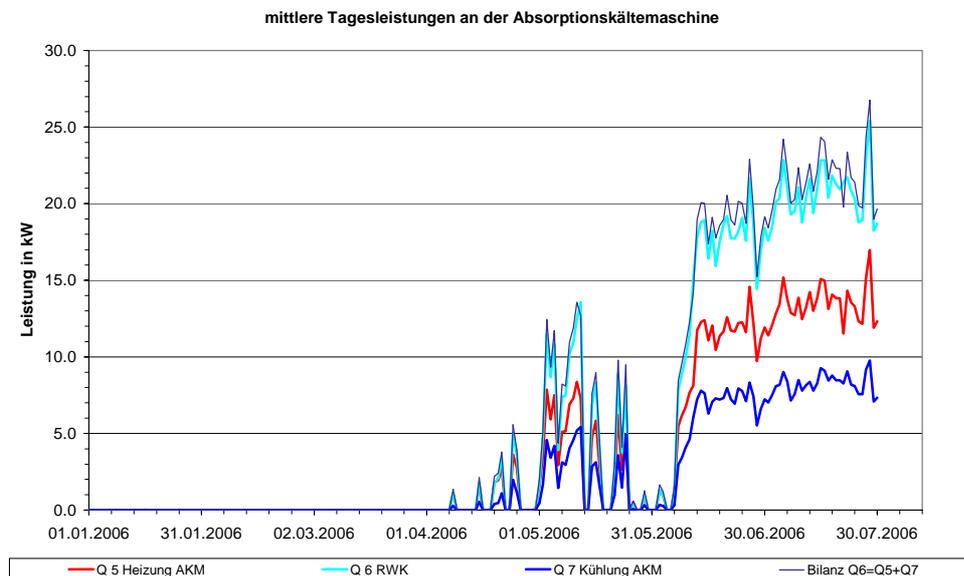


Abbildung 9 Verlauf der mittleren Tagesleistungen der Absorptionskältemaschine

1.2.2 Kontrolle Bereitstellung und Verbrauch Heizenergie Absorptionskältemaschine

Die Beheizung der Absorptionskältemaschine erfolgt durch Entnahme von heißem Wasser aus dem Solar-Warmwasserspeicher. Dieser Speicher wird mittels Energie aus den Kollektoren und als Backup-Maßnahme durch den Brennwertkessel gespeist. Die Verläufe der mittleren Tagesleistung sind in Abbildung 10 ersichtlich. Da im Gegensatz zu 1.2.1 eine zeitliche Entkopplung zwischen Energiezufuhr und Energieentnahme aus dem Speicher besteht, kann die Summe der zugeführten Energien von der Summe der entnommenen Energien abweichen. Aufgrund der Temperaturverhältnisse (im Speicher höhere Temperatur als im Raum) ist ein Verlust zu erwarten. Es kann nur weniger Energie entnommen werden als eingespeist.

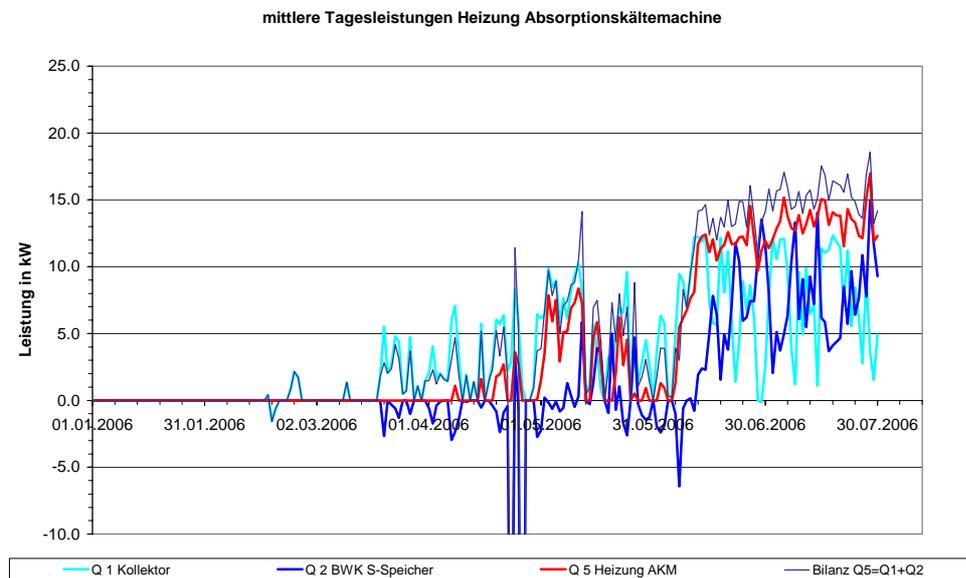


Abbildung 10 Verlauf der mittleren Tagesleistungen um den Solar-Warmwasserspeicher

Wie ersichtlich, ist dies der Fall. Bei Betrachtung des Zeitraumes ab Anfang Juli (deutliche Inanspruchnahme der Absorptionskältemaschine) liegt die Summe der eingespeisten Energie stets über der entnommenen Energie. Die Differenz zwischen den beiden Werten ist der Verlust über den Speicher. Am Speicher selbst erfolgt keine Temperaturmessung, weshalb keine Aussage zu den Dämmungseigenschaften des Behälters getroffen werden kann.

Die negativen Werte im Zeitraum Anfang des Jahres bis Mitte Juli der als Backup fungierenden Energielieferung vom Brennwertkessel an den Speicher, insbesondere die auffälligen Werte Ende Mai, sind auf ihre Ursache hin gesondert zu untersuchen.

1.3 Abgleich mit Simulationsmodellen



Abbildung 11 Satellitenaufnahme des BSZW Rodewisch; geografische Lage des Kollektorfeldes: 50,527741° Nord und 12,402798 (Quelle: Google Earth 4.0.1693(beta) 13.07.2006)

1.3.1 Überprüfung der Simulation der Strahlungsberechnung

Für viele Simulationsprogramme (Kühlenergiebedarf, Kollektorleistung,...) wird die Einstrahlung auf die horizontale Oberfläche benötigt. Diese Einstrahlung kann mit Hilfe verschiedener Modelle berechnet werden. Für die Simulation wurde ein Modell auf Basis VDI 6020-1 /2/ und VDI 2078 /3/ erstellt. Diese Normen werden für die Berechnung der Kühllast von Gebäuden verwendet. Als Vergleich zwischen Simulation und Messung wurde ein Tag aus der Messung ausgewählt, der im Sommer liegt, hohe Temperaturen aufweist und keine Bewölkung hatte. Eine solche Schönwetterperiode gab es Mitte Juli. Der 19. Juli war dabei der dritte Tag in Folge, der diese Bedingungen aufweist. Deshalb wurde dieser Tag als Referenztag für alle weiteren nachfolgenden Betrachtungen ausgewählt. Verglichen wurde dieser Tag mit den Simulationsergebnissen aus den typischen Werten für Juli.

Erst während der Reihe klarer Tage im Juli fiel auf, dass regelmäßig um die Mittagszeit der Strahlungssensor einen Einbruch der Strahlung aufwies (siehe Abbildung 12). Dieser ca. 30 min dauernde Strahlungseinbruch ist vermutlich auf einen Schlagschatten zurückzuführen. Für weitere Betrachtungen wurde der Schatten mit vernünftigen Annahmen aus der Messung herauskorrigiert.

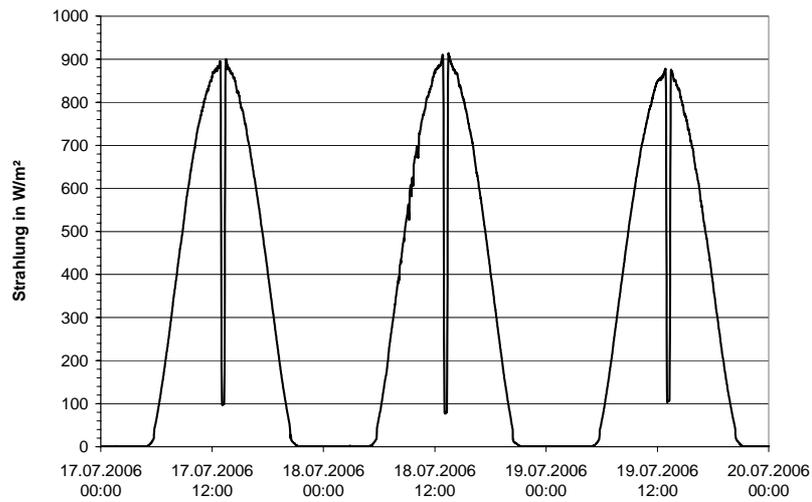


Abbildung 12 gemessener Strahlungsverlauf auf die Horizontale mit charakteristischer Schattenbildung zur Mittagszeit

Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der Messwerte ist in Abbildung 13 zu sehen.

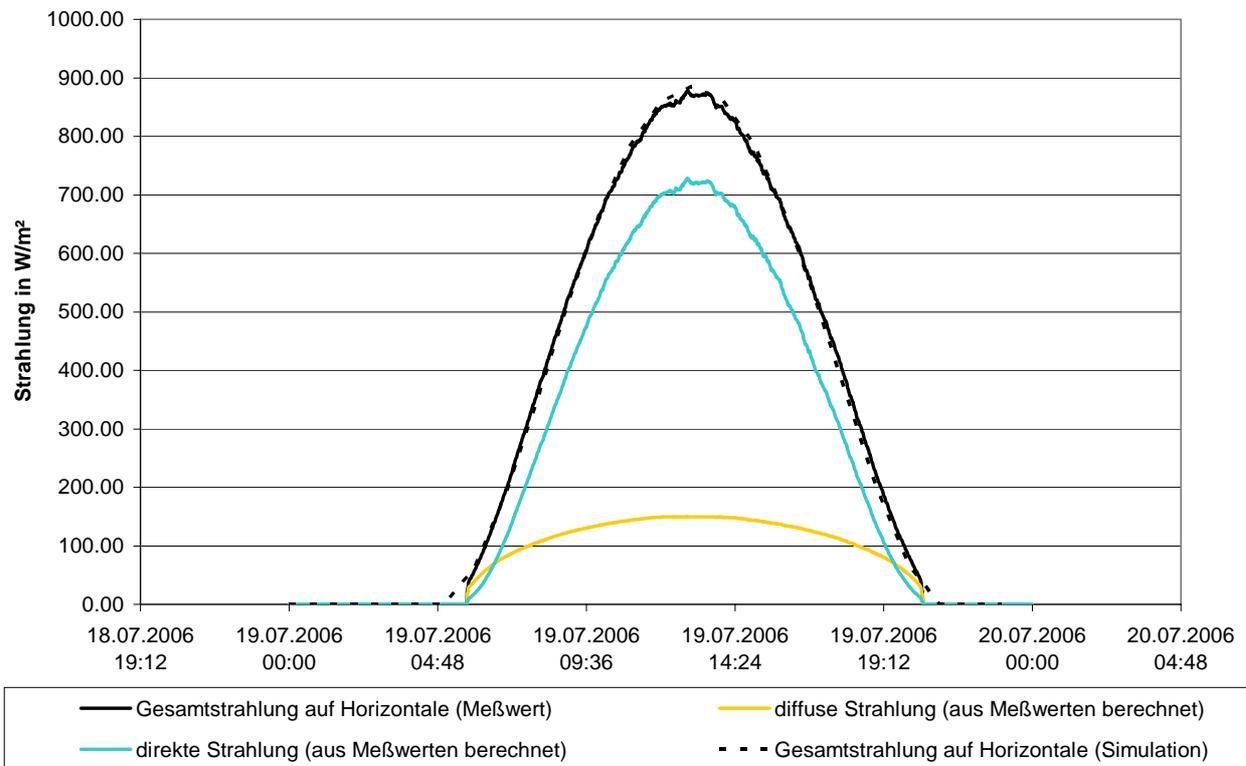


Abbildung 13 Strahlungsverlauf auf die Horizontale, simuliert (Juli), gemessen(19.07.2006) und berechnet

Trotz der willkürlichen Auswahl des Tages ist die äußerst starke Ähnlichkeit zwischen Rechnung und Messung ersichtlich. Des Weiteren sind die aus den Messergebnissen ermittelten Anteile der direkten und diffusen Strahlung dargestellt. Da keine Messung des diffusen Anteiles erfolgte, wurde auf Basis der Verhältnisse zwischen diffuser Strahlung und Gesamtstrahlung aus der Simulation eine Aufteilung der gemessenen Gesamtstrahlung vorgenommen. Dieser Ansatz erscheint aufgrund der guten Kongruenz der Gesamtstrahlung zwischen Messung und Simulation als angebracht.

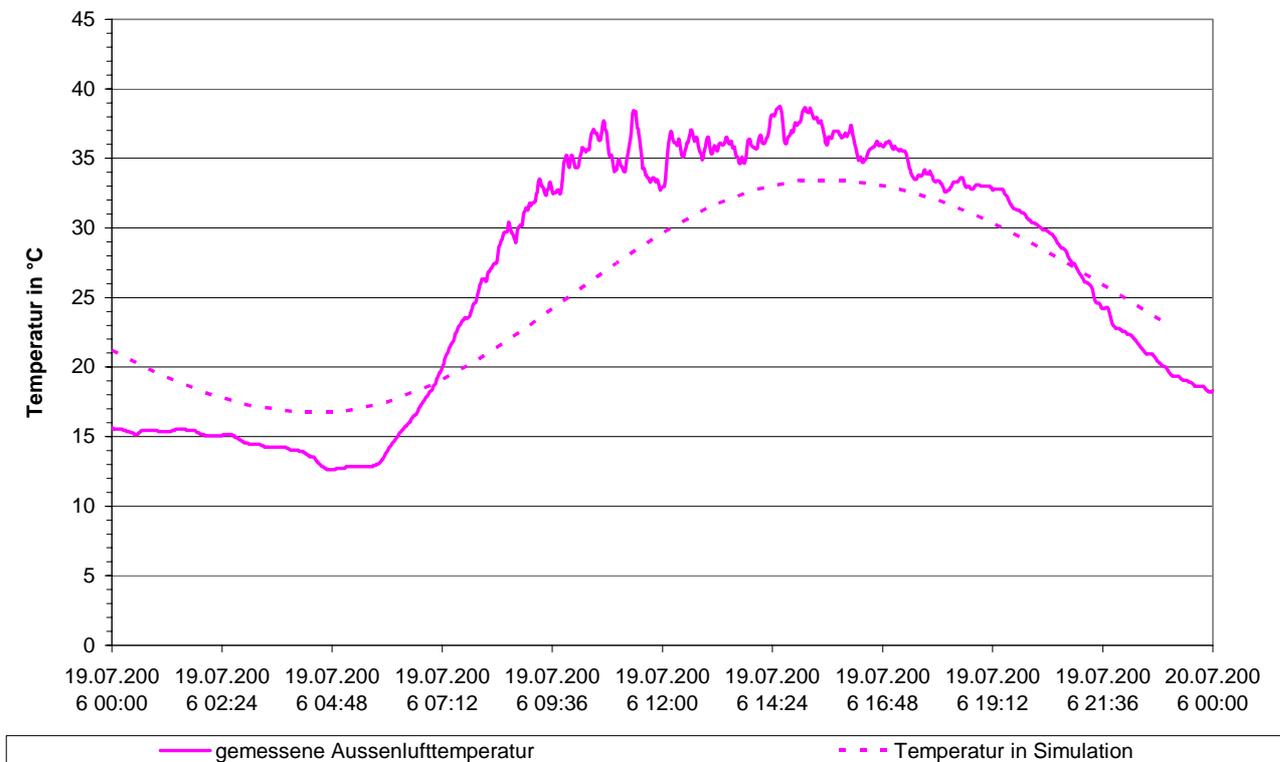


Abbildung 14 Verlauf der Außenlufttemperatur, Vergleich zwischen Simulation (Juli) und Messung (19.07.2006)

In der als Basis für die Simulation der klimatischen Bedingungen gewählten Norm (/2/, /3/) wird der Verlauf der Außenlufttemperatur in Form einer Sinuskurve beschrieben. Eine solche Funktion kann leicht die Informationen für einen simulierten Verlauf der Außenlufttemperatur wiedergeben. Jedoch ist in Abbildung 14 ersichtlich, dass es einen markanten Unterschied zwischen Messung und Simulation gibt. Zwar erreicht die Simulation ähnliche Spitzenwerte (die gemessenen Werte von über 35°C sind untypisch hoch für die Region, derzeit gilt für die sommerliche Betrachtung 32°C als Höchstwert), jedoch ist der realistische Verlauf der Temperaturen durch einen schnellen, steilen Anstieg der Temperaturen am Morgen, einem Mittagshochplateau, einem etwas langsameren Abklingen der Temperaturen am Abend, und einem nächtlichen Tiefplateau gekennzeichnet. Für exaktere Simulationen sollte daher auf diesen Unterschied geachtet werden, da dieser z.B. für eine Betrachtung der nächtlichen Kühlung einen wichtigen Unterschied darstellt.

Die mittleren Tagestemperaturen sind mit 25,1°C (simuliert) und 26,3°C (gemessen) ähnlich.

1.3.2 Umrechnung der Strahlung von der gemessenen Strahlung auf die Horizontale auf beliebige Flächen

Für die Ermittlung der Strahlungsbelastung auf die einzelnen Fassaden des Gebäudes und speziell für die vorzunehmende Simulation der zwei Computerkabinette muss eine Umrechnung der gemessenen Gesamtstrahlung auf die Horizontale auf beliebig orientierte Flächen (z.B. nach Westen oder Osten) erfolgen.

Basierend auf vorhandenen Algorithmen zur Strahlungsumrechnung wurden Anpassungen vorgenommen, mit deren Hilfe diese Umrechnungen für den Standort Rodewisch vorgenommen werden können.

Ausgehend von Abbildung 11 wurde für die Räume R107 (grob nach Westen orientiert) und R111 (grob nach Osten orientiert) die Ausrichtung ermittelt (Abbildung 15).



Abbildung 15 Ermittlung der Himmelsrichtung der Räume R107 und R111; die Achse des Traktes mit den beiden Räumen ist um $19,8^\circ$ gegen der Nordausrichtung geneigt

Die Außenwände der Räume zeigen demnach nach $109,8^\circ$ (R111) und nach $289,8^\circ$ (R107).

In Abbildung 16 sind die aus der gemessenen Strahlung auf die Horizontale errechneten Verläufe der direkten und diffusen Strahlung auf die Außenwände von R111 und R107 zu sehen.

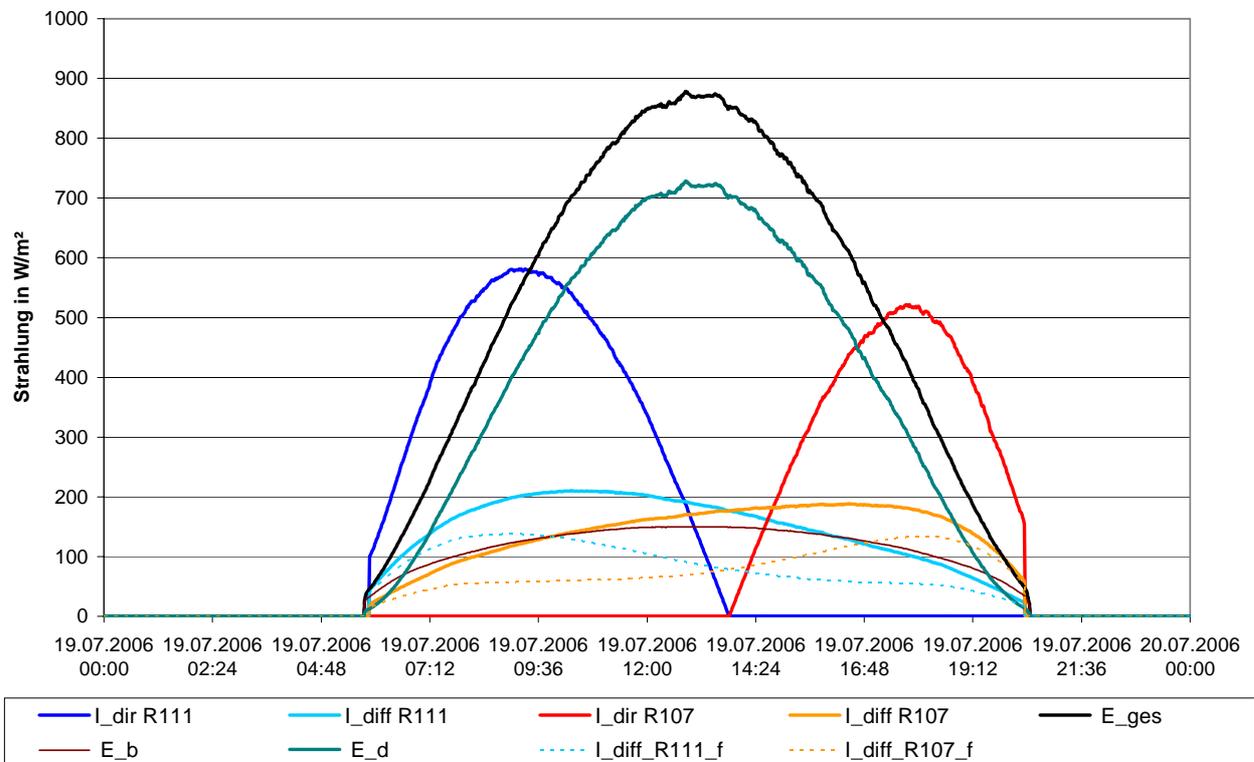


Abbildung 16 Beispielhafter Strahlungsverlauf und Berechnung der nicht gemessenen Einstrahlung auf eine nach Osten und eine nach Westen orientierte Wand am 19.07.2006 auf der gemessenen Einstrahlung auf die Horizontale (E_{ges})

Die direkte und die diffuse Strahlung auf die Wände entsprechen dabei den nach Abbildung 17 erwarteten Verläufen. Sie weisen einen symmetrischen Verlauf auf.

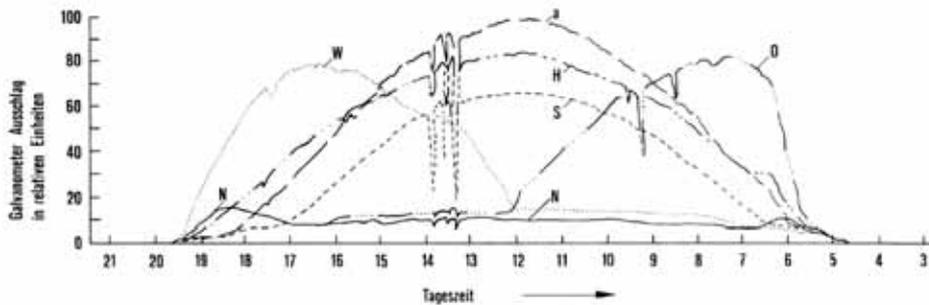


Bild 2-8 Gemessene Strahlungswerte vom 9. August 1953 nach *Gräfe* aus [12]

N	Empfangsfläche vertikal nach Norden	W	Empfangsfläche vertikal nach Westen
S	Empfangsfläche vertikal nach Süden	H	Empfangsfläche horizontal
O	Empfangsfläche vertikal nach Osten	a	Empfangsfläche unter 45° nach Süden

Abbildung 17 gemessene Strahlungsverläufe nach /1/

1.3.3 Überprüfung der Theorie zur äquivalenten Strahlungstemperatur

Die Theorie der äquivalenten Strahlungstemperatur besagt, dass für die Berechnung des Wärmedurchganges durch eine Gebäudehülle der auf die Hülle treffende Strahlungsanteil mittels einer Korrektur der Außentemperatur berücksichtigt werden kann.

$$T_{\text{komb,e}} = T_{\text{L,e}} + \frac{a_s \cdot I}{\alpha_e}$$

Diese Annahme soll überprüft werden.

Dazu wird im ersten Schritt angenommen, dass die durch die Fassadenlüftungsgeräte angesaugte Lufttemperatur gleich der äquivalenten Strahlungstemperatur ($T_{\text{SonneR111}}$) ist. In Abbildung 18 sind die Temperaturverläufe und der nach 1.3.2 ermittelte Strahlungsverlauf auf die Wand für den Raum R111 aufgetragen.

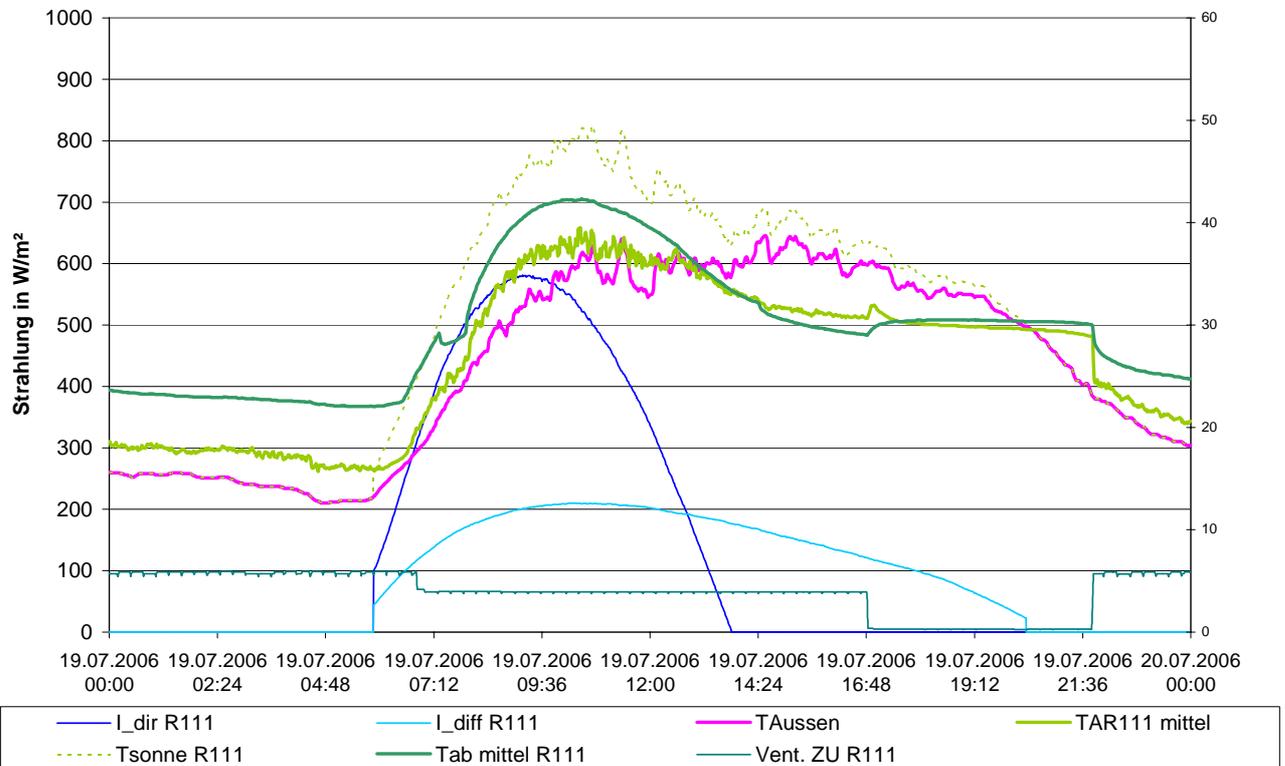


Abbildung 18 Betrachtung der äquivalenten Strahlungstemperatur auf die Außenwand des Raumes 111 (nach Osten ausgerichtet)

Entgegen den Erwartungen liegt die berechnete äquivalente Strahlungstemperatur (T_{Sonne} R11) deutlich über den gemessenen Werten in der angesaugten Außenluft ($TAR111$ mittel).

Eine Erklärung für diese Beobachtung könnte folgenden Hintergrund haben. Der Volumenstrom, welcher sich an einer warmen vertikalen Wand bildet ergibt sich für den turbulenten Bereich ($Gr(h) \cdot Pr > 10^8$) nach VDI 3803 /4/ nach folgender Formel

$$\dot{V}(h) = 0,104 \cdot v_w \cdot Gr(h)^{0,4} \cdot b$$

Bei einer angenommenen Höhe von 1 m, einer Wandtemperatur von $60^{\circ}C$ und einer Lufttemperatur von $30^{\circ}C$ ergibt sich die Grasshof-Zahl zu ca. $26,136 \cdot 10^8$, die Prandtl-Zahl ist 0,72.

Für eine Breite von 1,5 m folgt damit ein Volumenstrom von ca. 63 m³/h. Die Lüftungsgeräte saugen jedoch einen Volumenstrom von nominell 120 m³/h an. Eine Vermischung von erhitzter Luft aus der thermischen Grenzschicht der Fassade und der Außenluft kann die Differenz sowohl zwischen Außentemperatur und angesaugter Luft, als auch zwischen errechneter Temperatur und Temperatur der angesaugten Luft in den Vormittagsstunden erklären. Keine Erklärung jedoch gibt dieser Ansatz für die niedrigere Temperatur der angesaugten Luft im Vergleich zur Außenlufttemperatur ab ca. 13 Uhr. Ab dieser Uhrzeit könnte mit teilweiser Umluft gefahren werden, jedoch ist hier die Lage der Temperatursensoren zu überprüfen. Unverständlich ist der hohe Wert der Ablufttemperatur (entspricht der Raumluft), der in den Vormittagsstunden zum Teil deutlich über der Außenlufttemperatur liegt.

2 Literatur

- /1/ Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik: „Lehrbuch der Klimatechnik, Band 1: Grundlagen“ 2., durchgesehene Auflage, Verlag C.F. Müller Karlsruhe, 1974
- /2/ Verein deutscher Ingenieure: „Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation – Gebäudesimulation –“, Norm VDI 6020-1, Mai 2001
- /3/ Verein deutscher Ingenieure: „Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)“, Norm VDI 2078, Juli 1996
- /4/ Verein deutscher Ingenieure: „Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten“, Norm VDI 3802, Dezember 1998