

Monitoring, Experimente und Datenanalyse für die Nachtlüftung im Verwaltungsgebäude Pollmeier

Diplomarbeit
an der
Fachhochschule Erfurt
FB Versorgungstechnik

vorgelegt von
Jeannette Wapler
am 05.12.2002

1. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. M. Kappert
2. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. B. Stanzel

bearbeitet am



Fraunhofer Institut
Solare Energiesysteme

Betreuer: Herr J. Pfafferott

Kurzzusammenfassung

Nächtliche Lüftung stellt eine Möglichkeit dar, die sommerlichen Raumtemperaturen am Tag im Behaglichkeitsbereich zu halten und gleichzeitig auf eine aktive Klimatisierung zu verzichten.

Entscheidend für die Begrenzung des Anstieges der Raumtemperatur ist die Speicherung der am Tag anfallenden Lasten in der Baukonstruktion. Die eingespeicherte Wärmemenge ist außer von der effektiven Speicherkapazität der Raumumschließungsflächen und deren thermischer Kopplung an die Raumluft noch von der Temperaturschwankung der Raumluft vor der Bauteiloberfläche abhängig. Wie Messungen der Raumlufttemperatur in den Büroräumen des Verwaltungsgebäudes zeigten, nehmen hier die Temperaturschwankungen mit der Entfernung von der Außenfassade und mit der Höhe ab. So ist die Temperaturschwankung, als „Potential“ für die einzuspeichernde Wärmemenge zu verstehen, an der Decke um 30% kleiner als am Fußboden.

Die Wärmemenge, die in der Nacht abgeführt wird, ist in dem untersuchten Gebäude sehr unterschiedlich. Bei einer ausschließlich mechanischen Entlüftung ($n \approx 0,8$ 1/h) ist der Luftwechsel nicht ausreichend, um selbst an Tagen mit einem mittleren Lasteintrag ein Aufschaukeln der Raumtemperatur zu vermeiden. Hingegen erweist sich die Nachtlüftung an Tagen, an denen durch Öffnen von Schlitzfenstern ein zusätzlicher natürlicher Luftaustausch den Luftwechsel erhöht, als ausreichend effektiv. Das die Raumlufttemperatur während der Sommerperiode an weniger als 10% der Betriebszeit über 26°C liegt, zeigt, dass die Speichermassen in ausreichendem Maße aktiviert werden können.

Summary

During summer, night-time ventilation enables the limitation of daytime room temperatures to comfortable levels while avoiding the need of active air conditioning.

The storage of daytime loads in the building's structure is crucial for the limitation of the rising of the room temperature. During night the stored heat is transported outside by the ventilation.

The stored heat depends not only on the heat capacity of the building components and their thermal coupling with the indoor air but also on temperature variations in the air near the building structure surfaces.

Measurements in offices of the analysed administration building have shown decreasing variations in temperature with increasing height and distance to the outer walls.

Thus, the temperature variations, which are 30% smaller at the ceiling, may be interpreted to be the potential of the heat that needs to be stored.

The heat that is removed during night varies significantly within the building that was subject of the experiment. Using only mechanical ventilation ($n \approx 0,8$ l/h) the air exchange is not sufficient to avoid an increasing air temperature even for days of standard incoming loads.

On the other hand nightly ventilation proves to be sufficiently effective for days during which exchange through open slit windows provides additional air transportation.

The fact that, during the summer period, the room temperature is above 26°C (the tolerated limit) during less than 10% of the operating hours shows that sufficient heat capacities may be activated.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	10
2	DAS GEBÄUDE.....	11
2.1	Konzept.....	11
2.2	Objektbeschreibung.....	11
2.3	Baukonstruktion.....	13
2.4	Gebäudetechnik.....	14
2.4.1	Klimakonzept.....	14
2.4.2	Lüftung.....	14
2.5	Regelungskonzept.....	16
2.5.1	Lüftung.....	16
2.5.2	Sonnenschutz.....	17
3	DIE MESSDATEN.....	18
3.1	Datenbasis.....	18
3.2	Langzeitmessungen.....	18
3.2.1	Messdaten.....	18
3.2.2	Korrektur fehlender Messwerte.....	19
3.3	Kurzzeitmessungen.....	21
3.4	Der Referenzraum.....	21
4	ÄÜßERE UND INNERE LASTEN.....	22
4.1	Meteorologische Parameter.....	22
4.1.1	Grundlagen.....	22
4.1.2	Messwerte.....	23
4.2	Innere Wärmequellen.....	25
4.2.1	Grundlagen.....	25
4.2.2	Messwerte.....	26
5	DIE LÜFTUNG.....	27
5.1	Grundlagen.....	27
5.1.1	Zusammenfassung.....	27
5.1.2	Luftströmung durch Öffnungen.....	28
5.1.3	Luftwechsel in Folge von Temperaturunterschieden.....	30
5.1.4	Luftwechsel in Folge von Wind.....	31
5.1.5	Luftwechsel in Folge einer Lüftungsanlage.....	34
5.1.6	Überlagerung verschiedener treibender Kräfte.....	34
5.1.7	Richtwerte für den natürlichen Luftwechsel.....	35
5.1.8	Luftwechsel und Lüftungswirksamkeit.....	36

5.2	Der Luftwechsel im Büroraum	37
5.2.1	Überlegungen zum Luftwechsel	37
5.2.2	Fensteröffnungszeiten	38
5.2.3	Messwerte: Mechanischer Volumenstrom	39
5.3	Messungen: Tracer-Gas	41
5.3.1	Zielstellung	41
5.3.2	Messprinzip	41
5.3.3	Durchführung	41
5.3.4	Auswertung	42
5.4	Strömungsvisualisierung: Zuluftstrom	43
5.4.1	Zielstellung	43
5.4.2	Messprinzip	43
5.4.3	Versuchsdurchführung	43
5.4.4	Beobachtung	44
5.4.5	Auswertung	45
6	DIE RAUMTEMPERATUR	46
6.1	Messung: Oberflächentemperatur	46
6.1.1	Zielstellung	46
6.1.2	Messprinzip	46
6.1.3	Versuchsdurchführung	47
6.1.4	Bewertung der Messergebnisse	49
6.1.5	Beobachtung	50
6.1.6	Auswertung	53
6.2	Messung: Temperaturverteilung im Raum	55
6.2.1	Zielstellung	55
6.2.2	Durchführung	55
6.2.3	Beobachtung	56
6.3	Die GLT-Temperatur	62
6.3.1	Der GLT-Temperaturfühler	62
6.3.2	Vergleich GLT-Temperatur und Lufttemperatur	62
6.3.3	Die Referenztemperatur	63
6.4	Auswertung Raumlufttemperatur	67
6.4.1	Auswertungszeitraum	67
6.4.2	Temperaturen der Büroräume im Vergleich	67
6.4.3	Temperaturen und Behaglichkeitsfeld nach DIN 1946 T2	68
6.4.4	Dauerlinie	69
6.4.5	Tagesgang der Raumlufttemperatur	70

7	INSTATIONÄRE WÄRMELEITUNG UND WÄRMESPEICHERUNG	72
7.1	Speicherfähigkeit des Raumes	72
7.2	Grundlagen	73
7.3	Einführung von dynamischen Kenngrößen	75
7.4	Berechnung der Wärmeleitung und Wärmespeicherung eines Bauteils.....	78
	7.4.1 Grundlagen	78
	7.4.2 Wärmeleitung durch eine Außenwand.....	79
	7.4.3 Wärmespeicherung	81
7.5	Wärmespeicherkapazität im Referenzraum.....	84
8	DAS THERMISCHE VERHALTEN DES RAUMES.....	89
8.1	Grundgedanke.....	89
8.2	Die Energiebilanz: Der Ansatz	90
	8.2.1 Ansatz.....	90
	8.2.2 Bestimmung der Energieströme.....	91
8.3	Auswertung der Bilanz der Sommerperiode.....	97
	8.3.1 Temperaturen und Globalstrahlung	97
	8.3.2 Die mittlere Tagesenergiebilanz.....	98
	8.3.3 Mittlere Tagesgänge der Wärmeströme.....	100
8.4	Auswertung der Tagesenergiebilanzen.....	102
	8.4.1 Zuverlässigkeit der Ergebnisse	102
	8.4.2 Bilanzierungszeitraum	102
	8.4.3 Tagesmitteltemperaturen während der Sommerperiode	103
	8.4.4 Tagesenergiebilanzen	103
	8.4.5 Tageslüftung und Wärmedurchgang in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.....	105
	8.4.6 Solare Wärme in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	106
	8.4.7 Nachtlüftung in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	108
8.5	Effektivität und Energieeffizienz der Nachtlüftung	110
	8.5.1 Effektivität der Nachtlüftung.....	110
	8.5.2 Energieeffizienz der Nachtlüftung.....	113
8.6	Eingespeicherte Wärmemenge und Speicherkapazität.....	115
8.7	Parametermodell nach Keller	116
	8.7.1 Ansatz.....	116
	8.7.2 Bestimmung der Parameter.....	119
	8.7.3 Auswertung: Raumtemperatur während der Sommerperiode.....	124
	8.7.4 Zeitkonstante und Speicherkapazität des Raumes	125
8.8	Speicherfähigkeit des Raumes.....	126
9	ZUSAMMENFASSUNG	128

ANHANG

A.1	Literaturverzeichnis	130
B.1	Ansichten	132
B.2	Grundriss 2. OG und Schnitt Nord-Ost	133
B.3	Bauteile	134
B.4	Thermographieaufnahmen „Deckenprofil“	135
B.5	Thermographieaufnahmen „Abhängung“	136
B.6	Thermographieaufnahmen „Kante“	137
B.7	Berechnung der Speicherfähigkeit	138

Formelverzeichnis

a	Absorptionsgrad
A	Querschnittsfläche
b	Wärmeeindringzahl
C	Speicherkapazität
c	spezifische Speicherkapazität
c_p	Druckbeiwert
C'	Speicherfunktion
C_d	Öffnungsbeiwert
C_{eff}	Effektive Speicherkapazität
C_{∞}	dynamische Speicherkapazität
d	Schichtdicke
g	Gesamtenergiedurchlassgrad
h	Höhe
H	Höhe der Fensteröffnung
I	Sonneneinstrahlung
K	Verlustfaktor
l	Länge
n	Luftwechselzahl
n_{50}	Kennwert für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle
p	Druck
P_i	Innere Wärmegewinne
q	Wärmefluss
\dot{q}	Wärmeflussdichte
\dot{Q}	Wärmefluss
Q	Wärmemenge
R	Widerstand
T	Lufttemperatur
T	Periode

t	Zeit
U	Wärmedurchgangskoeffizient
V	Raumvolumen
\dot{V}	Volumenstrom
v	Geschwindigkeit
z	dimensionslose Dicke
α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Kopplungsfaktor
ε	Emissionsgrad
γ	Gewinn-zu-Verlustverhältnis
ϑ	Temperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
σ	Eindringtiefe
τ	Zeitkonstant
ω	Kreisfrequenz
Ψ	Apertur

Index

α	Wärmeübergang
a	außen
äqu	äquivalent
d	Tag
eff	effektiv
el	elektrisch
GLT	Gebäudeleittechnik
H	Heiz-
i	innen
K	Kühl-
L	Lüftung
max	maximal
mech	mechanisch
NL	Nachtlüftung
o	Normbedingungen
ref	Referenz
S	Solar
Sp	Speicher
T	Transmission
U	Oberfläche der Umgebung
v	Vorschicht
w	Wand
y	Jahr

1 Einleitung

Bei dem Verwaltungsgebäude der Firma Pollmeier wurde als ein Baustein der schlanken und energieeffizienten Gebäudetechnik als Konzept der sommerlichen Kühlung eine nächtliche Lüftung realisiert.

Nächtliche Lüftung basiert auf dem Prinzip, die am Tag anfallenden Lasten zu speichern und damit den Anstieg der Raumlufttemperatur zu begrenzen. In der Nacht wird die gespeicherte Wärmemenge mit der Lüftung abgeführt. In dem Gebäude Pollmeier wird dies durch eine Kombination aus mechanischer Entlüftung und natürlicher Lüftung realisiert.

Die Mechanismen des Wärmeaustausches und der Wärmespeicherung zum einen und die vielschichtigen Abhängigkeiten der natürlichen Lüftung zum anderen lassen ein komplexes System entstehen. Nur durch Reduzierung der Einflussgrößen auf die wesentlichen ist eine transparente Analyse der Funktion der Nachtlüftung möglich.

In der Arbeit werden die wesentlichen theoretischen Zusammenhänge der Nachtlüftung erläutert, einfache Berechnungsansätze vorgestellt und angewendet und der Auswertung der Messkampagne gegenübergestellt.

Zunächst werden die zentralen Abhängigkeiten der natürlichen Lüftung vorgestellt und die Anwendbarkeit einfacher Planungshilfen für dieses Gebäude überprüft. Eine Tracer-Gas-Messung des Luftwechsels soll eine Abschätzung des realen Luftwechsels ermöglichen.

Kurzzeitmessungen der Verteilung der Raumlufttemperatur sollen zusammen mit der Auswertung der stationären Messwerterfassung Aufschluss über den thermischen Komfort in den Büroräumen geben.

Es werden die thermodynamischen Zusammenhänge der Wärmespeicherung vorgestellt, um anschließend eine abschätzende Berechnung der Speicherfähigkeit des Raumes durchzuführen. Diese wird den Ergebnissen, die sich aus der Energiebilanz des Raumes ableiten lassen, gegenübergestellt.

Die Energiebilanz des Raumes wird auf Grundlage der vorhandenen Messdaten aufgestellt. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die Effektivität der Nachtlüftung und die Speicherfähigkeit des Raumes ziehen.

Abschließend wird ein Modell vorgestellt, das durch Reduzierung auf drei charakteristische Parameter eine transparente Beschreibung des thermischen Gebäudeverhaltens ermöglicht. Es soll an diesem Gebäude für die Sommerperiode überprüft werden.

2 Das Gebäude

2.1 Konzept

Der Neubau des Verwaltungsgebäudes der Firma Pollmeier Massivholz GmbH befindet sich in Creuzburg (nahe Eisenach / Thüringen). Das Gebäude wurde im September 2001 bezogen und wird derzeit von rund 70 Mitarbeitern genutzt.

Ziel der Planung war es, einen Gebäudeentwurf zu realisieren, der optimale Arbeitsbedingungen hinsichtlich der Tages- und Kunstlichtverhältnisse sowie hinsichtlich des zu erwartenden Raumklimas schafft. Dies sollte bei Einsatz einer schlanken Gebäudetechnik und einem Höchstmaß an Energieeffizienz erreicht werden. Der Energiebedarf des Gebäudes und dessen haustechnische Anlagen wurden auf der Grundlage der Preis-Leistungs-Verhältnisse verschiedener Energieeinsparmaßnahmen minimiert. Dafür wurden die Innenraumtemperaturen in den Sommermonaten mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS simuliert.

Das Gebäude ist ein Demonstrationsprojekt des vom BMWi getragenen Förderprogramms Solar optimiertes Bauen (SolarBau), welches in dem Teilkonzept 3 die Planung und Evaluierung von Nichtwohngebäuden fördert. Im Rahmen dieses Programms werden während der ersten zwei Jahre nach Inbetriebnahme mehrere Messgrößen kontinuierlich erfasst.



Abb. 2.1: Ansicht: Süd- und Ostfassade; Quelle: www.solarbau.de

2.2 Objektbeschreibung

Das Gebäude befindet sich auf dem Gelände des Sägewerkes in einem ländlichen Gebiet. Der Standort ist freiliegend ohne Verschattung.

Das Gebäude besitzt einen quadratischen Grundriss. Die Grundfläche des Erdgeschosses ist etwas kleiner als die der darüber liegenden zwei Geschosse. Mit einem

A/V-Verhältnis von $0,3 \text{ m}^{-1}$ ist der Baukörper sehr kompakt. Das Gebäude hat eine Bruttovolumen von ca. 16.800 m^3 bei einer beheizten Nutzfläche von 3.500 m^2 .

Den Kern des Gebäudes bildet ein durch alle Geschosse reichendes Atrium, dessen Glasdach über dem umlaufenden Baukörper schwebt. Um das Atrium gruppieren sich im Erdgeschoss die Eingangszone, mehrere Besprechungs- und Ausstellungsräume, eine Cafeteria mit angegliederter Küche sowie Service- und Technikräume.

In der ersten und zweiten Etage wird das zentrale Atrium von den Bürobereichen umschlossen. Zwei Versorgungskerne (auf der West- und auf der Ostseite) unterteilen jede Etage in zwei weitläufige Großraumbüros mit Grundrissen in Form eines „L“, welche durch Wandscheiben in offene Zonen gegliedert werden. Die Arbeitsplätze sind in dem Mittelstreifen zwischen einer fassadennahen und einer atriumnahen Verkehrszone angeordnet.

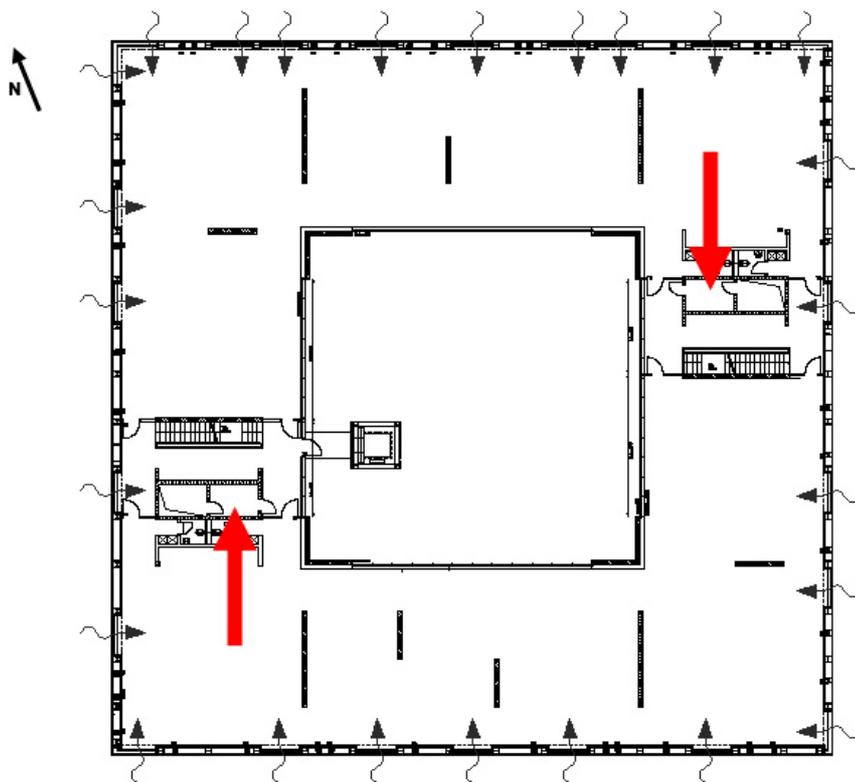


Abb. 2.2: Grundriss 1.OG mit Darstellung der Luftführung

Zu dem Luftraum des Atriums hin sind die Büroräume großflächig verglast. Die Außenfassaden werden von in lockerem Wechsel angeordneten sehr schmalen und breiten raumhohen Fenstern durchbrochen.

Die Fassaden orientieren sich nach den vier Himmelsrichtungen, mit einer Abweichung der Nordfassade von 22° nach Osten. Zwei der vier Bürobereiche erstrecken sich über die gesamte Südseite und einen Teil der Ostseite, die anderen über die gesamte Nordseite und einen Teil der Westseite.



Abb. 2.3: Büroraum 2.OG Nord; Quelle: www.solarbau.de

2.3 Baukonstruktion

Das Gebäude ist als Stahlskelettkonstruktion mit massiven Betondecken ohne Unterzüge ausgeführt. Die Estrichschicht des Fußbodens wird von einem Hohlraumboden über der Betondecke getragen.

Die Außenwand besteht aus vorgefertigten Holzelementen mit eingebrachter Wärmedämmung, die außenseitig mit vorgehängten Faserzementplatten und raumseitig mit vorgefertigten Betonplatten abgeschossen sind.

Als Innenwände wurden massive Wandscheiben aus Beton, massive Trennwände aus Kalksandstein und Leichtbauwände eingebaut. Die Betonwände in den Großraumbüros (Außenwände und raumgliedernde Wandscheiben) wurden nicht verputzt, sind aber zur Verbesserung der Akustik und aus gestalterischen Gesichtspunkten zu einem großen Teil mit stoffbespannten Elementen verkleidet. (s. Abb. 2.3)

Die in Sichtbeton ausgeführten Decken sind in den Großraumbüros im Mittelstreifen (über der Arbeitszone) mit perforierten Gipskartonplatten abgehängt, um eine Verbesserung der Tageslichtsituation und der Raumakustik zu erreichen.

Das Hauptdach des Gebäudes ist als extensiv begrüntes Flachdach ausgeführt.

Das Gebäude besitzt einen sehr hohen Dämmstandard (s. 8.2.2.1, Anhang B).

2.4 Gebäudetechnik

2.4.1 Klimakzept

Der Entwurf wurde hinsichtlich der Reduzierung der solaren Einträge und der Dämpfung der Temperaturschwankungen der Raumluft soweit optimiert, dass auch bei Verzicht auf eine maschinelle Klimatisierung der Bürobereiche akzeptable sommerliche Raumlufttemperaturen zu erwarten sind. Maßgebend dabei waren die Beeinflussung der Fassadengestaltung, die Verteilung der inneren Massen und das Lüftungskonzept:

- Der Verglasungsanteil liegt auf der Nordseite bei ca. 50 %, auf der Ost- und Südseite bei ca. 40 % und auf der Westseite bei ca. 30 %. Die breiten Fassadenfenster der Obergeschosse erhielten einen automatisch gesteuerten Sonnenschutz in Form von außen liegenden senkrechten Textilmarkisen. Geplant war ein g-Wert von 0,30. Jedoch wurde der fälschlich gelieferte Sonnenschutz mit einem g-Wert von 0,40 eingebaut. Für die Dachverglasung des Atriums war ein innen liegender Sonnenschutz geplant, der jedoch nicht eingebaut wurde.
- Zur Erhöhung der inneren Masse, die die Temperaturschwankung dämpft, wurde raumseitig an der Außenwand eine Betonschicht eingebaut.
- Der Luftwechsel in den Räumen soll durch den Einsatz einer Abluftanlage auf das hygienisch erforderliche Maß beschränkt werden. Des Weiteren übernimmt die Abluftanlage die nächtliche Entwärmung des Gebäudes in den Sommermonaten. Nur der zentrale EDV-Raum besitzt eine aktive Klimatisierung.

2.4.2 Lüftung

Das Gebäude wird, mit Ausnahme des Atriums, mechanisch entlüftet.

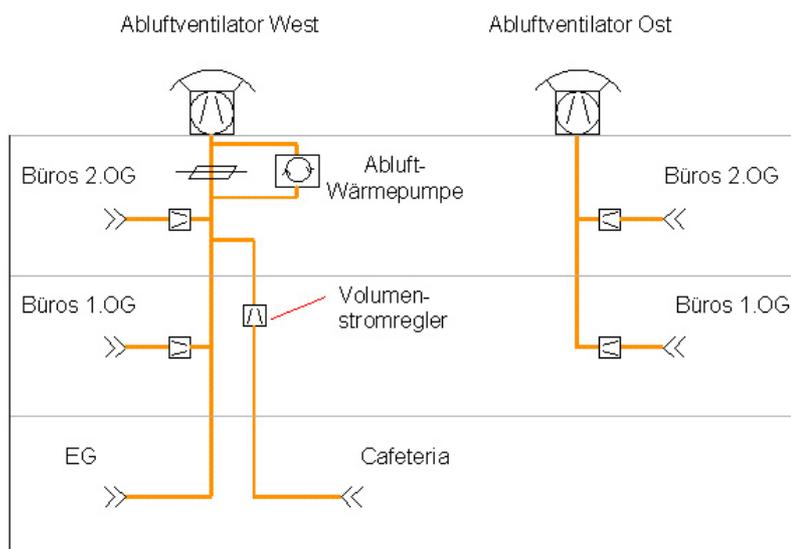


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Abluftsystems mit Luftqualitätsregelung über Volumenstromregler, Quelle: solares bauen GmbH

In den Büroräumen strömt die Zuluft ohne Vorkühlung bzw. Vorerwärmung über Zuluftgitter oberhalb der breiten Außenfenster in das Gebäude (s. Abb. 2.5). Die Zuluftgitter sind verstellbar, sollten jedoch, um die geplante Luftführung im Raum zu garantieren, nach einer erstmaligen Einregulierung nicht mehr verstellt werden. Aufgrund der relativ unzugänglichen Anordnung unter der Decke ist eine Verstellung seitens der Nutzer wenig wahrscheinlich.



Abb. 2.5: Zuluftgitter; Quelle: www.solarbau.de

Die schmalen Fenster in der Fassade können von den Nutzern geöffnet werden, während die breiten Außenfenster und die transparenten Flächen zum Atrium hin fest verglast sind.

Über zwei zentrale Kanäle wird die Abluft der Räume von je einem drehzahlregulierten Ventilator abgesaugt. In den Obergeschossen erfolgt dies im Deckenbereich der zwei Serviceblöcke (s. Abb. 2.2). Jede Bürozone ist über einen Volumenstromregler an einen Abluftschacht angeschlossen (die nördlichen Bürozone an den westlichen Abluftschacht und die südlichen Bürozone, sowie das Erdgeschoss, an den östlichen Abluftschacht). Um sowohl tagsüber regeln zu können als auch nachts einen hohen Volumenstrom bei niedrigem Druckverlust realisieren zu können, ist der Volumenstromregler mit einem Bypass eingebaut.

Eine hohe Luftdichtheit der Außenhülle, die für die Effizienz des Lüftungskonzeptes wichtig ist, konnte erreicht werden. Der durchgeführte Drucktest (Blower-Door-Messung s. 5.1.2.2) ergab bei geschlossenen Zuluftgittern einen n_{50} -Wert von 0,76 1/h.

Das Atrium wird frei über Klappen im Dach entlüftet.

2.5 Regelungskonzept

2.5.1 Lüftung

Das Gebäude ist in regelungstechnisch unabhängige Zonen unterteilt, um auf die unterschiedlichen Bedingungen reagieren zu können:

- EG: mit einer weiteren Unterteilung in Besprechungsräume und Cafeteria,
- 1.OG: Nordzone,
- 1.OG: Südzone,
- 2.OG: Nordzone,
- 2.OG: Südzone,
- Atrium.

Für das Regelungskonzept sind feste Nutzungszeiten definiert. Die in der Planung vorgesehenen Zeiten wurden während des Betriebes den Anforderungen angepasst. Die Nutzungszeiten der Bürozone sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Die Zonen (außer dem Atrium) sind getrennt voneinander an das zentrale Abluftsystem angebunden, so dass die Abluftvolumenströme unabhängig voneinander geregelt werden. Die Abluftanlage wird entsprechend der Nutzung mit drei unterschiedlichen Regelungskonzepten (für die Büroräume) betrieben:

- Normalbetrieb
Während der Nutzungszeit wird der Abluftvolumenstrom mittels der CO₂-geregelten Volumenstromregler an die jeweilige Raumluftqualität angepasst. Der Sollwert der Raumluftqualität ist in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur festgelegt: lineare Funktion zwischen 1.600 ppm bei $\vartheta_a \leq -12^\circ\text{C}$ und 650 ppm bei $\vartheta_a \geq 20^\circ\text{C}$ ¹. Die Ventilatoren werden bei konstantem Druck betrieben.
- Nachtlüftung
Die Nachtlüftung geht in Betrieb, wenn während der festgelegten Zeitspanne (s. Tabelle 2.1) die Raumtemperatur über dem Grenzwert von 18°C (Planung: 25°C) und um 3 K (Planung: 4 K) über der Außenlufttemperatur liegt. Sinkt die Raumtemperatur in Folge der Nachtlüftung unter einen Grenzwert (Planung: 22°C, Betrieb: -) beziehungsweise beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Außenlufttemperatur nur noch weniger als 2 K, so wird die Nachtlüftung vorzeitig abgestellt. Während der Nachtlüftung laufen die Ventilatoren ohne Regelung bei maximaler Drehzahl und die Volumenstromregler, sowie deren Bypassklappen werden vollständig geöffnet. Geplant war ein nächtlicher Luftwechsel von 1,6 1/h.
- Durchlüften
Vor Beginn der Betriebszeit wird die Abluftanlage für eine halbe Stunde mit konstantem Volumenstrom betrieben.

¹ Planungsangaben, während des Betriebes geändert (s. 5.2.3.2)

Tabelle 2.1: Betriebszeiten der Abluftanlage

Zeit	Planung	Betrieb (ab 08.06.02)
Nutzungszeit	Mo – Fr: 07.00 – 18.00 Uhr	Mo – Fr: 07.30 – 20.00 Uhr
	Sa: 07.00 – 12.00 Uhr	Sa: 07.00 – 12.00 Uhr
Nachtlüftung	Mo – So: 22.00 – 06.00 Uhr	Mo – So: 20.00 – 07.00 Uhr
Durchlüften	Mo – Fr: 06.00 – 06.30 Uhr	Mo – Fr: 07.00 – 07.30 Uhr ²

2.5.2 Sonnenschutz

Der Sonnenschutz wird über die Gebäudeleittechnik zentral gesteuert. Die Gebäudefassade ist in acht Zonen unterteilt, so dass die Abschattungen abhängig von der Orientierung und der Geschossebene angesteuert werden können. Darüber hinaus können die Nutzer jeden Sonnenschutz manuell bedienen.

Es werden zwei Steuerungsarten unterschieden (Grenzwerte s. Tabelle 2.2):

- Anwesenheit:
Der Sonnenschutz wird während der Nutzungszeit in Abhängigkeit von der Raumtemperatur und der Lichtstärke gesteuert.
- Abwesenheit:
Der Sonnenschutz wird außerhalb der Nutzungszeit in Abhängigkeit von der Raumtemperatur gesteuert.

Die Grenzwerte für die Raumtemperatur können für jede der 8 Zonen und getrennt nach Anwesenheit und Abwesenheit unterschiedlich eingestellt werden.

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Sonnenschutzsteuerung

	Planung		Betrieb		
	Anwesenheit	Abwesenheit	Anwesenheit		Abwesenheit
			Süd, Ost	Nord, West	
Raumtemperatur	> 25°C	> 24°C	> 23 ³ / 24°C	> 27°C	> 27°C
Außenhelligkeit	> 10 klux	-	> 40 klux		-

² Beginn bereits um 06.30 Uhr, wenn die Nachtlüftung nicht aktiv ist.

³ ab 27.06.02

3 Die Messdaten

3.1 Datenbasis

Die Auswertung stützt sich auf Messdaten der zentralen Messwerterfassung aus einem Zeitraum von drei Monaten (01.06.02 bis 31.08.02). Dieser Zeitraum wird in der Arbeit als Sommerperiode bezeichnet.

Die Auswertung erfolgt anhand von Stundenmittelwerten. Hierbei wird folgende Bezeichnung verwendet (Beispiel): 16 Uhr entspricht dem Mittelwert der Messwerte (2-Minutenwerte) von 16:00 bis 16:58 Uhr.

Ergänzend wurden Kurzzeitmessungen durchgeführt.

Betrachtet werden die thermischen Bedingungen in den Büroräume am Beispiel des Büroraumes Süd in der 2.OG (s. 3.4 Der Referenzraum). Die Bedingungen in den übrigen Räumen (Besprechungsräume, Atrium, ...) sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

3.2 Langzeitmessungen

3.2.1 Messdaten

Über die zentrale Messwerterfassung werden folgende Parameter erfasst:

- Außenlufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung (s. 4.1.2),
- Stellbefehl des Sonnenschutzes (s. 8.2.2.4),
- Raumtemperatur: 1 Temperaturfühler je Büroraum (s. 6.3.1),
- Abluftvolumenstrom je Büroraum (s. 5.2.3),
- Elektroenergie (Geräte und Beleuchtung: s. 4.2.2, Ventilator: s. 8.5.2).

Die Messwerte stehen als 2-Minutenwerte zur Verfügung.

3.2.2 Korrektur fehlender Messwerte

Die Aufzeichnung der Messwerte während des Betrachtungszeitraumes ist lückenhaft. Wenn nur einzelne Messwerte fehlen, so wird der Stundenmittelwert aus den vorhandenen Messwerten gebildet.

Zu den folgenden Zeiten liegen keine Stundenmittelwerte vor:

- 05.07.02 09 Uhr - 19 Uhr,
- 10.07.02 10 Uhr,
- 17.07.02 17 Uhr - 19.07.2002 10 Uhr, 19.07.2002 13 - 14 Uhr,
- 03.08.02 01 Uhr - 05.08.2002 07 Uhr,
- 07.08.02 01 Uhr - 04 Uhr.

Für die Energiebilanz (s. 8.2) ist es erforderlich alle Werte zu ersetzen. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Volumenstrom und innere Lasten:

Die fehlenden Messwerte werden durch die entsprechenden Mittel aller vorhandenen Messwerte der jeweiligen Uhrzeit ersetzt. Dabei wird unterschieden zwischen Wochentag, Samstag und Sonntag, zwischen Normalbetrieb und Betriebsferien und beim Volumenstrom noch zusätzlich nach dem eingestellten CO₂-Sollwert.

Temperaturen und Strahlung:

- 10.07.02, 07.08.02, 19.07.02 13 - 14 Uhr:

Alle Werte werden durch Interpolieren zwischen dem letzten bekannten und dem ersten nächsten bekannten Wert ersetzt.

- 05.07.02 09 - 19 Uhr:

- Temperaturen:

Unter Einbeziehung der erfassten Messwerte des Tages und der Phasenverschiebungen des durchschnittlichen Tagesganges der Raumtemperatur und der Außenlufttemperatur wird je eine Sinus-Funktion gebildet. Die Funktionswerte der beiden Sinus-Funktionen ersetzen die fehlenden Werte.

- Strahlung:

Die fehlenden Werte werden durch die jeweiligen Mittelwerte der Stundenmittelwerte eines strahlungsarmen (06.07.02) und eines strahlungsreicheren (08.07.02) Tages gebildet.

-
- 17.07.02 17 Uhr - 19.07.02 10 Uhr
 - Außenlufttemperatur:

Wie die vorhandenen Messdaten vom 17.07.02 und vom 19.07.02 zeigen, lagen die Außenlufttemperaturen mit $\vartheta_{\max} = 17^{\circ}\text{C}$ an diesen Tagen sehr niedrig. Ein Vergleich mit veröffentlichten Wetterdaten der Region deutet auch auf ein gleich niedriges Temperaturniveau am 18.07.02 hin. Die fehlenden Messdaten werden durch die Messwerte vom 19.07.02 11 bis 0 Uhr ersetzt. Die Zeit von 0 bis 10 Uhr wird durch eine Temperaturkurve mit einem Minimum von 12°C (nach veröffentlichten Wetterdaten) ergänzt.
 - Strahlung:

Die fehlenden Messwerte wurden durch Messwerte vom 19.07.02 ersetzt. Die Werte vor 11 Uhr wurden durch lineare Interpolation zwischen Sonnenaufgang und 11 Uhr gebildet.
 - Raumtemperatur:

Die Raumtemperatur lag vor dem Messwernerfassungsausfall 2 K höher als am Tag nach dem Ausfall. Die fehlenden Werte der Raumtemperatur werden durch die Messwerte ersetzt, die in einem Zeitraum (28.6.02 bis 30.6.02) mit ebenfalls fallenden Raumtemperaturen aufgezeichnet wurden.
 - 03.08.02 01 Uhr - 05.08.02 07 Uhr
 - Raumtemperatur:

In dieser Zeitspanne wurden die Messungen des Raumprofils durchgeführt. Hier zeigt sich, dass die Amplitude der Lufttemperatur in diesem Zeitraum annähernd gleich der Amplitude des vorangegangenen Tages ist. Der Tagesmittelwert nimmt vom Tag vor dem Messwernerfassungsausfall bis zum Tag danach kontinuierlich ab. Die Raumtemperatur wird daher durch den Tagesgang vom 02.08.02 ersetzt, wobei von jedem 1h-Wert ein gleitender Korrekturfaktor abgezogen wird, um das fallende Temperaturniveau in der Periode wiederzugeben.
 - Außenlufttemperatur:

Messdaten meteorologischer Stationen in der Region zeigen, dass das Temperaturniveau in der Ausfallzeit dem des vorangehenden und des nachfolgenden Tages entspricht. Die fehlenden Messwerte werden durch die jeweiligen Mittelwerte der Stundenmittelwerte des 02.07.02 und des 06.07.02 ersetzt.
 - Strahlung:

Die fehlenden Messwerte werden durch die jeweiligen Mittelwerte der Stundenmittelwerte des 2.7.02 und des 6.7.02 ersetzt.

Sonnenschutz

Die fehlenden Befehle zur Steuerung des Sonnenschutzes werden durch Befehle an einem Tag mit ähnlicher Strahlungsintensität und Raumtemperatur aufgefüllt. (03.08.02 - 05.08.02 durch Mittelwert 02.08.02 und 6.08.02)

3.3 Kurzzeitmessungen

Ziel der ergänzenden Kurzzeitmessungen ist es, die Aussagekraft einiger in der Langzeitmessung gewonnenen Messdaten zu bewerten und Aussagen über ausgewählte, bisher nicht erfasste Betriebsparameter zu erhalten. Zu beachten ist, dass Kurzzeitmessungen nur Momentaufnahmen unter bestimmten Randbedingungen darstellen. Sie ermöglichen jedoch Abschätzungen für andere Betriebssituationen.

Betrachtet werden folgende Zustandsgrößen und Parameter:

- Raumlufttemperatur:
Messungen an der Raumlufttemperatur an verschiedenen Orten im Raum in Zeitraum von neun Tagen (s. 5.4),
- Oberflächentemperatur:
Thermographieaufnahmen der Decke an zwei Tagen (s. 6.1),
- Raumluftströmung:
Visualisierung der Strömungswege der Zuluft der Nachtlüftung mithilfe von Nebel (s. 5.4),
- Luftwechsel:
Tracer-Gas-Messungen zur Überprüfung der stationären Messung des Abluftvolumenstromes und zur Abschätzung des freien Luftwechsels (s. 5.3).

3.4 Der Referenzraum

Der Büroraum Süd in der 2. OG wird als charakteristischer Büroraum gewählt. In der Raumgeometrie unterscheidet sich der Raum nur durch die Abmessungen des Serverraumes von den übrigen drei Büroräumen (s. Anhang B).

Der Büroraum hat eine Grundfläche von 490 m² und ein Raumvolumen von 1.516 m³. Die Außenfassade besitzt einen Fensteranteil von 33%. Die Außenfenster orientieren sich zu 10% nach Westen, zu 70% nach Süden und zu 20% nach Osten.

4 Äußere und innere Lasten

4.1 Meteorologische Parameter

4.1.1 Grundlagen

Außenlufttemperatur und Sonneneinstrahlung weisen einen zeitlichen Verlauf auf, der von einer Periodizität (Jahres- und Tagesschwankung) geprägt ist und durch stochastische Ereignisse überlagert wird. Der periodische Anteil lässt sich durch eine Fourier-Reihe beschreiben.

Außenlufttemperatur

Der zeitliche Verlauf der Außenlufttemperatur wird im Wesentlichen durch den Jahresmittelwert $\bar{\vartheta}$, die Jahresschwankung $\Delta\vartheta_y$ und die Tagesschwankung $\Delta\vartheta_d$ bestimmt [Keller]:

$$\vartheta(t) = \bar{\vartheta} + \Delta\vartheta_y \cos\left(\frac{2\pi}{T_y}t\right) + \Delta\vartheta_d \cos\left(\frac{2\pi}{T_d}t + \varphi\right) \quad (4-1)$$

mit: $T_y = 365$ d, $T_d = 24$ h.

Sonneneinstrahlung

Der Tagesgang der Sonneneinstrahlung auf eine horizontale oder vertikale Fläche kann durch die Summe des Tagesmittelwertes und mehrerer Grundschwingungen beschrieben werden:

$$I(t) = I_{\max} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T_d}t\right) \right] \quad (4-2)$$

mit: I_{\max} : maximale Intensität der Einstrahlung,
 a_0, a_n : Fourierkoeffizient.

Die Koeffizienten sind von der Sonnenscheindauer abhängig. Je länger die Sonnenscheindauer, desto geringer ist der Beitrag der höherfrequenten Grundschwingungen. Es zeigt sich, dass in den Sommermonaten die Grundschwingungen bis etwa $T = 8$ h zu berücksichtigen sind.

In Tabelle 4.1 sind die Fourierkoeffizienten für verschiedene Sonnenscheindauern aufgeführt, die sich aus dem gesetzmäßigen Tagesgang der direkten Sonneneinstrahlung ohne Einfluss der atmosphärischen Zustände (Lufttrübung, Niederschläge, usw.) herleiten lassen. Die Fourieranalysen realer Sonnengänge bestätigen die Zusammenhänge weitgehend [Keller].

Tabelle 4.1: *Fourierkomponenten der direkten Sonneneinstrahlung (ohne Einfluss der atmosphärischen Zustände: Lufttrübung etc.)*

Sonnenscheindauer	$a_0/2$	a_1	a_2	a_3	a_4
8 h	0,218	0,391	0,276	0,128	0,028
10 h	0,269	0,455	0,258	0,067	0,031
12 h	0,318	0,500	0,212	0,000	0,042
14 h	0,364	0,527	0,152	0,039	0,018

4.1.2 Messwerte

4.1.2.1 Außenlufttemperatur

Die Außenlufttemperatur wird mit zwei Temperaturfühlern gemessen:

- Strahlungsgeschützter Lufttemperaturfühler in einer Wetterstation auf dem Dach,
- Außenlufttemperaturfühler an der Westfassade.

Die ungünstige Einbausituation des Fassadentemperaturfühlers (unter der Vorhangsfassade) bewirkt bis zu 5 K höhere Temperaturmesswerte gegenüber dem Dachtemperaturfühler. Jedoch ist auch der Temperaturfühler auf dem Dach nicht ausreichend frei aufgestellt. Während die nachts mit dem Dachtemperaturfühler gemessenen Werte mit den Angaben der nahe gelegenen meteorologischen Stationen gut übereinstimmen, liegen die gemessenen Temperaturen an sonnenreichen Tagen bis zu 5 K über den Angaben der Tagesmaxima der meteorologischen Stationen.

Da keine Vergleichsmessungen vor Ort durchgeführt werden, wird in dieser Arbeit mit den Messdaten des Dachfühlers gerechnet.

4.1.2.2 Sonneneinstrahlung

Die Globalstrahlung wird mit vier Strahlungssensoren erfasst. Diese sind (entsprechend der Anordnung der PV-Elemente) im Winkel von 12° zu der Horizontalen geneigt und orientieren sich in die gleichen Himmelsrichtungen wie die vier Fassaden. Ein weiteres Pyranometer erfasst die horizontale Globalstrahlung.

Die mit den geneigten Pyranometern gemessenen Werte sind realistisch. Die mit dem horizontalen Pyranometer gemessenen Werte sind um rund 26% geringer als sie entsprechend der astronomischen Zusammenhängen zu erwarten sind. Die Messwerte werden mit Hilfe der Kenntnis der theoretisch erreichbaren Strahlung bei klarem Himmel korrigiert und anschließend wird mit einem Strahlungssimulationsprogramm die Strahlung auf die Fassadenflächen berechnet⁴.

⁴ Ch. Reise, Fraunhofer ISE

4.1.2.3 Wind

Auf dem Dach sind ein Anemometer und eine Wetterfahne aufgestellt. Die Messwerte der Windgeschwindigkeit sind jedoch unzuverlässig. Der sich aus den Messungen ergebende Monatsmittelwert ist deutlich geringer als der zu erwartende Wert. Außerdem sind die erfassten Messwerte unverhältnismäßig häufig während mehrerer Stunden konstant. (Monatsmittelwert ist geringer als zu erwarten, unverhältnismäßig häufig für mehrere Stunden konstante Messwertangaben).

4.2 Innere Wärmequellen

4.2.1 Grundlagen

Innere Wärmelasten treten in den Büroräumen infolge der Wärmelast der Beleuchtung, der Bürogeräte und der Personen auf. In Tabelle 4.2 sind die Anzahl und Anschlussleistung der im Referenzraum vorhandenen Lampen und Bürogeräte und die Anzahl der dort arbeitenden Personen aufgeführt.

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der inneren Lasten im Referenzraum

	Anzahl	Leistung	
		Betrieb W/Stk	Stand-by W/Stk
Beleuchtung⁵			
Arbeitszone	36	54	
Arbeitsplatzleuchte	17	100	
Verkehrszone (Downlights)	40	42	
Geräte⁶			
PC	17	40	30
LCD – Monitor	17	23	10
Drucker (Laser)	2	300	80
Drucker (Tintenstrahl)	2	20	10
Kopierer	1	300	80
Fax	4	80	12
Personen⁷			
Regulär	17	75	
Außendienst (1Tag/Woche anw.)	5	75	

Die Anwesenheit der Nutzer wird entsprechend den Auskünften der Firma folgendermaßen angenommen:

Montag bis Freitag:

07:00 bis 08:00 und 16:00 bis 20:00 Uhr: gleitende Anfangs- bzw. Endzeit,
 08:00 bis 12:00 und 13:00 bis 16:00 Uhr: Blockzeit (17 Personen),
 12:00 bis 13:00 Uhr: halbe Belegung,

Samstag:

08:00 bis 12:00 Uhr: 4 Personen.

⁵ Leistungsangaben der Grundbeleuchtung (Verkehrszone, Arbeitszone) nach Planungsunterlagen, der Arbeitsplatzbeleuchtung nach Einbauangaben

⁶ Leistungsangaben für neue Geräte: nach [E.V.A]

⁷ Wärmeabgabe bei $\vartheta = 24^{\circ}\text{C}$ [VDI 2078]

Die Wärmelasten, die sich aus diesen Angaben für den Betrieb ableiten lassen, sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Hierbei wird angenommen, dass die elektrische Leistung vollständig als Wärme im Raum wirksam wird.

Tabelle 4.3: Summe der inneren Lasten im Referenzraum: alle Beleuchtungen eingeschaltet, alle Rechner in Betrieb, die übrigen Geräte im Stand-by und 17 Personen anwesend

	Leistung	
	W	W/m ²
Beleuchtung	3.624	11,1
Arbeitsplatzbeleuchtung	1.700	3,5
Geräte	1.379	2,9
Personen (17 Personen)	1.275	2,7

4.2.2 Messwerte

Der elektrische Gesamtverbrauch jedes Büroraumes wird separat erfasst und zusätzlich auch der jeweilige Verbrauch der Beleuchtung (ausgenommen der Tischbeleuchtung). Der Verbrauch in allen vier Büroräumen ist ähnlich.

In Abb. 4.1 ist der mittlere Tagesgang der inneren Lasten an Werktagen in den Monaten Juni bis August für den Referenzraum als Stundenmittelwert aufgetragen. Der pro Stunde gemessene Verbrauch der Geräte und Arbeitsplatzleuchten entspricht dem Verbrauch pro Stunde, der unter Berücksichtigung eines Gleichzeitigkeitsfaktors für die Nutzung der Geräte berechnet wird (s. dazu Tabelle 4.3). Der Maximalstundenverbrauch der Beleuchtung, der in den frühen Morgenstunden aufgrund der Anwesenheit des Reinigungspersonals auftritt, ist knapp doppelt so groß, wie der nach den Planungsangaben zu erwartende Stundenverbrauch bei gleichzeitigem Betrieb aller Lampen.

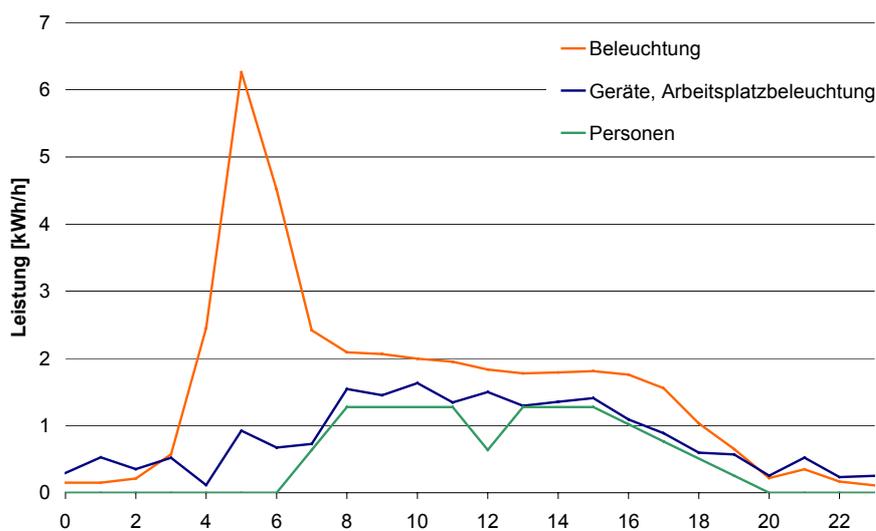


Abb. 4.1: Mittlerer Tagesgang der inneren Lasten an Werktagen (01.06.02 bis 31.08.02)

5 Die Lüftung

5.1 Grundlagen

5.1.1 Zusammenfassung

Der Luftaustausch über Durchlässe in den Umschließungsflächen wird durch Druckdifferenzen zwischen dem Raum und der Umgebung sowie den Nachbarräumen verursacht. Die Druckdifferenzen entstehen durch Windeinfluss, durch Dichteunterschiede der Luft als Folge unterschiedlicher Temperaturen in den einzelnen Zonen und durch mechanische Lüftung.

Je nach Ursache der treibende Kräfte werden im Folgenden natürliche und mechanische Lüftung unterschieden. Des Weiteren wird eine Unterscheidung in Infiltration (unkontrollierter Luftaustausch durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle) und Lüftung („gesteuerter“ Luftaustausch) vorgenommen.

Durch die Überlagerung der verschiedenen Effekte entstehen komplexe Zusammenhänge, so dass sich die einstellenden Druckverhältnisse nur mit aufwändigen Modellen abbilden lassen. Die sich ausbildenden Luftströme können i.d.R. nur numerisch berechnet werden. Es existieren numerische Modelle unterschiedlicher Komplexität und Leistung, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll. Die Ansätze verschiedener Modelle werden z.B. in ([Clima Suisse], [IEA]) vorgestellt.

Im Folgenden werden die grundlegenden Zusammenhänge des Luftaustausches zusammengestellt und anschließend einige vereinfachte Auslegungsmethoden vorgestellt. Diese liefern nur grobe Richtwerte für den Luftaustausch und geben keine Auskunft über die Strömungsverteilung im Raum.

5.1.2 Luftströmung durch Öffnungen

5.1.2.1 Allgemeines

Bei dem Luftaustausch durch Öffnungen treten verschiedene Strömungsformen auf. Turbulente Strömungen bilden sich an großen Öffnungen (z.B. an offenen Fenstern) aus und laminare Strömungen an engen Fugen. Bei rein turbulenter Strömung wächst der Druckabfall quadratisch mit dem Volumenstrom, bei laminarer linear.

Allgemein lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt darstellen:

$$\dot{V} = \text{sgn}(\Delta p) R |\Delta p|^n \quad (5-1)$$

mit: R hydraulischer Widerstand,
sgn(Δp) Strömungsrichtung.

Der Exponent n ist von der Strömungsform abhängig:

n = 0,5 bei rein turbulenter Strömung,
n = 1,0 bei rein laminarer Strömung.

Für größere Undichtigkeiten, z.B. Zuluftgitter, liegt nach [Heinz] der Strömungsexponent bei ca. n = 0,55.

5.1.2.2 Fugendurchströmung

In der Gebäudehülle treten Undichtigkeiten in Form von Funktionsfugen an Fenstern und Türen und in Form von Bau- und Montagefugen auf, in denen sich verschiedene Strömungsformen ausbilden.

Für Luftströmungen durch Fugen wird häufig überschlägig mit folgendem empirischen Ansatz gerechnet:

$$\dot{V} = a l |\Delta p|^{\frac{2}{3}} \quad (5-2)$$

Werte für den Fugendurchlasskoeffizienten a verschiedener Fugen an Fenstern und Türen sind der DIN 4701 Teil 2 zu entnehmen. Diese Angaben berücksichtigen jedoch nicht, dass sich die Werte im Laufe der Lebensdauer der Bauteile verschlechtern können.

Nicht erfasst werden mit der Gleichung (5-2) andere Undichtigkeiten in der Gebäudehülle, wie Fugen zwischen Bauteilen. Bei Neubauten hängt die Undichtheit des Gebäudes jedoch hauptsächlich von der Qualität der Bauausführung ab, da die Fugendurchlasskoeffizienten von modernen Fenstern und Türen sehr gering sind.

Die Summe aller äußeren Undichtigkeiten eines Gebäudes wird daher mit Hilfe eines Wertes für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle angegeben. Als Kennwert ist der n_{50} -Wert gebräuchlich. Er entspricht einem fiktiven Luftwechsel, der sich bei einer konstanten Druckdifferenz von 50 Pa zwischen innen und außen einstellen würde. Er kann für ein bestehendes Gebäude mit dem Blower-Door-Messung bestimmt werden.

Dabei wird ein Element der Gebäudehülle, i.d.R. die Außentür, durch eine Platte, in welche ein Ventilator eingebaut ist, die sogenannte Blower Door, ersetzt. Hiermit wird im Gebäude ein Überdruck von 50 Pa erzeugt und der eingeblasene Luftvolumenstrom gemessen. Das Verhältnis des Volumenstroms zum Gebäudevolumen ergibt dann den n_{50} -Wert. Er ermöglicht einen Vergleich von Gebäuden ohne Einfluß von Klima und Umgebung. Der n_{50} -Wert stellt jedoch kein Maß für den Luftwechsel durch Infiltrationen dar, da die Verteilung der Leckagestellen in der Gebäudehülle und die Lage des Gebäudes bzw. die vorherrschenden Winddrücke den Luftwechsel maßgebend beeinflussen. Nach [Raatschen] liegt der Nachteil der Meßmethode darin, dass die Ergebnisse nicht unbedingt repräsentativ sind, da sich in Folge der künstlich erzeugten hohen Druckdifferenzen die Leckagestellen vergrößern können.

Typische Werte:

- < 3: dichte Gebäude,
- 3 – 5: typischer Bestand,
- > 5: sehr undichte Gebäude.

In der DIN 4108 Teil 7 werden für Neubauten mit natürlicher Lüftung, bei denen Luftdichtheitsprüfungen durchgeführt werden, Grenzwerte für den n_{50} -Wert von 3 1/h und 1,5 1/h für Neubauten mit eingebauter mechanischer Anlage angegeben.

Eine weitergehende Kenntnis der Leckagestellen der Gebäudehülle erhält man, wenn mit dem Ventilator schrittweise unterschiedliche Druckdifferenzen erzeugt werden und für jeden Druckwert der Luftstrom durch den Ventilator gemessen wird. So kann die Beziehung zwischen Druckdifferenz und Volumenstrom bestimmt werden, d.h. man erhält die gebäudespezifischen Koeffizienten R und n der Gleichung (5-1).

5.1.2.3 Große Öffnungen

Der Volumenstrom durch eine große Öffnung, bei der die Druckdifferenz über die ganze Öffnungsfläche konstant ist, kann durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$\dot{V} = C_d A \left(\frac{2}{\rho} |\Delta p| \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(\Delta p) \quad (5-3)$$

mit: A freien Querschnitt,
 C_d Öffnungsbeiwert.

Der Öffnungsbeiwert berücksichtigt die Abweichung vom idealen Durchfluss (Einschnürung und Strömungsabriss) und wird von der Reynoldszahl, der Geometrie der Öffnung, dem Öffnungswinkel und der Gestaltung der Umgebung der Öffnung beeinflusst. Für ganz geöffnete Fenster und Türen ohne beeinflussende Vorsprünge in der umgebenden Wand beträgt der Öffnungsbeiwert $\sim 0,6$. (Detaillierte Angaben für verschiedene Öffnungswinkel sind u.a. in [Clima Suisse] zusammengestellt)

Sind in einer Raumhülle mehrere Öffnungen vorhanden, so können diese je nach Luftführung analog einer Reihen- bzw. Parallelschaltung von Widerständen zusammengefasst werden. Für den Volumenstrom bei der Durchströmen von zwei hintereinanderliegenden Öffnungen gilt:

$$\dot{V} = \left(\frac{1}{(C_d A)_1^{-2} + (C_d A)_2^{-2}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\rho} |\Delta p_{ges}| \right)^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\Delta p) \quad (5-4)$$

Ist die Druckdifferenz nicht über die ganze Öffnung konstant, so muss die Strömung durch Integration über die Öffnungshöhe ermittelt werden. Sind die Abweichungen nicht groß, so kann als gute Näherung mit Gleichung (5-3) und dem Mittelwert der Druckdifferenz gerechnet werden.

Es können sich infolge von Temperaturdifferenzen an Öffnungen Zweiwegeströmungen einstellen. Die neutrale Ebene (siehe auch 5.1.3) liegt in etwa in der Mitte der Öffnung, wenn Windstille herrscht und keine mechanisch erzeugten Druckdifferenzen und keine weiteren äußeren Randeinflüsse (z.B. große Temperaturdifferenzen zwischen Oberflächentemperaturen und Lufttemperaturen) vorhanden sind. Der Luftvolumenstrom in eine Richtung berechnet sich damit wie folgt [Flourentzou]:

$$\dot{V} = \frac{1}{3} C_d A \left(gH \frac{\Delta T}{T} \right)^{0,5} \quad (5-5)$$

mit: H Höhe des Fensters.

5.1.3 Luftwechsel in Folge von Temperaturunterschieden

Der Luftdruck nimmt mit der Höhe ab. Für übliche Höhen von Gebäuden und isotherme Luftsäulen kann der Druckverlauf mit guter Näherung durch einen linearen Ansatz beschrieben werden:

$$p(h) = p_0 - \rho_0 g h \quad (5-6)$$

Da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat, ist der Druckunterschied pro Höheneinheit bei warmer Luft geringer als bei kalter Luft. Die Druckdifferenz zwischen zwei Zonen unterschiedlicher Temperatur in der Höhe h beträgt:

$$\Delta p(h) = p_a(h) - p_i(h) \quad (5-7)$$

Die Höhe h ist dabei der Abstand von der neutralen Ebene, in der ein Druckgleichgewicht zwischen den beiden Zonen herrscht. Betrachtet man die Luft als ideales Gas, so ergibt sich unter Verwendung der allgemeinen Gasgleichung:

$$\Delta p(h) = \rho_0 T_0 g h \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (5-8)$$

Die Lage der neutralen Ebene in einer Zone stellt sich so ein, dass die Masseströme in die eine Richtung über der neutralen Ebene gerade den in die andere Richtung unter der neutralen Ebene entsprechen. Warme Luft strömt über der neutralen Ebene in die andere Zone, kalte Luft unterhalb der neutralen Ebene. In einer Zone mit konstanter Temperatur und über die Höhe gleich verteilten Öffnungen liegt die neutrale Ebene in etwa in der Mitte. Bei ungleicher Verteilung der Öffnungen verschiebt sich die neutrale Ebene zu der größeren Öffnung hin. Während sich die Lage der neutralen Ebene in einer Zone für Öffnungen in zwei Höhen noch explizit berechnen lässt, ist für mehrere Öffnungen ein numerischer Ansatz notwendig. Wie (5-8) zeigt, ergibt sich die Druckdifferenz an einer Öffnung aus dem Abstand zur der neutralen Ebene. Das bedeutet, dass die Kenntnis der Lage der neutralen Ebene Voraussetzung für die Berechnung des Luftstromes durch die Öffnung ist.

Betrachtet man mehrzellige Gebäude, so ist die thermisch bedingte Druckverteilung außer von Lage und Art der Öffnungen auch von der inneren Struktur des Gebäudes abhängig. Besteht zwischen den einzelnen Geschossen kein Luftaustausch, so hat jedes Geschoss eine eigene neutrale Zone. Die Druckverteilung lässt sich dann unabhängig von den anderen Zonen berechnen. Demgegenüber entspricht für ein Gebäude mit großer Durchlässigkeit zwischen den Geschossen die gesamte Gebäudehöhe der für den thermischen Auftrieb wirksamen Höhendifferenz. Inwieweit sich die Kaminwirkung in einem Schacht auf den Luftaustausch der angrenzenden Zonen auswirkt, hängt von der Dichtheit der Trennwand ab. So ist z.B. bei dicht zu einem Treppenhaus schließenden Türen der Einfluss fast vollständig unterbunden. [Hausladen]

In Gebäuden mit verbundenen Geschossen und in hohen Räumen sind darüber hinaus Temperaturschichtungen zu berücksichtigen.

Für vereinfachende Berechnungen des Luftwechsels infolge von Temperaturdifferenzen werden i.d.R. in jeder Zone ortsunabhängig konstante Temperaturen angenommen und es wird Gleichung (5-8) angewendet. Differenziertere Ansätze zum Druckverlauf infolge von Auftrieb unter Beachtung verschiedener Randbedingungen sind in [IEA] zu finden.

Auf die durch unterschiedliche Oberflächentemperaturen bedingten Strömungen im Raum wird hier nicht eingegangen.

5.1.4 Luftwechsel in Folge von Wind

5.1.4.1 Zusammenfassung

Der Wind bewirkt am Gebäude zeitlich und örtlich variierende Strömungs- und damit Druckverhältnisse. Obwohl der Wind nie beständig ist, wird der Winddruck an einem Gebäude mit Hilfe zeitlicher Mittelung als näherungsweise stationär beschrieben [Heinz]. Hiermit kann jedoch nur der Luftwechsel bei Querlüftung abgeschätzt werden. Bei einseitiger Lüftung wird der Luftaustausch durch instationäre, pulsierende Strömung (Böenwirkung des Windes und Verwirbelungen an der Fassade) bewirkt.

Die im folgenden erläuterten Zusammenhänge beziehen sich auf den Luftaustausch bei Querlüftung.

5.1.4.2 Grundlagen

In der freien Atmosphäre werden die Winde von der meteorologischen Situation und der Topographie bestimmt. Bis in eine Höhe von 300 – 600 m über Grund wirken sich zusätzlich Wirbelbildungen an Bergen, Vegetation und Bebauungen sowie die Reibung der bodennahen Schichten auf die Windströmung aus. Das dadurch entstehende Höhenprofil der Windgeschwindigkeit wird in guter Näherung durch folgende Potenzgleichung, die bis ca. 100 m über Grund gültig ist, beschrieben [Moser]:

$$v = v_{ref} * \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^c \quad (5-9)$$

mit: v : Windgeschwindigkeit in der Höhe h ,
 v_{ref} : Windgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe h_{ref} .

Der Exponent c steigt mit zunehmender Bodenrauigkeit und thermischen Stabilität der Atmosphäre:

Bebautes Gebiet (Stadt)	ca. 0,40,
Bebautes Gebiet (Dorf)	ca. 0,28,
Offenes Gelände	ca. 0,16.

Die von meteorologischen Stationen angegebenen Windgeschwindigkeiten (z.B. in [DIN 4710]) beziehen sich auf eine Höhe von 10 m über Grund in freiem Gelände bzw. auf eine Situation, bei der die Windverhältnisse denen in 10 m Höhe über Grund in freiem Gelände entsprechen. Für Berechnungen bezieht man sich üblicher Weise auf mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen, die über einen Zeitraum von einer Stunde bestimmt werden⁸.

Die zur Verfügung stehenden Winddaten müssen auf die Verhältnisse an dem betrachteten Gebäude umgerechnet werden. Dabei sind außer dem Höhenunterschied zwischen Messort und Gebäude die unterschiedlichen Bodenrauigkeiten zu berücksichtigen. Grundgedanke der Umrechnung ist, die gemessene Windgeschwindigkeit über die Windgeschwindigkeit in der Höhe für ungestörten Wind auf die Bedingungen am gewünschten Ort zu transferieren. Folgender Ansatz ist gebräuchlich:

$$v = v_{meteo} W_z^w \quad (5-10)$$

mit: v Windgeschwindigkeit in der Höhe z ,
 v_{meteo} Windgeschwindigkeit bei der meteorologischen Station,
 W, w vom Gelände abhängige Koeffizienten [Feist], [IEA].

⁸ Die Böengeschwindigkeit (die mittlere Geschwindigkeit über 2 s) beträgt nach [prEN ISO 15927-1] in guter Näherung $\hat{v} = 1,65\bar{v}$ mit \bar{v} : Stundenmittelwert

Das lokale Windfeld und damit die Gebäudeanströmung wird zusätzlich von der lokalen Bebauung, d.h. dem Abstand und der Lage der Nachbargebäude, und der Vegetation bestimmt. Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Windabschirmung durch Nachbarbebauung sind in [Fischer] zu finden.

Die Umströmung des Gebäudes wird durch die Gebäudeform und die Anströmrichtung bestimmt. Der auf das Gebäude auftreffende Wind wird zur Seite und über das Dach abgelenkt und erzeugt lokale Wirbel. Auf der angeströmten Seite (Luv) entsteht im Wesentlichen ein Überdruck, an den windabgewandten Seiten (Lee) ein Unterdruck.

Häufig wird von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass bei senkrechtem Auftreffen des Windes auf eine Hauswand der Überdruck bis zum dynamischen Druck p_s ansteigen kann und der sich auf der Leeseite bildende Unterdruck ca. $1/3$ des dynamischen Druckes beträgt [Ihle]. Dies ergibt eine Druckdifferenz zwischen Luv und Lee von $4/3 p_s$. Die strömungsbedingten Druckverhältnisse entlang der Gebäudefassade weisen jedoch viel stärkere lokale Unterschiede auf und lassen sich differenzierter mit Hilfe des sogenannten Druckbeiwertes c_p darstellen. Der zeitliche Mittelwert des Druckes infolge des Windes an einer beliebigen Stelle ergibt sich damit zu:

$$p = c_p \frac{\rho}{2} v^2 \quad (5-11)$$

Als Referenzbedingung für die Windgeschwindigkeit v wird ungestörte Anströmung in Gebäudehöhe genommen.

Der Druckbeiwert c_p ist eine Funktion des Strömungsfeldes um ein Gebäude, also von der Gebäudegeometrie und der Anströmrichtung abhängig. Ferner wird er durch die benachbarten Gebäude und Hindernisse bestimmt. In der Literatur sind Druckbeiwerte für einfache Gebäudeformen aufgeführt: in Abhängigkeit von der Anströmrichtung und teilweise auch in Abhängigkeit der lokalen Bebauung [Feist], [IEA]. Für niedrige Gebäude mit bis zu drei Geschossen werden die Druckkoeffizienten als Mittelwerte für jede Gebäudefassade angegeben. Da für höhere Gebäude die örtliche Verteilung von zunehmender Bedeutung ist, sollte auf die Angabe von lokalen Druckkoeffizienten zurückgegriffen werden. Weicht die Gebäudeform von der einfachen Quaderform ab, so sind diese Angaben nicht mehr zu nutzen. Allein Vorsprünge können einen entscheidenden Einfluss auf die Umströmung haben.

Zur Berechnung der Querlüftung sind die von der gleichen Luft durchströmten Öffnungen als Reihenschaltung von Widerständen zu betrachten (s. 5.1.2.3). Als wirksame Druckdifferenz wird die Differenz der an den beiden Seiten herrschenden Drücke angesetzt. Der Volumenstrom ist proportional zur Windgeschwindigkeit.

5.1.5 Luftwechsel in Folge einer Lüftungsanlage

Bei einer mechanischen Entlüftung wird im Gebäude ein Unterdruck hergestellt, so dass die Luft über die Undichtigkeiten der Gebäudehülle (z.B. Zuluftgitter) oder der Innenwände nachströmt. Der Druckunterschied, der mechanisch erzeugt wird, um einen bestimmten Volumenstrom zu fördern, kann, wenn die Strömungscharakteristik der Umschließungsflächen bekannt ist, mit dem Ansatz (5-1) berechnet werden. Solange der Winddruck und der thermische Auftrieb die Druckverhältnisse an keiner Stelle der Gebäudehülle und der Innenwände umkehrt, ist die Strömungsrichtung immer von außen nach innen gerichtet, und die Luftwechselrate nur von dem Lüftungssystem bestimmt.

5.1.6 Überlagerung verschiedener treibender Kräfte

Bei gleichzeitigem Wirken verschiedener treibender Kräfte können die sich einstellenden Druckverhältnisse nur mittels numerischer Berechnungen ermittelt werden.

Es sind einige vereinfachte Rechenmethoden zur Ermittlung des Gesamtvolumenstromes einer Zone entwickelt worden, die auf empirischen Ansätzen beruhen. Nach [Panzhauser] wird die Kombinationswirkung von Wind und Temperaturdifferenzen nie größer als die Summe der Einzelwirkungen.

Die verschiedenen Einflüsse werden zunächst separat betrachtet. Der gesamte Volumenstrom infolge natürlicher Lüftung wird dann durch quadratische Mittelung der einzelnen Volumenströme ermittelt [Heinz], [IEA], [Panzhauser]:

$$\dot{V}_{NL} = \sqrt{\dot{V}_T^2 + \dot{V}_W^2} \quad (5-12)$$

mit: \dot{V}_W Volumenstrom infolge von Windwirkung,
 \dot{V}_T Volumenstrom infolge von Temperaturunterschieden.

Bei der Berücksichtigung des mechanischen Lüftungsanteils wird zwischen abgeglichenen und nicht abgeglichenen Zu- und Abluftvolumenströmen unterschieden. Sind mechanisch geförderte Zu- und Abluftstrom annähernd gleich, so werden der mechanische Volumenstrom und der gemittelte natürliche Volumenstrom addiert. Bei nicht abgeglichenen Zu- und Abluftstrom oder reinen Abluftanlagen wird der nicht abgeglichene Volumenstrom zusammen mit den natürlichen Volumenströmen quadratisch gemittelt:

$$\dot{V}_{NL} = \dot{V}_{M,a} + \sqrt{\dot{V}_T^2 + \dot{V}_W^2 + \dot{V}_{M,n}^2} \quad (5-13)$$

mit: $\dot{V}_{M,a}$ Volumenstrom infolge von Lüftungsanlage, abgeglichener Anteil,
 $\dot{V}_{M,n}$ Volumenstrom infolge von Lüftungsanlage, nicht abgeglichener Anteil.

5.1.7 Richtwerte für den natürlichen Luftwechsel

Die Angaben in der Literatur (z.B. [Rechnagel], [IEA]) für zu erwartende mittlere Luftwechsel in natürlich belüfteten Gebäuden beschränken sich i.d.R. nur auf die Heizperiode. Die meteorologischen Bedingungen und die Lüftungsgewohnheiten im Sommer unterscheiden sich stark von denen im Winter. Diese Werte können daher nicht auf das ganze Jahr übertragen werden.

Des Weiteren sind in der Literatur Angaben zu finden, die Richtwerte für den momentanen Luftwechsel in Abhängigkeit von der Fensterstellung angeben (s. Tabelle 5.1). Die große Spannweite dieser Angaben zeigt jedoch, dass allgemeingültige Aussagen zu dem natürlichen Luftwechsel aufgrund der Komplexität der einflussreichen Randbedingungen kaum möglich ist.

Tabelle 5.1: Luftwechselzahlen bei freier Lüftung in Abhängigkeit von der Fensterstellung

	Luftwechsel h^{-1}	
	[Rechnagel]	[VDI 2067]
Fenster, Türen geschlossen		
$n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$	0,1 ... 0,3	0 ...
$n_{50} > 5 \text{ h}^{-1}$	<2	... 0,5
Regulierbare Lüftungseinrichtungen	0,2 ... 0,8	
Fenster gekippt		
ohne Querlüftung	0,8 ... 2,5	0,7 ...
mit Querlüftung	2 ... 4	... 5,0
Fenster halb offen		4 ... 10
Fenster offen		
ohne Querlüftung	9 ... 15	7 ... 10
mit Querlüftung	> 20 h^{-1}	25 ... 40

5.1.8 Luftwechsel und Lüftungswirksamkeit

Als Maß für den Luftaustausch eines Raumes wird meistens die Luftwechselzahl n angegeben:

$$n = \frac{\dot{V}}{V} \quad (5-14)$$

mit: \dot{V} Gesamtabluftvolumenstrom,
 V Raumvolumen.

Die Luftwechselzahl ist ein Durchschnittswert für den ganzen Raum.

Es ist von dem Raumströmungsmuster abhängig, wie sich ein bestimmter Luftwechsel auf den Zustand der Raumlufte (Luftqualität, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit) auswirkt. Allgemein werden drei Luftströmungsarten Verdrängungsströmung („kolbenförmige“ Durchströmung) und Mischlüftung (vollständige Durchmischung) und Kurzschlussströmung (keine Durchmischung der Zuluft mit der Raumlufte) unterschieden. In diesen drei Grenzfällen lässt sich die örtliche Luftqualität und die Lufttemperaturverteilung im Raum aus der Luftwechselzahl direkt ableiten. Bei der natürlichen Lüftung treten zumeist räumlich „inhomogene“ Raumströmungen auf. Es können u.U. Totzonen entstehen, in welchen die Luft vollkommen gefangen bleibt. Die Ausbildung der Raumlufteströmung ist von der Art und Anordnung der Öffnungen, der Temperaturunterschiede zwischen Raumlufte und Außenluft, der Intensität und Anordnung der inneren Wärmequellen, der Raumgeometrie und der Windverhältnisse abhängig.

Aus der Luftwechselzahl lassen sich daher nur bedingt Aussagen zur Raumluftequalität und der thermischen Wirksamkeit⁹ des Luftaustausches ableiten. Nur zusammen mit einer Abschätzung der Raumlufteströmung ist die Luftwechselzahl als Kennzahl für den Luftaustausch nutzbar. So wird im Extremfall der Kurzluftströmung (z.B. Anordnung der Fenster über Eck) dem Raum keine Wärme abgeführt bzw. zugeführt: der Luftaustausch ist thermisch unwirksam.

⁹ zu- bzw. abgeführte Wärmemenge

5.2 Der Luftwechsel im Büroraum

5.2.1 Überlegungen zum Luftwechsel

In den Büroräumen werden zeitabhängig unterschiedliche Lüftungsstrategien realisiert (s. 2.4.2). Je nach Betriebsart der Abluftanlage (Normalbetrieb, Nachtlüftung, Durchlüften, Stillstand) und Nutzereingriff (Fensteröffnung) treten drei unterschiedliche Lüftungsformen auf:

- mechanische Lüftung,
- Kombination von natürlicher und mechanischer Lüftung,
- natürliche Lüftung.

Die Anwendung der im vorangegangenen Kapitel 5.1 vorgestellten Berechnungsansätze auf die Büroräume erwies sich nicht als zielführender Ansatz zur Abschätzung des natürlichen Luftwechsels. Die hohe Anzahl der Fenster und deren verteilte Anordnung (Orientierung zu drei Himmelsrichtungen) führt zu einer Mannigfaltigkeit an möglichen Druckverhältnissen entlang der Gebäudehülle. Daher beschränken sich die Überlegungen in diesem Kapitel auf qualitative Überlegungen.

Im Normalbetrieb wird der entsprechend der CO₂-Konzentration geregelte Abluftvolumenstrom gefördert. Der Unterdruck im Raum gegenüber der Umgebung ist bei geschlossenen Fenstern so groß, dass keine nennenswerten Exfiltrationen auftreten. Werden Fenster geöffnet (Strömungswiderstand im Zuluftstrom sinkt), so verringert sich der Unterdruck. Wind und Thermik können das Druckgefälle über der Gebäudehülle lokal ändern und Luft tritt über die Öffnungen aus. Der Luftaustausch mit dem Treppenhaus ist zu vernachlässigen, da die Türen mit einem automatischen Türschließer versehen sind und relativ dicht schließen¹⁰. Es ist von der Durchmischung der Raumluft abhängig, inwieweit dies zu einer Vergrößerung des Zuluftstromes (d.h. einer Erhöhung der Luftwechselzahl) führt. Nur der Anteil der natürlichen Lüftung der (aufgrund einer unvollkommenen Durchmischung) nicht zur Minderung der CO₂-Konzentration beiträgt, erhöht den Luftwechsel. Wird in Folge der natürlichen Lüftung der Sollwert der CO₂-Konzentration unterschritten, so bedeutet dies auch eine Erhöhung der Luftwechselzahl gegenüber der Situation bei geschlossenen Fenstern.

Im Nachtlüftungsbetrieb läuft der Ventilator frei. Bei geöffnetem Fenster erhöht sich der Luftwechsel verglichen mit der Situation geschlossener Fenster um den (auf das Raumvolumen bezogenen) Volumenstrom, der über die Fenster aus dem Raum austritt. Außerdem ist zu erwarten, dass sich der geförderte Abluftvolumenstrom als Folge des

¹⁰ Es wurde eine Messung der Luftgeschwindigkeit direkt an den Funktionsfugen der Türen (keine Schwelle, mit Gummidichtung an allen vier Funktionsfugen) des Büroraumes zum Treppenhaus durchgeführt. (Nachtlüftung aktiv, Fenster geschlossenen). Mit einem Hitzdrahtanemometer wurde nur an der unteren horizontalen Fuge über deren halbe Länge eine Luftbewegung nachgewiesen. Und dies auch nur direkt an der Fuge.

verringerten zuluftseitigen Strömungswiderstandes (Veränderung der Anlagenkennlinie) steigt. Die Messung des Abluftvolumenstromes zeigt, dass dieser Zusammenhang hier jedoch nicht vorhanden ist (s. 5.2.3.2).

5.2.2 Fensteröffnungszeiten

Tageslüftung

Da die Fensterstellung nicht erfasst wird, liegen hier keine Informationen vor. Die einzige Informationsquelle ist eine Nutzerbefragung¹¹. Die zur Erfassung der Nutzerakzeptanz des Gebäudes angelegte Befragung beinhaltete auch Fragen zum Lüftungsverhalten der Nutzer im Sommer. Aus der Befragung lässt sich jedoch nur ableiten, dass weder eine eindeutige Tendenz zu stets geschlossenen noch zu stets offenen Fenstern vorhanden ist.

Nachtlüftung

Der Planung nach sollte während der Nachtlüftung auch bei geschlossenen Fenstern ein ausreichender Volumenstrom gefördert werden. Da die Nutzern während der ersten zwei Wochen im Juni z.T. zu hohe Raumtemperaturen am Tage beklagten, wurden die Fenster in der Nacht teilweise geöffnet.

Die Fensterstellungen während der Nachtlüftung sind z.T. bekannt¹². Entsprechend werden in der Auswertung drei Betriebszustände unterschieden:

- alle Fenster sind zu,
- alle Fenster sind offen,
- Fensterstellung ist unbekannt.

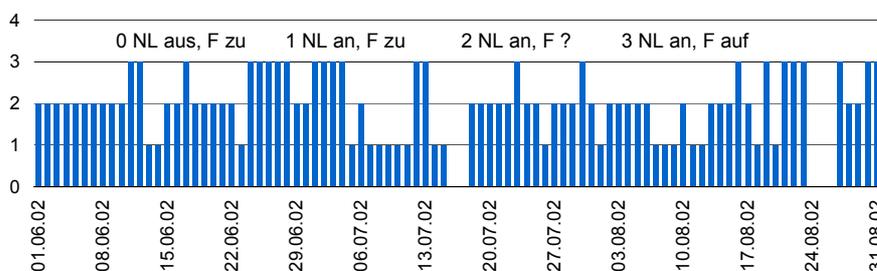


Abb. 5.2: Fensterstellung während der Nachtlüftung (01.06.02 bis 31.08.02)

¹¹ Im Rahmen des Monitoring dieses Gebäudes wurde vom Fraunhofer ISE im Juli 02 eine Nutzerbefragung in Form eines Fragebogen durchgeführt.

¹² Informationsquelle:

- Auskunft der Pförtner, die die Fenster zu Beginn der Nacht öffneten,
- Auswertung des Temperaturverlaufes in den Büroräumen (sehr geringe Tagesschwankung: Fenster zu, sehr große Temperaturschwankung: Fenster auf)

5.2.3 Messwerte: Mechanischer Volumenstrom

5.2.3.1 Messwerterfassung

Der Abluftvolumenstrom jedes Büroräume wird mit zwei verschiedenen Volumenströmmessern erfasst:

- einer quer zur Strömungsrichtung eingebauten stabförmige Messsonde (Druckdifferenzmessung),
- einem Messkreuz am Volumenstromregler.

Da der Einbauort des Messkreuzes hydraulisch sehr ungünstig ist (auf Grund des zu geringer Abstand von dem letzten Kanalbogen), stützt sich die Auswertung des Abluftvolumenstromes nur auf die Messwerte der Messsonde.

5.2.3.2 Auswertung der Messdaten

In Tabelle 5.2 sind die Abluftvolumenströme, die durchschnittlich bei den entsprechenden Betriebsweisen gefördert werden, für den Büroraum Süd 2. OG aufgeführt.

Tabelle 5.2: Abluftvolumenstrom und „mechanischer“ Luftwechsel im Büroraum Süd 2.OG, Mittelwerte in Abhängigkeit von der Betriebsart des Ventilators

	Normalbetrieb ¹³		Nachtlüftung	Durchlüften
	500 ppm	1.000 ppm		
CO ₂ - Sollwert	500 ppm	1.000 ppm		
Volumenstrom [m ³ /h]	< 156	840	1.060 / 1.340	760 / 1.050
Luftwechsel [1/h]	< 0,10	0,56	0,70 / 0,88	0,50 / 0,69

Normalbetrieb

Der Sollwert für die CO₂-Konzentraion (bei Außenlufttemperatur über 20°C) wurde während des Betriebes unterschiedlich eingestellt. Dementsprechend stellen sich unterschiedliche Volumenströme ein.

- Sollwert 500 ppm: (01.06. – 04.06.02, 10.07. – 31.08.02)
In Abb. 5.3 sind die an den Arbeitstagen geförderten Abluftvolumenströme über der Uhrzeit aufgetragen. Der Volumenstrom steigt von Beginn der Betriebszeit (nach dem Durchlüften) bis in den Nachmittag leicht an: im Mittel von 740 m³/h um 8 Uhr auf 900 m³/h um 15 Uhr. Nach 16:00 Uhr verringert sich der Volumenstrom stark, bis auf rund die Hälfte um 19 Uhr. Während der Kernarbeitszeit beträgt der Volumenstrom durchschnittlich 840 m³/h. Dabei stellt sich der Volumenstrom an einigen Tagen bei rund 780 und an anderen bei rund 1.070 m³/h ein. Diese Werte stellen sich bei gleichem Druckverlust am Ventilator (differenzdruckgeregelt) und gleicher

¹³ Mittelwert: Mo – Fr 8:00 bis 17:00 Uhr (nur Arbeitstage)

Klappenstellen des Volumenstromreglers ein (weitere Erläuterungen hierzu s. Nachtlüftung).

- Sollwert 1.000 ppm: (05.06.02 bis 09.07.02)
Der entsprechend dem Sollwert und dem Ist-Wert des CO₂-Konzentration erforderliche Volumenstrom liegt unterhalb des Regelbereiches des Volumenstromreglers ($\dot{V}_{\min} = 157 \text{ m}^3/\text{h}$).

Es zeigt sich, dass der natürliche Luftwechsel bei dem vorhandenen Nutzerverhalten bezüglich der Fensteröffnung bei Normalbelegung nie ausreichend ist, um eine CO₂-Konzentration von 500 ppm sicherzustellen.

Nachtlüftung

Der mechanisch erzeugte Luftwechsel in der Nacht liegt mit 0,7 – 0,88 1/h deutlich unter den Planungswerten von 1,5 1/h. Die Fensteröffnung hat keinen Einfluss auf den geförderten Volumenstrom. Es stellen sich jedoch bei gleicher Klappenstellung (offener Bypass und offener Volumenstromregler in den Teilsträngen zu den Büroräumen Süd 1. OG und 2. OG) zwei unterschiedliche Volumenströme ein. Da kein Zusammenhang mit der Fensteröffnung besteht, müssen die unterschiedlichen Druckverluste im Netz auftreten. Es bleibt zu überprüfen, ob sich die Klappenstellung bei dem zusätzlich eingebauten Volumenstromregler ändert. Dieser ist nicht an die GLT angeschlossen ist, da er aufgrund eines Planungsfehlers eingebaut wurde und keine Regelungsaufgaben übernimmt. Außerdem wird im Rahmen dieser Arbeit nicht die Ursache dafür untersucht, dass der maximal geförderte Abluftvolumenstrom um rund die Hälfte unter dem Planungswert liegt.

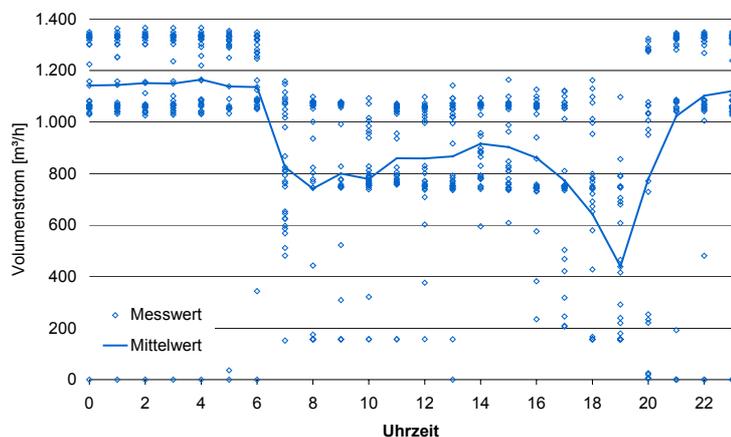


Abb. 5.3: Abluftvolumenstrom im Büroraum Süd 2 (22.07. – 31.08.02)

5.3 Messungen: Tracer-Gas

5.3.1 Zielstellung

Es werden Messungen des Luftwechsel durchgeführt, mit folgenden Zielstellungen:

- Abschätzung des natürlichen Luftwechsels unter verschiedenen Randbedingungen,
- Abgleich des stationären Volumenstrommessers in dem Abluftkanal,
- Abschätzung der Dichtheit der Gebäudehülle.

5.3.2 Messprinzip

Angewendet wird hier die Konzentrationsabfall-Methode, bei der ein Spurengas in den Raum eingebracht wird und anschließend aus dem zeitlichen Verlauf des Konzentrationsabfalles der Luftwechsel bestimmt wird. Der Konzentrationsabfall ist exponentiell. Die Luftwechselzahl berechnet sich mit:

$$n = \frac{\ln C(t) - \ln C(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (5.15)$$

Voraussetzung für den Erfolg der Messung ist, dass während der Dauer der Messung eine vollständige Durchmischung innerhalb des gesamten Raumvolumens gewährleistet ist.

5.3.3 Durchführung

Die durchgeführten Messreihen sind in Abb. 5.4 zusammengestellt.

In dem Büroraum Süd 2.OG wird Tracer-Gas (verwendet wird SF₆) mit Injektionsspritzen gleichmäßig verteilt im Raum eingebracht. Anschließend wird die Raumluft mit einem Laken verwirbelt. Die Probeentnahme erfolgt an zehn im Raum gleichmäßig verteilten Orten im Raum in einem zeitlichen Abstand von 15 – 50 min (je nach erwartetem Luftwechsel)¹⁴. Insgesamt werden fünf Proben je Messreihe entnommen. Die Entnahmezeit wird notiert. Zwischen den Probeentnahmen wird erneut die Luft verwirbelt. Während einer Messreihe dürfen die Randbedingungen (Fensterstellung) nicht verändert werden.

Die Analyse der Proben erfolgt in einem Gaschromatographen.

Die ermittelten Konzentrationen werden logarithmisch über der Zeit aufgetragen und aus der Regressionsgrade der Luftwechsel berechnet.

¹⁴ Eine weitere Messreihe wird durchgeführt, bei der die Probe an der Absaugstelle der Luft aus dem Raum gezogen wird.

Zur Bewertung der Ergebnisse von Messungen bei natürlicher Lüftung ist die Kenntnis der meteorologischen Randbedingungen erforderlich. Da hier die stationäre Windmessung unzuverlässig ist, kann hier der Wind nur durch die Beobachtung der Bewegungen in der Vegetation abgeschätzt werden.

5.3.4 Auswertung

In Abb. 5.4 sind die Messergebnisse zusammengestellt.

Ventilator	Fenster	ZLÖ	n
- (tags)	zu	zu	0,15 +/- 0,09
- (tags)	zu	auf	-
Durchlüften	zu	auf	0,16 +/- 0,37
Durchlüften	zu	auf	0,19 +/- 0,22
Durchlüften	0,5 auf	auf	1,75 +/- 0,44
Durchlüften	auf	auf	2,00 +/- 0,43
Durchlüften	auf	auf	2,75 +/- 0,42
- (tags)	auf	auf	2,17 +/- 0,75
- (nachts)	auf	auf	2,06 +/- 1,28
- (nachts)	auf	auf	1,71 +/- 1,43
Nachtlüftung ¹⁵	zu	auf	0,95 +/- 0,66
Nachtlüftung	zu	auf	0,41 +/- 0,39
Nachtlüftung	auf	auf	1,95 +/- 0,68

Abb. 5.4: Ergebnisse der Tracer-Gas-Messung; ZLÖ: Zuluftgitter

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt eine große Streuung der Messwerte um die Regressionsgrade in nahezu allen Messungen. Die Ungenauigkeiten werden als zu groß angesehen, als dass sich aus den Messungen zuverlässige Rückschlüsse auf den Luftwechsel schließen ließen.

Ursache der schlechten Qualität der Messung ist vermutlich, dass keine gute Durchmischung im Raum erreicht werden konnte.

In anderen Räumen (normale Büroräume und Atrien) erwies sich diese Messmethode als zuverlässig¹⁶. Daher bleibt zu prüfen, ob Luftwechsellräumen in Großraumbüros auf diese Art durchgeführt werden können.

¹⁵ Probeentnahmeort direkt vor der Absaugung aus dem Raum

¹⁶ Auskunft: Fraunhofer ISE

5.4 Strömungsvisualisierung: Zuluftstrom

5.4.1 Zielstellung

Der Verlauf der während der Nachtlüftung über die Zuluftöffnungen eindringenden Zuluft wird mit Nebel sichtbar gemacht. Hiermit sollen folgende Aspekte untersucht werden:

- Verlauf des Zuluftstrahles:
Wann sinkt der Zuluftstrahl ab?
Wie schnell tritt eine Vermischung mit der Raumluft ein?
- Raumluftströmung außerhalb des Zuluftstrahles:
Wie breitet sich der Kaltluftsee aus?

5.4.2 Messprinzip

In einem Nebelgerät wird ein ölfreies Nebelfluid verdampft, das mit hohem Impuls aus dem Gerät austritt. Unmittelbar nach dem Austritt aus dem Gerät bildet sich durch eine physikalisch-chemische Reaktion mit der atmosphärischen Luftfeuchtigkeit Nebel, d.h. mikroskopisch kleine Partikel.

Deren Oberfläche-Masse-Verhältnis ist so groß, dass die auf das Tröpfchen wirkenden Kräfte hauptsächlich aus der molekularen Reibung an der Luft resultieren, wohingegen die Erdanziehung zu vernachlässigen ist. Die Absinkrate der Tröpfchen geht bei richtiger Betriebsweise des Gerätes somit gegen Null, die Tröpfchen bewegen sich mit der Luftströmung und machen diese damit sichtbar.

An dem Gerät wird ein Schlauch angebracht, so dass der Nebel auch in bis zu 10 m Entfernung von dem Gerät genutzt werden kann.

Zu beachten ist die erhöhte Temperatur und der Bewegungsimpuls am Anfang des Nebelstrahles. Die Übertemperatur hat sich nach Herstellerangaben nach einem halben Meter nahezu abgebaut.

5.4.3 Versuchsdurchführung

Der Nebel wird außerhalb des Gebäudes ca. 1m unterhalb einer Zuluftöffnung in die Außenluft eingeblasen (s. Abb. 5.5). Gewählt wird eine Zuluftöffnung, die sich nicht unmittelbar in Ventilatornähe befindet und bei der günstige „Befestigungsbedingungen“ für den Schlauch vorhanden sind. Dieser wird von dem vor dem Gebäude stehenden Nebelgerät aus vor der Gebäudefassade entlang geführt und mit Hilfe von Bindfäden, die an den schmalen Fenstern befestigt werden, gehalten.

Während der Versuchsdurchführung sind alle Fenster geschlossen und der Ventilator läuft im Nachtlüftungsprogramm und fördert einen Volumenstrom von 1.200 m³/h. Dies

entspricht bei gleichmäßiger Verteilung der Zuluftströme auf alle Zuluftöffnungen einem Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ je Zuluftöffnung. Es herrscht nahezu Windstille. Die Außenlufttemperatur beträgt 10°C und die Raumlufthtemperatur in $1,10 \text{ m}$ Höhe 21°C ¹⁷. Die Temperatur unter der Decke liegt rund $0,5 \text{ K}$ höher (s. 6.2.3.2).



Abb. 5.5: Visualisierung des Zuluftstrahls: Versuchsaufbau

5.4.4 Beobachtung

Wie in Abb. 5.5 zu sehen, tritt der Nebel senkrecht nach oben aus dem Schlauch aus und strömt dann durch eine der beiden nebeneinander angeordneten Zuluftöffnungen in den Raum ein.

Unmittelbar nach dem Eintritt in den Raum fällt der Nebel nach unten (s. Abb. 5.6). Dabei verbreitert sich der Strahl langsam, jedoch nicht kontinuierlich. Er fällt bis zum Fußboden und breitet sich dann horizontal aus. Die Zuluft vermischt sich dabei schnell mit der Raumlufthtemperatur. Nach wenigen Minuten hat sich in dieser Zone bis zum Atrium hin und in Richtung der Nachbarzone am Ventilator eine gleichmäßig „vernebelte“, ca. 1 m hohe Schicht über dem Fußboden ausgebreitet. Die Nebelkonzentration reicht nicht mehr aus, um den Verlauf der Ausbreitung des Kaltluftsees genau verfolgen zu können.

¹⁷ gemessen mit einem Lufttemperaturfühler (s. 6.3.2.1)



Abb. 5.6: Visualisierung des Zuluftstrahls während der Nachtlüftung

5.4.5 Auswertung

Während der Nachtlüftung stellt sich Raumluftrömung ein, die einer Quelllüftung vergleichbar ist. Aus dem bodennahen Kaltluftsee steigt die Luft gleichmäßig auf, so dass sich im Gegensatz zu einer Quelllüftung am Tag keine obere Schichtgrenze ausbildet.

Die schnelle und gleichmäßige Ausbreitung der Zuluft im unteren Raumvolumen über die gesamte Grundfläche ist auf eine gute Durchmischung zurückzuführen: einerseits eine horizontale Durchmischung über dem Fußboden und andererseits eine vertikale Durchmischung oberhalb des Zuluftsees.

6 Die Raumtemperatur

6.1 Messung: Oberflächentemperatur

6.1.1 Zielstellung

Thermographieaufnahmen der Decke sollen Aufschluss über die Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche geben. Mit den Messungen werden folgende Aspekte untersucht:

- Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der räumlichen Lage,
- Oberflächentemperatur in Abhängigkeit vom Material: Beton / Gipskarton,
- zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur im Verhältnis zur zeitlichen Änderung der Raumlufitemperatur.

6.1.2 Messprinzip

Jeder Körper sendet elektromagnetische Strahlung aus, deren Leistungsdichte und spektrale Verteilung eine Funktion der Oberflächentemperatur des Körpers ist.

Die gesamte von einem idealen Strahler ausgesandte Leistungsdichte wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben:

$$M = \sigma * T^4 \quad (6-1)$$

mit: σ als Stefan-Boltzmann-Konstante.

Reale Strahler emittieren nur einen Teil der Strahlung des idealen Strahlers. Das Verhältnis wird durch den Emissionskoeffizienten wiedergegeben. In dem Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung haben Baustoffe einen nahezu wellenlängenunabhängigen Emissionsgrad. Bei mineralischen Bau- und Anstrichstoffen liegt er bei $\epsilon \approx 0,90$ [Zürcher], [Glückert].

Jeder Körper steht im Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Reale Strahler, die in dem entsprechenden Wellenbereich nichttransparent sind, reflektieren den Anteil $(1 - a)$ der einfallenden Strahlung. Der Absorptionsgrad a , der den Anteil der absorbierten an der einfallenden Strahlung wiedergibt, hat den gleichen Wert wie der Emissionsgrad bei gleicher Wellenlänge: $a_\lambda = \epsilon_\lambda$.

Unter der Annahme, dass der Emissionsgrad ε_U der Umgebung nahe 1 liegt, beträgt die von einer Oberfläche der Temperatur T_O ausgesandte spezifische Strahlungsleistung:

$$M_{ges} = \varepsilon * \sigma * T_O^4 + (1 - \varepsilon) * \sigma * T_U^4 \quad (6-2)$$

mit: T_O Oberflächentemperatur des Messobjektes,
 T_U mittlere Oberflächentemperatur der Umgebung,
 ε mittlerer Emissionsgrad des Messobjektes.

Durch Messung der von einem Flächenelement emittierten flächenspezifischen Strahlungsleistung lässt sich die Oberflächentemperatur bestimmen.

Die Infrarotstrahlung kann auf der Übertragungsstrecke vom Messobjekt zum Messgerät durch Absorption, Streuung und Reflektion an Luftbestandteilen gedämpft werden. Die Absorption durch permanente Bestandteile der Luft ist jedoch sehr gering und kann bei geringen Entfernungen von einigen Metern vernachlässigt werden. Hingegen können Nebel, Aerosole und Verunreinigungen in der Luft durch Streuung zu Verfälschung der Ergebnisse führen [Glückert], [Heidt].

6.1.3 Versuchsdurchführung

6.1.3.1 Aufnahme

Verwendet wird ein Scanner-Thermographiegerät mit Stirlingkühlung.

Am Gerät werden die Voreinstellungen für die Umgebungstemperatur mit $T_U = 20^\circ\text{C}$, den Emissionsgrad mit $\varepsilon = 0,9$ und den Temperaturbereich von $20^\circ\text{C} - 26^\circ\text{C}$ vorgenommen.

Es werden drei Messreihen an drei aufeinander folgenden Tagen aufgenommen.

1. Messreihe: „Deckenprofil“

In der ersten Messreihe wird der Verlauf der Deckenoberflächentemperatur von außen nach innen aufgenommen. Hierfür werden fünf Messstellen gewählt (s. Abb. 6.1):

- Betondecke am Außenfenster,
- Kante Betondecke / Abhängung (Gipskartonplatte),
- Abhängung,
- Kante Abhängung / Betondecke,
- Betondecke an Innenwand.

Die Ausschnitte werden so gewählt, dass ein Erkennungsmerkmal mit abgebildet wird.

An diesen Messstellen werden kurz nacheinander je eine Aufnahme gemacht. Beginnend mit der Bildfolge um 20:45 Uhr entstehen im Zeitabstand von zwei Stunden bis 4:45 Uhr fünf Bildfolgen.

Das Thermographiegerät wird auf den Fußboden gestellt, wobei ein Deckenausschnitt von 1,00 m x 1,50 m abgebildet wird.

2. Messreihe: „Abhängung“

In der zweiten Messreihe wird über 24 Stunden ein Ausschnitt der Abhängung im 2 h-Abstand aufgenommen. Die Aufnahme erfolgt automatisch. Hierbei wird ein Zoom eingestellt und die Kamera auf einen Tisch gestellt, wodurch sich der Bildausschnitt auf 0,40 m x 0,60 m verkleinert. Bei der Wahl des Messausschnittes wird auf die Abbildung eines Erkennungsmerkmals verzichtet, da sich die Aufnahme der Lampen als ungünstig erwies (s. 6.1.4).

3. Messreihe: „Kante“

Anschließend wird in der dritten Messreihe ein Deckenausschnitt an der Kante von der Abhängung zu der Betondecke aufgenommen, ebenfalls im 2 h-Abstand über 24 h. Der Bildausschnitt beträgt hier wie in der ersten Messreihe 1,00 m x 1,50 m.

Zeitgleich wird eine Messung der Raumlufttemperatur durchgeführt (s. 6.3.2)

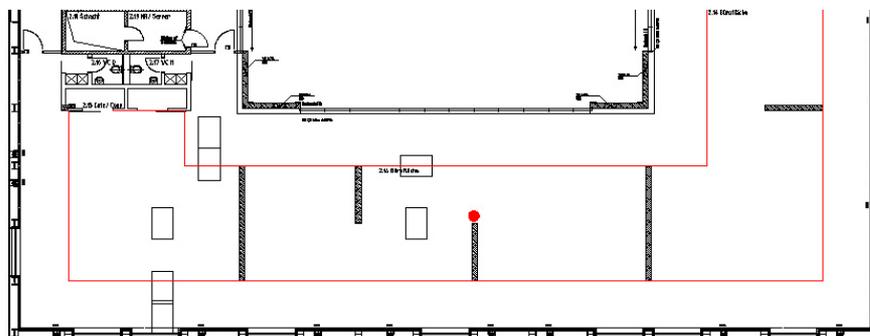


Abb. 6.1: Thermographie: Anordnung der Messstellen, und Messstelle GLT (roter Punkt)

6.1.3.2 Bildaufbereitung

Die Aufnahmen werden in dem Gerät gespeichert und stehen anschließend als thermografische Rohdaten zur Bearbeitung in einem Thermografieauswertungsprogramm zur Verfügung. Hier wird eine Korrektur der Umgebungstemperatur vorgenommen und ein für die Darstellung günstigerer Temperaturbereich gewählt. Als mittlere Umgebungstemperatur wird die mittlere Oberflächentemperatur des abgebildeten Deckenausschnittes angenommen. In der Messreihe „Deckenprofil“ wird für alle Aufnahmen einer Bildfolge die gleiche Umgebungstemperatur (mittlere Oberflächentemperatur der fünf Deckenausschnitte) angesetzt. Eine Fehlerbetrachtung zeigt, dass sich eine Ungenauigkeit der Angabe der Umgebungstemperatur um ± 1 K mit einer Ungenauigkeit der ermittelten Oberflächentemperatur um $\pm 0,1$ K auswirkt.

Zur grafischen Auswertung des räumlichen und zeitlichen Temperaturverlaufes werden mit dem Thermographieauswertungsprogramm (Auflösung von 0,1 K) die Temperaturen aus den Aufnahmen ermittelt.

6.1.4 Bewertung der Messergebnisse

Im Anhang B sind die Thermographieaufnahmen aller drei Messreihen abgebildet. Die erste Bildfolge der Messreihe „Deckenprofil“ ist in Abb. 6.2 dargestellt.

In den Aufnahmen der Messreihe „Deckenprofil“ ist am linken Rand der Bildfolge der Holzrahmen der Fensterlaibung sichtbar.

Des Weiteren sind die Lampen (in die Decke eingesetzte Downlights im Betonstreifen und frei hängende Lampen unter der Abhängung) zu erkennen (s. Anhang B). Da diese während der Messzeit teilweise in Betrieb sind, ist die Betontemperatur in Umgebung der eingebauten Lampen erhöht. Für die Auswertung der Aufnahmen werden daher Betrachtungsflächen (in Abb. 6.2 dargestellt durch Rechtecke) in ungestörten Bereichen festgelegt¹⁸.

Die Bilder der Messreihe „Deckenprofil“ (mit Ausnahme der vierten Bildfolge) zeigen einen Streifen erhöhter Temperatur am linken Bildrand. Dieser „Randeffekt“ taucht auch in den Bildern der Messreihe „Kante“ auf¹⁹. Die Lage dieser Messstellen ist sehr unterschiedlich, so dass ein Einfluss von der Umgebung ausgeschlossen werden kann und der Effekt mit einer fehlerhaften Bildaufnahme oder Bildverarbeitung erklärt wird.

Im ungestörten Bereich werden drei Bewertungsflächen festgelegt, um den Temperaturverlauf in Grafiken verdeutlichen zu können.

In allen Aufnahmen der Messreihe „Kante“ zeigt sich im Bereich der Betondecke ein starker Temperaturabfall zur Kante hin. Dieses Temperaturgefälle ist in den anderen Aufnahmen von Kantensituationen an anderer Stelle im Raum (s. Anhang B „Deckenprofil“) nicht bzw. nur sehr gering ausgeprägt²⁰. Die möglichen Erklärungen für den deutlichen Temperaturabfall können hier nicht bestätigt werden:

- Die Konstellation der Lampen als Strahlungsquelle ist an den entsprechenden Messstellen vergleichbar.
- Weitere Wärmequellen, die diesen Temperaturverlauf bewirken könnten, wurden nicht gefunden.
- Die Erklärung, dass die Betontemperatur unter der Abhängung aufgrund des Strahlungsschutzes durch die Abhängung niedriger ist als die Betontemperatur im nicht abgehängten Bereich und dass dieses Phänomen an der Kante sichtbar wird, kann durch den Vergleich der verschiedenen Aufnahmen nicht bestätigt werden.

¹⁸ Während in den meisten Bildern die Grenzen der durch die Lampen beeinflussten Bereiche deutlich erkennbar sind, ist in den Aufnahmen am Fenster der ersten und zweiten Bildfolge nicht genau erkennbar, ob der gesamte abgebildete Deckenausschnitt von dieser Temperaturerhöhung betroffen ist. Der Verlauf der Temperatur in dem Umkreis der Lampe, lässt die Vermutung zu, dass nur der orange-rote Bereich auf die Wirkung der Lampe zurückzuführen ist, der gelbe Bereich jedoch unbeeinflusst ist. Die Temperatur in der Betrachtungsfläche wird somit in die Auswertung mit aufgenommen.

¹⁹ In Anhang B ist nur der ungestörte Bereich dargestellt.

²⁰ 0,4 ... 0,7 K/m in der Messreihe „Kante“ und 0,1 K/m in der Messreihe „Deckenprofil“

Eine erneute Thermographieaufnahme mit Einbeziehung eines größeren Bereiches scheint notwendig, um dieses Phänomen zu klären. Doch kann dies aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden.

In den Bildern der Messreihe „Kante“ ist die Betontemperatur direkt an der Kante (bis auf eine Aufnahme) niedriger als die der Abhängung und in einiger Entfernung von der Kante ist die Betontemperatur stets höher als die der Abhängung. Da die Auswertung der Messreihe „Deckenprofil“ auf eine im Vergleich zur Oberfläche der Abhängung kältere Betondeckenoberfläche hinweist, werden in die Auswertung der Aufnahmen der Messreihe „Kante“ nur die Betontemperatur unmittelbar an der Kante und die Temperatur der Abhängung einbezogen (in Anhang B als Rechtecke dargestellt).

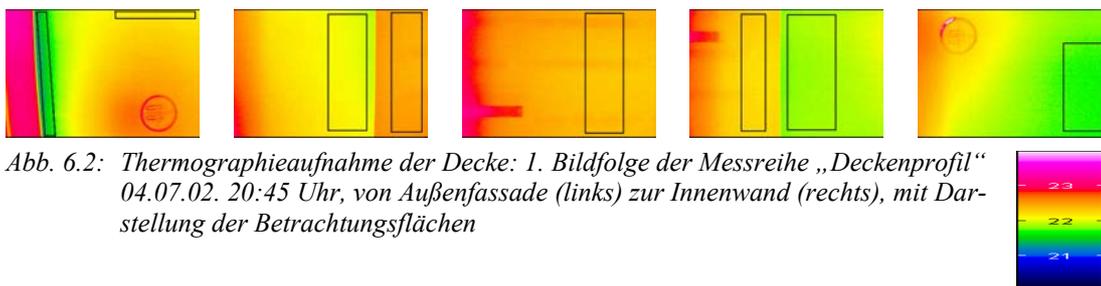


Abb. 6.2: Thermographieaufnahme der Decke: 1. Bildfolge der Messreihe „Deckenprofil“ 04.07.02. 20:45 Uhr, von Außenfassade (links) zur Innenwand (rechts), mit Darstellung der Betrachtungsflächen

6.1.5 Beobachtung

„Deckenprofil“

Während der Messreihe „Deckenprofil“ ist die mechanische Nachtlüftung aktiv (ab 20:00 Uhr) und die Fenster sind geschlossen. Die Außenlufttemperatur ist bereits zu Beginn der Messung um ca. 5 K kälter als die Raumlufttemperatur (20:45 Uhr: $\vartheta_{AL} = 17,5^{\circ}\text{C}$, 04:45 Uhr: $\vartheta_{AL} = 9,6^{\circ}\text{C}$).

In Abb. 6.3 sind die Temperaturprofile der Deckenoberfläche zu den Messzeiten dargestellt²¹. Der Abstand der Messwerte im Diagramm entspricht maßstäblich den realen Abständen der Messstellen.

In dem Randbereich der an die Außenwand grenzenden Betondecke ist zu allen Zeiten deutlich ein Temperatursprung zu erkennen: außenwandseitig ist es stets ca. 0,6 K kälter. Die Abkühlung wird durch die unmittelbar unter der Decke einströmende kalte Außenluft bewirkt. Wie in den Thermographieaufnahmen zu erkennen, ist der kältere Bereich auf einen ca. 15 cm breiten Streifen begrenzt. Die klar ausgebildete Temperaturgrenze macht den Ablösepunkt der Zuluftströmung deutlich.

²¹ Die hier eingetragenen Messwerte entsprechen den Temperaturmittelwerten der Betrachtungsflächen (s. 6.1.3.2).

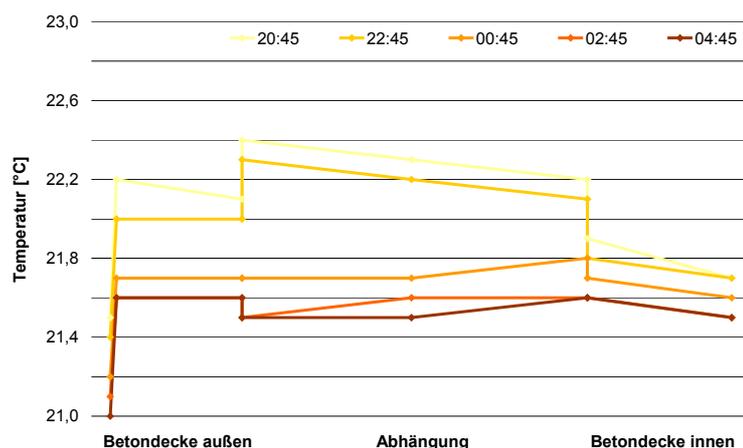


Abb. 6.3: Temperaturprofil der Deckenoberfläche von der Außenwand (links) zur Innenwand (rechts), Messreihe „Deckenprofil“ (04./05.07.02)

Das Temperaturprofil der Deckenoberfläche weist zu Beginn der Messreihe (20:45 Uhr) zum einen ein Temperaturgefälle von der Außenwandseite zur Innenwandseite auf und zum anderen Temperaturunterschiede zwischen der Betondecke und der Abhängung:

- Der außenwandseitige Betonstreifen ist um rund 0,3 K wärmer als der innenwandseitige. An der Abhängung ist ebenfalls ein leichtes Temperaturgefälle vorhanden: 0,2 K Temperaturunterschied zwischen außen- und innenwandseitiger Kante.
- Die Abhängung ist wärmer als die Betondecke: Temperaturunterschied an der Kante zwischen Abhängung und benachbarter Betondecke von 0,3 K.

Der zeitliche Verlauf aller Oberflächentemperaturen weist nach einer langsamen Abkühlung am Anfang der Messzeit (von 20:45 Uhr bis 22:45 Uhr) einen deutlichen Temperaturabfall zwischen 22:45 Uhr und 0:45 Uhr auf. Dabei ist der Temperaturabfall des außenliegenden Betonstreifens und der Abhängung größer als der des innenliegenden Betonstreifens, so dass sich alle Deckentemperaturen bis 0:45 Uhr angeglichen haben. Danach fällt die Temperatur aller Flächen bis 4:45 Uhr nur noch leicht ab.

Die Raumlufttemperatur (in 1,10 m Höhe) hingegen fällt von Beginn der Messungen bis ca. 2 Uhr kontinuierlich ab und bleibt danach von einer kurzzeitigen Temperaturschwankung abgesehen konstant. (s. Abb. 6.4) Dies zeigt, dass sich Decken- und Lufttemperatur nicht im gleichen Verhältnis abkühlen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Temperatur in der benachbarten Raumzone in 1,10 m Höhe gemessen wird. Eine direkte Schlussfolgerung auf die thermische Kopplung ist daher nicht möglich.

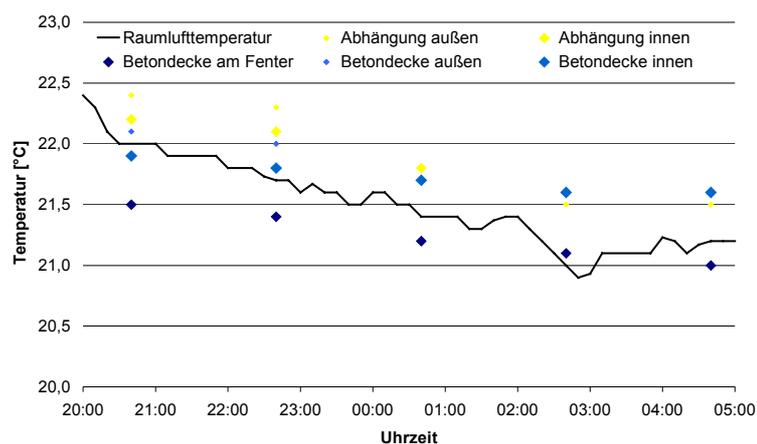


Abb. 6.4: Lufttemperatur und Oberflächentemperatur während der Messreihe "Deckenprofil"

„Kante“

Abb. 6.5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Raumlufttemperatur und der Deckenoberflächentemperatur für die Abhängung und die Betondecke.

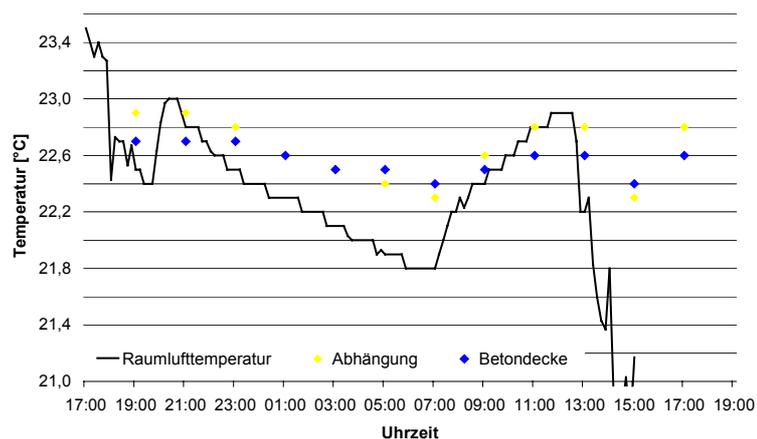


Abb. 6.5: Oberflächentemperatur der Decke (Betondecke und Abhängung) und Raumlufttemperatur, Messreihe "Kante" (06./07.07.02)

Zu Beginn der Messreihe „Kante“ (19 und 21 Uhr) ist die Abhängung um 0,2 K wärmer als die Betondecke: $\vartheta_{D_Beton} = 22,7\text{ °C}$, $\vartheta_{D_Abh.} = 22,9\text{ °C}$. Beide Temperaturen sinken ab ca. 21 Uhr, ebenso wie die Lufttemperatur, bis ca. 7 Uhr kontinuierlich ab. Die Abhängung kühlt sich stärker ab als die Betondecke, so dass sich die Temperaturen um 1 Uhr angeglichen haben und die Abhängung zum Ende der nächtlichen Abkühlung geringfügig kühler ist. Während die Deckentemperaturen diesem Zeit um 0,6 K bzw. 0,3 K gefallen sind, kühlte sich die Raumluft um 1,0 K ab.

Auch während des Temperaturanstieges danach – von 7 Uhr bis 13 Uhr – zeichnet sich ein entsprechendes Verhältnis der Temperaturänderungen von Raumluft und Oberflächen ab.

Um 13 Uhr fällt die Raumlufthtemperatur deutlich ab (verursacht durch Öffnen der Fenster und den damit verbundenen Einfall von zu diesem Zeitpunkt kälterer Außenluft), von 22,9°C (12:40 Uhr) auf 20,7°C (15 Uhr). Dieser kurzzeitige Temperaturabfall wirkt sich auch auf der Deckenoberfläche aus. Die Oberflächentemperatur der Betondecke fällt um 0,5 K und die der Abhängung um 0,2 K.

6.1.6 Auswertung

An der Oberflächentemperatur lässt sich ablesen, dass der Ablösepunkt der Zuluftströmung unmittelbar nach dem Lufteintritt liegt. Der Zuluftstrahl hat einen sehr geringen Impuls, so dass die kalte Zuluft unmittelbar nach dem Eintritt absinkt (s. 5.4 Strömungsvisualisierung: Zuluftstrom).

Tagsüber besteht ein Temperaturgefälle der Deckenoberfläche von der Außenwand zum Atrium. Dies wird zum einen durch den Strahlungseintrag und zum anderen durch das Temperaturgefälle der Raumluft vom außenwandnahen zum außenwandentfernten Raumvolumen verursacht:

- Die durch die Außenfenster einfallende Strahlung trifft auf den Fußboden und wird dort teils diffus reflektiert und teils absorbiert (was eine Temperaturerhöhung bewirkt). Der Fußboden steht im Strahlungsaustausch mit den anderen Bauteiloberflächen. Die Strahlungsintensität ist abhängig von der räumlichen Lage der Bauteile zueinander und verringert sich mit größerem Raumwinkel. Aufgrund der großen Raumtiefe und der vergleichsweise niedrigen Raumhöhe ist der Strahlungsaustausch zwischen fensternahen und fensterentfernten Bauteilen gering.
- Die Raumlufthtemperatur am Tag nimmt mit der Raumtiefe ab (Erklärung s. 6.2.3.1). Durch die thermische Kopplung zwischen der Luft und der Oberfläche wirkt sich dies auch auf die Deckenoberfläche aus.

Die unterschiedlichen Temperaturänderungen der Bauteiloberflächen in Abhängigkeit vom Material sind in Abb. 6.6 gegenübergestellt. Dargestellt sind die Temperaturänderungen, die jeweils in einer Zeitspanne (8 bzw. 10 h) mit kontinuierlich steigender bzw. fallender Raumlufthtemperatur auftreten. Die Temperaturänderung der Betondecke ist halb so groß wie die Änderung der Temperatur der Abhängung. (Aufgrund der Auflösung des Messwertes von 0,1 K ist diese Verhältnisangabe mit einer möglichen Abweichung von 13% zu betrachten.) Die Temperatur des Betons ändert sich wesentlich weniger, da er eine deutlich höhere Speicherkapazität besitzt als der Gipskarton der Abhängung.

Im Verhältnis zur Temperaturänderung der Raumlufthtemperatur an der Messstelle in 1,10 m Höhe ändert sich die Temperatur der Abhängung nur um 60% bis 80%. Hieraus kann aber kein Rückschluss auf die Kopplung zwischen der Bauteiloberfläche und der Raumlufthtemperatur gezogen werden, da die Temperaturschwankungen der Luft nicht in allen Höhen gleich sind. Zur Bewertung der thermischen Kopplung wäre die Messung der Lufttemperatur unter der Decke zeitgleich mit der Thermographieaufnahme erforderlich.

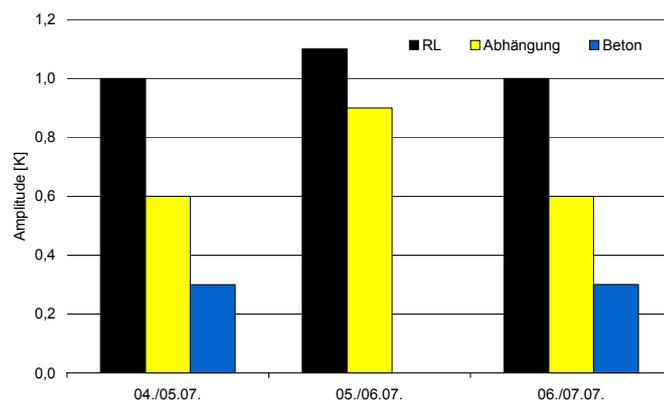


Abb. 6.6: Temperaturänderungen der Oberflächen (Beton, Abhängung) und der Raumluft jeweils während einer Periode kontinuierlich steigender bzw. fallender Temperatur (8 bzw. 10 h)

6.2 Messung: Temperaturverteilung im Raum

6.2.1 Zielstellung

Die Temperaturschichtung und die Temperaturunterschiede zwischen den Zonen geben einen Hinweis auf die Luftdurchmischung im Raum. Außerdem ist die Temperaturschichtung am Tag ein Maß für die Behaglichkeit.

Mit der Messung sollen folgende Aspekte der Raumlufttemperatur untersucht werden:

- Temperaturunterschiede zwischen den Raumzonen,
- Temperaturen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fenster,
- Temperaturschichtung,
- Temperaturen in Decken- und in Fußbodennähe,
- Bewertung der stationären Messwerterfassung.

6.2.2 Durchführung

Über einen Zeitraum von neun Tagen (29.07.02 bis 08.08.02) wird in dem Referenzraum eine Messung der Raumlufttemperatur durchgeführt. Temperatursensoren sind an drei Orten im Raum in jeweils drei Höhen (0,10 m, 1,10 m und 2,90 m über dem Fußboden) angeordnet (s. Abb. 6.7):

- In der östlichen Raumzone, in gleicher Entfernung (~5 m) von Außenwand und Atrium (bezeichnet als Ou, Om, Oo),
- In der südlichen Raumzone, in 2,20 m Entfernung von der Außenfassade (bezeichnet als Fu, Fm, Fo),
- In der südlichen Raumzone, in 7,60 m Entfernung von der Außenfassade (bezeichnet als Au, Am, Ao).

Alle Temperatursensoren sind an stoffbezogenen Elementen der Trennwände befestigt, so dass diese von der Wand entkoppelt und nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

Verwendet werden Temperaturlogger, in einem Plastikgehäuse untergebrachte Temperatursensoren (HOBO H8 Family).

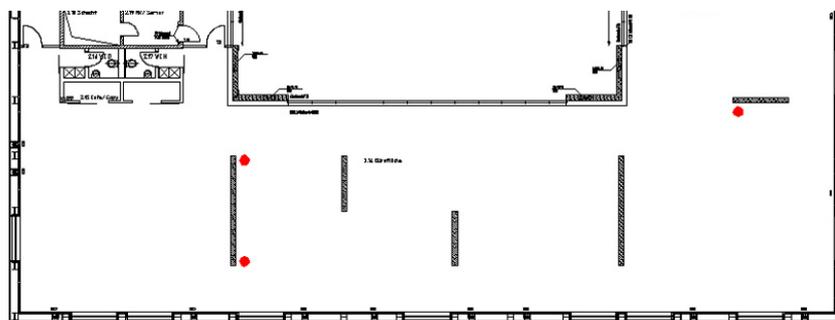


Abb. 6.7: Anordnung der Messstellen

Zur Bewertung der Messgenauigkeit der Temperaturlogger wird vor der Messung des Temperaturprofils eine Vergleichsmessung²² durchgeführt. Über einen Zeitraum von sechs Stunden wird die Raumlufthtemperatur mit den am gleichen Ort positionierten Temperaturloggern gemessen. Die Messergebnisse jedes Loggers werden anhand der 1-Stundenmittelwerte bewertet (s. Abb. 6.8):

- Als Vergleichstemperatur wird der Mittelwert der neun gemessenen Temperaturen angesetzt.
- Die mittlere Abweichung von der Vergleichstemperatur wird als systematischer Fehler betrachtet.
- Die Messwerte werden mit dem systematischen Fehler korrigiert.
- Die maximale Abweichung der korrigierten Messwerte von der Vergleichstemperatur wird als Ungenauigkeit der Messung betrachtet: $\pm 0,12$ K.

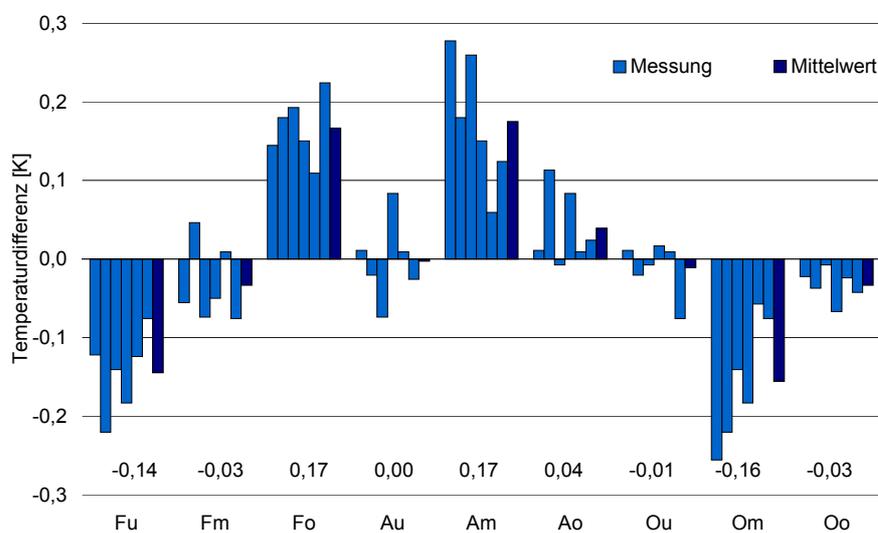


Abb. 6.8: Vergleichsmessung: Differenzen der Messwerte zu dem Vergleichswert für sechs 1-Stundenmittelwerte und deren mittlere Differenz für die neun Temperaturlogger

6.2.3 Beobachtung

6.2.3.1 Randbedingungen

Die Messperiode liegt in einer Periode mit fallender Außenlufttemperatur und fallender Raumlufthtemperatur. Während der ersten Tage liegen die Außenlufttemperaturen am Tage deutlich über der Raumtemperatur. An den übrigen Tagen übersteigt die Außenlufttemperatur nicht oder nur kurzzeitig die Raumlufthtemperatur. Die Nachtlüftung wird in allen Nächten genutzt, teils mit geöffnetem und teils mit geschlossenem Fenster.

²² Vergleich der Temperaturfühler untereinander, kein Vergleich mit einem kalibrierten Lufttemperaturfühler.

6.2.3.2 Temperaturunterschiede in einer Raumzone

Abb. 6.9 zeigt den Tagesgang der Temperaturen an den zwei Messorten in der Südzone (Fassade und Atrium) in den drei Höhen am 06.08.02. In der Nacht 05./06.08. sind die Fenster alle geöffnet und in der Nacht 06./07.08. geschlossen.

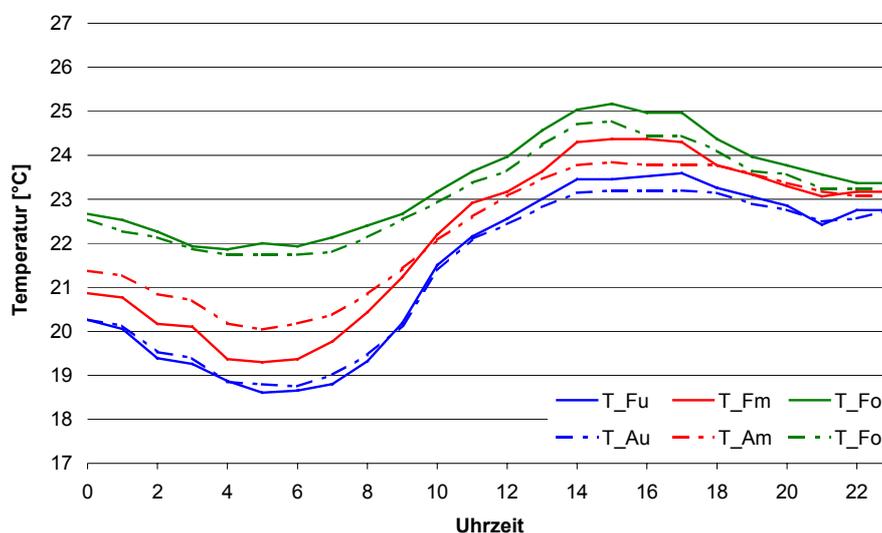


Abb. 6.9: Temperaturverlauf am 06.08.02 in Abhängigkeit von dem Abstand von der Fassade (F: 2,20 m, A: 7,60 m) und der Höhe (u: 0,1 m, m: 1,1 m, o: 2,9 m)

In dem Raum stellt sich eine mit der Höhe steigende Temperatur ein. Die Temperaturschichtung ist zeitlich und räumlich unterschiedlich ausgeprägt:

Fassade:

- Die Lufttemperatur ändert sich unter Tage in allen Höhen relativ gleichmäßig. Bei starkem Temperaturabfall (intensive Nachtkühlung) hingegen kühlt sich die Luft nur am Fußboden und in 1,10 m im gleichen Maße ab, unter der Decke deutlich weniger. Dies bedeutet, dass der untere Temperaturgradient²³ stets näherungsweise konstant ist, während der obere Temperaturgradient²³ in der Nacht größer ist als am Tag (s. Abb. 6.9).
- Am Tag ist der obere Temperaturgradient geringer (Mittelwert um 16 Uhr: 0,2 K/m) als der untere (Mittelwert um 16 Uhr: 0,6 K/m). In der Nacht ist der obere Temperaturgradient bei starker Abkühlung der Raumluft größer als der untere. (Im Mittel ist der Temperaturgradient um 5 Uhr über die Höhe gleich: 0,7 K/m.)

²³ auf den Höhenunterschied bezogener Temperaturunterschied zwischen 0,10 m und 1,10 m bzw. 1,10 m und 2,90 m Höhe

Atrium:

- Am Tag erwärmt sich die Luft am Atrium weniger stark als an der Fassade. Das größte Temperaturgefälle zwischen Fassade und Atrium tritt gleichzeitig mit dem Tagesmaximum der Raumlufthtemperatur auf. Es ist in allen Höhen gleich. Zu diesem Zeitpunkt ist der vertikale Temperaturgradient demnach an der Fassade und am Atrium gleich.

Die maximalen Temperaturunterschiede zwischen fassadennaher und atriumnaher Messstelle liegen bei 0,5 K (an strahlungsarmen Tagen mit kalten Außenlufttemperaturen) bis 1,0 K (an strahlungsreichen Tagen mit hoher Außenlufttemperatur).

- In der Nacht kühlt sich die Luft über die Höhe unterschiedlich ab: am Fußboden am meisten und unter der Decke am wenigsten. Der untere Temperaturgradient vergrößert sich auf 0,9 K/m und der obere Temperaturgradient auf 0,7 K/m (Mittelwerte um 5 Uhr).

Am Fußboden gleichen sich die Temperaturen an der Fassade und am Atrium während der Nachtlüftung an. Hingegen fällt in 1,10 m Höhe die Temperatur am Atrium nicht bis auf die Temperatur an der Fassade. Unter der Decke bleibt die Luft an der Fassade stets wärmer als am Atrium.

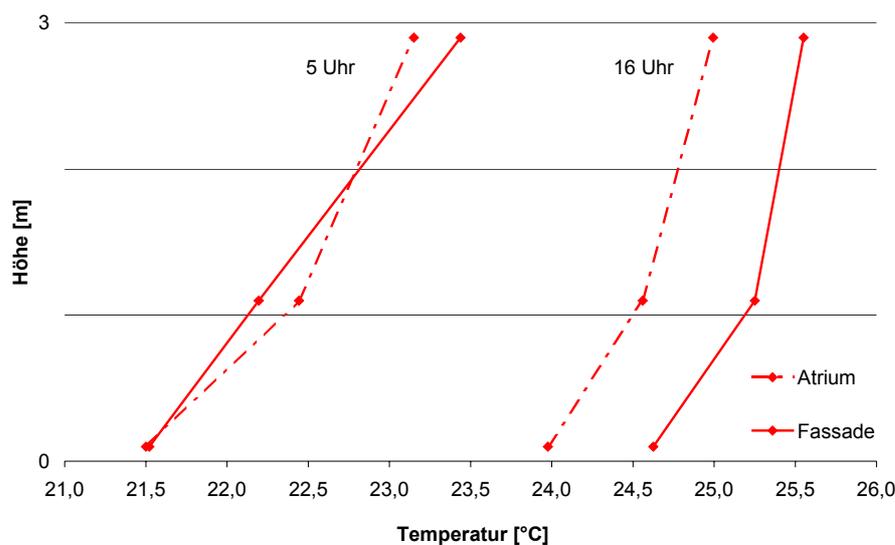


Abb. 6.10: Vertikaler Temperaturverlauf in 2,20 m und 7,60 m Entfernung von der Fassade (Mittelwerte der Messperiode)

Die zeitliche Änderung des vertikalen und horizontalen Temperaturprofils ist auf die unterschiedlichen Temperaturschwankungen (Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum) im Raum zurückzuführen. Die Temperaturschwankungen an den neun Messstellen sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt. Die Temperaturschwankung nimmt tendenziell mit der Entfernung von der Fassade und mit der Höhe ab:

- An der Fassade sind die Temperaturschwankungen am größten: Die Temperaturschwankung am Atrium beträgt in 0,10 m Höhe rund 80%, in 1,10 m 70% und unter der Decke 90% der Temperaturschwankung an der Fassade.
- Die Temperaturschwankungen in 0,10 m und 1,10 m Höhe sind an der Fassade nahezu gleich ($\sim 3,4$ K), während am Atrium die Temperaturschwankung in 1,10 m nur rund 80 % der in 0,10 m beträgt. Unter der Decke beträgt die Temperaturschwankung 70% der Temperaturschwankung über dem Fußboden. Dieses Verhältnis ist in allen Entfernungen von der Fassade gleich.

Tabelle 6.1: Temperaturschwankung in Abhängigkeit von der Höhe und der Entfernung von der Fassade (Fassade: 2,20 m, Mitte: 5,00 m und Atrium 7,60 m), (Mittelwerte der Messperiode)

	Fassade	Mitte	Atrium
0,10 m	2,4 K	2,2 K	2,1 K
1,10 m	3,4 K	2,8 K	2,3 K
2,90 m	3,5 K	3,3 K	2,9 K

6.2.3.3 Temperaturunterschiede zwischen den Raumzonen

Ein Vergleich zwischen den Zonen, also dem Messort Ost zum einen und den Messorten Fenster und Atrium zum anderen, zeigt, dass die Temperaturamplitude im Osten i.d.R. zwischen der am Fenster und der am Atrium liegt. Dies verdeutlicht, dass die Beeinflussung der Raumtemperatur durch die tagesabhängigen Einwirkungen von außen mit der Raumtiefe abnimmt.

Der Einfluss der äußeren Lasten wird auch in den unterschiedlichen Tagesgängen der Temperaturen deutlich: an den meisten Tagen steigt die Raumlufttemperatur im Osten zunächst gleich der an der Fassade (Süd) an, ab mittags aber nicht weiter.

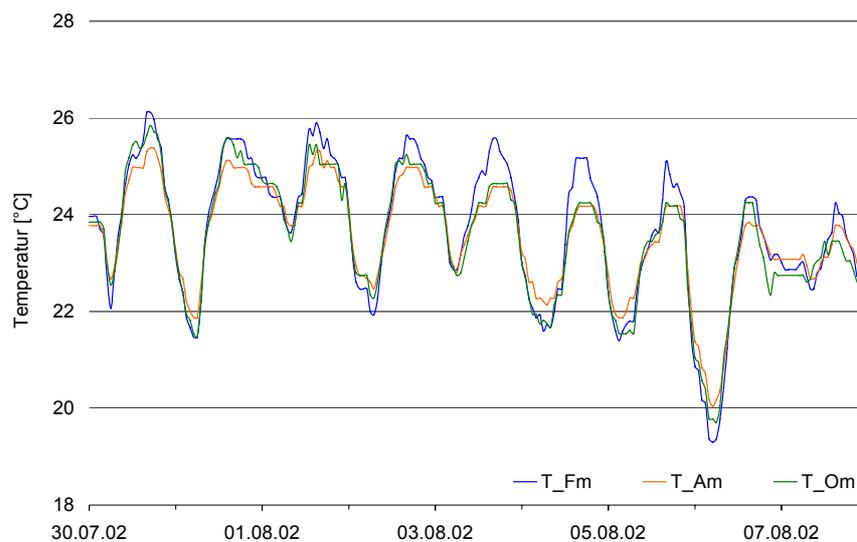


Abbildung 6.11: Raumlufthtemperaturen in 1,10 m Höhe

Im Gegensatz zu den Temperaturunterschieden zwischen Fassade und Atrium, die jeden Tag einen ähnlichen tageszeitabhängigen Verlauf haben, variieren die Unterschiede zwischen den Zonen von Tag zu Tag. Die Temperaturen liegen dabei i.d.R. zwischen denen an der Fassade und denen am Atrium.

Der Tagesverlauf der Temperaturen aller drei Messorte zeigt, dass die kurzzeitigen Änderungen der Temperatur an der Fassade i.d.R. auch gleichzeitig am Atrium auftreten, jedoch gedämpft. Teilweise sind diese auch im Temperaturverlauf Osten sichtbar. Einige Temperaturänderungen wirken sich jedoch nicht in der anderen Zone aus.

Alle Zonen werden von der Nachtlüftung auf nahezu gleiche Temperaturen abgekühlt, sowohl bei natürlicher als auch bei rein mechanischer Lüftung. Dies deutet auf eine gleichmäßige Verteilung der Zuluftströme auf alle Zuluftöffnungen hin.

Anmerkung:

Die Zuluftgitter sind alle vollständig geöffnet. Eine Messung der Zuluftgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen bringt keine Erkenntnis zur Verteilung der Zuluftvolumenströme. Die mittlere Eintrittsgeschwindigkeit ist kleiner als die Ansprechgeschwindigkeit des Flügelradanemometers.

6.2.3.4 Auswertung

Während der Betriebszeit überschreitet der untere Temperaturgradient nie den Grenzwert von 2 K/m nach DIN 1946 Teil 2.

Aus den Messungen lassen sich einige Überlegungen zur Durchmischung der Raumluft ableiten:

- In der Nacht gibt es eine gute horizontale Durchmischung über dem Fußboden. Dies lässt sich auf die Ausbreitung des Kaltluftsees zurückführen (s. 5.4).
- Der große Temperaturgradient (ausgeprägte Schichtung) in der Nacht und die geringe Abkühlung der Luft unter der Decke verdeutlicht, dass sich hier eine der Quelllüftung entsprechende Raumluftströmung einstellt.
- Tagsüber findet eine gute vertikale Durchmischung statt (geringer Temperaturgradient).
- Die horizontale Durchmischung zwischen den Zone einerseits, als auch innerhalb einer Zone ist tagsüber nicht gut ausgeprägt. (Die Beeinflussung der Raumtemperatur durch die tagesabhängigen Einwirkungen von außen nimmt mit der Raumtiefe deutlich ab).

Die Temperaturschwankungen der Luft sind vor der Speicherschicht Decke am geringsten. Dies hat Auswirkungen auf die Wärmemenge, die gespeichert werden kann (s. 7.5).

6.3 Die GLT-Temperatur

6.3.1 Der GLT-Temperaturfühler

Die Temperaturen werden in jedem Büroraum von einem PT 100-Temperaturfühler erfasst, der in eine Überputzdose eingebaut ist. Dieser ist in einer Höhe von 2,20 m an der nach Norden orientierten Stirnseite der kurzen Trennwand montiert. (s. Abb. 6.1).

6.3.2 Vergleich GLT-Temperatur und Lufttemperatur

6.3.2.1 Messung der Lufttemperatur

Für einen Zeitraum von sechs Tagen (04.-10.07.02) wird die Raumlufthtemperatur mit einem strahlungsgeschützten Lufttemperaturfühler gemessen. Dieser ist in einer Höhe von 1,10 m in der südlichen Raumzone in ca. 8 m von der Außenfassade entfernt positioniert.

6.3.2.2 Beobachtung

In Abb. 6.12 ist der Temperaturverlauf der Raumlufthtemperatur und die mit dem GLT-Temperaturfühler gemessene Temperatur aufgetragen.

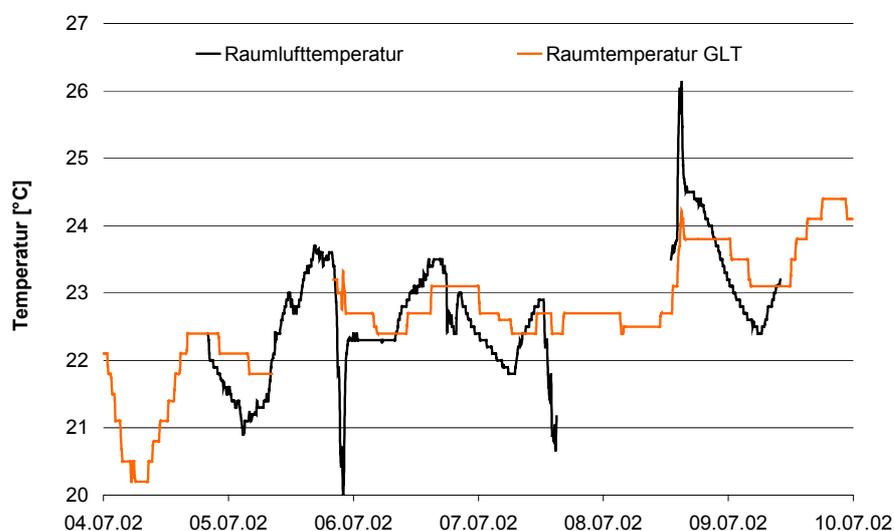


Abb. 6.12: Lufttemperatur und GLT-Temperatur(10 min-Werte)

Es lassen sich folgende Unterschiede erkennen:

- Die GLT-Temperatur weist keinen kontinuierlichen Verlauf auf. (Die Temperatursprünge sind nicht auf eine grobe Auflösung der Messwerterfassung zurückzuführen, wie die Auswertung aller Messwerte der GLT-Temperaturmessung zeigt. Es steht noch aus, die Ursache für dieses Verhalten des Temperaturfühlers zu finden.)
- Deutlich wird die geringere Temperaturschwankung des GLT-Fühlers. Die Tagesamplitude der Lufttemperatur an Tagen mit geschlossenen Fenstern war ca. doppelt so groß wie die der GLT-Temperatur. Die Tagesminima und -maxima der beiden Temperaturen unterschieden sich dabei um ca. 0,7 K. Die Lufttemperatur schwankte also um die GLT-Temperatur. Die Tagesmittelwerte der Temperaturen am 06.07.02 unterscheiden sich nur um 0,1 K:
Raumlufttemperatur: 22,7°C, GLT-Temperatur: 22,8°C.
- Auf dynamische Änderung reagiert der GLT-Temperaturfühler i.d.R. nicht. Nur ein kurzzeitiger Anstieg der Lufttemperatur um 2 K ist auch im Verlauf der GLT-Temperatur erkennbar, jedoch stark gedämpft.
- Es ist eine Verschiebung der Temperaturänderungen der Luft- und der GLT-Temperatur erkennbar. Die Verzögerung scheint bei Temperaturabfall größer zu sein, als bei Temperaturanstieg.

6.3.2.3 Auswertung

Aufgrund der Montagesituation des GLT-Temperaturfühlers wirkt sowohl die Beton- als auch die Lufttemperatur auf den Temperaturfühler. Die Phasenverschiebung gegenüber der Raumlufttemperatur kann damit erklärt werden, dass der Fühler in einer Mulde in der Betonwand eingebaut ist. Die Temperatur in dem Beton ist mit zunehmender Schichttiefe phasenverschoben gegenüber der Raumlufttemperatur (s. 7.2).

6.3.3 Die Referenztemperatur

An dieser Stelle werden die Temperaturmesswerte aus der Messung der Raumtemperaturverteilung (s. 6.2) mit den Messwerten des GLT-Fühlers verglichen. Aus dem Vergleich wird eine Korrekturfunktion für die GLT-Temperatur abgeleitet.

Die Auswertung der gemessenen Temperaturen ist nur qualitativ möglich, da die Logger nicht kalibriert sind. Es können Aussagen hinsichtlich der unterschiedlichen Temperaturschwankungen und der Phasenverschiebung gemacht werden.

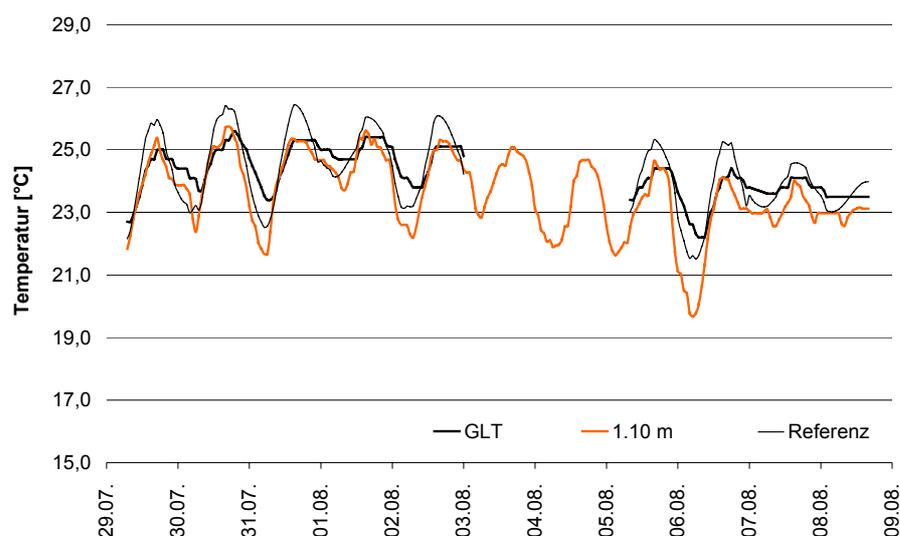


Abb. 6.13: Raumtemperaturen gemessen mit dem GLT-Temperaturfühler und den Loggern in 1,10 m Höhe und die berechnete Referenztemperatur

Der zeitliche Verlauf der Temperaturen zeigt deutlich die Dämpfung der mit dem GLT-Fühler gemessenen Temperatur gegenüber denen, die mit dem Logger gemessen werden (Abb. 6.13). An Tagen mit einer hohen Temperaturschwankung, d.h. an Tagen mit in der Nacht geöffneten Fenstern, ist die Dämpfung geringer als an Tagen mit einer niedrigen Temperaturschwankung (Abb. 6.14). Außerdem sind die Temperaturverläufe zeitlich verschoben. Die Phasenverschiebung variiert, liegt aber durchschnittlich (wie in der Lufttemperaturmessung) bei 2 h, (s. 6.3.2)

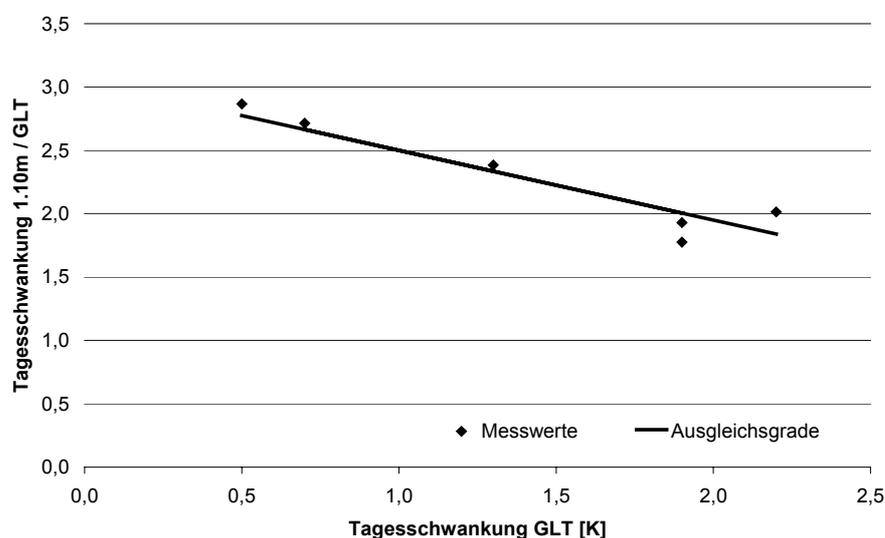


Abb. 6.14: Verhältnis der Temperaturschwankungen gemessen mit den Sensoren in 1,10 m Höhe und dem GLT-Sensor (30.07.02 bis 02.08.02 und 06./07.08.02)

Für die Auswertung des thermischen Verhaltens des Raumes (s. 8) ist es erforderlich, eine Referenztemperatur im Raum zu haben, die außer dem Temperaturniveau auch die Tagesschwankung der Lufttemperatur wiedergibt. Als Referenz wird die Temperatur

schwankung in 1,10 m Höhe als Mittelwert zwischen fensternahem und atriumsnahem Messwert gewählt. Da während der Zeitspanne, in der die Messungen des Raumprofils durchgeführt werden, Tage mit unterschiedlichen äußeren und inneren Lasten und mit verschiedenen Lüftungsmethoden liegen, können die Verhältnisse als repräsentativ für die Sommerperiode angenommen werden. Aus den Messungen wird eine Funktion zur Korrektur der GLT-Temperatur hinsichtlich der Phasenverschiebung und der Erhöhung der Tagesschwankung abgeleitet.

Wie gezeigt, kann das Verhältnis zwischen der Tagesschwankung in 1,10 m Höhe, angegeben durch den Mittelwert der fassadennahen und atriumnahen Temperatur, und der mit dem GLT-Fühler gemessenen Tagesschwankung als Funktion von der Temperaturschwankung des GLT-Fühlers dargestellt werden:

$$y = \frac{(\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min})_{1,10}}{(\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min})_{GLT}} \quad (6-3)$$

$$y = -0,55K^{-1}(\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min})_{GLT} + 3,05 \quad (6-4)$$

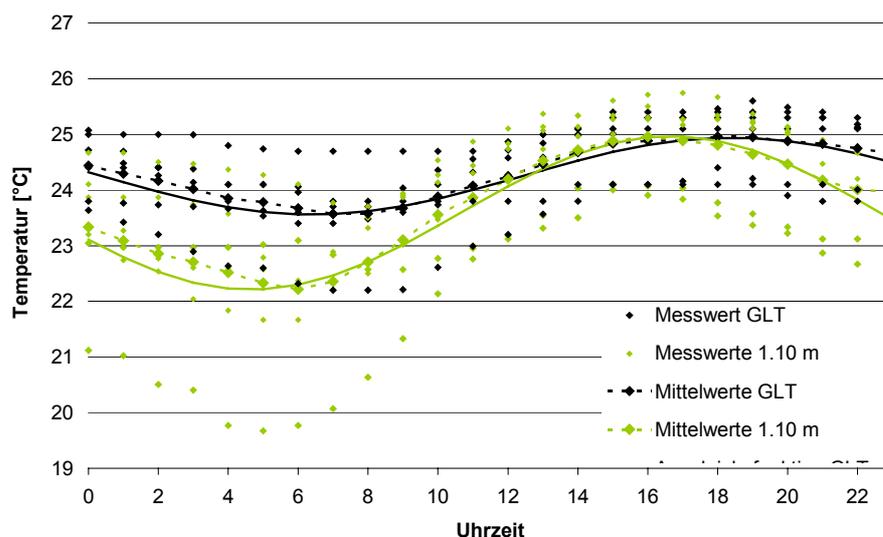


Abb. 6.15: Tagesgang der Temperaturen gemessen mit den Sensoren in 1,10 m Höhe und dem GLT-Sensor, 30.07.02 bis 02.08.02 und 06./07.08.02

Die Phasenverschiebung ist in Abb. 6.15 zu erkennen. Hier sind die Messwerte ϑ_{GLT} und $\vartheta_{1,10}$ über den Tag dargestellt, sowie deren mittlere Tagesgänge. Der mittlere Tagesgang wird jeweils mit einer cos-Funktion beschrieben. Die Korrekturfunktion ergibt sich aus der Differenz der beiden cos-Funktionen, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Mittelwerte:

$$f_{\text{kor}}(t) = -\Delta\vartheta_{1,10} \cos(\omega(t-\varphi_{1,10})) - [-\Delta\vartheta_{GLT} \cos(\omega(t-\varphi_{GLT}))] \quad (6-5)$$

$$f_{\text{kor}}(t) = \Delta\vartheta_{GLT} [-y \cos(\omega(t-4,65)) + \cos(\omega(t-6,4))] \quad (6-6)$$

Die in die Korrekturfunktion eingehende Amplitude $\Delta\vartheta_{\text{GLT}}$ der GLT-Temperatur ergibt sich als die Hälfte der Tagesschwankung $(\vartheta_{\text{max}} - \Delta\vartheta_{\text{max}})_{\text{GLT}}$. Für die Referenztemperatur ϑ_{Raum} ergibt sich:

$$\vartheta_{\text{Raum}}(t) = \vartheta_{\text{GLT}}(t) + f_{\text{kor}}(t) \quad (6-7)$$

Die sich im Messzeitraum ergebene Referenztemperatur ist in Abb. 6.13 dargestellt.

In dem folgenden Teil der Arbeit wird die Referenztemperatur als Raumlufttemperatur bezeichnet.

6.4 Auswertung Raumlufttemperatur

6.4.1 Auswertungszeitraum

Es werden die Stundenmittelwerte der Raumlufttemperatur in der Betriebszeit während der Sommerperiode (01.06.02 bis 31.08.02) ausgewertet. Die Zeitspanne der zwei Wochen Betriebsferien (08.07.02 bis 19.07.02) wird nicht mit einbezogen, ebenso nicht der 05.07.02 wegen Ausfalls der Messwerterfassung.

Als Betriebszeit wird festgelegt:

- Montag bis Freitag,
- 08:00 bis 17:00 Uhr.

Somit fließen 54 Tage bzw. 486 h in die Auswertung ein.

Als Raumlufttemperatur wird hier die Referenztemperatur dargestellt, die sich aus der Korrektur der GLT-Temperatur ergibt (s. 6.3.3).

6.4.2 Temperaturen der Büroräume im Vergleich

In Abb. 6.16 sind die während der Betriebszeit in den vier Büroräumen gemessenen Temperaturen als Dauerlinien dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf die mit den GLT-Sensoren gemessenen Werte, da nur in dem Referenzraum (Süd 2) ergänzende Messdaten aus Kurzzeitmessungen vorliegen.

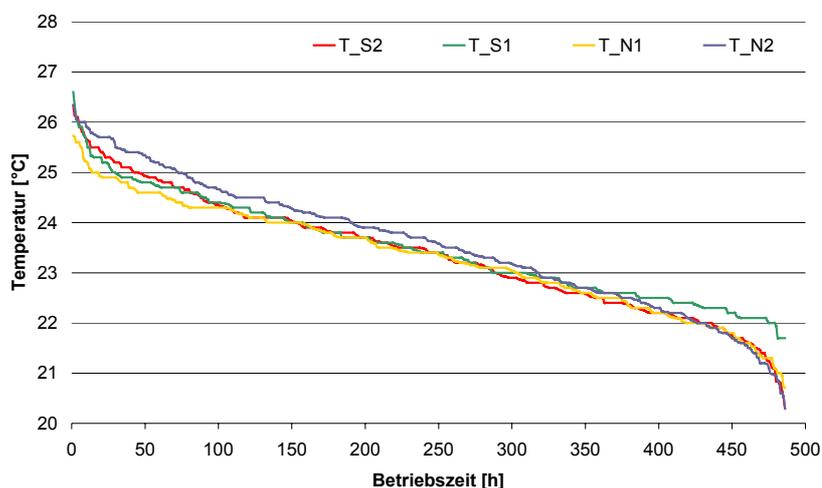


Abb. 6.16: Dauerlinie der GLT-Temperaturen in den Büroräumen während der Betriebszeit in der Sommerperiode

Es zeigt sich, dass sich die Temperaturen in den Räumen nicht bedeutend unterscheiden. Die thermische Situation in dem Referenzraum kann demnach als typisch bezeichnet und die folgenden Auswertungen können als repräsentativ für die Büroräume angesehen werden.

6.4.3 Temperaturen und Behaglichkeitsfeld nach DIN 1946 T2

Abb. 6.17 zeigt die Raumlufttemperatur im Büroraum Süd 2 während der Betriebszeit in der Sommerperiode über der Außenlufttemperatur. Dargestellt ist zusätzlich der nach DIN 1946 Teil 2 (VDI-Lüftungsregeln) empfohlene Bereich für die operative Raumtemperatur.

Im Hinblick auf die Empfehlungen der DIN 1946 Teil 2 lassen sich die Raumlufttemperaturen folgendermaßen bewerten:

- Nur an wenigen Stunden liegt die Raumlufttemperatur außerhalb des Behaglichkeitsfeldes.
- Die untere Zulässigkeitsgrenze wird nie unterschritten.
- Temperaturen im unteren Zulässigkeitsbereich ($20^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$) treten nur an Tagen, an denen die Nacht zuvor die Fenster offen waren, in den Vormittagsstunden auf.
- Bei hohen Außenlufttemperaturen liegen die Raumlufttemperaturen nur dann an der unteren Zulässigkeitsgrenze, wenn es sich um den ersten Tag mit hohen Außenlufttemperaturen nach einer kalten Periode handelt. Die Speichermassen wirken dämpfend auf den Anstieg der Raumlufttemperatur.
- Raumlufttemperaturen über der Zulässigkeitsgrenze treten an Tagen (21.08. bis 31.08.02) nach einer Periode mit hohen Außenluft- und Raumlufttemperaturen auf. Während die Außenlufttemperatur nach der Hitzeperiode sprunghaft abfällt und anschließend einige Tage lang niedrig bleibt, fällt die Raumlufttemperatur durch die Speichermassen gedämpft langsamer ab. Nach zwei Tagen kann der Raum trotz niedriger Außenlufttemperaturen nicht weiter auskühlen, und die Raumlufttemperatur verharrt auf dem erreichten Niveau, da die Nachtlüftung ausgeschaltet ist.

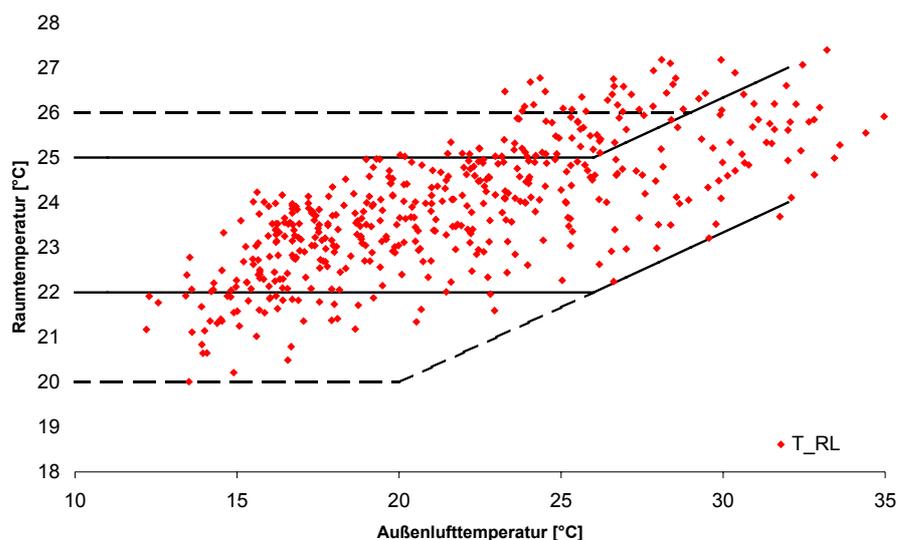


Abb. 6.17: Raumlufttemperatur im Büroraum Süd 2 während der Betriebszeit in der Sommerperiode (01.06.02 bis 31.08.02) und Zulässigkeitsbereich nach DIN 1946 T2.

6.4.4 Dauerlinie

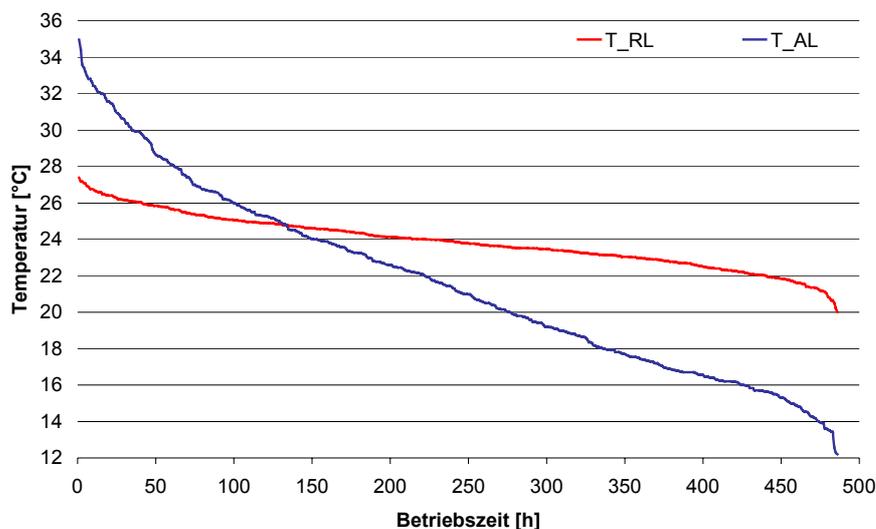


Abb. 6.18: Dauerlinie der Außenlufttemperatur und der Raumlufttemperatur im Büroraum Süd 2. OG während der Betriebszeit, (01.06.02 bis 31.08.02)

Aus der Dauerlinie (Abb. 6.18) sind die Überhitzungsstunden abzulesen. Als Überhitzungsstunden werden die Stunden verstanden, in denen eine bestimmte Temperaturgrenze überschritten wird. Die Raumlufttemperaturen liegen während 38 h, das entspricht weniger als 10% der Betriebszeit in den Monaten Juni, Juli und August, über 26°C (maximal zulässige Raumlufttemperatur nach Arbeitsstättenrichtlinie [ASR 6/1,3].)

Tabelle 6.2: Überhitzungsstunden während der Betriebszeit in Büroraum Süd 2: (01.06.02 bis 31.08.02)

	>24°C	>25°C	>26°C	>27°C
ϑ_{AL}	149 h	127 h	98 h	73 h
ϑ_{RL}	213 h	101 h	38 h	5 h

6.4.5 Tagesgang der Raumlufthtemperatur

In Abb. 6.19 sind die Außenlufttemperaturen und die Raumlufthtemperaturen an den Werktagen über der Uhrzeit aufgetragen. Zusätzlich sind die Regressionskurven²⁴ des mittleren Tagesganges der Außenlufttemperatur und der Raumlufthtemperatur dargestellt.

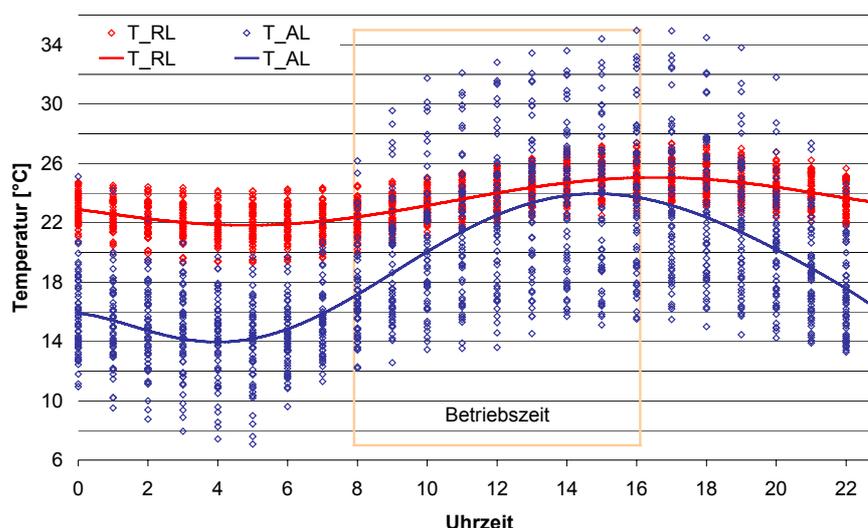


Abb. 6.19 Raumlufthtemperaturen im Büroraum Süd 2 an Werktagen über der Tageszeit, (01.06.0 bis 31.08.02)

Der Verlauf der Außenlufttemperatur und der Raumlufthtemperatur ist zeitlich verschoben; das Minimum der Außenlufttemperatur tritt im Mittel um 4 Uhr und das Maximum um 15 Uhr auf. Das Minimum der Raumlufthtemperatur tritt rund eine Stunde später und das Maximum eine bis zwei Stunden später auf.

Da die Raumlufthtemperatur nicht direkt, sondern nur über eine Korrektur (die aus den Kurzzeitmessungen abgeleitet wurde) ermittelt wird, kann die Phasenverschiebung nur qualitativ bewertet werden:

- In der Nacht wird die Raumlufthtemperatur nur durch Transmission und Lüftung beeinflusst und ist somit direkt von der Außenluft abhängig. Die Entladung der Speichermassen bewirkt die zeitliche Verschiebung.
- Am Tag wirken zusätzlich die Sonneneinstrahlung und die internen Lasten auf die Raumlufthtemperatur.

²⁴ Die Regressionskurve wird durch ein Polynom 6. Ordnung wiedergegeben. Dies bildet in guter Näherung den Verlauf einer harmonischen Schwingung nach.

Abb. 6.20 zeigt den mittleren Verlauf der Raumlufthtemperatur während der Betriebszeit und die Extremwerte (Maximum und Minimum) jeder Stunde.

Die Raumlufthtemperatur steigt während der Betriebszeit stetig an, im Mittel um 2,6 K, von 22,4 °C auf 25,0 °C. Die Extremwerte weichen max. um 2,4 K von dem Mittelwert der jeweiligen Uhrzeit ab:

- Am Beginn der Betriebszeit liegen diese zwischen 20,0 und 24,5 °C und
- am Ende der Betriebszeit zwischen 22,8 und 27,3 °C.

Auch hier ist aus den o.g. Gründen eine detailliertere Auswertung nicht durchführbar.

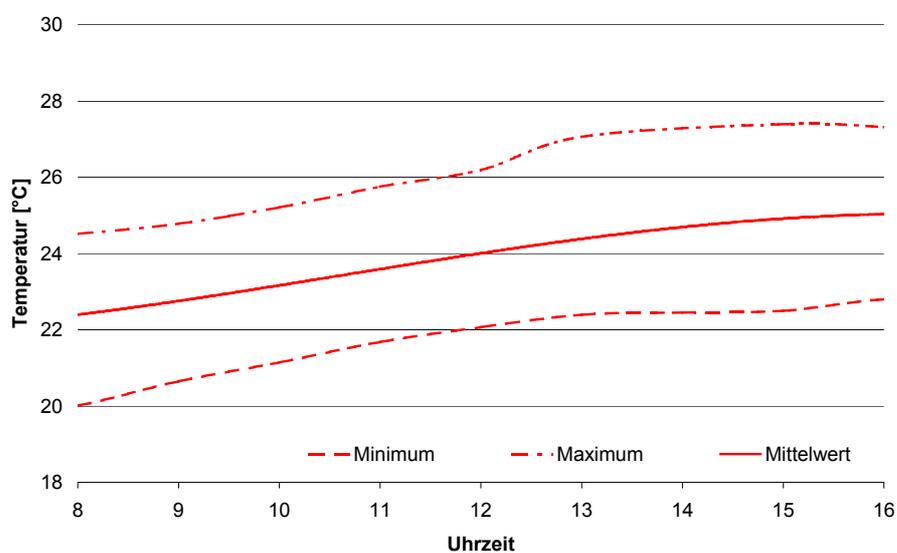


Abb. 6.20: Raumlufthtemperatur im Büro S2 während der Betriebszeit, als Mittelwerte, Maximal- und Minimalwerte über der Uhrzeit, (01.06.02 bis 31.08.02)

7 Instationäre Wärmeleitung und Wärmespeicherung

7.1 Speicherfähigkeit des Raumes

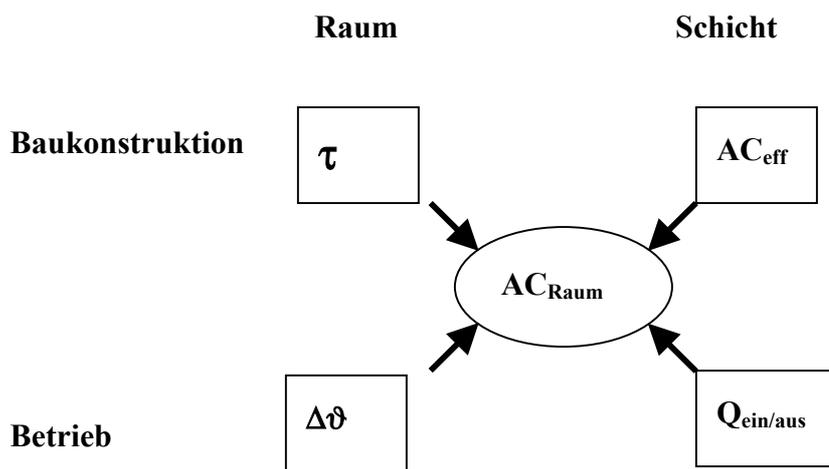
Die Beschreibung der Eigenschaft des Raumes durch Wärmespeicherung den Anstieg der Raumtemperatur zu begrenzen, kann auf zwei unterschiedlichen Betrachtungsebenen erfolgen:

- Der Raum als ein System betrachtet:
Wie stark wird die Temperaturschwankung durch die Speichermassen gedämpft?
- Die speichernde Schicht betrachtet:
Wie viel Wärme wird ein- bzw. ausgespeichert?

Hierfür sind τ und $\Delta\vartheta$ bzw. AC_{eff} und Q_{ein} die beschreibenden Größen.

Für beide Betrachtungsebenen werden Modelle vorgestellt, mit denen sich die jeweiligen beschreibenden Parameter zum einen aus den Stoffdaten der Baukonstruktion und zum anderen aus dem (mit Messungen ermittelten) thermischen Verhalten des Raumes herleiten lassen. (s. 7.5, 8.6, 8.7.3, 8.7.4)

Diese vier Ansätze werden auf dieses Gebäude angewendet. Anschließend wird anhand der Ergebnisse überprüft, ob sich diese Ansätze hier ineinander überführen lassen.



7.2 Grundlagen

Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich auf die eindimensionale Wärmeleitung in einer homogenen Schicht.

Die einer Schicht zugeführte Energie wird je nach Randbedingungen zu einem Teil wieder abgegeben und zum anderen Teil bewirkt sie eine Erhöhung der Schichttemperatur. Demzufolge treten sowohl eine Wärmeleitung und als auch eine Wärmespeicherung auf.

Die Wärmeleitung ist proportional zum Temperaturgefälle und kann mit dem Ansatz von Fourier beschrieben werden:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx} \quad (7-1)$$

Wenn die Beträge der einer Schicht zugeführten und abgeführten Wärmeströme gleich sind, so bleibt das Temperaturgefälle konstant. In diesem Fall spricht man von einer stationären Wärmeleitung. Ist das Temperaturgefälle hingegen zeitlichen Veränderungen unterworfen, sind die Wärmeleitungsvorgänge zeitabhängig, also instationär.

Die Änderung der Temperatur infolge der aufgenommenen Wärmemenge dq lässt sich nach folgendem Ansatz berechnen:

$$dq = -c\rho d\vartheta \quad (7-2)$$

Die aufgenommene Wärmemenge entspricht gerade der Differenz zwischen zugeführter und abgeführter Wärmemenge. Damit lassen sich beide Ansätze zu einer Gleichung zur Beschreibung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung zusammenführen:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} \quad (7-3)$$

Dieser Ansatz ist nur unter der Annahme zeitlich und räumlich konstanter Stoffwerte gültig. Er beschreibt also das Verhalten eines einschichtigen Bauteils.

Die instationäre Wärmeleitung wird demzufolge von den Stoffwerten Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Speicherkapazität c und Dichte ρ bestimmt. Je größer die volumenbezogene Speicherkapazität $c\rho$ ist, desto größer ist der Anteil der Wärme, die gespeichert wird, und desto kleiner der Anteil, der weitergeleitet wird. Je größer die Wärmeleitfähigkeit ist, desto leichter wird Wärme weitergeleitet.

Wie schnell sich eine Temperaturänderung im Material ausbreitet, wird demzufolge durch den Quotienten aus Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogener Speicherkapazität, der Temperaturleitfähigkeit a , bestimmt:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (7-4)$$

Eine weitere Kennzahl, die Wärmeeindringzahl b , ist ein Maß dafür, wie viel Wärme bei einer Temperaturänderung an der Oberfläche in die Materialschicht eindringt.

$$b = \sqrt{\lambda c\rho} \quad (7-5)$$

Die Berechnung der instationären Wärmeleitung in einer Schicht erfordert das Lösen der Differentialgleichung (7-3). Je nach Randbedingungen und Anfangsbedingung ergeben sich unterschiedliche Lösungen der Differentialgleichung.

Als Randbedingungen werden hier die Bedingungen des Wärmeüberganges an der Materialoberfläche bezeichnet. Es können drei verschiedene Fälle auftreten:

- Isotherme Randbedingung: Der Materialoberfläche wird eine Temperatur aufgezungen. Diese kann konstant oder zeitlich veränderlich sein.
- Adiabate Randbedingung: An der Oberfläche findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt.
- Gemischte Randbedingung: Die Materialoberfläche ist über einen Widerstand an ein Temperaturbad, z.B. die Lufttemperatur, gekoppelt.

Entscheidend für die Ankopplung ist das Verhältnis von dem Wärmeübergangswiderstand R_α zu dem Schichtwiderstand R . In [Keller] wird der Begriff Kopplungsfaktor β verwendet, als Quotient aus Entladewiderstand und Schichtwiderstand:

$$\beta = \frac{R_\alpha}{R} = \frac{\lambda}{da} \quad (7-6)$$

Eine Verringerung des Wärmeübergangswiderstandes (z.B. an der Außenfläche der Außenwand als Folge von Wind) bewirkt, dass sich Änderungen des Temperaturbades (z.B. die Änderung der Außenlufttemperatur) auf der Materialoberfläche stärker auswirken. Ein kleiner Kopplungsfaktor bedeutet demzufolge eine bessere Ankopplung als ein großer Kopplungsfaktor. Für $\beta \rightarrow 0$ nähert man sich der isothermen Randbedingung.

Entgegengesetzt wirkt es sich aus, wenn vor eine Speicherschicht eine nahezu trägheitslose Schicht mit dem Widerstand R_v eingebaut wird. Dies kann durch eine Erhöhung des Entladewiderstandes beschrieben werden:

$$\beta = \frac{R_\alpha + R_v}{R} \quad (7-7)$$

Der Grenzfall für $\beta \rightarrow \infty$ entspricht einer adiabaten Randbedingung.

Die Anfangsbedingung bezeichnet die Temperaturverteilung in der Materialschicht zu Beginn der Betrachtungszeit $t = 0$. Verändert sich die Anregung der Schicht, so klingt die Anfangsverteilung mit der Zeit ab und die Schicht stellt sich auf die neue Anregung ein. Der abnehmende Einfluss der Anfangsbedingungen auf die thermischen Vorgänge in der Schicht wird als transients Anteil bezeichnet. Die Zeit, die für das Abklingen des Einflusses (Einschwingzeit) benötigt wird, wird beschrieben durch die Zeitkonstante τ .

An einem Gebäude hat man es vorrangig mit periodischen Anregungen zu tun (s. auch 4.1.1), die durch stochastische Einflüsse überlagert werden. Das thermische Verhalten einer Schicht kann in einen eingeschwungenen Zustand, infolge der periodischen Anregung, und in transiente Vorgänge, infolge der Abweichungen von der Periodizität, zerlegt werden.

7.3 Einführung von dynamischen Kenngrößen

Die Ausbreitung einer periodischen Anregung der Schichtoberfläche wird kurz anhand einer einseitig unendlich dicken Schicht erläutert.

Die Schicht wird an der Oberfläche mit einer Temperaturschwingung der Amplitude $\Delta\vartheta$ und der Periode T angeregt. Im eingeschwungenen Zustand stellen sich in der Schicht periodische Schwingungen der Temperatur mit der gleichen Periode ein. Die Amplitude nimmt mit der Entfernung von der Oberfläche exponentiell ab und die Phase der Schwingung verschiebt sich linear mit der Tiefe:

$$\vartheta(x,t) = \Delta\vartheta e^{\frac{-x}{\sigma}} \cos\left(\varpi t - \frac{x}{\sigma}\right) \quad (7-8)$$

mit: ϖ : Kreisfrequenz,
 σ : Eindringtiefe.

$$\sigma = \sqrt{\frac{T}{\pi}} \sqrt{a} \quad (7-9)$$

Aus (7-8) und (7-9) lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

- Nach jeder Eindringtiefe σ nimmt die Amplitude auf den 1/e-ten Teil ab.
- Schichten mit einer hohen Temperaturleitfähigkeit haben eine große Eindringtiefe. Die Anregung wird demzufolge in gleicher Entfernung von der Oberfläche weniger gedämpft als in Schichten mit einer geringen Temperaturleitfähigkeit.
- Hochfrequente Schwankungen werden stärker gedämpft als niederfrequente. Kurzzeitige Temperaturstörungen dringen somit weniger tief in eine Schicht ein als langzeitige.
- Schichten mit einer großen Temperaturleitfähigkeit a haben eine geringe Phasenverschiebung.

Aus den Überlegungen zum Temperaturprofil der Schicht geht hervor, dass mit zunehmender Entfernung von der Materialoberfläche die gespeicherte Wärmemenge kleiner wird, da die Temperaturschwankungen abnehmen. Die gesamte in einer Schicht gespeicherte Wärmemenge ist somit von der Eindringtiefe abhängig. Man berechnet die gespeicherte Wärmemenge q_{ein} durch Integration des durch die Oberfläche tretenden Wärmeflusses q :

$$q_{ein} = \int_{t_B}^{t_E} q(x=0, t) dt \quad (7-10)$$

Der Wärmefluss ist eine periodische Schwingung mit gleicher Periodendauer wie die Temperaturschwingung, aber verschobener Phase. Die in einer halben Periode in die Schicht eingespeicherte und in der nächsten halben Periode wieder ausgespeicherte Wärmemenge, ist – auch bei halbusendlichen Schichten – endlich:

$$q_{ein} = \sqrt{2} \frac{\lambda T}{\pi \sigma} \Delta \vartheta \quad (7-11)$$

Um diese Wärmemenge mit dem Ansatz zur Beschreibung der statischen Wärmespeicherung wiederzugeben, wird der unendlichen Schicht eine effektive Schichtdicke d_{eff} zugeordnet. Die effektive Schichtdicke entspricht der Dicke eines Bauteiles, das im statischen Fall (die Temperaturänderung $\Delta \vartheta_{eff}$ ist in allen Tiefen gleich), die gleiche Wärmemenge q_{ein} aufnimmt wie die halbusendliche Schicht in einer halben Periode.

$$q_{ein} = c \rho d_{eff} \Delta \vartheta_{eff} = C_{\infty} \Delta \vartheta_{eff} \quad (7-12)$$

Im Folgenden wird als beschreibende Temperaturdifferenz die doppelte Amplitude ($\Delta\vartheta_{\text{eff}} = 2 \Delta\vartheta$) gewählt, da sich diese aus den charakteristischen Größen Temperaturmaximum und Temperaturminimum direkt ableitet. Damit erhält man als effektive Schichtdicke d_{eff} und als dynamische Speicherkapazität C_{∞} :

$$d_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma \quad (7-13)$$

$$C_{\infty} = c\rho d_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T}{\pi}} b \quad (7-14)$$

7.4 Berechnung der Wärmeleitung und Wärmespeicherung eines Bauteils

7.4.1 Grundlagen

Auch eine endlich dicke Schicht weist bei einer periodischen Anregung im eingeschwungenen Zustand eine Schwingung des Temperaturprofils mit gleicher Periode, verringerter Amplitude und verschobener Phase auf. Gleiches gilt für den Wärmefluss. Die instationäre Wärmeleitung wird bei einer endlich dicken Schicht nicht nur von den dynamischen Stoffkennwerten sondern auch von der Schichtdicke und den Randbedingungen bestimmt.

Die Wärmeleitgleichung für den Temperaturverlauf in einer endlichen Schicht ist nicht mehr analytisch zu lösen. In [Keller] wird die Lösung in Form einer Reihenentwicklung dargestellt.

Zur Berechnung von Transmission und Wärmespeicherung in Bauteilen (d.h. der Wärmemenge, die in ein Bauteil hineingeht und wieder herauskommt) sind jedoch nur die Temperaturen und Wärmeströme an den beiden Oberflächen von Bedeutung. Die Amplituden- und Phasenbeziehungen an den beiden Oberflächen ergeben sich als Lösung der Wärmeleitgleichung (7-3) für die entsprechenden Randbedingungen. Die Lösungen stellen komplexwertige Funktionen dar. Die Amplituden- und Phasenbeziehungen werden als Kennwerte angegeben: z.B. die Schichtantwort als das Verhältnis zwischen Wärmeflussdichte und Temperaturänderung an einer Oberfläche.

Für einschichtige Bauteile stellt Keller die Kennzahlen in Abhängigkeit von der Schichtdicke d , der Eindringtiefe σ und den Randbedingungen – beschrieben durch den Kopplungsfaktor β - grafisch dar. Für mehrschichtige Aufbauten können keine sinnvollen funktionellen Abhängigkeiten hergestellt werden. Die Kennwerte sind daher für konkrete Wand- und Deckenaufbauten zu bestimmen. Angaben von Kennwerten einiger ausgewählter typischer Wand- und Deckenaufbauten sind in der Literatur zu finden [Keller], [Zürcher].

7.4.2 Wärmeleitung durch eine Außenwand

Zur Berechnung der Transmission wird der Gedankenansatz der Fourieranalyse, der in 4.1.1 zur Darstellung des Verlaufes der Außenlufttemperatur genutzt wurde, herangezogen: die Zerlegung einer Funktion in einen Mittelwert und eine diskrete Summe. Die Bilanz für die Außenwand wird demnach in eine stationäre Bilanz für die Berechnung des Mittelwertes und eine instationäre für die Berechnung der Schwankungen aufgeteilt.

Die stationäre Bilanz

Die Wärmestromdichte infolge der Lufttemperaturunterschiede berechnet sich nach:

$$\bar{q}_{TW} = U_w (\bar{\vartheta}_a - \bar{\vartheta}_i) \quad (7-15)$$

mit: $\bar{\vartheta}_a$, $\bar{\vartheta}_i$: Mittelwert der Außenlufttemperatur bzw. der Raumlufthtemperatur,
 U_w : Wärmedurchgangskoeffizient der Wand.

An Außenwänden wird zusätzlich ein Wärmestrom durch die Absorption der Sonneneinstrahlung hervorgerufen. Dieser Wärmestrom berechnet sich aus dem Mittelwert des in die Wand eindringenden Anteils der auftreffenden Sonneneinstrahlung:

$$\bar{q}_{sw} = U_w \frac{a\bar{I}}{\alpha_a} \quad (7-16)$$

mit: \bar{I} : Mittelwert der auftreffenden Sonneneinstrahlung,
 a : Absorptionskoeffizient der Außenfassade,
 α_a : Wärmeübergang an der Außenfassade.

Die stationäre Bilanz ist nur gültig, wenn ein ausreichend langes Mittelungsintervall der Temperaturen und der Strahlung gewählt wird:

- Das Mittelungsintervall muss ein ganzes Vielfaches der Grundperiode (24 h) oder sehr viel größer als die Grundperiode sein.
- Das Mittelungsintervall muss über einen Zeitraum erfolgen, der wesentlich größer als die transiente Zeitkonstante τ der Wand ist: $\Delta t > 3\tau$. Ansonsten besteht die Gefahr, durch die Wahl der Lage des Mittelungsintervalls Einzelereignisse, die im Mittelungsintervall auftreten, überzubewerten. Denn die Wirkung von Ereignissen, die von der Periodizität der Temperatur- bzw. Strahlungsverlaufes abweichen, ist aufgrund der Speicherfähigkeit der Wand länger als ihr Auftreten.

Die instationäre Bilanz

Der Kennwert, der das Verhältnis der Amplitude der Wärmeflussdichte $\Delta\dot{q}$ auf der Innenseite der Außenwand zu der Temperaturschwankung $\Delta\vartheta$ auf der Außenseite wiedergibt, wird Temperaturdurchgriff TDG oder auch dynamischer U-Wert genannt. Werte für bestimmte Wandaufbauten sind der Literatur zu entnehmen (s. oben), ebenso für die Phasenverschiebung. Ein entsprechender Kennwert ist für den Strahlungsdurchgriff SDG gebräuchlich.

Die Gesamtbilanz einer Außenwand ergibt sich ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung zwischen Temperatur- und Einstrahlungsschwankung, zu:

$$\dot{q}_{W \min/\max} = U \left[\bar{\vartheta}_i - \bar{\vartheta}_a + \frac{a}{\alpha_a} \bar{I} \right] \pm TDG \Delta\vartheta_a \pm a I_{\max} \sum_{i=1}^4 a_i SDG(i) \quad (7-17)$$

Für die Abschätzung von Extremfällen ist diese Addition der Amplituden ausreichend.

7.4.3 Wärmespeicherung

Die während einer halben Periode in eine Schicht mit endlicher Dicke eingespeicherte Wärmemenge q_{ein} lässt sich mit der effektiven Speicherkapazität C_{eff} darstellen (vgl. (7-11)):

$$q_{\text{ein}} = C_{\text{eff}} 2\Delta\vartheta \quad (7-18)$$

Die effektive Speicherkapazität C_{eff} einer Schicht unterscheidet sich von ihrem dynamischen Kennwert C_{∞} aufgrund der begrenzten Schichtdicke und der thermischen Kopplung an der Schichtoberfläche. Mit der normierten Speicherkapazität C' als Verhältnis von effektiver Speicherkapazität einer endlichen Schicht zu der dynamischen Speicherkapazität C_{∞} ergibt sich:

$$q_{\text{ein}} = C' C_{\infty} 2\Delta\vartheta \quad (7-19)$$

In [Keller] wird C' als Betrag einer komplexwertige Funktion von der thermischen Ankopplung β und einer dimensionslosen Dicke z dargestellt.

$$z = \frac{d}{\sigma} \quad (7-20)$$

Grundsätzlich wird unterschieden, ob auf der Rückseite ein Wärmestrom die Schicht verlässt oder nicht (adiabate Randbedingung). Adiabate Bedingungen können angenommen werden:

- Bei großen Wärmeübergangswiderständen auf der Rückseite, z.B. bei Speicherschichten vor Dämmschichten.
- Bei beidseitig genutzten Speicherschichten, z.B. Raumteilern oder Wänden zwischen gleich betriebenen Räumen. Hierbei ist mit der halbierten Schichtdicke zu rechnen.
- Bei Schichtdicken, die viel größer als die Eindringtiefe sind; $d > 5 \sigma$.

Hier wird nur die adiabate Randbedingung ($\beta_{\text{Rückseite}} = 0$) verwendet. Für die (adiabate) normierte Speicherfunktion²⁵ gilt:

$$C' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{f_2(z)}{1 + f_2(z)z\beta} \right| \quad (7-21)$$

$$f_2(z) = (1 + i)\tanh(z(1 + i)) \quad (7-22)$$

mit: $f_2(z)$ Faktor zur Berücksichtigung der begrenzten Schichtdicke,
 $z\beta$ Faktor zur Berücksichtigung der thermischen Kopplung an der Vorderseite.

Die Speicherfunktion C' ohne Wärmeübergang auf der Vorderseite ($\beta = 0$), also bezogen auf die Amplitude der Oberflächentemperatur, ist in Abb. 7.1 grafisch dargestellt. Zusätzlich ist das Verhältnis von statischer zu dynamischer Speicherkapazität in Abhängigkeit von der normierten Schichtdicke dargestellt. Aus dieser Darstellung lassen sich einige Aussagen über die Speicherefähigkeit einer Schicht in Abhängigkeit von der Schichtdicke ableiten:

- Bei geringen Schichtdicken ($d < 0,5 \sigma$) wird auch bei einer dynamischen Wärmespeicherung die maximal mögliche Speicherkapazität der Schicht (die statische Speicherkapazität) genutzt.
- In einer Schicht der Dicke $d \approx 0,8 \sigma$ kann bereits die gleiche Wärmemenge gespeichert werden wie in einer halbunendlichen Schicht des gleichen Materials.
- Die größte Wärmemenge kann in einer Schicht der Dicke $d \approx 1,2 \sigma$ gespeichert werden.
- Größere Schichtdicken führen folglich nicht zu einer Erhöhung der Speicherkapazität der Schicht für die betrachtete Periode der Anregung, vergrößern jedoch die Speicherkapazität für niedrigere Frequenzen.

²⁵ Rückseite: $\beta = 0$

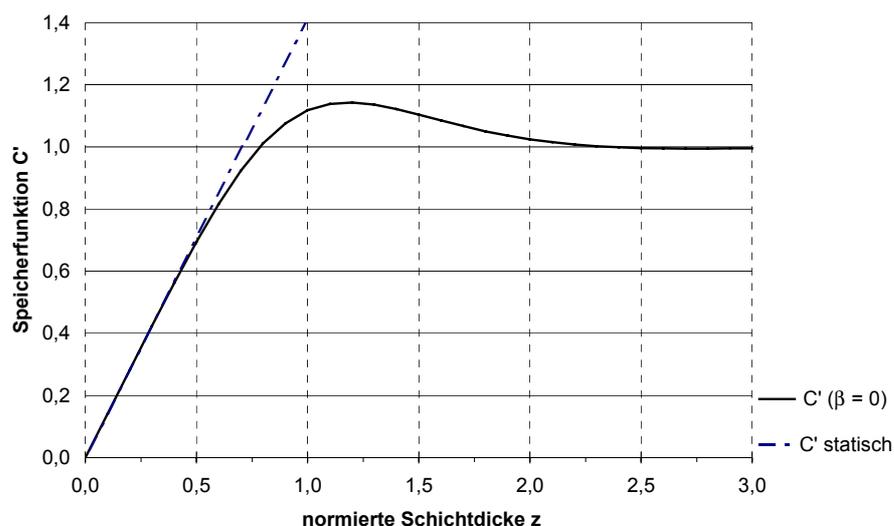


Abb. 7.1: Speicherfunktion C' ohne Wärmeübergang (Rückseite: adiabate Randbedingung) und Verhältnis von statischer zu dynamischer Speicherkapazität ($C' \text{ statisch}$)

In Abb. 7.2 ist die Speicherfunktion C' in Abhängigkeit der normierten Schichtdicke z und des Kopplungsfaktors β grafisch dargestellt. Wählt man, was nahe liegt, als Bezugstemperatur für die Berechnung der gespeicherten Wärmemenge nicht die Oberflächentemperatur sondern die Raumlufitemperatur, ist der Wärmeübergang zu berücksichtigen. Je größer der Wärmeübergangswiderstand, wiedergegeben durch einen großen Wert für β , ist, um so geringer ist die Amplitude der Oberflächentemperatur und damit die eingespeicherte Wärmemenge, wiedergegeben durch ein kleinen Wert für C' .

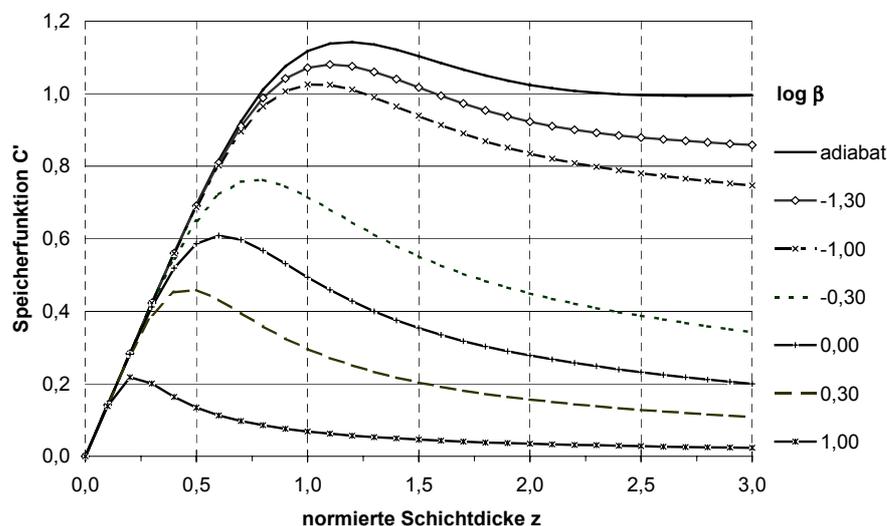


Abb. 7.2: Normierte Speicherfunktion in Abhängigkeit von der normierten Speicherdicke und dem Kopplungsfaktor (Rückseite: adiabate Randbedingung)

7.5 Wärmespeicherkapazität im Referenzraum

In diesem Abschnitt werden die im Raum vorhandenen Speicherschichten zusammengestellt und die effektive Speicherkapazität jedes Bauteils berechnet, um anschließend das gesamte im Raum verfügbare Speichervermögen abzuschätzen. Die Berechnung erfolgt für die Tagesperiode ($T = 24$ h).

Tabelle 7.1: Speicherschichten im Büroraum Süd 2. OG

	Vorwiderstand	Rückseite	Fläche [m ²]	Dicke ²⁶ [m]	σ [m]
Decke					
Beton	-	Dämmschicht	242	0,200	0,148
Beton	Abhängung	Dämmschicht	278	0,200	0,148
Gipskarton	-	Hohlraum	278	0,015	0,083
Fußboden					
Estrich	Teppich	Hohlraum	490	0,050	0,132
Außenwand					
Beton	-	Dämmschicht	30	0,100	0,148
Beton	Elemente	Dämmschicht	118	0,100	0,148
Trennwand					
Beton	-	Raumluft	23	0,130	0,148
Beton	Elemente	Raumluft	92	0,130	0,148
Massive Seitenwand I					
Beton	-	Atrium ²⁷	8	0,130	0,148
Massive Seitenwand II					
Kalksandstein	Putz	Serverraum ²⁷	49	0,09	0,131
Leichte Seitenwände					
Gipskarton	-	Dämmschicht	90	0,015	0,083

In Anhang B sind die Stoffwerte der Speicherschichten und Vorwiderstände zusammengestellt. Diese sind den Planungsunterlagen entnommen. Fehlende Angaben wurden durch Angaben aus [Keller], [Recknagel] ergänzt.

Neben der Unsicherheit der Stoffkennwerte liegt eine große Unsicherheit in der Festlegung des Wärmeübergangswiderstandes. Der Gesamtwärmeübergangswiderstand an den Rauminnenoberflächen, der konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeaustausch zusammenfasst, wird in der DIN 4701 mit $R_{\alpha} = 0,13$ m²K/W (für horizontale Wärmeströme und Wärmeströme nach oben) angegeben. Nach [Keller] liegen die Werte

²⁶ Dicke: Schichtdicke bis Dämmschicht, bzw. halbe Schichtdicke bei beidseitiger Speichernutzung.

²⁷ Die Raumlufttemperatur in den Nachbarräumen kann in ausreichender Näherung als gleich angesehen werden.

unter realen Bedingungen i.d.R. jedoch höher, bei $R = 0,17 \dots 0,20 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Die im Folgenden angegebenen Ergebnisse beziehen sich auf $R_\alpha = 0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Wenn die Speicherschicht nicht direkt mit der Raumluft in Kontakt steht (hier: vorgehängte trägheitslose Schicht), wird diese als Vorwiderstand berücksichtigt:

- Decke:
Rund die Hälfte der Deckenfläche ist abhängt: gelochte Gipskartonplatte mit einer dünnen Filzauflage in einem Abstand von 5 cm. Die Luftschicht kann als ruhend angesehen werden, da sie nur an den Seiten mit der Raumluft in Verbindung steht und die horizontalen Ausmaße der Schicht sehr viel größer als deren Dicke sind.
- Fußboden:
Der Fußbodenbelag besteht aus einem dünnen Teppich.
- Trennwände und Außenwände:
Nur rund 20% der Wandflächen sind frei. Der größte Teil der Oberfläche ist mit stoffbezogenen Elementen (s. Abb. 2.3) bestückt. Diese schließen einen 4 cm dicken Hohlraum ein. Obwohl nicht vollkommen von der Raumluft getrennt, wird die Luft im Hohlraum als ruhend angesehen und damit der Widerstand eher als zu groß angenommen.

Die vorhandenen Speicherschichten bestehen alle aus nur einer homogenen Materialschicht, mit einer adiabaten Randbedingung auf der Rückseite. Somit kann nach Berechnung der Eindringtiefe σ und des Kopplungsfaktors β die normierte Speicherkapazität C' mit Gleichung (7-21) ermittelt und die effektive Speicherkapazität C_{eff} berechnet werden. (s. Anhang B).

Tabelle 7.2: Speicherkapazität im Büroraum Süd 2. OG (mit $R_\alpha = 0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$)

		C_{eff}	$C_{\text{eff}}A$	$C_{\text{eff,th}}A$
		[KJ/m ² K]	[KJ/ K]	[KJ/ K]
Decke	frei	68	16.437	13.045
	abgehängt	38	9.518	7.554
Fußboden		47	22.992	26.010
Außenwand	frei	71	2.102	2.102
	verkleidet	46	5.407	5.407
Trennwand	frei	71	1.623	1.623
	verkleidet	45	4.180	4.180
Seitenwand Beton		70	587	587
Seitenwand KS		53	2.582	2.582
Leichte Seitenwände, Abhängung, Möbel		10	3.054	2.705
Summe		Möbel 4	68.482	65.795

Es zeigt sich, dass die effektive Speicherkapazität aller Betonflächen ohne Vorwiderstand (Decke, Außenwand, Trennwand und Seitenwand) trotz unterschiedlicher Schichtdicken nahezu gleich ist (+/- 5%) (s. Tabelle 7.2).

Vergleicht man die Auswirkung der Vorwiderstände, so zeigt sich, dass die Abhängung der Decke eine Reduktion der effektiven Speicherkapazität um 57% bewirkt. Durch die Stoffelemente vor den Wänden wird die effektive Speicherkapazität der Wände um maximal 64% verringert (s. Abb. 7.3)

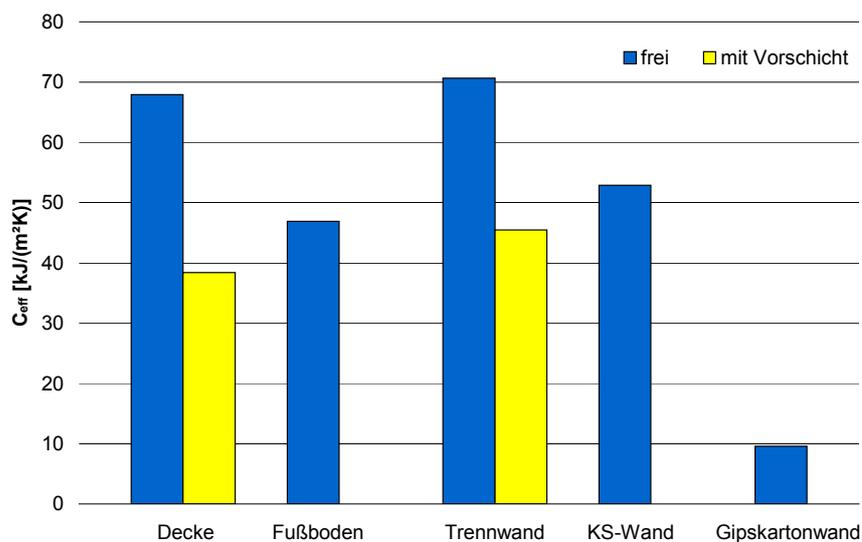


Abb. 7.3: effektive Speicherkapazität C_{eff} der Speicherschichten (mit $R_{\alpha} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Unter Einbeziehung der Flächen der einzelnen Speicherschichten ergibt als Gesamtspeicherkapazität aller Schichten $\Sigma C_{eff}A$. Diese beträgt 68.482 kJ/K bei einem Wärmeübergangswiderstand an den Bauteiloberflächen von $R_{\alpha} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$. Bei einem geringeren Wärmeübergangswiderstand, $R_{\alpha} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, ist die Gesamtspeicherkapazität um 16 % größer, bei höherem Wärmeübergangswiderstand, $R_{\alpha} = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$, um 13% kleiner.

In Abb. 7.4 ist die Aufteilung der Gesamtspeicherkapazität auf die Speicherschichten dargestellt. Decke und Fußboden besitzen jeweils rund 1/3 der Gesamtspeicherkapazität.

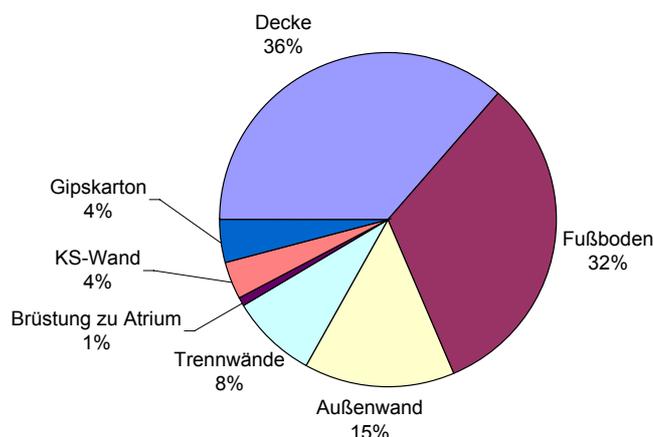


Abb. 7.4: Prozentuale Verteilung der Speicherkapazität im Büroraum Süd 2. OG

Dieses Berechnungsmodell der Gesamtspeicherkapazität im Raum geht davon aus, dass alle Flächen an das gleiche Wärmebad gebunden sind. Die Temperaturschwankungen der Raumluft müssen im ganzen Raum gleich sein. Wie die Messungen der Temperaturverteilung im Raum zeigen, sind hier ortsabhängig unterschiedliche Temperaturschwankungen vorhanden (s. hierzu 6.2.3). Je größer die Temperaturschwankung sind, desto größer sind die Unterschiede zwischen den Temperaturschwankungen in den drei gemessenen Höhen. Hier werden zur Abschätzung der unterschiedlichen Belastung der Speicherflächen die Verhältnisse bei der mittleren Tagesschwankung der Sommerperiode, $\Delta\vartheta_{1,10m} = 1,34 \text{ K}$ (s. 8.7.4), berücksichtigt:

- Die Temperaturamplitude $\Delta\vartheta_{0,10m}$ (10 cm über dem Fußboden) beträgt 113 % der Temperaturamplitude $\Delta\vartheta_{1,10m}$ in 1,10 m Höhe,
- Die Temperaturamplitude $\Delta\vartheta_{2,90m}$ (10 cm unter der Decke) beträgt nur rund 79 % der Temperaturamplitude in 1,10 m Höhe.

Das führt dazu, dass in der Decke, die eine um 13 % höhere Speicherkapazität CA als der Fußboden hat, in einer halben Periode 20 % weniger Wärme ein- bzw. ausgespeichert wird als im Fußboden²⁸.

²⁸ Die Angaben beziehen sich auf die Unterschiede zwischen den Temperaturamplituden in je 10 cm Abstand von der Bauteiloberfläche, da die Lufttemperatur direkt an der Oberfläche nicht gemessen wurde.

Dieser Zusammenhang kann berücksichtigt werden, wenn die effektiven Speicherkapazitäten C_{eff} von Fußboden und Decke thermisch gewichtet werden. Wird als Bezugs-temperaturamplitude die Raumlufitemperatur in 1,10 m Höhe genutzt, so ergibt sich:

$$C_{\text{eff},th,Decke} = C_{\text{eff},Decke} \frac{\Delta\vartheta_{3,00m}}{\Delta\vartheta_{1,10m}} \quad (7-23)$$

Analog berechnet sich die thermisch gewichtete effektive Speicherkapazität $C_{\text{eff},th}$ des Fußbodens.

Auch die übrigen Bauteile sind über der Höhe unterschiedlichen Temperaturschwankungen unterworfen, deren Verlauf jedoch nicht bekannt ist. Als Näherung wird angenommen, dass sich die Abweichung der Temperaturamplituden von $\Delta\vartheta_{1,10m}$ im Mittel ausgleichen.

In Tabelle 7.2 sind die thermisch gewichteten Speicherkapazität der Bauteile zusammengestellt und in Abb. 7.5 ist deren prozentuale Anteile an der Gesamtspeicherkapazität dargestellt. Die thermisch gewichtete Gesamtspeicherkapazität aller Schichten beträgt 65.794 kJ/K.

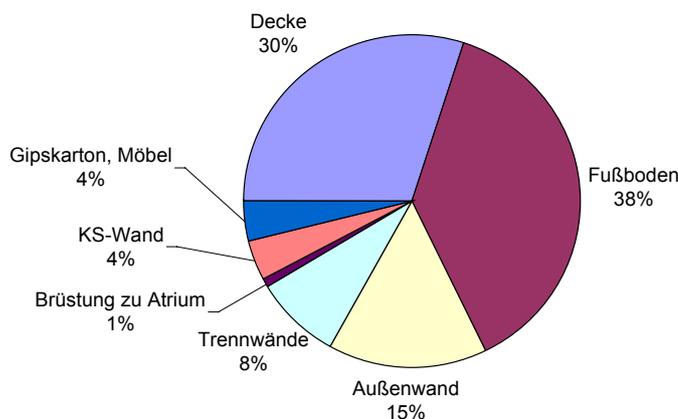


Abb. 7.5: Prozentuale Verteilung der Speicherkapazität im Büroraum Süd 2. OG bei Bezug auf Lufttemperatur $\vartheta_{1,10m}$

8 Das thermische Verhalten des Raumes

8.1 Grundgedanke

Zur Darstellung des thermischen Verhaltens eines Raumes ist es hilfreich, eine Wärmebilanz für den betrachteten Raum aufzustellen. Zu jedem Zeitpunkt müssen sich die dem Raum zugeführten und die abgeführten Energieströme in der Summe ausgleichen.

$$\dot{Q}_S + \dot{Q}_T + \dot{Q}_L + \dot{Q}_i + \dot{Q}_{K/H} = \dot{Q}_{Sp} \quad (8-1)$$

mit: \dot{Q}_S : Solare Wärmeeinträge,
 \dot{Q}_T : Transmissionswärmestrom,
 \dot{Q}_L : Lüftungswärmestrom,
 \dot{Q}_i : Wärmeabgabe interner Quellen,
 $\dot{Q}_{K/H}$: Kühlleistung/Heizleistung,
 \dot{Q}_{Sp} : Speicherwärmestrom.

Die zentralen Zusammenhänge, die sich aus der Energiebilanz eines nicht klimatisierten Raumes für die Sommerperiode ableiten lassen ($\dot{Q}_{K/H} = 0$), werden im Folgenden kurz dargestellt. Hierbei kann der Transmissionswärmestrom der Übersichtlichkeit halber unberücksichtigt bleiben, da dieser bei Gebäuden mit einer hohen Wärmedämmung die Energiebilanz nur gering beeinflusst (s. 8.3.2).

Solare Einträge und interne Wärmequellen führen dem Raum Wärme zu. In einem Raum ohne Speichervermögen (adiabater Grenzfall, der in der Realität nicht auftritt) müssen die Wärmelasten zeitgleich abgeführt werden. Steht im Raum keine Kühlleistung zur Verfügung, so ist die Raumluft wärmer als die Außenluft. Die Übertemperatur stellt sich so ein, dass die Wärme mit der Lüftung abgeführt wird.

Reale Räume verhalten sich nicht adiabatisch. Die Wände können einen Speicherwärmestrom aufnehmen. Der Speicherwärmestrom entspricht zu jedem Zeitpunkt der Summe aller Wärmeströme. So wird am Tag, wenn die Summe aller Wärmeeinträge positiv ist, eingespeichert und in der Nacht, wenn die Summe negativ ist, ausgespeichert. Die Temperaturerhöhung im Raum ist abhängig von dem Speicherwärmestrom und der aktivierbaren Speicherkapazität. Je geringer die Speicherkapazität im Raum, desto mehr muss sich der Speicher resp. die Raumluft erwärmen, um die Wärmelasten aufzunehmen. Eine Erhöhung der Raumlufttemperatur bewirkt gleichzeitig eine Minderung der Gesamtlasten durch eine Verringerung der Lüftungswärmelasten (bei $\vartheta_i < \vartheta_a$) bzw. eine Erhöhung der Lüftungsverluste (bei $\vartheta_i < \vartheta_a$).

In den folgenden Kapiteln wird die Energiebilanz des Büroraumes Süd 2. OG aufgestellt, aus der sich die mittleren effektiven Luftwechsel durch energetische Rückrechnung bestimmen lassen; anschließend können die mittleren Wärmeströme bestimmt werden. Außerdem lässt sich aus der Energiebilanz die mittlere eingespeicherte Energiemenge und somit die im Raum aktivierbare Speicherkapazität berechnen.

Im Anschluss wird das von [Keller] aus der Leistungsbilanz eines Raumes abgeleitete Parametermodell zur Berechnung der Raumtemperatur (Tagesmittelwert und Schwankung) vorgestellt und für den hiesigen Fall überprüft.

8.2 Die Energiebilanz: Der Ansatz

8.2.1 Ansatz

In die Energiebilanz des Raumes (8-2) fließen nur die energetisch wichtigen Parameter ein. Es wird nur der Wärmeaustausch zwischen dem Raum und außen bzw. den Nachbarräumen berücksichtigt. Damit entfällt die Betrachtung des IR-Austausches zwischen den Oberflächen im Raum. Nach Abschätzung der Größenordnung werden die Windabhängigkeit des konvektiven Wärmeüberganges an der Fassade und die nächtliche Abstrahlung an den Himmel vernachlässigt.

Die Energiebilanz des Raumes lässt sich wie folgt darstellen:

$$Q_{SF} + Q_{SW} + Q_{TF} + Q_{TW} + Q_{Ti} + Q_{TL} + Q_{NL} + Q_i = Q_{Sp} \quad (8-2)$$

mit: Q_{SF} , Q_{SW} : Solare Wärme durch Fenster /Wände,

Q_{TF} / Q_{TW} / Q_{Ti} Transmissionswärme durch Außenfenster/Außenwände/Innenwände

Q_{TL} / Q_{NL} : Lüftungswärme am Tag / in der Nacht,

Q_i : interne Wärme,

Q_{Sp} : Speicherwärme.

Die Energiemengen berechnen sich durch Aufsummieren der in dem Betrachtungszeitraum geflossenen Energieströme.

Über einen längeren Zeitraum betrachtet, in dem die Außenlufttemperatur nicht tendenziell stark steigt oder fällt, ist die Summe der ein- und ausgespeicherten Energieströme sehr klein im Verhältnis zu der Summe der anderen Energieströme. Die Energiebilanz muss demzufolge auch ohne Beachtung des Speicherterms annähernd aufgehen. In guter Näherung gilt dann:

$$Q_{SF} + Q_{SW} + Q_{TF} + Q_{TW} + Q_{Ti} + Q_{TL} + Q_{NL} + Q_i \approx 0 \quad (8-3)$$

Zunächst wird die Energiebilanz (8-3) für die drei Monate der Sommerperiode (01.06.02 bis 31.08.02) aufgestellt.

Die Energieströme werden als 1 Stundenmittelwerte ermittelt. Die Transmissionslasten, die Strahlungseinträge durch die Wände und die inneren Lasten können aufgrund der erfassten Messdaten als annähernd bekannt angenommen werden. Hingegen ist die Bestimmung der Strahlungseinträge durch die nicht erfasste Nutzungszeit des Sonnenschutzes mit Unsicherheiten verbunden. Die größte Unbekannte ist der Lüftungswärme-
strom, da dieser aufgrund des Anteils der freien Lüftung nur grob abgeschätzt werden kann. Alle notwendigen Annahmen werden daher so abgestimmt, dass die Energiebilanz aufgeht.

8.2.2 Bestimmung der Energieströme

8.2.2.1 Raumumschließungsflächen

Die für die Energiebilanz relevanten Raumumschließungsflächen werden wie folgt unterteilt:

Tabelle 8.1: Raumumschließungsflächen: Büroraum Süd 2.OG

	A	U	g
	[m ²]	[W/(m ² K)]	[-]
Außenwand			
West	31	0,11	
Süd	69	0,11	
Ost	48	0,11	
Außenfenster			
West schmal	1	1,40	0,58
breit	6	1,40	0,58
Süd schmal	5	1,40	0,58
breit	39	1,40	0,58
Ost schmal	2	1,40	0,58
breit	11	1,40	0,58
Decke/Fußboden			
Flachdach	490	0,16	
Fußboden	490	2,38	
Innenwände			
zum Treppenhaus	25	1,84	
zum Atrium	37	1,71	
Innenfenster			
zum Atrium	57	1,84	0,62

Die Fensterflächen zum Atrium werden wie opake Bauteile behandelt, da die solaren Gewinne durch diese Flächen hier rechnerisch nicht erfasst werden können und Abschätzungen nach sehr gering sind.

8.2.2.2 Temperaturen

Die Berechnung bezieht sich auf die Referenztemperatur des Raumes (s. 6.3.3).

Als Temperatur der Nachbarräume werden folgende Annahmen getroffen:

- WC:
Da die Zuluft für die WC-Räume aus dem Büroraum nachströmt und in ihnen keine Wärmequellen vorhanden sind, werden die gleichen Raumlufttemperaturen angenommen.
- Serverraum:
Die Transmission kann vernachlässigt werden, da die Tagesmitteltemperaturen von Server- und Büroraum annähernd gleich sind und aufgrund der Dicke und des Materials der Wand die Wärmetransmission so gedämpft wird, dass momentane Temperaturdifferenzen keine Auswirkung haben.
- Büroraum eine Etage tiefer:
Aufgrund der Temperaturschichtung im Raum wird hier eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von 1 K angenommen.
- Treppenhaus:
Die Temperatur im Treppenhaus ist nicht bekannt. Es wird die Temperatur des Atriums angesetzt.
- Atrium:
Es wird die Temperatur angesetzt, die von dem in Höhe der zweiten Etage an der Atriumwand angebrachten Fühler gemessen wird.

Die Außenlufttemperatur wird messtechnisch erfasst (s. 4.1.2.1)

8.2.2.3 Transmission

Die Raumumschließungsflächen werden eingeteilt in trägheitslose und träge Bauteile.

Als trägheitslos werden Bauteile bezeichnet, bei denen die Wärmekapazität klein ist und somit keine Phasenverschiebung und Dämpfung des Wärmedurchgriffes auftritt. Der momentane Wärmestrom lässt sich daher mit dem Ansatz für die stationäre Wärmeleitung berechnen. Die Fenster erfüllen diese Voraussetzungen und damit ergibt sich die Transmission durch die Fenster zu:

$$\dot{Q}_{TF} = \sum_{k=1}^n A_k U_k (\vartheta_a - \vartheta_i) \quad (8-4)$$

Die Wärmeleitung durch träge Bauteile (hier: die Wände und das Dach) wird hingegen durch die Speicherfähigkeit der Schichten stark beeinflusst. Es ist der Ansatz der instationären Wärmeleitung heranzuziehen (s. (7-17)). Die auf einer Wandoberfläche auftretenden Wärmelasten werden also nicht simultan auf der anderen Wandoberfläche wirksam, sondern erfahren eine zeitliche Verzögerung und werden gedämpft. Schwan

kungen an der Außenoberfläche mit einer Periode deutlich kleiner als 24 h reichen nicht bis auf die Innenoberfläche [Keller].

Angaben in [Keller] und [Zürcher] für ähnliche Wand- und Deckenaufbauten machen deutlich, dass die TDG (für Schwingungen mit einer 24-Stundenperiode) nur 10 bis 30 % des jeweiligen U-Wertes betragen. Die Phasenverschiebungen bei ähnlichen Wandaufbauten werden mit rund 10 h, bei ähnlichen Dachkonstruktionen mit rund 18 h angegeben.

Die starke Dämpfung bewirkt, dass die Amplitude der Transmissionslast im Vergleich zu den Schwankungen der anderen Lasten sehr gering ist. Daher wird hier der instationäre Anteil der Wärmeleitung vernachlässigt und nur die stationäre Bilanz berücksichtigt. Als Temperaturen werden die gleitenden Mittelwerte der letzten drei Tage angesetzt.

$$\dot{Q}_{TW} = \sum_{k=1}^n A_k U_k (\bar{\vartheta}_a - \bar{\vartheta}_i) \quad (8-5)$$

Die mit (8-6) berechneten Wärmeströme geben also nicht die momentanen Wärmeströme wieder sondern nur deren Mittelwert.

8.2.2.4 Strahlungseintrag

Fenster

Die gesamte durch ein transparentes Bauteil in den Raum eindringende Energie bezogen auf die außen auftreffende Strahlungsenergie wird mit dem Gesamtenergiedurchlassgrad g_{\perp} beschrieben. Er setzt sich zusammen aus dem Anteil der Strahlungstransmission τ und der sekundären Wärmeabstrahlung q_i .

Der Gesamtenergiedurchlassgrad wird für senkrecht auf saubere Scheiben einfallende Strahlung angegeben. Die Verminderung infolge der realen Bedingungen wird in dem korrigierten Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{kor}}r$ berücksichtigt:

$$g_{\text{kor}}r = F_w F_v F_s F_c F_F g_{\perp} \quad (8-6)$$

- F_w

Die Transmission ist von dem Winkel der einfallenden Sonnenstrahlung abhängig. In der DIN 4108 wird zur Berücksichtigung des verminderten Energieeintrages infolge des unterschiedlichen Strahlungseinfalles über den Tag und das Jahr ein mittlerer Korrekturfaktor von $F_w = 0,85/0,9$ angegeben. In [Kolmetz] werden nach den vier Himmelsrichtungen unterschiedene Faktoren angegeben, die nur die Einstrahlungsverhältnisse während der Sommermonate berücksichtigen (s. Tabelle 8.2)

- F_v :

Korrekturfaktoren für geringeren Strahlungseintrag infolge der Verschmutzung sind in [Petzold] angegeben. Da hier von seltener Fensterreinigung ausgegangen werden kann, wird entsprechend $F_v = 0,8$ angesetzt.

- F_s :
Der Korrekturfaktor F_s berücksichtigt die Verschattung durch die tiefer liegenden Fensterscheiben mit F_o für die horizontalen Überhänge und F_f für die seitliche Abschattung:
 $F_s = F_o F_f$.
Auch hier wird aufgrund der fehlenden Kenntnis der diffusen und direkten Anteile der Strahlung, die zur Berechnung der momentanen Minderung durch Verschattung notwendig sind, auf Mittelwerte zurückgegriffen. In VDI 4108 T6 sind Faktoren für die mittlere Verschattung in Abhängigkeit von der geografischen Lage und der Himmelsrichtung für verschiedene Verschattungen als Mittelwerte über ein Jahr angegeben. Für die an dem Gebäude vorhandenen Fenster werden durch Interpolieren die entsprechenden Werte aus der VDI gewonnen und unter Berücksichtigung des Verhältnisses des Jahresmittels des Sonnenstandes zum Mittel während der Sommermonate korrigiert. (Werte s. Tabelle 8.2) Eine Verschattung durch Nachbargebäude und Bäume ist nicht vorhanden.
- F_F :
Hiermit wird der Anteil der transparenten Fläche an der Fensterfläche beschrieben. (Werte s. Tabelle 8.2)
- F_c :
Der Korrekturfaktor F_c für den Sonnenschutz kann nur angesetzt werden, wenn der Sonnenschutz geschlossen ist. Die teilweise Nutzung des Sonnenschutzes kann mit einem Mittelwert der Strahlungsminderung durch den Sonnenschutz F'_c berücksichtigt werden. F'_c berücksichtigt die strahlungsgewichtete Nutzungszeit p des Sonnenschutzes:

$$F'_c = 1 - p + p F_c \quad (8-7)$$

$$p = \frac{\sum_{t=0}^{24z} I_{c,t}}{\sum_{t=0}^{24z} I_{ges,t}} \quad (8-8)$$

- mit: I_c : Sonneneinstrahlung während der Schließzeit des Sonnenschutzes,
 I_{ges} : Sonneneinstrahlung während der gesamten Betrachtungszeit,
 z : Anzahl der Tage im Bewertungszeitraum.

Die Nutzungszeit des Sonnenschutzes ist nicht bekannt, jedoch der Stellbefehl der GLT. Aus der Nutzerbefragung geht hervor, dass der Sonnenschutz nur gelegentlich manuell bedient wird und dass Öffnen und Schließen sich die Waage halten. Die Schließzeiten des Sonnenschutzes werden in der Berechnung entsprechend den Stellbefehlen der GLT angesetzt. Der Grenzwert der Raumtemperatur für die Steuerung des Sonnenschutzes an der Westfassade ist so hoch eingestellt, dass der Sonnenschutz nie automatisch schließt (s. 2.5.2). Die Nutzungszeit wird gleich der mittleren Nutzungszeit p an Süd- und Ostseite angesetzt

Tabelle 8.2: Abminderungsfaktoren für den Gesamtenergiedurchlassgrad: Quellenangabe s.o., Nutzungszeit p nach GLT-Stellbefehlen

Außenfenster	F_w	F_v	F_s	F_F	F_c	p^{29}	F'_c
West schmal	0,87	0,80	0,67	0,61	-	-	-
breit	0,87	0,80	0,94	0,93	0,40	0,26	0,85
Süd schmal	0,78	0,80	0,63	0,61	-	-	-
breit	0,78	0,80	0,94	0,93	0,40	0,27	0,86
Ost schmal	0,87	0,80	0,67	0,61	-	-	-
breit	0,87	0,80	0,94	0,93	0,40	0,24	0,84

Als Strahlungslast durch die Fenster ergibt sich damit:

$$\dot{Q}_{SF} = \sum_{k=1}^n A_k g_{korr,k} I_k \quad (8-9)$$

Wand

Entsprechend den Überlegungen zur Transmission durch die Außenwände wird der Strahlungseintrag durch die Wände mit dem gleitenden Mittelwert der Strahlung berechnet:

$$Q_{SW} = U \frac{a\bar{I}}{\alpha_a} \quad (8-10)$$

Der Absorptionsgrad der Außenwand kann entsprechend den Angaben in [Keller] mit $\alpha_a = 0,7$ angenommen werden. Die Angaben in der Literatur zum Absorptionsgrad von Kiesdächern liegen zwischen 0,3 und 0,6. Da das Dach leicht bewachsen ist, wird die Reflexion verringert. Der Absorptionsgrad wird mit $a = 0,5$ angesetzt.

Der Wärmeübergangskoeffizient, der den konvektiven und den strahlungsbedingten Wärmeübergang zusammenfasst, ist an der Außenoberfläche in starkem Maße abhängig von der Windgeschwindigkeit. Für die Mittelwertbetrachtung der Wärmeleitung durch die Außenwand erweist sich der in der DIN 4701 Teil 4 angegebene Wert von 25 W/(m²K) nach [Keller] als zu hoch. In der Berechnung wird hier der von Keller vorgeschlagene Wert von 10 W/(m²K) genutzt. Dieser Wert ist auch in der Berechnung der U-Werte anzusetzen.

Die Außenwand steht im Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Der Strahlungsaustausch mit Nachbargebäuden und der Vegetation wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten bereits erfasst. In klaren Nächten treten Zusatzverluste durch Abstrahlung an die Atmosphäre auf. Im Mittel betrachtet sind diese Strahlungsverluste, verglichen mit den Wärmeströmen infolge der Sonneneinstrahlung, gering und bewegen sich in der

²⁹ Mittelungszeitraum: 01.06.02 bis 31.08.02

Größenordnung der Ungenauigkeit, die sich aufgrund der nicht genauen Kenntnis des Absorptionskoeffizienten und des Wärmeübergangskoeffizienten ergibt.

8.2.2.5 Lüftung

Der Lüftungswärmestrom berechnet sich mit:

$$\dot{Q}_L = nV_R (c\rho)_{Luft} \Delta\vartheta \quad (8-11)$$

Die Dichte und die spezifische Speicherkapazität werden als konstant angesetzt:

$$c = 1.100 \text{ J/(kg K)},$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3.$$

Der Luftwechsel n setzt sich aus einem Anteil, der durch die Lüftungsanlage abgeführt wird (hier als mechanischer Anteil bezeichnet), und einem Anteil, der über die Öffnungen in den Umschließungsflächen abgeführt wird (freier Anteil), zusammen.

Der mechanische Volumenstrom wird entsprechend den Messwerten (s. 5.2.3) angesetzt.

Zur Bestimmung der freien Lüftung werden fünf Betriebszustände (s. Tabelle 8.3) unterschieden, in denen jeweils ein konstanter, mittlerer thermisch wirksamer Luftwechsel angesetzt wird. Für jeden Betriebszustand wird die Größenordnung des Luftwechsels anhand der Ergebnisse der Luftwechselfmessungen, der theoretischen Überlegungen zum Luftaustausch und der Annahmen für die Fensteröffnungszeiten abgeschätzt. Nach dem Aufstellen der Energiebilanz für drei Monate werden die Luftwechsel so angepasst, dass die Energiebilanz (8-3) aufgeht. Die somit ermittelten freien Anteile am Gesamtluftwechsel sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

Tabelle 8.3: Mittlere freie Anteile des Luftwechsels

Betriebszeit	Mo – Fr:	08 – 17 Uhr	1,3 1/h
Abwesenheit	Mo – Fr:	07 – 08 Uhr	0,4 1/h
		17 – 20 Uhr	
	Sa, So:	07 – 20 Uhr	
Nachtlüftung ³⁰ :	Fenster auf	20 – 07 Uhr	2,7 1/h
	Fenster ?	20 – 07 Uhr	1,3 1/h
	Fenster zu	20 – 07 Uhr	0 1/h

8.2.2.6 Interne Wärme

Die Wärmebelastung durch die Beleuchtung, die Geräte und die Personen wird als interne Wärmelast zusammengefasst (s. auch 4.2.2). Die Lasten infolge der Beleuchtung und der Geräte werden entsprechend der gemessenen Verbräuche angenommen (s. 4.2.2). Als Leistung wird der Stundenmittelwert angesetzt. Die Personenlasten werden entsprechend der Annahmen in auch 4.2.2 berechnet.

³⁰ s. 5.2.2

8.3 Auswertung der Bilanz der Sommerperiode

Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der Energiebilanz der Sommerperiode erfolgt anhand der Werte, die sich für den durchschnittlichen Tag aus der Energiebilanz ableiten lassen.

8.3.1 Temperaturen und Globalstrahlung

In Abb. 8.1 sind die Außenlufttemperaturen und die Raumlufttemperaturen während der Sommerperiode und deren mittlerer Tagesgang dargestellt. Im Mittel liegen die Raumlufttemperaturen zu jeder Uhrzeit über der Außenlufttemperatur. Die niedrigste Temperaturdifferenz (1,1 K) tritt im Mittel um 14 Uhr, die höchste Temperaturdifferenz (8,6 K) um 5 Uhr auf.

Im Mittel treten folgende Temperaturen auf:

	Tagesmittel	Tagesmaximum	Tagesminimum
Außenlufttemperatur	18,7 °C	23,5 °C	13,4 °C
Raumlufttemperatur	23,4 °C	24,7 °C	20,0 °C

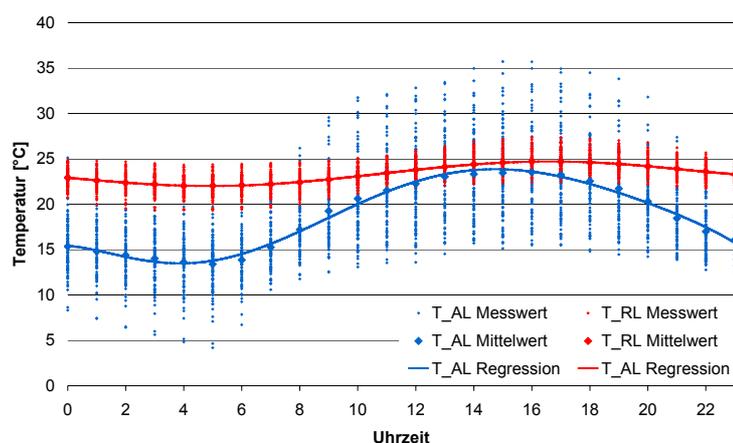


Abb. 8.1: Außenlufttemperatur und Raumlufttemperatur: 01.06.02 bis 31.08.02.

In Abb. 8.2 ist der mittlere Tagesgang der Globalstrahlung auf die drei Fassaden und auf das Dach während der Sommerperiode dargestellt. Die mittleren Tagessummen der Einstrahlung für jede der Orientierungen betragen:

Südfassade	Westfassade	Ostfassade	Dachfläche
2,9 kWh/(m ² ,d)	2,5 kWh/(m ² ,d)	2,1 kWh/(m ² ,d)	3,8 kWh/(m ² ,d)

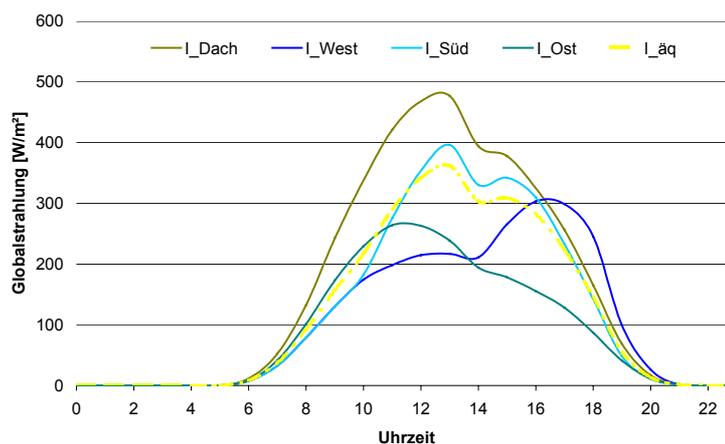


Abb. 8.2: Globalstrahlung auf Fassaden, Dach und mittlere, thermisch äquivalente Globalstrahlung (s. 8.7.2) als Mittelwerte der Sommerperiode (01.06.02 bis 31.08.02)

8.3.2 Die mittlere Tagesenergiebilanz

Abb. 8.3 zeigt die Energiebilanz eines durchschnittlichen Tages. Dargestellt sind die dem Raum zugeführten (positiven) und aus dem Raum abgeführten (negativen) Energiemengen. Die Energiebilanz ist aufgrund des Ansatzes und der Anpassung der Luftwechselzahl ausgeglichen.

In der Grafik wie auch in der folgenden Auswertung wird der Begriff des Wärmedurchganges verwendet, mit dem Transmission durch die gesamte Außenhülle und Strahlungseintrag durch Außenwand und Dach zusammengefasst werden. Die Transmission durch Innenwände wird separat aufgeführt. Der Begriff der solaren Wärme bezeichnet die solaren Einträge durch die Außenfenster. Die Lüftungswärme wird getrennt nach Tag (7 bis 20 Uhr) und Nacht (20 bis 7 Uhr) erfasst.

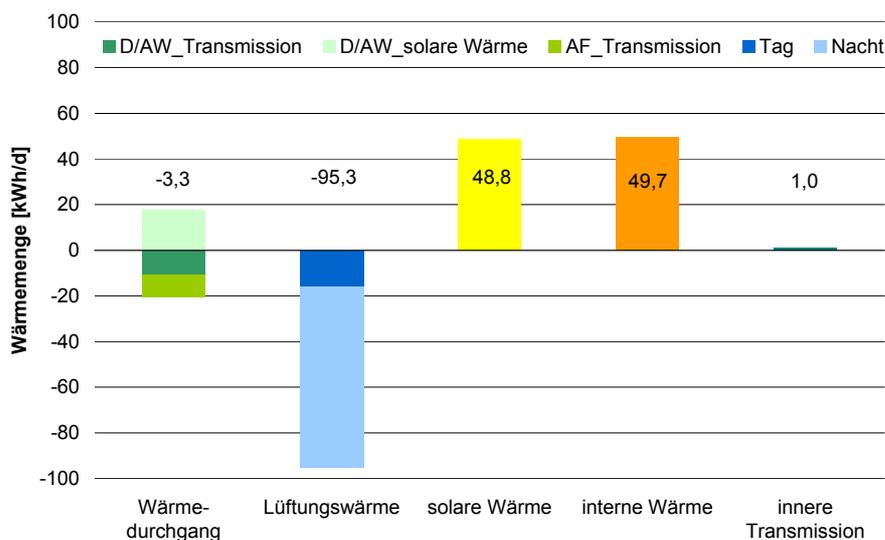


Abb. 8.3: Tagesenergiebilanz: Büroraum Süd 2. OG, als Mittelwerte vom 01.06.02 bis 31.08.02

Dem Raum werden am Tag 116 kWh/d zugeführt und ebensoviel abgeführt (ohne innere Transmission).

Wärme wird dem Raum durch die solaren und internen Wärmeeinträge zugeführt, während Lüftung und Transmission durch die Außenflächen Wärme aus dem Raum abführen. Die innere Transmission ist verschwindend gering und kann auch mit Berücksichtigung der Unsicherheiten der Berechnung mit +/- 0 kWh/d angenommen werden. In den folgenden Betrachtungen wird die innere Transmission nicht mehr berücksichtigt.

Wärmedurchgang

Die Transmissionsverluste teilen sich etwa zu gleichen Teilen auf die transparenten Flächen (9,9 kWh/d) und die opaken Flächen (Außenwand und Dach) (8,9 kWh/d) auf. Diese Verluste werden fast vollständig mit den solaren Gewinnen, die dem Raum durch opake Flächen – insbesondere das Dach – zugeführt werden, ausgeglichen.

Lüftungswärme

Die Lüftung bewirkt einen Wärmeverlust für den Raum. Mit der Tageslüftung werden 14 % der Gesamtwärmelast abgeführt, mit der Nachtlüftung 68 %.

Solare Wärme

Rund 40 % der Gesamtwärmelast des Raumes entfallen auf die solaren Einträge durch die Außenfenster. Nur ein Zehntel der solaren Einträge, das entspricht 4% der Gesamtwärmelasten, gelangt durch die schmalen Fenster ohne Abschattungsmöglichkeit in den Raum. Der größte Anteil der solaren Wärmelasten, rund 2/3, fällt über die breiten Fenster im Süden ein.

Interne Wärme

Die internen Wärmequellen bewirken die gleichen Wärmelasten wie die solaren Einträge.

8.3.3 Mittlere Tagesgänge der Wärmeströme

Die mittleren Tagesgänge der Wärmeströme³¹ – Wärmedurchgang, Lüftungswärme, solare Wärme und interne Wärme - sind in Abb. 8.4 dargestellt, die mittleren Tagesgänge der Gesamtwärme (Summe der o.g. Wärmeströme) und der Raumlufthtemperatur in Abb. 8.5.

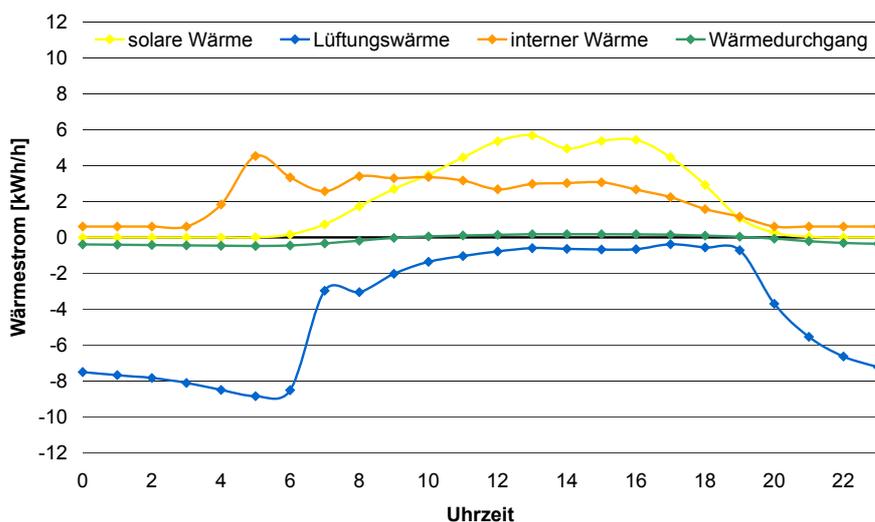


Abb. 8.4: Tagesgang der Wärmeströme Büroraum Süd 2, als Mittelwerte vom 01.06.02 bis 31.08.02

Der Tagesgang der internen Wärme ist in den frühen Morgenstunden von der Beleuchtung (eingeschaltet vom Reinigungspersonal) und am Tag von den Gerätelasten und Personenlasten bestimmt (s. 4.2.2). Die Leistungsspitze liegt um 5 Uhr bei 4,5 kWh/h. Während der Betriebszeit ist die interne Wärmeleistung relativ gleichbleibend bei rund 3 kWh/h. Der Leistungsabfall in der Mittagszeit ist gering. Ab 16 Uhr fällt die Leistung langsam bis 20 Uhr ab. In der Nacht ist eine Grundlast von 0,6 kWh/h vorhanden.

Der solare Wärmeeintrag ist hauptsächlich von dem Tagesgang der Sonneneinstrahlung auf die Südfassade geprägt. Die hohen Wärmeströme am Nachmittag sind mit knapp 6 kWh/h rund doppelt so hoch wie die internen Wärmeströme am Tag.

Wie in Abb. 8.1 gezeigt, liegt die Raumlufthtemperatur immer höher als die Außenlufttemperatur. Die Lüftung bewirkt somit auch am Tag einen – wenn auch geringen – Wärmeverlust für den Raum. Von Beginn der Nachtlüftung an vergrößert sich der Wärmestrom zunächst stark (bis 0 Uhr auf rund das Doppelte), dann langsamer bis zu seinem Maximum um 5 Uhr. Da hier der Luftwechsel für den gesamten Zeitraum der Nachtlüftung als nahezu konstant angesetzt wurde, lässt sich dieser Verlauf direkt aus dem Verlauf der Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Raumlufthtemperatur (s. Abb. 8.1) ableiten.

³¹ Stundenmittelwerte

Der Wärmestrom des Wärmedurchganges – in der Nacht negativ und am Tag positiv – ist verglichen mit den anderen Wärmeströmen zu vernachlässigen.

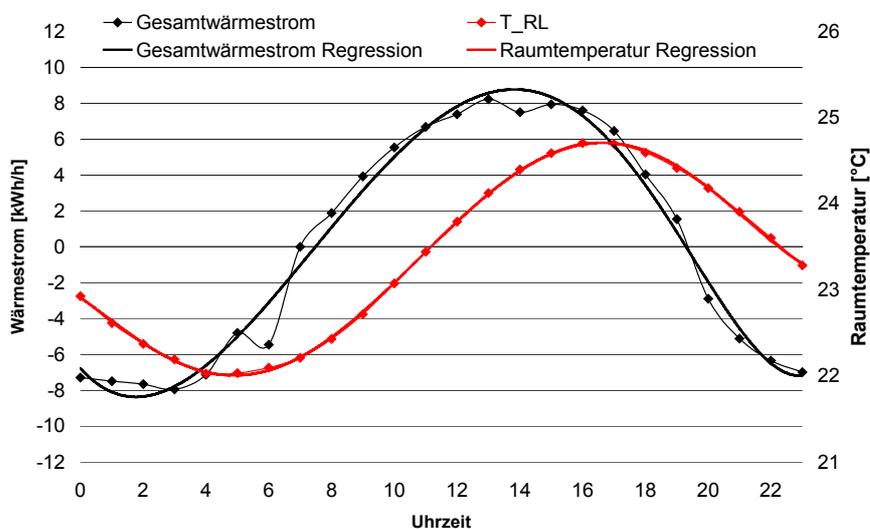


Abb. 8.5: Tagesgang des Gesamtwärmestromes und der Raumlufttemperatur, als Mittelwerte vom 01.06.02 bis 31.08.02 und deren Regressionskurven³²

Der Gesamtwärmestrom bewirkt zwischen 7 Uhr und 19 Uhr einen Wärmeeintrag in den Raum und zwischen 19 Uhr und 7 Uhr einen Wärmeverlust. Am Tag wird der Verlauf hauptsächlich durch die solaren und internen Wärmeeinträge bestimmt, in der Nacht durch die Lüftungswärme. In guter Näherung lässt sich der Tagesgang durch eine Sinus-Funktion wiedergeben (s. Abb. 8.5).

Der Tagesgang des Gesamtwärmestromes und ist gegenüber dem Verlauf der Raumlufttemperatur um rund drei Stunden verschoben: Das Temperaturmaximum tritt nach der Lastspitze, aber noch vor dem Zeitpunkt, an dem der Gesamtwärmestrom sein Vorzeichen ändert, auf. Dies bedeutet, dass die Raumlufttemperatur bereits wieder leicht fällt, obwohl dem Raum in der Summe noch Wärme zugeführt wird.

³² Die Regressionskurve wird durch ein Polynom 6. Ordnung wiedergegeben. Dies entspricht in guter Näherung dem Verlauf einer harmonischen Schwingung.

8.4 Auswertung der Tagesenergiebilanzen

8.4.1 Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Energiebilanzen einzelner Tage ist zu beachten, dass die hier berechneten Energiemengen von den tatsächlichen z.T. erheblich abweichen können, da, wie gezeigt, für Energieströme, die nicht messtechnisch erfasst wurden, die Durchschnittswerte der Sommerperiode angesetzt werden. Hingegen können für einen längeren Betrachtungszeitraum die einzelnen Summen der in der Zeit geflossenen Energieströme, gut wiedergegeben werden. Die größten Ungenauigkeiten ergeben sich bei Abbildung des Nutzerverhaltens und der freien Lüftung mit Mittelwerten:

- Solare Wärme:
Durch manuelle Betätigung des Sonnenschutzes können Abweichungen der berechneten von den realen Werten bis maximal 60% auftreten.
- Lüftungswärme:
Nutzerverhalten (Fensteröffnungszeiten am Tag und in der Nacht) und unterschiedliche meteorologische Bedingungen (Windverhältnisse und Temperaturunterschiede) bestimmen den Luftwechsel. Die größte Unsicherheit der Berechnung der Tagessumme der Lüftungslasten liegt an Tagen, an denen die Fensterstellung in der Nacht nicht bekannt war, bzw. falsch angenommen wurde. Die tatsächlichen Wärmeverluste könnten bis zu 60% geringer und bis zu 200% größer sein.

8.4.2 Bilanzierungszeitraum

Als Bilanzzeitraum wird die Zeit von 20 Uhr bis 20 Uhr (d.h. von Beginn der Nachtlüftung des Vortages bis zum Beginn der Nachtlüftung des betrachteten Tages) festgelegt. Wie in Abb. 8.5 gezeigt, fällt im Mittel der Übergang von Einspeicherung zu Ausspeicherung ungefähr mit dem Beginn der Nachtlüftung zusammen.

8.4.3 Tagesmitteltemperaturen während der Sommerperiode

Abb. 8.6 zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur und der Raumlufthtemperatur (Tagesmittel, Tagesmaxima und Tagesminima) in der Sommerperiode.

In den drei Monaten gab es keine länger anhaltende Hitzeperiode. Vielmehr war die Außenlufttemperatur sehr wechselhaft und nur zweimal, im Abstand von rund drei Wochen, lag das Tagesmaximum für je ein paar Tage über 30°C.

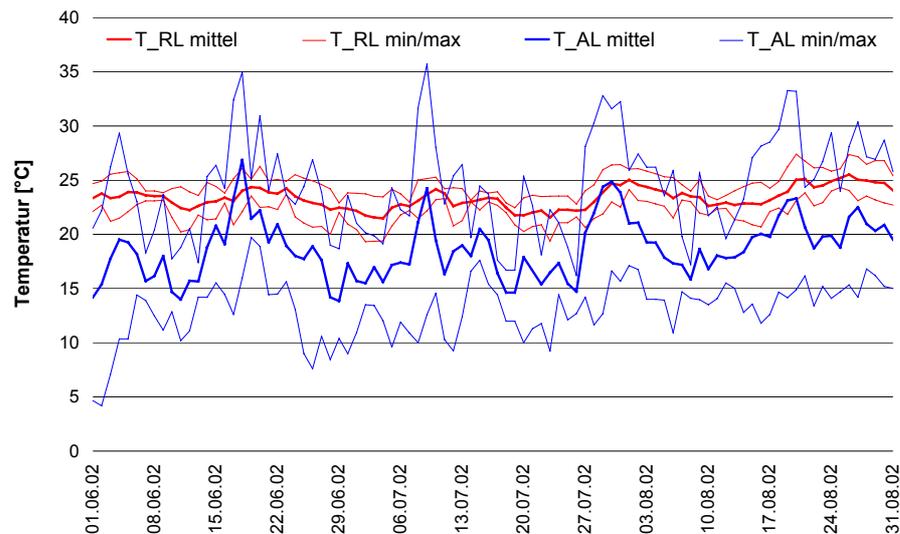


Abb. 8.6: Außenluft- und Raumlufthtemperaturen: Tagesmittelwerte, Tagesmaxima und Tagesminima, 01.06.02 bis 31.08.02

8.4.4 Tagesenergiebilanzen

Abb. 8.7 stellt die Tagesenergiebilanzen aller Tage während der Sommerperiode dar. Die Speicherwärme ist nicht mit dargestellt. Die Summe der Energiemengen entspricht (unter Berücksichtigung der oben genannten Fehler) der Tagesbilanz der Speicherwärme. Eine positive Bilanz bedeutet, dass im Bilanzzeitraum (24 h) mehr Wärme eingespeichert wird als ausgespeichert.

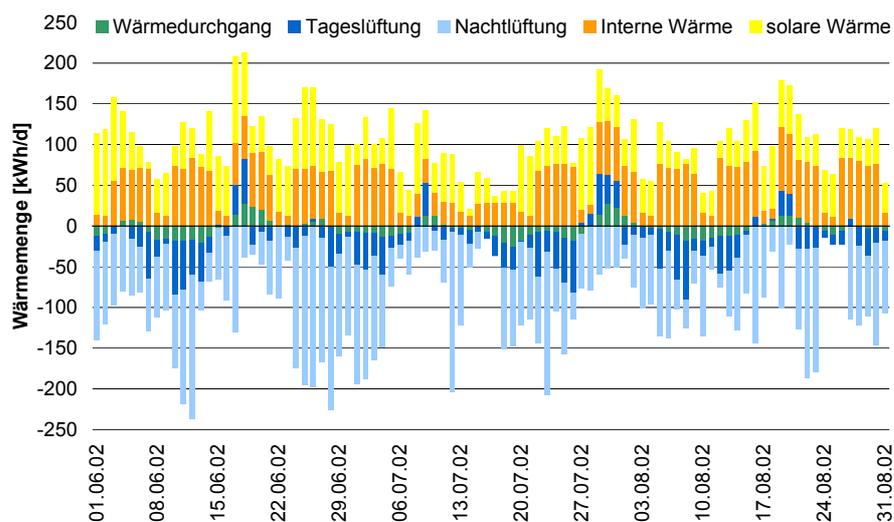


Abb. 8.7: Tagesenergiebilanzen: Büroraum Süd 2, vom 01.06.02 bis 31.08.02

Es zeigt sich deutlich der Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden und den Betriebsferien, da sich die internen Lasten stark unterscheiden:

- Werktage: 52 kWh/d ... 84 kWh/d (Mittel: 71 kWh/d),
- Wochenenden: durchschnittlich 12 bzw. 17 kWh/d.

Außerdem lassen sich anhand der Werte der Tageslüftung und des Wärmedurchgangs Tage mit hohen und mit niedrigen Außenlufttemperaturen ablesen. Die Tageslüftung bewirkt an nur dreizehn Tagen (14% der Sommerperiode) einen Lasteintrag in den Raum. Die Tagesbilanz des Wärmedurchganges ist häufiger (an einem Drittel aller Tage) positiv, als die der Tageslüftung. Außerdem ist der Verlauf des Wärmedurchganges gegenüber dem Verlauf der Tageslüftung meist um einen Tag verzögert. Während die Lüftungswärme direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft ist, fließen in den Wärmedurchgang zusätzlich die Temperaturdifferenzen der letzten drei Tage (infolge des „Gedächtnisses“ der Außenwand und des Daches) und die Strahlung (als solare Einträge durch Außenwand und Dach) ein.

An Wochenenden sind die Wärmemengen des Wärmedurchganges und der Tageslüftung in etwa gleich groß, an Werktagen ist die Wärmemenge der Tageslüftung um ca. zwei Drittel höher, als die des Wärmedurchganges. Die Werte liegen in folgenden Größenordnungen:

- Tageslüftung an Werktagen: -67 kWh/d ... 55 kWh/d,
- Wärmedurchgang: -25 kWh/d ... 28 kWh/d.

Der Wärmeverlust infolge der Nachtlüftung nimmt aufgrund der unterschiedlichen Luftwechsel (Fenster auf, Fenster zu) sehr unterschiedliche Werte an (s. 8.4.7).

Die solaren Wärmeeinträge variieren in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung und der Nutzung des Sonnenschutzes (s. 8.4.6)

8.4.5 Tageslüftung und Wärmedurchgang in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

In Abb. 8.8 ist die Wärmemenge, die dem Raum an einem Tag infolge von Wärmedurchgang (WD) und Tageslüftung (TL) zugeführt bzw. abgeführt wird, über dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur aufgetragen. Unterschieden werden Tage mit hohem Luftwechsel (Werktage) und Tage mit niedrigem Luftwechsel (Wochenenden, Betriebsferien).

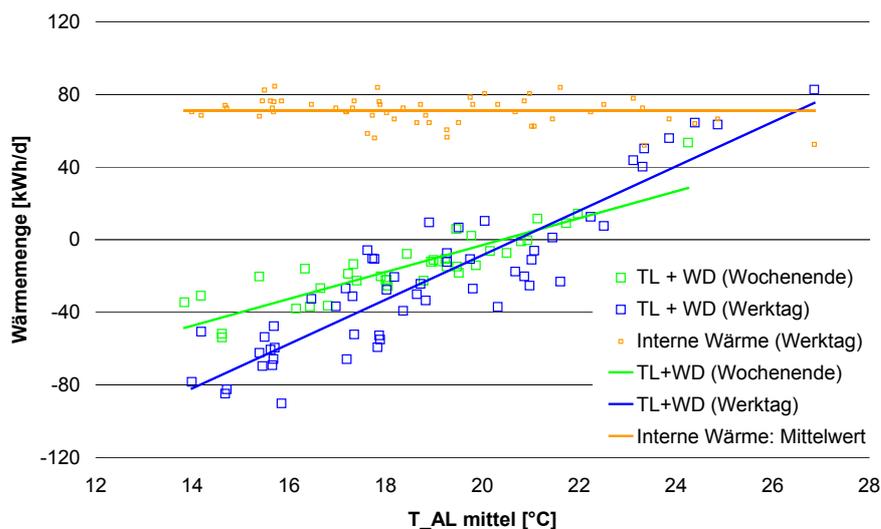


Abb. 8.8: Tagessummen der Summe aus Tageslüftung und Wärmedurchgang in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (Tagesmittel) bei unterschiedlichen Luftwechseln (Wochenende, inkl. Betriebsferien: geringer LW, Werktag: höherer LW); zum Vergleich: interne Wärme an den Werktagen und deren Mittelwert; (01.06.02 bis 31.08.02)

Es zeigt sich eine Abhängigkeit der Summe der Transmissions- und Tageslüftungswärme von der Außenlufttemperatur, da Lüftungswärme und Transmission proportional zu der Temperaturdifferenz zwischen Außenluft- und Raumlufttemperatur sind.

Die Streuung hat u.a. folgende Ursachen:

- Nur der freie Anteil am Luftwechsel wurde als konstant angenommen, der mechanische Anteil variiert je nach Betriebszustand (s. Tabelle 5.2).
- Tage mit gleicher Tagesmitteltemperatur können unterschiedliche Temperaturen während des Tages haben. Zudem unterscheiden sich die Raumlufttemperaturen.
- Der Wärmedurchgang besitzt mit dem Strahlungseintrag durch die opaken Außenflächen auch einen von der Außenluft unabhängigen Anteil.

Der Wärmeaustausch des Raumes mit der Umgebung ist im Mittel bei einer Tagesmitteltemperatur der Außenluft von 21°C ausgeglichen.

Zum Vergleich sind in dem Diagramm die internen Wärmelasten an Werktagen und deren Mittelwert (71 kWh/d) dargestellt. An kalten Sommertagen kann die interne Wärmelast mit den Wärmeverlusten infolge des Wärmedurchgangs und der Tageslüf

tung³³ kompensiert werden. Hingegen wird an sehr warmen Tagen ein Wärmeeintrag in Höhe der internen Wärmelasten verursacht³³.

8.4.6 Solare Wärme in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Abb. 8.9 zeigt die Tagessumme der solaren Wärmelasten³⁴ in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung (Tagessumme der Globalstrahlung auf die Südfassade). Da der größte Anteil des Wärmeeintrages durch die Fenster in der Südfassade in den Raum gelangt, ist an Tagen ohne Nutzung des Sonnenschutzes ein linearer Zusammenhang zwischen der Sonneneinstrahlung und den solaren Lasten vorhanden (obere Grenzkurve). Je größer die Abweichung von dem linearen Zusammenhang ist, desto länger ist die strahlungsgewichtete Nutzungszeit des Sonnenschutzes. An Werktagen im Juni und an Wochenenden wurde der Sonnenschutz auch an sehr strahlungsreichen Tagen nicht geschlossen, da der Grenzwert der Raumlufttemperatur (ϑ_{GLT} : 24°C bzw. 27°C) für den Schließbefehl sehr hoch eingestellt war (s. 2.5.2). An Tagen mit Nutzung des Sonnenschutzes wurde eine Reduzierung der solaren Wärmeeinträge um bis zu 30 % erreicht. Maximal kann eine Reduzierung um 60 % erreicht werden (untere Grenzkurve).

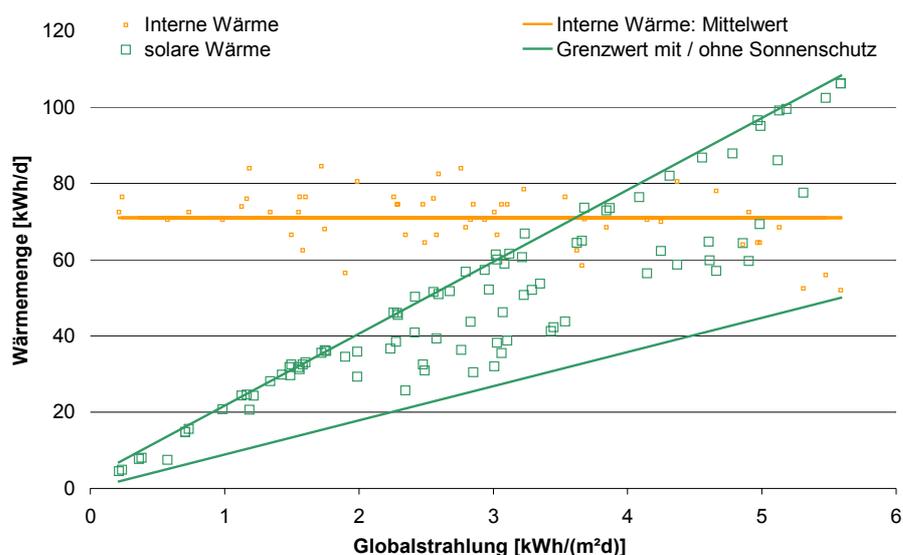


Abb. 8.9: Tagessummen der solaren Wärme in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung auf Südfassade [kWh/(m²d)]); zum Vergleich interne Wärme an den Werktagen und deren Mittelwert (01.06.02 bis 31.08.02)

In Abb. 8.10 sind die Tagessummen der solaren Wärmelast über der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwert) aufgetragen. Es zeigt sich kein Zusammenhang zwischen der

³³ bei dem für die Werktage angesetzten Luftwechsel

³⁴ Dies sind die solaren Wärmelasten, die sich entsprechend der GLT-Steuerung, ohne Nutzereingriff ergeben würden. Die tatsächliche Nutzung wurde nicht erfasst (s. 8.2.2.4).

Außenlufttemperatur und der solaren Wärmelast, da keine Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung von der Außenlufttemperatur vorhanden ist.

Zusätzlich sind in Abb. 8.10 die internen Wärmelasten an Werktagen und deren Mittelwert (71 kWh/d) dargestellt. Unterscheidet man die Tage nach ihrem Strahlungsangebot, so können drei Bereiche unterschieden werden:

- An strahlungsarmen Tagen (Globalstrahlung auf Südfassade $< 2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$) betragen die solaren Wärmelasten weniger als die Hälfte der internen Wärmelasten.
- An Tagen mit einer mittleren Sonneneinstrahlung ($2 \dots 4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$) liegen diese auch bei geöffnetem Sonnenschutz kaum über den internen Wärmelasten.
- Die Sonneneinstrahlung bewirkt nur an strahlungsreichen Tagen ($> 4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$), an denen der Sonnenschutz nicht genutzt wurde, höhere Wärmelasten als sie von den internen Wärmequellen an Werktagen verursacht werden.

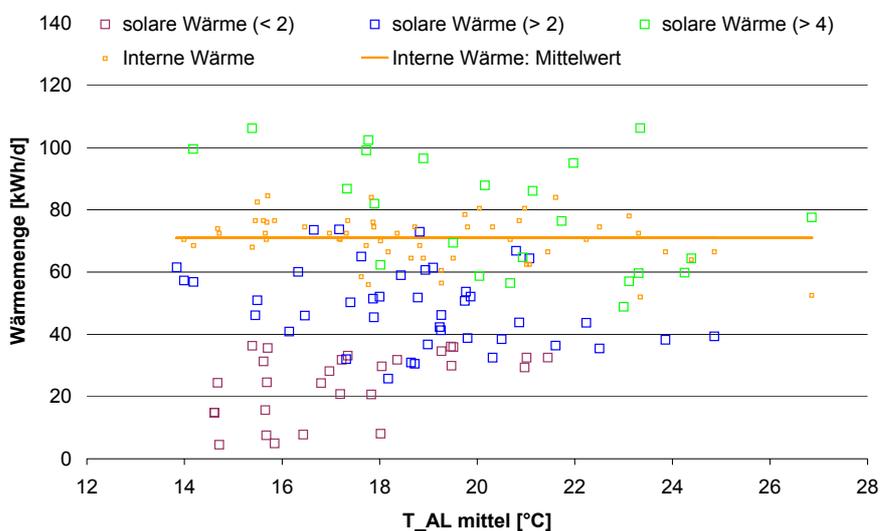


Abb. 8.10: Tagessummen der solaren Wärme in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Tagesmittel) und der Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung auf Südfassade [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{d})$]); zum Vergleich interne Wärme an den Werktagen und deren Mittelwert: 01.06.02 bis 31.08.02.

8.4.7 Nachlüftung in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

In Abb. 8.11 sind die Wärmemengen, die täglich mit der Nachlüftung bei entsprechendem Luftwechsel abgeführt werden können, in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt.

Den vier unterschiedenen Betriebszuständen liegen folgende Luftwechselzahlen, die im Mittel bei der jeweiligen Fensterstellung erreicht werden, zugrunde (s. auch 8.2.2.5):

NL aus Fenster zu	NL an Fenster zu	NL an Fenster ?	NL an Fenster zu
0 1/h	0,6 ... 0,9 1/h	1,9 ... 2,2 1/h	3,3 ... 3,6 1/h

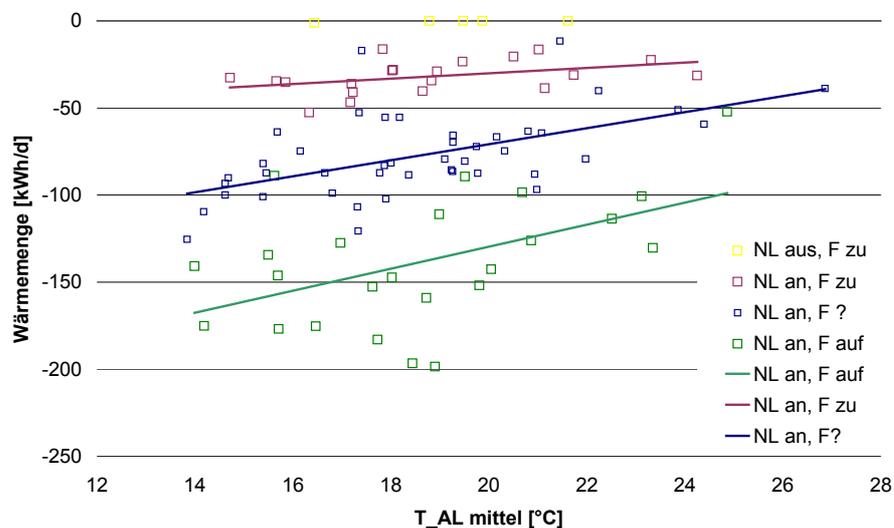


Abb. 8.11: Tagessummen der mit der Nachlüftung abführbaren Wärmemenge in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (Tagesmittel) und dem Luftwechsel: 01.06.02 bis 31.08.02.

Es wird deutlich, dass mit größeren Luftwechselzahlen bei gleicher Außenlufttemperatur eine größere Wärmemenge abgeführt wird – Luftwechsel und Wärmemenge sind direkt proportional zueinander. Außerdem steigt mit fallender Außenlufttemperatur bei gleichem Luftwechsel die Wärmemenge, die abgeführt wird. (Ursachen der Streuung analog Kapitel 8.4.5 Tageslüftung und Wärmedurchgang in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur)

In Abb. 8.12 ist die Wärmemenge, die im Mittel bei dem jeweiligen Luftwechsel in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur mit der Nachtlüftung abgeführt werden kann, den in der Sommerperiode täglich eingebrachten Wärmemengen gegenübergestellt.

- Der Luftwechsel, der bei geschlossenen Fenstern erreicht wird, ist nur an kalten Tagen ausreichend, um einen geringen Wärmeeintrag abzuführen ($Q < 40 \text{ kWh/d}$).
- Ein Luftwechsel von rund 2 h^{-1} kann an „normal warmen“ Sommertagen ($\vartheta < 21^\circ\text{C}$) einen mittleren Wärmeeintrag ($Q < 70 \text{ kWh/d}$) kompensieren.
- An Tagen mit einer mittleren Außenlufttemperatur $\vartheta > 23^\circ\text{C}$ ist ein Luftwechsel von rund $3,5 \text{ l/h}$ nicht mehr ausreichend, um die eingebrachten Wärmelasten abzuführen.

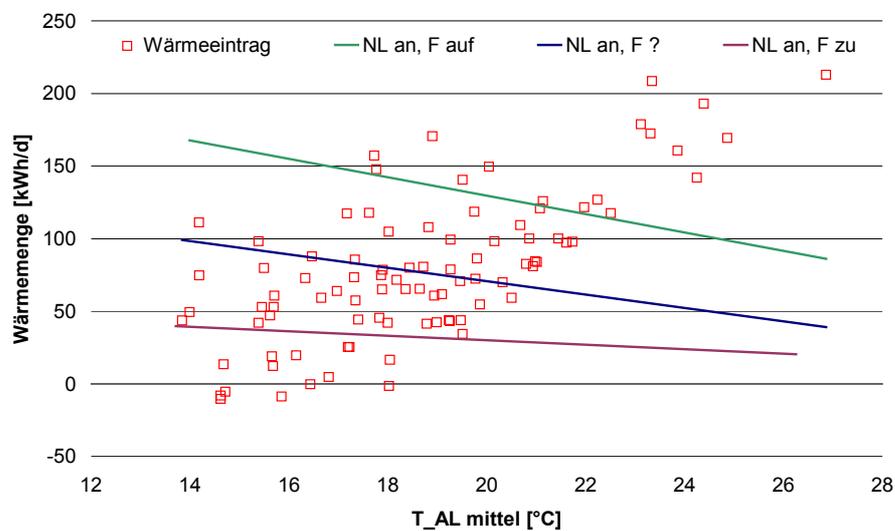


Abb. 8.12: Tagessummen des Wärmeeintrages (solare Wärme, interne Wärme, Tageslüftung, Wärmedurchgang), Betrag der Tagessummen der im Mittel mit der Nachtlüftung abführbaren Wärmemenge in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (Tagesmittel): 01.06.02 bis 31.08.02

8.5 Effektivität und Energieeffizienz der Nachtlüftung

8.5.1 Effektivität der Nachtlüftung

Das Konzept der Nachtlüftung beruht darauf, die am Tag anfallenden Wärmelasten in der Gebäudekonstruktion zu speichern und in der Nacht die eingespeicherte Wärmemenge durch Lüftung aus den Speichermassen und damit aus dem Raum abzuführen. Die ein- bzw. ausgespeicherte Wärmemenge ist proportional zum Temperaturanstieg bzw. -abfall des Speichers während des Ein- bzw. Ausspeichervorganges. Wird am Tag eine größere Energiemenge eingespeichert als die Nacht zuvor ausgespeichert wurde, so führt dies am Ende der Einspeicherung zu einer Speichertemperatur, die höher ist als zu Beginn der Ausspeicherung am Vortag. Aufgrund der thermischen Kopplung zwischen Speicheroberfläche und Luft bewirkt dies ebenfalls eine Erhöhung der Raumlufttemperatur.

Die Temperaturentwicklung im Vergleich zum Gesamtwärmeeintrag³⁵ ist demnach ein Maß für die Wärmemenge, die mit der Nachtlüftung kompensiert werden kann, also für die Wirksamkeit der Nachtlüftung.

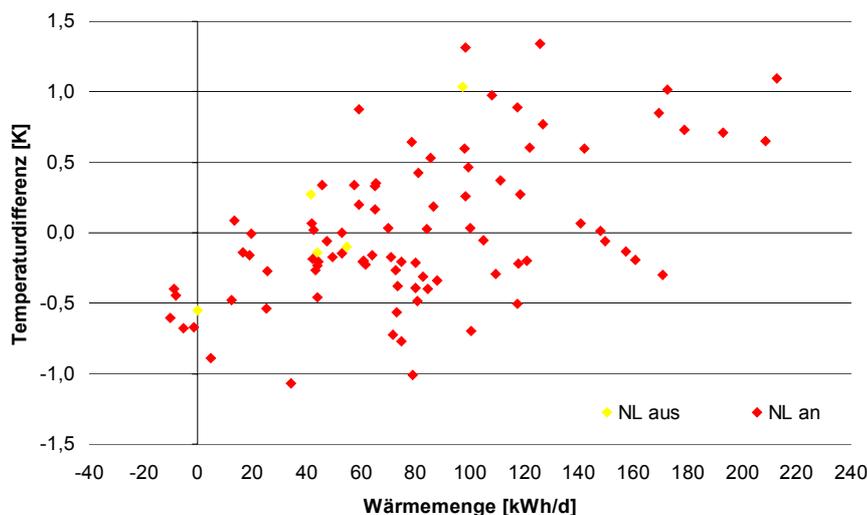


Abb. 8.13: Änderung der Raumlufttemperatur vom Vortag zum betrachteten Tag im Verhältnis zur Tagessumme der eingebrachten Wärme (solare Wärme, interne Wärme, Tageslüftung, Wärmedurchgang). Bilanzzeitraum der Wärmemenge: 20 – 19 Uhr. Bezugstemperatur: Raumlufttemperatur um 20 Uhr.

³⁵ Tagessumme aller Wärmeströme, ausgenommen der Nachtlüftungswärmestrom

In Abb. 8.13 ist die Änderung der Raumlufttemperatur (von 20 Uhr) über dem Gesamtwärmeeintrag aufgetragen. Die Änderung der Raumlufttemperatur lag an 61 Tagen (knapp 70% der Sommerperiode) bei weniger als $\pm 0,5$ K, an 7 Tagen bei mehr als ± 1 K.

Aus der Grafik lässt sich ableiten wie groß der Wärmeeintrag ist, der mit der Nachtlüftung kompensiert werden konnte. Es können vier Bereiche unterschieden werden:

- An weniger als zehn Tagen ist keine Nachtlüftung erforderlich, um die dem Raum zugeführten Energiemengen am gleichen Tag wieder abzuführen (negativer Wärmeeintrag).
- An Tagen ohne wesentliche Temperaturveränderung wird mit der Nachtlüftung die Tagesenergiebilanz ausgeglichen.
- An Tagen, an denen die Raumlufttemperatur niedriger liegt als am Vortag ($\Delta\vartheta < 0$), wird mit der Nachtlüftung eine größere Wärmemenge aus dem Raum abgeführt als am Tag zugeführt wird.
- Steigt die Raumlufttemperatur hingegen an ($\Delta\vartheta > 0$), so wird mit der Nachtlüftung deutlich weniger Energie aus dem Raum abgeführt als am Tag zugeführt wird.

Es zeigt sich, dass die Wärmemengen, die mit der Nachtlüftung kompensiert werden können, sehr unterschiedlich sind³⁶. Dies ist zum einen auf die sehr unterschiedlichen Luftwechsel (offene bzw. geschlossene Fenster) in der Nacht zurückzuführen. Zum anderen wird die zu erreichende Leistung der Nachtlüftung von dem Temperaturunterschied zwischen der Außen- und der Raumluft bestimmt.

Um die unterschiedlichen Luftwechsel an verschiedenen Tagen vergleichen zu können, muss das unterschiedliche Potential für die Nachtlüftung (Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft) berücksichtigt werden.

In Abb. 8.14 ist daher die Änderung der Raumlufttemperatur im Verhältnis zum Quotienten aus eingebrachter Energiemenge und Potential der Nachtlüftung (hier: Differenz der Tagesminima von Außenlufttemperatur und Raumlufttemperatur) dargestellt.

³⁶ In der Bewertung sind die oben erwähnten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Energiemengen (Nutzerverhalten: Sonnenschutz, Fensteröffnung) und bei der Ermittlung der Raumtemperatur (6.3.3) zu bedenken.

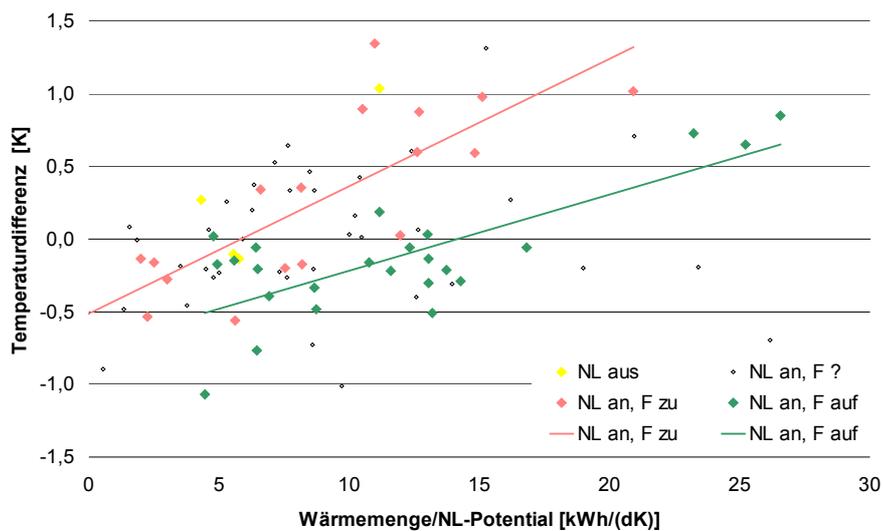


Abb. 8.14: Änderung der Raumlufttemperatur vom Vortag zum betrachteten Tag, aufgetragen über dem Verhältnis von Tagessumme der Wärmeeinträge und Differenz der Tagesminima von Außenluft- und Raumlufttemperatur.

Es zeigt sich, dass durch die Öffnung der Fenster in der Nacht die Energiemenge, die abgeführt werden kann, deutlich erhöht wird. An Tagen mit gleichen Bedingungen, gleichem Verhältnis von abzuführender Last (Wärmeeintrag) zum Nachtlüftungspotential, kann bei geöffnetem Fenster der Anstieg der Raumlufttemperatur vermieden oder verringert werden. An den meisten Tagen mit einem Temperaturanstieg waren die Fenster in der Nacht geschlossen, oder die Fensterstellung war nicht bekannt. Nur an den drei wärmsten Tagen kam es auch bei geöffneten Fenstern in der Nacht zu einem deutlichen Anstieg der Raumlufttemperatur ($\Delta\vartheta > 0,5$ K).

Anmerkung: Aus der Grafik lässt sich ableiten, in welchen Nächten, in denen die Fensterstellung nicht bekannt war, die Fenster wahrscheinlich offen und in welchen wahrscheinlich geschlossen waren.

8.5.2 Energieeffizienz der Nachtlüftung

Der Ventilator läuft in der Nacht in zwei verschiedenen Betriebspunkten (s. 5.2.3.2). Entsprechend ist die elektrische Antriebsleistung³⁷ unterschiedlich:

- 0,16 W pro m³/h Luftvolumenstrom: bei einem geförderten Volumenstrom von 1.336 m³/h (n = 0,88 1/h)
- 0,18 W pro m³/h Luftvolumenstrom: bei einem geförderten Volumenstrom von 1.064 m³/h (n = 0,70 1/h).

Die Effizienz der Nachtlüftung kann mit einer Leistungszahl ε (abgeführter Wärmestrom bezogen auf die elektrische Antriebsleistung) beschrieben werden.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{NL,mech}}{\dot{Q}_{el}} \quad (8.12)$$

In Abb. 8.15 ist der Zusammenhang zwischen der Leistungszahl³⁸ und der Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Außenluft dargestellt. Läuft der Ventilator in einem Betriebspunkt, so ist die Leistungszahl proportional zu der Temperaturdifferenz. Je größer die Temperaturdifferenz ist, desto größer sind die abgeführte Leistung und die Leistungszahl. Hier sind jedoch aufgrund der zwei Betriebspunkte und des Digitalisierungssprunges der Messwerterfassung des Stromverbrauches der Ventilatoren vier Proportionalitätsfaktoren vorhanden.

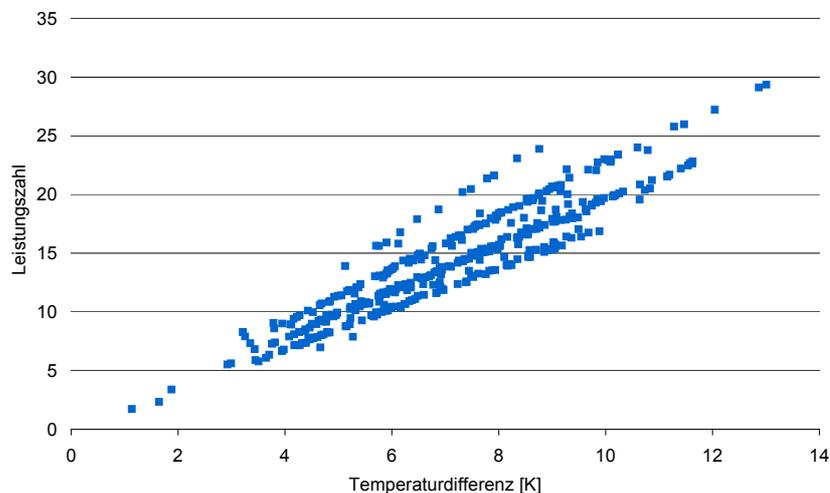


Abb. 8.15: Leistungszahl der Nachtlüftung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Raumluft und Außenluft.

³⁷ Diese Angabe bezieht sich auf die elektrische Gesamtleistung beider Ventilatoren und den gesamten geförderten Volumenstrom.

³⁸ Die Leistungszahl wird für den Referenzraum bestimmt. Dabei wird als elektrische Antriebsleistung der Anteil an der Gesamtleistung angesetzt, entsprechend dem Verhältnis des Volumenstroms des Referenzraumes zum Gesamtvolumenstrom beider Ventilatoren.

Die Leistungszahl ändert sich während der Nacht wegen der Änderung der Temperaturdifferenz. Mit dem COP³⁹ (hier: abgeführte Wärmemenge, bezogen auf die elektrische Arbeit) kann die Gesamteffizienz der Nachtlüftung einer Nacht wiedergegeben werden. In Abb. 8.16 sind die COP für 14 Nächte mit geschlossenen Fenstern in Abhängigkeit von dem Minimum der Außenlufttemperatur dargestellt. Je kälter die Außenluft in der Nacht ist, desto mehr Wärme kann abgeführt werden, d.h. desto effizienter ist die Nachtlüftung. Der COP liegt zwischen 24 (in sehr kalten Nächten) und 8 (in sehr warmen Nächten).

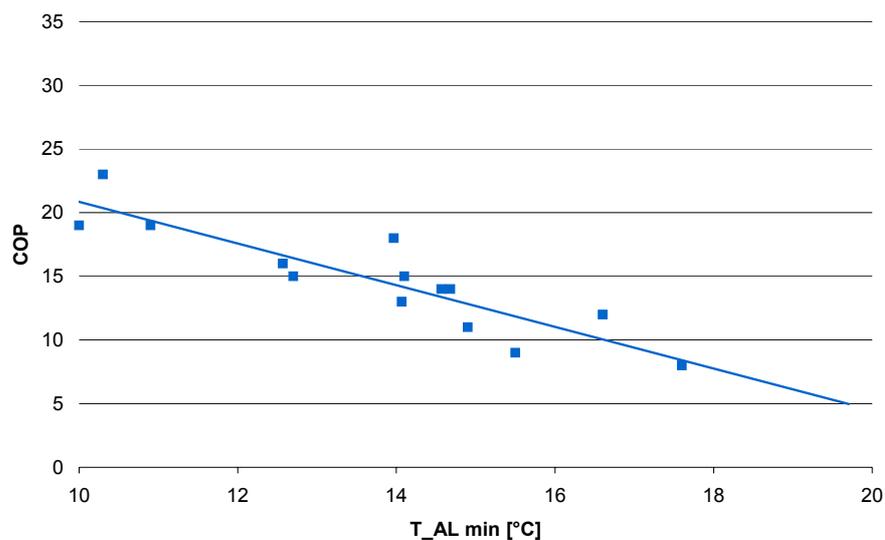


Abb. 8.16: COP der Nachtlüftung in Abhängigkeit von dem Tagesminimum der Außenlufttemperatur

Mangels Vergleichsgrößen aus anderen Projekten mit Nachtlüftung ist eine Bewertung des hier vorhandenen COP nicht möglich.

³⁹ Coefficient of performance

8.6 Eingespeicherte Wärmemenge und Speicherkapazität

Der Gesamtwärmestrom (Wärmedurchgang, Lüftungswärme, solare und interne Wärme) entspricht dem Speicherwärmestrom (s. (8-1)). Aus dem Verlauf des Gesamtwärmestromes lassen sich daher die am Tag ein- und ausgespeicherten Wärmemengen berechnen: Durch Integration des Speicherwärmestromes von Beginn bis Ende der Einspeicherung erhält man die während dieser Zeitspanne eingespeicherte Wärmemenge. Hier wird diese als Summe aller positiven Gesamtwärmeströme $\dot{Q}_{sp, ein}$ über einen Tag berechnet. (Analog lässt sich die ausgespeicherte Wärmemenge berechnen.)

$$Q_{ein,d} = \sum_{t=0}^{23} \dot{Q}_{sp, ein} \quad (8.13)$$

Die Berechnung der eingespeicherten Wärmemenge ist aufgrund der Annahme von Mittelwerten bei der Berechnung der einzelnen Wärmeströme, mit Ungenauigkeiten verbunden. Summiert man die eingespeicherten Wärmemengen aller Tage der Sommerperiode, so heben sich die Fehler, die an jedem Tag bei der Bestimmung der Wärmeströme gemacht werden, auf.

$$\sum_d Q_{ein,Rechnung,d} = \sum_d (Q_{ein,real,d} + Q_{ein,Fehler,d}) \quad (8.14)$$

$$\sum_d Q_{ein,Rechnung,d} = \sum_d Q_{ein,real,d} \equiv \sum_d Q_{ein,d} \quad (8.15)$$

Der Tagesgang des Gesamtwärmestromes, und dementsprechend der des Speicherwärmestromes, kann (s. Abb. 8.5) in guter Näherung durch eine cos-Funktion wiedergegeben werden. Somit ist es möglich unter Verwendung des Ansatzes (7-18) die bei Anregung mit einer 24 h Periode aktivierbare Gesamtspeicherkapazität der Raumschließungsflächen aus der Leistungsbilanz zu berechnen:

$$\sum_d Q_{ein,d} = \sum_d ((\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min})_d \Sigma(CA)) \quad (8.16)$$

$$\Sigma(CA) = \frac{\sum_d Q_{ein,d}}{\sum_d (\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min})_d} \quad (8.17)$$

Hiermit ergibt sich: $\Sigma(CA) = 97.660 \text{ kJ/K}$.

8.7 Parametermodell nach Keller

Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich alle auf [Keller]. In dem Buch wird das im folgenden verwendete Modell zur Berechnung der Raumtemperatur (Mittelwert und Amplitude) vorgestellt. Dieses Modell leitet sich aus der Lösung der Leistungsbilanz eines Raumes unter Berücksichtigung der instationären Prozesse ab. In der Darstellung des Modells wird die thermische Beschreibung des Raumes auf drei Parameter reduziert. Nach Angaben des Autor hat die Überprüfung des Modells mit gemessenen Daten an realen Gebäuden hat eine gute Übereinstimmung gegeben.

8.7.1 Ansatz

In die Leistungsbilanz eines Raumes, die Keller aufstellt, fließen nur die Parameter ein, die auch in die Energiebilanz (s. 8.2.1) einfließen:

$$K(\vartheta_i(t) - \vartheta_a(t)) = \Psi I(t) + \frac{dQ}{dt} + P_i \quad (8-18)$$

Alle Energieflüsse werden auf die Außenfläche bezogen und mit Parametern beschrieben:

- K : verallgemeinerter, auf die Außenfläche bezogener Verlustfaktor
Er fasst die Transmission durch alle Außenflächen und die Lüftung zusammen:

$$K = \frac{1}{\sum_n A_{a,n}} \left[\sum_n A_{a,n} U + n V_R \frac{(c\rho)_{Luft}}{3.600} \right] \text{ mit: } n [1/h] \quad (8-19)$$

- Ψ : auf die Außenfläche bezogene Apertur
Sie fasst die mit dem g-Wert gewichteten transparenten Flächen zusammen:

$$\Psi = \frac{1}{\sum_n A_{a,n}} \left[\sum_k A_{tr,k} g_k \right] \quad (8-20)$$

- γ : Gewinn-zu-Verlustverhältnis

$$\gamma = \frac{\Psi}{K} \quad (8-21)$$

- Q : Wärmemenge, die mit der Speichermasse ausgetauscht wird, bezogen auf die Außenfläche,
- P_i : innere Wärmegewinne, bezogen auf die Außenfläche.

Durch Umformung der Leistungsgleichung nach der Raumtemperatur erhält man:

$$\vartheta_i(t) = \vartheta_a(t) + \gamma I(t) + \frac{1}{K} \frac{dQ}{dt} + \frac{P_i}{K} \quad (8-22)$$

Unter folgenden Bedingungen kann die Gleichung analytisch gelöst werden:

- Der zeitliche Verlauf der Außenlufttemperatur, der Einstrahlung und der inneren Lasten werden durch Fourier-Reihen dargestellt. (s. 5.1.1)
- Es wird nur eine Speicherfläche betrachtet.

Die korrekte Lösungsgleichung beruht auf Reihenentwicklungen, ist wenig transparent und aufwändig in der Anwendung. Für die Bedingungen gewöhnlicher Bauten lassen sich einige Vereinfachungen durchführen. Dies sind u.a.:

- Vernachlässigung der Phasenverschiebung zwischen Außenlufttemperatur und Sonneneinstrahlung
- Vernachlässigung der hochfrequenten Anteile der Sonneneinstrahlung und der inneren Lasten, da diese stark gedämpft werden.

Damit erhält man für die Raumtemperatur im Rahmen der Näherung:

$$\vartheta_i(t) = \bar{\vartheta}_i + \Delta \vartheta_i \sin(\omega t) \quad (8-23)$$

$$\text{mit: } \bar{\vartheta}_i = \bar{\vartheta}_a + \gamma \bar{I} + \frac{\bar{P}}{K} \quad (8-24)$$

$$\Delta \vartheta_i = \frac{T}{2\pi\tau} \left(\Delta \vartheta_a + \gamma \Delta I + \frac{\Delta P}{K} \right) \quad (8-25)$$

Der Verlauf der Raumtemperatur entspricht demnach in erster Näherung einer harmonischen Funktion. Der Mittelwert und die Amplitude werden weitgehend durch das Gewinn-Verlustverhältnis γ bestimmt. Die Zeitkonstante des Raumes τ wirkt dämpfend auf die Schwingung der Eingangsgrößen.

Die Zeitkonstante des Raumes τ wird bestimmt von der nutzbaren Speicherkapazität im Raum und der Anbindung an die Außenluft:

$$\tau = \frac{1}{K} \frac{A_c C}{\sum_n A_{a,n}} \left(\frac{4}{\beta_{AL} \pi^2} + 1 \right) \quad (8-26)$$

Die Gleichung lässt sich folgendermaßen verstehen:

- $\frac{1}{K}$: Kehrwert des Verlustfaktors

Eine Erhöhung des Verlustfaktors, verursacht durch eine Erhöhung des Luftwechsels, bewirkt eine Verstärkung der Auswirkungen der Schwankungen der Außenlufttemperatur auf die Schwankung der Raumtemperatur. Dies entspricht einer Reduzierung der Zeitkonstante des Raumes.

- $\frac{A_c C}{\sum_n A_{a,n}}$: Die auf die Außenfläche bezogene Speicherkapazität der Speicherschicht

Eine größere Speicherkapazität im Raum erhöht die Dämpfung der Raumtemperatur. Nach Keller wird hier die Speicherkapazität als statische Speicherkapazität der Schicht angesetzt. Dies erscheint im Hinblick auf die begrenzt nutzbare Schichtdicke bei einer dynamischen Anregung problematisch (vergleiche 7.3 Einführung von dynamischen Kenngrößen).

- $\left(\frac{4}{\beta_{AL} \pi^2} + 1 \right)$: Faktor, der die Randbedingungen berücksichtigt, die bestimmen, bis zu welchem Maß die Speicherkapazität ausgenützt werden.

Der Kopplungsfaktor β , als Quotient von Entladewiderstand und Schichtwiderstand, beschreibt hier die Kopplung der Speicherschicht an die Außenluft. Der Entladewiderstand wird durch den Wärmewiderstand der Außenhülle und den Luftwechsel bestimmt. In guter Näherung entspricht der Entladewiderstand dem Kehrwert des auf die Fläche der Speicherschicht zu beziehenden Verlustfaktors K :

$$\beta_{AL} = \frac{1}{R_c} \frac{A_c}{A_a K} \quad (8-27)$$

In den Schichtwiderstand R_c fließt die Schichtdicke d ein, deren Einfluß auf die thermische Kopplung jedoch fragwürdig ist. Insbesondere, da bei dicken Speicherschichten u.U. der Speicherwärmestrom nicht bis zur Rückseite der Schicht eindringt (s. 7.3).

Ist einer Speicherschicht ein zusätzlicher Widerstand R_v vorgeschaltet, z.B. im Fall einer abgehängten Decke, wird dies in dem Kopplungsfaktor β_{AL} folgendermaßen berücksichtigt:

$$\beta_{AL} = \frac{1}{(R_v + R_c)} \frac{A_c}{A_a K} \quad (8-28)$$

Der Wert des Kopplungsfaktors wird damit kleiner und bewirkt eine Reduzierung der Zeitkonstante.

Der Ansatz lässt sich unter bestimmten Randbedingungen auch auf Räume mit mehreren Speicherschichten anwenden, wenn die folgenden Überlegungen zutreffen. Die Entladung verschiedener Speicherschichten erfolgt zunächst über parallele Widerstände bis zur Innenseite der Außenwand und von dort gemeinsam durch den Widerstand der Wand. In den meisten Fällen sind die Widerstände bis zur Außenwand klein im Verhältnis zum gemeinsamen Entladewiderstand der Wand. Besteht zudem durch IR-Strahlung eine intensive Querkopplung zwischen den Oberflächen, so kann der Raum als eine Parallelschaltung von Speicherkapazitäten mit einem gemeinsamen Entladewiderstand verstanden werden.

Die Zeitkonstante ergibt sich damit zu:

$$\tau = \frac{1}{K} \frac{\sum_m A_{c,m} C_m}{\sum_n A_{a,n}} \left(\frac{4}{\beta_{AL} \pi^2} + 1 \right) \quad (8-29)$$

Kritisch hierbei erscheint die Zusammenfassung von Speicherkapazitäten mit sehr unterschiedlichen Schichtwiderständen bzw. von Speicherschichten mit und ohne Vorwiderstand, da deren Kopplung an die Außenluft mit nur einem gemeinsamen Kopplungsfaktor berücksichtigt wird.

Der Betrachtungszeitraum

Der Berechnungsansatz hat nur Gültigkeit, wenn man einen längeren Zeitraum betrachtet. Es empfiehlt sich, den Zeitraum deutlich größer als die zwei bis dreifache Zeitkonstante des Raumes zu wählen. Wenn man das Modell anhand von Messdaten eines bestehenden Gebäudes überprüft, so dürfen keine Zeitspannen mit tendenziell steigender bzw. fallender Außenlufttemperatur, sowie keine Zeitspannen mit extrem unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen betrachtet werden. Zur Planung für das Gebäudeverhalten, sind als Außenlufttemperaturen und Sonneneinstrahlung die extremen Mittelwerte, welche über einen Zeitraum von zwei bis drei Zeitkonstanten auftreten, anzusetzen.

8.7.2 Bestimmung der Parameter

Es werden die mittlere Raumtemperatur und die mittlere Amplitude der Raumtemperatur während der drei Sommermonate anhand dieses Modells berechnet und anschließend mit den Messwerten verglichen. Die Gebäudeparameter und die meteorologischen Daten werden entsprechend der in der Energiebilanz getroffenen Annahmen bestimmt und in Tabelle 8.4 zusammengestellt.

Die Außenfläche

Die Außenfläche bezeichnet alle an die Umgebung grenzenden Flächen (Dach, Außenwände und Außenfenster).

Der Verlustfaktor K

Der Verlustfaktor geht sowohl in die Berechnung des Mittelwertes und als auch in die Berechnung der Amplitude ein. Wie die Überlegungen in 8.2.2.3 zeigen, ist die Dämpfung der Außenlufttemperaturschwankung durch die Außenwand jedoch viel größer, als es durch den U-Wert wiedergegeben wird. Daher wird das Parametermodell an dieser Stelle erweitert und es werden für die Berechnung des Temperaturmittelwertes und der Temperaturamplitude zwei Verlustfaktoren unterschieden:

K_1 : Verlustfaktor zur Berechnung des Temperaturmittelwertes
Er berücksichtigt alle Außenflächen als Verlustflächen.

K_2 : Verlustfaktor zur Berechnung der Temperaturamplitude
Er berücksichtigt nur die Fensterflächen als Verlustflächen.

Aus den in der Energiebilanz getroffenen Annahmen geht hervor, dass sehr unterschiedliche Luftwechsel während der Zeitspanne auftreten. Diese müssen hier zu einem mittleren, thermisch äquivalenten Luftwechsel zusammengefasst werden. Dieser lässt sich aus den Stundenwerten folgendermaßen berechnen:

$$\bar{n}_{\text{äqu}} = \frac{\sum_{t=0}^{24z} n_t (\vartheta_{AL} - \vartheta_{RL})_t}{\sum_{t=0}^{24z} (\vartheta_{AL} - \vartheta_{RL})_t} \quad (8-30)$$

mit z: Anzahl der Tage in dem Bewertungszeitraum.

Die Apertur ψ

Hiermit wird der Strahlungseintrag durch alle Außenflächen berücksichtigt.

Der Strahlungseintrag durch die opaken Flächen wird mit äquivalenten g-Werten, einem für Wände und einem für das Dach, berücksichtigt:

$$g_W = a_W \frac{U_W}{\alpha_a}, \quad g_D = a_D \frac{U_D}{\alpha_a} \quad (8-31)$$

Die g_{kor} -Werte der Fenster werden nach Himmelsrichtung und Art des Sonnenschutzes unterschieden (mit bzw. ohne Sonnenschutz), um die in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung unterschiedlichen Nutzungszeiten des Sonnenschutzes zu berücksichtigen.

Entsprechend den Überlegungen zum Verlustfaktor K werden auch hier zwei Aperturen unterschieden:

ψ_1 : Apertur zur Berechnung des Temperaturmittelwertes
Sie berücksichtigt als Gewinnflächen alle Außenflächen.

ψ_2 : Apertur zur Berechnung der Temperaturamplitude
Sie berücksichtigt als Gewinnflächen nur die Fensterflächen.

Innere Wärmegewinne P_i

Der mittlere Tagesverlauf der inneren Wärmegewinne wird hier durch eine Sinus-Funktion mit einer 24 h-Periode um den Tagesmittelwert wiedergegeben (s. Abb. 8.17). Der Mittelwert ergibt sich als arithmetischer Mittelwert aller 1-Stundenmittelwerte des Bewertungszeitraumes. Als Amplitude wird die Differenz zwischen dem Mittelwert und dem Maximalwert des mittleren Tagesverlaufes (außerhalb der Lastspitze am Morgen) angesetzt.

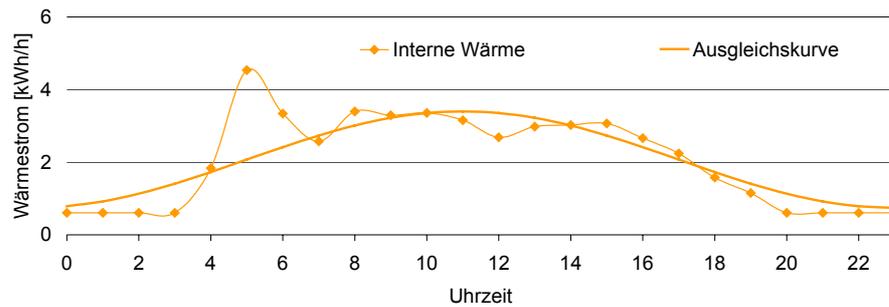


Abb. 8.17: Mittlerer Tagesgang der internen Wärme während der Sommerperiode (01.06.02 bis 31.08.02) und die Ausgleichskurve

Außenlufttemperatur ϑ_a

Aus dem mittleren Tagesgang der Temperatur (s. Abb. 8.1) werden Mittelwert und Amplitude bestimmt.

Sonneneinstrahlung I

Da die Außenflächen sich zu vier Richtungen orientieren (horizontale Fläche, vertikale Flächen nach Nord, Ost, West), das Modell aber nur eine Einstrahlung berücksichtigen kann, wird ein mittlerer Tagesgang für die Einstrahlung eingeführt. Die Einstrahlungen sind dabei entsprechend ihrer Wirksamkeit zu wichten:

$$I_{\ddot{a}q} = \frac{\sum_{m=1}^3 (g_{korr,breit,m} A_{F,breit,m} + g_{korr,schmal,m} A_{F,schmal,m} + g_{W,m} A_{W,m}) I_m + g_D A_D I_{hor}}{\sum_{m=1}^3 (g_{korr,breit,m} A_{F,breit,m} + g_{korr,schmal,m} A_{F,schmal,m} + g_{W,m} A_{W,m}) + g_D A_D} \quad (8-32)$$

mit: 1, 2, 3 als West, Süd, Ost

In Abb. 8.2 sind die mittleren Tagesverläufe der realen Sonneneinstrahlungen und der thermisch äquivalenten Sonneneinstrahlung dargestellt. Der Tagesgang der thermisch äquivalenten Sonneneinstrahlung ist dem realer Sonneneinstrahlungen sehr ähnlich. Daher wird bei der Ermittlung der Amplitude ΔI (die Amplitude der ersten Grundschwingung) auf die Fourierkomponente (s. Tabelle 4.1) zurückgegriffen, die den allgemeinen Tagesgang der Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer wiedergibt:

- Aus dem Tagesgang der thermisch äquivalenten Sonneneinstrahlung werden Mittelwert und Maximum bestimmt. Das Verhältnis aus Mittelwert und Maximum entspricht der Fourierkomponente $a_0/2$.
- Anhand der Angaben in Tabelle 4.1 wird die Sonnenscheindauer bestimmt, bei der sich für den idealen Sonnengang eben dieser Wert von $a_0/2$ ergibt.
- Anschließend wird die erste Fourierkomponente a_1 für die ermittelte Sonnenscheindauer aus der Tabelle ermittelt, mit der sich die Amplitude berechnen lässt.

Der modifizierte Ansatz

Nach der Modifizierung der Ansätze (8-24) und (8-25) ergibt sich die Berechnung der Raumtemperatur zu:

$$\bar{\vartheta}_i = \bar{\vartheta}_a + \gamma_1 \bar{I} + \frac{\bar{P}}{K} \quad (8-33)$$

$$\Delta \vartheta_i = \frac{T}{2\pi\tau} \left(\Delta \vartheta_a + \gamma_2 \Delta I + \frac{\Delta P}{K_2} \right) \quad (8-34)$$

$$\text{mit: } \gamma_1 = \frac{\Psi_1}{K_1} \quad (8-35)$$

$$\gamma_2 = \frac{\Psi_2}{K_2} \quad (8-36)$$

$$\tau = \frac{1}{K_2} \frac{\sum_m A_{c,m} C_m}{\sum_n A_{a,n}} \left(\frac{4}{\beta_{AL} \pi^2} + 1 \right) \quad (8-37)$$

In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Gebäudeparameter und Eingangsgrößen zusammengestellt.

Tabelle 8.4: Parameter nach Keller zur Bestimmung der mittleren Raumtemperatur während der Sommerperiode

Gebäudeparameter		
Luftwechsel	n	1,68 1/h
Verlustfaktor	K ₁	1,472 W/(m ² K)
	K ₂	1,337 W/(m ² K)
Apertur	ψ ₁	0,033
	ψ ₂	0,026
Gewinn-zu-Verlustverhältnis	γ ₁	0,023 m ² K/W
	γ ₂	0,020 m ² K/W
Eingangsgröße: Meteorologie		
Außenlufttemperatur	$\bar{\vartheta}_a$	18,7 °C
	$\Delta\vartheta_a$	5,1 K
Sonneneinstrahlung	\bar{I}	118 W/m ²
	ΔI_a	182 W/m ²
Eingangsgröße: Nutzung		
Innere Wärmegewinne	\bar{P} ⁴⁰	2,95 W/m ²
	ΔP ⁴¹	1,89 W/m ²

⁴⁰ $\bar{P} = (2.071 \text{ W}) / (701 \text{ m}^2)$

⁴¹ $\Delta P = (1.328 \text{ W}) / (701 \text{ m}^2)$

8.7.3 Auswertung: Raumtemperatur während der Sommerperiode

Mittelwert der Raumtemperatur

Die Berechnung der mittleren Raumtemperatur nach (8-24) aus den oben bestimmten Parametern ergibt: $\bar{\vartheta}_i = 23,4 \text{ °C}$. Dies entspricht genau dem gemessenen Wert (s. 8.3.1). Diese Übereinstimmung ergibt sich als logische Konsequenz der im folgenden erläuterten Zusammenhängen.

Wie die Umstellung der Gleichung (8-24) verdeutlicht, entspricht sie einer Leistungsbilanz, die ohne Berücksichtigung eines Speicherterms ausgeglichen ist. Die Berechnung liefert als mittlere Raumtemperatur somit die Temperatur, bei der diese Leistungsbilanz für die angenommenen Parameter (welche die Energieströme wiedergeben) ausgeglichen ist.

Bei der Bestimmung der Parameter wurden die gleichen Annahmen wie in der in 8.2 aufgestellten Energiebilanz verwendet werden. Beide Ansätze lassen sich somit ineinander überführen, wenn aus der Energiebilanz die mittlere Leistungsbilanz abgeleitet wird.

$$\bar{\dot{Q}}_{SF} + \bar{\dot{Q}}_{SW} + \bar{\dot{Q}}_{TF} + \bar{\dot{Q}}_{TW} + \bar{\dot{Q}}_{TL} + \bar{\dot{Q}}_{NL} + \bar{\dot{Q}}_i = K(\bar{\vartheta}_a - \bar{\vartheta}_i) + \Psi \bar{I} + \bar{P} \quad (8-38)$$

Infolge der Tatsache, dass die Energiebilanz aus 8.2 ausgeglichen ist (aufgrund des angepassten Luftwechsels), ergibt die Berechnung der mittleren Raumtemperatur den gemessenen Wert.

Amplitude der Raumtemperatur

Die Berechnung der Zeitkonstante des Raumes τ nach Gleichung 9-31 ergibt unter Verwendung der statischen Speicherkapazität einen sehr großen Wert und somit einen unverhältnismäßig kleinen Wert für die Amplitude der Raumtemperatur.

Dies zeigt, dass sich die wirksame Zeitkonstante dieses Raumes nicht unter Verwendung des Parametermodells aus den Stoffdaten der Baukonstruktion ermitteln lässt.

8.7.4 Zeitkonstante und Speicherkapazität des Raumes

Die Zeitkonstante des Raumes, die die hier vorhandene Dämpfung der Schwingung der Einflussgrößen bewirkt, lässt sich aus den Einflussgrößen und der gemessenen Raumtemperatur bestimmen. Unter Verwendung von (8-25) erhält man:

$$\tau = \frac{T}{2\pi\Delta\vartheta_i} \left(\Delta\vartheta_a + \gamma_2\Delta I + \frac{\Delta P}{K_2} \right) \quad (8-39)$$

Mit den für die Betrachtung der kompletten Sommerperiode gültigen Parametern und Eingangsgrößen (s. Tabelle 8.4) und der gemessenen Amplitude der Raumtemperatur ($\Delta\vartheta_i = 1,3 \text{ K}$) ergibt sich:

Zeitkonstante des Raumes: $\tau = 28 \text{ h}$.

Aus der Zeitkonstante kann die wirksame Speicherkapazität abgeleitet werden.

In Anlehnung an 9-36 erhält man:

$$\tau = \frac{1}{K_2} \frac{(AC)_{Raum}}{\sum_n A_{a,n}} \quad (8-40)$$

$$(AC)_{Raum} = \tau K_2 \sum_n A_{a,n} \quad (8-41)$$

Die wirksame Speicherkapazität ergibt sich damit zu: $(AC)_{Raum} = 96.700 \text{ kJ/K}$.

8.8 Speicherfähigkeit des Raumes

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Speicherkapazität zum einen aus den Stoffwerten der Baukonstruktion und zum anderen aus der vorhandenen messtechnisch erfassten Energiebilanz gegenübergestellt.

Betrachtungsebene: Schicht

In 7.5 wurde mit einer aus dem Ansatz der instationären Wärmeleitung hergeleiteten Gleichung die effektive Gesamtspeicherkapazität aus den Stoffdaten der Umschließungsflächen berechnet ($\Sigma (C_{\text{eff}}A) = 65.794 \text{ kJ/K}$). Die aus den Energieströmen abgeleitete Gesamtspeicherkapazität ($\Sigma (CA) = 97.660 \text{ kJ/K}$) ist knapp 50% größer als die aus den Stoffgrößen ermittelte. Mögliche Ursachen der Abweichungen können in folgenden Sachverhalten liegen:

- Die eingespeicherte (und entsprechend die ausgespeicherten) Wärmemengen wurden durch falsche Annahmen in der Energiebilanz überbewertet. Dies wäre z.B. der Fall, wenn die Strahlungseinträge, z.B. aufgrund längerer Nutzungszeit des Sonnenschutzes, in der Realität geringer ausfallen als in der Berechnung angenommen wurde. Entsprechend wäre der Luftwechsel somit zu groß angesetzt.
- Die in der Berechnung angesetzten Werte für die Stoffwerte der Bauteile, für die Wärmeübergänge an der Speicheroberfläche und die Annahmen zur Wirkung der Vorschicht weichen von den realen Bedingungen ab.
- Der Ansatz zur Ermittlung von C_{eff} (7-21) berücksichtigt nur das Verhalten der Speicherschicht infolge der Temperaturänderungen der Raumlufte (konvektive Ankopplung) und der Bauteiloberflächen (IR-Strahlungsankopplung). Nicht jedoch das Wärmespeichervermögen bei direktem solaren Strahlungseinfall. Der durch den direkten Strahlungseinfall bewirkte Anstieg der Oberflächentemperatur bewirkt zwar auch einen Anstieg der Raumlufte, der jedoch durch den Wärmeübergang an der Oberfläche gedämpft ist. Der Strahlungseinfall bewirkt demnach einen Speicherstrom, der größer ist, als es sich entsprechen der resultierenden Raumlufte-temperaturerhöhung berechnen lässt.

Betrachtungsebene: Raum

Hier konnte aus den Stoffdaten nicht die Zeitkonstante des Raumes bzw. die Speicherkapazität bestimmt werden.

Aus den Messwerten der Temperaturschwankung wurde mit dem Ansatz von Keller eine Speicherkapazität des Raumes von $(AC)_{\text{Raum}} = 96.700 \text{ kJ/K}$ ermittelt. Dies entspricht ungefähr dem Wert, der sich aus der Energiebilanz herleiten ließ.

Resümee

Der Vergleich der Ergebnisse des thermodynamischen Ansatzes mit dem durch die Messwerte wiedergegebenen thermischen Verhalten des Raumes zeigt, dass sich die für das thermische Verhalten entscheidenden, in einer Tagesperiode aktivierbaren Speicherkapazitäten mit den Gleichungen (7-14) und (7-21) aus den Stoffwerten der Bauteile grob abschätzen lassen.

9 Zusammenfassung

Die Auswertung der Messkampagne der Sommerperiode zeigt, dass die Raumlufttemperatur nur an weniger als 10% der Betriebszeit höher als 26°C liegt. Daraus lässt sich schließen, dass ausreichende Speicherkapazitäten im Raum (Fußboden, Decke und Außenwände) aktiviert werden können. Es zeigt sich, dass die mechanische Lüftung ($n \approx 0,8$ 1/h) allein nicht ausreicht, die Speicher in der Nacht zu entladen. In Kombination mit geöffneten Fenstern wurde ein ausreichender nächtlicher Luftwechsel erreicht

Mit den Kurzzeitmessungen konnten Aussagen über die unterschiedlichen, sich tags und nachts ausbildenden Durchmischungen der Raumluft abgeleitet werden. Während sich am Tage eine schlechte Kopplung zwischen den außenwandnahen und –fernen Luftmassen zeigt, breitet sich in der Nacht ein Kaltluftsee über die gesamte Raumfläche aus. Dies hat zur Folge, dass sich unterschiedliche Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von der Höhe und der Raumtiefe einstellen.

Es wurde eine Gegenüberstellung eines thermodynamischen Ansatzes zur Berechnung der Speicherkapazität des Raumes aus den Stoffwerten der Baukonstruktion mit den sich aus den Messdaten der Temperatur und der die Energieströme bestimmenden Betriebsbedingungen vorgenommen. Es zeigt sich, dass mit diesem thermodynamischen Ansatz, der die dynamischen Speichervorgänge in der Schicht und den konvektiven Wärmeübergang an den Schichtoberfläche berücksichtigt, eine einfach anzuwendende Möglichkeit der groben Abschätzung der wirksamen Speicherkapazität des Raumes gegeben ist.

Das vorgestellte Modell von Keller beschreibt das thermische Verhalten eines Raumes an Hand von drei charakteristischen Gebäudeparametern. Bei der Anwendung des Modells auf dieses Gebäude zeigt sich, dass sich eine verlässliche Aussage über die mittlere Temperatur der Raumluft über eine längere Periode treffen lässt. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist abhängig von der Genauigkeit, mit der die Gebäude beschreibenden Parameter bestimmt werden können. Die kritische Größe hierbei ist die Abschätzung des thermisch wirksamen Luftwechsels. Mit diesem Modell konnte hier nicht die Speicherkapazität bei dieser Raumsituation richtig wiedergegeben werden, sie wurde überschätzt. Folglich würde die Dämpfung der Raumlufttemperatur zu hoch bewertet, d.h. die Berechnung ergibt eine zu geringe Amplitude der Raumlufttemperatur.

Anhang A

A.1 Literaturverzeichnis

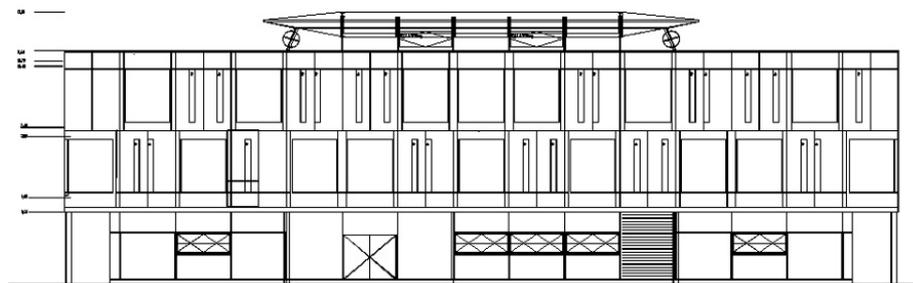
- [ASR 6/1,3] Arbeitsstättenrichtlinie ASR 6/1,3. Raumtemperatur, April 2001
- [Clima Suisse] Clima Suisse, Verband schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen (Hrsg.): Lüftung von großen Räumen: Handbuch für Planer. 1998
- [DIN 1946] DIN 1946 Teil 2 Januar 1994. VDI-Lüftungsregeln: Gesundheitstechnische Anforderungen
- [DIN 4710] DIN 4710 Februar 1982. Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauches von heiz- und Raumluftechnischen Anlagen
- [E.V.A.] Energieverwertungsagentur (E.V.A.): Beschaffung energieeffizienter Bürogeräte.
- [Feist] Feist, Wolfgang: Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. Heidelberg : Verlag C.F. Müller, 1994
- [Fischer] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Klopfer, Heinz; u.a.: Lehrbuch der Bauphysik. 4., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1997
- [Flourentzou] Flourentzou, F.; Van der Maas, J.; Roulet, C.-A.: Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. In: Energy and Buildings 27, (1998)
- [Glückert] Glückert, Udo: Erfassung und Messung von Wärmestrahlung: Eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie. München : Franzis-Verlag GmbH & Co. KG, 1992
- [Hausladen] Hausladen, Gerhard: Wohnungslüftung – Untersuchung der verschiedenen Lüftungsarten bzw. Lüftungspraktiken unter hygienischen, bauphysikalischen und energetischen Gesichtspunkten / VDI (Hrsg.). Düsseldorf : VDI-Verlag, 1980
- [Heidt] Heidt, Frank-Dietrich; Kalender, Volker: Quantitative Thermographie. In Gesundheitsingenieur 119, (1998), Heft 5
- [Heinz] Heinz, Ehrenfried: Kontrollierte Wohnungslüftung. Berlin : Verlag Bauwesen, 2000 (Bibliothek Gebäudetechnik – HLS-Technik)

-
- [IEA] Internationale Energie Agentur (IEA) (Hrsg.): Luftaustausch in Gebäuden: Handbuch für die praktische Anwendung von Berechnungsmethoden. 1989
- [Ihle] Ihle, Claus: Lüftung und Luftheizung. 6., Neubearb. Aufl. Düsseldorf : Werner Verlag, 1997 (Der Heizungsingenieur ; Bd. 3)
- [Keller] Keller, Bruno: Klimagerechtes Bauen: Grundlagen – Dimensionierung – Beispiele. Stuttgart : Teubner, 1997
- [Kolmetz] Kolmetz, S.; Rouvel, L.: Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen. In: Gesundheitsingenieur 118, (1997), Heft 2
- [Moser] Moser, Alfred ; Dorer, Viktor: Grundlagen der Raumluftströmung / Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) und Verband Schweizer Heizungs- und Lüftungsfirmer (VSHL) (Hrsg.). Zürich, 1994 (Forschungsprogramm Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden: Dokumentationsreihe für die Praxis)
- [Panzhauser] Panzhauser, Erich: Die Luftwechselzahlen in österreichischen Wohnungen. ERLT, Gesellschaft mbH Ingenieurbüro für Fenstertechnik (Hrsg.)
- [Petzold] Petzold, Karl: Zum Energiegewinn aus der Sonnenstrahlung Teil I. In: Gesundheitsingenieur 120, (1999), Heft 3
- [prEN ISO 15927-1] prEN ISO 15927-1 August 1999. Klimadaten – Teil 1: Monatswerte einzelner meteorologischer Elemente
- [Raatschen] Raatschen, Willigert: Was ist Lüftungseffektivität? In: Ki Klima-Kälte-Heizung, (1988), Heft 5
- [Recknagel] Recknagel, Hermann; Schramek, Ernst-Rudolf ; Sprenger, Eberhard ; u.a.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 69. Aufl. München : Oldenburg, 1999
- [VDI 2067] VDI 2067 Blatt 2 Dezember 1993. Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen: Raumheizung
- [VDI 2078] VDI 2078 Blatt 2 Juli 1996. Kühllastregeln
- [Zürcher] Zürcher, Christoph; Frank, Thomas: Bauphysik: Leitfaden für Planung und Praxis. Stuttgart : Teubner, 1998

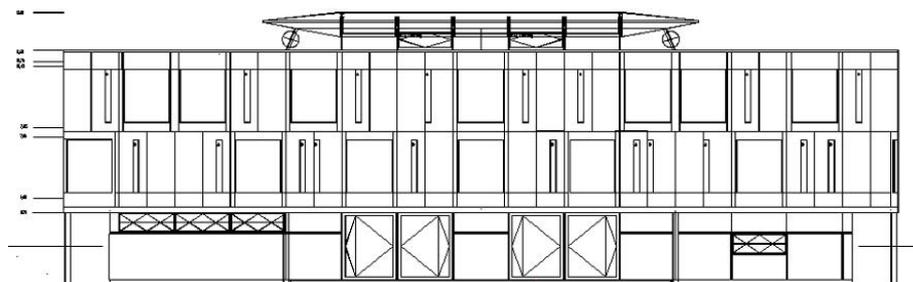
Anhang B

B.1 Ansichten

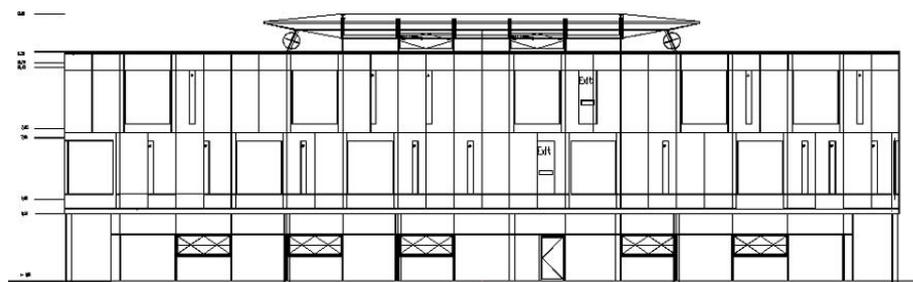
Ansicht Nord



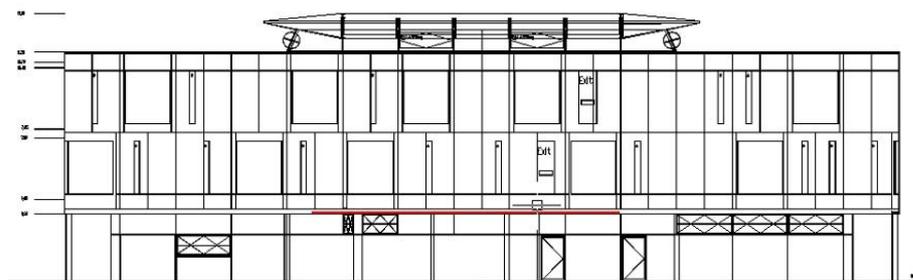
Ansicht Süd



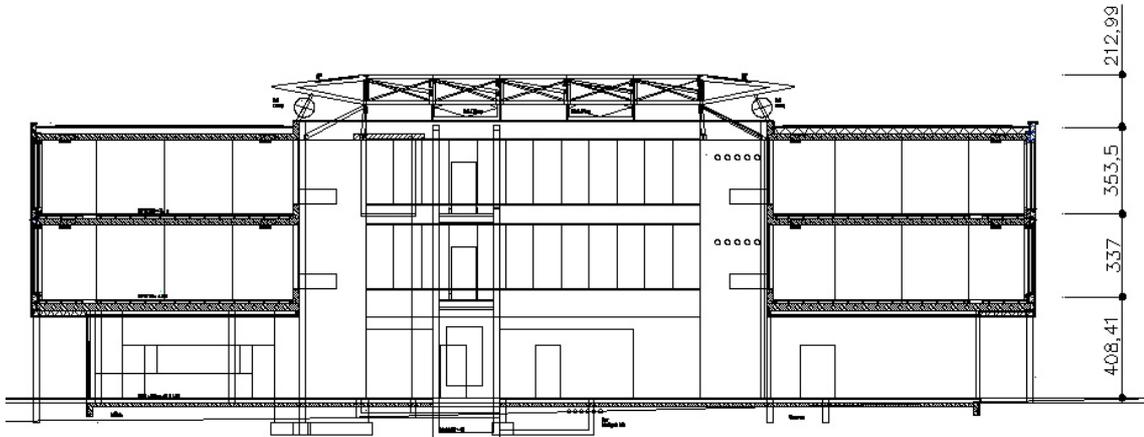
Ansicht Ost

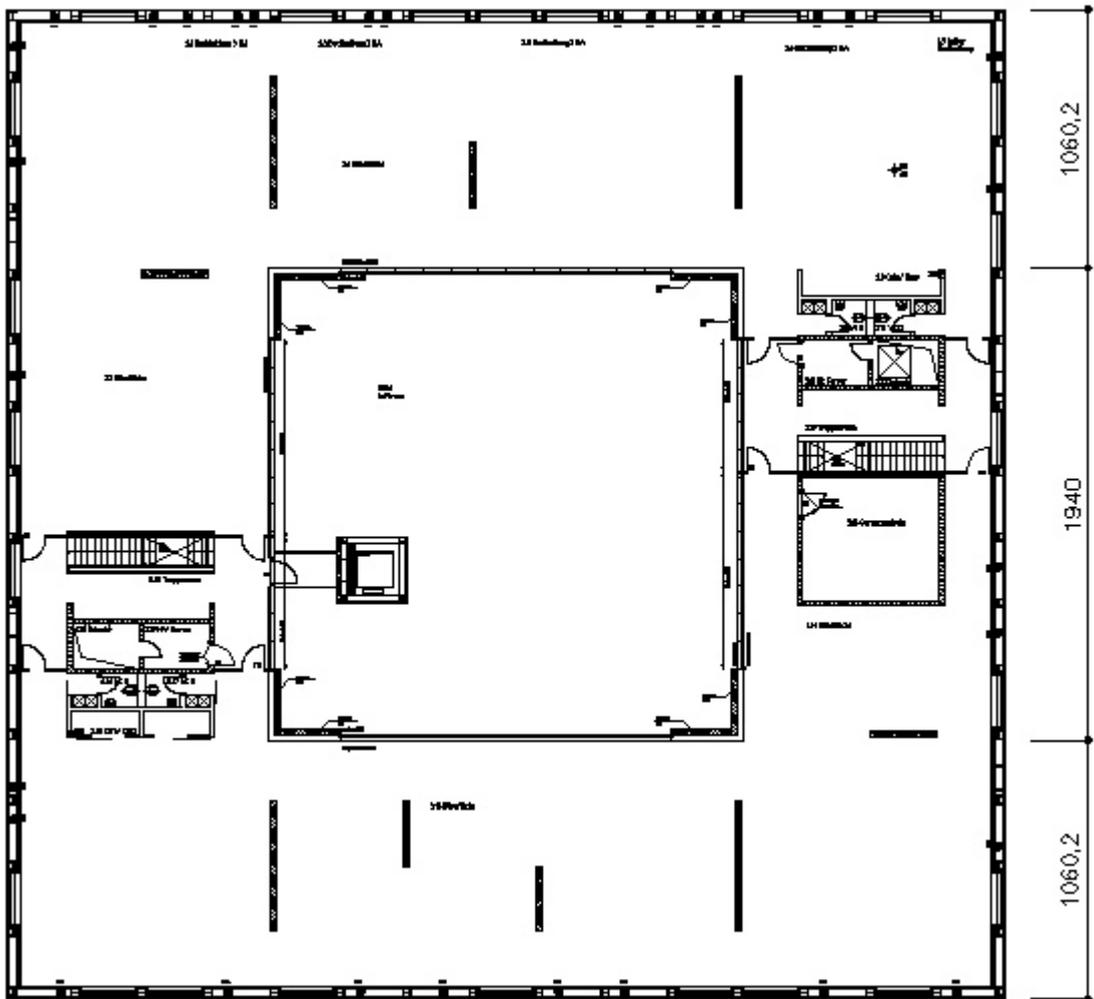


Ansicht West



B.2 Grundriss 2.OG und Schnitt Nord-Süd





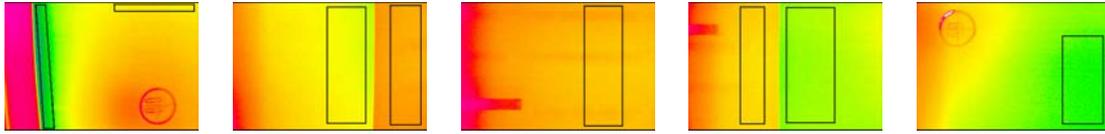
B.3 Bauteile

	d	λ	R
	[m]	[W/(mK)]	[m ² K/W]
Außenwand			
Beton	0,10	2,10	0,05
Holz	0,10	0,14	0,71
Dämmung	0,30	0,04	7,50
Verkleidung	0,06	0,14	0,43
Luftschicht	0,08		
Außenschale			
U-Wert			0,11

	d	λ	R
	[m]	[W/(mK)]	[m ² K/W]
Fußboden			
Estrich	0,05	1,40	0,04
Hohlraum	0,10		0,16
Beton	0,20	2,10	0,10
U-Wert			2,38

	d	λ	R
	[m]	[W/(mK)]	[m ² K/W]
Flachdach			
Beton	0,20	2,10	0,10
Dämmung	0,24	0,04	6,00
Kiesschüttung			
U-Wert			0,16

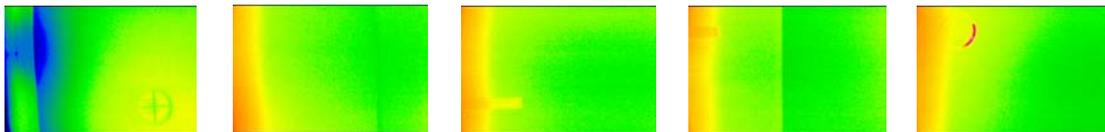
B.4 Thermographieaufnahmen „Deckenprofil“



20:45 Uhr



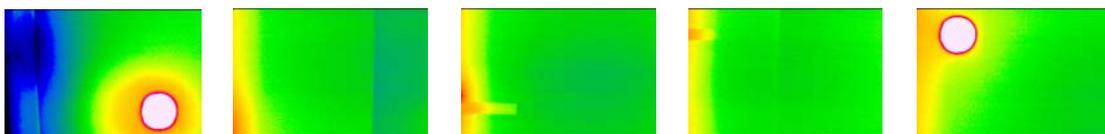
22:45 Uhr



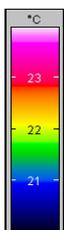
23:45 Uhr



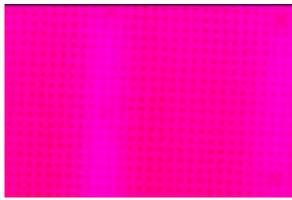
02:45 Uhr



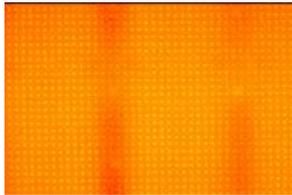
04:45 Uhr



B.5 Thermographieaufnahmen „Abhängung“



19:00 Uhr



21:00 Uhr



23:00 Uhr



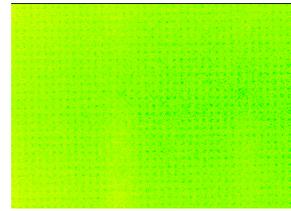
1:00 Uhr



3:00 Uhr



5:00 Uhr



7:00 Uhr



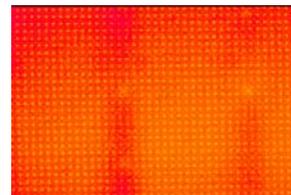
9:00 Uhr



11:00 Uhr



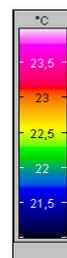
13:00 Uhr



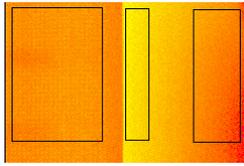
15:00 Uhr



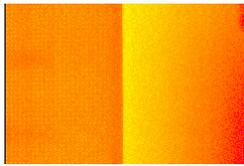
17:00 Uhr



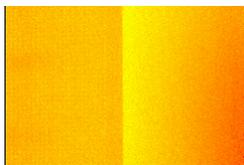
B.6 Thermographieaufnahmen „Kante“



19:00 Uhr



21:00 Uhr



23:00 Uhr



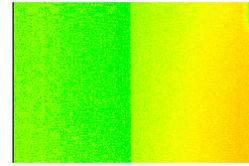
1:00 Uhr



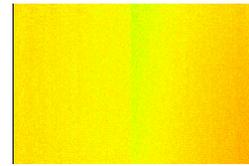
3:00 Uhr



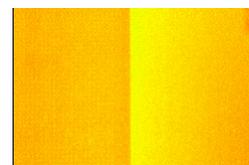
5:00 Uhr



7:00 Uhr



9:00 Uhr



11:00 Uhr



13:00 Uhr



15:00 Uhr



17:00 Uhr



B.7 Berechnung der Speicherkapazität

		d	λ	c	ρ	R_v
		[m]	[W/(mK)]	[J/(kgK)]	[kg/m ³]	[m ² K/W]
Decke	frei	0,20	2,10	1.100	2.400	-
	abgehängt	0,20	2,10	1.100	2.400	0,16
Fußboden		0,05	1,40	1.100	2.000	0,08
Außenwand	frei	0,10	2,10	1.100	2.400	-
	verkleidet	0,10	2,10	1.100	2.400	0,11
Trennwand	frei	0,13	2,10	1.100	2.400	-
	verkleidet	0,13	2,10	1.100	2.400	0,11
Seitenwand Beton		0,13	2,10	1.100	2.400	-
Seitenwand KS		0,09	0,80	1.620.000		-
Leichte Seitenwände, Abhängung,		0,01	0,21	900	900	-

		β	σ	d_{eff}	z	C_∞	C'
		[-]	[m]	[m]	[-]	[J/m ² K]	[-]
Decke	frei	1,79	0,148	0,105	1,352	276.108	0,25
	abgehängt	3,44	0,148	0,105	1,352	276.108	0,14
Fußboden		7,09	0,132	0,094	0,378	205.799	0,23
Außenwand	frei	3,57	0,148	0,105	0,676	276.108	0,26
	verkleidet	5,88	0,148	0,105	0,676	276.108	0,17
Trennwand	frei	2,86	0,148	0,105	0,845	276.108	0,26
	verkleidet	4,70	0,148	0,105	0,845	276.108	0,16
Seitenwand Beton		2,86	0,148	0,105	0,845	276.108	0,25
Seitenwand KS		1,60	0,131	0,092	0,651	149.581	0,48
Leichte Seitenwände, Abhängung		2,98	0,083	0,058	0,145	47.345	0,20

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.