Energetisches Verhalten von Doppelfassaden

Auswertung von drei gemessenen Beispielen

Von der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften angenommene Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Till Pasquay

Gutachter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Gerhard Sedlacek (RWTH-Aachen)

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek

Tag der mündlichen Prüfung: 25 Oktober 2002

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur und Bauphysik an der Universität Dortmund.

Für das Zustandekommen dieser Arbeit danke ich meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller für die Ermöglichung dieser Arbeit, für seine stete Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ich danke Ihm für die gute Zusammenarbeit, die engagierten Diskussionen und die Übernahme der Aufgabe des ersten Gutachters.

Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Sedlacek bin ich für seine konstruktiven Anregungen und die Übernahme des Amtes des 2. Gutachters zu besonderem Dank verpflichtet.

Zu danken habe ich Herrn Prof. Dr. Ernst-Rudolf Schramek für die steten Anregungen während meiner Zeit an der Universität Dortmund sowie für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Dr. Claudia Zilla (RWTH-Aachen) danke ich für die Anregungen in ihrer Dissertation und die fruchtbare Diskussion zum Thema Lüftung. Weiterhin danke ich allen studentischen Mitarbeitern des Lehrstuhls Klimagerechte Architektur und Bauphysik, insbesondere Thorsten Lengies, die zum Gelingen und zur Auswertung der Messungen beigetragen haben und meinem Kollegen Prof. Dr. Christoph Nolte der die Vorarbeit bei den Luftwechselmessungen im Siemes-Gebäude in seiner Dissertation durchgeführt hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Andreas Christmann vom Hochschulrechenzentrum der Universität Dortmund, der die in der Arbeit verwendeten statistischen Berechnungen mit seiner profunden Kenntnis auf dem neuesten Stand der Wissenschaft durchgeführt hat.

Der Arbeitsgemeinschaft Solar des Landes Nordrhein-Westfalen möchte ich für die Förderung des Forschungsvorhabens „Klimagerechte Fassadentechnologie“ und die Förderung der Messungen im RWE-Turm danken, die diese Arbeit erst möglich gemacht haben.

Schließlich möchte ich meiner Lebensgefährtin und Architektin Beate Reinelt meinen besonders herzlichen Dank aussprechen. Ohne Ihre Unterstützung und ihr Verständnis wäre die notwendige intensive Beschäftigung mit dem Thema dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Wuppertal im November 2002

Till Pasquay

Zusammenfassung

Durch die Forderung nach einer natürlichen Lüftung von Bürogebäuden und einem effektiven Sonnenschutz in Hochhäusern haben Doppelfassaden einen hohen Stellenwert erreicht. Das energetische Verhalten von Doppelfassaden ist Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen. Bisher liegen jedoch nur wenige Messungen in ausgeführten Gebäuden vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Gebäude mit Doppelfassaden detailliert vermessen. Die Langzeitmessungen erfassten über mindestens ein Jahr unter anderem die Temperaturen im Raum und in der Doppelfassade, die Luftströmung in der Fassade, Wärmeflüsse und meteorologische Randbedingungen. Gemessen wurde in einem Hochhaus ohne Haustechnik für Lüftung und Kühlung (Siemens-Gebäude in Dortmund), einem Hochhaus mit Lüftungsanlage und Kühldecke (RWE-Turm in Essen) und einem Gebäude mit Betonkerntemperierung (Victoria Versicherung in Düsseldorf).

Ausgewertet dargestellt werden unter anderem jeweils eine Sommerperiode, eine Winterperiode, die Temperaturüberschreitungsdauern im Raum und in der Fassade für ein Jahr und punktuelle Messungen des Raumluftwechsels.

Für die Auslegung und die Simulation von Doppelfassaden ist die Luftströmung im Fassadenzwischenraum bisher die einzige schwer zu bestimmende Größe. Der Luftaustausch in der Fassade wurde über eine energetische Bilanz anhand der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten kalibriert. Eine statistische Auswertung der Messdaten zeigt einen signifikanten Einfluss von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und der Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung.

Trotz aller Unterschiede in der Fassadengestaltung stellt sich für die ausgewerteten Gebäude ein linearer Zusammenhang zwischen dem wirksamen Öffnungsanteil der Außenfassade und dem mittleren Luftvolumenstrom pro m² Fassadenfläche in der Fassade ein.

Mit Hilfe der durchgeführten Langzeitmessungen in drei Gebäuden können die energetischen Zusammenhänge klar beschrieben und die Grenzen und Möglichkeiten von Doppelfassaden aufgezeigt werden.

Lebenslauf

19.07.1965	geboren in Freiburg i. Br.

Schulbildung

9/82 bis 7/83	Austauschschüler in Seattle, USA.
6/1986:	Abitur an der Staudinger Gesamtschule in Freiburg

Zivildienst

12/86 bis 7/88	Chirurgische Ambulanz, Diakoniekrankenhaus Freiburg.

Studium

10/88 bis 1/96	RWTH Aachen, Fachbereich Maschinenbau, Fachrichtung Grundlagen, (Konstruktion und Energietechnik).

Diplom

5/95 bis 11/95	Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, lichttechnische und thermische Gebäudesimulation.

Universität Dortmund, Lehrstuhl Klimagerechte Architektur und Bauphysik

ab 6/1996	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Forschung / Lehre Betreuung von Forschungsvorhaben und Beratung in Bauprojekten (Strömungssimulation, thermische Simulation) Leitung von Seminaren und Betreuung von Exkursionen (z.B. Hongkong und China)

Schmidt Reuter Partner Ingenieurgesellschaft, Forschung und Entwicklung

seit 10/2001	Verantwortlich für Energiekonzepte und thermische Gebäudesimulation Projektleitung, Systementwicklung, Wettbewerbe.

Inhalt

Verwendete Zeichen und Symbole

Lateinische Buchstaben

A_{Br}	Brüstungsfläche
A_{Fass}	Fassadenfläche
c	Konstante
c_p	Wärmekapazität der Luft
c_p	Druckbeiwert
c_v	Geometriebeiwert
g	Gesamtenergiedurchlassgrad
g_{Raum}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Innenverglasung
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
LW	Luftwechsel
$\dot{Q}_{LW\ Raum}$	Lüftungswärmestrom zum Raum
$Q_{LW\ Raum}$	Durch Lüftung zum Raum ausgetauschte Energiemenge
$\dot{Q}_{LW\ u}$	Lüftungswärmestrom zur Umgebung
$Q_{LW\ u}$	Durch Lüftung zur Umgebung ausgetauschte Energiemenge
$\dot{Q}_{St}$	Wärmestrom der solaren Gewinne
Q_{St}	Durch solare Gewinne ausgetauschte Energiemenge
$\dot{Q}_{T}$	Transmissionswärmestrom
$\dot{Q}_{T\ u}$	Transmissionswärmestrom zur Umgebung
$Q_{T\ u}$	Durch Transmission zur Umgeb. ausgetauschte Energiemenge
$\dot{Q}_{T\ Raum}$	Transmissionswärmestrom zum Raum
$Q_{T\ Raum}$	Durch Transmission zum Raum ausgetauschte Energiemenge
R	Gaskonstante der Luft
t	Temperatur
T	absolute Temperatur [K]
t_a	Temperatur im Fassadenzwischenraum außen
T_{Fass}	absolute Temperatur im Fassadenzwischenraum [K]
t_i	Temperatur im Fassadenzwischenraum innen
t_{Raum}	Raumtemperatur
t_u	Temperatur der Umgebung
T_u	absolute Umgebungstemperatur [K]
u_{Br}	Wärmedurchgangskoeffizient der Brüstung
u_{De}	Wärmedurchgangskoeffizient der Decke
u_{Fe}	Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters
v	Strömungsgeschwindigkeit

V	Volumen
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom
$\dot{V}_{Raum}$	Luftvolumenstrom zum Raum
$\dot{V}_{u}$	Luftvolumenstrom zur Umgebung
WR	Windrichtung

Griechische Buchstaben

α	absorbierter Strahlungsanteil
Δp	Druckdifferenz
Δt	Temperaturdifferenz
η_{DF}	Einsparung an Transmissionswärmeverlusten durch die Doppelfassade
ρ	Dichte der Luft
ρ	reflektierter Strahlungsanteil
ρ_{Fass}	Dichte der Luft im Fassadenzwischenraum
ρ_{u}	Dichte der Umgebungsluft
τ	transmittierter Strahlungsanteil

Einheiten

°	Grad
°C	Grad Celsius
h	Stunde
K	Kelvin
lx	Lux
m	Meter
s	Sekunde

1 Einleitung

Die Entwicklung von Doppelfassadensystemen gehört heute zu den wichtigsten Neuerungen im Bereich der Fassadentechnik. Doppelfassaden haben sich im großen Stil in der Baupraxis beim Bau von Büro- und Verwaltungsgebäuden an lärmbelasteten Standorten und im Hochhausbereich durchgesetzt.

Einer der wichtigsten Gründe für die Popularität von Doppelfassadensystemen ist der Wunsch der in Bürogebäuden arbeitenden Menschen, selbst über Lüftung und Sonnenschutz zu bestimmen. Die Doppelfassade bietet hier einen Übergangsbereich, in dem man durch das Öffnen der Fenster das Außenklima erfährt, ohne jedoch den Unbillen von Wind oder Verkehrslärm ausgesetzt zu sein.

Das Sick-Building-Syndroms [17], das in erster Linie durch schlecht geplante oder schlecht gewartete Klimaanlagen hervorgerufen wird, trägt zu dem hohen Stellenwert bei, welcher der natürlichen Lüftung beigemessen wird. Selbst moderne Klimaanlagen sind nicht frei von Schadstoffemissionen [36]. Auch eine Filterung der zeitweise hoch belasteten Außenluft im innerstädtischen Bereich durch eine Lüftungsanlage überzeugt nur bedingt in diesem Zusammenhang.

Für die Architekten eröffnet sich die Möglichkeit hohe transparente Gebäude mit einer gleichmäßigen Außenansicht der Fassade zu planen, ohne allzu große Nachteile durch hohe solare Gewinne über die Glasflächen in Kauf zu nehmen. Die Anordnung eines effektiven Sonnenschutzes im Zwischenraum einer Doppelfassade erlaubt geringe g-Werte des Gesamtsystems, die sonst nur mit Sonnenschutzverglasungen erzielbar sind, welche die Transmission von Tageslicht erheblich einschränken.

Die Entwicklung von Doppelfassaden begann mit der Idee die nicht öffenbaren Glasfassaden mit Sonnenschutzverglasung des „International Style“ der bis dahin üblichen Bürokomplexe flexibler und „intelligenter“ [38], [41], [43] zu gestalten. In der Praxis bedeutet das, einen effektiven Sonnenschutz anzubieten, der geschlossen und geöffnet werden kann und eine natürliche Fensterlüftung der Büroräume ohne Komforteinbuße zu ermöglichen.

Die Kombination von effektivem Sonnenschutz und natürlicher Lüftung auch zur Nachtauskühlung [42] mit möglichen solaren Gewinnen im Winter ließ die Doppelfassade sowohl im Sommer [39] als auch im Winter als energiesparende Lösung erscheinen [32]. Ansätze zur Energiegewinnung im Winter wurden in Einzelfällen verfolgt [21], [23], erfordern aber, um eine nennenswerte Energieeinsparung zu erzielen, eine Ausführung als Wärmeschutzverglasung in beiden Fassadenebenen.

In den meisten ausgeführten Gebäuden dient die Doppelfassade als reiner Lärm- und Windschutz. Die innere Fassade wird dabei als Primärfassade in Wärmeschutzverglasung und die äußere Fassade in Einfachverglasung ausgeführt [13]. Der permanent hinterlüftete Fassadenzwischenraum nimmt den Sonnenschutz auf [27], [43]. Eine umfassende Klassifikation von Doppelfassaden hat *Lang* [18], [19] durchgeführt. Oesterle [29] und Blum [2] geben eine gute Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten und die Vielzahl der gebauten Varianten.

Mit einer reinen Kosten-Nutzen Analyse lässt sich die Doppelfassade in der Regel nicht gegenüber einer moderne Haustechnik mit Kühldecken oder Betonkerntemperierung [22] und klein dimensionierter Lüftungsanlage begründen (siehe auch [15]). Zumindest dann nicht, wenn der Glasanteil der Außenfassade ausreichend klein dimensioniert wird.

Der große energetische Vorteil der Doppelfassade, einen effektiven Sonnenschutz windgeschützt im Fassadenzwischenraum aufzunehmen, besteht dann, wenn ein außen liegender Sonnenschutz, beispielsweise aus Gründen der Windbelastung nicht eingebaut werden kann. Bei Vergleich eines Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum mit einem außen liegenden Sonnenschutz, ist der außen liegende Sonnenschutz jedoch in der Regel effektiver, wenn ausschließlich über die Fenster gelüftet werden soll. Sonderfälle ergeben sich bei tiefen, gut hinterlüfteten Fassadenzwischenräumen [23].

Die Doppelfassade ist eine von mehreren Variationen energiebewusst Gebäude zu planen [24], [4], [45]. Zwei Gründe sprechen für den Einbau einer Doppelfassade. Der primäre Parameter ist die komfortable Möglichkeit der Nutzer an lärmbelasteten Standorten und in Hochhäusern über die Fenster zu lüften. Der zweite Grund ist, einen effektiven, schaltbaren und windgeschützten Sonnenschutz zu ermöglichen. Weiterhin bietet das System Doppelfassade gute Voraussetzungen für Lichtlenkende Bauteile, wenn auch die Lichttransmission grundsätzlich durch eine zusätzliche Glasscheibe verringert wird [23].

Ein weiteres bisher kaum in der Praxis umgesetztes Anwendungsgebiet stellt die Sanierung von bestehenden Gebäuden dar [23], [26], [31].

Doppelfassadensysteme werden momentan kontrovers diskutiert [9], insbesondere dann, wenn Gebäude mit Ganzglasfassaden ausgestattet werden. Messergebnisse liegen für ausgeführte Gebäude bisher, bis auf die in dieser Arbeit verwendeten vorab veröffentlichten Ergebnisse [34], [30], [31], [33], [27], nur in Ansätzen vor [29].

Die in dieser Arbeit ausgewerteten Messungen wurden in drei Gebäuden mit Doppelfassade durchgeführt und erstreckten sich über den Zeitraum von mindestens einem Jahr. Untersucht wurde ein Gebäude ohne jegliche Klimatisierung (Siemens-Gebäude in Dortmund), ein Gebäude mit Bauteiltemperierung (Victoria Versicherung in Düsseldorf) und ein Gebäude mit Kühldecken und Lüftungsanlage (RWE-Turm in Essen). Die untersuchten Fassaden sind vom überwiegend realisierten Typ der Kastenfensterfassade, bzw. der Korridorfassade (Siemens-Gebäude).

Ziel der Arbeit ist es eine größere Planungssicherheit beim Einsatz von Simulationsprogrammen bei der Dimensionierung von Doppelfassaden zu erreichen und auch ohne Simulation eine Abschätzung der zu erwartenden Temperaturen in einer Doppelfassade zu ermöglichen.

Bei der Berechnung und der Simulation von Doppelfassaden ist die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes die wichtigste Größe, die bisher nur ansatzweise bestimmt werden konnte.

In dieser Arbeit wird der tatsächliche Luftwechsel im Fassadenzwischenraum anhand der in den drei vermessenen Gebäuden gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt und in einem weiteren Schritt über eine statistische Auswertung der Einfluss der einzelnen Randbedingungen abgeleitet.

Eine weitere wichtige Fragestellung ist der Einfluss der Fassadengeometrie und der Öffnungsquerschnitte auf die Hinterlüftung einer Doppelfassade, der sich für die gemessenen Gebäude als Funktion ableiten lässt.

Der Einfluss der Hinterlüftung der Fassade wird für die vermessenen Gebäude sowohl für den Sommer, als auch für den Winter inklusive weiterer Einflüsse, wie der technischen Gebäudeausstattung und dem Einfluss einer warmen Grenzschicht-strömung vor der Fassade dokumentiert.

Die in der Arbeit verwendeten Messergebnisse wurden im Rahmen der von der AG-Solar, NRW geförderten Forschungsvorhaben „Klimagerechte Fassadentechnologie“ und „Messungen im Gebäude DLZ-Stern“ gewonnen.

2 Gemessene Gebäude

2.1 Siemens Niederlassung Dortmund

Bauherr: Siemens AG
Entwurf: SIAT Bauplanungs GmbH u. Co. Erlangen
Fassadenplanung: SIAT Bauplanungs GmbH u. Co. Erlangen
Haustechnik: SIAT Bauplanungs GmbH u. Co. Erlangen
Bauphysik: K+L, Giessen
Fertigstellung (Renovierung): 1997

Das elfgeschossige Gebäude der Siemens-Niederlassung in Dortmund liegt an einem verkehrsreichen innerstädtischen Platz. Nach einem Brand wurde die gesamte Fassade erneuert und eine neue Doppelfassade zu dem ausgesprochen niedrigen Preis von unter 1000 DM pro m² Gesamtfassadenfläche erstellt. Die Doppelfassade dient einerseits der Abminderung des Verkehrslärms und andererseits als Schutz für den im Fassadenzwischenraum angeordneten Sonnenschutz. Bis auf den Kantinenbereich wurde die gesamte Lüftungs- und Klimaanlage des vorher vollklimatisierten Gebäudes entfernt. Durch den Einbau der Doppelfassade kann der Sonnenschutz vom Innenraum in den Fassadenzwischenraum verlegt werden. Die vorher nicht öffenbaren Fenster dienen jetzt ganzjährig der natürlichen Belüftung des Gebäudes.

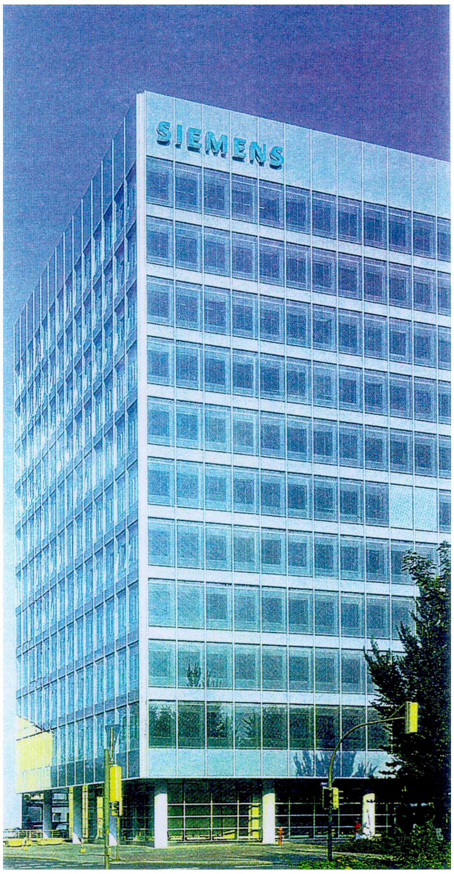

Bild 2.1-1: Siemensgebäude, Ansicht Märkische Straße

2.1.1 Messprogramm und Anordnung der Sensoren

Als Messräume dienten 2 intensiv genutzte Büroräume in der 5. Etage mit Süd- und Westfassade (Callcenter) und Ostfassade (2er-Büro mit Telefonanlagenschaltschrank). Die ausgewertete Messperiode reicht von August 97 bis September 98. Die beiden Räume, in denen gemessen wurde unterliegen folgenden Randbedingungen:

Tabelle 2.1-1: 2er-Büro (kleiner Raum)

Geometrie		
Grundfläche: 21 m²	Raumhöhe: 2,85 m	Geschosshöhe: 3,5 m
Fassadenfläche: 18 m²	Fensterfläche Innenfassade: 8,6 m²	Fensterfläche Außenfassade: 16,4 m²
Außenöffnungen unten 0,52 m²	Außenöffnungen oben: 0,52 m²	Öffnungsanteil: 6,4%
Nutzung		
2 Personen	2 Rechner mit Monitor	Telefonanlagenschaltschrank des Call-Centers

Tabelle 2.1-2: Call-Center (großer Raum)

Geometrie		
Grundfläche: 131 m²	Raumhöhe: 2,85 m	Geschosshöhe: 3,5 m
Südost		
Fassadenfläche: 36,8 m²	Fensterfläche Innenfassade: 17,1 m²	Fensterfläche Außenfassade: 32,9 m²
Außenöffnungen unten 1,05 m²	Außenöffnungen oben: 1,05 m²	Öffnungsanteil: 6,4%
Südwest		
Fassadenfläche: 55,1 m²	Fensterfläche Innenfassade: 25,7 m²	Fensterfläche Außenfassade: 49,3 m²
Außenöffnungen unten 1,57 m²	Außenöffnungen oben: 1,57 m²	Öffnungsanteil: 6,4%
Nutzung		
Bis zu 14 Personen	14 Rechner mit Monitor	Drucker, Kopierer, Fax

Der Energieeintrag der Beleuchtung wurde bei der Messung nicht mit erfasst. Beide Räume sind mit neuen Spiegelrasterleuchten ausgestattet.

Die Doppelfassadenkonstruktion setzt sich aus einer inneren sanierten Lochfassade und einer mit einem Abstand von 35 cm montierten äußeren Einfachverglasung zusammen (Bild 2.1-3). Der Sonnenschutz (Aluminiumlamellenraffstore) befindet sich in etwa in der Mitte des Fassadenzwischenraumes. Die Hinterlüftung erfolgt über 10 cm hohe waagrecht durchlaufende Öffnungen, die durch ein Weglassen der waagrechten Einspannung der äußeren Scheiben entstehen. Die Luftschlitze für „Zu- und Abluft“ sind vertikal im Bereich der Geschossdecke durch ca. 60 cm hohe opake Felder getrennt, um Reinfiltration zu vermeiden. Die Fassade folgt dem Typus der Korridorfassade. Sie ist jeweils geschossweise und an den Gebäudeecken getrennt. Eine Schallübertragung von außen und von Raum zu Raum wird durch schallabsorbierende Brüstungsverkleidungen im Fassadenzwischenraum abgemindert.

Gemessen wurde die Temperatur der Umgebungsluft vor der Südwestfassade und vor der Südostfassade. Die Doppelfassade wurde auf der Südost- und Südwestseite mit jeweils drei Temperatursensoren vor und hinter dem Sonnenschutz bestückt. Zwei Thermoanemometer erfassten die Luftströmung im Fassadenzwischenraum der Südwestfassade. Die Raumlufttemperatur wurde im Call-Center an zwei Stellen und im 2er-Büro an einer Stelle mit jeweils drei vertikal angeordneten Thermoelementfühlern gemessen. Um die Stellung des Sonnenschutzes abzuschätzen, wurde jeweils vor dem Sonnenschutz und auf der dem Sonnenschutz gegenüberliegenden Wand die Beleuchtungsstärke gemessen.

Weitere Messpunkte erfassten die relative Feuchte im Call-Center und den Wärmefluss in die Brüstung und in eine Stütze der Südwestfassade. Den Öffnungszustand aller Fenster (gekippt und geöffnet) in beiden Räumen überwachten Reedkontakte, deren Schaltzustand mit aufgezeichnet wurde. Eine Wetterstation auf dem Dach nimmt Windgeschwindigkeit, Windrichtung und solare Einstrahlung auf. Bild 2.1-3 und 2.1-4 zeigen die Lage der Sensoren und Tabelle 2.1-1 gibt die technischen Daten der verwendeten Messfühler an.

Der ausgewertete Zeitraum der in Minutenintervallen gemessenen und als 15 Minuten Mittelwerte aufgezeichneten Daten beträgt ein Jahr und reicht vom 01.09.1997 bis zum 31.08.1998.

Auf die in den beiden Messräumen durchgeführten Luftwechselmessungen wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

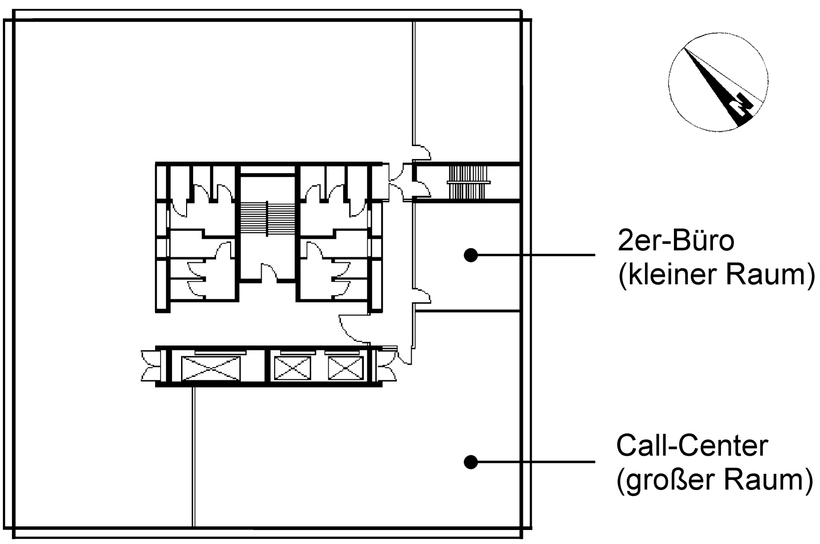

Bild 2.1-2: Gemessene Räume im 5. OG

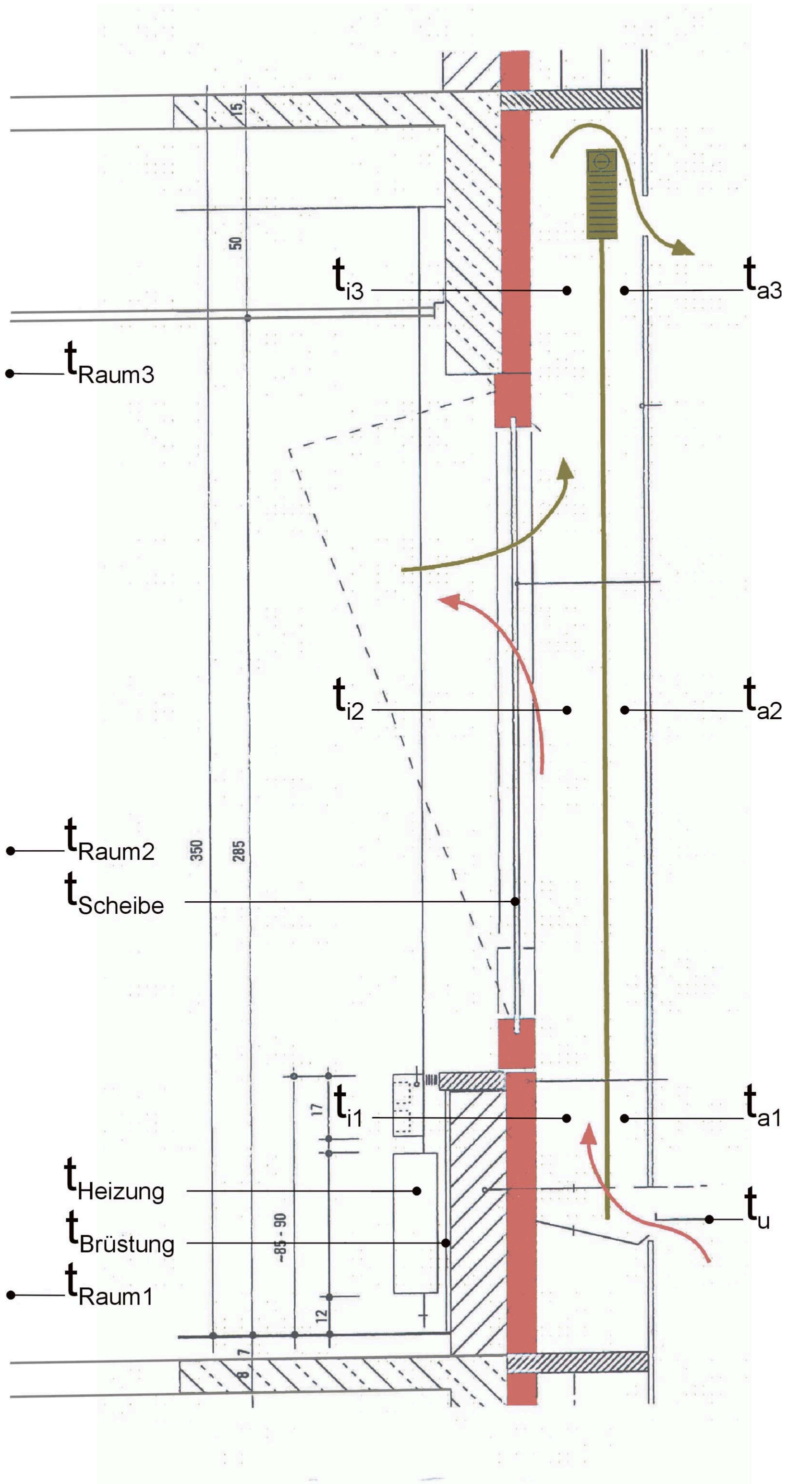

Bild 2.1-3: Temperaturmessstellen

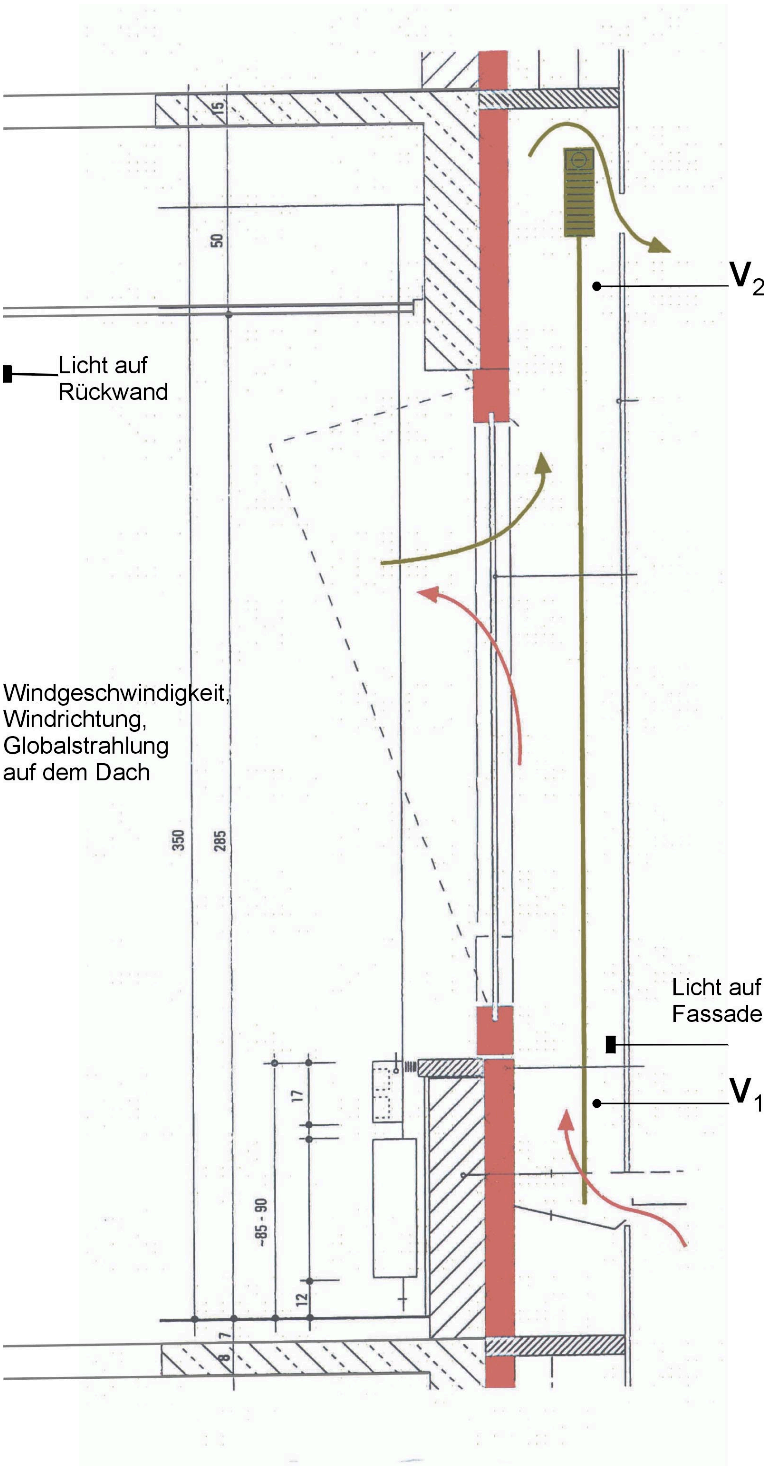

Bild 2.1-4: Weitere Messstellen außer Temperaturmesstellen

Tabelle 2.1-3: Verwendete Sensoren

Messzeitraum: 01.09.1997 bis 31.10.1998 Messintervall: 1 Minute, Aufzeichnungsintervall: 15 Minuten		
Messwert	**Anzahl**	**Sensor**
Temperatur	29	Thermoelemente mit Strahlungsschutz Klasse 1: Maximaler Fehler 1,1° oder 0,4 %
Strömung	2	Thermoanemometer (Fa. TSI) Meßbereich 0 – 10 m/s Auflösung: 0,07 % vom selektierten Meßbereich Genauigkeit 3% vom Meßwert Zeitkonstante wählbar bis 10 s Temperaturbereich: 0 bis 60 °C
Wärmefluss in massive Bauteile	2	Wärmeflussplatte (Ahlborn) "zur Ermittlung der Wärmestromdichte Temperaturbeständig bis 80 °C Genauigkeit vom Eichwert: 5%"
Licht zur Beurteilung des Öffnungszustandes der Sonnenschutzes	4	Lux-Sonde (Fa. Ahlborn) Spektrale Empfindlichkeit: 360 –760 nm Grundgenauigkeit: 5% vom Endwert Bereich 0 bis ca. 26.000 Lux, Auflösung 1 Lux Bereich 0 bis ca. 260.000 Lux Auflösung 10 Lux
Öffnungszustand	7	Reed-Kontakte
Strahlung	1	Pyranometer Kipp u. Zonen CM 11
Windgeschwindigkeit	1	(Fa. Thies) 0,5 – 50 m/s, Auflösung 0,1 m/s –30 bis 50 °C geschützt gegen Vereisung
Windrichtung	1	(Fa. Thies) 0 bis 360°, Auflösung 11,25°; Totzone: ca. 5° –30 bis 50 °C geschützt gegen Vereisung
Luftfeuchte im Raum und in der Fassade	2	Kapazitiver Sensor, (Fa. Thies) 5 bis 98 % r. H. –20 bis 80°C

2.1.2 Strömung im Fassadenspalt

Die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fassadenspalt wurde an zwei Messpunkten in der Nähe der Lüftungsöffnungen gemessen (Bild 2.1-4).

Maßgeblich für die Luftströmung in der Fassade sind neben der Fassadengeometrie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und die Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung. Bei der Analyse dieser Einflussgrößen zeigt sich, dass neben dem thermischen Auftrieb Windgeschwindigkeit und Windrichtung einen erheblichen Einfluss haben müssen. Die in Bild 2.1.5 als 15 Minuten-Werte und in Bild 2.1-6 als Stundenwerte mit diesen Einflussgrößen dargestellte Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade legt den Schluss nahe, dass Windrichtung und Windgeschwindigkeit einen größeren Einfluss als die Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung haben. Am 11.08.1998 wird beispielsweise die größte Strömungsgeschwindigkeit in der dargestellten Periode bei gleichzeitig kleiner Temperaturdifferenz zwischen Fassade und Umgebung gemessen. Der Einfluss der Windrichtung zeigt sich darin, dass bei ähnlichen Windgeschwindigkeiten und Temperaturen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten auftauchen. Zusätzlichen Einfluss haben gekippte Fenster der Innenfassade. Dies wird ausführlicher in Kapitel 4 und Kapitel 6 diskutiert. Eine statistische Auswertung der einzelnen Einflussgrößen wird in Kapitel 5 durchgeführt.

Da die Strömung in der Fassade stark schwankt, wurden in Bild 2.1-6 für eine übersichtlichere Darstellung der Zusammenhänge Stundenmittelwerte für die Darstellung gewählt.

Auf den Luftwechsel zwischen Raum und Fassade wird ausführlich in Kapitel 3 eingegangen.

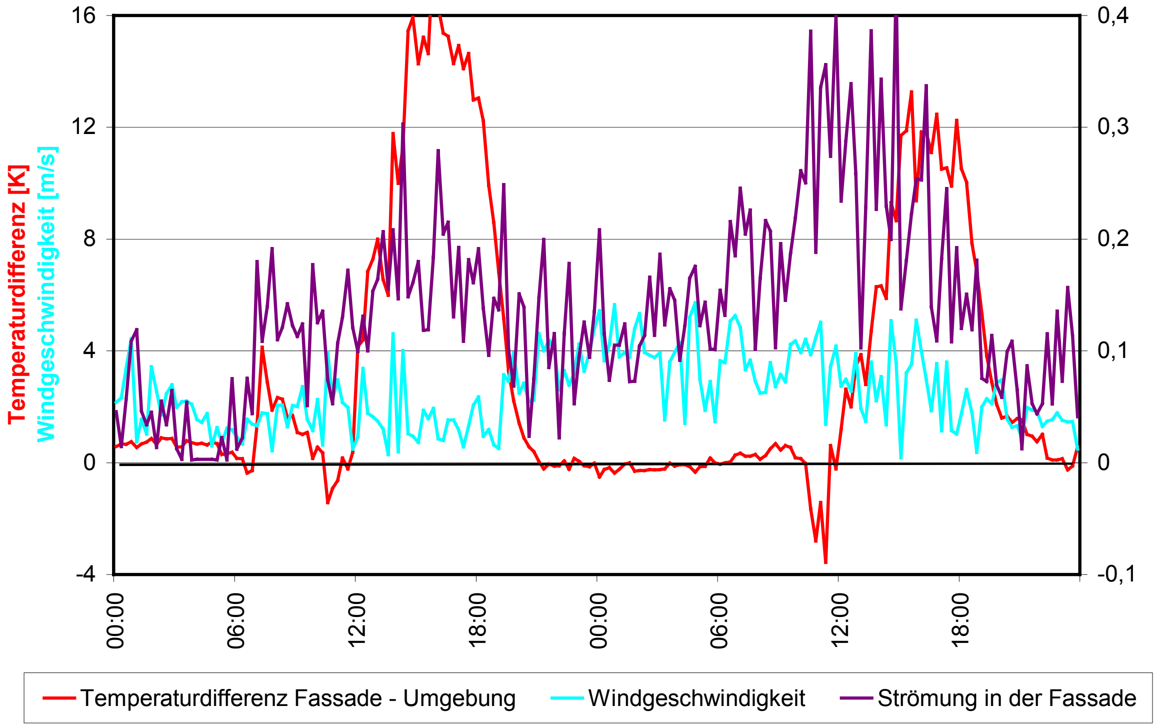

Bild 2.1-5: Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade, 10. und 11.08.1998

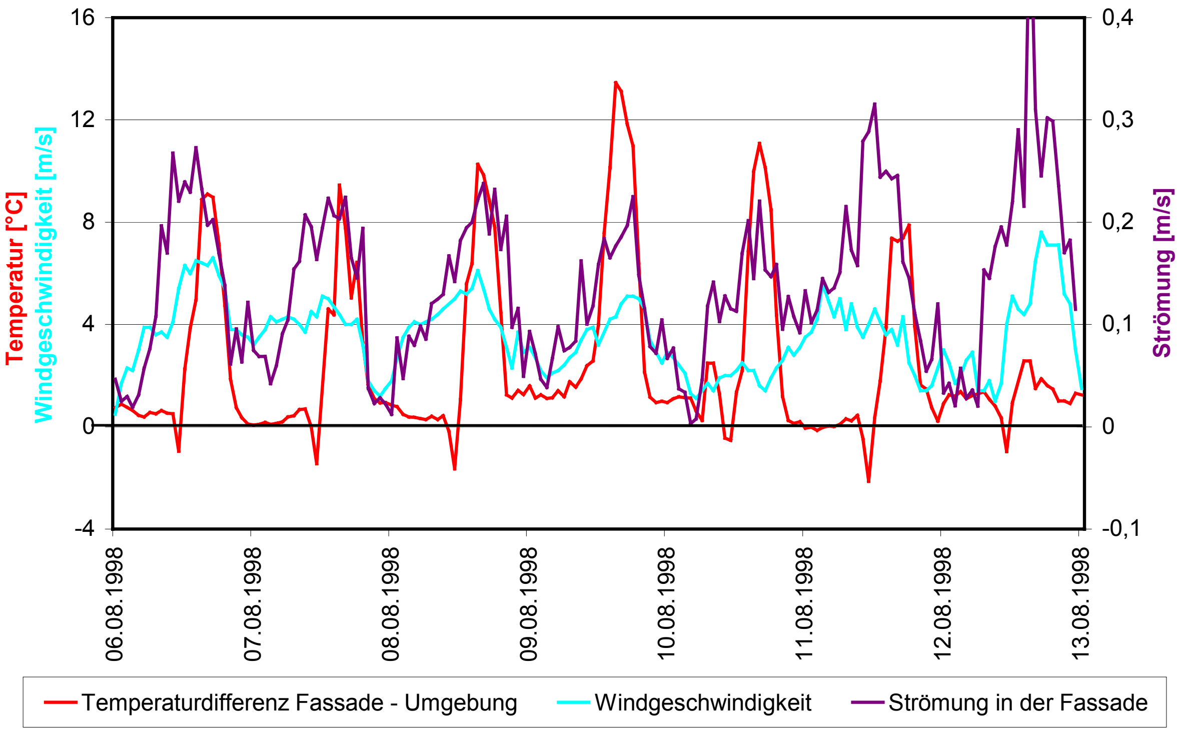

Bild 2.1-6: Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade, Stundenmittelwerte.

2.2 RWE-Turm

RWE-Turm, Essen
Bauherr: Hochtief AG
Entwurf: Ingenhoven Overdiek und Partner
Fassadenplanung: Josef Gartner + Co., Gundelfingen
Haustechnik: HL-Technik AG, München / Düsseldorf
Bauphysik: Trümper & Overath, Bergisch - Gladbach
Fertigstellung: 1996

Die 1996 von der Hochtief AG fertiggestellte Konzernzentrale der RWE-AG steht in Essen am Opernplatz 1 frei hinter einer durchbrochenen Blockrandbebauung. Das zylindrische Hochhaus mit außen liegenden verglasten Aufzügen hat insgesamt 31 Obergeschosse [12], [14].

Die 50 cm tiefe Doppelfassade des Gebäudes ist bis auf die Lüftungsöffnungen verglast. Der Sonnenschutz befindet sich im Fassadenzwischenraum. Die Fassade wurde nach dem Kastenfensterprinzip ausgeführt, d.h. jedes über zwei Achsen reichende Segment ist sowohl vertikal als auch mit Glaselementen horizontal von seinem Nachbarn getrennt. Die Lüftungsöffnungen der Doppelfassade sind nebeneinander angeordnet, so dass jeweils eine Öffnung als Abluft für die darunter liegende Etage und eine Öffnung als Zuluft für die darüber liegende Etage dient. Die Fassadenöffnungen wurden für eine maximale Transparenz und für den Windschutz optimiert.

Das Gebäude verfügt über Kühldecken und eine Lüftungsanlage mit Be- und Entfeuchtung für einen 2,5 - fachen Luftwechsel.

Bild 2.2-1: RWE-Turm

2.2.1 Messprogramm und Anordnung der Sensoren

Die Messungen im Gebäude beinhalten die Erfassung raumklimatisch relevanter Daten über einen Zeitraum von Oktober 1998 bis März 2001. Die Messungen fanden auf der 1. und 16. Etage des Gebäudes in je einem nach Norden und Süden orientierten Raum dieser Etagen statt (Bild 2.2-2 und 2.2-3). Die Räume wurden entsprechend Bild 2.2-4 bis 2.2-6 mit Sensoren versehen. In je einem Raum pro Etage wurden ergänzend Luftwechselmessungen durchgeführt. Im einzelnen gestalteten sich die Messungen wie folgt:

Es wurden in den Nordräumen 15 Sensoren und in den Südräumen 29 Sensoren jeweils im Raum und der zugehörigen Fassade installiert, die Lufttemperaturen, Bauteiltemperaturen, Feuchte, Luftgeschwindigkeiten, Wärmefluss, Licht und Druckdifferenzen über den Messzeitraum erfassen. Die Randbedingungen der im folgenden genauer ausgewerteten Räume sind in Tabelle 2.2-1 und 2.2-2 aufgelistet. Die Beleuchtungsanlage war nicht Teil des Messprogramms. Die Räume sind mit Spiegelrasterleuchten ausgestattet.

Die gemessenen Werte wurden über Kabelverbindungen an einen Messwerterfassungsrechner mit Datalogger weitergegeben, dort aufgezeichnet und später ausgewertet. Das Messintervall betrug eine Minute. Aufgezeichnet wurden 15-Minuten Mittelwerte und ab März 2000 5-Minuten Mittelwerte dieser Messungen. Werte zu den äußeren Wetterbedingungen wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Solareinstrahlung und Außentemperatur wurden zusätzlich von der Gebäudeleittechnik aufgenommen. Die im Rechner gesammelten Werte ließen sich per Fernabfrage über Modem abrufen.

Entsprechend der durch den Nutzer zur Verfügung gestellten Räume konnten in einem Südraum des 1. OGs und einem Nordostraum des 16. OGs je 8 Luftwechselmessungen durchgeführt werden. Die Durchführung solcher Messungen wird in Kapitel 3 ausführlich beschrieben.

Tabelle 2.1-1: Nordostraum 16. OG.

Geometrie		
Grundfläche: 25 m²	Raumhöhe: 3,15 m	Geschosshöhe: 3,6 m
Fassadenfläche: 18 m²	Fensterfläche Innenfassade: 15 m²	Fensterfläche Außenfassade: 19 m²
Außenöffnungen unten 0,29 m²	Außenöffnungen oben: 0,29 m²	Öffnungsanteil: 2,9 %
Nutzung		
2 Personen	2 Rechner mit Monitor	Drucker

Tabelle 2.1-2: Südraum 16. OG.

Geometrie		
Grundfläche: 25 m²	Raumhöhe: 3,15 m	Geschosshöhe: 3,6 m
Fassadenfläche: 18 m²	Fensterfläche Innenfassade: 15 m²	Fensterfläche Außenfassade: 19 m²
Außenöffnungen unten 0,29 m²	Außenöffnungen oben: 0,29 m²	Öffnungsanteil: 2,9 %
Nutzung		
Bis zu 2 Personen	2 Rechner mit Monitor	Fax, Messwerterfassung

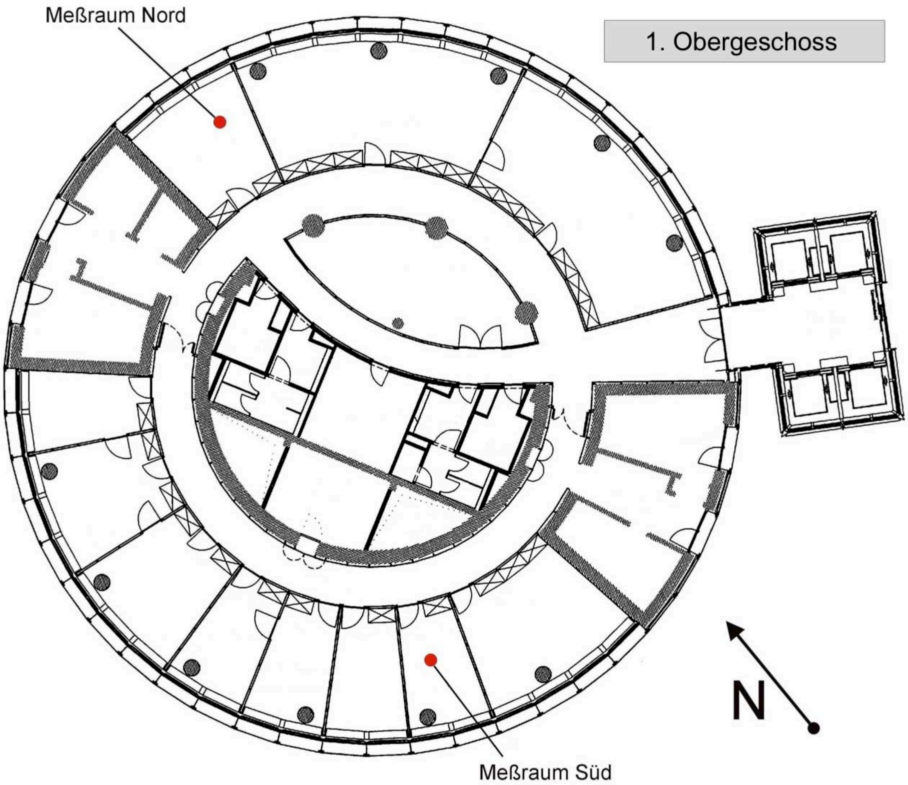

Bild 2.2-2: Messräume im 1. OG, ohne Maßstab

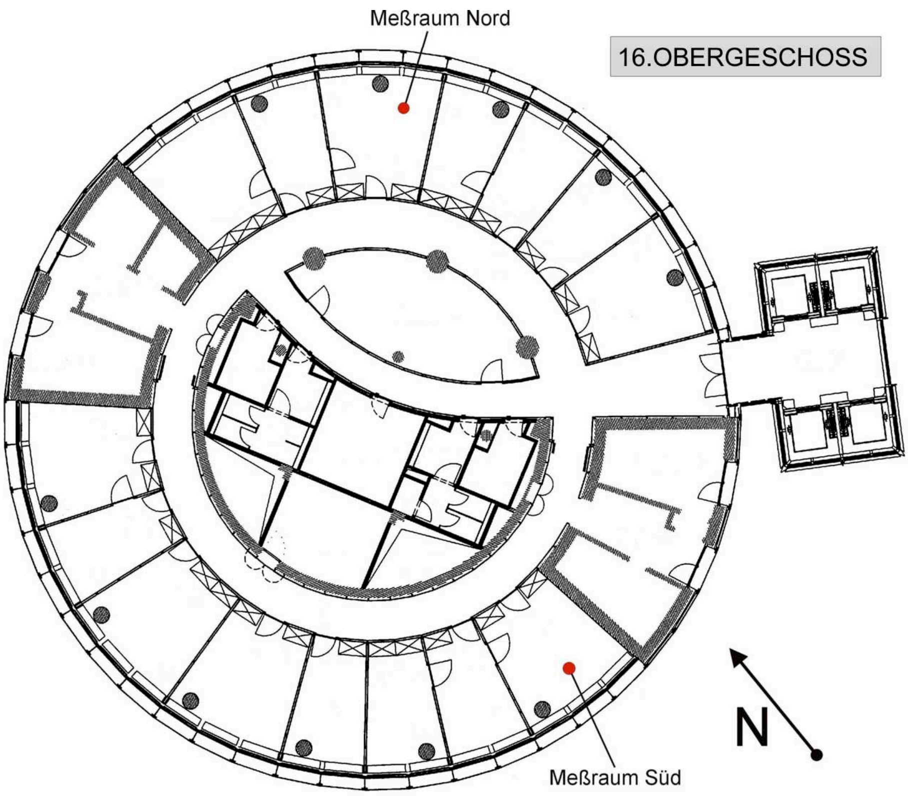

Bild 2.2-3: Messräume im 16. OG, ohne Maßstab

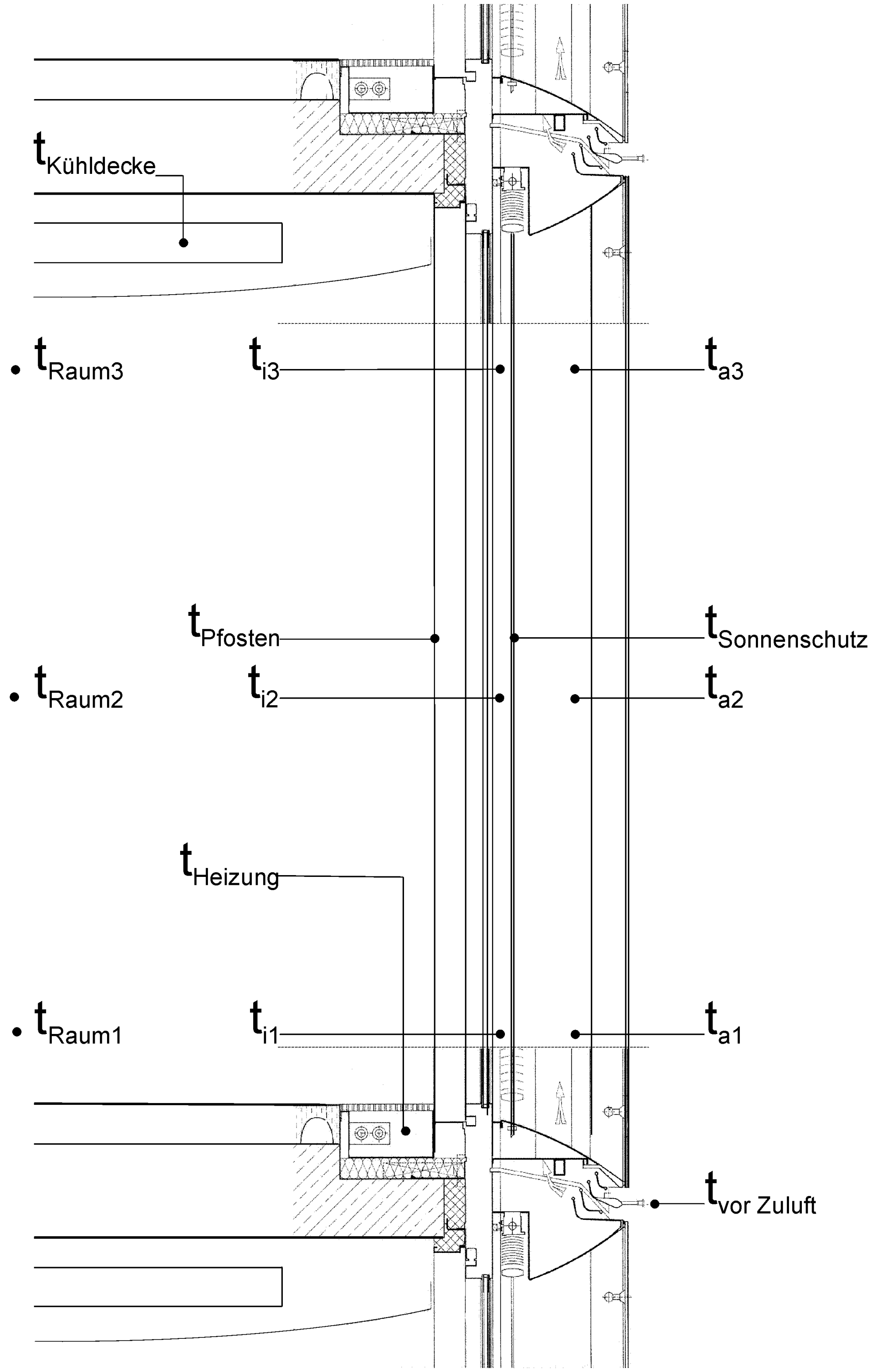

Bild 2.2-4: Temperaturmessstellen Fassadenschnitt

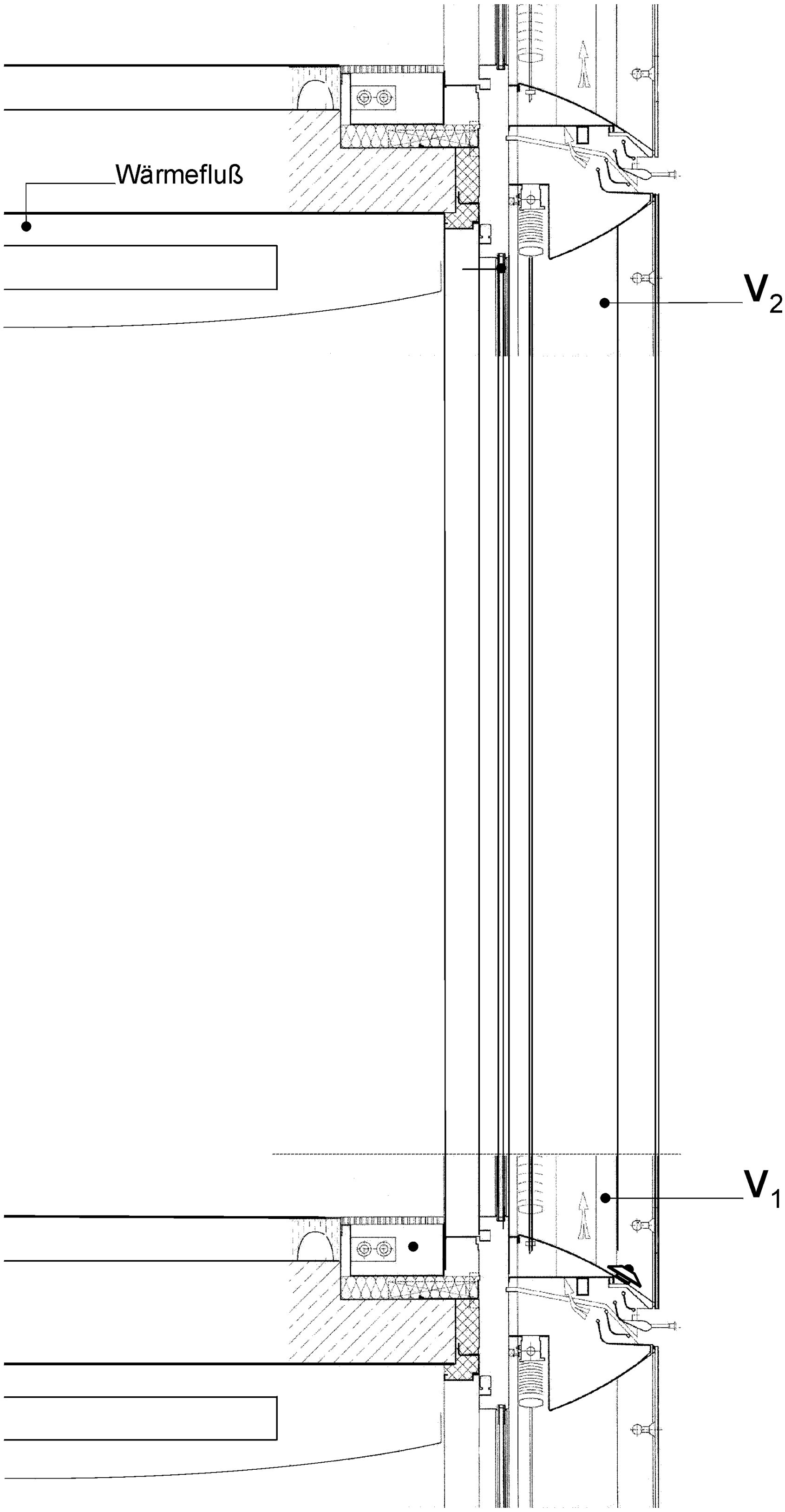

Bild 2.2-5: Weitere Messstellen außer Temperaturmessstellen, Fassadenschnitt

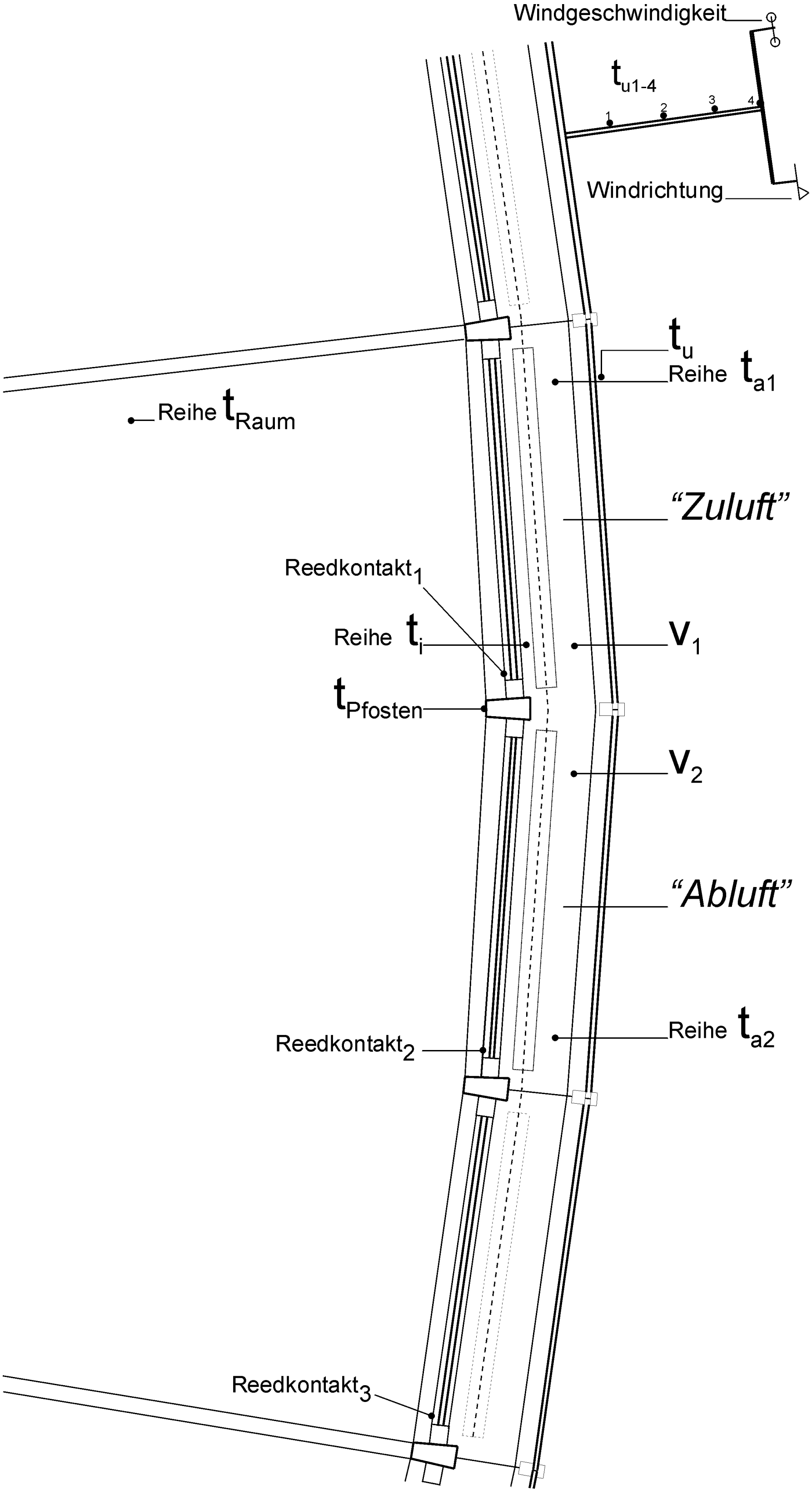

Bild 2.2-6: Messstellen 16. OG, Südraum, Grundriss

Tabelle 2.2-3: Messstellen:

Messzeitraum: 01.11.1998 bis 31.12.2000 Messintervall: 1 Minute, Aufzeichnungsintervall: 15 Minuten, ab 17.03.2000: 5 Minuten		
Messwert	**Anzahl**	**Sensor**
Temperatur	75	Thermoelemente mit Strahlungsschutz Klasse 1: Maximaler Fehler 1,1° oder 0,4 %
Strömung in der Doppelfassade (2 Messpunkte in 2 Fassaden)	4	Thermoanemometer (Fa. TSI) Messbereich einstellbar bis maximal 0 – 10 m/s Auflösung: 0,07 % vom selektierten Messbereich Genauigkeit 3% vom Messwert Zeitkonstante wählbar bis 10 s Temperaturbereich: 0 bis 60 °C
Wärmefluss (Kühldecke)	4	Wärmeflussplatte (Fa. Ahlborn) zur Ermittlung der Wärmestromdichte Temperaturbeständig bis 80 °C Genauigkeit vom Eichwert: 5%
Licht zur Beurteilung des Öffnungszustandes des Sonnenschutzes	6	Lux-Sonde (Ahlborn) Spektrale Empfindlichkeit: 360 –760 nm Grundgenauigkeit: 5% vom Endwert Bereich 0 bis ca. 26.000 Lux, Auflösung 1 Lux Bereich 0 bis ca. 260.000 Lux Auflösung 10 Lux
Öffnungszustand von Fenstern und Sonnenschutz	13	Reed-Kontakte (ein Kontakt pro Schiebefenster und Sonnenschutz)
Strahlung auf die Fassade	1	Pyranometer Kipp u. Zonen CM 11 Messung im Fassadenzwischenraum
Luftfeuchte im Raum und in der Fassade	2	Kapazitiver Sensor, (Fa. Thies) 5 bis 98 % r. H. –20 bis 80°C
Luftfeuchte und Temperatur im Raum und in der Fassade	2	Feuchte: Kapazitiver Sensor, (Fa. Ahlborn) 5 bis 98 % r. H. –20 bis 80°C Temperatur: NTC Fühler
Druck Differenzdruck Fassade-Umgebung und Fassade-Raum	2	Differenzdruck +/- 6800 Pa Lageempfindlichkeit +/- 5 Pa Temperaturdrift: 0,5 %

2.2.2 Strömung im Fassadenspalt

Die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fassadenspalt wurde ähnlich wie im Siemens-Gebäude an zwei Messpunkten in der Nähe der Lüftungsöffnungen gemessen (Bild 2.2-4).

Maßgeblich für die Luftströmung in der Fassade sind auch hier neben der Fassadengeometrie die Windgeschwindigkeit und -richtung vor der Fassade und die Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung. Gemessen wurde die Windgeschwindigkeit parallel zur Fassade. Die „Windrichtung" gibt in diesem Fall an, ob die Luft von unten, oben, von Osten oder Westen an der Fassade entlang strömt.

Insgesamt schwankt die in der Fassade gemessene Strömungsgeschwindigkeit in hohem Maße sowohl zwischen den Messpunkten als auch insgesamt. Bild 2.2.7 zeigt das chaotische Strömungsverhalten in der Fassade und Abweichung zwischen den beiden Messpunkten. In Bild 2.2-8 und 2.2.9 sind die Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade und die Einflussgrößen Wind und Temperaturdifferenz einmal als 5-Minuten Mittelwerte und dann als Stundenmittelwerte dargestellt. Die Stundenmittelwerte lassen wie schon beim Siemens-Gebäude (siehe Kapitel 2.1.2) einen deutlichen Einfluss des Windes neben dem Einfluss des thermischen Auftriebs erkennen. So treten beispielsweise die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bei sehr geringen Temperaturdifferenzen zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung auf. Dass ohne thermischen Auftrieb die Windgeschwindigkeit nicht allein ausschlaggebend, ist zeigen die unterschiedlichen Werte der Fassadenströmung bei ähnlicher Windgeschwindigkeit.

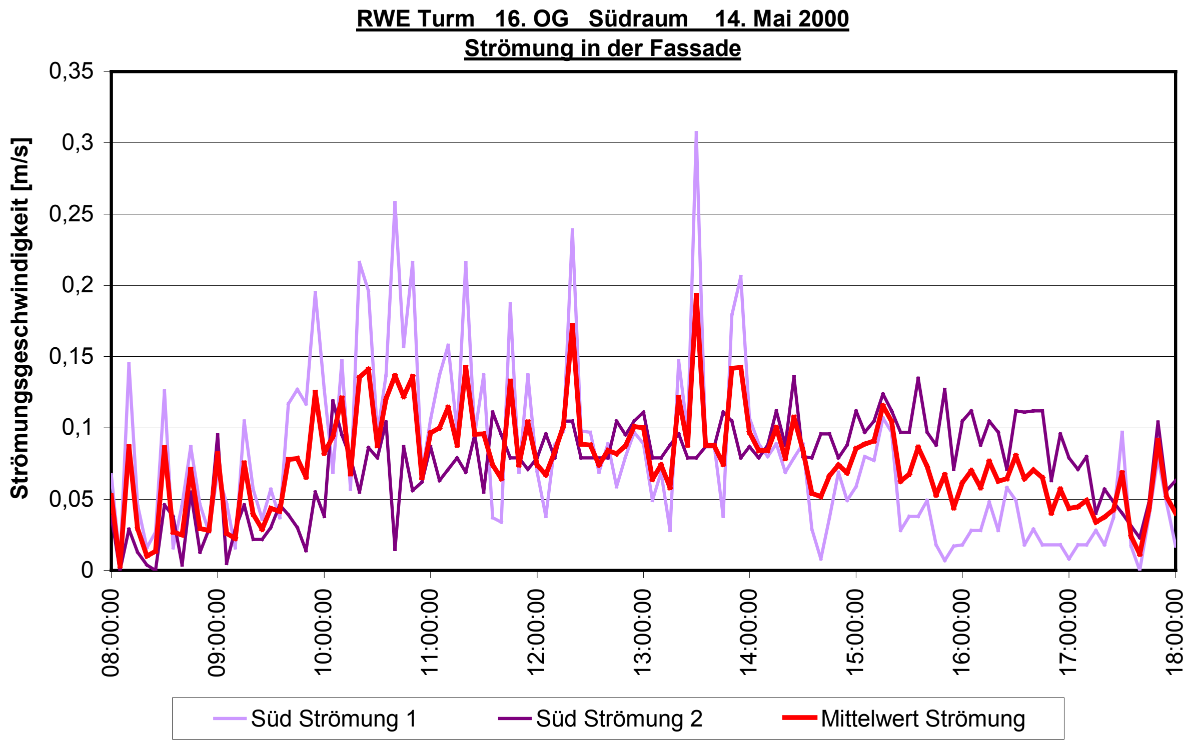

Bild 2.2-7: Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade, 5-Minuten Werte

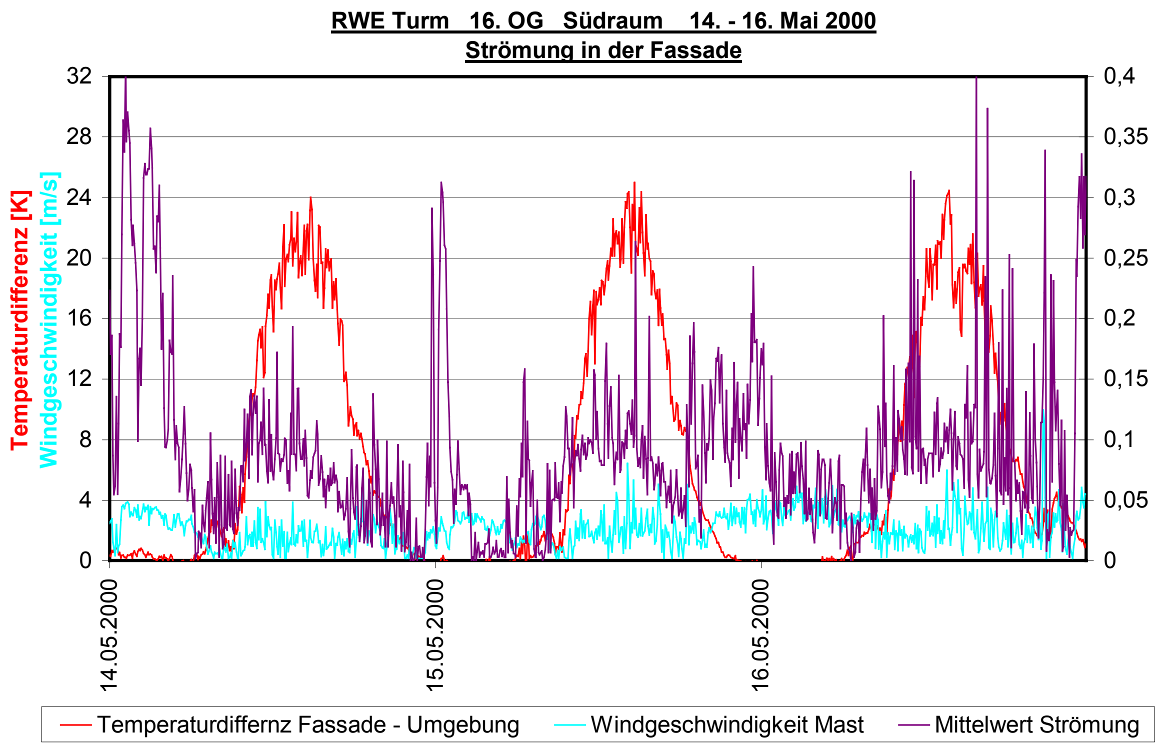

Bild 2.2-8: Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade, 5-Minuten Mittelwerte

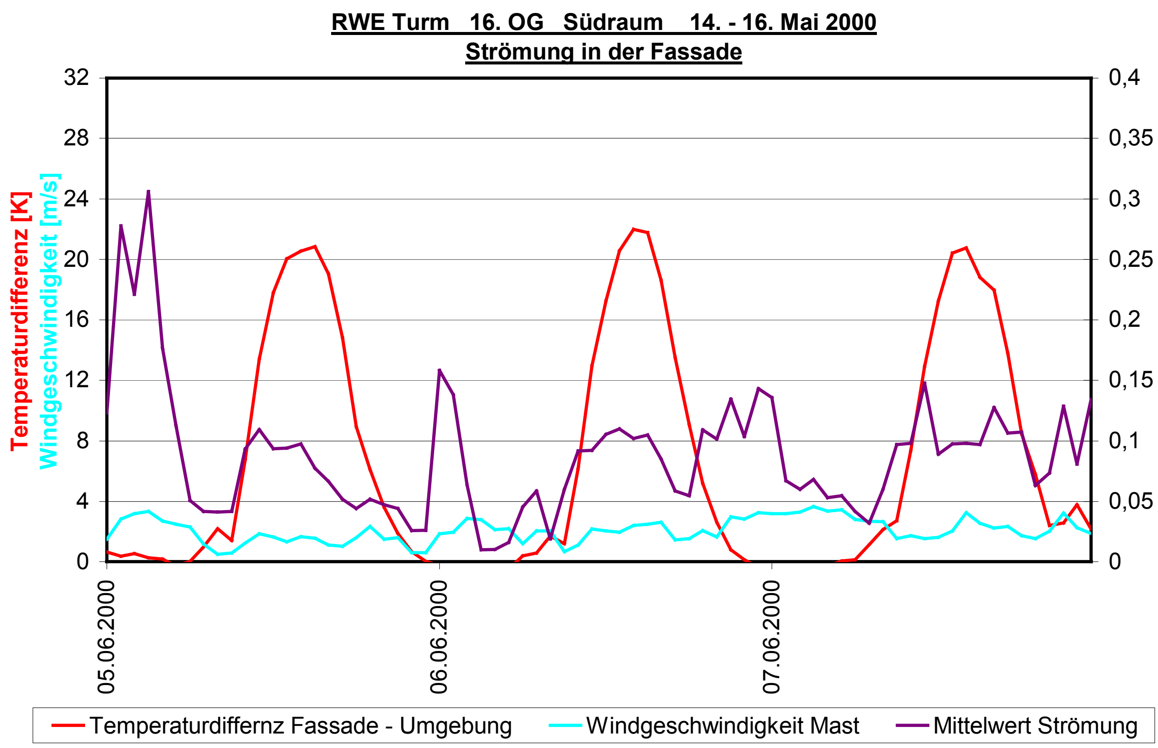

Bild 2.2-9: Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade, Stundenmittelwerte.

2.2.3 Natürliche Lüftung über die Doppelfassade

Bild 2.2-10 zeigt die bei den durchgeführten Luftwechselmessungen ermittelten Werte des Raumluftwechsels der beiden untersuchten Räume, des Nordraums im 1. OG und des Südraums im 16. OG. Der dargestellte Luftwechsel pro Stunde gibt das Volumen der ausgetauschten Luftmenge bezogen auf das Raumvolumen an. Die Messungen fanden jeweils an Samstagen zu Zeiten statt, in denen die Lüftungsanlage abgeschaltet war. Für die Messung wurden alle raumhohen Schiebefenster mit der zur Verfügung stehenden Spaltbreite von 10 cm geöffnet. Die Türen der Räume waren während des Messzeitraumes (ca. 30 Minuten) geschlossen.

Der hygienisch notwendige Luftwechsel hängt von der Zahl der im Raum arbeitenden Personen ab und beträgt nach DIN 1946 30 m³ bis 60 m³ pro Stunde und Person. Dieser Luftwechsel wurde bei allen Messungen erreicht. Die gemessenen Werte lagen bei 85% aller Messungen über dem für die Lüftungsanlage vorgesehenen Luftwechsel von 2,5 pro Stunde. Ein Luftwechsel von 2 wurde bei keiner Messung unterschritten. Der Mittelwert der Messungen beträgt 5,9 1/h. Die punktuellen Messungen zeigen, dass eine ausreichende Lüftung über die Fassade ohne zusätzliche Lüftungsanlage möglich ist.

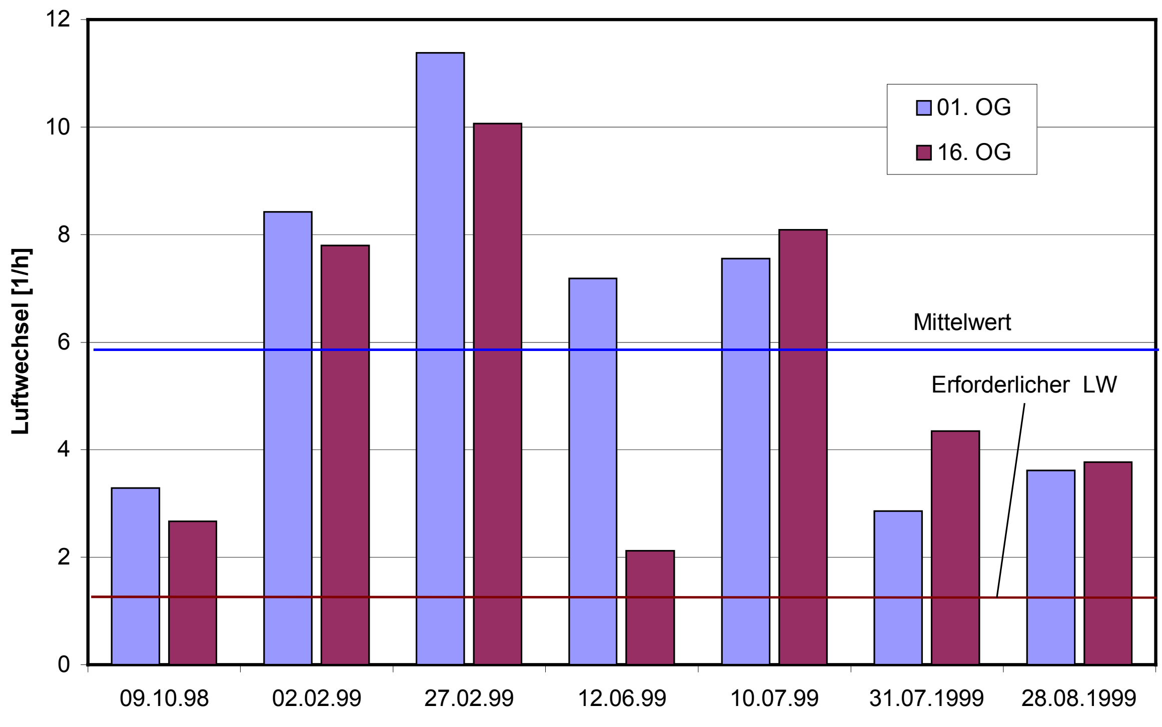

Bild 2.2-10: Fensterlüftung bei abgeschalteter Lüftungsanlage, Luftwechselmessung

2.3 Victoria Versicherung, Düsseldorf

Bauherr: Victoria Versicherung, Düsseldorf
Entwurf: HPP Düsseldorf
Fassadenplanung: Josef Gartner + Co., Gundelfingen
Haustechnik: Schmidt-Reuter-Partner, Köln
Bauphysik: Ingenieurbüro Memmert, Neuss
Fertigstellung: 1997

Im Jahre 1997 wurde das Erweiterungsgebäude der Victoria Versicherung fertiggestellt. Als weiteres Merkmal der Landeshauptstadt Düsseldorf entstand hier ein von den Architekten HPP (Hentrich, Petschnig + Partner) KG, Düsseldorf, geplantes Gebäudeensemble bestehend aus einem 109 m hohen Büroturm mit 29 Geschossen und einem sich daran anschließenden 6-geschossigen Gebäudekomplex. Von den rund 107.000 m² Geschossfläche befinden sich ca. 26.000 m² im Bereich des Hochhauses. Die übrige Fläche verteilt sich auf die flacheren Gebäudeteile [1], [15].

Das Hochhaus und die Fassade eines ca. 100 m langen Gebäuderiegels entlang der Fischerstraße sind mit einer Doppelfassade ausgestattet. Die Doppelfassade soll im Hochhaus durch Abbau der Windlastspitzen vor den öffenbaren Fenstern während ca. 60% des Jahres eine Fensterlüftung ermöglichen. Die Lüftung wird in der übrigen Zeit durch eine mechanische Be- und Entlüftungsanlage gewährleistet, die bei Bedarf zugeschaltet werden kann. Zur Kühlung werden im Hochhaus Deckensegel (Kühldecke) eingesetzt.

In dem Büroriegel, der hier messtechnisch untersucht wurde, bietet die Doppelfassade einen Lärmschutz gegen die stark befahrene Fischerstraße. Vermessen wurde ein nach Osten orientierter Büroraum im 4. OG.

Bild 2.3-1: Ansicht Fischerstraße, Fassadendetail EG

Die Lüftung erfolgt hier ausschließlich über die Fenster. Die Fassade besteht aus einem inneren Dreh-Kippfenster mit einer Wärmeschutzverglasung und einer ca. 35 cm vorgelagerten äußeren Glashaut aus 8 mm ESG-Verglasung (Bild 2.3-2). Im Fassadenzwischenraum ist der Sonnenschutz angeordnet. Lüftungsöffnungen befinden sich in den vertikalen Pfosten (Lisenen) der Außenfassade (vorzugsweise Zuluft) und hinter vertikalen Lamellen im Bereich der Geschossdecke (vorzugsweise Abluft). Die Fassade wird als Kastenfensterfassade typisiert. Der Doppelfassadenzwischenraum ist geschossweise getrennt. Zur Vermeidung von Schallübertragung ist jede Achse mit einer Verglasung getrennt.

Zur Kühlung der hinter der Doppelfassade gelegenen Büroräume wurde ein Bauteilkühlsystem eingebaut, bei dem die thermische Masse des Gebäudes für die Temperierung genutzt wird. Die Einbeziehung der Betondecke erlaubt es, durch die Speicherfähigkeit der Decke die Spitzenlast für die Kälteerzeugung zu minimieren. Die Kühlung kann kontinuierlich mit geringer Leistung betrieben werden. Ebenso können die geringeren nächtlichen Außentemperaturen für eine bessere Leistungszahl der Kälteerzeugung genutzt werden. Schallschutzelemente ersetzen eine abgehängte Decke. Zur Realisierung einer Betonkerntemperierung wurden wasserführende Leitungen ähnlich den Kunststoffrohren einer Fußbodenheizung in die Betondecke integriert und mit einer Vorlauftemperatur des Kühlwassers (bereitgestellt von einem Kühlaggregat) von ca. 19°C im 24-Stundenbetrieb beaufschlagt.

2.3.1 Messprogramm und Anordnung der Sensoren

Durch eine breit angelegte Messung in einem Büroraum konnte unter realen Betriebsbedingungen die Funktionsweise des integralen Fassaden- und Kühlkonzeptes überprüft werden. Der ausgewertete Messzeitraum betrug wie beim Siemens-Gebäude genau ein Jahr zwischen September 1997 und August 1998. In der Fassade wurden über 40 Messpunkte und im Raum mehr als 20 Messpunkte installiert. Ziel der Messung war es, die Lufttemperaturen, die Luftströmung in der Fassade, die Solareinstrahlung auf die Fassade, den Wärmefluss in die Decke und die Temperaturen der einzelnen Bauteile im Raum und in der Fassade zu erfassen. Reedkontakte und Lichtmessköpfe überwachten den Öffnungszustand der Fenster und des Sonnenschutzes. Zur Abschätzung des Fassadenluftwechsels wurde neben den Strömungsgeschwindigkeiten an den Fassadenöffnungen die Solareinstrahlung auf die Fassade erfasst.

Die Leuchten konnten nicht mit vermessen werden. Der Raum ist im hinteren Bereich mit Spiegelrasterleuchten und in Fensternähe mit Stehleuchten ausgestattet.

Tabelle 2.3-1: Geometrie und Nutzung, Messraum

Geometrie		
Grundfläche: 23 m²	Raumhöhe: 2,97 m	Geschosshöhe: 3,5 m
Fassadenfläche: 14,3 m²	Fensterfläche Innenfassade: 8,7 m²	Fensterfläche Außenfassade: 10,4 m²
Außenöffnungen unten 0,25 m²	Außenöffnungen oben: 1,62 m²	Wirksamer Öffnungsanteil: 6,3 %
Nutzung		
2 Personen	2 Rechner mit Monitor	Drucker, Messwerterfassung

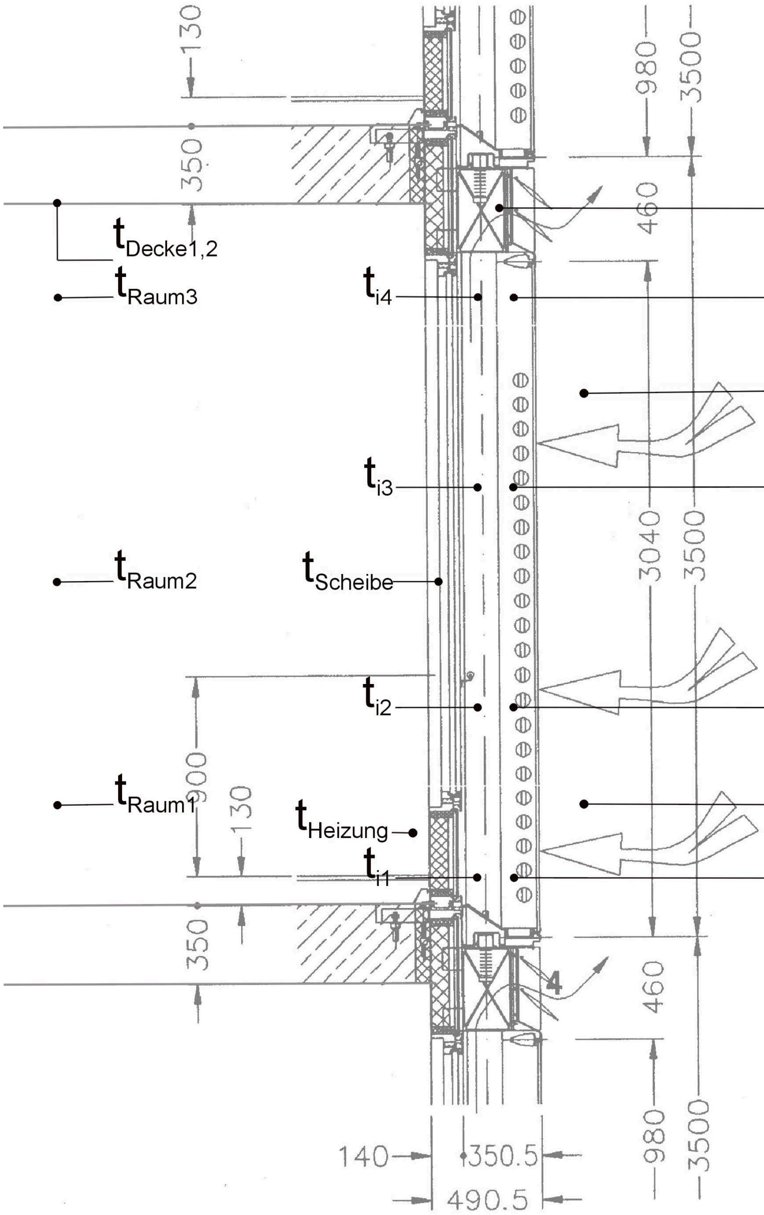

Bild 2.3-2: Temperaturmessstellen

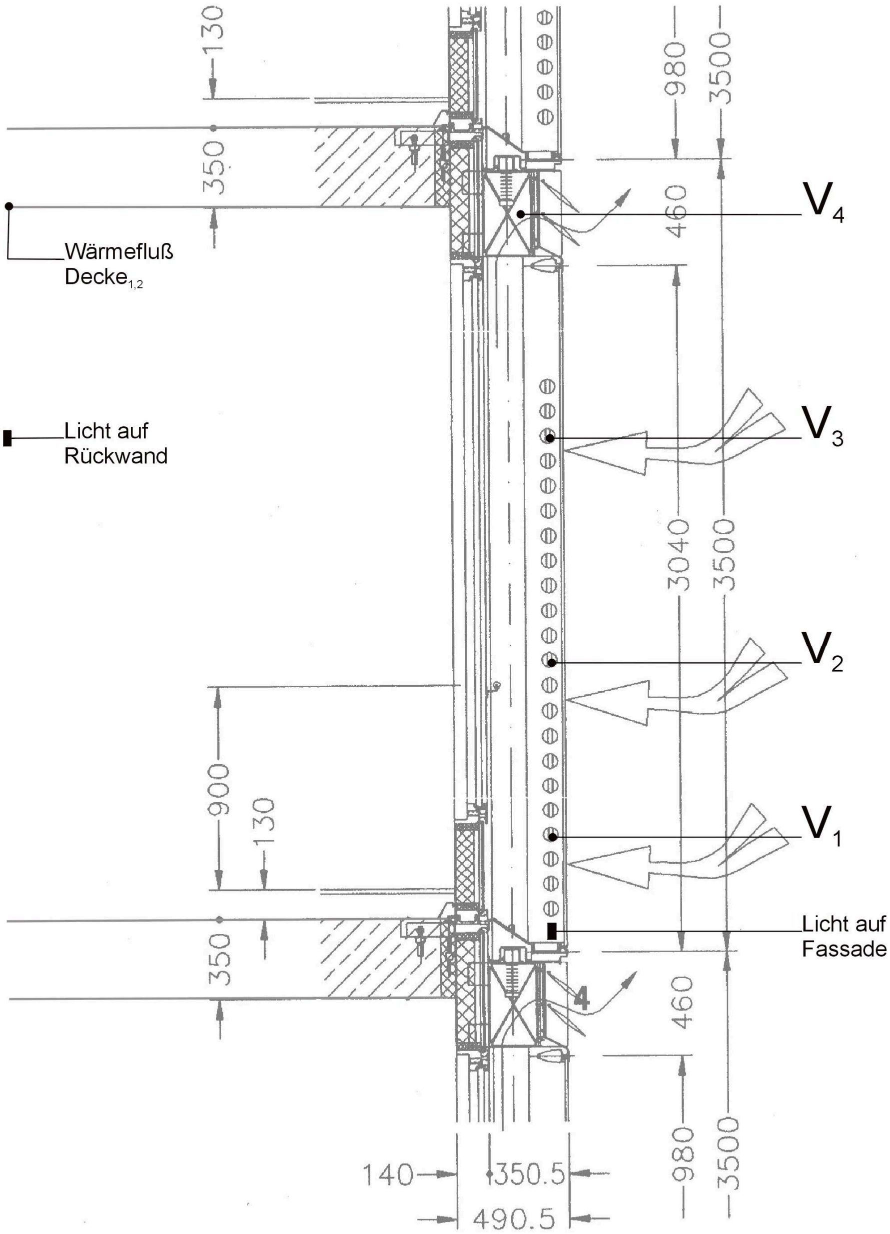

Bild 2.3-3: Weitere Messstellen außer Temperaturmessstellen

Tabelle 2.3-2: Verwendete Sensoren

Messzeitraum: 01.09.1997 bis 31.10.1998 Messintervall: 1 Minute, Aufzeichnungsintervall: 15 Minuten		
Messwert	**Anzahl**	**Sensor**
Temperatur	36	Thermoelemente mit Strahlungsschutz Klasse 1: Maximaler Fehler 1,1° oder 0,4 %
Strömung in der Doppelfassade	4	Thermoanemometer (Fa. TSI) Meßbereich einstellbar bis maximal 0 – 10 m/s Auflösung: 0,07 % vom selektierten Meßbereich Genauigkeit 3% vom Meßwert Zeitkonstante wählbar bis 10 s Temperaturbereich: 0 bis 60 °C
Wärmefluss in die Decke (Bauteiltemperierung)	2	Wärmeflussplatte (Fa. Ahlborn) zur Ermittlung der Wärmestromdichte Temperaturbeständig bis 80 °C Genauigkeit vom Eichwert: 5%
Licht zur Beurteilung des Öffnungszustandes des Sonnenschutzes	2	Lux-Sonde (Ahlborn) Spektr. Empfindlichkeit: 360 –760 nm Grundgenauigkeit: 5% vom Endwert Bereich 0 bis ca. 26.000 Lux, Auflösung 1 Lux Bereich 0 bis ca. 260.000 Lux Auflösung 10 Lux
Öffnungszustand von Fenstern und Tür	7	Reed-Kontakte (seperatat für Öffnung und Kippstellung der Fenster)
Strahlung auf die Fassade	1	Pyranometer Kipp u. Zonen CM 11 Messung im Fassadenzwischenraum

2.3.2 Strömung im Fassadenspalt

Der Luftwechsel im Fassadenspalt wurde abgeschätzt, indem an vier Messpunkten an den Luftein- und austrittsöffnungen der Fassade die Strömungsgeschwindigkeit der Luft mit Thermoanemometern gemessen wurde. Über die Fläche der Öffnungen lässt sich die Summe der ein- und austretenden Volumenströme berechnen. Der Abminderungsfaktor, der die Geschwindigkeitsverteilung in der Öffnung der Lisenen gegenüber der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt, wurde mit 0,9 hoch abgeschätzt, um einer Versperrung der Öffnung durch die Messgeräte Rechnung zu tragen. Der Abminderungsfaktor für die große Abströmöffnung wurde mit 0,55 angesetzt. Da die Luft sowohl zu als auch abströmt, berechnet sich der Fassadenluftwechsel aus der Hälfte aller über die Fläche der Öffnungen bestimmten Volumenströme (siehe auch Kapitel 4.3).

Die für die Luftströmung in der Fassade maßgeblichen Faktoren sind neben der Fassadengeometrie die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung. Wie auch in den Fassaden des Siemens-Gebäudes und des RWE-Turms zeigt sich der Einfluss von Wind und Temperaturdifferenz zur Außenluft. In Bild 2.3-4 wird deutlich dass auch zu Zeiten ohne nennenswerte Temperaturdifferenz Luftwechselzahlen des Fassadenzwischenraums von 40 bis 60 pro Stunde erreicht werden können. Die gleichzeitig dargestellte Windgeschwindigkeit wurde vom deutschen Wetterdienst am Flughafen in Düsseldorf gemessen. Bild 2.3-4 zeigt eine detaillierte Darstellung für zwei Tage als 15-Minuten Mittelwerte. Die Windgeschwindigkeit liegt in stündlichen Werten vor. Bild 2.3-5 zeigt Stundenmittelwerte für eine Periode von 6 Tagen. Die Fenster der Innenfassade waren im dargestellten Zeitraum geschlossen.

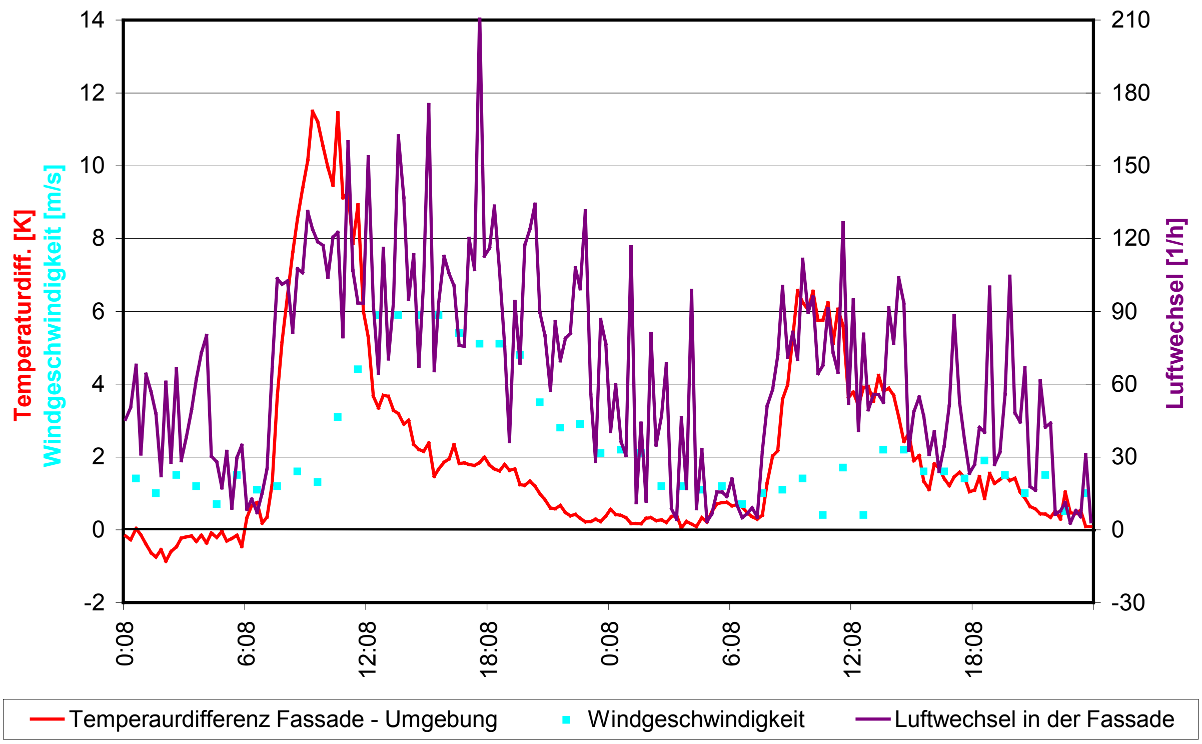

Bild 2.3-4: Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (Viertelstundenwerte) 19. und 20.08.1997

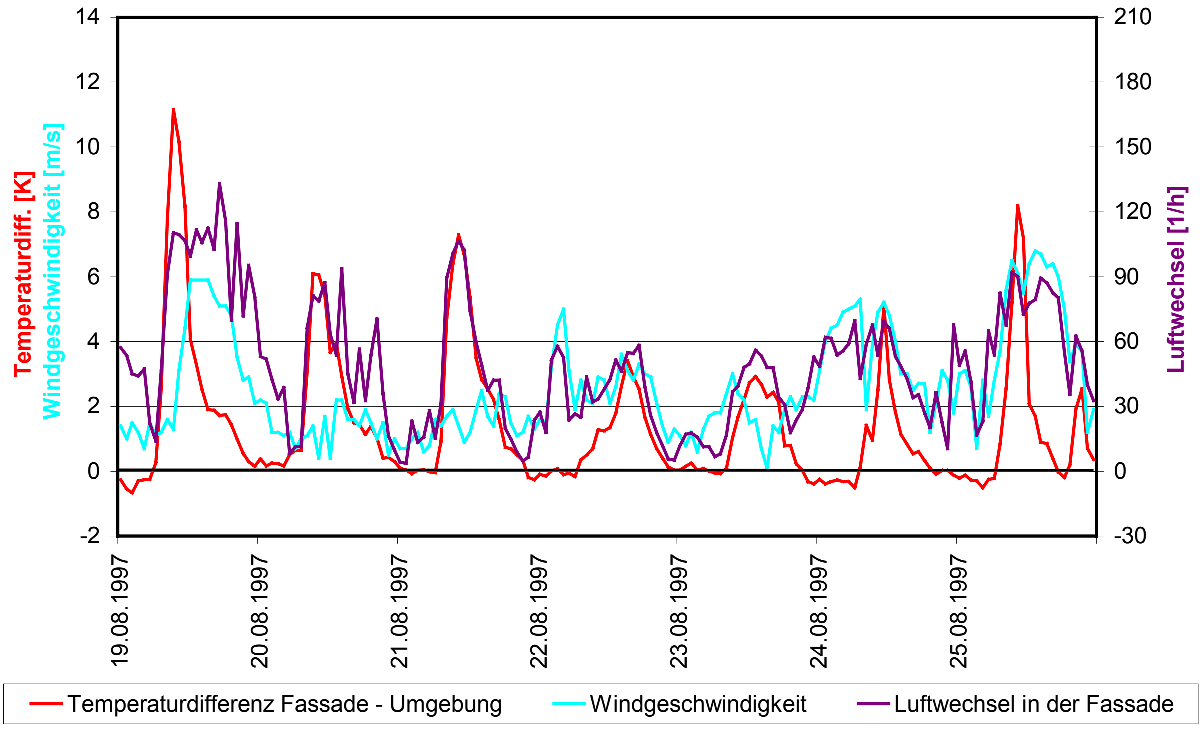

Bild 2.3-5: Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (Stundenmittelwerte)

2.3.3 Natürliche Lüftung über die Doppelfassade

Der Lehrstuhl für Stahlbau an der RWTH-Aachen, der bei der Auslegung der Fassade mitgewirkt hat, führte in dem gemessenen Büroraum parallel Luftwechselmessungen nach der Konzentrations-Abkling-Methode mit dem Spurengas SF6 durch. Die Messungen zeigen, dass der Mindestluftwechsel (30 m³ pro Person und Stunde) in 8 von 9 Messungen mit einem gekippten Fenster von drei Fenstern erreicht wurde (Bild 2.3-6). Der durchschnittliche Luftwechsel der Messungen liegt mit 2,1/h deutlich über dem notwendigen Luftwechsel. Die Heizung schaltet bei geöffnetem Fenster automatisch ab.

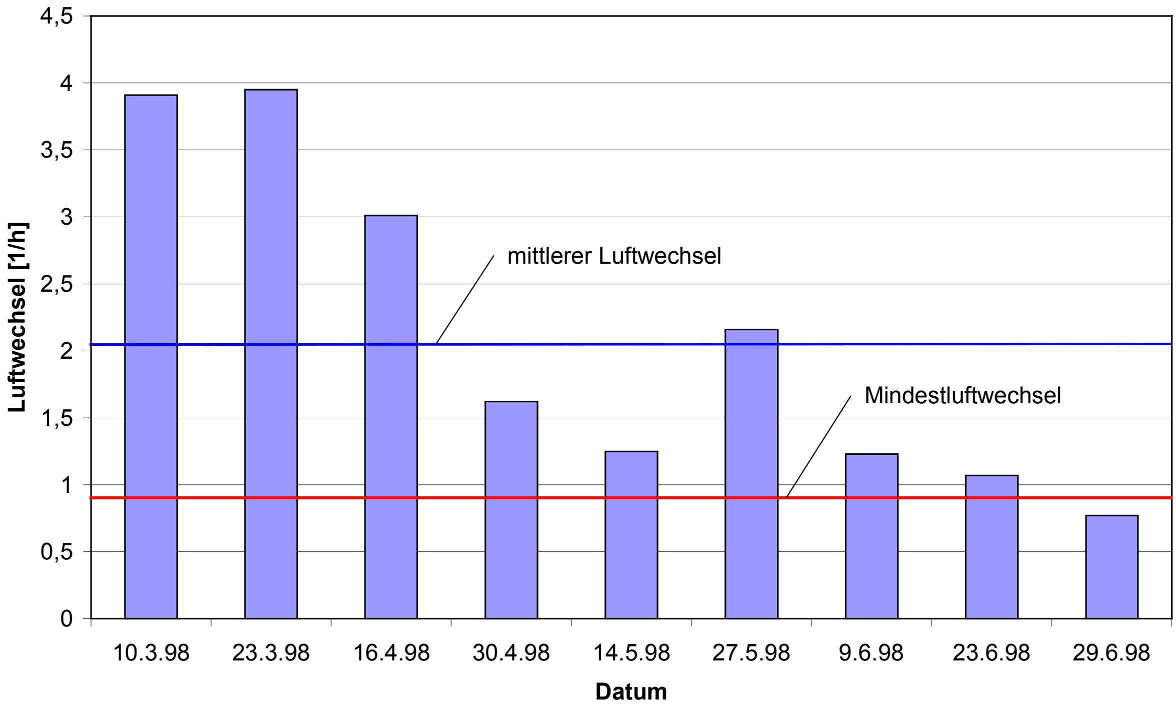

Bild 2.3-6: Natürlicher Luftwechsel bei einem gekippten Fenster

3 Natürliche Lüftung über die Fenster, Siemens-Gebäude

Für die in Kapitel 4 durchgeführte energetische Bilanzierung des Fassadenzwischenraumes des Siemens-Gebäudes ist eine Abschätzung der ausgetauschten Luftmenge zwischen Raum und Fassade notwendig, die hier erfolgen soll.

Die Luftwechselmessungen im Siemens-Gebäude wurden von meinem Kollegen C. Nolte durchgeführt und ausführlich in seiner Dissertation [26] ausgewertet. Da eine allgemeingültige Herleitung des Raumluftwechsels anhand der gemessenen Randbedingungen Schwierigkeiten aufwirft, soll hier noch einmal der Versuch unternommen werden, die Messdaten mit Hilfe der in Kapitel 5 für die Hinterlüftung der Fassade erfolgreich durchgeführten statistischen Auswertung mit dem „Generalized Additive Model“ von Hastie und Tibshirani [10] anzuwenden.

Zur Bestimmung der Luftwechselrate über die Fensterlüftung in den beiden untersuchten Räumen wurden in dem Call-Center (großer Raum) 52 Luftwechselmessungen und in einem Zweierbüro (kleiner Raum) 53 Luftwechselmessungen durchgeführt.

Die Messungen erfolgten mit einem ungiftigen und ungefährlichen Spurengas (SF6) nach der Konzentrations-Abklingmethode. Hierbei wird eine geringe Menge des Spurengases (Konzentration im ppm-Bereich, d.h. 10^{-6}) mit Hilfe einer Spritze in den Raum eingebracht und mit der Raumluft möglichst vollständig durchmischt. Dann werden bei gekippten Fenstern in Abständen von 5 bis 10 Minuten Proben der Raumluft genommen. Die Proben werden eingeschickt und die Konzentration des Spurengases mit Hilfe eines Gaschromatographen bestimmt. Aus dem Abklingen der Konzentration des Spurengases (englisch: tracer gas) wird die Luftwechselrate bestimmt. Apparative Einrichtungen werden vor Ort nicht benötigt. Ein Mitarbeiter der Universität hielt sich während des Messvorganges im Raum auf, brachte das Spurengas aus und nahm die Proben.

Tabelle 3-2 und 3-3 zeigen die Ergebnisse dieser Messungen für den großen und kleinen Raum. Eine ausführliche Auswertung der Luftwechselmessungen hat C. Nolte [26] in seiner Dissertation durchgeführt.

Um einen Zusammenhang zwischen dem Raumluftwechsel und den gemessenen Randbedingungen aufzuzeigen, können die Erfahrungen bei der Bestimmung des Luftwechsels im Doppelfassadenzwischenraum mit dem statistischen Modell (Generalized Additive Model) von Hastie und Tibshirani [10] unter Zuhilfenahme des Programms S-Plus 4.5 [42] herangezogen werden.

Die statistischen Auswertungen wurden iterativ durchgeführt. Die statistische Methode und Herangehensweise wird ausführlich in Kapitel 5 beschrieben, das sich mit der statistischen Auswertung des Luftwechsels bzw. des Luftvolumenstroms im Fassadenzwischenraum befasst. Da der Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und dem Raumluftwechsel in Kapitel 4 benötigt wird, wird diese statistische Auswertung hier ohne ausführliche Beschreibung vorgezogen.

Die verwendeten Einflussgrößen sind:

- Temperaturdifferenz zwischen Raum und Fassadenzwischenraum
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit

Die mittlere Temperatur im Fassadenzwischenraum wirkt bei dieser Fassade unmittelbarer auf den Raum als die Umgebungstemperatur. Eine starke Vermischung von Raumluft und der Luft im Fassadenzwischenraum wird ausgehend von der Anordnung der Fenster und der Lüftungsöffnungen nach außen vorausgesetzt. Wird der große Raum nur zur Südwestfassade gelüftet, stehen 375 m³ des Raumvolumens 14,6 m³ an Fassadenvolumen gegenüber. Für einen einfachen Raumluftwechsel ist also ein 25-facher Fassadenluftwechsel notwendig. Bei einem mittleren Fassadenluftwechsel von 123/h ist theoretisch ein 5-facher Raumluftwechsel möglich, der einem Mittelwert der Luftwechselmessungen von 3,26/h gegenüberseht. Die Antriebskräfte für den Luftwechsel im Raum sind die gleichen, die auch die Hinterlüftung der Fassade bestimmen.

Der Einfluss der Windrichtung ist stark von der Gebäudeausrichtung und -form abhängig und wird in 30° Schritten in Klassen unterteilt.

Für die Berechnung der Zielgröße Raumluftwechsel wird eine Wurzeltransformation durchgeführt (siehe auch Kapitel 5).

$$\sqrt{\text{Luftwechsel}} \sim \text{lo}(\Delta t) + \text{lo}(\text{Windge}) + \text{factor}(\text{Windri}) \qquad (3\text{-}1)$$

Die Einflussgrößen lo(Δt) und lo(Windge) werden für jeden Wert optimal bestimmt, während factor(Windri) für jede Windrichtungsklasse berechnet wird.

Die sich für die einzelnen Einflussgrößen ergebenden Graphen sind in den Bildern 3-1 bis 3-6 dargestellt. Für den großen Raum ergibt sich grundsätzlich ein größerer Einfluss größerer Werte von Δt und Windgeschwindigkeit auf den Raumluftwechsel. Für den kleinen Raum ist selbst dieser Zusammenhang nicht eindeutig ablesbar.

Histogramm, Kernel density plot, Boxplot und QQ plot sind in den Bildern 3-7 bis 3-14 dargestellt. Die Verteilung der Fehler könnte bei beiden Räumen bei einer sehr viel größeren Anzahl von Messpunkten normal verteilt sein. Die Lage der Residuen in der Nähe der eingezeichneten Geraden im QQ plot zeigt, dass die Wurzeltransformation sinnvoll war.

Insgesamt kann für die mit großem Aufwand erzeugte, im statistischen Maßstab jedoch relativ kleine Datenmenge, kein signifikanter Einfluss der zugrundegelegten Größen festgestellt werden. Die Pr(F) Werte, die bei einem signifikanten Einfluss unter 5%, also bei 0,05 liegen sollten, stellen sich wie folgt dar:

Tabelle 3-1: Pr(F) Werte

	Großer Raum Pr(F)	**Kleiner Raum Pr(F)**
lo(Dt)	0,6624	0,8400
lo(Windgeschwindigkeit)	0,4945	0,6243

Für die Auswertung wurden für den großen Raum 36 und für den kleinen Raum 38 Messungen berücksichtigt. Das Ergebnis der statistischen Auswertung all dieser Messungen ist, dass definitiv für die vorliegenden Daten keine sinnvolle (signifikante) Funktion zwischen den Einflussgrößen und der Zielgröße gefunden werden kann.

Eine Energiebilanz der Fassade, die zur Kalibrierung des Fassadenluftwechsels herangezogen werden soll, macht es trotzdem erforderlich, den Raumluftwechsel mit einzubeziehen. Ein sinnvoller Zeitraum mit ausreichender solarer Einstrahlung und gleichzeitig geschlossenen Fenstern, bei dem der Raumluftwechsel unberücksichtigt bleibt, stand in Messperiode nicht zur Verfügung.

Die einzige Möglichkeit, den Raumluftwechsel überhaupt zu berücksichtigen, besteht darin, die Luftwechselrate pro geöffnetem Fenster über eine möglichst große Anzahl von Messungen zu mitteln. Da der Anteil an Situationen mit einer Querlüftung des Raumes über zwei Fassaden oder mit einzelnen ganz geöffneten Fenstern bei den Luftwechselmessungen vernachlässigbar ist, wurden nur Messungen mit einseitig gekippten Fenstern berücksichtigt.

Für den großen Raum berechnet sich pro Fenster ein Mittelwert von 0,42/h. Eine Messung bei geschlossenen Fenstern ergab einen Fugenluftwechsel von 0,41/h. Dieser Wert wurde jedoch bei einer relativ hohen mittleren Windgeschwindigkeit von 7,1 m/s gemessen und wird für die weitere Berechnung mit 0,3/h abgeschätzt. Bei der separaten Berücksichtigung eines Fugenluftwechsel von 0,3/h reduziert sich der Luftwechsel pro Fenster auf 0,36/h. Der Mittelwert pro Fenster für den kleinen Raum liegt bei 1,64/h

Tabelle 3-2: Luftwechsel großer Raum

Großer Raum Datum	Messzeitraum	LW_{Raum} [1/h]	SW kipp	SW auf	SO kipp	SO auf	LW / Fenster	t_{Raum} [°C]	t_{Fass} [°C]	t_u [°C]	v_{Wind} [m/s]	WR [°]
20.08.97	10:38-11:38	0,90	9				0,10					
27.08.97	11:34-12:53	2,21	9				0,25					
03.09.97	11:45-12:30	1,41	9				0,16	25,1	23,6	21,5		
09.09.97	14:00-14:45	2,24	9				0,25					
02.10.97	11:18-12:18	1,68	4				0,42	23,6	21,9	19,6		
08.10.97	12:18-13:18	5,25	3		1			22,8	16,1	14,3		
15.10.97	13:45-14:30	4,10	9					21,2	10,1	8,3		
29.10.97	11:45-12:43	2,70	5				0,54	22,6	9,9	8,1		
05.11.97	14:30-15:30	4,01	9				0,45	23,8	20,4	8,5	1,8	0
12.11.97	12:30-13:15	3,33	9				0,37	23,6	18,0	8,8	2,1	79
19.11.97	10:48-11:46	2,78	7				0,40	23,4	11,5	9,1	1,7	292
26.11.97	16:00-16:30	2,76	9				0,31	22,2	11,9	6,9	2,2	124
03.12.97	13:15-14:15	3,23	9		1			22,9	9,8	6,1	4,8	45
10.12.97	12:45-13:30	4,72	9				0,52	22,0	4,9	2,0	2,4	314
17.12.97	19:00-19:45	2,89	9				0,32	22,5	10,6	9,3	8,1	169
07.01.98	14:30-15:15	5,10	6				0,85	22,0	1,6	-0,6	3,9	45
14.01.98	12:45-13:30	5,00	9				0,56	21,4	12,6	11,1	7,3	194
21.01.98	12:00-12:15	2,40	9				0,27	22,1	13,9	11,6	7,0	180
28.01.98	11:40-12:15	3,20	5				0,64	22,7	2,4	0,5	2,7	342
04.02.98	17:30-18:15	3,34	9				0,37	21,5	1,9	1,1	2,8	225
11.02.98	12:30-12-45	7,19	9				0,80	22,0	7,0	3,6	2,8	191
18.02.98	11:00-11:15	2,28	5				0,46	22,3	11,8	9,7	6,6	225
25.02.98	12:00-12:15	2,22	9				0,25	24,3	12,7	10,4	2,4	180
04.03.98	13:05-14:05	0,41	0					23,5	11,7	9,2	0,7	146
11.03.98	10:45-11:00	3,57	9				0,40	25,4	14,0	12,9	6,2	236
18.03.98	12:15-12:30	4,14	9				0,46	21,9	9,1	6,7	2,2	314
25.03.98	14:40-14:56	2,18	9		1			22,9	12,5	11,3	4,8	236
01.04.98	12:15-12:30	4,13	9				0,46	25,3	29,1	12,0	1,7	225
08.04.98	11:55-12:27	1,21	1				1,21	24,4	15,3	14,1	2,7	191
15.04.98	12:00-12:15	4,41	9				0,49	22,3	10,4	9,2	4,0	202
21.04.98	14:10-14:42	2,51	2	1				22,4	11,3	8,7	4,6	158
29.04.98	15:45-16:00	2,36	9				0,26	26,3	36,8	20,6	2,8	45
06.05.98	16:15-17:00	5,76	9				0,64	25,2	20,4	14,0	4,3	34
20.05.98	14:00-14:15	2,57	9				0,29	22,1	12,7	11,8	4,1	199
27.05.98	15:45-16:00	2,08	9				0,23	27,4	35,3	20,1	2,0	259
10.06.98	18:00-18:15	3,08	9				0,34	26,8	35,6	21,7	3,9	34
18.06.98	15:30-15:45	4,71	9				0,52	26,0	29,5	19,0	3,6	236
25.06.98	17:30-17:45	3,53	9				0,39	23,5	16,3	15,0	4,2	225
01.07.98	14:15-14:30	3,00	9				0,33	26,3	21,4	19,3	2,6	225
09.07.98	19:00-19:15	5,75	9				0,64	25,7	21,0	18,9	3,3	292
17.07.98	12:30-12:45	3,69	9				0,41	23,7	15,1	14,5	3,8	236
20.07.98	18:30-18:45	2,42	9				0,27	21,9	27,6	21,9	21,9	158
06.08.98	18:45-19:00	2,93	9				0,33	29,0	38,3	32,3	1,3	169
07.08.98	13:30-13:45	2,70	9				0,30	27,3	32,6	25,0	4,3	225
12.08.98	18:00-18:15	3,09	9				0,34	27,7	35,6	28,5	4,0	236
14.08.98	15:40-16:04	1,80	3				0,60	27,6	29,3	27,6	27,6	247
17.08.98	17:00-17:15	3,94	9				0,44	26,5	27,4	21,8	2,8	191
19.08.98	15:45-16:09	2,81			3	2		29,0	31,8	25,3	3,0	221
21.08.98	18:00-18:15	4,73	9				0,53	29,0	41,0	22,0	1,6	45
26.08.98	18:45-19:00	2,00	9				0,22	23,9	17,4	16,0	3,7	247
02.09.98	18:00-18:15	1,74	9				0,19	23,6	13,0	12,1	4,0	315

Tabelle 3-3: Luftwechsel kl. Raum

kl. Raum Datum	Messzeitraum	LW_{Raum}	SO kipp	LW / Fenster	t_{Raum} [°C]	t_{Fass} [°C]	t_u [°C]	v_{Wind} [m/s]	WR [°]
20.08.97	10:30-11:30	2,78	3	0,93					
27.08.97	11:30-13:00	1,60	3	0,53					
03.09.97	13:15-14:00	2,22	3	0,74	24,8	28,3	23,2		
09.09.97	15:30-16:00	3,76	3	1,25	22,9	20,3	19,0		
17.09.97	14:00-14:45	4,36	3	1,45	26,2	28,1	22,7		
02.10.97	13:15-14:00	3,89	3	1,30	23,0	18,5	13,8		
08.10.97	14:00-15:00	5,28	1	5,28	23,9	18,2	15,2		
15.10.97	12:30-13:00	3,92	3	1,31	22,0	12,8	8,9		
23.10.97	12:15-13:00	3,66	3	1,22	22,4	8,8	7,3		
29.10.97	13:45-14:30	5,04	3	1,68	20,8	11,0	9,1	2,4	23
05.11.97	13:30-14:00	6,07	3	2,02	21,5	12,3	10,2	2,6	0
12.11.97	13:45-14:30	3,32	3	1,11	22,2	11,5	9,6	2,2	281
19.11.97	12:15-13:00	3,41	3	1,14	20,5	14,7	7,3	3,7	90
26.11.97	14:45-15:15	4,64	3	1,55	18,6	8,0	7,1	4,3	45
03.12.97	14:45-15:30	3,33	3	1,11	20,5	4,3	1,8	2,3	326
10.12.97	13:45-14:45	2,67	2	1,34	22,0	11,2	9,4	7,2	180
17.12.97	17:45-18:15	4,89	3	1,63	16,3	-0,6	-1,0	4,2	45
07.01.98	13:15-14:00	5,50	3	1,83	23,2	13,2	11,8	6,4	191
14.01.98	11:30-12:00	3,90	3	1,30	23,4	12,6	11,0	5,1	176
21.01.98	10:45-11:20	5,00	3	1,67	19,3	1,2	0,6	2,5	0
28.01.98	13:15-13:45	4,21	2	2,11	20,7	2,6	1,1	2,4	191
11.02.98	11:45-12:00	7,16	3	2,39	21,7	13,2	9,8	8,1	224
18.02.98	10:00-10:30	1,94	1	1,94	25,1	18,2	8,0	2,1	169
25.02.98	11:00-11:15	2,74	3	0,91	22,1	11,3	8,5	0,5	232
04.03.98	12:00-12:30	2,56	1	2,56	23,2	15,8	15,3	8,6	191
11.03.98	12:15-12:30	5,26	3	1,75	21,7	10,3	7,0	6,1	146
18.03.98	12:45-13:00	5,44	3	1,81	22,7	13,5	11,6	4,8	236
25.03.98	12:15-12:30	2,66	3	0,89	24,7	23,9	12,4	2,6	90
01.04.98	13:00-13:30	0,72	zu		25,0	15,4	14,5	2,6	158
08.04.98	13:15-13:30	3,23	3	1,08	23,3	12,1	10,7	3,2	169
15.04.98	12:30-13:00	5,81	1	5,81	20,9	11,0	8,8	4,5	135
22.04.98	15:00-15:30	4,46	1	4,46	24,7	21,0	19,9	3,4	23
29.04.98	16:30-16:45	5,99	3	2,00	14,6	14,6	13,3	6,7	45
06.05.98	17:30-18:00	1,46	3	0,49	22,5	12,8	12,2	5,5	192
13.05.98	18:00-18:30	0,86	3	0,29	29,0	24,2	23,8	5,7	34
20.05.98	15:00-15:15	3,35	3	1,12	25,3	21,4	19,5	3,1	0
27.05.98	16:30-16:45	2,40	3	0,80	25,0	17,3	14,1	1,9	146
10.06.98	17:15-17:30	5,87	3	1,96	26,8	19,8	19,1	3,1	236
18.06.98	16:30-16:45	5,70	3	1,90	24,9	16,1	14,8	3,8	214
25.06.98	16:45-17:00	5,57	3	1,86	19,8	19,8	18,9	1,5	191
01.07.98	15:15-15:30	2,90	3	0,97	26,2	23,2	19,6	4,4	259
09.07.98	18:00-18:15	5,82	3	1,94	25,0	15,5	14,5	4,2	202
17.07.98	12:00-12:15	3,55	3	1,18	25,3	27,4	20,7	2,4	180
20.07.98	19:15-19:30	2,63	3	0,88	28,1	31,5	30,9	2,4	146
06.08.98	19:15-19:30	3,93	3	1,31	26,1	24,5	24,2	3,5	236
07.08.98	15:15-15:30	2,91	3	0,97	26,7	29,2	27,9	5,2	247
09.08.98	17:30-17:45	3,53	3	1,18	26,8	25,1	24,8	3,8	57
12.08.98	17:15-17:30	4,47	3	1,49	30,3	29,6	28,6	4,4	225
14.08.98	15:15-15-30	5,10	3	1,70	27,9	23,4	21,1	4,3	180
17.08.98	18:00-18:15	6,08	3	2,03	27,7	25,7	25,0	4,6	236
19.08.98	15:15-15:30	3,47	3	1,16	26,4	23,8	22,2	1,0	34
21.08.98	17:15-17-30	4,62	3	1,54	24,8	18,3	16,3	4,1	236
26.08.98	18:15-18:30	6,66	3	2,22	22,7	12,6	12,1	3,3	12

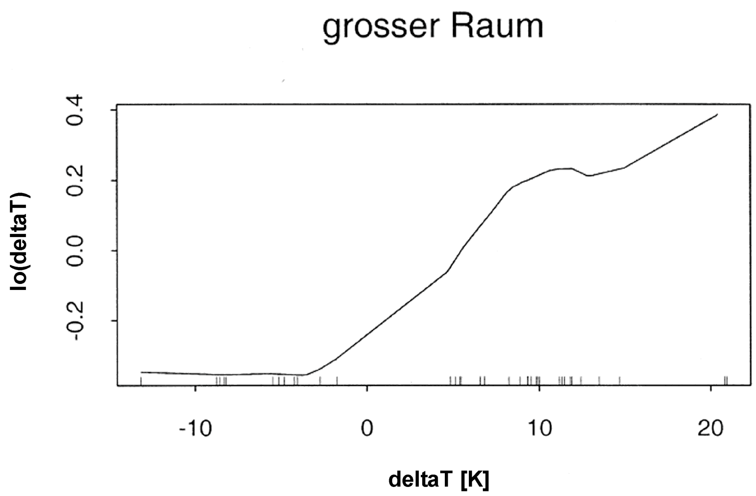

Bild 3-1: Einfluss der Temperaturdifferenz zum Fassadenzwischenraum großer Raum

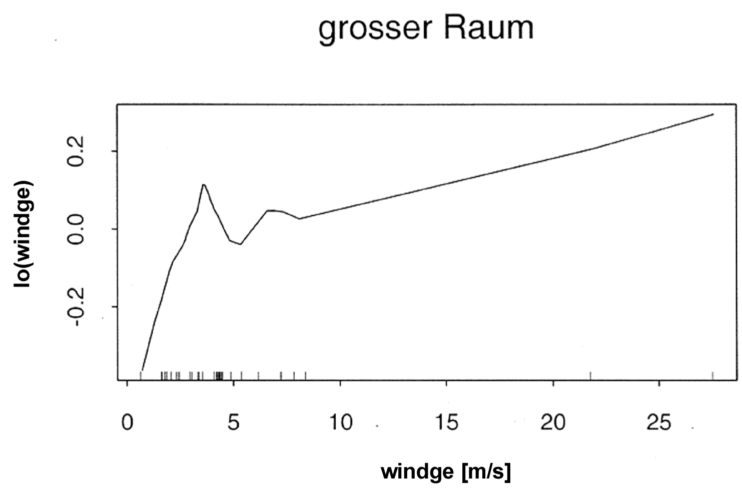

Bild 3-2: Einfluss der Windgeschwindigkeit, großer Raum

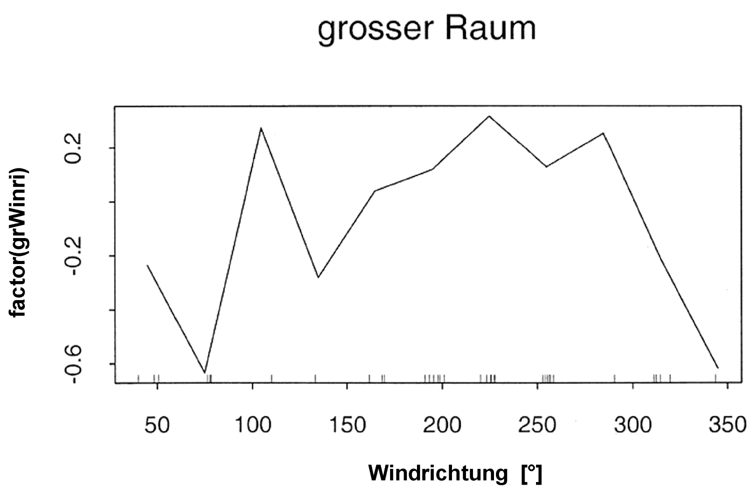

Bild 3-3: Einfluss der Windrichtung, großer Raum (gruppiert in 30° Schritten)

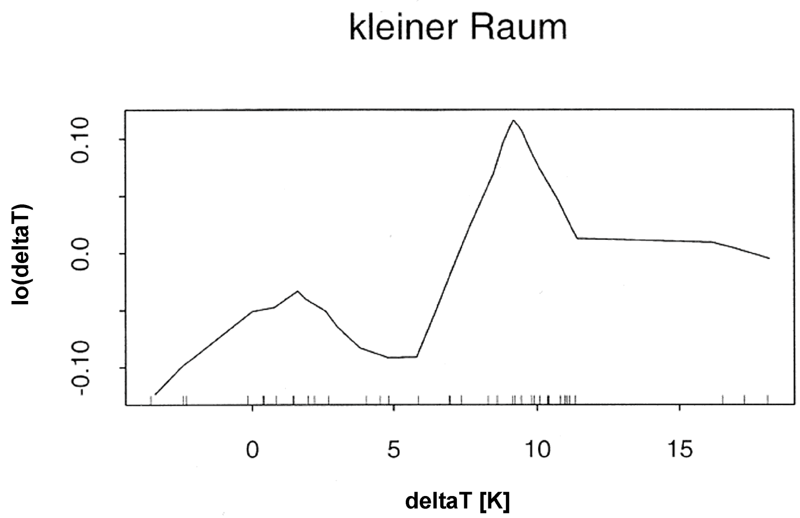

Bild 3-4: Einfluss der Temperaturdifferenz zum Fassadenzwischenraum, kleiner Raum

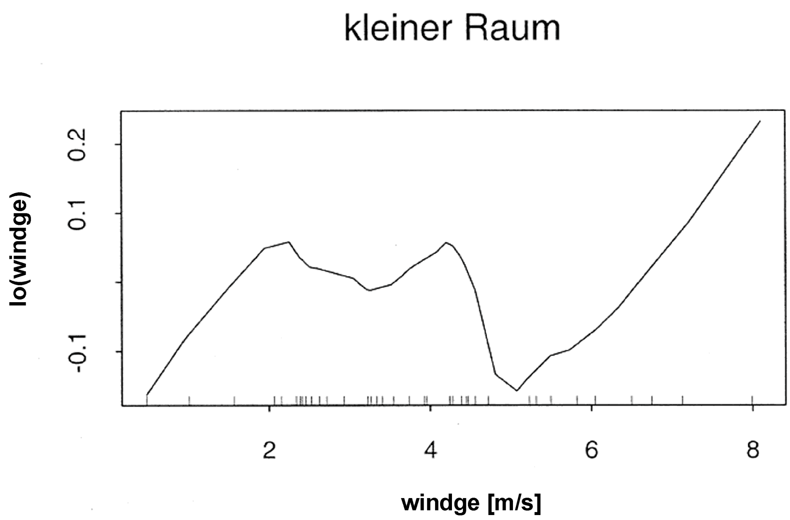

Bild 3-5: Einfluss der Windgeschwindigkeit, kleiner Raum

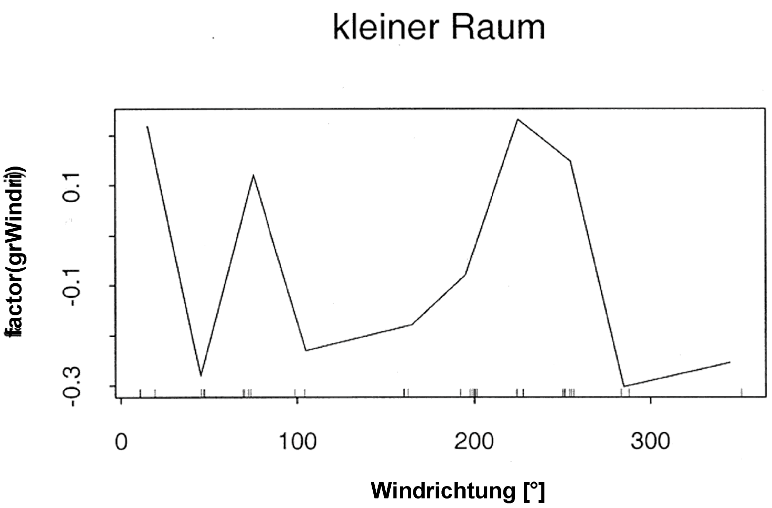

Bild 3-6: Einfluss der Windrichtung, kleiner Raum

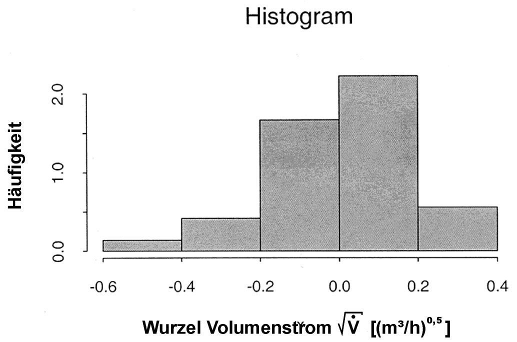

Bild 3-7: Histogramm, großer Raum

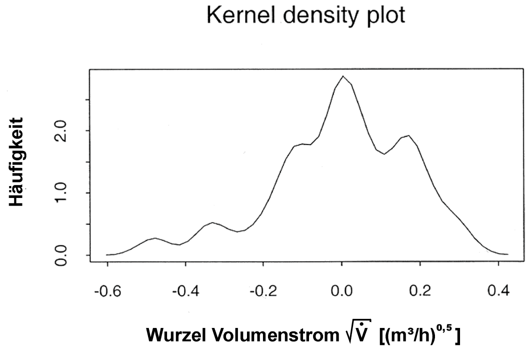

Bild 3-8: Kernel density plot, großer Raum

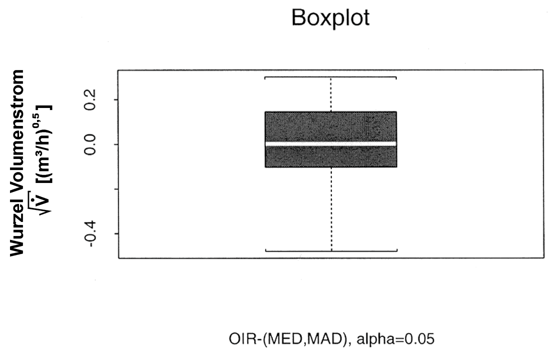

Bild 3-9: Boxplot, großer Raum

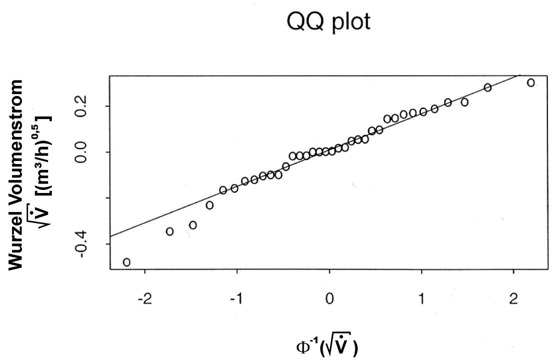

Bild 3-10: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung großer Raum

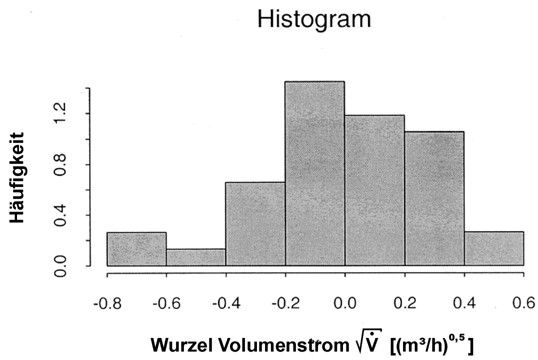

Bild 3-11: Histogramm, kleiner Raum

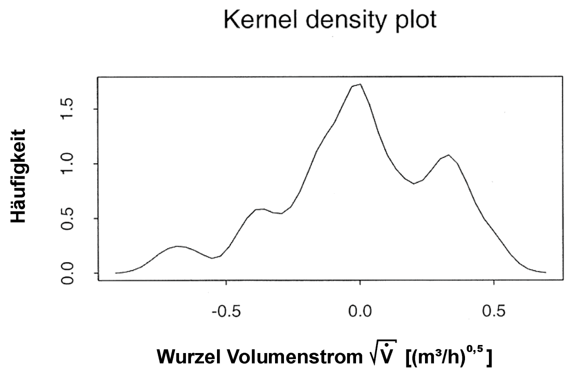

Bild 3-12: Kernel density plot, kleiner Raum

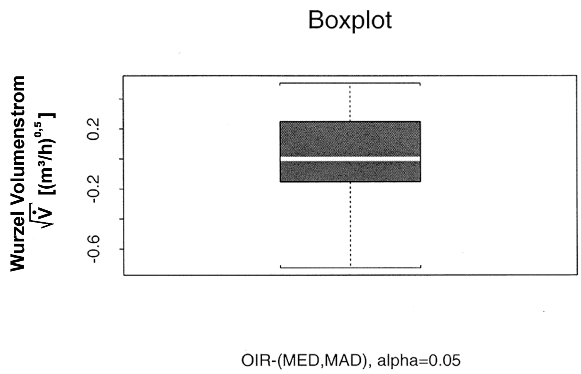

Bild 3-13: Boxplot, kleiner Raum

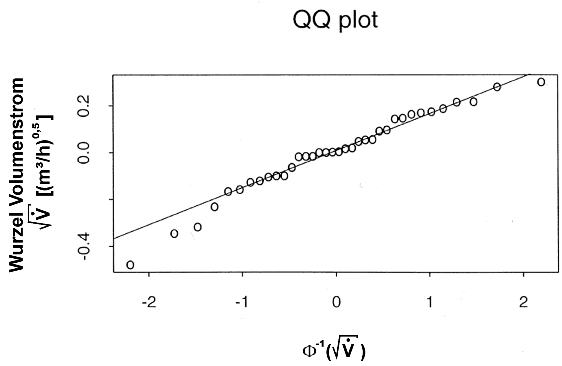

Bild 3-14: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung kleiner Raum

4 Bestimmung des Fassadenluftwechsels

Bei der Auslegung von Doppelfassaden spielt die Dimensionierung des Fassadenzwischenraumes und insbesondere der Lüftungsöffnungen eine wichtige Rolle. Sie bestimmen die sich einstellende Hinterlüftung und haben erheblichen Einfluss auf die zu erwartenden Temperaturen im Fassadenzwischenraum.

Neben der Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes bestimmen nur noch Materialkennwerte wie Glasart und Reflektionseigenschaften des Sonnenschutzes die thermischen Bedingungen in der Fassade. Gerade die Hinterlüftung ist jedoch wie in Kapitel 2 gezeigt, kurzzeitigen Schwankungen unterworfen und mit den bisher verwendeten Modellen, die den thermischen Auftrieb in der Fassade berechnen, nur unzureichend abzuschätzen.

Der Luftwechsel im Fassadenzwischenraum einer Doppelfassade wird in der Praxis zumeist über Modellversuche bestimmt oder mit Hilfe von Strömungssimulationen bei Windstille für extreme Situationen im Sommer abgeschätzt. Die Ergebnisse werden dann in einer dynamischen thermischen Simulation zur Bestimmung der Häufigkeiten von Temperaturüberschreitungen verwendet. Vorrausgesetzt wird dabei entweder eine konstante Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes, oder eine aus der Temperaturdifferenz zur Umgebung abgeleitete Hinterlüftung.

Da die sich tatsächlich einstellenden Bedingungen bisher nur unbefriedigend abgebildet werden können, ist es umso wichtiger, belastbare Messwerte, die über einen größeren Zeitraum erfasst wurden, vorzulegen.

Im Gebäude der Victoria Versicherung konnten vier Thermoanemometer zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft direkt an den Öffnungen der Fassade platziert werden. Über einen Abminderungsfaktor für die Geometrie und den Querschnitt der Öffnung lässt sich hier direkt der Luftvolumenstrom in der Fassade bestimmen.

Für das Siemens-Gebäude und den RWE-Turm lässt sich die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes nicht direkt bestimmen. Hier standen pro vermessener Fassade nur jeweils zwei Messpunkte für die Luftströmungsgeschwindigkeit im Fassadenzwischenraum, der frei durchströmt wird, zur Verfügung. Nur über eine genaue Erfassung der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt der Fassade wäre es möglich, aus den Messwerten direkt einen Luftwechsel des Fassadenzwischenraumes zu bestimmen.

Wie schon in Kapitel 2.2.4 am RWE-Turm gezeigt wurde, weicht die Strömung in der Doppelfassade lokal stark ab und zeigt insgesamt ein chaotisches Verhalten. Da eine massive Anordnung von Messstellen den Strömungsquerschnitt lokal an der Messstelle verringert, was zu falschen Messergebnissen führt, und Thermoanemometer nicht in beliebiger Anzahl zur Verfügung standen, wurde der Umweg über eine thermische Bilanzierung gewählt, um dennoch zu richtigen Ergebnissen für die Hinterlüftung der Fassade zu kommen.

Über eine Messung an zwei Punkten in der Doppelfassade lässt sich nur dann ein Volumenstrom in der Fassade bestimmen, wenn der Zusammenhang zwischen gemessener Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom im Mittel richtig kalibriert ist. Bei einer Kalibrierung wird die Energiebilanz des Fassadenzwischenraumes vorgenommen, bei der der Luftwechsel der Fassade im Mittel so bestimmt wird, dass der erste Hauptsatz der Thermodynamik erfüllt ist, d.h. die Summe aller in die Doppelfassade ein- und austretenden Energieströme im Mittel null ergibt.

Eine energetische Bilanzierung umfasst die solaren Gewinne Q_{St}, die Transmission zum an die Fassade grenzenden Raum $Q_{Tr\ Raum}$, die Transmission zur Umgebung $Q_{T\ u}$, die Lüftungswärme zum Raum $Q_{LW\ Raum}$ und die Lüftungswärme zur Umgebung $Q_{LW\ u}$. Über einen längeren Zeitraum, der zulässt, die thermische Masse der Fassade zu vernachlässigen, ergibt sich für die Summe der ausgetauschten Energien:

$$Q_{St} + Q_{T\ Raum} + Q_{T\ u} + Q_{LW\ Raum} + Q_{LW\ u} = 0 \qquad (4\text{-}1)$$

Bis auf die über die Lüftung zur Umgebung ausgetauschte Energie $Q_{LW\ u}$ lassen sich alle Größen anhand der Messergebnisse ermitteln. Gleichzeitig korreliert $Q_{LW\ u}$ mit dem Luftvolumenstrom, mit dem der Fassadenzwischenraum hinterlüftet wird.

$$\dot{Q}_{LW\ u} = \dot{V}_u * \rho * c_p * \Delta t \qquad \text{, bzw .} \qquad (4\text{-}2)$$

$$\dot{V}_u = Q_{LW\ u} / (\rho * c_p * \Delta t) \qquad (4\text{-}3)$$

Der über die Energiebilanz errechnete Volumenstrom $\dot{V}_u$ in der Fassade muss über einen Faktor mit den im Fassadenzwischenraum gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten übereinstimmen. Diesen Faktor stellt der aerodynamisch wirksame Querschnitt in der Fassade dar, der mit der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit v durchströmt wird.

$$\dot{V}_u = v * A_{Querschnitt} \qquad \text{, bzw.} \qquad (4\text{-}4)$$

$$A_{Querschnitt} = \dot{V}_u / v \qquad (4\text{-}5)$$

Wird dieser Querschnitt durch eine thermische Bilanz über einen sinnvollen Zeitraum kalibriert, kann der Volumenstrom in der Fassade während der gesamten Messperiode über die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten abgeschätzt werden. Dieser Zeitraum muss so bemessen sein, dass die thermische Trägheit der Fassade vernachlässigbar wird.

Sinnvolle Werte für den aerodynamisch wirksamen Querschnitt liegen je nach Anordnung der Messpunkte bei 30 % bis 70 % des Fassadenquerschnitts.

4.1 Siemens-Gebäude

Zur Bestimmung des Fassadenluftwechsels wurden in der Südwestfassade zwei Thermoanemometer zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade eingesetzt. Die Strömung wurde im Messgerät kontinuierlich gemittelt. Im Messzyklus wurden Minutenmittelwerte abgefragt und alle 15 Minuten als Mittelwerte gespeichert. Die Anordnung aller verwendeten Messstellen ist in Bild 2.1-3 und 2.1-4 dargestellt.

Eine Energiebilanz der Doppelfassade umfasst solare Gewinne, Lüftungswärme und Transmissionswärme. Alle Werte sind spezifisch auf einen Quadratmeter der Fassadenfläche bezogen.

Als Bilanzzeitraum wurde ein der Zeitraum vom 06.8. bis 12.8. 1998 gewählt. Dieser Zeitraum weist hohe solare Gewinne, gleichmäßig geöffnete Fenster und einen permanent geschlossenen Sonnenschutz auf. Gemittelt ergibt sich;

$$\dot{Q}_{St} + \dot{Q}_{T\,Raum} + \dot{Q}_{T\,u} + \dot{Q}_{LW\,Raum} + \dot{Q}_{LW\,u} = 0 \qquad (4.1\text{-}1)$$

Die einzelnen Komponenten der Gleichung wurden, wie folgt, ermittelt:

4.1.1 Solare Gewinne Q_{St}

Die Globalstrahlung wurde auf dem Dach des Gebäudes gemessen und muss auf die Südwestfassade umgerechnet werden, wobei der g-Wert der äußeren Verglasung von 0,87 sowie die Abminderung durch die Pfosten der äußeren Fassade mit 0,95 berücksichtigt werden müssen. Der Absorbtionsgrad a des Systems Fassade und Sonnenschutz bestimmt dann den Anteil der im Fassadenzwischenraum absorbierten Sonnenenergie.

$$\dot{Q}_{St} = \dot{Q}_{St\,SW} * g * 0{,}95 * a \qquad (4.1.\text{-}2)$$

Die Umrechnung von horizontal gemessener Strahlung auf die Einstrahlung senkrecht auf die Südwestfassade $Q_{St\ SW}$ erfolgt mit einem auch im Simulationsprogramm TRNSYS verwendeten Algorithmus. Nach dem Modell von Liu und Jordan [20] wird die Strahlung in einen direkten und indirekten Anteil zerlegt. Die direkte Strahlung auf die Fassade wird entsprechend dem Azimut und Zenitwinkel der Sonne berechnet [6]. Der diffuse Anteil senkrecht zur Fassade wird unter Berücksichtigung des Perez Himmelsmodells ermittelt [35]. Bild 4.1-1 zeigt die auf dem Dach gemessene Strahlung und die für die Südwestfassade berechnete Einstrahlung.

Die Ermittlung des absorbierten Anteils der Sonneneinstrahlung berücksichtigt die durch die Reflexion der verwendeten Materialien reflektierte Strahlung und die durch die Doppelfassade in den Raum transmittierte Strahlung.

$$\alpha = 1 - \rho - \tau = 0{,}55 \qquad (4.1\text{-}3)$$

Der reflektierte Anteil wird um einen abgeschätzten z-Wert des Sonnenschutzes von z=0,75 vermindert, da die Annahme getroffen wird, dass hinter dem Sonnenschutz keine Strahlung mehr nach außen reflektiert wird. Als Reflexionsgrad wurde für die Metallverkleidung der Fassade ein Wert von 0,45 und für den Sonnenschutzes ein Wert von 0,5 aus Katalogwerten ermittelt. Unter Berücksichtigung der Verschmutzung wird pauschal mit einem Wert von 0,45 gerechnet. Der g-Wert der Innenverglasung wird mit 0,65 berücksichtigt.

$$\rho = 0{,}45 * z \qquad (4.1\text{-}4)$$

$$\tau = A_{Fenster} / A_{Fass} * z * g_{Raum} \qquad (4.1\text{-}5)$$

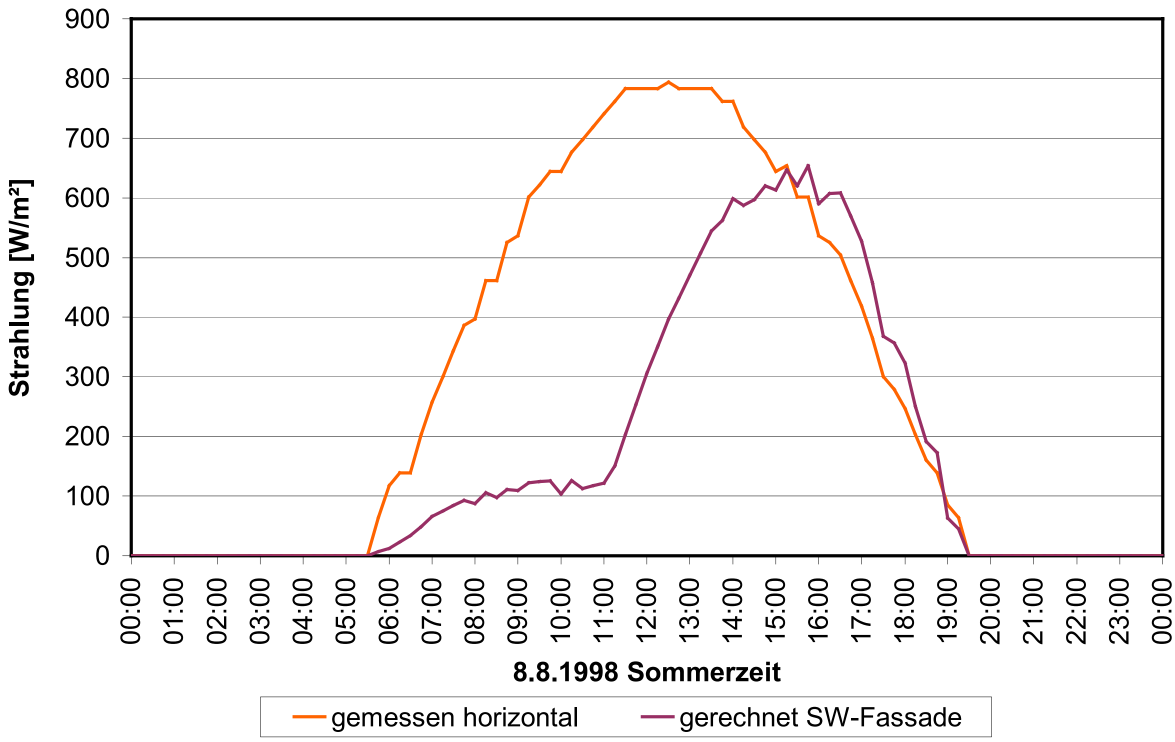

Bild 4.1-1 Gemessene Strahlung und Umrechnung auf SW-Fassade

4.1.2 Transmission zum an die Fassade grenzenden Raum $Q_{Tr\ Raum}$

Die Wand zwischen Doppelfassade und angrenzendem Büroraum besteht aus einem gedämmten Brüstungsbereich, Fensterflächen, einem gedämmten Deckenbereich und gedämmten Stützen. Der Wärmefluss über Brüstungs-, Decken- und Fensterbereich wird getrennt ermittelt, wobei die jeweils in der Fassade vor dem Bauteil gemessene Lufttemperatur auf der Fassadenseite und die mittlere Raumlufttemperatur auf der Raumseite herangezogen werden. Die vom Boden bis zur Decke durchlaufenden Stützen werden anteilmäßig den Bereichen zugeschlagen.

$$\dot{Q}_{T\ Raum} = \dot{Q}_{T\ Brüstung} + \dot{Q}_{T\ Fenster} + \dot{Q}_{T\ Decke} \qquad (4.1\text{-}7)$$

Die einzelnen Wärmeflüsse berechnen sich entsprechend den in Tab. angegebenen Flächenanteilen. Für den Fensterbereich wird ein u-Wert der Scheibe von 1,4 W/(m²K) und des gesamten Fensters von 1,5 W/(m²K) und ein Stützenanteil (u = 0,43 W/(m²K)) von 14 % zugrundegelegt.

$$\dot{Q}_{T\ Brüstung} = A_{Br} / A_{Fa} * u_{Br} * (t_{Raum} - t_{i1}) \quad (4.1\text{-}8)$$

$$\dot{Q}_{T\ Fenster} = A_{Br} / A_{Fa} * u_{Fe} * (t_{Raum} - t_{i2}) \quad (4.1\text{-}9)$$

$$\dot{Q}_{T\ Decke} = A_{Br} / A_{Fa} * u_{De} * (t_{Raum} - t_{i3}) \quad (4.1\text{-}10)$$

Tabelle 4.1-1: Südwestfassade, gr. Raum:

	Fläche	u-Wert	Anteil A / A_{Fa}
Brüstungsbereich	7,9 m²	0,43	0,16
Fensterbereich	29,9 m²	1,35	0,61
Deckenbereich	11,0 m²	0,43	0,23
gesamt	48,8 m²		1,00

Die u-Werte wurden nach DIN 4108 [5] berechnet. Bei der Berechnung der Wärmeflüsse für einen bestimmten Zeitpunkt (die Messwerte wurden im Viertelstundentakt aufgezeichnet) kann durch den Einfluss der thermischen Masse eine Abweichung zwischen berechnetem und tatsächlichem Wärmefluss auftreten. Wird jedoch über einen größeren Zeitraum bilanziert, wie es hier zur Kalibrierung der gemessenen Strömung in der Doppelfassade durchgeführt wird, relativieren sich diese Fehler wieder.

4.1.3 Transmission zur Umgebung $Q_{T\ u}$

Für die Berechnung der durch Wärmetransmission vom Fassadenzwischenraum zur Umgebung ausgetauschten Energie werden die gemessenen Lufttemperaturen in der Fassade vor der Außenscheibe und die vor der Fassade gemessene Umgebungstemperatur zugrundegelegt.

$$\dot{Q}_{T\ u} = 5.8\ W/(m^2K) * (tu - (t_{a1} + t_{a2} + t_{a3})/3\ ) \quad (4.1\text{-}11)$$

4.1.4 Lüftungswärme zum Raum $Q_{LW\ Raum}$

Der Wärmestrom über den Luftaustausch zwischen dem Raum und der Doppelfassade lässt sich nur näherungsweise abschätzen. Die Anzahl der geöffneten Fenster der Innenfassade werden zwar von der Messwerterfassungsanlage protokolliert, die tatsächliche Höhe der Luftwechselrate kann jedoch, wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, nicht explizit aus den gemessenen Randbedingungen abgeleitet werden.

Um dennoch im Mittel zu verwendbaren Ergebnissen zu kommen, wurde der mittlere Luftwechsel des Raumes, bezogen auf die Anzahl der geöffneten Fenster, aus den in diesem Raum durchgeführten 50 Luftwechselmessungen bestimmt. Die Luftströmung zwischen Raum und Fassade variiert je nach Temperaturverteilung über die Höhe der Doppelfassade. Um im Mittel richtig zu liegen, wird der Mittelwert der im Fassadenzwischenraum vor der Innenfassade liegenden Temperaturfühler für die Bilanz verwendet.

$$\dot{Q}_{LW\,Raum} = \dot{V}_{Raum} * \rho * c_p * (t_{Raum} - (t_{i1} + t_{i2} + t_{i3})/3) \qquad (4.1\text{-}13)$$

Der in Kapitel 3 ermittelte mittlere Luftwechsel pro geöffnetem Fenster beträgt 0,36 1/h. Ein Raumluftwechsel von 0,3 1/h über Undichtigkeiten der Fassade wird als Sockel zugrundegelegt. Der Luftwechsel wird, auch wenn im Bilanzzeitraum keine winterlichen Temperaturdifferenzen auftreten, nicht zu hoch angesetzt, da zeitweise auch Querlüftungseffekte vorausgesetzt werden. Der auf einen m² Fassadenfläche bezogene Luftvolumenstrom zwischen Fassadenzwischenraum und dem angrenzenden Raum berechnet sich aus dem Luftwechsel pro Fenster $LW_{Fenster}$, der Anzahl der geöffneten Fenster n, dem Raumvolumen V_{Raum} und der Fassadenfläche A_{Fass}.

$$\dot{V}_{Raum} = (LW_{Fenster} * n + 0{,}3/h) * V_{Raum} / (A_{Fass} * 3600s/h) \qquad (4.1\text{-}14)$$

Der Fassadenbereich, in dem gemessen wurde, hat insgesamt 9 Fenster und das Raumvolumen beträgt 214 m³.

Die beliebige Verteilung von geöffneten und geschlossenen Fenstern entlang der Fassade kann zu unterschiedlichen Temperaturen im Fassadenzwischenraum führen. Da die Temperaturen in der Doppelfassade nur in einer Achse gemessen wurden und die Luft in dem nur an den Gebäudeecken abgeteilten Fassadenkorridor frei strömt, sollte für eine korrekte Bilanz ein Zeitraum mit möglichst wenigen, oder möglicht vielen geöffneten Fenstern gewählt werden.

Der Anteil der im Bilanzierungszeitraum über die Fensterlüftung insgesamt ausgetauschten Energie betrug ca. 23 % der insgesamt über die Bilanzgrenze der Fassade erfassten Energie (Tabelle 4.1-2). Da die Fensterlüftung tagsüber als Kühlung für die Fassade wirkt, nachts aber über die Nachtlüftung des Raumes der Fassade Energie zugeführt wird, gleichen sich die Energieströme aus, so dass in der Summe ein Anteil von ca. 2 % verbleibt.

4.1.5 Lüftungswärme zur Umgebung $Q_{LW\,u}$

Zielgröße der Wärmebilanz der Fassade, mit der die Hinterlüftung der Fassade kalibriert wird, ist die über die Lüftungswärme zur Umgebung ausgetauschte Energie. Dieser Lüftungswärmestrom berechnet sich aus dem Volumenstrom zwischen Fassade und Umgebung und der Differenz zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur der Luft. Wie schon gezeigt wurde, hat der Wind einen erheblichen Einfluss auf die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes. Die Luftströmung verläuft deshalb nicht notwendigerweise von unten nach oben. Trotzdem ist der Fassadenzwischenraum ist zu 98,5 % wärmer als die Umgebung. Am Luftaustritt herrscht also, wenn die Fassade Energie an die Umgebung abgibt, eine höhere Temperatur als am Lufteintritt.

Um die Bilanz richtig zu bestimmen, kann nicht die mittlere Temperatur im Fassadenzwischenraum herangezogen werden, sondern es muss mit der jeweils größeren Temperatur in der Nähe einer der Lüftungsöffnungen gerechnet werden.

$$\dot{Q}_{LW\,u} = \dot{V}_u * \rho * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3})) \quad (4.1\text{-}15)$$

Der Volumenstrom berechnet sich aus dem Mittelwert der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und einer der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit zugeordneten aerodynamisch wirksamen Querschnittsfläche in der Fassade.

$$\dot{V}_u = v * A_{Querschnitt} \quad (4.1\text{-}16)$$

In der Wärmebilanz der Fassade ist der aerodynamisch wirksame Querschnitt, der den Strömungsmessgeräten zugeordnet wird, die einzige Unbekannte. Wird dieser Querschnitt durch eine thermische Bilanz über einen sinnvollen Zeitraum kalibriert, kann der Volumenstrom in der Fassade während der gesamten Messperiode über die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten abgeschätzt werden.

$$A_{Querschnitt} = \dot{V}_u / v \quad (4.1\text{-}17)$$

$$= \dot{Q}_{LW\,u} / (\dot{V}_u * \rho * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3}) * v) \quad (4.1\text{-}18)$$

$$= -(\dot{Q}_{St} + \dot{Q}_{T\,Raum} + \dot{Q}_{T\,u} + \dot{Q}_{LW\,Raum}) / (\dot{V}_u * \rho * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3}) * v) \quad (4.1\text{-}19)$$

Als Bilanzzeitraum wird die Periode vom 6.8.98 - 12.8.98 mit hoher Einstrahlung und großen Temperaturdifferenzen gewählt, um Störeinflüsse gering zu halten. Der Sonnenschutz war in diesem Zeitraum geschlossen und die Fenster zur Fassade gleichmäßig und zu einem hohen Anteil geöffnet. Eine Periode mit hoher Einstrahlung und hohen Temperaturdifferenzen bei gleichzeitig geschlossenen Fenstern steht im Messzeitraum nicht zur Verfügung. Der Luftvolumenstrom zum Raum wird durch die Anordnung der Geschwindigkeitssensoren in der Fassade weitgehend mit erfasst (Bild 2.1-4). Der geschlossene Sonnenschutz reicht bis auf den Boden und der untere Strömungssensor hat ausreichend Abstand vom Fenster. Der obere Sensor ist deutlich über dem Fenster angebracht und die in Bild 2.1-4 eingezeichnete Strömung über den Sonnenschutz ist hier vernachlässigbar.

Der aerodynamisch wirksame Strömungsquerschnitt betrug bezogen auf die gemessene Luftströmung

$A_{Querschnitt} = 0{,}192\ m^2/m$.

Das entspricht 62 % des horizontalen Fassadenquerschnitts.

4.1.6 Wärmebilanz der Doppelfassade

Tabelle 4.1-2 zeigt die Einzelposten der Wärmebilanz der Fassade. Wärmegewinne und Wärmeverluste wurden für jede Viertelstunde einzeln berechnet und dann aufsummiert. Die absoluten Zahlen geben sie Summe der Beträge der in beiden Richtungen geflossenen Wärmeströme an. Der Anteil stellt den Anteil an der Summe der insgesamt geflossenen Energiemenge dar. Für jede Viertelstunde wurde eine Energiebilanz erstellt. Der Anteil der Summe der Absolutbeträge dieser Bilanzierung beträt nur 93 % der insgesamt geflossenen Wärmeströme, da sich einzelne Wärmeströme zu bestimmten Zeiten aufheben können.

Bild 4.1-2 zeigt einen typischen Verlauf der einzelnen Wärmeströme für den 8.8.1998. Die starke Schwankung des Lüftungswärmetransports zur Umgebung ist bedingt durch den Windeinfluss. Charakteristisch ist mit 74 % der hohe Anteil der über die Lüftung abgeführten Energiemenge. 28 % der Wärme werden über die Einfachverglasung abgeführt. Die Lüftung zum Raum ist trotz gekippter Fenster und einem mittleren Raumluftwechsel von 1,8 /h nur von untergeordneter Bedeutung für die Energiebilanz der Fassade. Selbst eine Verdopplung des angenommenen Luftwechsels pro geöffnetem Fenster hätte keinen großen Einfluss, da Gewinne und Verluste bei dieser Position ähnlich verteilt sind.

Eine um fast eine Stunde verzögerte Wärmeabgabe der Fassade zeigt sich bei der Gegenüberstellung der Bilanz von Transmission, Lüftung und den solaren Gewinnen des Doppelfassadenzwischenraumes (Bild 4.1-3).

Tabelle 4.1-2: Energieströme

Wärmebilanz Doppelfassade [kWh/m²]		**6.8.98 - 12.8.98** Gesamt	pos.	neg.	Absolut	Anteil [%]
Transmission zum Raum	$Q_{T\ Raum}$	0,13	0,51	-0,38	0,89	5%
Transmission zur Umgebung	$Q_{T\ u}$	-3,41	0,08	-3,49	3,57	20%
Lüftung zur Umgebung	$Q_{LW\ U}$	-9,20	0,14	-9,34	9,48	52%
Lüftung zum Raum	$Q_{LW\ Raum}$	0,22	2,18	-1,95	4,13	23%
Summe Bilanz ohne Solarstrahlung		-12,26	2,30	-14,56	16,86	93%
Summe Solarstrahlung Fassade		25,58				
Summe Solarstrahlung horizontal		13,19				
Absorbtion der Solarstrahlung [%]		0,55				

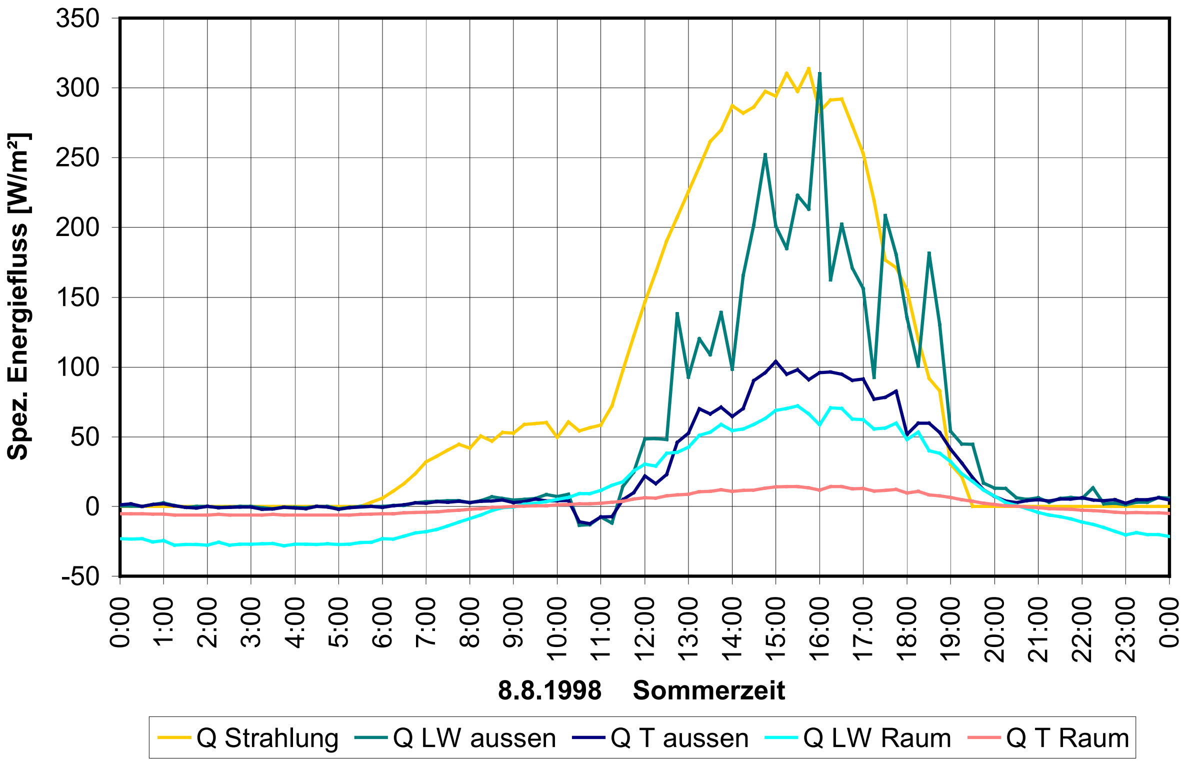

Bild 4.1-2: Typische Verläufe der spezifischen Energieströme

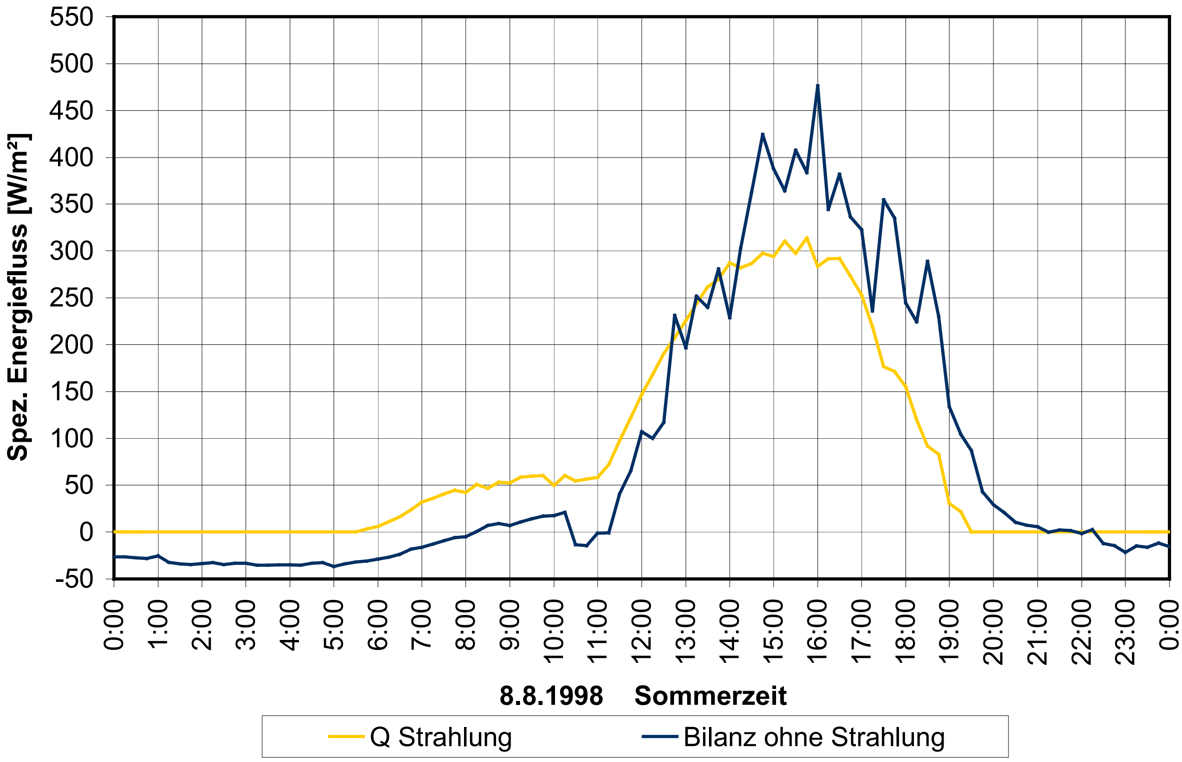

Bild 4.1-3: Gegenüberstellung solarer Einstrahlung und abgeführter Wärme

Um die natürliche Durchströmung der Doppelfassade mit anderen Projekten zu vergleichen, wurde der Luftwechsel des Fassadenzwischenraumes, die ausgetauschte Luftmenge pro laufenden Meter Fassade und pro m² hinterlüfteter Fassadenfläche berechnet. Tab. 4.1-3 zeigt dies für den Bilanzierungszeitraum, den Monat August und den Zeitraum von 1.1.1998 bis zum 31.8.1998. Bild 4.1-4 zeigt den Fassadenluftwechsel für den 8.8.1998.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade ist an sich mit einiger Unsicherheit behaftet, da nur an zwei Punkten in der Fassade gemessen wird. Um die Plausibilität zu prüfen, wurden die Mittelwerte beider Sensoren für die o.g. Perioden verglichen. Die Abweichung beider Sensoren rangiert mit 13% im Bilanzzeitraum, 6% im August und -1% für das erste Halbjahr 1998 in Anbetracht der Strömungsverhältnisse im Fassadenzwischenraum in einem akzeptabel geringen Bereich.

Tabelle 4.1-3: Mittelwerte der Luftströmung in der Fassade

	6.8. - 12.8.98	**1.8. - 31.8.98**	**1.1. - 31.8.98**
Fassadenluftwechsel [1/h]	103,2	105,4	122,8
Luftströmung pro m Fassade [m³/h]	96,0	98,0	114,2
Luftströmung pro m² Fassade [m³/h]	31,0	31,6	36,9
Strömung unten [m/s]	0,1486	0,1462	0,1641
Strömung oben [m/s]	0,1291	0,1372	0,1661
Abweichung zwischen den Messstellen	13%	6%	-1%

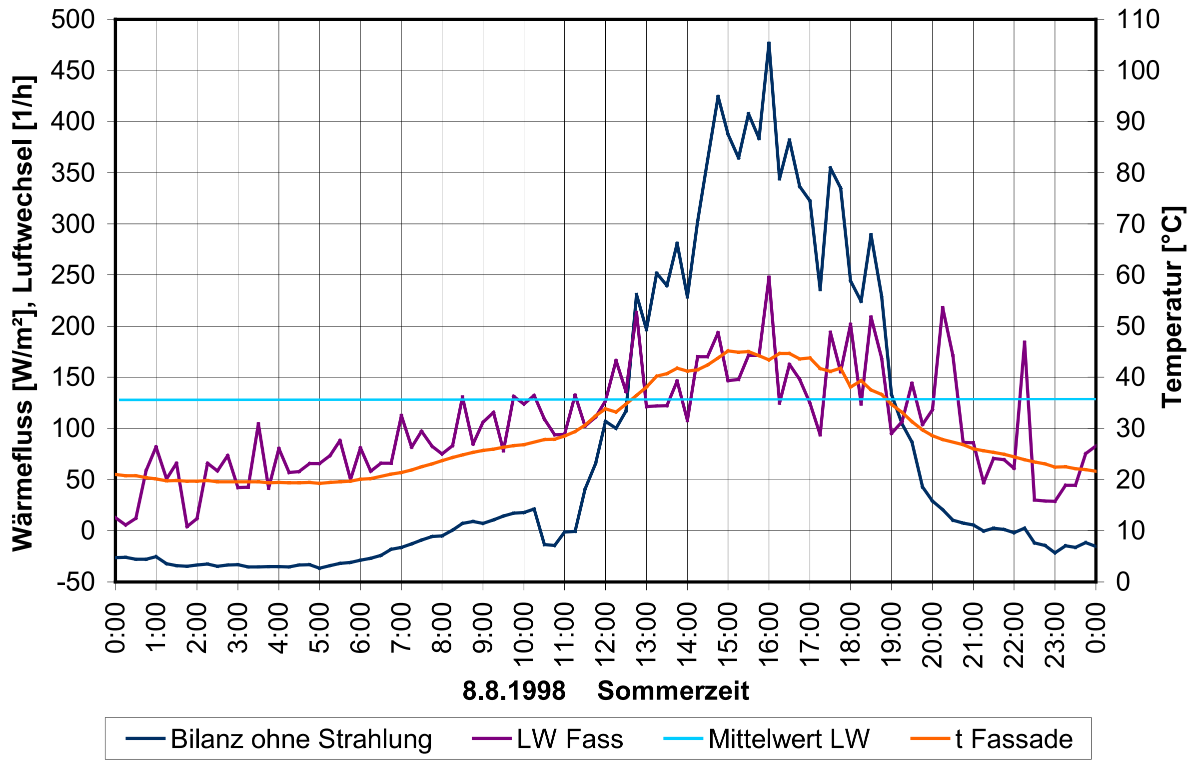

Bild 4.1-4: Fassadenluftwechsel und Wärmebilanz

4.2 RWE-Turm

Eine Energiebilanz der Doppelfassade umfasst auch hier solare Gewinne, Lüftungswärme und Transmissionswärme. Alle Werte sind spezifisch auf einen m² der Fassadenfläche bezogen.

Für die Bilanzierung wurde der Monat Mai 2000 gewählt. Dieser Monat weist einen hohen Anteil an strahlungsreichen Tagen auf. Die Fenster der Innenfassade wurden während dieser Zeit praktisch nicht geöffnet. Der Sonnenschutz war in dem bilanzierten Aktenraum während dieser Zeit geschlossen.

$$Q_{St} + Q_{T\ Raum} + Q_{T\ u} + Q_{LW\ Raum} + Q_{LW\ u} = 0 \qquad (4.2\text{-}1)$$

Die einzelnen Komponenten der Energiegleichung wurden wie folgt ermittelt:

4.2.1 Solare Gewinne Q_{Str}

Die solare Einstrahlung wurde im Doppelfassadenzwischenraum mit einem um 35° nach Süden geneigten Pyranometer gemessen (Bild 4.2-1).

Bis zu einem Sockelbetrag von 150 W/m² wird die gemessene Strahlung Q_{mess} als diffuse Einstrahlung auf die Fassade gerechnet. Für einen darüber hinaus gehenden Anteil wird anhand des Inzidenzwinkels β_m, dem Winkel zwischen der Normalen der Messfläche und der direkten Solarstrahlung, eine fiktive direkte Strahlung ermittelt.

$$\dot{Q}_{dir} = \dot{Q}_{mess} / \cos\beta_m \qquad (4.2\text{-}2)$$

Dieser Strahlungsanteil wird dann über den Inzidenzwinkel β_{Fass}, dem Winkel zwischen direkter Solarstrahlung und der Flächennormalen der Fassade, auf die vertikale Fassadenfläche umgerechnet.

$$\dot{Q}_{Fass} = \dot{Q}_{dir} * \cos\beta_{Fass} \qquad (4.2\text{-}3)$$

Bild 4.2-2 zeigt den Zusammenhang zwischen gemessener Strahlung und der normal zur Fassade berechneten Strahlung. Die geringere Bewertung der Strahlung am Nachmittag ist durch die insgesamt geringere Einstrahlung in der zweiten Tageshälfte bedingt.

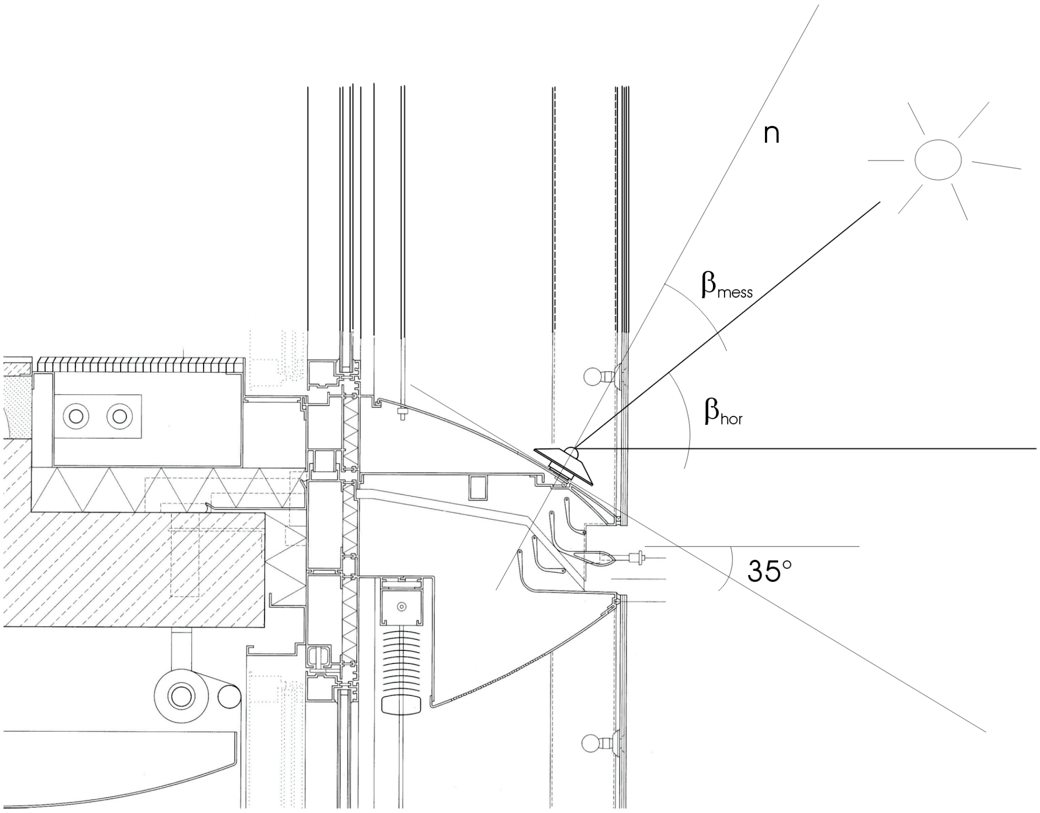

Bild 4.2-1: Messung der Globalstrahlung in der Fassade

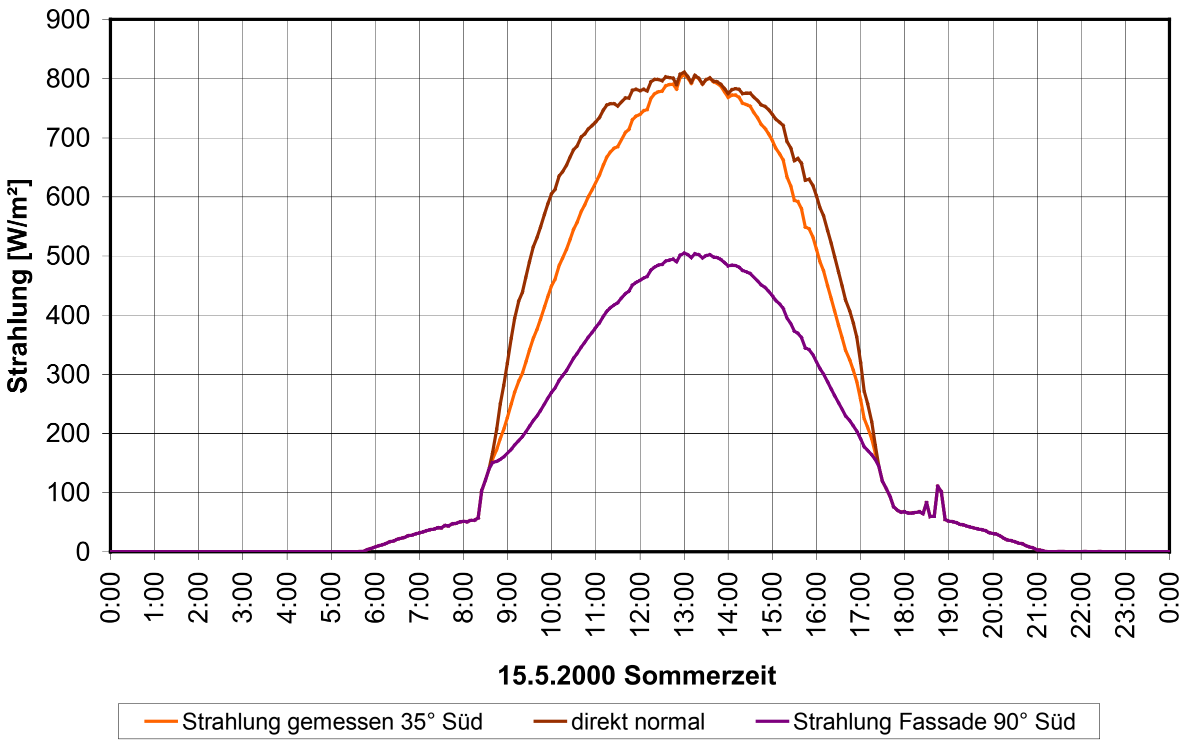

Bild 4.2-2: Unter 35° gemessener Strahlung und Strahlung normal zur Fassade

Die Ermittlung des absorbierten Anteils der Sonneneinstrahlung berücksichtigt wie beim Siemens-Gebäude die durch die Reflektion der verwendeten Materialien zur Umgebung zurückreflektierte Strahlung und die durch die Doppelfassade in den Raum transmittierte Strahlung.

$$\alpha = 1 - \rho - \tau = 0{,}52 \qquad (4.2\text{-}4)$$

Der reflektierte Anteil wird um den abgeschätzten z-Wert des Sonnenschutzes (0,7) vermindert, wobei angenommen wird, dass hinter dem Sonnenschutz keine Strahlung an die Umgebung mehr reflektiert wird. Die Materialeigenschaften entsprechen dem Siemensgebäude. Auch hier wird mit einem Reflexionsgrad von 45 % gerechnet. Die Innenfassade ist nach Abzug des Rahmenanteils zu 73 % transparent. Der g-Wert der Scheibe wird mit 0,75 angesetzt.

$$\rho = 0{,}45 * z \qquad (4.2\text{-}5)$$

$$\tau = A_{Fenster} / A_{Fass} * z * g_{Raum} \qquad (4.2\text{-}6)$$

4.2.2 Transmission zum an die Fassade grenzenden Raum $Q_{Tr\ Raum}$

Die Innenwand der Doppelfassade ist vollständig mit Fenstern versehen. Hinter den oberen und unteren Abtrennungen des Fassadenzwischenraumes befinden sich angrenzende Fassadenzwischenräume und eine kleine Brüstung, die hier in Anbetracht der Größenordnung der übrigen Wärmeströme und der unklaren Temperaturverhältnisse vernachlässigt werden soll. Für die Transmission zum Raum hin werden die drei vor der Innenfassade gemessenen Temperaturen verwendet.

$$\dot{Q}_{T\ Raum} = u_{Fe} * (t_{Raum} - (t_{i1} + t_{i2} + t_{i3})/3) \qquad (4.2\text{-}7)$$

Der u-Wert des Fensters wird mit 1,5 W/(m²K) berücksichtigt.

Die u-Werte wurden nach DIN 4108 berechnet und können hier bei einer Berechnung der Wärmeflüsse im Fünfminutentakt durch den Einfluss der thermischen Masse von den Werten der DIN abweichen. Bei der Bilanzierung über größere Zeiträume, die hier zur Kalibrierung der gemessenen Strömung in der Doppelfassade durchgeführt wird, relativieren sich auch hier diese Fehler wieder.

4.2.3 Transmission zur Umgebung $Q_{T\ u}$

Für die Berechnung der Wärmetransmission vom Fassadenzwischenraum zur Umgebung werden die sechs vor der Außenscheibe des Fassadenzwischenraumes gemessenen Temperaturen berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{T\ u} = 5.8\ W/(m^2K) * (tu - (t_{a11} + t_{a12} + t_{a21} + t_{a22} + t_{a31} + t_{a33})/6\ ) \qquad (4.2\text{-}8)$$

4.2.4 Lüftungswärme zum Raum $Q_{LW\ Raum}$

Der untersuchte Raum im 16. OG diente während der Messung als Aktenraum, und die Fenster wurden so selten geöffnet, dass selbst bei einem angenommenen 6-fachen Raumluftwechsel über die Fenster kein Einfluss auf die Bilanz feststellbar war. Der Luftwechsel über die Fugen der Fassade wird mit 0,2/h abgeschätzt. Für die Bilanz werden die Temperaturen im Fassadenzwischenraum vor der Innenfassade herangezogen.

$$\dot{Q}_{LW\ Raum} = \dot{V}_{Raum} * \rho * c_p * (t_{Raum} - (t_{i1} + t_{i2} + t_{i3})/3) \qquad (4.2\text{-}9)$$

Der Luftvolumenstrom zwischen Fassadenzwischenraum und dem angrenzenden Raum berechnet sich aus dem Raumvolumen V_{Raum}, der Fassadenfläche A_{Fass} und dem Fugenluftwechsel.

$$\dot{V}_{Raum} = 0{,}2/h * V_{Raum} / (A_{Fass} * 3600s/h) \qquad (4.2\text{-}9)$$

4.2.5 Lüftungswärme zur Umgebung $Q_{LW\ u}$

Die Zielgröße der Wärmebilanz der Fassade ist, wie schon gesagt, der Lüftungswärmestrom zur Umgebung. Er berechnet sich aus dem Volumenstrom zwischen Fassade und Umgebung und der Differenz zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur der Luft.

Wie schon gezeigt wurde, hat der Wind einen erheblichen Einfluss auf die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes. Um die Bilanz richtig zu bestimmen, kann nicht die mittlere Temperatur im Fassadenzwischenraum herangezogen werden, sondern es muss wieder mit der jeweils größeren Temperatur in der Nähe der Lüftungsöffnungen gerechnet werden.

$$\dot{Q}_{LW\ u} = \dot{V}_u * \rho * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3})) \qquad (4.2\text{-}10)$$

Der Volumenstrom errechnet sich aus dem Mittelwert der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und der für die gemessenen Geschwindigkeiten aerodynamisch wirksamen Querschnittsfläche der Fassade. Die Fenster der Innenfassade (Aktenraum) waren im Kalibrierungszeitraum und in der statistisch ausgewerteten Periode praktisch nicht geöffnet.

$$\dot{V}_u = v * A_{Querschnitt}$$

In der Wärmebilanz der Fassade ist wieder der aerodynamisch wirksame Querschnitt, der den Strömungsmessgeräten zugeordnet wird, die einzige Unbekannte. Wird dieser Querschnitt durch eine thermische Bilanz über einen sinnvollen Zeitraum - zugrundegelegt wird der Monat Mai 2000 (Bild 2.2-7) - kalibriert, kann der Volumenstrom in der Fassade während der gesamten Messperiode über die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten abgeschätzt werden.

$$A_{Querschnitt} = \dot{V}_u / v \qquad (4.2\text{-}11)$$

$$= \dot{Q}_{LW\ u} / (\dot{V}_u * r * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3}) * v) \qquad (4.2\text{-}13)$$

$$= -(\dot{Q}_{St} + \dot{Q}_{T\ Raum} + \dot{Q}_{T\ u}) / (\dot{V}_u * \rho * c_p * (t_u - \max(t_{a1}, t_{a3}) * v) \qquad (4.2\text{-}14)$$

Der der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit zugeordnete Strömungsquerschnitt beträgt

$A_{Querschnitt}$ = 0,1075 m²/m.

Das entspricht 43% der Fassadentiefe oder 21,5% der horizontalen Fläche (nur jedes zweite Feld ist mit einer Zuluft-, bzw. Abluftöffnung ausgeführt.

4.2.6 Wärmebilanz der Doppelfassade

Tabelle 4.1-2 zeigt die Einzelposten der Wärmebilanz der Fassade. Wärmegewinne sind positiv und Wärmeverluste sind negativ aufgeführt. Die absoluten Zahlen geben die Summe der Beträge der in beiden Richtungen geflossenen Wärmeströme an. Der Anteil stellt den Anteil an der Summe aller Energiebeträge dar. Die Bilanzsumme berechnet sich aus 5-Minuten-Werten. Die Bilanzsumme beträgt nur rund 79 % der Summe der Absolutbeträge, da die Wärmeströme instationär sind und sich einzelne Anteile zu bestimmten Zeiten aufheben können. Dies gilt insbesondere für die Transmission zum Raum.

Bild 4.2-3 zeigt einen typischen Verlauf der einzelnen Wärmeströme für den 15.2.2000. Auch hier schwanken die Luftströmungsgeschwindigkeiten und der daraus resultierende Wärmetransport bedingt durch den Windeinfluss erheblich. In der Wärmebilanz für den 15.05.2000 werden 7% der in der Doppelfassade absorbierten Solarenergie über Transmission an den Raum abgeführt, 30% gehen über die Hinterlüftung der Fassade nach außen, und 63% werden über die äußere Verglasung an die Umgebung abgeführt. Durch die im Gegensatz zum Siemens-Gebäude wesentlich kleiner dimensionierten Lüftungsöffnungen überwiegt hier bei der Wärmeabfuhr die Transmission über die äußere Scheibe der Doppelfassade.

Ähnlich wie beim Siemens-Gebäude zeigt sich eine um fast eine Stunde verzögerte Wärmeabgabe der Fassade bei der Gegenüberstellung der Bilanz von Transmission, Lüftung und den solaren Gewinnen des Doppelfassadenzwischenraumes (Bild 4.2-4).

Tabelle 4.2-1: Energieströme

Wärmebilanz Doppelfassade [kWh/m²]		**1.5.2000 - 31.5.2000** Gesamt	pos.	neg.	Absolut	Anteil [%]
Transmission zum Raum	$Q_{T\ Raum}$	3,30	5,99	-2,69	8,68	18%
Transmission zur Umgebung	$Q_{T\ u}$	-23,13	0,06	-23,20	23,26	48%
Lüftung zur Umgebung	$Q_{LW\ U}$	-16,27	0,02	-16,29	16,31	34%
Summe Bilanz ohne Solarstrahlung		-36,10	1,10	-37,19	38,29	79%
Summe Solarstrahlung Fassade		70				
Summe Solarstrahlung horizontal		98				
Absorbtion der Solarstrahlung [%]		0,59				

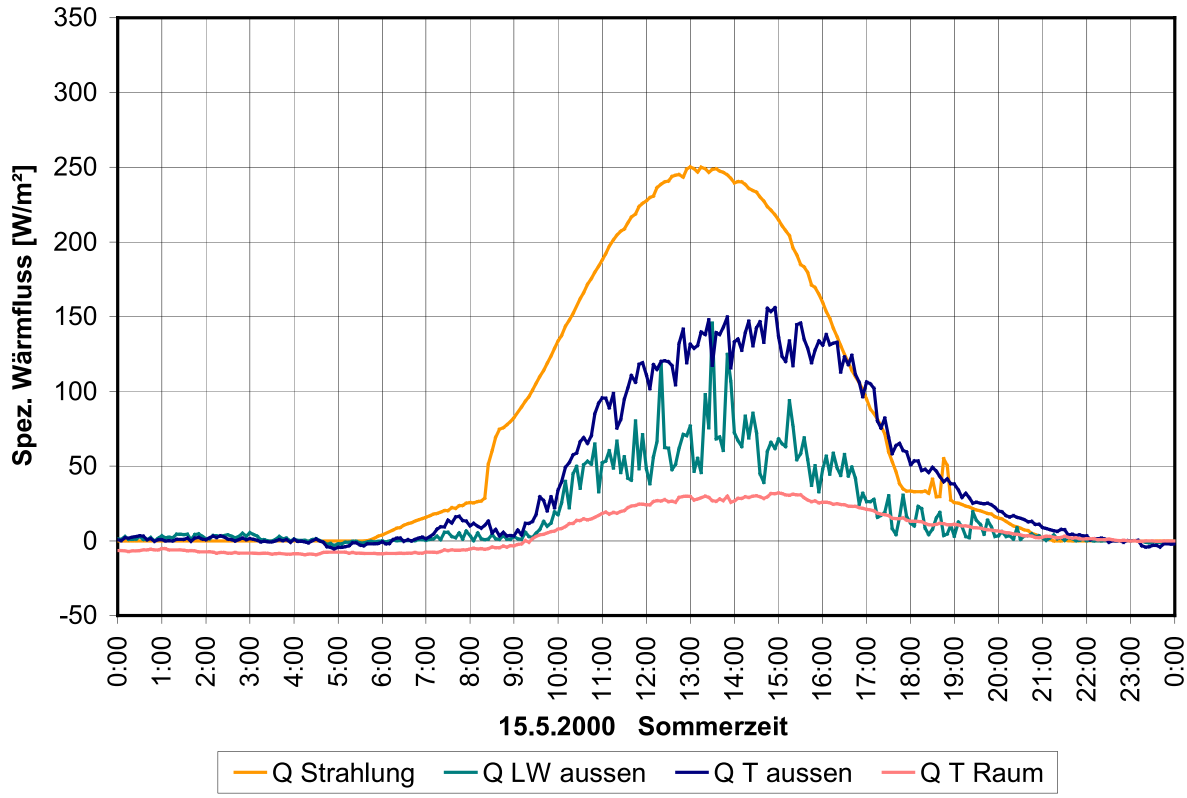

Bild 4.2-3: Absorbierte Strahlung und Wärmeströme in der Fassade (16. OG Südraum)

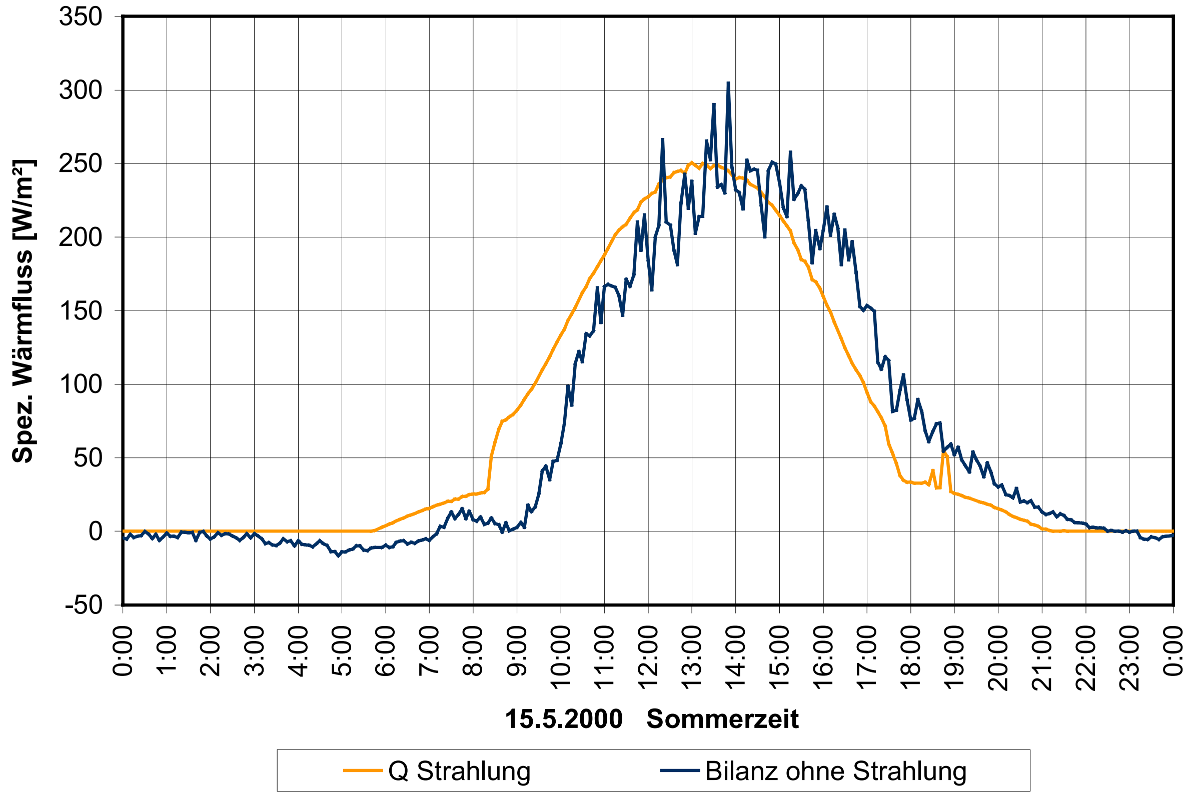

Bild 4.2-4: Gegenüberstellung von absorbierter Solarenergie und abgeführter Wärme

Tabelle 4.2-2 zeigt die bei der Hinterlüftung der Fassade ausgetauschte Luftmenge pro m² hinterlüfteter Fassade für den Bilanzierungszeitraum, den Monat August, und für das gesamte Jahr 2000. Bild 4.2-5 stellt den Luftwechsel in der Fassade am 15.5.2000 dar.

Die Messpunkte für die Strömungsgeschwindigkeit in der Fassade variieren durch die Strömungssituation in der Fassade um ca. 24%, wobei die Abweichung beider Messpunkte während der Messdauer um ca. 8 Prozentpunkte variiert. Dies liegt auch hier deutlich im akzeptablen Bereich.

Tabelle 4.2-2: Mittelwerte der Luftströmung in der Doppelfassade

	1.5. -31.5.00	**1.8. - 31.8.00**	**1.1. - 31.12.00**
Fassadenluftwechsel [1/h]	20.3	16.1	24.9
Luftströmung pro m Fassade [m³/h]	35.6	28.1	43.6
Luftströmung pro m² Fassade [m³/h]	10.2	8.0	12.4
Strömung unten [m/s]	0.1023	0.0843	0.1294
Strömung oben [m/s]	0.0817	0.0611	0.0957
Abweichung	20%	28%	26%

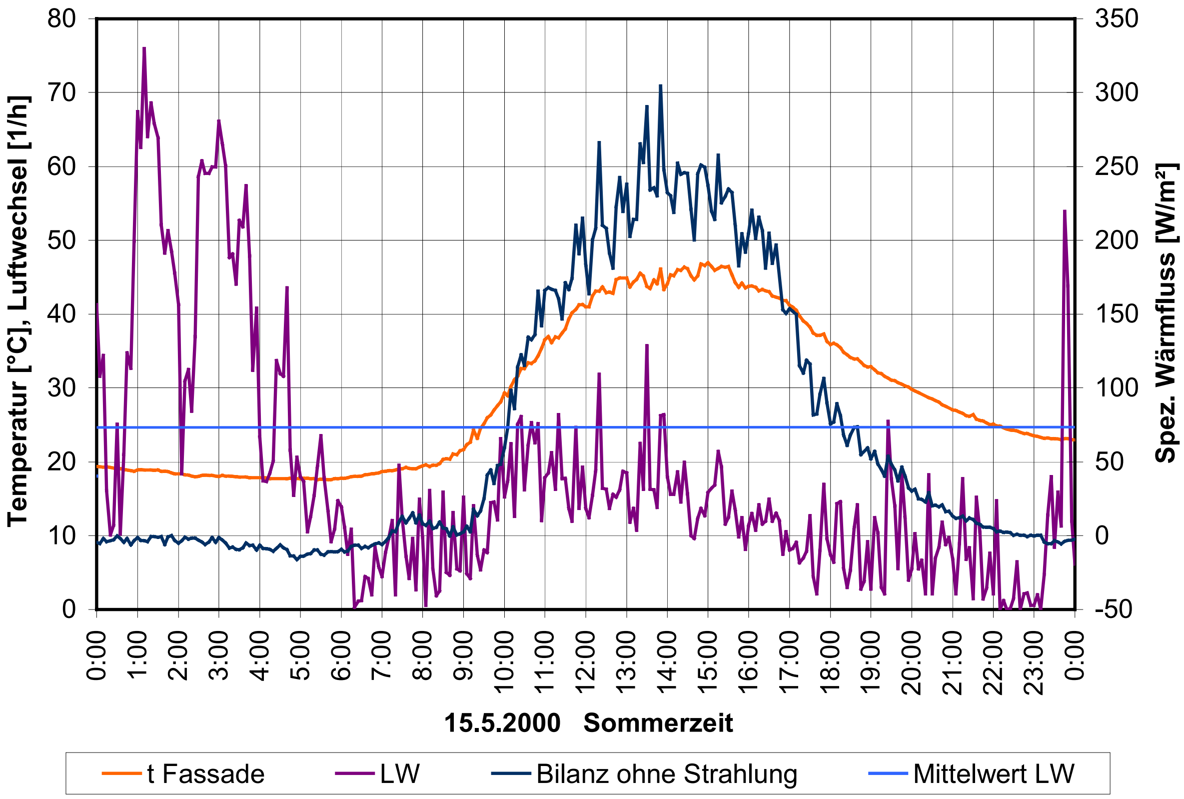

Bild: 4.2-5: Luftwechsel in der Fassade

4.3 Victoria Versicherung

Bei der Vermessung der Fassade war eine direkte Positionierung der Thermoanemometer hinter drei Öffnungen in den Pfosten und hinter „Abluft“ – Lamellen möglich (Bild 2.3-3). Eine weitere Validierung anhand einer thermischen Bilanz war nicht möglich, da die im Fassadenzwischenraum gemessenen Strahlungswerte nicht ausreichend verlässlich erfasst wurden. Auch eine Verwendung von aus Satellitenbildern berechneten Solarstrahlungswerten wurde erwogen [35]. Ein Test mit den auf dem Siemens-Gebäude gemessenen Werten ergab zwar eine Übereinstimmung in der Tagessumme, die zeitliche Differenzierung war jedoch mit zu großer Unsicherheit behaftet.

Über die Querschnitte der Öffnungen der Fassade lässt sich die insgesamt strömende Luftmenge abschätzen. Da die Luft zur Hälfte zu und zur Hälfte abströmt, wird die berechnete Luftmenge zur Ermittlung des Luftaustausches mit der Umgebung halbiert.

$$\dot{V}_u = (v_1 * A_1 + v_2 * A_2 + v_3 * A_3 + v_4 * A_4) / 2 \qquad (4.3\text{-}1)$$

Die Flächen 1 bis 3 sind von unten nach oben auf die Pfosten verteilt (ein Messpunkt pro Fassadendrittel), und die Fläche 4 bezieht sich auf die „Abluft“ – Öffnung (siehe auch Bild 2.3-1). Wie schon in Kapitel 2.3.3 beschrieben, wird für die Lüftungsöffnungen in den Pfosten mit 6 cm Durchmesser (insgesamt 30 pro Pfosten) ein c_V-Wert von 0,9 und für die obere Öffnung (1,08 m²) ein c_V-Wert von 0,55 abgeschätzt. Geöffnete Fenster der Innenfassade haben durch die Anordnung der Messpunkte an den Lüftungsöffnungen der Fassade keinen Einfluss auf die Messung der Luftströmung.

Tabelle 4.3-1 zeigt die Luftströmung in der Fassade für unterschiedliche Zeiträume. Den Messpunkten 1 und 2 sind jeweils 11 Öffnungen und dem Messpunkt 3 8 Öffnungen zugeordnet. Der Anteil der einzelnen Volumenströme am insgesamt gemessenen Volumenstrom (Zuluft plus Abluft) weicht für die unterschiedlichen Messperioden um maximal 5,7 Prozentpunkte ab, was in Anbetracht der grundsätzlich chaotischen Strömungssituation vertretbar erscheint. Auffällig ist, dass entgegen den Erwartungen die oberen Öffnungen in den Lisenen einen ähnlichen Anteil am Luftvolumenstrom haben, wie dies bei den unteren Öffnungen der Fall ist. Der größte Anteil entfällt auf die mittleren Öffnungen. Dieses Ergebnis ist, wie in Kapitel 6 gezeigt wird, in der Hauptsache auf den Einfluss des Windes zurückzuführen

Tabelle 4.3-1: Luftströmung in der Fassade

	18.7.97 - 31.7.97	**18.7.97 - 31.12.97**	**18.07.97 - 7.4.98**
LW [1/h]	74,6	83,9	85,5
Luftströmung pro m Fassade [m³/h]	91,3	102,8	104,7
Luftströmung pro m² Fassade [m³/h]	26,1	29,4	29,9
Strömung 1 [m³/(m²h)]	9,1	10,3	10,8
Strömung 2 [m³/(m²h)]	10,5	14,7	15,5
Strömung 3 [m³/(m²h)]	9,7	9,7	9,5
Strömung 4 [m³/(m²h)]	22,9	24,1	24,0
Anteil Strömung 1 [%]	17%	18%	18%
Anteil Strömung 2 [%]	20%	25%	26%
Anteil Strömung 3 [%]	19%	17%	16%
Anteil Strömung 4 [%]	44%	41%	40%

5 Statistische Auswertung des Luftwechsels im Doppelfassadenzwischenraum

Um einen Zusammenhang zwischen der Luftströmung in der Fassade und den gemessenen Randbedingungen herzustellen, bietet sich eine statistische Auswertung der gemessenen Werte an. Wie schon in Kapitel 3 gezeigt, ist eine hinreichende Anzahl von Werten notwendig, um zu statistisch relevanten Aussagen zu kommen. Mit den Daten der in den beschriebenen Gebäuden durchgeführten Langzeitmessungen steht eine ausreichend große Anzahl zur Verfügung.

Ausgewertet wird nicht die gemessene Luftströmung, sondern die in Kapitel 4 dazu korrelierte, ausgetauschte Luftmenge zwischen Fassade und Umgebung pro m² Fassadenfläche. Diese Größe ist allgemeiner und gibt relativ unabhängig von der Geometrie die Leistungsfähigkeit der Hinterlüftung einer Doppelfassade an.

Zunächst wurde der Versuch unternommen die in Kapitel 6 beschriebenen erwarteten physikalischen Zusammenhänge statistisch anzunähern. Für eine vorgegebene Funktion wurden dabei Koeffizienten optimiert, mit der die Zielgröße, die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes, bestmöglich beschrieben wird. Maßgebliche Einflussgrößen sind die Temperaturdifferenz zur Umgebung, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit.

Nachdem die ersten Versuche mit Funktionen nur bedingt befriedigend ausfielen, wurde ein neuer Weg beschritten, der ohne die Vorgabe einer konkreten Funktion den Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und der Zielgröße bestimmt.

Die statistische Auswertung wurde am statistischen Beratungs- und Analysezentrum der Universität Dortmund von Herrn Dr. Christmann durchgeführt.

Eingesetzt wurde die moderne Regression des „Generalized Additive Model“ von Hastie und Tibshirani [10] mit Hilfe des Programms S-Plus 4.5 [44]. Dieses Modell berücksichtigt keine vorgegebene Funktion, sondern berechnet selbstständig in kleinen Schritten optimale Werte für die Auswirkung der einzelnen Einflussgrößen. Der entstehende stetige Graph (auch als loess bezeichnet) folgt keiner Funktion, sondern stellt den tatsächlichen, den der Statistik zugrunde liegenden Daten entsprechenden Verlauf der Wirkung der einzelnen Einflussgrößen dar. Dieses Verfahren fand Anwendung auf den Einfluss von Temperaturdifferenz und Windgeschwindigkei.

Aus Voruntersuchungen war bereits klar, dass der Einfluss der Windrichtung stark schwankt und kleine Änderungen der Windrichtung große Auswirkungen haben können. Aus diesem Grunde erfolgte eine Klassifizierung der Windrichtung in 10° Schritten, für die jeweils ein Koeffizient bestimmt wurde. Die gefundenen Werte werden im weiteren als factor(grWindri) bezeichnet.

Die berücksichtigten Einflussgrößen für die Hinterlüftung der Doppelfassade sind:

- Temperaturdifferenz Δt zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit

Zielgröße ist der mit der Umgebung ausgetauschte Volumenstrom pro m² Fassadenfläche ($\dot{V}$).

5.1 Siemens-Gebäude

Untersucht wurde der Zeitraum vom 1.1.1998 bis 31.8.1998, aufgezeichnet in 15 Minuten Schritten mit insgesamt 28.483 Messpunkten.

Für die Größen Temperaturdifferenz und Windgeschwindigkeit wurde die oben beschriebene Darstellung (lo(Δt) und lo(Windge)) als Aneinanderreihung optimierter Werte gewählt. „lo“ steht für loess (nicht nicht zu verwechseln mit Logarithmus). Die Windrichtung wurde in 10° Schritten klassifiziert und für jeden Bereich ein Einflussparameter ermittelt (factor(grWindri)). Tabelle 5.1-1 zeigt die Anzahl der Messwerte in den einzelnen Klassen.

Zunächst wurde der Zusammenhang zwischen der Zielgröße, den Einflussgrößen und einer Konstante c wie folgt bestimmt:

$$\dot{V} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri}) + c \qquad (5.1\text{-}1)$$

Das Ergebnis der statistischen Auswertung zeigt im Histogramm, im Kernel density plot und im QQ plot einen deutlich schiefen Verlauf (Bild 5.1-1 bis 5.1-4). Um eine gleichmäßige Verteilung zu erhalten, wird eine Wurzeltransformation durchgeführt. Es wird dabei nicht die Zielgröße, sondern die Wurzel der Zielgröße mit dem Generalized Additive Model approximiert.

$$\sqrt{\dot{V}} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri}) + c \qquad (5.1\text{-}2)$$

Die Fehler sind nun annähernd normal verteilt (Bild 5.1-5 bis 5.1-8). Die Residualanalyse zeigt, dass die Verteilung der Residuen selbst bei Verwendung der Wurzeltransformation noch rechts-schief ist.

Alle 3 erklärenden Variablen haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße, die Wurzel des Volumenstroms. Die Pr(F) Werte, die bei einem signifikanten Einfluss unter 5%, also 0,05 liegen sollten, sind so klein, dass das Programm sie mit null angibt. Die lo Werte für Windgeschwindigkeit und Δt zeigen einen monoton wachsenden Einfluss auf die Zielgröße (Bild 5.1-9 und 5.1-10).

Der Einfluss der Windrichtung ist ebenfalls signifikant. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit folgt keiner Funktion. Man kann einen größeren Einfuß im Intervall zwischen 105° und 145° und im Bereich von 265° bis 315° feststellen (Bild 5.1-11). Insgesamt ist der Einfluss der Windrichtung chaotisch, was das Vorgehen der Klassifizierung in 10° Schritten bestätigt.

Für die einzelnen Klassen werden jeweils die Anzahl der Werte und die Einflussgröße factor(windri) in Tabelle 5.1-1 und 5.1-2 angegeben.

Eine eingehende Diskussion der angenäherten Funktionen erfolgt in Kapitel 6.

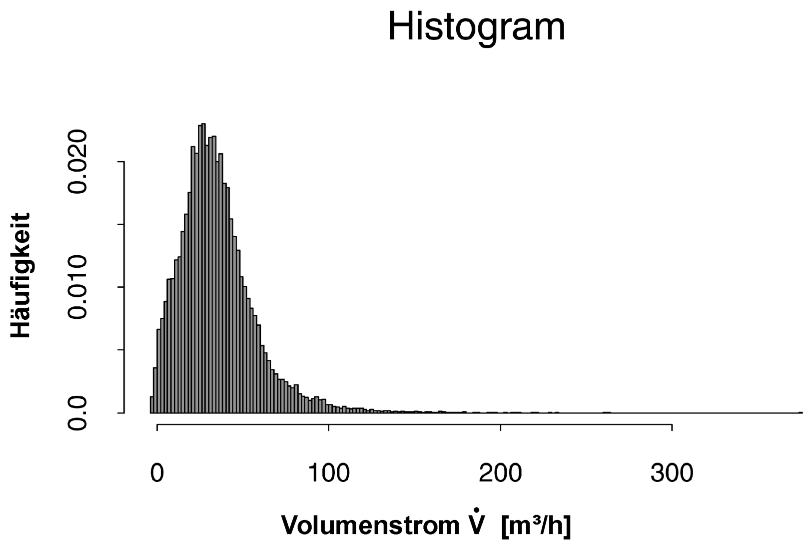

Bild 5.1-1: Histogramm, Siemens-Gebäude ohne Wurzeltransformation

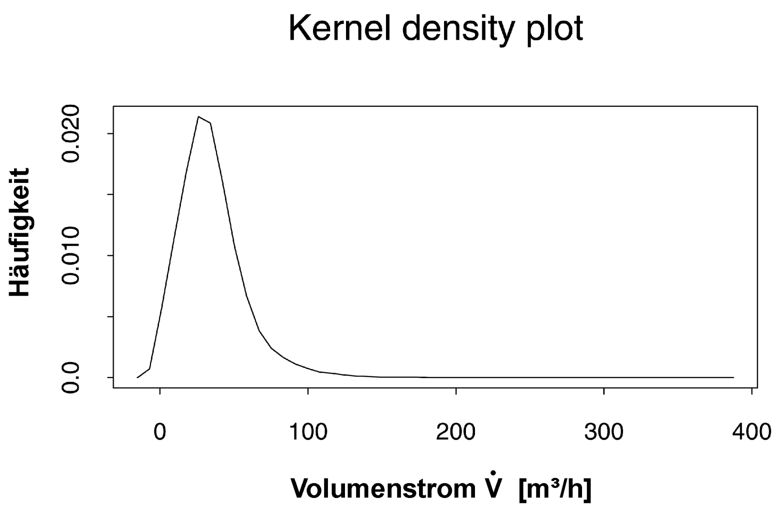

Bild 5.1-2: Kernel density plot, Siemens-Gebäude ohne Wurzeltransformation

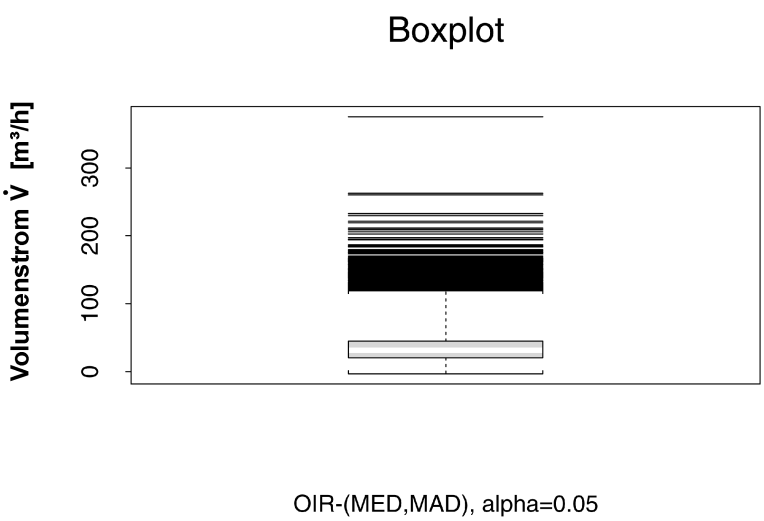

Bild 5.1-3: Boxplot, Siemens-Gebäude ohne Wurzeltransformation

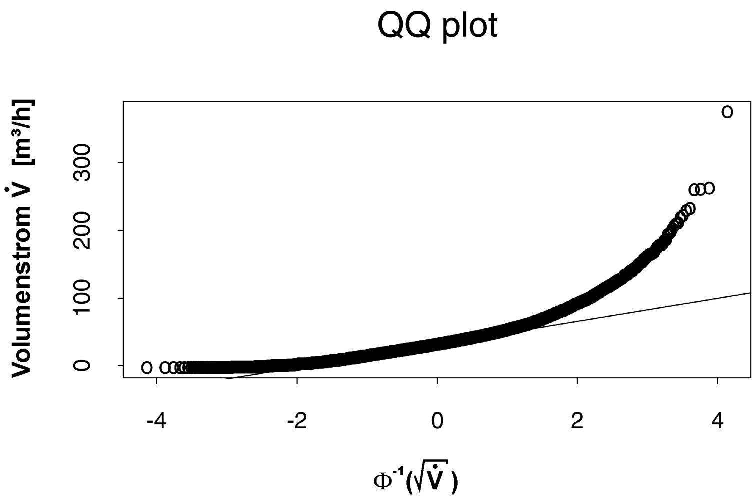

Bild 5.1-4: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung Siemens-Gebäude ohne Wurzeltransformation

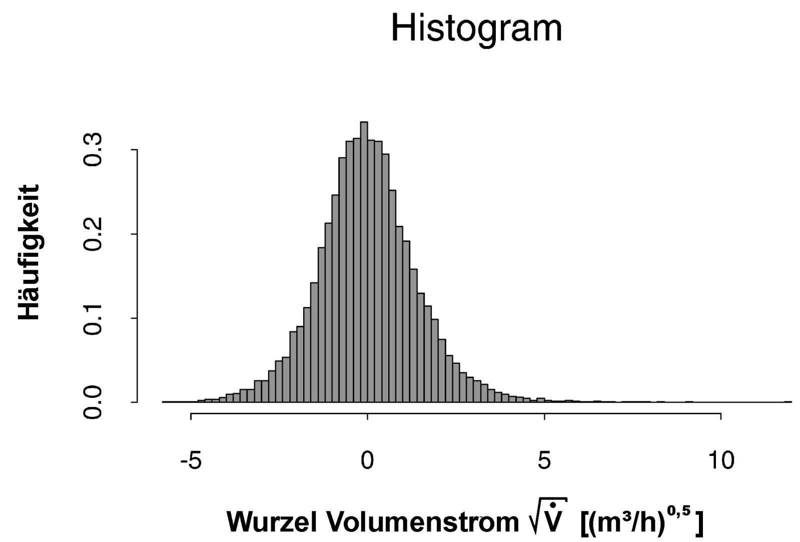

Bild 5.1-5: Histogramm, Siemens-Gebäude mit Wurzeltransformation

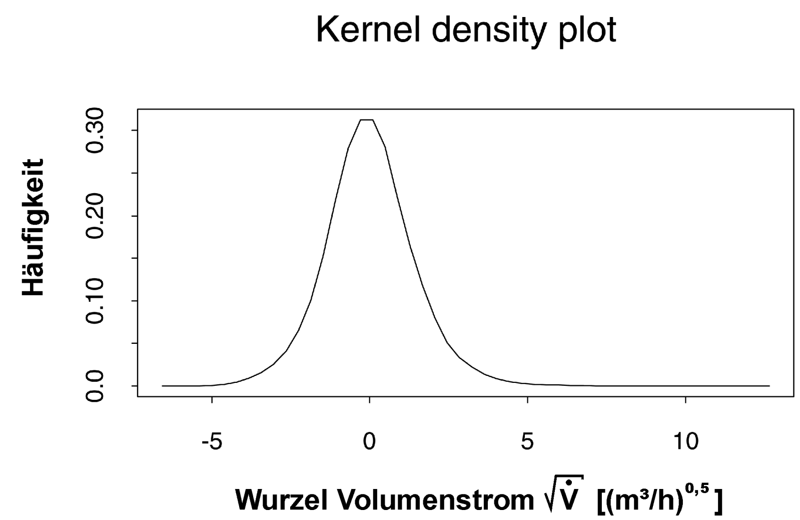

Bild 5.1-6: Kernel density plot, Siemens-Gebäude mit Wurzeltransformation

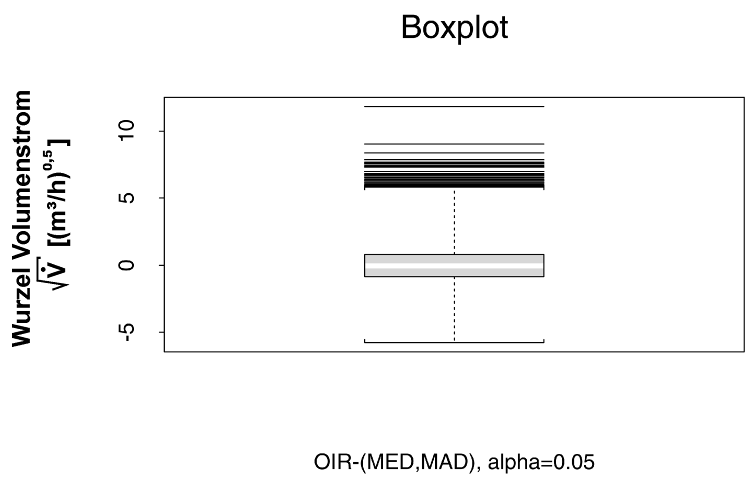

Bild 5.1-7: Boxplot, Siemens-Gebäude mit Wurzeltransformation

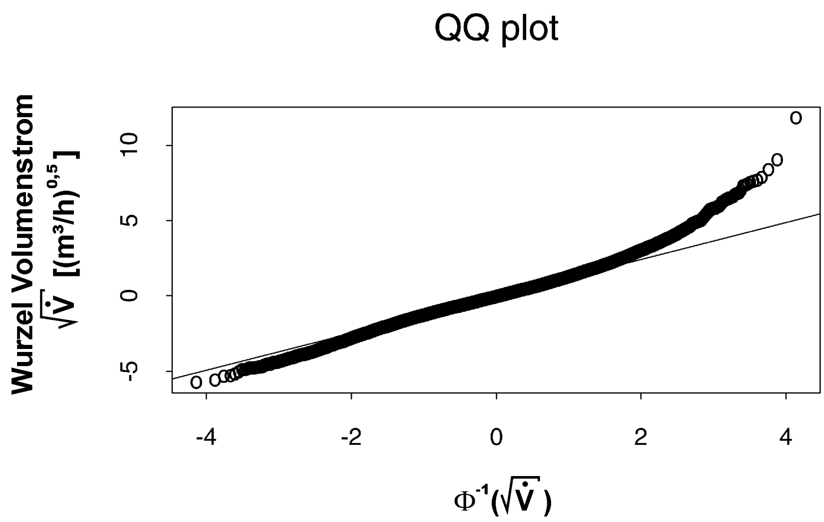

Bild 5.1-8: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung Siemens-Gebäude mit Wurzeltransformation

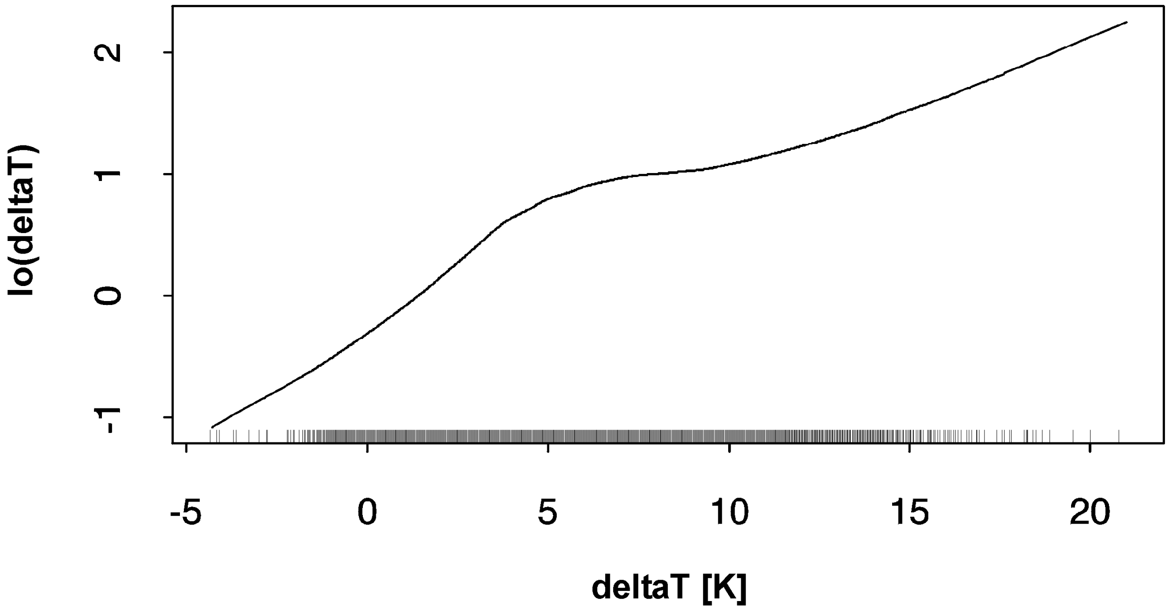

Bild 5.1-9: Einflussfunktion der Temperaturdifferenz Siemens-Gebäude

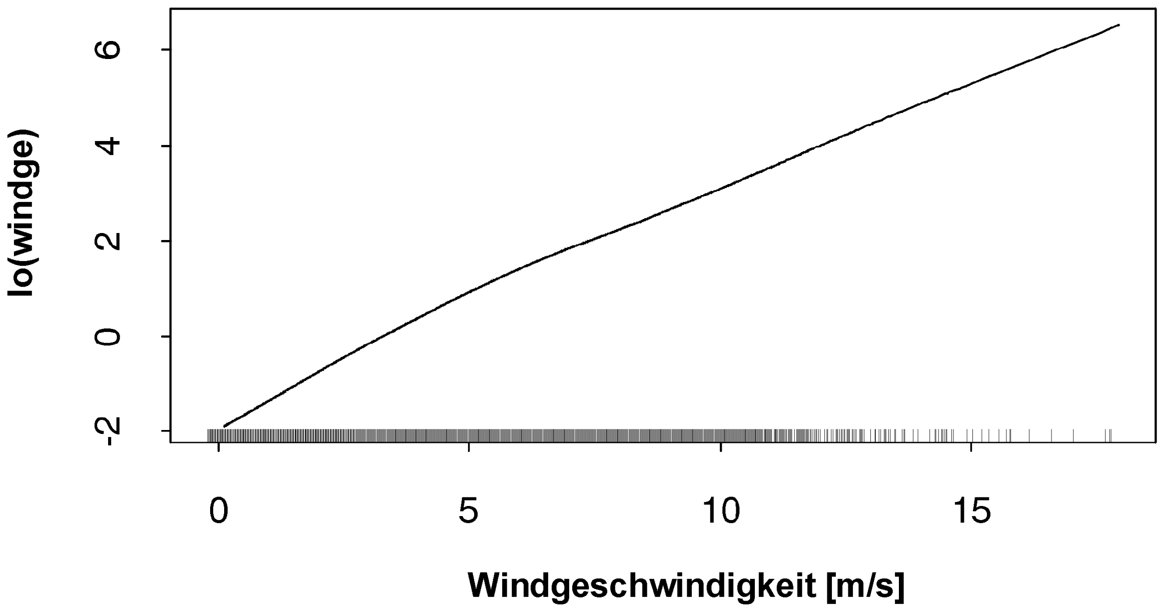

Bild 5.1-10: Einflussfunktion der Windgeschwindigkeit , Siemens-Gebäude

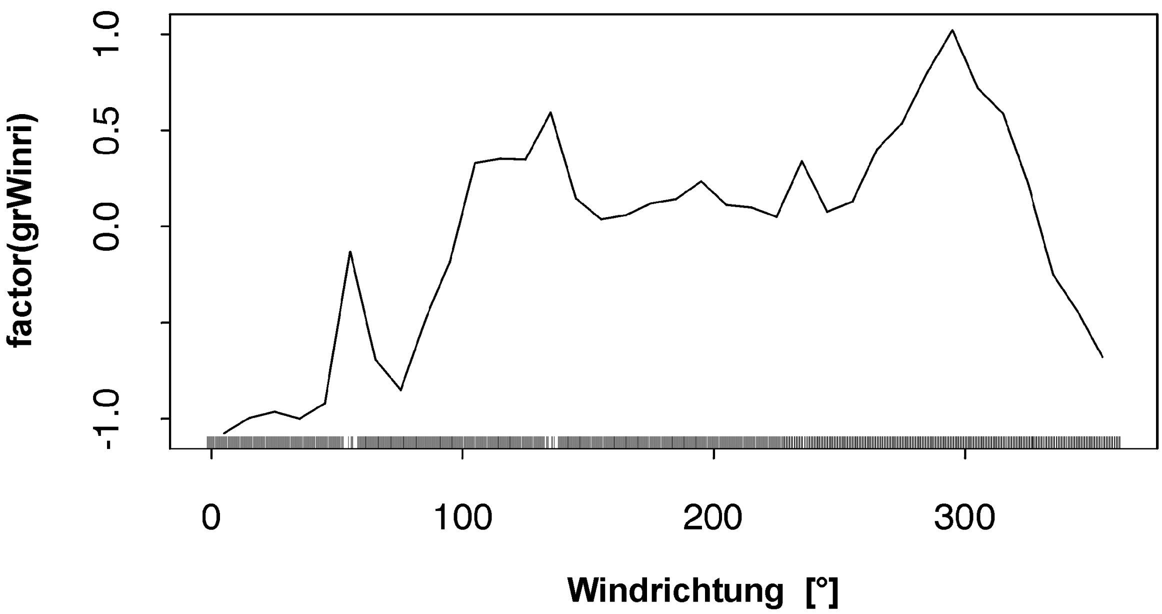

Bild 5.1-11: Einfluss der Windrichtung normiert auf das Intervall 0° bis 10°, Siemens-Gebäude (Gruppiert in 10° Schritten)

Tabelle 5.1-1: Anzahl der Messpunkte für jede Klasse der Windrichtung (0° = Norden)

Windrichtung	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	95°	105°	115°
Anzahl Messpunkte	356	517	678	713	815	32	771	383	410	255	306	261
Windrichtung	125°	135°	145°	155°	165°	175°	185°	195°	205°	215°	225°	235°
Anzahl Messpunkte	363	39	558	1391	1282	2279	2072	2070	1411	1386	2294	120
Windrichtung	245°	255°	265°	275°	285°	295°	305°	315°	325°	335°	345°	355°
Anzahl Messpunkte	2128	804	993	639	776	452	365	171	327	488	290	287

Tabelle 5.1-2: Einflussfaktoren der Windrichtung

Windrichtung	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	95°	105°	115°
factor(grWindri)	-1,07	-0,99	-0,97	-1,00	-0,92	-0,13	-0,69	-0,85	-0,48	-0,19	0,33	0,35
Windrichtung	125°	135°	145°	155°	165°	175°	185°	195°	205°	215°	225°	235°
factor(grWindri)	0,35	0,59	0,15	0,04	0,06	0,12	0,14	0,23	0,11	0,10	0,05	0,34
Windrichtung	245°	255°	265°	275°	285°	295°	305°	315°	325°	335°	345°	355°
factor(grWindri)	0,07	0,13	0,40	0,53	0,80	1,02	0,72	0,59	0,22	-0,25	-0,45	-0,68

5.2 RWE-Turm

Untersucht wurde der Zeitraum vom 17.03.2000 bis 31.12.2000, aufgezeichnet in 5-Minuten-Schritten mit insgesamt 83.346 Messpunkten.

Einflussgrößen für die Hinterlüftung der Doppelfassade hier:

- Temperaturdifferenz Δt zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung
- Strömungsrichtung vor der Fassade (Ost, West, oben, unten, oben = 0°)
- Strömungsgeschwindigkeit vor der Fassade.

Zielgröße ist der mit der Umgebung ausgetauschte Volumenstrom pro m² Fassadenfläche ($\dot{V}$).

Windgeschwindigkeit und Windrichtung liegen hier nicht als Messwerte vom Dach des Gebäudes vor, sondern als Werte, die senkrecht vor der Fassade gemessen wurden. Anstelle der Windgeschwindigkeit wurde die Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft vor der Fassade zugrundegelegt. Die Windrichtung gibt in diesem Fall an, ob die Luft von Osten, Westen, oben oder unten an der Fassade entlang strömt. Im folgenden werden diese Größen jedoch analog zum Siemensgebäude bezeichnet (Δt, Windri und Windge).

Für die Größen Temperaturdifferenz und Windgeschwindigkeit wurde die oben beschriebene Darstellung (lo(Δt) und lo(Windge)) als Aneinanderreihung optimierter Werte gewählt. Die Windrichtung wurde auch hier in 10° Schritten klassifiziert und für jeden Bereich ein Einflussparameter ermittelt (factor(grWindri)). Tabelle 5.2-1 zeigt die Anzahl der Messwerte in den einzelnen Klassen.

Auch hier wurde zunächst der Zusammenhang zwischen der Zielgröße und den Einflussgrößen wie folgt bestimmt:

$$\dot{V} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri}) + c$$

Das Ergebnis der statistischen Auswertung zeigt im Histogramm, im Kernel densiry plot und im QQ plot, einen deutlich schiefen Verlauf (Bild 5.2-1 bis 5.1-4). Abhilfe schafft eine Wurzeltransformation, bei der nicht die Zielgröße, sondern die Wurzel der Zielgröße approximiert wird.

$$\sqrt{\dot{V}} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri}) + c$$

Alle drei erklärenden Variablen haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße, die Wurzel des Volumenstrom pro m² Fassadenfläche. Die Pr(F) Werte, die bei einen signifikanten Einfluss unter 5%, also 0,05 liegen sollten, sind so klein, dass das Programm sie mit null angibt.

Die Residualanalyse zeigt, dass die Verteilung der Residuen approximativ normalverteilt ist (Bild 5.2-5 bis 5.2-8).

Die Windgeschwindigkeit (Bild 5.2-10) zeigt einen monoton wachsenden Einfluss auf die Zielgröße (hier sogar einen approximativ linearen Einfluss). Δt zeigt einen monoton wachsenden Einfluss auf die Zielgröße, falls die Werte von ΔT größer als ca. 5 K sind (Bild 5.2-9). Jedoch ist der Einfluss nicht linear über den gesamten Wertebereich.

Der Einfluss der Windrichtung ist ebenfalls signifikant. Die Windrichtung wurde in Klassen von 10° aufgeteilt. Bild 5.2-11 zeigt die Werte des Einflusses der Windrichtung. In Tabelle und sind die Anzahl der Werte pro Klasse und die Einflussgröße factor(windri) dargestellt.

Ein detaillierte Analyse der angenäherten Funktionen wird in Kapitel 6 durchgeführt.

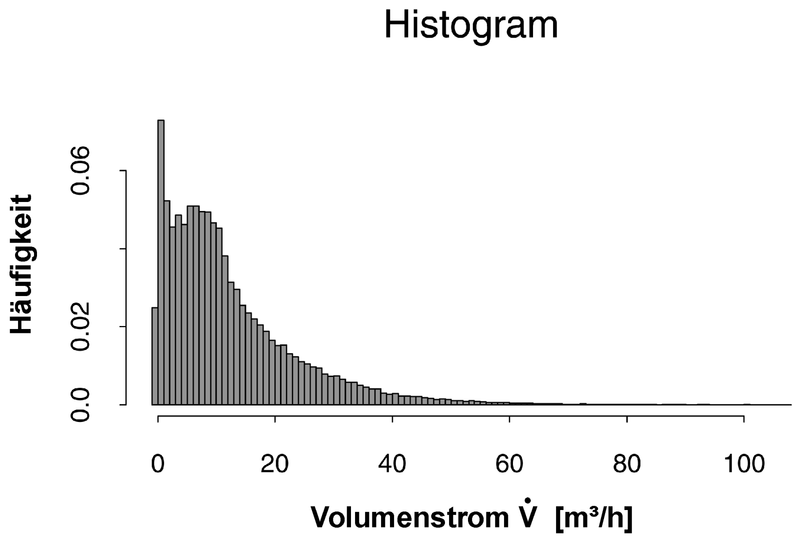

Bild 5.2-1: Histogramm, RWE-Turm ohne Wurzeltransformation

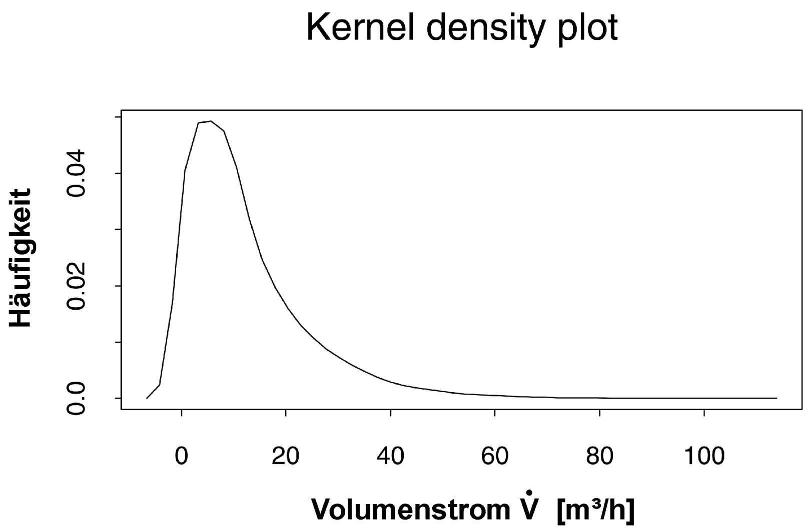

Bild 5.2-2: Kernel density plot, RWE-Turm ohne Wurzeltransformation

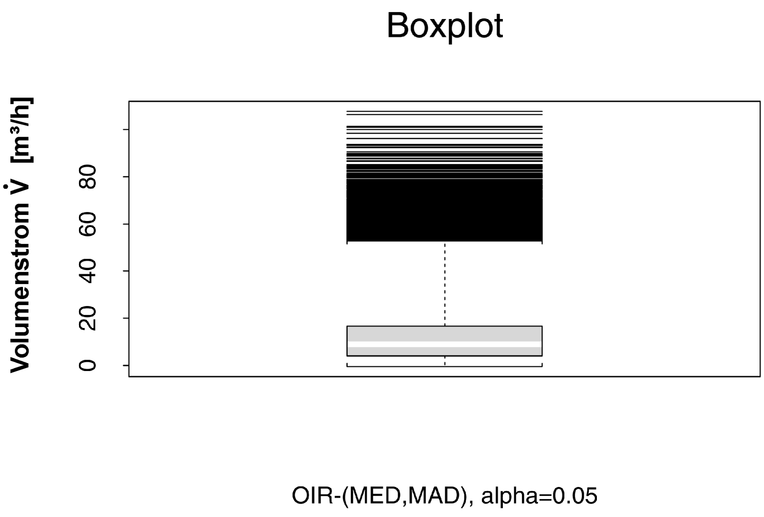

Bild 5.2-3: Boxplot, RWE-Turm ohne Wurzeltransformation

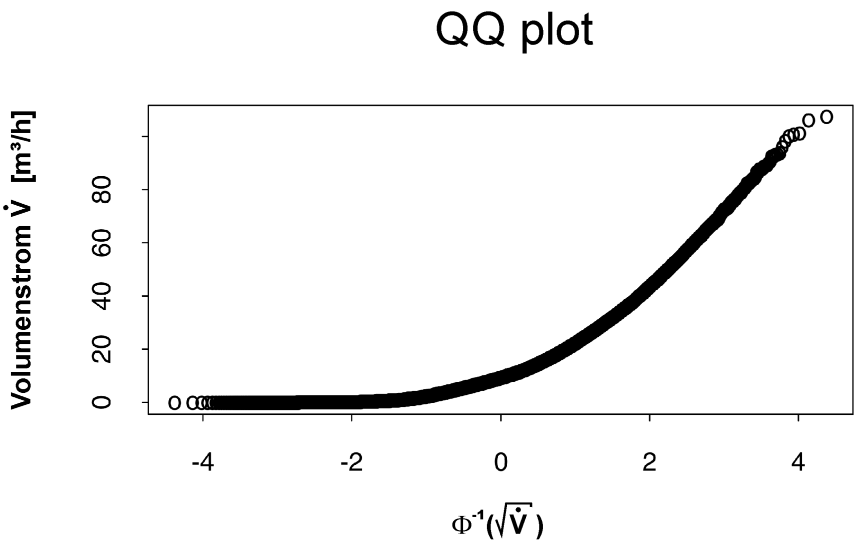

Bild 5.2-4: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung
. RWE-Turm ohne Wurzeltransformation

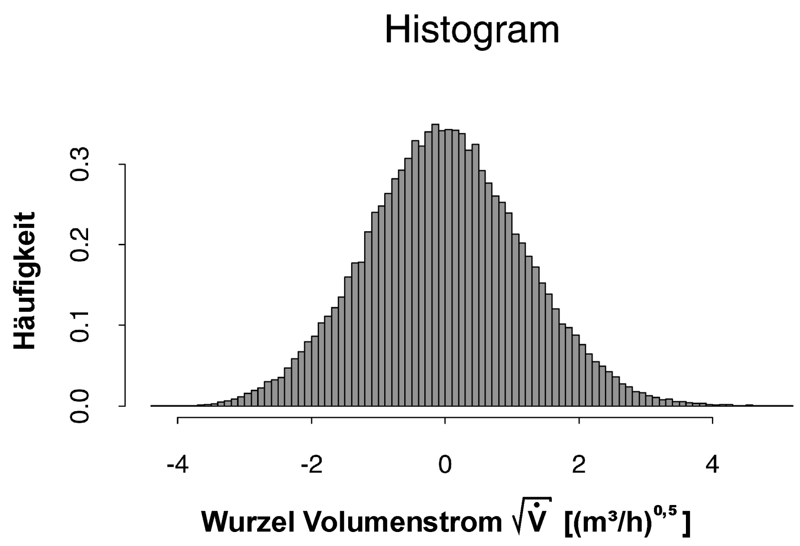

Bild 5.2-5: Histogramm, RWE-Turm mit Wurzeltransformation

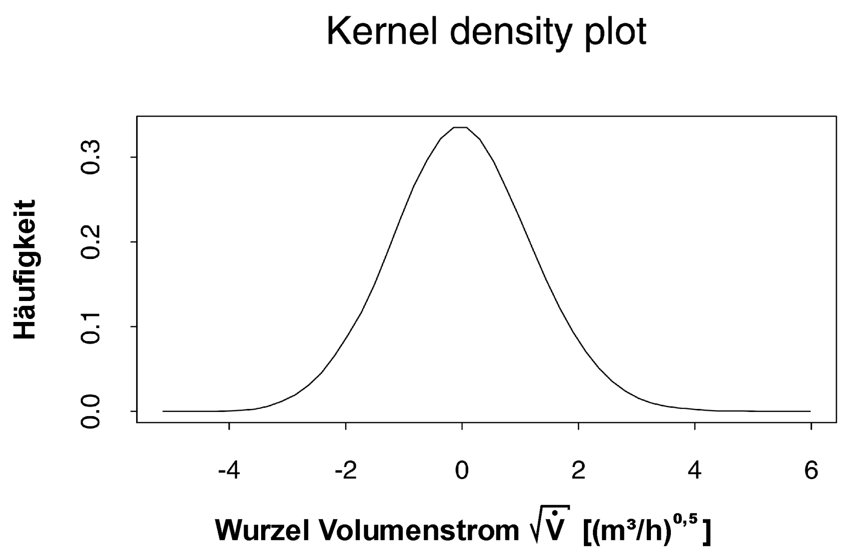

Bild 5.2-6: Kernel density plot, RWE-Turm mit Wurzeltransformation

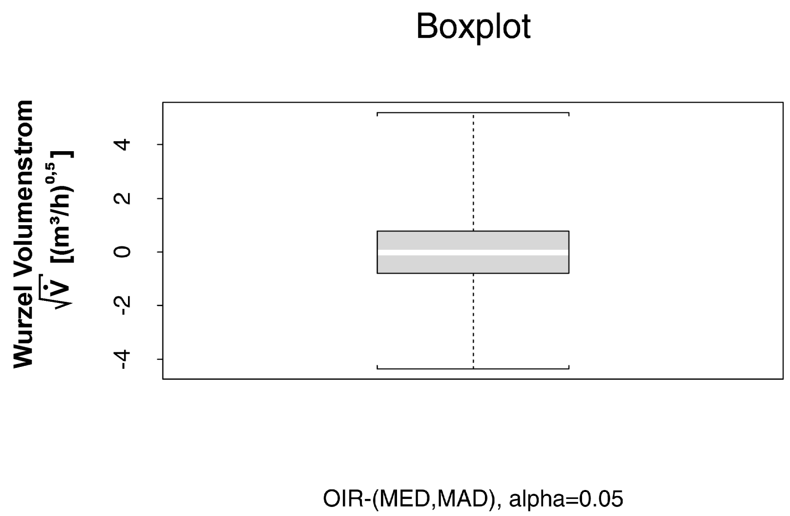

Bild 5.2-7: Boxplot, RWE-Turm mit Wurzeltransformation

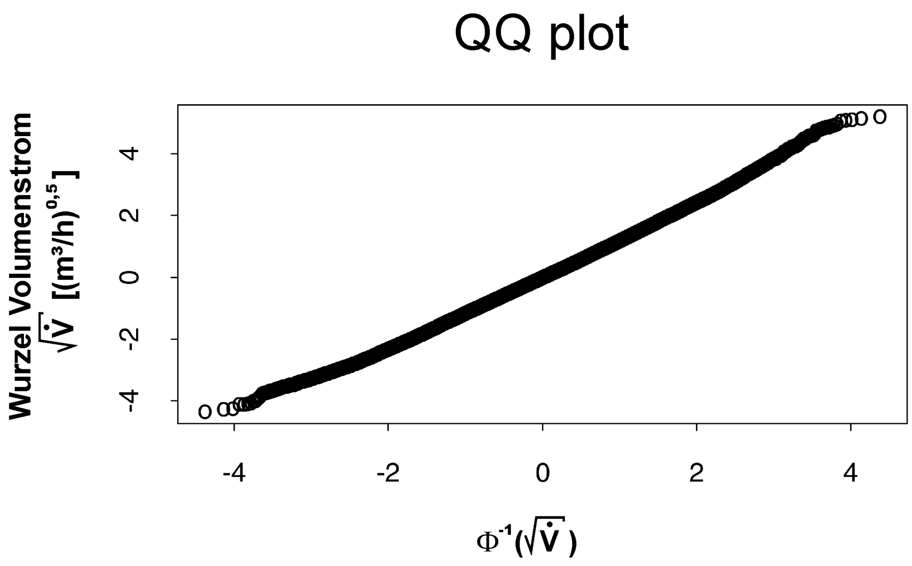

Bild 5.2-8: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung RWE-Turm mit Wurzeltransformation

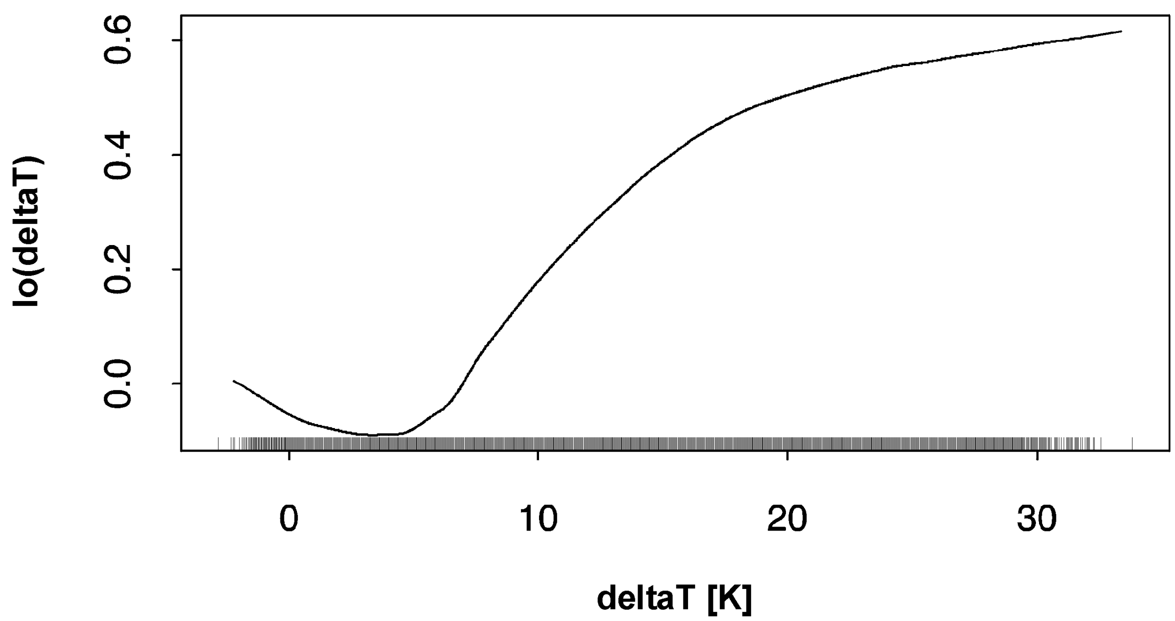

Bild 5.2-9:Einflussfunktion der Temperaturdifferenz, RWE-Turm

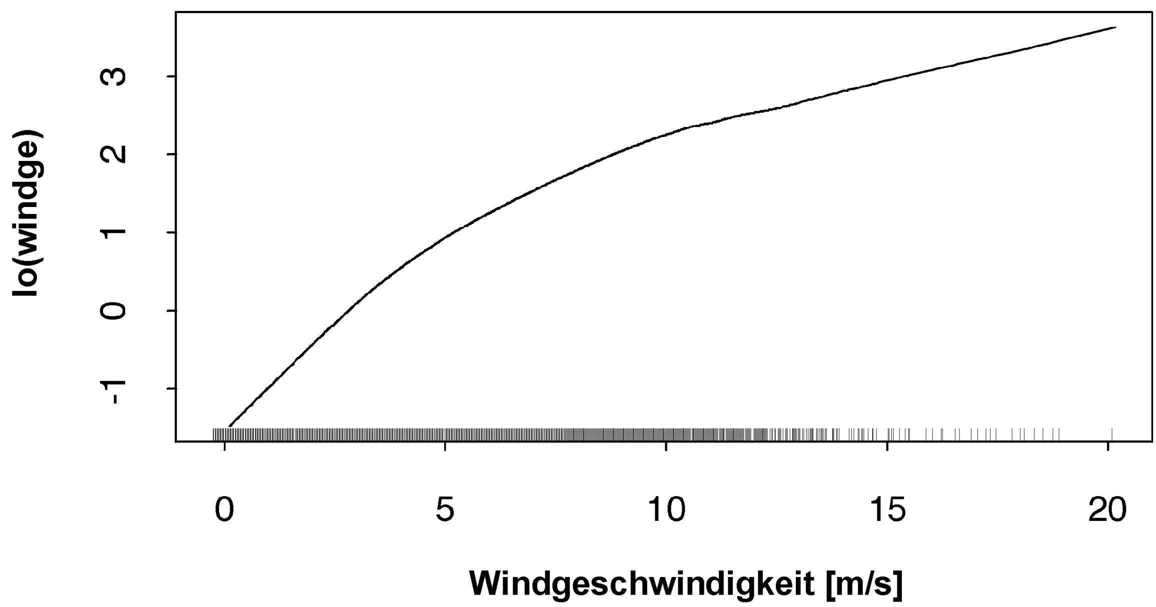

Bild 5.2-10: Einflussfunktion der Windgeschwindigkeit , RWE-Turm

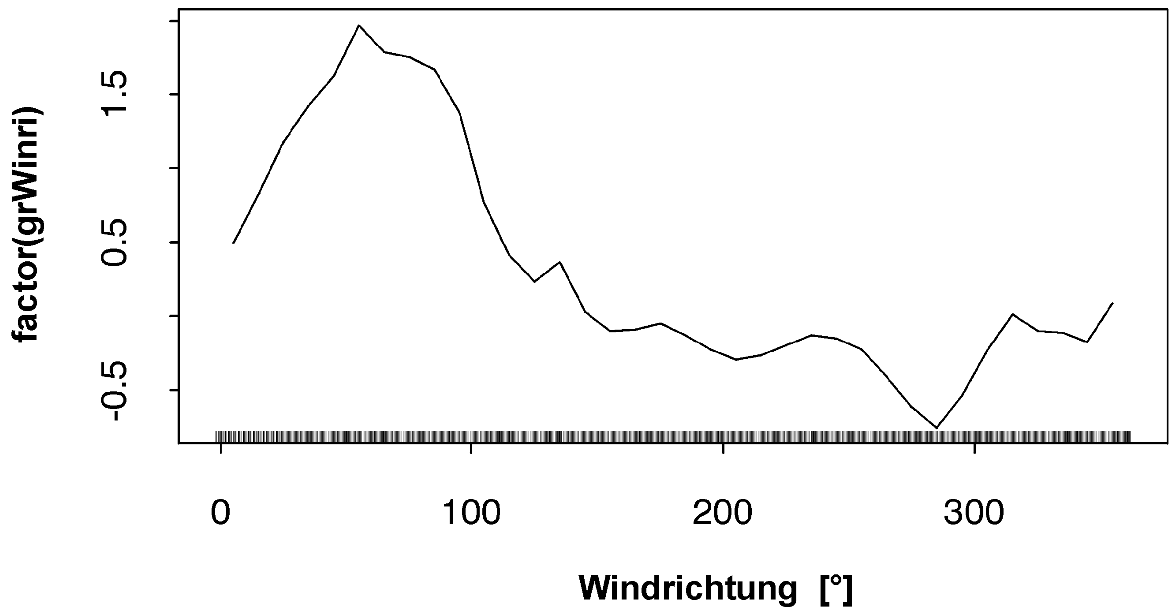

Bild 5.2-11: Einfluss der Windrichtung normiert auf das Intervall 0° bis 10° RWE-Turm (gruppiert in 10° Schritten)

Tabelle 5.2-1: Anzahl der Messpunkte für jede Klasse der Windrichtung (0° = oben)

Windrichtung	5°	15°	25°	35°	45°	5°5°	65°	75°	85°	95°	105°	115°
Anzahl Messpunkte	2164	2287	1829	1509	1934	106	2213	1073	1366	849	1232	874
Windrichtung	125°	135°	145°	155°	165°	175°	185°	195°	205°	215°	225°	235°
Anzahl Messpunkte	1032	90	1208	1986	875	1417	1481	2152	1745	1689	2265	119
Windrichtung	245°	255°	265°	275°	285°	295°	305°	315°	325°	335°	345°	355°
Anzahl Messpunkte	2951	1873	4124	4909	9932	6358	5067	275	4532	4676	2422	2732

Tabelle 5.2-2: Einflussfaktoren der Windrichtung

Windrichtung	5°	15°	25°	35°	45°	5°5°	65°	75°	85°	95°	105°	115°
factor(grWindri)	0,50	0,83	1,18	1,42	1,62	1,97	1,79	1,75	1,67	1,37	0,77	0,41
Windrichtung	125°	135°	145°	155°	165°	175°	185°	195°	205°	215°	225°	235°
factor(grWindri)	0,23	0,36	0,03	-0,10	-0,09	-0,05	-0,13	-0,23	-0,30	-0,27	-0,20	-0,13
Windrichtung	245°	255°	265°	275°	285°	295°	305°	315°	325°	335°	345°	355°
factor(grWindri)	-0,15	-0,23	-0,41	-0,62	-0,76	-0,54	-0,24	0,01	-0,10	-0,11	-0,18	0,09

5.3 Victoria Versicherung

Für die statistische Auswertung der Messdaten der Victoria Versicherung standen keine am Gebäude gemessenen Daten für Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Verfügung, da eine Kabelführung vom Dach zum Datalogger nicht möglich war. Für die Statistik wurden die am Flughafen Düsseldorf vom deutschen Wetterdienst in Stundenschritten aufgezeichneten Werte für Windgeschwindigkeit und Windrichtung verwendet. Die am Gebäude aufgezeichneten Daten wurden Stundenschritten synchronisiert.

Untersucht wurde der Zeitraum vom 18.08.1997 bis 27.05.1998, aufgezeichnet als 15-Minuten-Mittelwerte und zu Stunden-Mittelwerten verrechnet. Die statistische Berechnung berücksichtigt insgesamt 6.477 Stunden-Intervalle.

Einflussgrößen für die Hinterlüftung der Doppelfassade hier:

- Temperaturdifferenz Δt zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung
- Windgeschwindigkeit am Flughafen Düsseldorf
- Windrichtung am Flughafen Düsseldorf.

Zielgröße ist der mit der Umgebung ausgetauschte Volumenstrom pro m² Fassadenfläche ($\dot{V}$).

Für die Größen Temperaturdifferenz und Windgeschwindigkeit wurde die oben beschriebene Darstellung (lo(Δt) und lo(Windge)) als Aneinanderreihung optimierter Werte gewählt. Auch hier wurde die Windrichtung in 10° Schritten klassifiziert und für jeden Bereich ein Einflussparameter ermittelt (factor(grWindri)). Tabelle 5.3-1 zeigt die Anzahl der Messwerte in den einzelnen Klassen.

Zunächst wurde der Zusammenhang zwischen der Zielgröße und den Einflussgrößen wie folgt bestimmt:

$$\dot{V} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri})$$

Das Ergebnis der statistischen Auswertung zeigt im Histogramm, im Kernel density plot und im QQ plot, einen deutlich schiefen Verlauf (Bild 5.3-1 bis 5.3-4). Wie beim Siemens-Gebäude und dem RWE-Turm wird eine Wurzeltransformation durchgeführt und die folgende Formel approximiert.

$$\sqrt{\dot{V}} \sim \mathrm{lo}(\Delta t) + \mathrm{lo}(\mathrm{Windge}) + \mathrm{factor}(\mathrm{grWindri})$$

Alle drei erklärenden Variablen haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße, die Wurzel des Volumenstrom pro m² Fassadenfläche. Der Pr(F) Wert für die Variable Windge wird mit 0.000406965 angegeben. Die Pr(F) Wert der Temperaturdifferenz deltaT wird mit null beziffert.

Die Windgeschwindigkeit (Bild 5.3-10) zeigt einen monoton wachsenden Einfluss auf die Zielgröße (hier sogar einen approximativ linearen Einfluss). Δt zeigt ebenfalls einen monoton wachsenden Einfluss (Bild 5.3-9). Im Bereich zwischen 2 K und 6 K ist der Einfluss gegenüber einer linearen Approximation leicht erhöht. Insgesamt nimmt die Steigung mit zunehmender Größe von deltaT leicht ab.

Der Einfluss der Windrichtung ist ebenfalls signifikant. Für die einzelnen Klassen werden jeweils die Anzahl der Werte und die Einflussgröße factor(windri) in Tabelle 5.3-1 und 5.3-2 angegeben.

Die Residualanalyse zeigt, dass die Verteilung der Residuen approximativ normalverteilt ist (Bild 5.3-5 bis 5.3-7). Der QQ plot ist für große Werte immer noch leicht schief (Bild 5.3-8).

Eine Diskussion der einzelnen Einflussgrößen erfolgt in Kapitel 6.

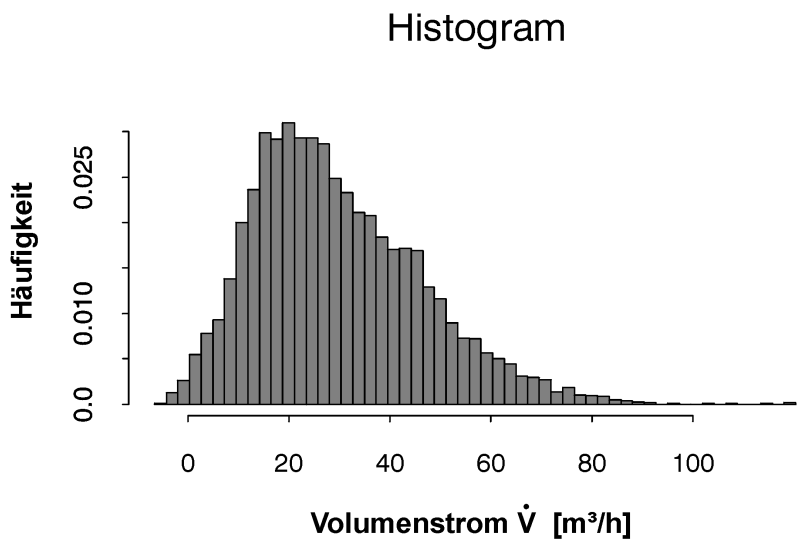

Bild 5.3-1:Histogramm, Victoria ohne Wurzeltransformation

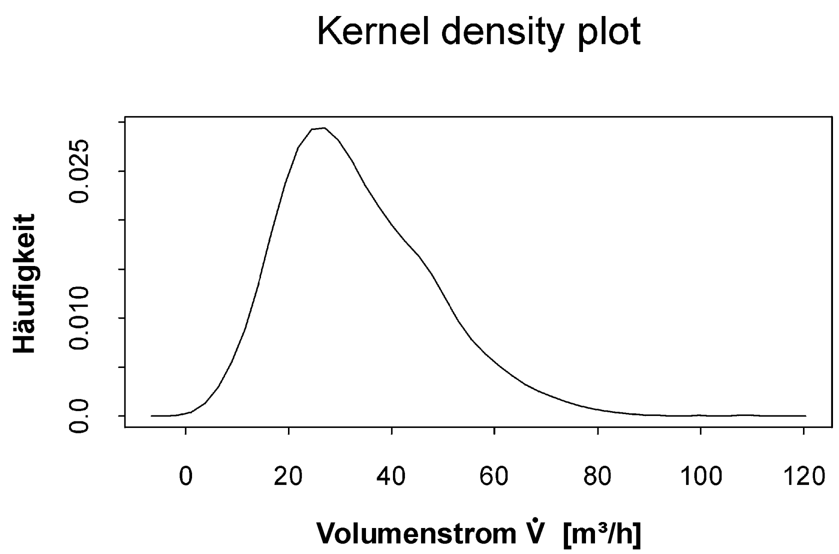

Bild 5.3-2: Kernel density plot, Victoria ohne Wurzeltransformation

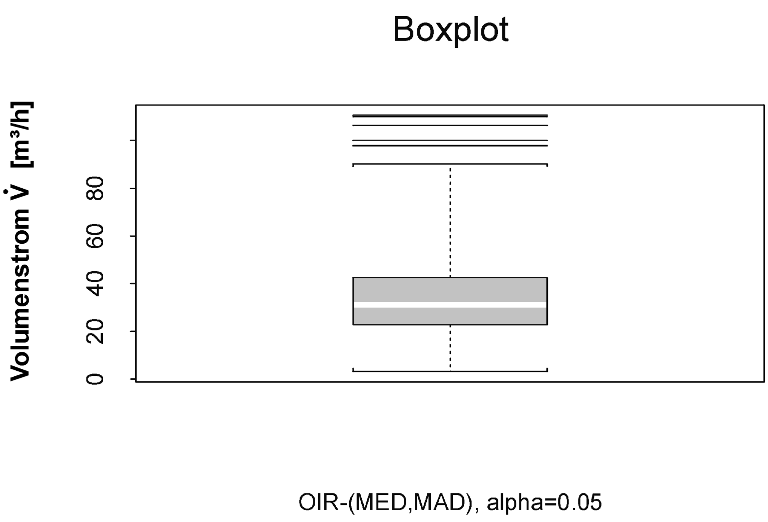

Bild 5.3-3: Boxplot, Victoria ohne Wurzeltransformation

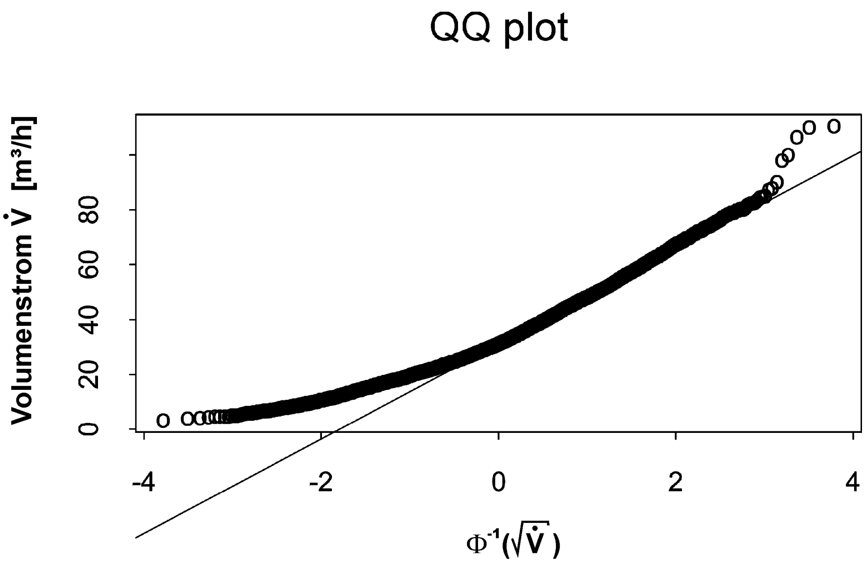

Bild 5.3-4: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung Victoria ohne Wurzeltransformation

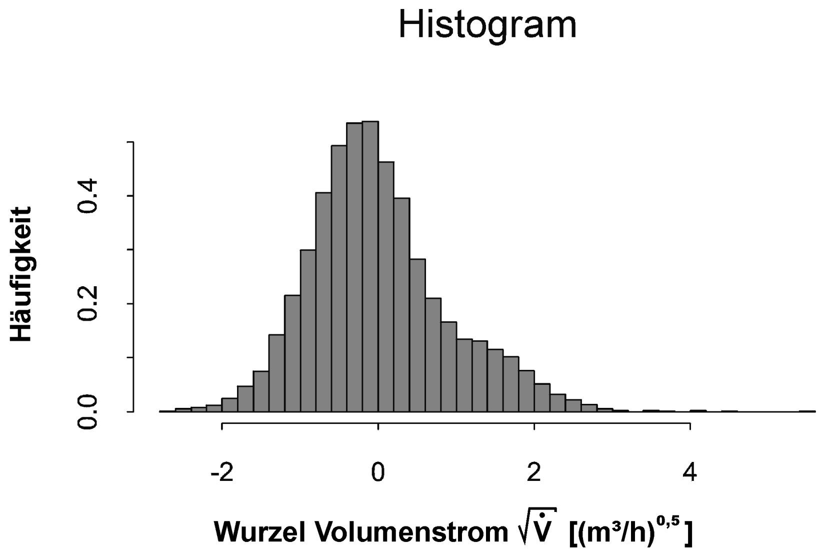

Bild 5.3-5: Histogramm, Victoria mit Wurzeltransformation

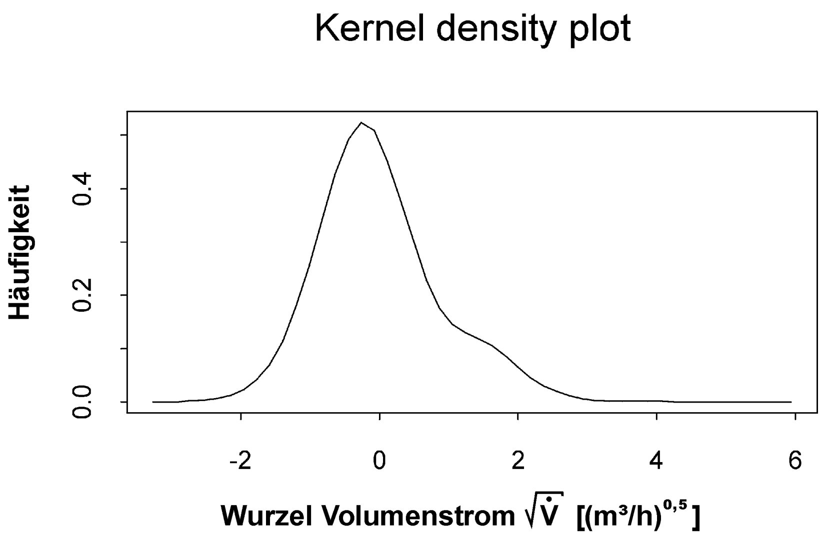

Bild 5.3-6: Kernel density plot, Victoria mit Wurzeltransformation

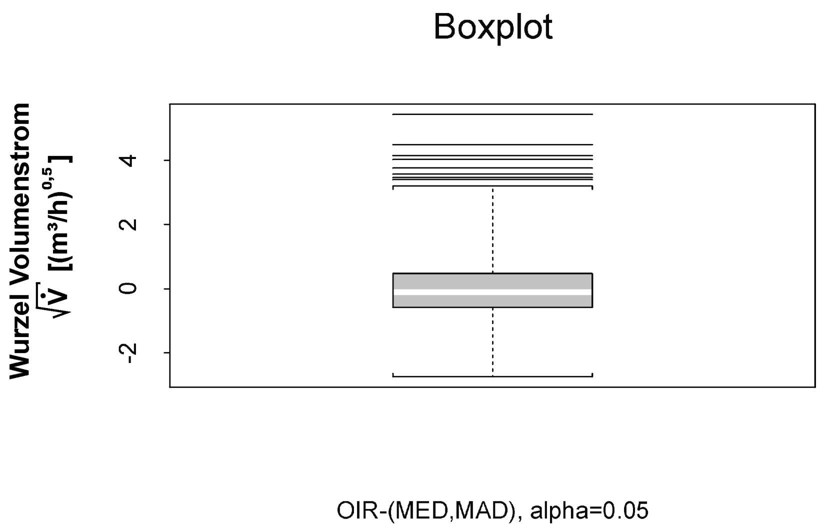

Bild 5.3-7: Boxplot, Victoria mit Wurzeltransformation

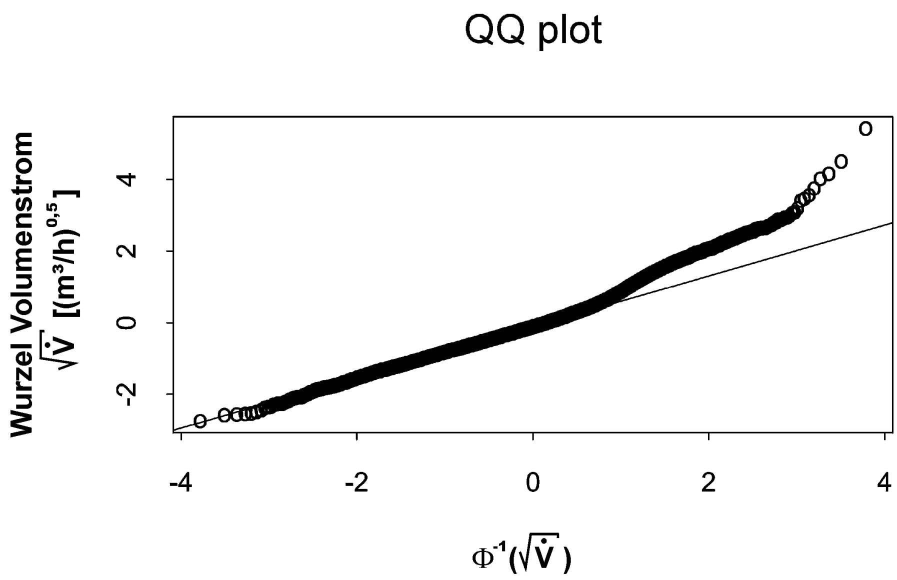

Bild 5.3-8: Wahrscheinlichkeitspapier für Normalverteilung, Victoria mit Wurzeltransformation

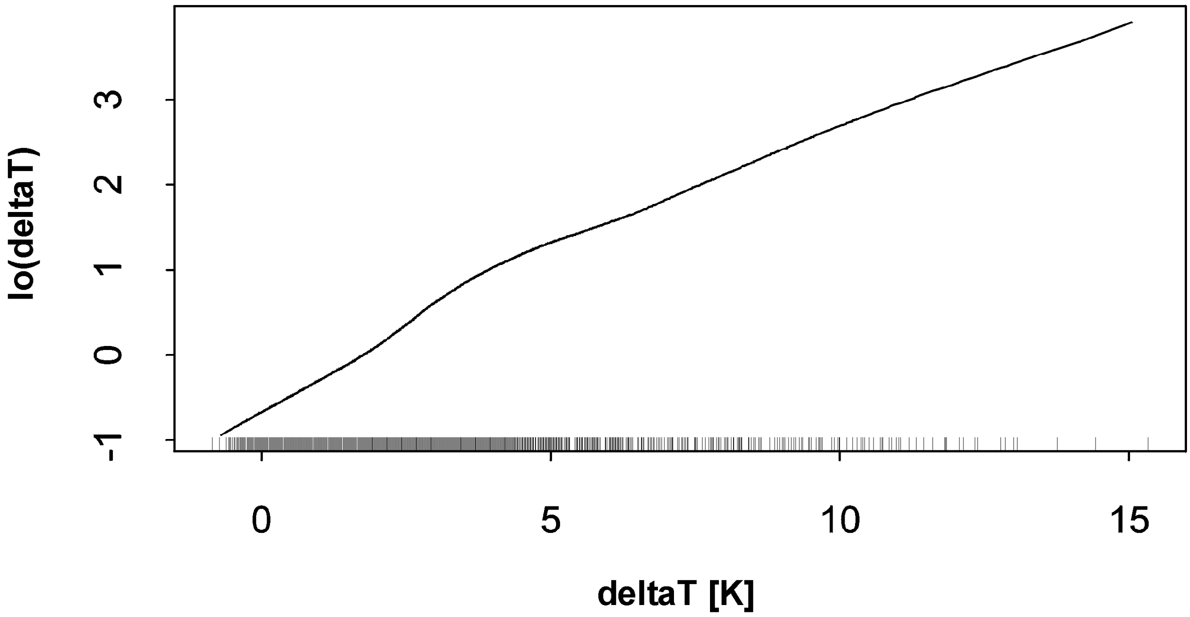

Bild 5.3-9: Einflussfunktion der Temperaturdifferenz, Victoria

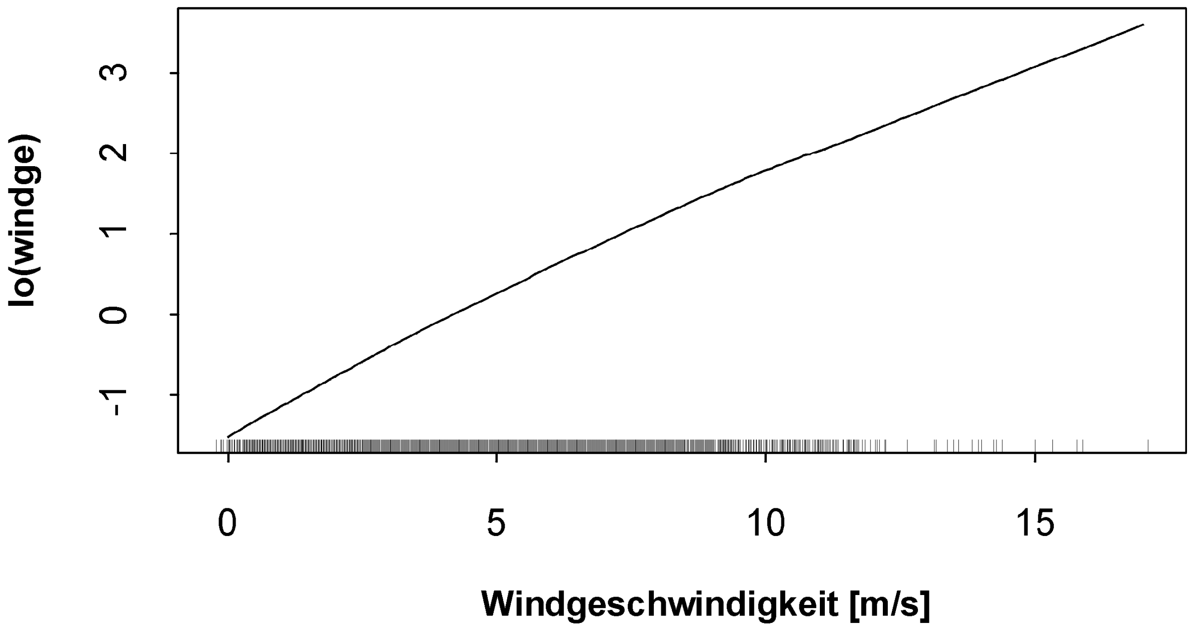

Bild 5.3-10: Einflussfunktion der Windgeschwindigkeit , Victoria

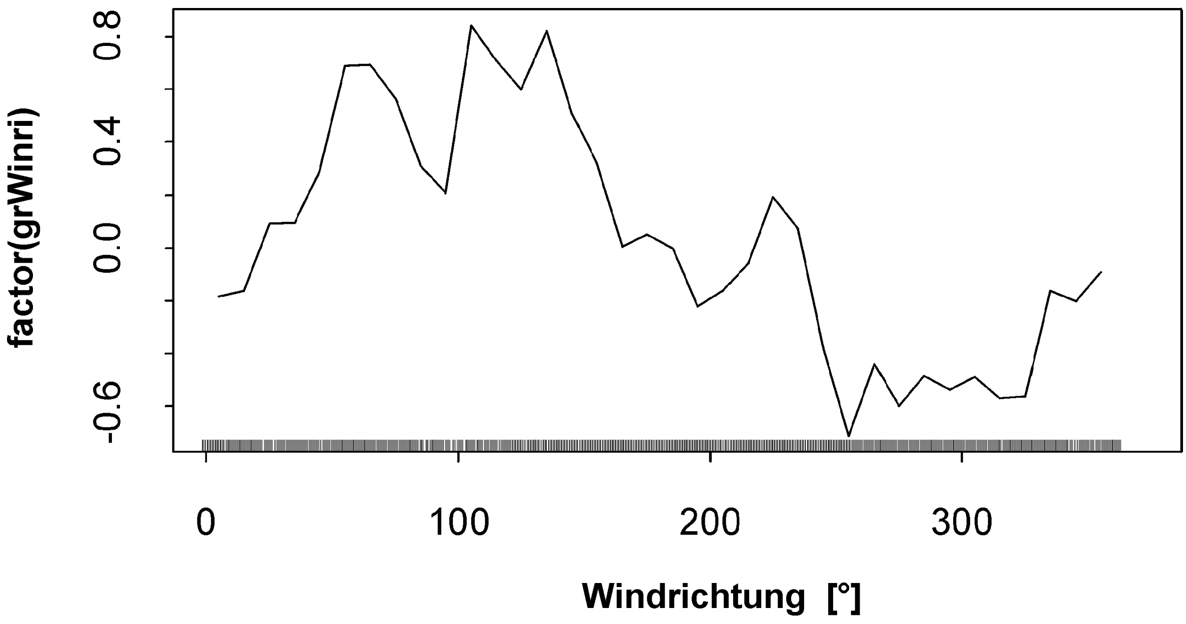

Bild 5.3-11: Einfluss der Windrichtung normiert auf das Intervall 0° bis 10°, Victoria (Gruppiert in 10° Schritten)

Tabelle 5.3-1: Anzahl der Messpunkte für jede Klasse der Windrichtung (0° = oben, 90 = Osten, 180 = unten, 270 = Westen)

Windrichtung	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115
Anzahl der Messwerte	115	109	121	121	150	176	185	116	59	41	68	77
Windrichtung	125	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235
Anzahl der Messwerte	88	100	130	416	681	301	234	219	156	210	337	390
Windrichtung	245	255	265	275	285	295	305	315	325	335	345	355
Anzahl der Messwerte	317	198	166	174	154	126	150	120	130	134	102	106

Tabelle 5.3-2: Einflussfaktoren der Windrichtung

Windrichtung	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	95°	105°	115°
factor(grWindri)	0,02	0,25	0,25	0,42	0,78	0,78	0,66	0,44	0,35	0,92	0,79
Windrichtung	135°	145°	155°	165°	175°	185°	195°	205°	215°	225°	235°
factor(grWindri)	0,90	0,62	0,45	0,17	0,21	0,17	-0,03	0,02	0,11	0,34	0,23
Windrichtung	255°	265°	275°	285°	295°	305°	315°	325°	335°	345°	355°
factor(grWindri)	-0,47	-0,22	-0,36	-0,26	-0,31	-0,27	-0,35	-0,34	0,01	-0,01	0,09

6 Bewertung der Einflussgrößen

In der statistischen Auswertung wurde, nachdem sich eine Wurzeltransformation in allen Fällen als notwendig herausgestellt hatte, die folgende Formel approximiert.

$$\sqrt{\dot{V}} = lo(\Delta t) + lo(Windge) + factor(grWindri) + c \qquad (6\text{-}1)$$

bzw.

$$\dot{V} = (lo(\Delta t) + lo(Windge) + factor(grWindri) + c)^2 \qquad (6\text{-}2)$$

Die Funktionen lo(Δt) und lo(Windge) sind jeweils in kleinen Schritten im Rahmen der statistischen Auswertung angenäherte Funktionen der Temperaturdifferenz zwischen Fassade und Umgebung und der Windgeschwindigkeit. „lo“ steht für loess (nicht zu verwechseln mit dem Logarithmus). Die Größe factor(grWindri) stellt den in 10° Schritten klassifizierten Einfluss der Windrichtung dar. Eine Konstante wird als c berücksichtigt. Die Konstante c als Ergebnis der Auswertung zeigt, dass in der Praxis die Luftströmung in der Fassade, von der Streuung abgesehen, nicht unter einen Basiswert fällt.

Bei der Korridorfassade des Siemens-Gebäudes dominiert die Windgeschwindigkeit die Hinterlüftung des Doppelfassadenzwischenraumes (Bild 6-1). Eine Durchströmung der Fassade durch den Windeinfluss ist dabei sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung möglich, da der Fassadenkorridor nur an den Gebäudeecken unterbrochen ist. Der Temperatureinfluss und der Einfluss der Windrichtung sind deutlich untergeordnet und liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Die Konstante c liegt mit einem Wert von 1,27 darunter.

Die Hochhausfassade (Kastenfenster) des RWE-Turms zeigt ebenfalls eine klare Dominanz des Windeinflusses. Vor der Fassade des RWE-Turms wurden außerdem die höchsten Windgeschwindigkeiten gemessen. Der Einfluss der Temperaturdifferenz mit einem Maximum von 0,65 liegt sogar noch deutlich unter der Konstanten von 1,23. Der Einfluss der „Windrichtung“ (gemessen parallel zur Fassade, s.o.) ist hier von allen untersuchten Gebäuden am deutlichten.

Für die Fassade der Victoria Versicherung (Kastenfenster) mit den in den vertikalen Pfosten (Lisenen) angeordneten „Zuluft“-Öffnungen stellt sich eine ähnliche Wertigkeit des Einflusses von Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz ein. Durch die vertikalen Abtrennungen der Fassade wird der Windeinfluss gegenüber dem Siemens-Gebäude zurückgedrängt. Die Konstante liegt mit 2,7 über dem Einfluss der Windrichtung. Insgesamt stellt sich beim der Fassade der Victoria Versicherung der höchste konstante Anteil in der o.g. Funktion für die Hinterlüftung der Fassade ein, der auf eine unspezifische Überlagerung der einzelnen Einflüsse hindeutet.

Zusammenfassend wird in Bild 6-4 in einem Diagramm der Einfluss von Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz gezeigt. Um die Gewichtung der Einflüsse zu vergleichen, wurden alle Einflussgrößen mit der Wurzel des mittleren Volumenstromes der einzelnen Fassade für die untersuchte Messperiode normiert. Beim RWE-Turm dominiert der Windeinfluss. Beim Siemens-Gebäude überwiegt ebenfalls der Windeinfluss, währen bei der Victoria Versicherung beide Einflüsse in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

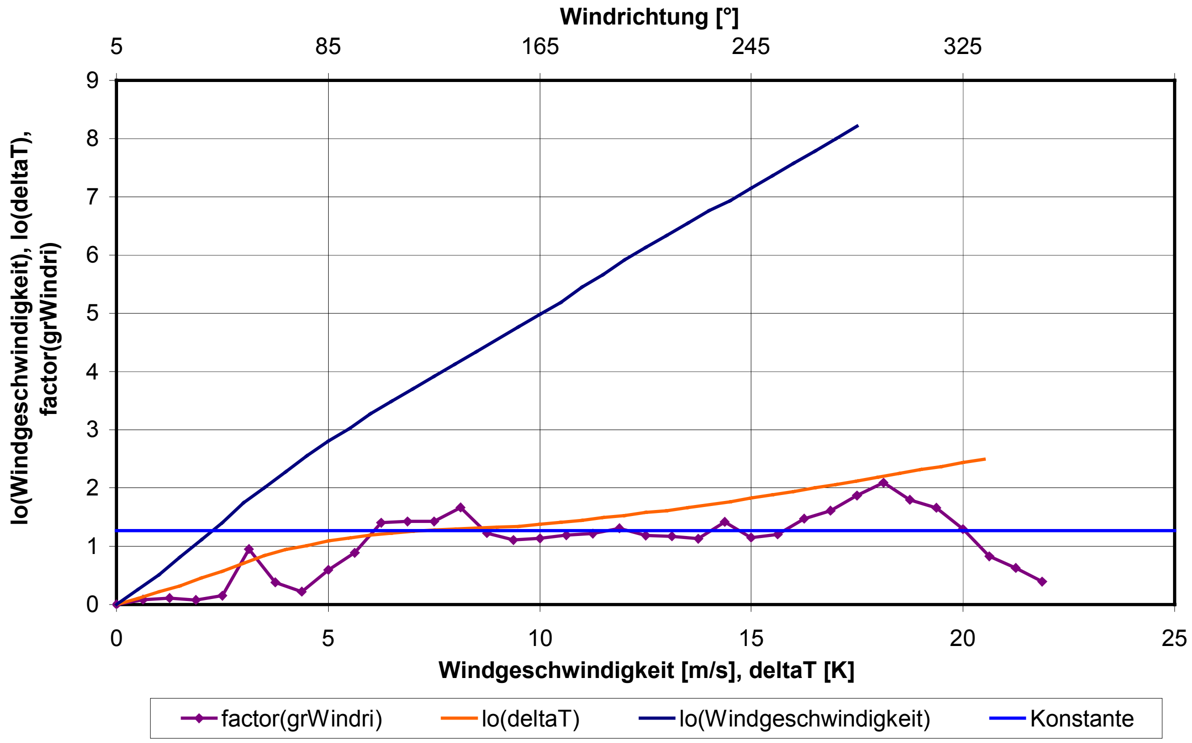

Bild 6-1: Einflussgrößen Siemens-Gebäude

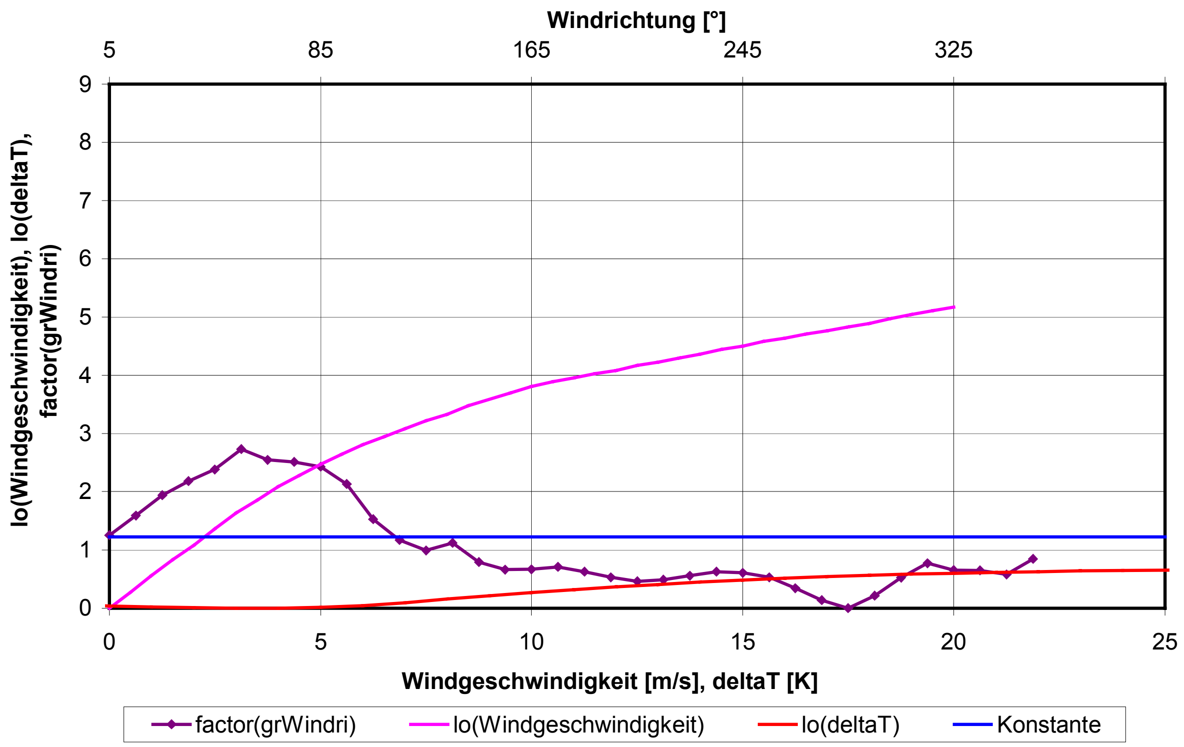

Bild 6-2: Einflussgrößen RWE-Turm

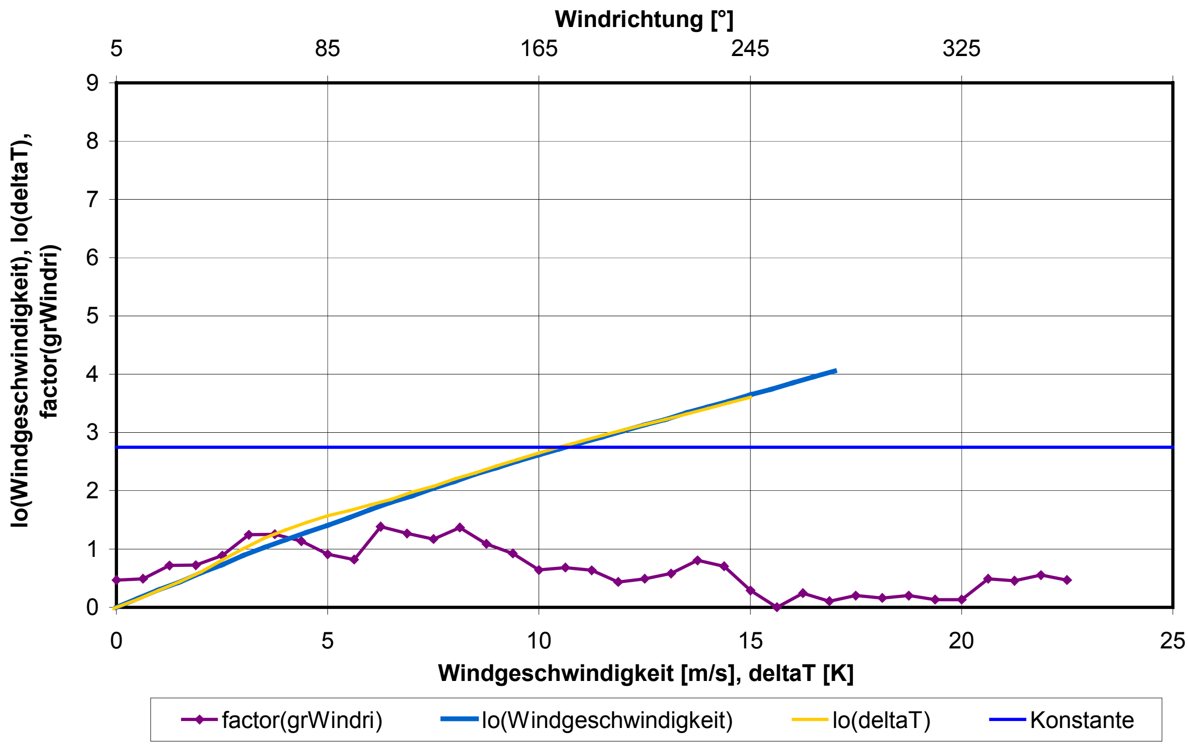

Bild 6-3: Einflussgrößen Victoria Versicherung

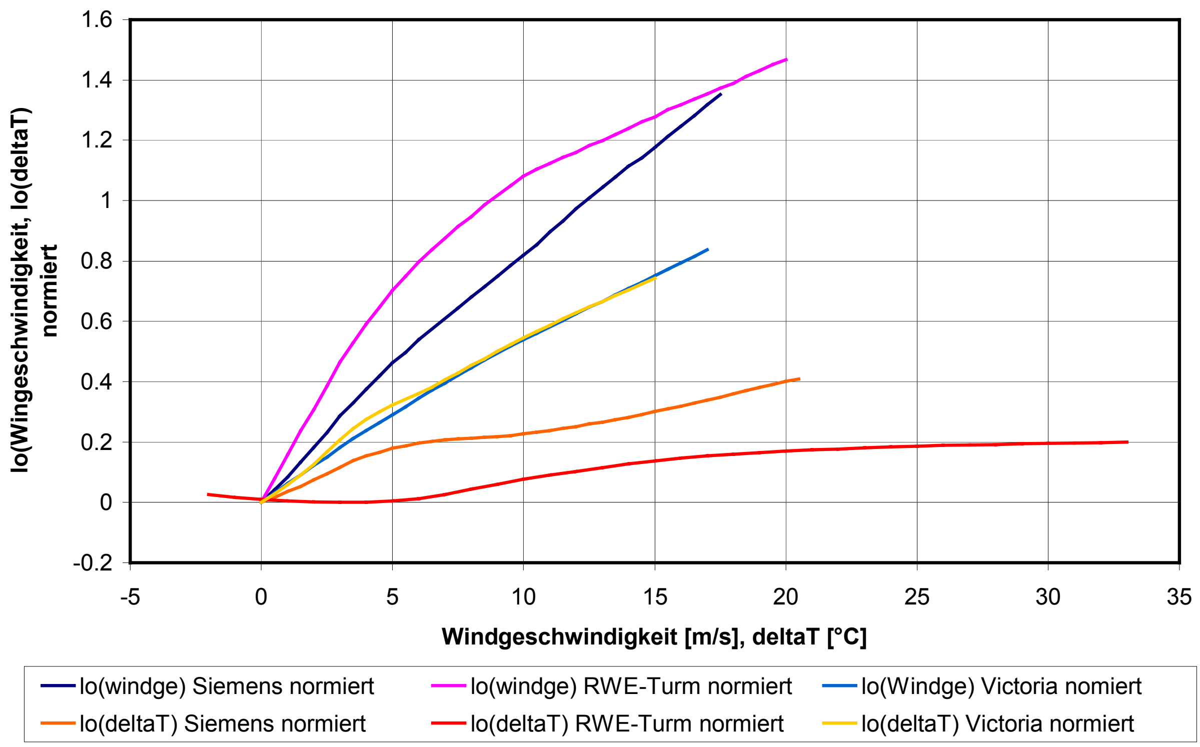

Bild 6-4: Normierter Einfluss von Wind und Temperatur

6.1 Einfluss der Windgeschwindigkeit

Zunächst lässt sich feststellen, dass der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Hinterlüftung der Fassade beim Siemens-Gebäude und beim RWE-Turm dominant ist und sich bei der Victoria Versicherung zumindest gleichbedeutend mit dem Temperatureinfluss darstellt. Steigende Windgeschwindigkeiten haben bei allen Gebäuden einen steigenden Luftvolumenstrom in der Fassade zur Folge. Dieses Ergebnis kann aufgrund der großen Anzahl der Stützpunkte der Langzeitmessungen und der hohen Signifikanz der Einflussgrößen als gesichert gelten.

Eine von *Gertis* [8] aus *Schwarz* [39] zitierte Beobachtung einer mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnehmenden Hinterlüftung von Fassadenbekleidungselementen lässt sich auf die hier zum ersten Mal statistisch ausgewertete Hinterlüftung einer Doppelfassade nicht übertragen. Der Unterschied zwischen den Messungen an Fassadenplatten bei *Schwarz* [39] und den hier untersuchten Doppelfassaden besteht in den um den Faktor 20 bis 100 größeren Lüftungsöffnungen und der um den Faktor 7,5 bis 12,5 größeren Spaltweite der Doppelfassade. Der Anteil der Öffnungsfläche liegt bei der Doppelfassade um den Faktor von etwa 3 bis 6 über dem Öffnungsanteil der untersuchten Fassadenplatten.

Ausgehend von der Physik, würde man zunächst den folgenden Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Luftströmung in der Fassade erwarten: Bei der Durchströmung einer Blende steigt der Durchfluss mit der Wurzel der anliegenden Druckdifferenz. Die Druckdifferenz steigt quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit. Eine abgeleitete Formel für die windinduzierte Hinterlüftung einer Doppelfassade könnte also sehr vereinfacht folgendermaßen nach Bernoulli hergeleitet werden:

$$\dot{V} \sim c_v * \sqrt{\frac{1}{2} * \rho * c_p * v^2} \qquad (6.1\text{-}1)$$

Der Druckbeiwert c_p hängt dabei sowohl von der Windrichtung als auch von der Windgeschwindigkeit ab, da sich Anströmrichtung der Fassadenöffnungen und Turbulenzgrad mit der Windgeschwindigkeit ändern können. Der Geometriebeiwert c_v zur Beschreibung des aerodynamisch wirksamen Querschnittes hängt von der Anströmrichtung des Querschnitts der Öffnungen und somit auch von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab.

Die tatsächliche Außenströmung entlang der Fassade ist eine mehr oder weniger turbulente Grenzschichtströmung bei der kleine Änderungen der Außenströmung größere Auswirkungen auf das Ein- und Ausströmen der Luft im Fassadenzwischenraum haben. Durch die Böigkeit und Turbulenz des Windes und die Turbulenz der Grenzschichtströmung am Gebäude entsteht eine „instationäre Wechselströmung“ (*Gertis* [8]) im Fassadenzwischenraum.

Der in der statistischen Auswertung gefundene Zusammenhang entspricht beim Siemens-Gebäude und bei der Victoria Versicherung nicht der vereinfachten physikalischen Erwartung. Es stellt sich vielmehr ein eher quadratischer Zusammenhang ein.

$\sqrt{\dot{V}}$ ~ Windgeschwindigkeit, bzw. $\dot{V}$ ~ (Windgeschwindigkeit)².

Der Grund für diese quadratische Korrelation ist in der Art des Windeinflusses auf die Fassade zu suchen. Eine Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes wird in erster Linie durch Böigkeit und Turbulenz der Außenströmung ausgelöst. Wenn diese Einflüsse mit steigender Windgeschwindigkeit ansteigen, kann sich ein quadratischer Zusammenhang einstellen.

Die Auswertung für den RWE-Turm zeigt mit zunehmender Windgeschwindigkeit einen Sättigungseffekt, wie er auch schon von *Ziller* [46] für den Temperatureinfluss in Modellversuchen festgestellt wurde.

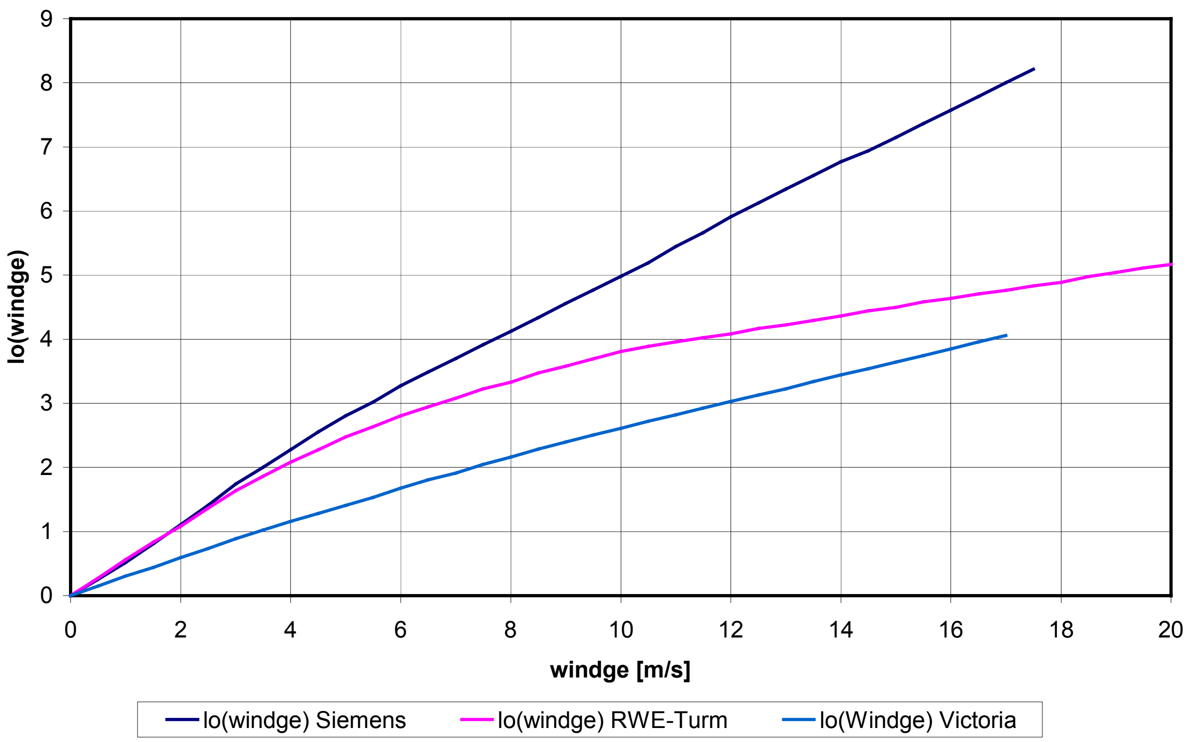

Bild 6.1-1: Einfluss der Windgeschwindigkeit

6.2 Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Fassade und Umgebung

Der Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung lässt sich physikalisch wie folgt herleiten:

Der thermische Auftrieb in der Fassade bzw. die treibende Druckdifferenz zwischen den Lüftungsöffnungen resultiert aus den Dichteunterschieden der warmen Luft im Fassadenzwischenraum und der kälteren Umgebungsluft mit h als für den Auftrieb wirksame Höhe und g als Erdbeschleunigung. Nach Bernoulli gilt:

$$\Delta p = (\rho_u - \rho_{Fass}) * h * g \qquad (6.2\text{-}1)$$

Setzt man das ideale Gasgesetz

$$p / \rho = R * T \qquad (6.2\text{-}2)$$

in (6.2-1)ein, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta p = (p / (R * T_u) - p / (R * T_{Fass})) * h * g \qquad (6.2\text{-}3)$$

$$= (T_{Fass} - T_u) * p / (R * T_{Fass} * T_u) * g * h$$

Für die untersuchten Temperaturdifferenzen ist also in etwa ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz zur Umgebung und einer aus der Thermik resultierenden Druckdifferenz zu erwarten. Da der Volumenstrom mit der Wurzel der Druckdifferenz wächst, ist folgender Zusammenhang zu erwarten :

$$\dot{V} \sim \sqrt{\Delta T}$$

Ziller [46] hat in Modellversuchen ohne Windeinfluss diesen Zusammenhang für den Luftwechsel im Raum bestätigt. Die statistische Auswertung der Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes zeigt jedoch in der Kombination mit den anderen Einflussgrößen für das Siemens-Gebäude und die Victoria Versicherung eine Korrelation, die eher der Charakteristik des Windes entspricht.

$$\dot{V} \sim (\Delta T)^2$$

Lediglich beim RWE-Turm entspricht die Kurve lo(dataT) zumindest grob den Erwartungen (Bild 5.2-9). Der Temperatureinfluss liegt hier jedoch erheblich unter dem Einfluss des Windes.

Der Grund für diese gravierende Abweichung ist in der in der Realität vorherrschenden Überlagerung der einzelnen Antriebskräfte zu suchen. Der Temperatureinfluss führt zu einer Strömung von unten nach oben in der Fassade. Der Windeinfluss kann zu einem Luftaustausch mit der Umgebung in allen Richtungen führen. Nur beim RWE-Turm ist eine vertikale Strömung (in beiden Richtungen) vorgegeben.

Große Temperaturdifferenzen treten nur bei einer geringen Hinterlüftung der Fassade auf, d.h. je größer die Temperaturdifferenz ist, desto geringer wird der Windeinfluss. Bei einer besseren Hinterlüftung wird der Temperatureinfluss vom

Windeinfluss überlagert. Da beide Effekte gegeneinander arbeiten können, fällt der Einfluss der Temperaturdifferenz bei kleineren Temperaturdifferenzen weniger ins Gewicht, als bei größeren. Dieser Zusammenhang kann die mit Hilfe der Statistik berechnete quasi quadratische Relation erklären. Durch die Wurzeltransformation treten beim Ausmultiplizieren der angenäherten Formel (6-2) auch gekoppelte Terme von Windgeschwindigkeits- und Temperatureinfluss auf, die eine gegenseitige Beeinflussung dokumentieren.

Das unterschiedliche Verhalten der Fassade am RWE-Turm erklärt sich einerseits aus einer gewissen Sättigung bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten, die auch beim Windeinfluss beobachtet werden. Andererseits können Effekte wie eine Grenzschichtströmung durch thermischen Auftrieb entlang der Fassade (Kapitel 7.2.3) oder ein größerer Temperaturbereich bei geringem Windeinfluss Auswirkungen haben.

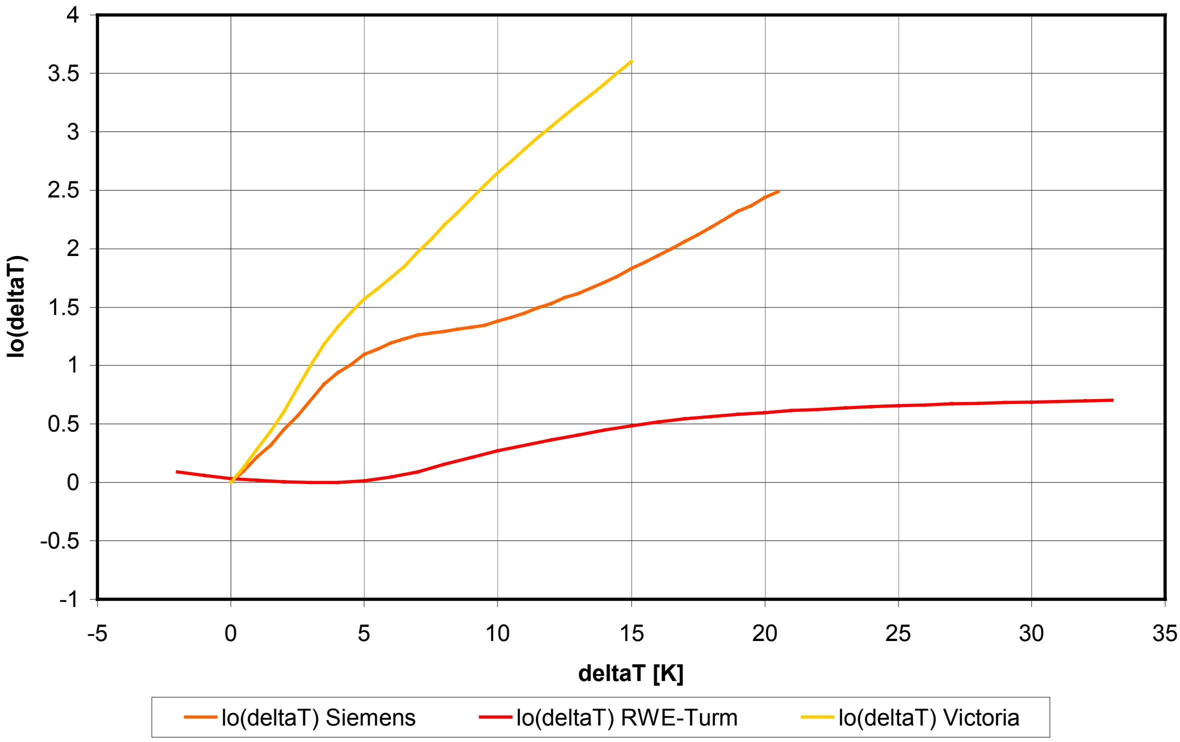

Bild 6.2-1: Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung

6.3 Einfluss der Windrichtung

Die Windrichtung wurde für alle drei vermessenen Gebäude unterschiedlich erfasst: Beim Siemens-Gebäude als 15-Minuten-Werte auf dem Dach des Gebäudes, beim RWE-Turm als 5 Minuten Werte parallel zur Fassade und bei der Victoria Versicherung als stündliche Mittelwerte am Flughafen Düsseldorf. Alle drei Messungen haben jedoch eines gemeinsam. Kleine Änderungen in der Windrichtung können große Auswirkungen haben. Insgesamt zeigt sich also ein chaotischer Einfluss. Der Einfluss liegt bei allen drei Gebäuden in der gleichen Größenordnung, wobei beim RWE-Turm die größten und bei der Victoria Versicherung die kleinsten Ausschläge auftreten. Beim Siemens-Gebäude wird ein Maximum bei 305° (NWW) gemessen. Das Maximum beim RWE-Turm liegt bei 65° (Ost, oben) und ist möglicherweise durch die weiter ostwärts angeordneten außen liegenden Aufzüge bedingt. Die umgebende Bebauung nimmt grundsätzlich ebenfalls Einfluss.

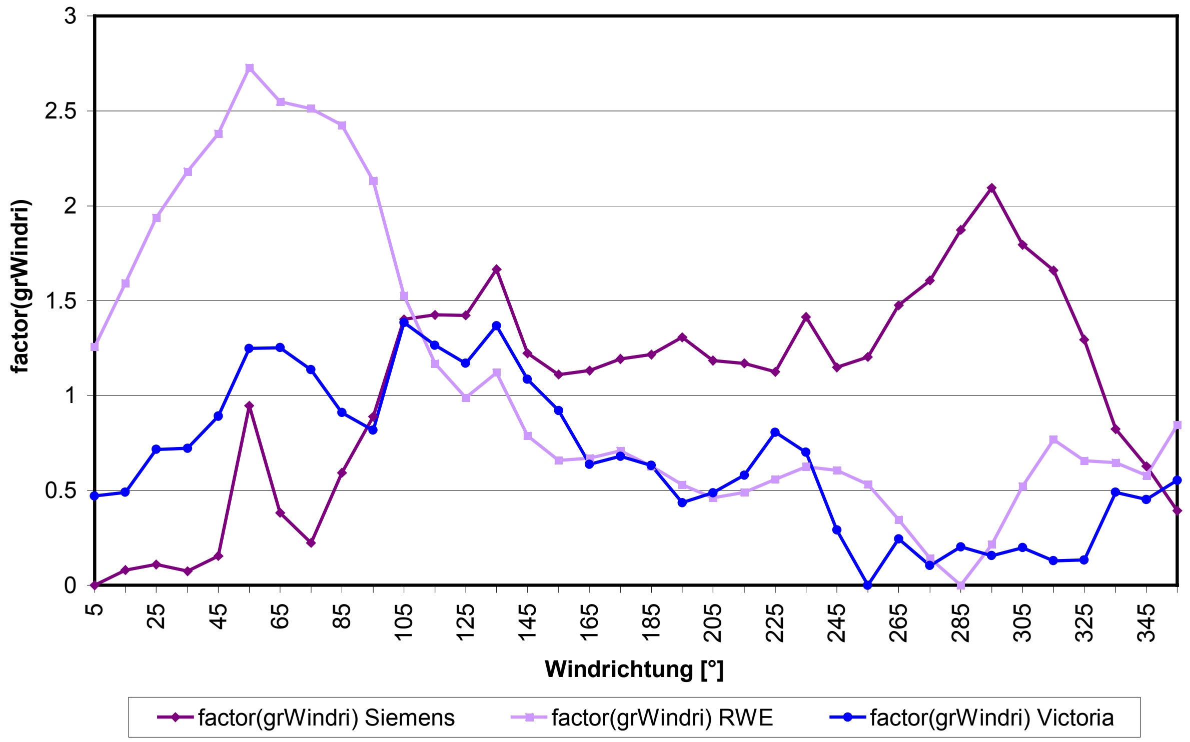

Bild 6.3-1: Einfluss der Windrichtung

6.4 Einfluss der Geometrie

Der Einfluss der Fassadengeometrie beinhaltet die entscheidende Möglichkeit, eine Doppelfassade im Sinne einer bauphysikalisch optimierten Funktion zu beeinflussen. Grundsätzlich sind bei den hier gemessenen Fassaden folgende Parameter unterschiedlich ausgeführt:

- Anteil der wirksamen Öffnungsfläche, bezogen auf die Fläche der hinterlüfteten Doppelfassade,
- Vertikale Abtrennung der Fassade
- Lage der Lüftungsöffnungen
- Öffnungszustand der Fenster der Innenfassade
- Lage und Orientierung der gemessenen Fassade am Gebäude.

In Tabelle 6.4-1 ist die für die jeweilige statistisch ausgewertete Periode ermittelte mittlere Hinterlüftung der einzelnen Doppelfassaden dargestellt. Die Verteilung auf einzelne Abschnitte des Jahres korreliert bei den einzelnen Gebäuden (siehe auch Tabelle 4.1-3, 4.2-2 und 4.3-1).

Der Anteil der wirksamen Öffnungsflächen hat den größten Einfluss auf den durchschnittlichen Luftvolumenstrom pro m² hinterlüfteter Fassadenfläche. Als so genannte wirksame Öffnungsfläche wird hier die Fläche gewertet, bei der „Zu"- und „Abluftöffnungen" gleich groß sind. Ist eine Fläche größer als die andere, so wird nur der der kleinen Fläche entsprechende Anteil gewertet. Wegen des geringeren Strömungswiderstandes der größeren Fläche ist dieses Vorgehen nicht ganz exakt, soll aber für die folgende Betrachtung ausreichen. Bei der Victoria Versicherung wird die obere Öffnung folglich nur mit der Fläche der unteren Öffnungen bewertet.

Der größte spezifische Volumenstrom durch die Öffnungen der Fassade des Siemens-Gebäudes resultiert aus dem gegenüber der Victoria Versicherung starken Windeinfluss, der (neben möglichen Einflüssen durch die Gebäudegeometrie) aus der fehlenden vertikalen Abtrennung der Fassade abzuleiten ist. Die deutliche Übereinstimmung der Kurve des Windeinflusses mit dem RWE-Turm ist eher zufällig, da jeweils ein erheblich unterschiedlicher spezifischer Volumenstrom in der Fassade zugrunde liegt.

Bei der Victoria Versicherung überrascht zunächst der vergleichsweise hohe Einfluss der Temperaturdifferenz zur Umgebung, der mit dem Windeinfluss in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Erwartet hätte man eher einen durch die vertikale Anordnung der Lüftungsöffnungen in den Lisenen geringeren Temperatureinfluss und einen durch die Möglichkeit der Lüftung längs des Fassadenelementes höheren Windeinfluss. Diese Abweichung gegenüber dem Siemens-Gebäude erklärt sich jedoch durch den dort insgesamt dominierenden Windeinfluss, der den Temperatureinfluss reduziert.

Für die praktische Auslegung von Doppelfassaden ist es hilfreich, einen groben Zusammenhang zwischen dem wirksamen Öffnungsanteil in der Fassade und dem sich einstellenden mittleren Volumenstrom pro m² Fassadenfläche herzustellen. Nach den Modellversuchen von *Ziller* [46] ist bis zu einem Öffnungsanteil von ca. 15% bis 20% in etwa mit einem linearen Anstieg der Hinterlüftung zu rechnen. Wie Bild 6.4-1 zeigt, stellt sich für die Fassaden des Siemens-Gebäudes und der Victoria

Versicherung ein ähnlicher spezifischer Volumenstrom, bezogen auf die Querschnittsfläche der Lüftungsöffnungen, ein. Betrachtet man nur diese beiden Gebäude, so stellt sich exakt ein linearer Zusammenhang zwischen dem Anteil der wirksamen Öffnungsfläche in der Fassade und dem mittleren Volumenstrom pro m² Fassadenfläche ein.

$$\dot{V} = 5{,}78 * \text{Öffnungsanteil} \qquad [m^3/m^2] \qquad (6.4\text{-}1)$$

Der relative Fehler dieser Annäherung ist zwar vernachlässigbar. Die Ergebnisse sind jedoch mit Vorsicht zu verwenden, da nur drei Fassaden vermessen wurden und davon nur zwei in diese Annäherung eingehen.

Die spezifische Volumenstrom der Fassade des RWE-Turms liegt wegen der Versperrung des Strömungsquerschnitts durch zusätzlich eingebaute Lochbleche niedriger. Diesen Einfluss zeigt auch der niedrigere spezifische Volumenstrom in den Öffnungsquerschnitten (Bild 6.4-1).

Ziller [46] hat gezeigt, dass die Tiefe des Fassadenzwischenraumes erst ab einer Tiefe von ca. 25 cm den Luftvolumenstrom in der Fassade reduziert, was für die gemessenen Gebäude nicht zutrifft.

Der Öffnungszustand der Fenster der Innenfassade wirkt sich durch den Luftaustausch des Raumes mit dem Fassadenzwischenraum in erster Linie auf die Temperatur im Fassadenzwischenraum aus. Ist die Fassade wärmer als der Raum, strömt im oberen Bereich der Innenfenster warme Luft aus der Fassade in den Raum und im unteren Bereich kühle Luft aus dem Raum in den Fassadenzwischenraum. Eine geringere mittlere Temperatur im Fassadenzwischenraum wird durch die Einflussgröße „Temperaturdifferenz der Fassade zur Umgebung“ erfasst.
Nur bei einer Querlüftung des Gebäudes wirkt sich das Öffnen der Fenster der Innenfassade direkt auf den Luftvolumenstrom zwischen Fassade und Umgebung aus. Eine Querlüftung trat nur kurzfristig beim Siemens-Gebäude auf und ist bezogen auf den ausgewerteten Zeitraum vernachlässigbar gering.

Die Lage der gemessenen Fassade am Gebäude hat sicherlich einen zusätzlichen Einfluss auf die Messergebnisse, der jedoch bei den drei gemessenen Gebäuden zu unspezifisch bleibt und hier nicht weiter erfasst wird.

Tabelle 6.4-1: Lüftungsöffnungen und Hinterlüftung

	Siemens	**RWE**	**Victoria**
Achsmaß [m]	1.75	1.93	2.75
Höhe [m]	3.13	3.43	3.04
Tiefe [m]	0.3	0.5	0.35
Fläche [m²]	5.48	6.62	8.36
Zuluft [m²]	0.175	0.097	0.170
Abluft [m²]	0.175	0.097	1.080
Zuluft %	3.19%	1.46%	2.03%
Abluft %	3.19%	1.46%	12.92%
Wirksame Öffnung	**6.4%**	**2.9%**	**4.1%**
Luftströmung pro m² Fassadenfläche [m³/h]	**36.9**	**12.4**	**23.5**
Luftwechsel	123	25	67

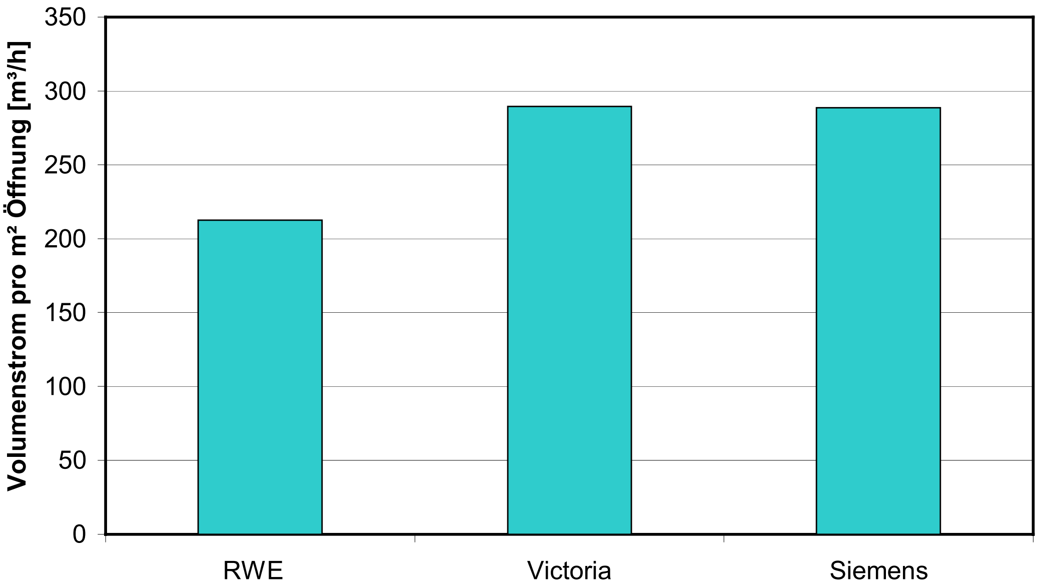

Bild 6.4-1: Spezifischer Volumenstrom der Lüftungsöffnungen

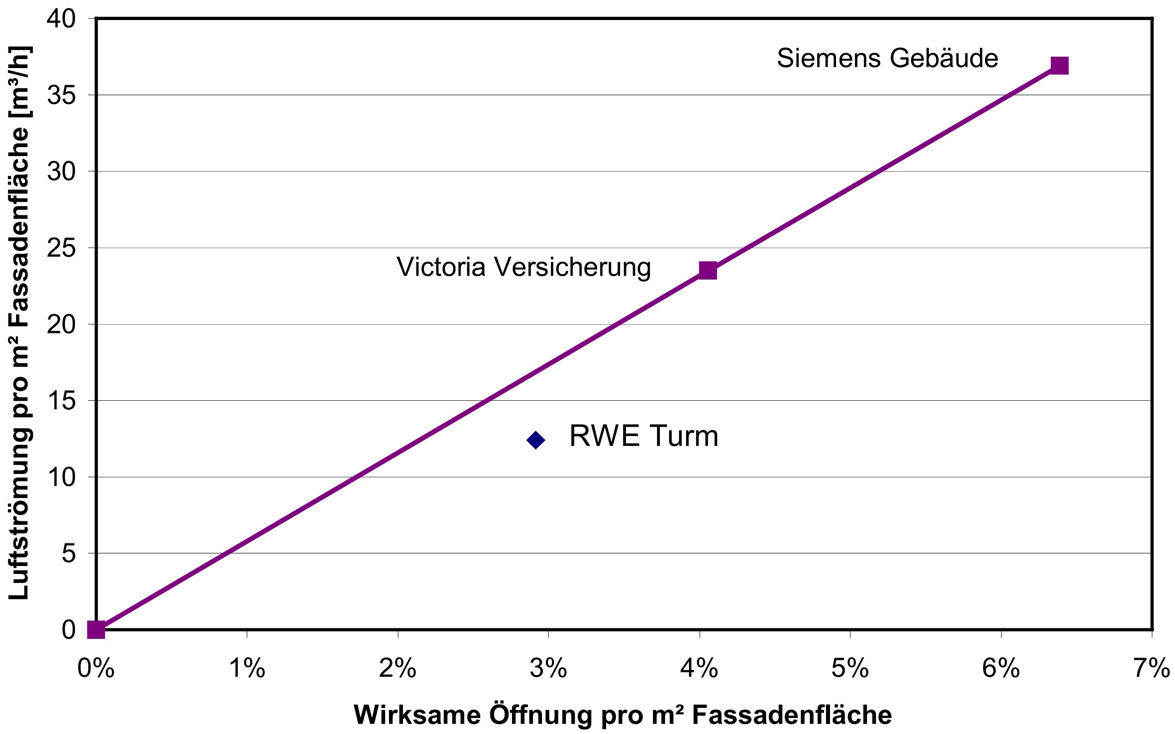

Bild 6.4-2: Relation zwischen Öffnungsanteil in der Fassade und Hinterlüftung

7 Einfluss des Fassadenluftwechsels auf die Temperaturen im Raum und in der Doppelfassade

Die Hinterlüftung des Doppelfassadenzwischenraumes ist eine Größe, die bisher nur schwer abzuschätzen war. Sie trägt, wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, maßgeblich zur Energiebilanz des Doppelfassadenzwischenraums bei und hat großen Einfluss auf die dort zu erwartenden Temperaturen.

Im folgenden soll exemplarisch für die drei vermessenen Gebäude mit unterschiedlichen Öffnungsanteilen der äußeren Fassade und der daraus resultierenden Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes gezeigt werden, wie sich die Temperaturen in der Fassade und im angrenzenden Raum entwickeln. Von Interesse sind dabei die Temperaturen im Sommer und die Temperaturüberschreitungsdauern während der Arbeitszeit. Die Hinterlüftung der Fassade beeinflusst auch die Energieeinsparung durch die Doppelfassade im Winter, die anhand der Messergebnisse quantifizierbar ist und hier ebenfalls dargestellt wird.

Der Fassadenzwischenraum ist bei allen untersuchten Gebäuden nach außen hin über die gesamte Höhe einfach verglast. Der Glasanteil der inneren Fassade variiert, ist jedoch bei geschlossenem Sonnenschutz von untergeordneter Bedeutung.

Die nach verschiedenen Himmelsrichtungen orientierten Fassaden beeinflussen naturgemäß die solaren Gewinne der Fassade und des angrenzenden Raumes. Eine weitere wichtige Einflussgröße für die im Raum gemessenen Temperaturen stellen die Art und der Umfang der eingesetzten Haustechnik dar, deren Einfluss in diesem Kapitel berücksichtigt wird. Bei hohen Gebäuden entsteht an windstillen Tagen eine warme Grenzschichtströmung vor der Fassade, auf die am Beispiel des RWE-Turms genauer eingegangen wird.

Obwohl die beiden wichtigen Faktoren Orientierung der Fassade und Haustechnik in den untersuchten Gebäuden variieren, lässt sich die Bedeutung und der Einfluss der Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes aus den Messergebnissen ableiten.

7.1 Siemens Niederlassung Dortmund

Die Doppelfassade des Siemens-Gebäudes hat mit einem effektiven Öffnungsanteil von 6,4 % von den drei untersuchten Gebäuden den größten Öffnungsanteil in der äußeren Fassade. Der mittlere Luftströmung zur Umgebung beträgt ca. 37 m³/h pro m² äußerer Fassadenfläche des Fassadenzwischenraumes.

Mit den Fassadenorientierungen nach Südost und Südwest wurden die im Sommer ungünstigsten Orientierungen vermessen. Das untersuchte Call-Center weist neben der nachteiligen Lage als Eckraum zusätzlich relativ hohe Wärmeeinträge durch die Nutzung auf.

7.1.1 Sommerliche Temperaturen

Bild 7.1-1 bis 7.1-4 veranschaulichen die Temperaturen im Raum und im Fassadenzwischenraum für eine Wärmeperiode im August 1998. Die thermische Masse des Gebäudes sorgt bei geschlossenem Sonnenschutz dafür, dass das Außentemperaturniveau im Inneren an extremen Tagen nicht überschritten wird. Die Außentemperatur kann jedoch erreicht werden. Die Temperaturen im Fassadenspalt liegen an extremen Tagen um 8°C bis 10°C über der Außentemperatur. Diese Temperaturen führen jedoch trotz geöffneter Fensterr nicht zu ähnlichen Bedingungen im Innenraum.

Die vom Nutzer sehr intensiv durchgeführte Nachtlüftung sorgt für eine Entspeicherung des Gebäudes. Ein Verzicht auf eine abgehängte Decke hätte die thermische Masse der Betondecke besser für den Raum nutzbar gemacht. Zu Zeiten, an denen extreme Temperaturen im Innenraum auftraten, wurden nach unseren Beobachtungen alle Brandschutztüren geöffnet und das Gebäude quergelüftet. In der dargestellten wärmsten Woche des Messzeitraumes erreichte die Windgeschwindigkeit tagsüber zwischen 4 und 6 m/s, was die Querlüftung entsprechend unterstützt.

Von den Fenstern des Call-Centers (großer Raum) wurden im August die 9 Fenster der Südwestfassade und kurzzeitig bis zu 5 der 6 Fenster der Südostfassade gekippt. Von den 3 Fenstern des 2er-Büros (kleiner Raum) wurden alle Fenster betätigt. Eines war zeitweise nachts sogar ganz geöffnet. In den Bildern 7.1-1 bis 7.1-4 sind die mit Reedkontakten bestimmten Fensteröffnungszustände dokumentiert.

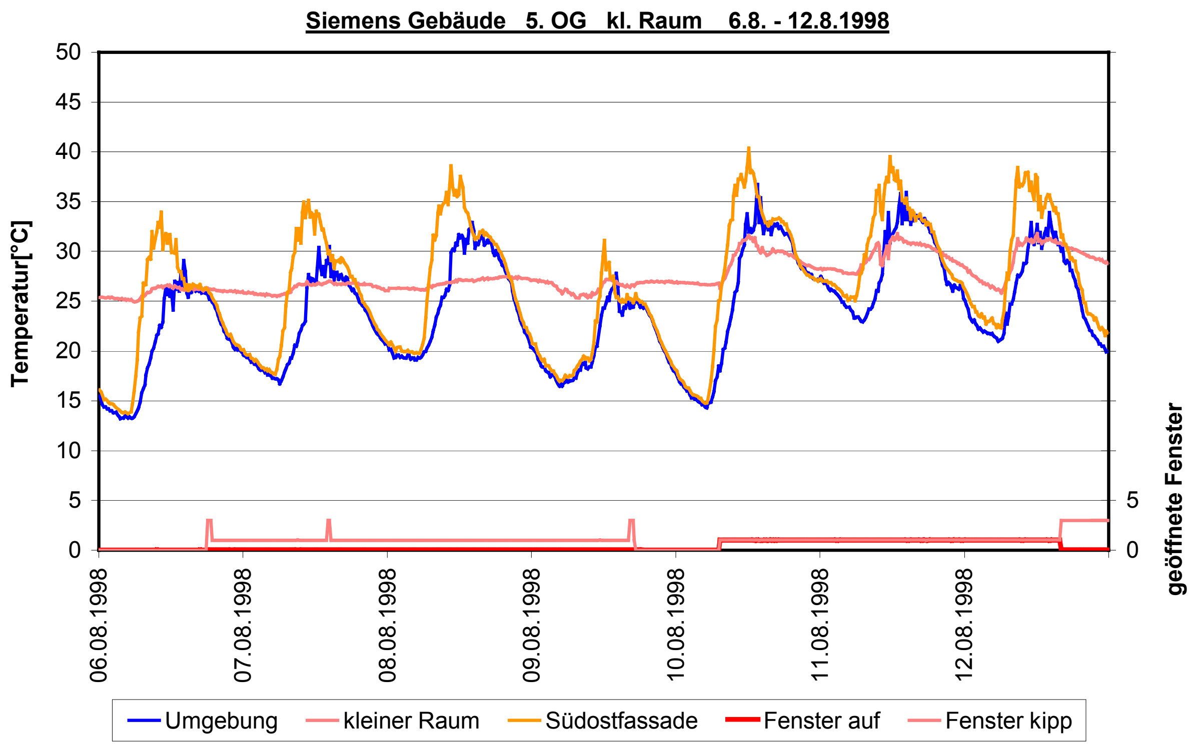

Bild 7.1-1: Temperaturen und Fensteröffnungszustände kl. Raum, wärmste Woche

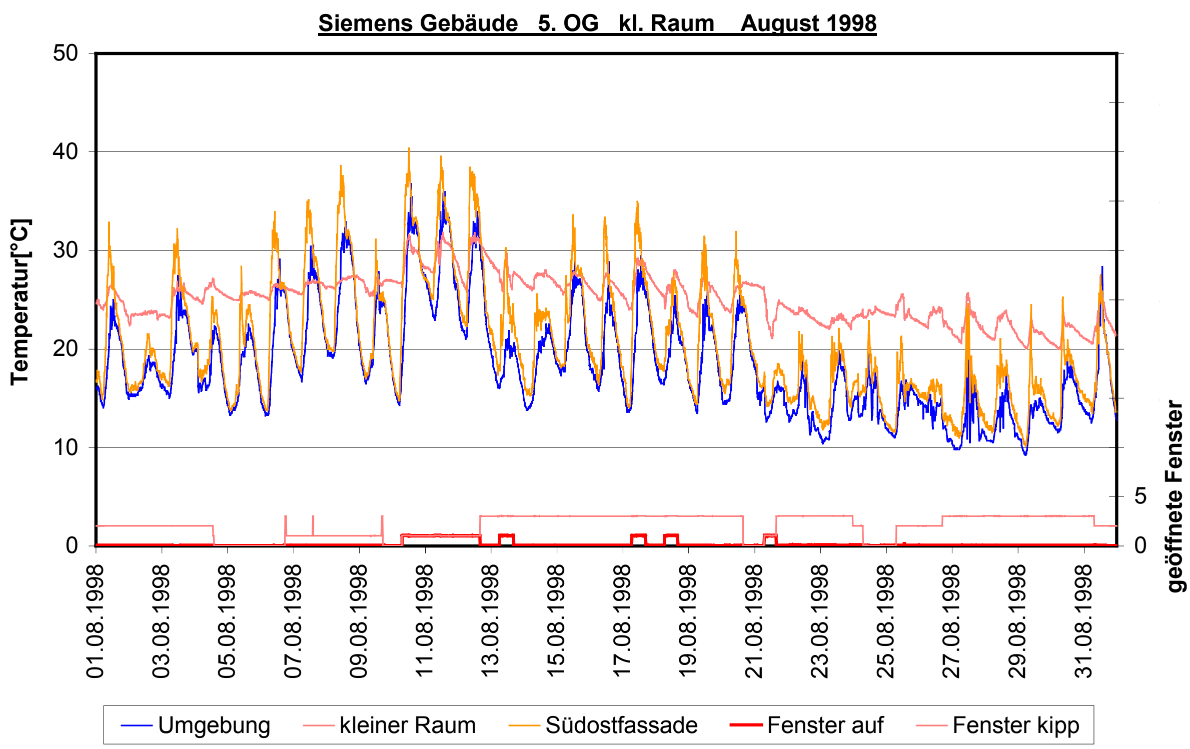

Bild 7.1-2: Temperaturen und Fensteröffnungszustände kl. Raum, August 1998

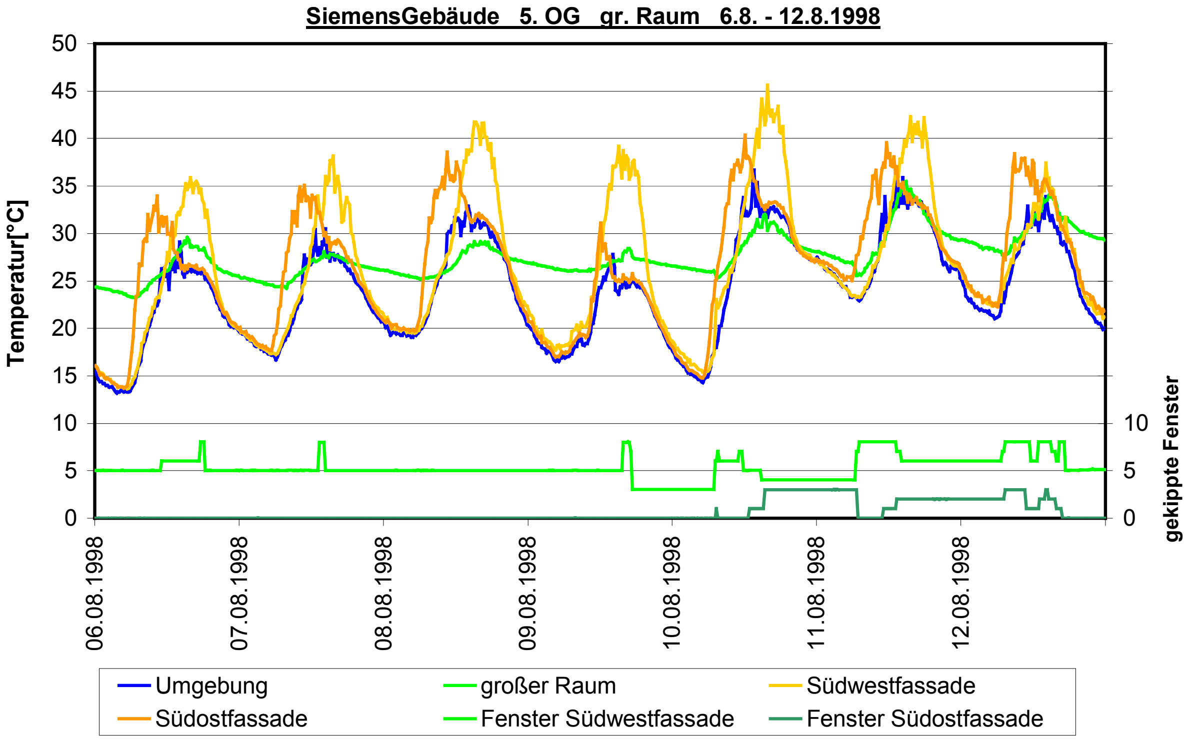

Bild 7.1-3: Temperaturen und Fensteröffnungszustände gr. Raum, wärmste Woche 1997 /1998

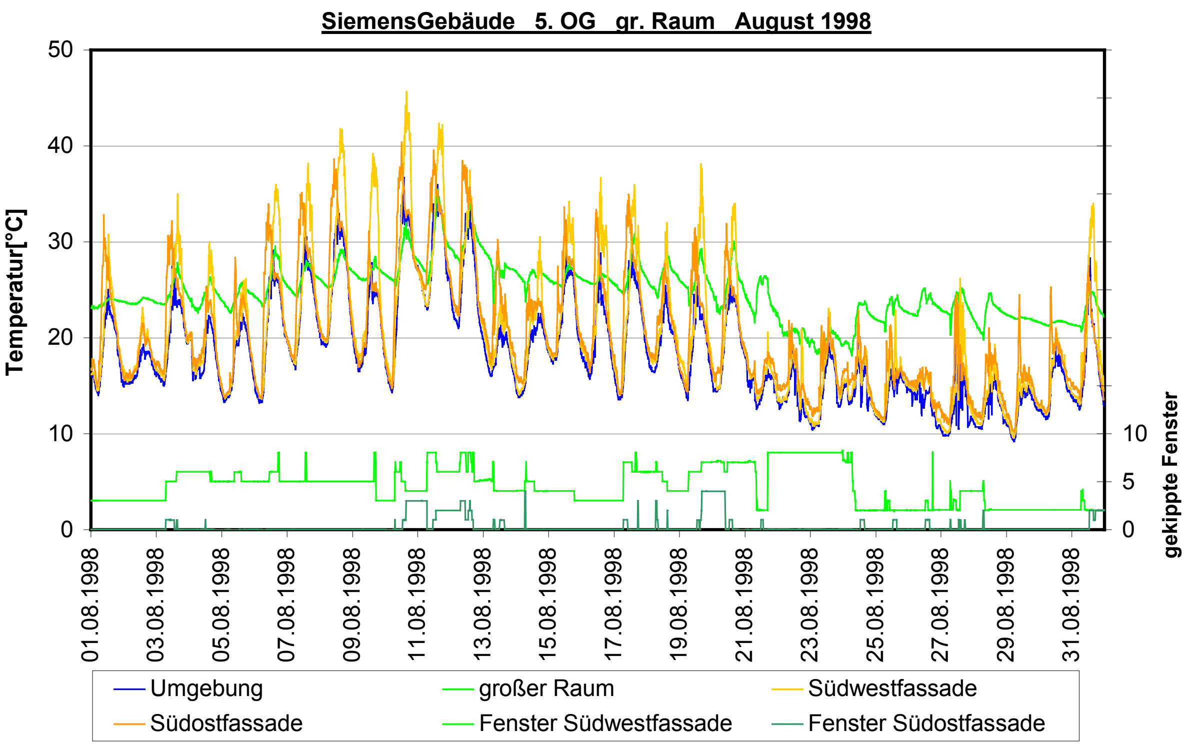

Bild 7.1-4: Temperaturen und Fensteröffnungszustände gr. Raum August 1998

Die Temperaturüberschreitungsdauer während der Arbeitszeit von 8:00 bis 18:00 Uhr im Messzeitraum zeigt Bild 7.1-5. Die Anzahl der Stunden, an denen in diesem Zeitraum eine Temperatur von 28°C überschritten wurde, liegt für den großen Raum (Call-Center) bei 104 Stunden und für den kleinen Raum bei 110 Stunden. Diese Stunden summieren sich rechnerisch auf eine Gesamtarbeitszeit von etwa 10 bis 11 Tagen. Urlaubszeiten und der Einfluss von Teil- und Gleitzeit bleiben bei dieser Rechnung unberücksichtigt. Die ebenfalls dargestellten Temperaturen des Testreferenzjahres 3 [3] wurden ohne Berücksichtigung des Wochenendes gewertet.

Die Umgebungstemperatur war im ausgewerteten Zeitraum überdurchschnittlich hoch. Die vom deutschen Wetterdienst zeitgleich in Essen gemessene Temperatur lag in den wärmsten 50 Stunden der Messperiode während um ca. 2,2 K über den Temperaturen des Testreferenzjahres 3 (Essen). Für die wärmsten 25 Stunden beträgt diese Differenz sogar ca. 2,4 K.

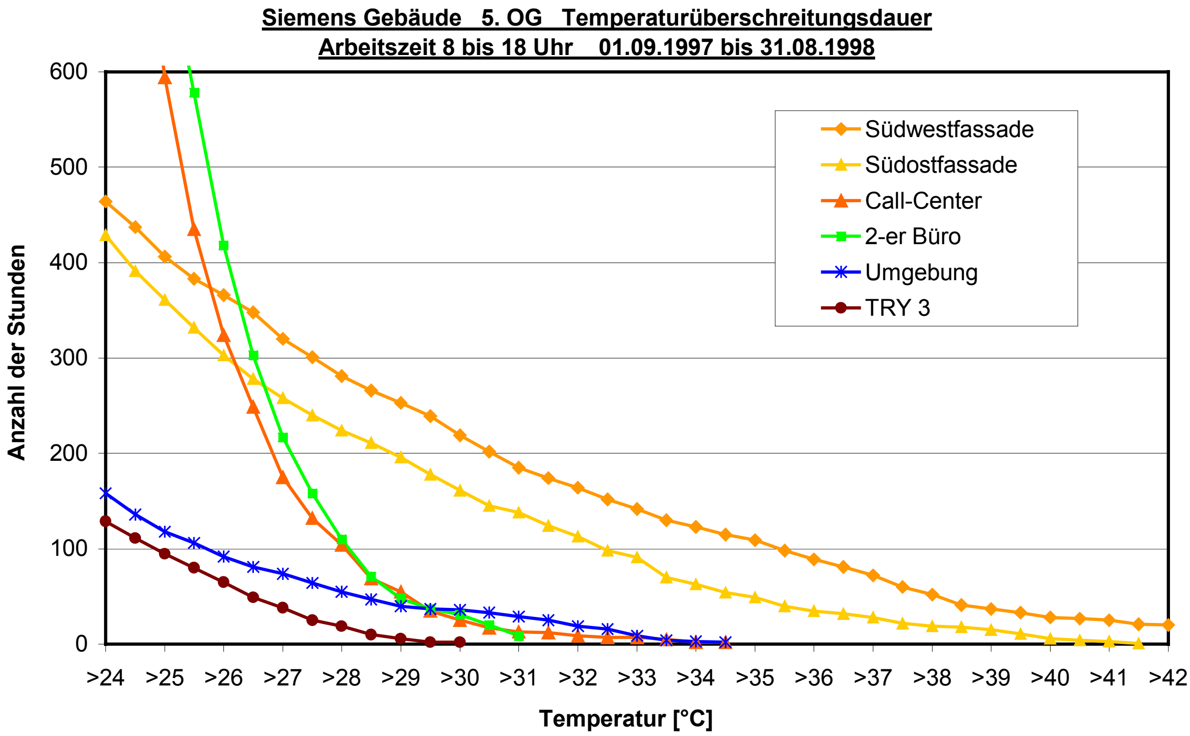

Bild 7.1-5: Stunden der Temperaturüberschreitung

7.1.2 Winterliche Temperaturen

In der Winterperiode zeigt sich, dass sich der Doppelfassadenzwischenraum trotz der relativ guten Hinterlüftung an klaren sonnigen Tagen um bis zu 10 K über das Außentemperaturniveau erwärmen kann. An Tagen mit geringer solarer Einstrahlung liegt die Temperatur im Fassadenzwischenraum nur wenig über der Außentemperatur (Bild 7.1-6 und 7.1-7). Die permanente Hinterlüftung der Fassade, die sich in erster Linie am Sommerfall orientiert, sorgt in Kombination mit dem schlechten k-Wert der äußeren Einfachverglasung nur für einen geringen Beitrag zur Wärmedämmung der Gesamtfassade.

Der Einfluss der inneren Lasten und der solaren Gewinne zeigt sich in einer Abnahme der Heizungstemperatur, wenn die Arbeit im Call-Center nach dem Jahreswechsel wieder aufgenommen wird.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 bestimmten mittleren Luftwechselraten pro gekipptem Fenster wurden analog zu Kapitel 4.1 mit Hilfe der gemessenen Temperaturen und der aufgezeichneten Fensteröffnungszustände die Lüftungswärmeverluste und Transmissionswärmeverluste der Innenfassade bestimmt. Verwendet man einmal die Temperaturen im Fassadenzwischenraum und einmal die Temperatur der Umgebung, so lässt sich die Heizenergieeinsparung durch die Doppelfassade im Winter berechnen. Bild 7.1-8 zeigt die Energieeinsparung für die Wintermonate November bis Februar. Insgesamt ergibt sich für diesen Zeitraum eine Einsparung an Heizenergie von ca. 9,2 %.

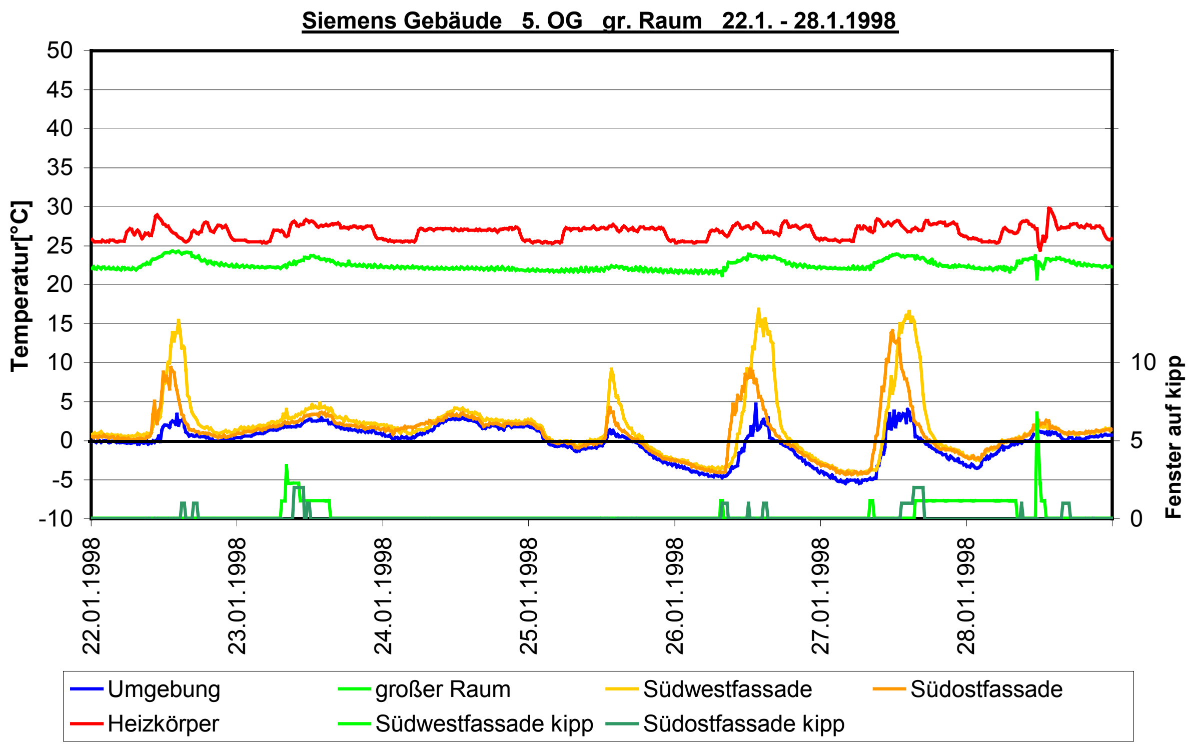

Bild 7.1-6: Siemens-Gebäude, Kälteperiode im Winter 1997 / 1998

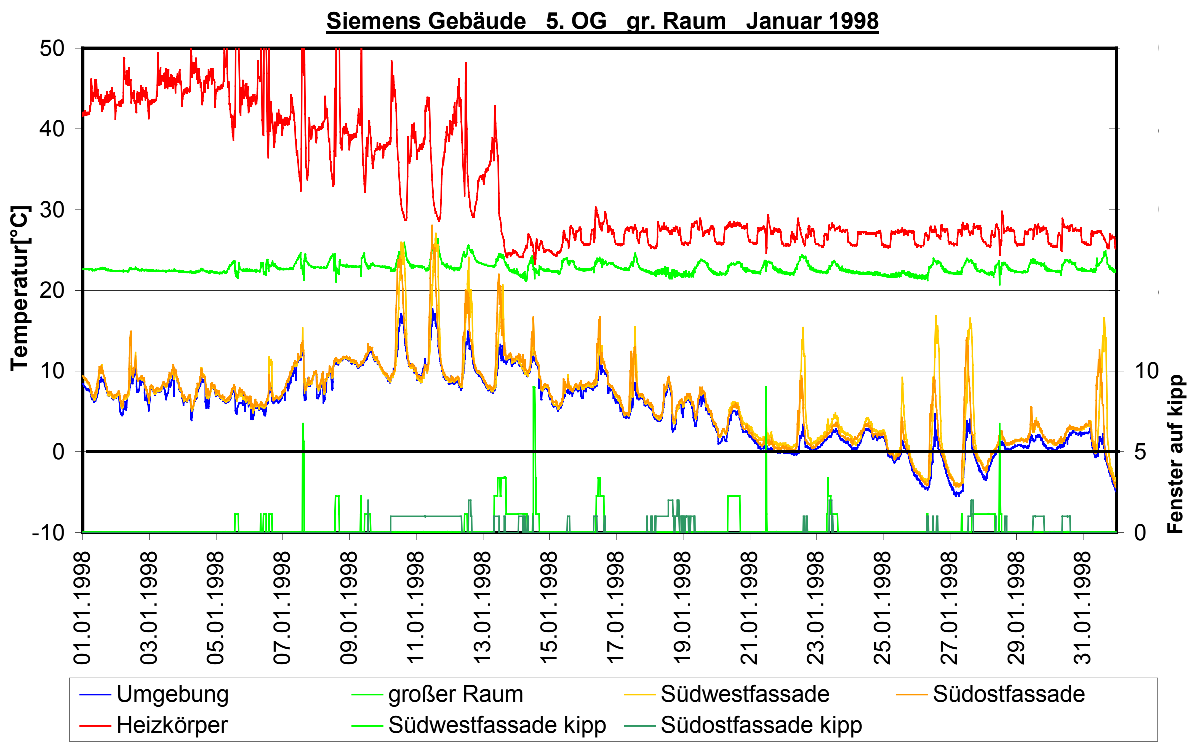

Bild 7.1-7: Siemens-Gebäude, Temperaturen im Januar 1998

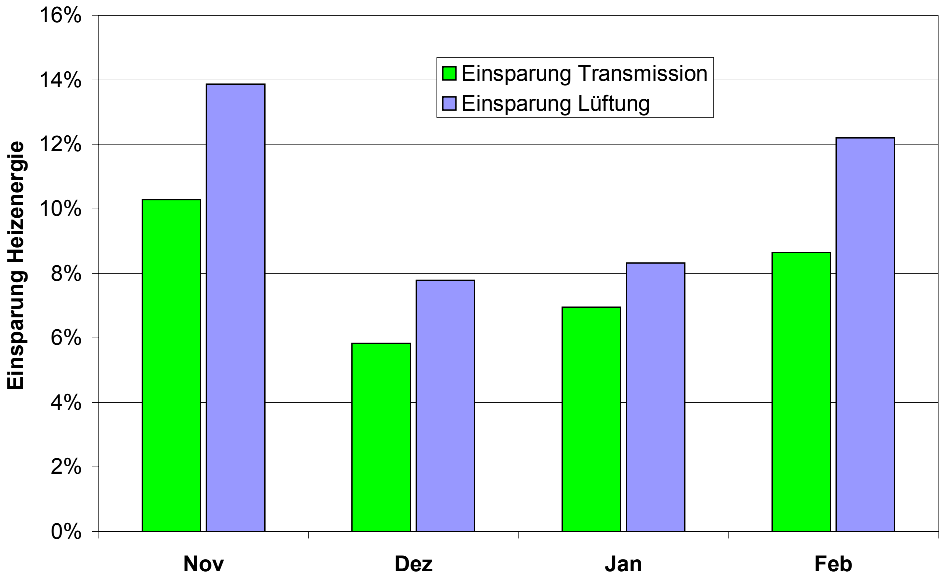

Bild 7.1-8: Heizenergieeinsparung durch die Doppelfassade

7.2 RWE-Turm

Die Doppelfassade des RWE-Turms weist mit einem Öffnungsanteil von 2,9 % und einem Luftaustausch des Fassadenzwischenraumes zur Umgebung von ca. 12 m^3/h pro m^2 Fassadenfläche die von den drei untersuchten Gebäuden geringste Hinterlüftung der Fassade auf. Durch die Lüftungsanlage im Gebäude ist jedoch an kritischen Tagen keine Lüftung der Räume über die Fassade erforderlich. Der Fassadenzwischenraum wird genutzt, um windgeschützt einen effektiven Sonnenschutz aufzunehmen.

Die Fassadenausrichtung nach Süden kann im Hinblick auf die Temperaturdifferenz zwischen Fassade und Umgebung und die Temperaturüberschreitungsdauern qualitativ mit dem Siemensgebäude verglichen werden. Eine Fassadenausrichtung nach Süden ist im Sommer jedoch grundsätzlich etwas günstiger als eine Ausrichtung nach Südwest. Ein weiterer Einflussfaktor auf die absolut gemessenen Temperaturen in der Fassade ist die Ausbildung einer warmen Grenzschichtströmung vor der Fassade, die in Kapitel 7.2-3 dokumentiert wird.

Beim Vergleich zwischen Nord- und Südfassade wird der Einfluss der solaren Gewinne der unterschiedlichen Fassadenausrichtungen deutlich.

Durch die Lüftungsanlage und die installierte Kühldecke bleiben die Räume weitestgehend unabhängig von den Bedingungen im Fassadenzwischenraum. Der gute u-Wert der inneren Fassade schirmt den Raum von den Temperaturen in der Doppelfassade ab, wenn der dort installierte Sonnenschutz für eine wirksame Reduktion des solaren Strahlungseintrags sorgt.

7.2.1 Sommerliche Temperaturen

Für die Sommerperiode wurden Lufttemperaturen im Raum und in der Fassade sowie Oberflächentemperaturen der Kühldecke und der Fassade ausgewertet. Die im folgenden gezeigten Diagramme mit den signifikanten Ergebnissen beziehen sich auf den Monat Mai 2000 . Dargestellt ist eine typische Wärmeperiode und der gesamte Monat Mai, der eine Reihe von sonnigen Tagen bei gleichzeitig hohen Außentemperaturen aufweist. Dargestellt sind jeweils die Raumlufttemperatur, die Temperatur der Kühldecke und die Umgebungslufttemperatur vor der Fassade für einen Nordost- und einen Südraum (Bild 7.2-1 bis 7.2-4).

Das Einschalten der Kühldecke wirkt sich unmittelbar auf die Raumtemperatur aus. Die Raumtemperatur konnte so mit Hilfe der technischen Anlagen (Kühldecke und Lüftung) immer im komfortablen Bereich (DIN 1946) gehalten werden. Die auf der Südseite zeitweise hohen Temperaturen im Fassadenzwischenraum, die auch kurzzeitig 45°C überschreiten können, wirken sich nicht auf die Innenraumtemperatur aus, sofern die Fenster geschlossen bleiben. In dem nach Nordosten gelegenen Raum ist ein Einfluss der Besonnung naturgemäß deutlich geringer. Durch den Einsatz der Kühldecke liegt die empfundene Temperatur, die Temperatur aller Umschließungsflächen des Raumes zu 50% mit berücksichtigt, noch unter der Raumlufttemperatur (im Diagramm nicht dargestellt).

Die Kühlung eines Raumes über die Kühldecke erfolgt, wenn die Temperatur der Kühldecke auf ca. 17 °C abgesenkt wird. Beim Vergleich der beiden Räume fällt auf, dass der Nordostraum in der zweiten Monatshälfte häufiger gekühlt wird, als der Südraum. Dies ist einerseits auf die höheren inneren Lasten zurückzuführen. Der Südraum wird als Aktenraum genutzt. Ein weiterer Einflussfaktor ist eine raumweise Einstellung der Lufttemperatur. Der Nutzer hat die Möglichkeit die Raumtemperatur um +/- 3 K, bezogen auf eine Standardtemperatur, einzustellen.

Die bei der Berechnung und Planung von Gebäuden wichtige Anzahl von Stunden, an denen in den Büroräumen eine bestimmte Temperatur überschritten wird, ist in Bild 7.2-5 und 7.2-6 für die Jahre 1999 und 2000 dargestellt. Die Anzahl von Stunden, an denen eine Lufttemperatur von 27 °C überschritten wird, ist 1999 vernachlässigbar gering. Die Komfortgrenzen der DIN 1946 wurden nur in Ausnahmefällen überschritten.

Im September 2000 fand im Südraum ein Nutzerwechsel statt, der sich auch in den gemessenen Temperaturen widerspiegelt. Ab September wurden die Fenster relativ häufig geöffnet, was sich im Vergleich zum Vorjahr sowohl in niedrigeren als auch in höheren Raumtemperaturen niederschlägt.

Eine Überschreitung dieser Temperaturen ist in der Regel nicht auf eine sommerliche Überhitzung zurückzuführen, sondern auf einen im Winter oder in der Übergangszeit bei tief stehender Sonne geöffneten Sonnenschutz. Die höchste Raumlufttemperatur 1998 von 30 °C wurde beispielsweise bei geöffnetem Sonnenschutz am 31. Dezember 1998 gemessen. Zusätzlich hat jeder Nutzer die Möglichkeit, die Raumlufttemperatur im Bereich von +/- 3 °K einzustellen. Dies erklärt das ganzjährig unterschiedliche Temperaturniveau im Nordostraum und im Südraum.

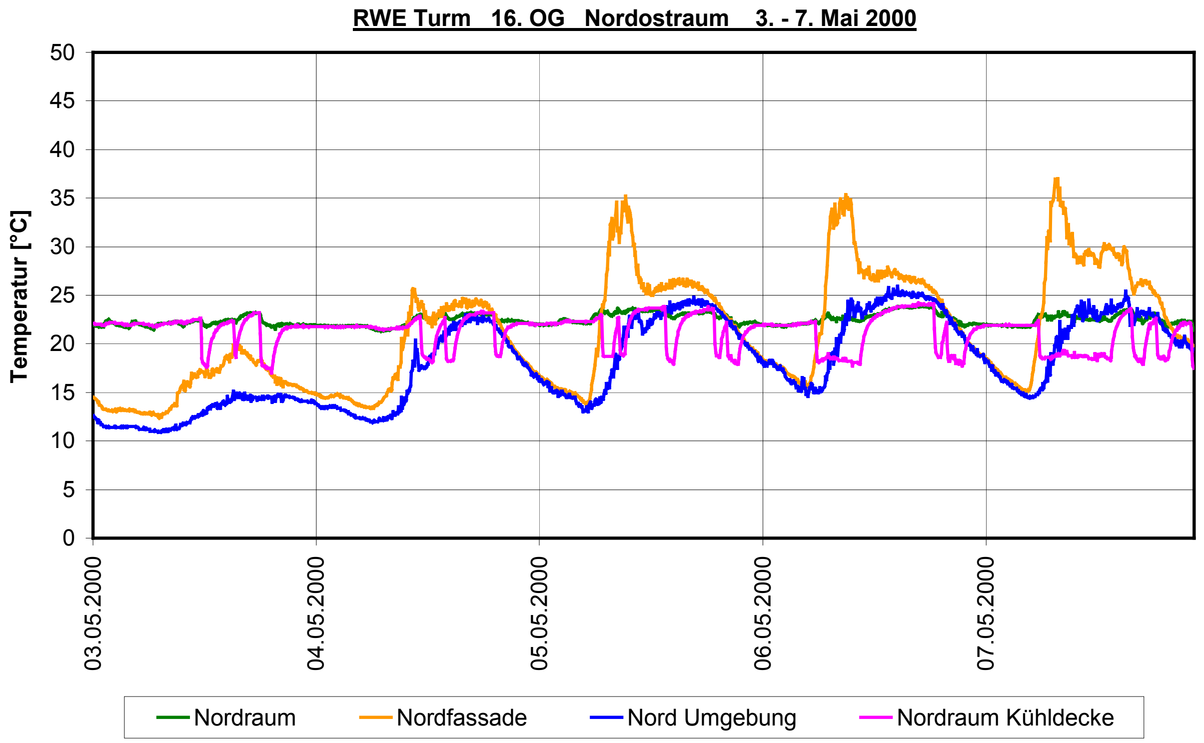

Bild 7.2-1: Typische Sommerperiode (Nordostraum)

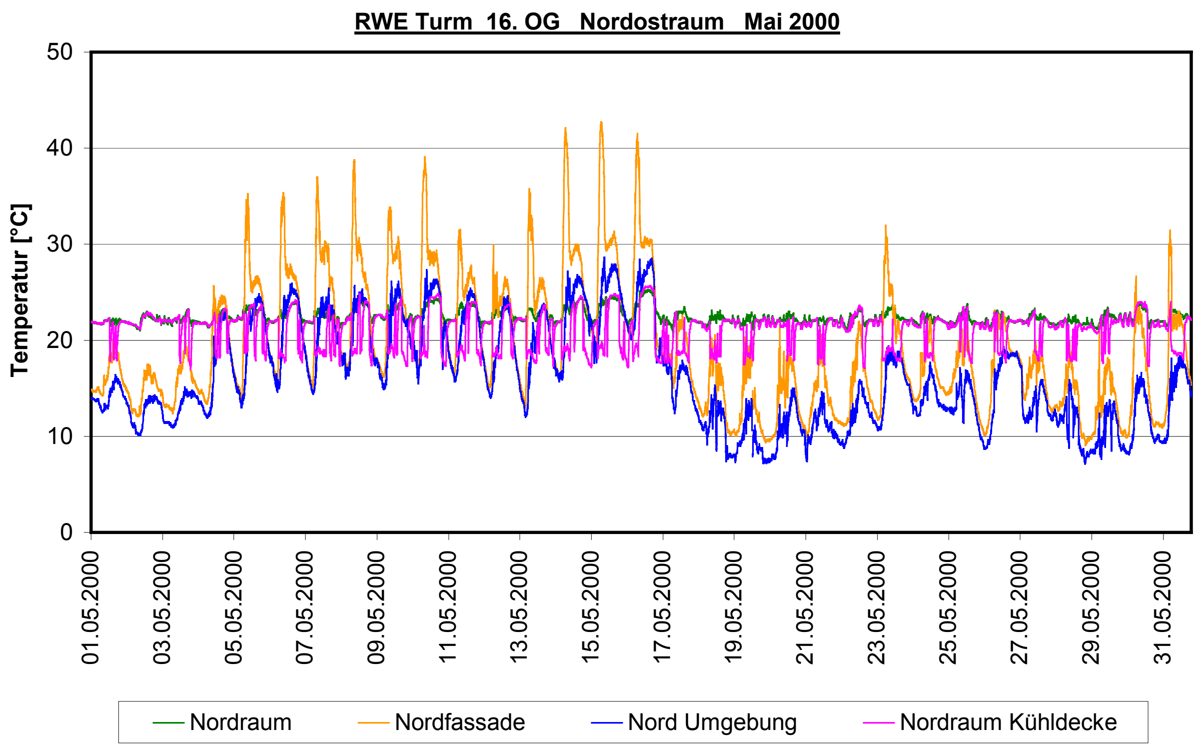

Bild 7.2-2: Temperaturen im Mai 2000 (Nordostraum)

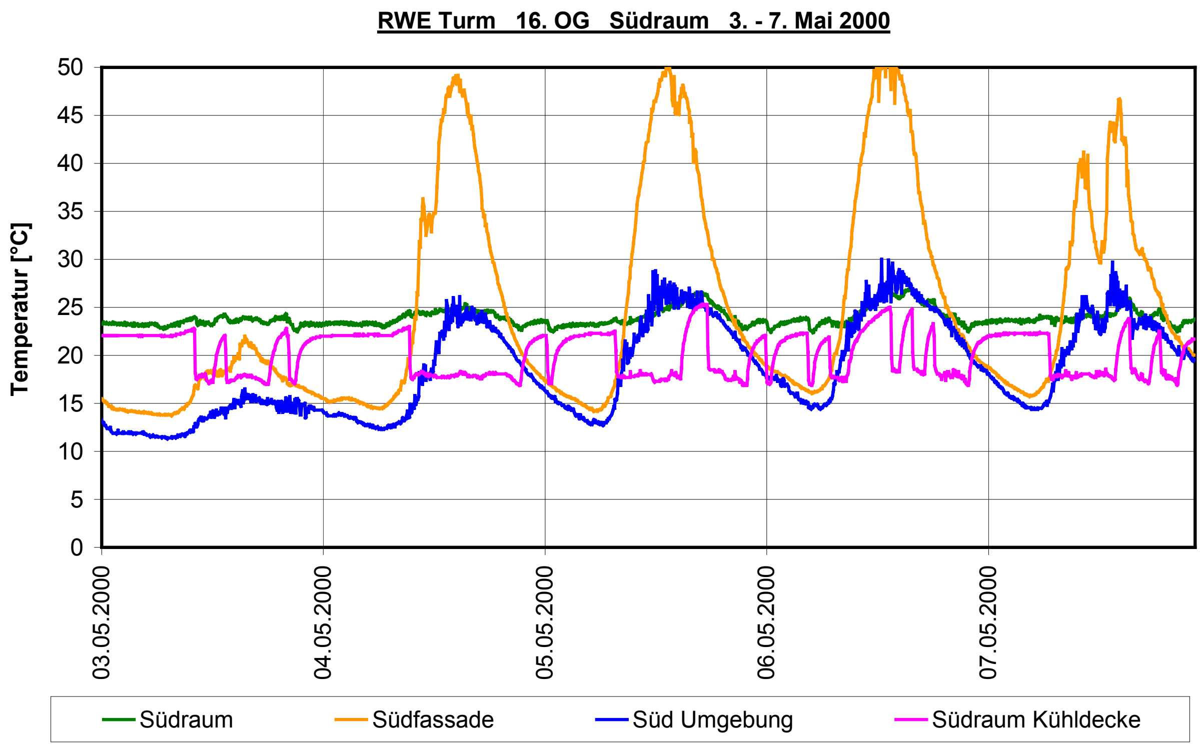

Bild 7.2-3: Typische Sommerperiode (Südraum)

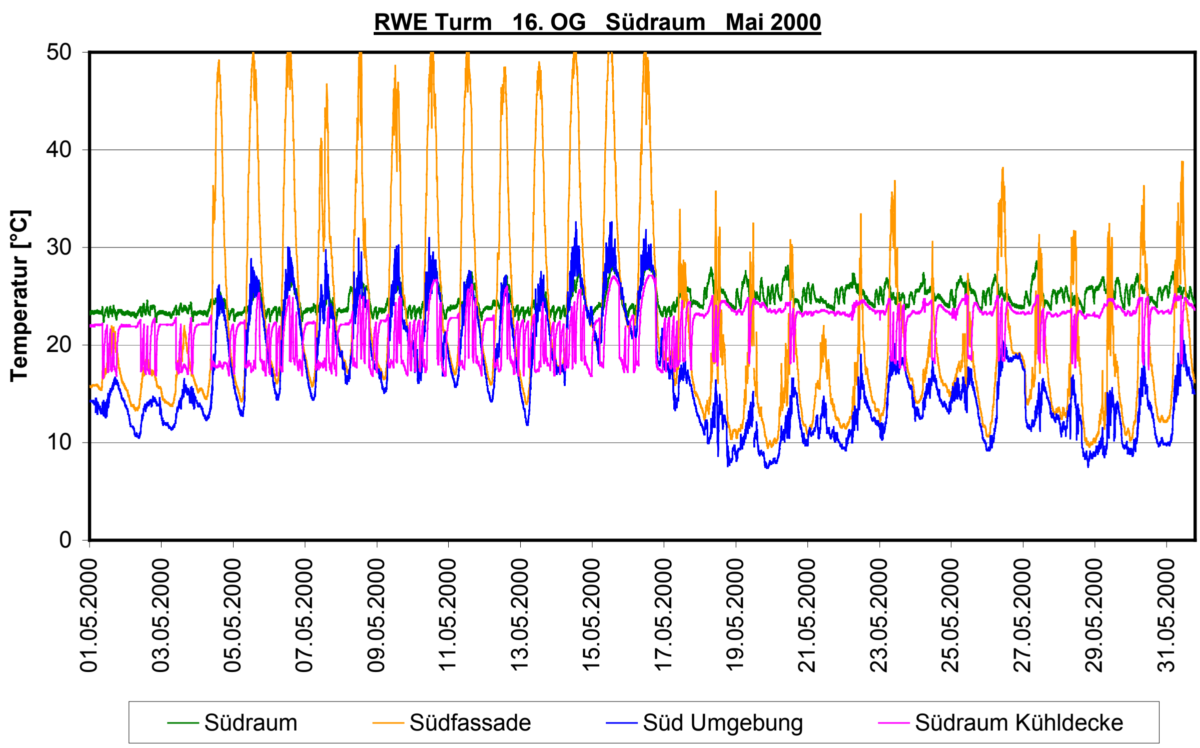

Bild 7.2-4: Temperaturen im Mai 2000 (Südraum)

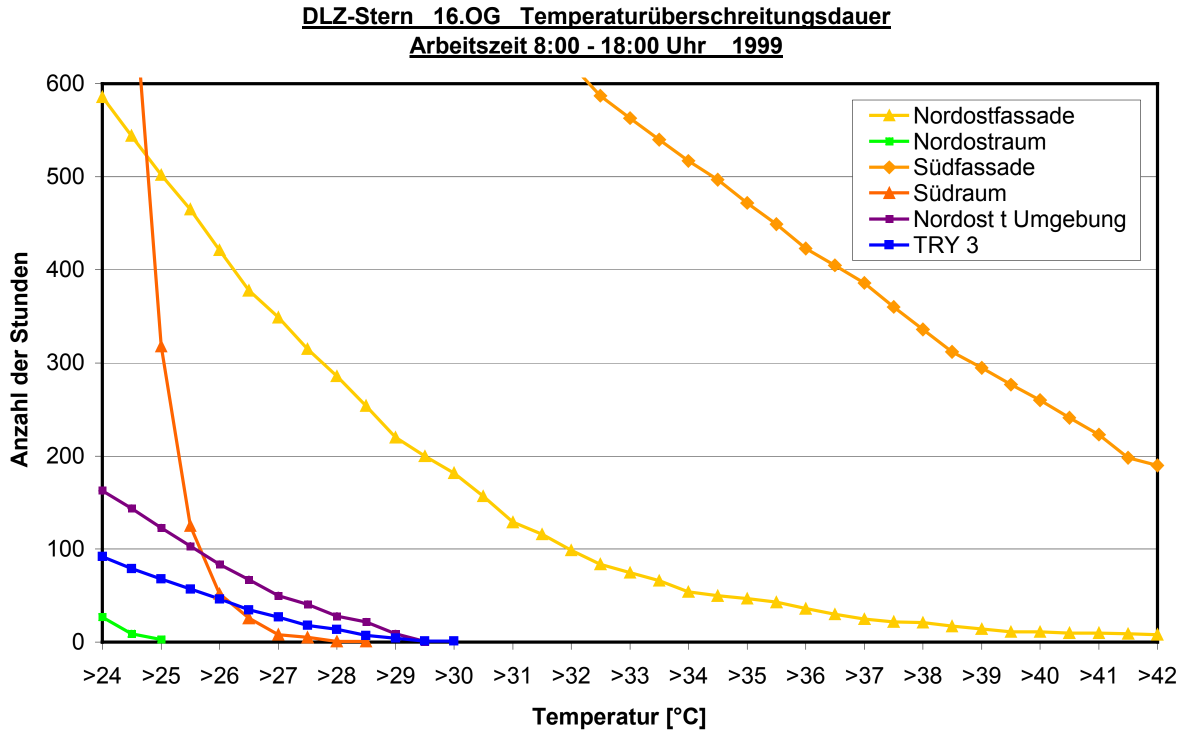

Bild 7.2-5: Stunden der Temperaturüberschreitung 1999

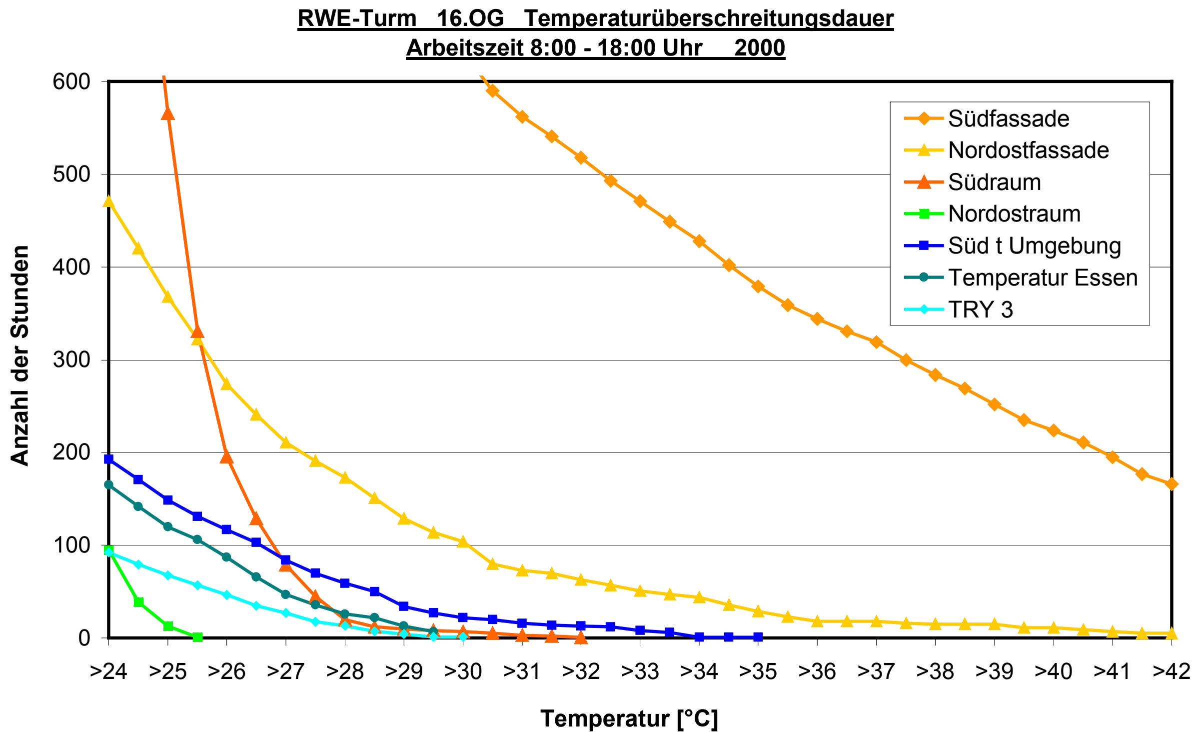

Bild 7.2-6: Stunden der Temperaturüberschreitung 2000

7.2.2 Winterliche Temperaturen

Die Raumtemperaturen während der Winterperiode werden durch die Heizung (Einzelraumregelung) zuverlässig auf dem gewünschten Niveau gehalten. Eine Nachtabsenkung ist aufgrund der unterschiedlichen Arbeitszeiten nicht eingestellt. Die Raumtemperatur korrespondiert dabei mit den Einschaltintervallen der Heizung. Eine Kühlung des Raumes über die Kühldecke trat in den Nordräumen im Winter praktisch nicht auf (Bild 7.2-7 und 7.2-8).

Im Südraum in der 16. Etage wird vereinzelt auch in der Winterperiode an sonnigen Tagen über die Kühldecke gekühlt (Bild 7.2-9 und 7.2-10). Dies ist dann der Fall, wenn der Sonnenschutz geöffnet ist und über die Fassade hohe solare Gewinne erzielt werden. Der Öffnungszustand des Sonnenschutzes wird über einen Helligkeitssensor auf der Rückseite des Raumes erfasst. Helligkeitswerte über 1000 lx auf der Rückwand des Raumes zeigen, dass der Sonnenschutz an Tagen mit Kühllasten zumindest teilweise geöffnet war. Da der Raum keine hohen inneren Lasten aufweist, sind die Energiegewinne in erster Linie auf Solareinstrahlung zurückzuführen.

An klaren strahlungsreichen Tagen kann die Temperatur im Doppelfassadenzwischenraum auf der Südseite deutlich über die Umgebungstemperatur und sogar bis über die Raumtemperatur ansteigen (Bild 2.2-10).

Die Einsparung η_{DF} an Heizenergie durch die Doppelfassade lässt sich über die gemessenen Temperaturen des Raumes, des Fassadenzwischenraumes und der Umgebung rechnerisch ermitteln.

$$\eta_{DF} = 1 - \frac{t_i - t_{Fass}}{t_i - t_u} \qquad (7.2\text{-}1)$$

Bild 7.2-11 zeigt die berechnete Heizenergieeinsparung durch die Doppelfassade für das Jahr 1999. Zeiten, in denen der Raum gekühlt wurde, wurden nicht berücksichtigt. Die Einschaltzeit der Kühldecke beträgt für die untersuchten vier Monate im Südraum rund 11 % und im Nordostraum rund 1,5 %. Der Einfluss von geöffneten Fenstern ist im betrachteten Zeitraum vernachlässigbar. Insgesamt konnten in den Monaten Januar, Februar, November und Dezember 1999 im Südraum rund 13 % und im Nordostraum rund 11 % an Transmissionsverlusten eingespart werden.

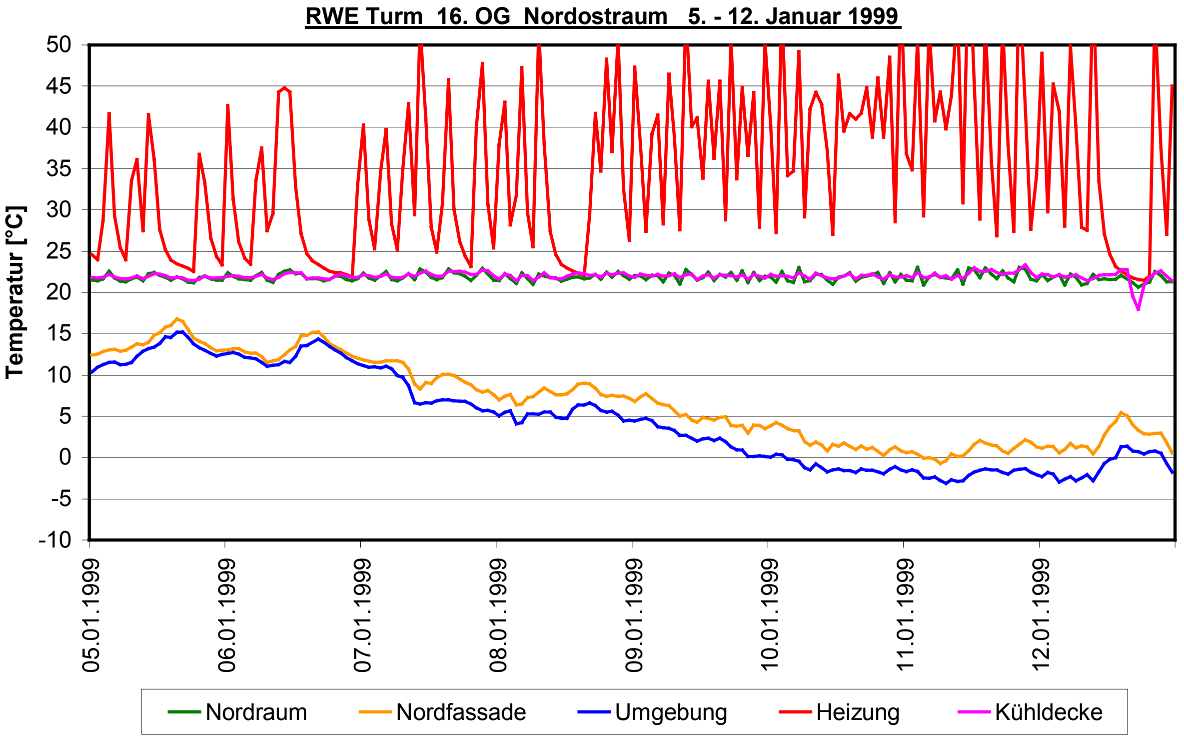

Bild 7.2-7: Typische Winterperiode (Nordostraum)

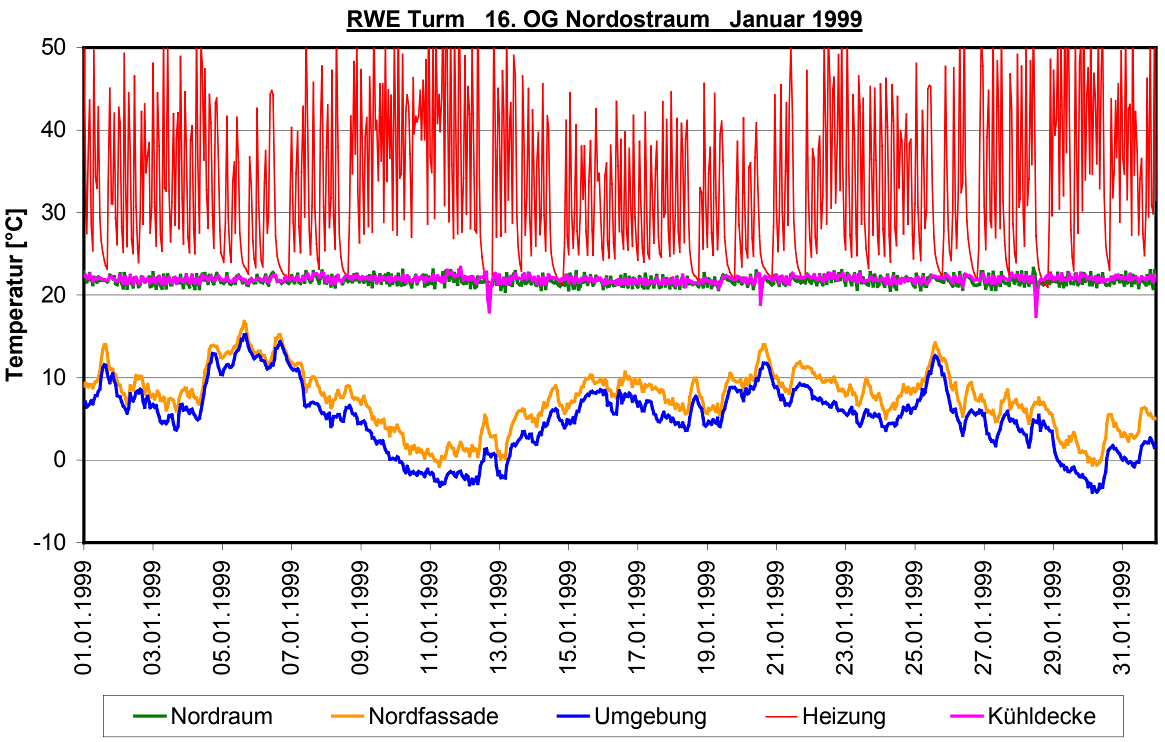

Bild 7.2-8: Temperaturen im Januar 1999 (Nordostraum)

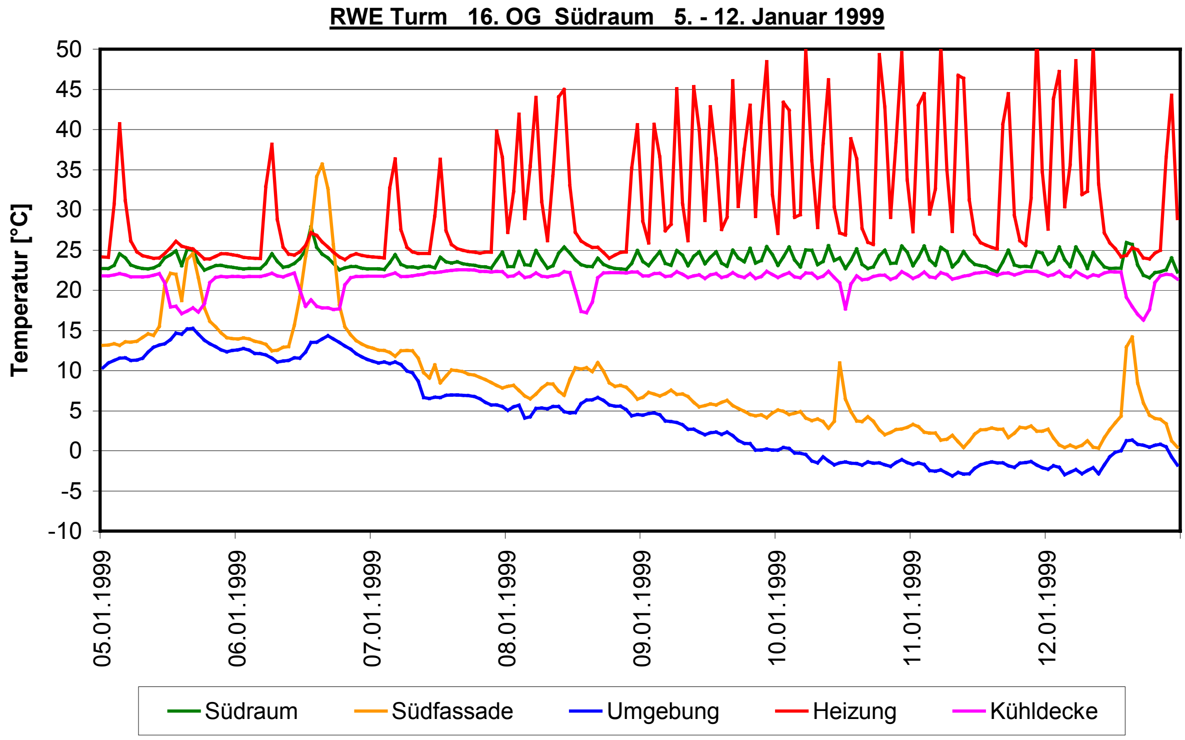

Bild 7.2-9: Typische Winterperiode (Südraum)

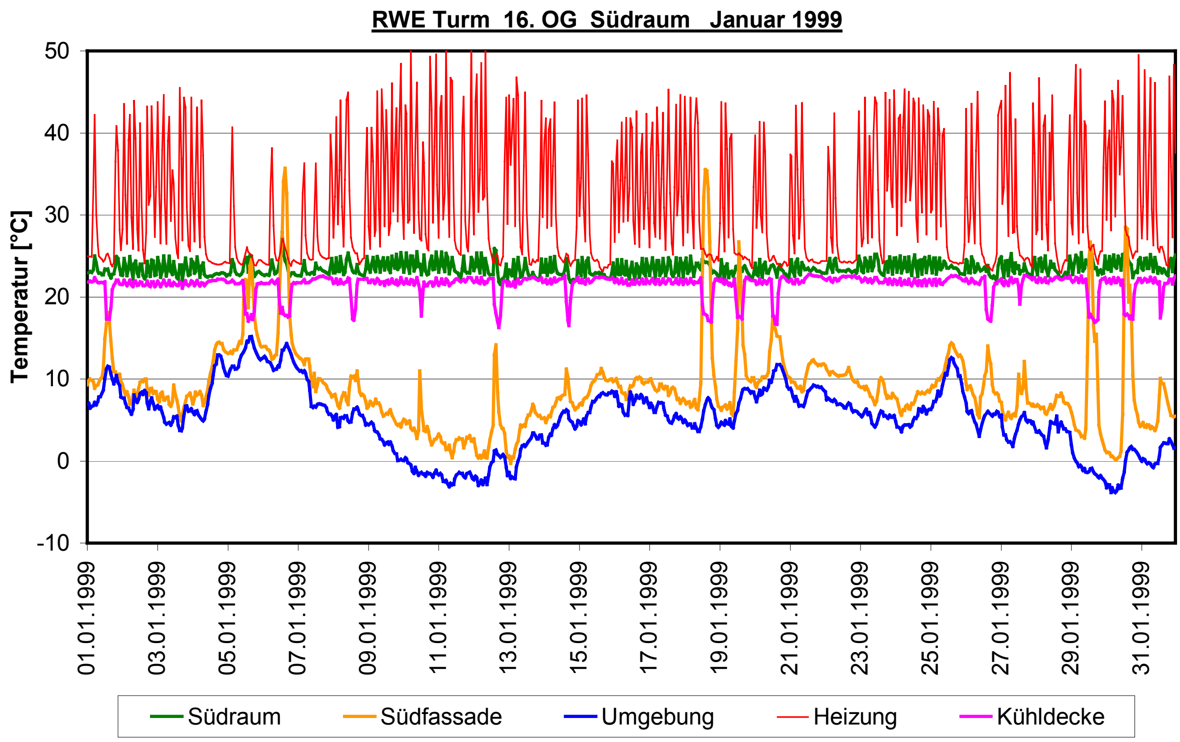

Bild 7.2-10: Temperaturen Januar 1999 (Südraum)

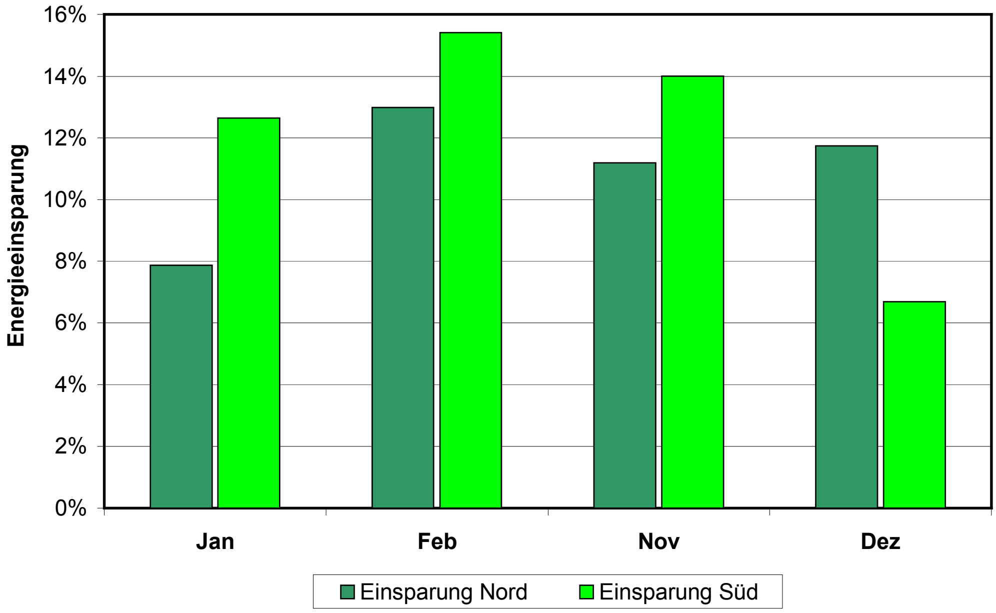

Bild 7.2-11: Einsparung an Transmissionswärmeverlusten durch die Doppelfassade

7.2.3 Natürliche Lüftung über die Doppelfassade

In einem Südraum im 1. OG und einem Nordraum im 16. OG wurden jeweils 8 Luftwechselmessungen , wie in Kapitel 3 beschrieben durchgeführt. Abb. 7.2-12 zeigt die bei den durchgeführten Luftwechselmessungen ermittelten Werte des Raumluftwechsels der beiden untersuchten Räume. Der dargestellte Luftwechsel pro Stunde gibt das Volumen der ausgetauschten Luftmenge bezogen auf das Raumvolumen an. Die Messungen fanden jeweils an Samstagen zu Zeiten statt, an denen die Lüftungsanlage abgeschaltet war. Für die Messung wurden alle Fenster mit der zur Verfügung stehenden Spaltbreite von ca. 10 cm geöffnet. Die Türen der Räume waren während des Messzeitraumes (ca. 30 Minuten) geschlossen.

Der hygienisch notwendige Luftwechsel hängt von der Zahl der im Raum arbeitenden Personen ab und beträgt nach DIN 1946 30 m³ bis 60 m³ pro Stunde und Person. Dieser Luftwechsel wurde bei allen Messungen erreicht. Die gemessenen Werte lagen bei 85% aller Messungen über dem für die Lüftungsanlage vorgesehenen Luftwechsel von 2,5 pro Stunde. Ein Luftwechsel von 2 wurde bei keiner Messung unterschritten. Der Mittelwert der Messungen beträgt 6,4/h. Die punktuellen Messungen zeigen, dass eine ausreichende Lüftung über die Fassade ohne zusätzliche Lüftungsanlage möglich ist.

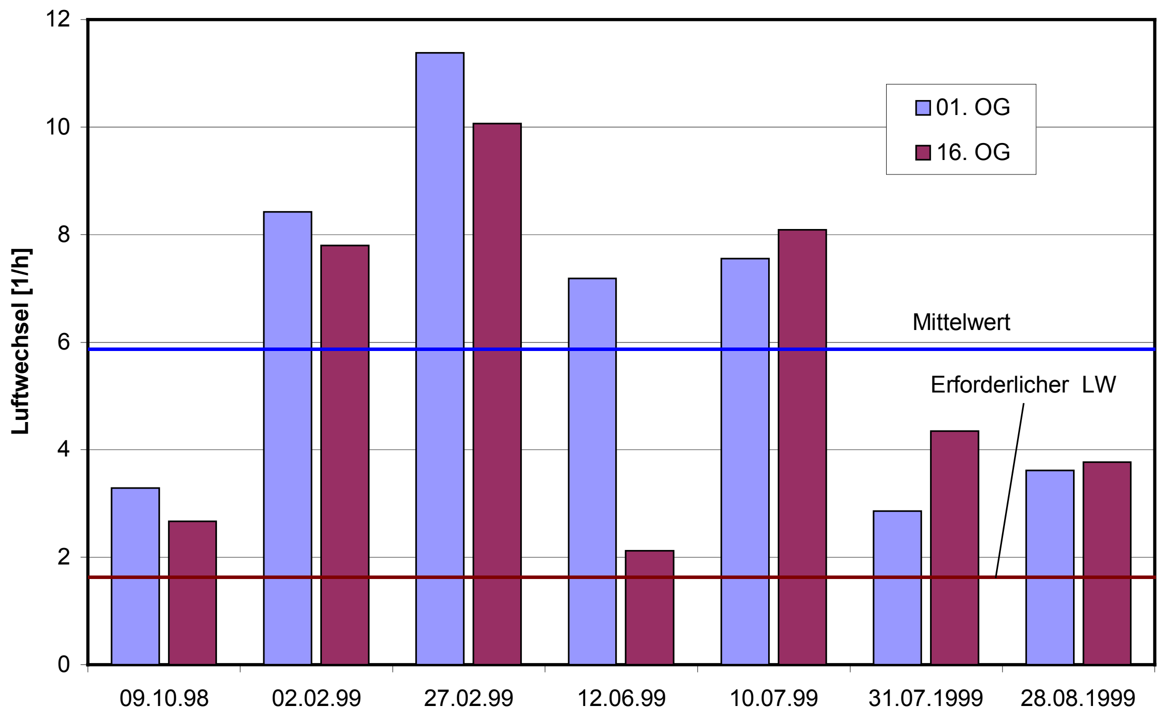

Bild 7.2-13: Fensterlüftung bei abgeschalter Lüftungsanlage

7.2.4 Einfluss der Temperaturen vor der Fassade

Die Lufttemperatur vor der Fassade kann an windstillen Tagen um mehr als 5 K über der auf der gegenüberliegenden verschatteten Gebäudeseite gemessenen Temperatur liegen. Die Temperaturschichtung vor der Fassade wurde durch die Messungen an einem 1 m auskragenden Messmast auf der Südseite in 16. OG verifiziert. Bild 7.2-13 zeigt eine typische Erwärmung der Umgebungsluft an sonnigen windstillen Tagen. Diese Temperaturerhöhung konnte kontinuierlich während einer Schönwetterperiode im Mai beobachtet werden (Bild7.2-14) Bild 7.2-15 zeigt exemplarisch die gemessene Schichtung der Temperaturen für zwei Zeitpunkte, die einen Hinweis auf eine Grenzschichtströmung vor dem Gebäude geben.

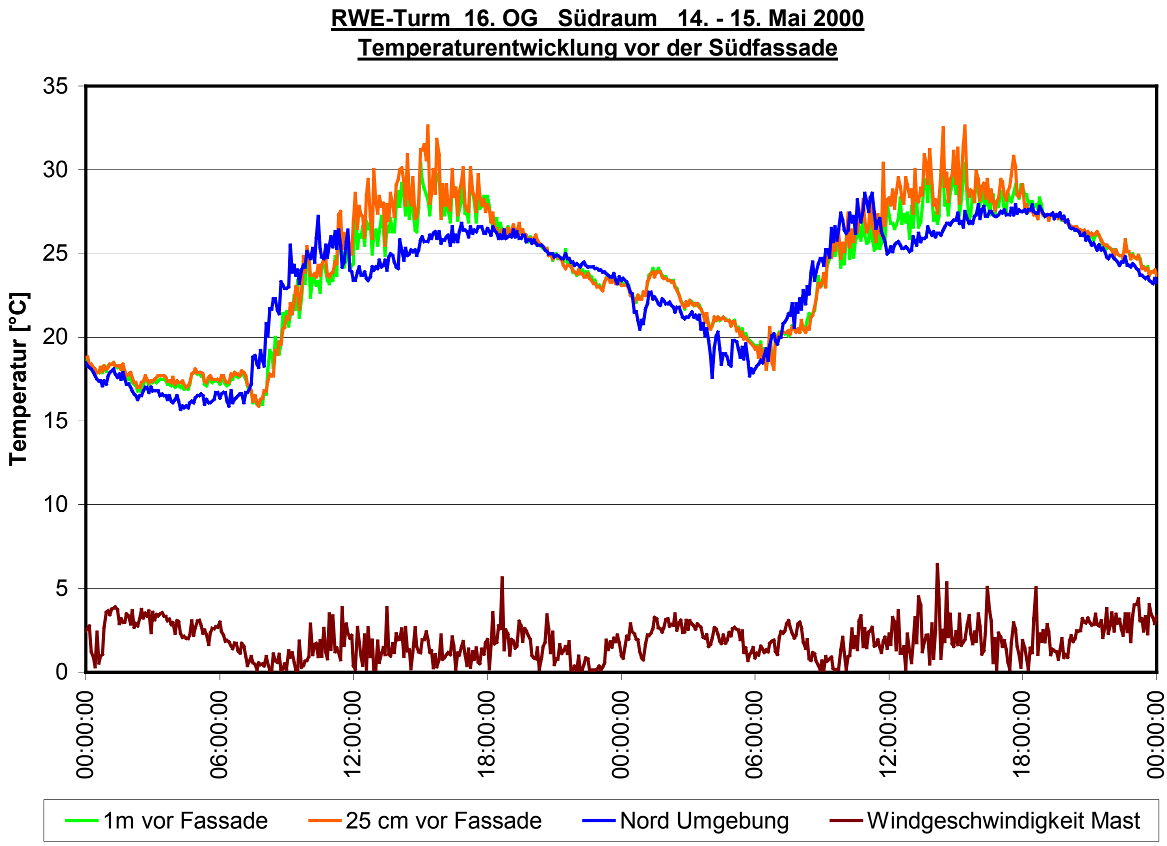

Bild 7.2-13: Temperaturentwicklung vor der Fassade, extreme Tage im Mai

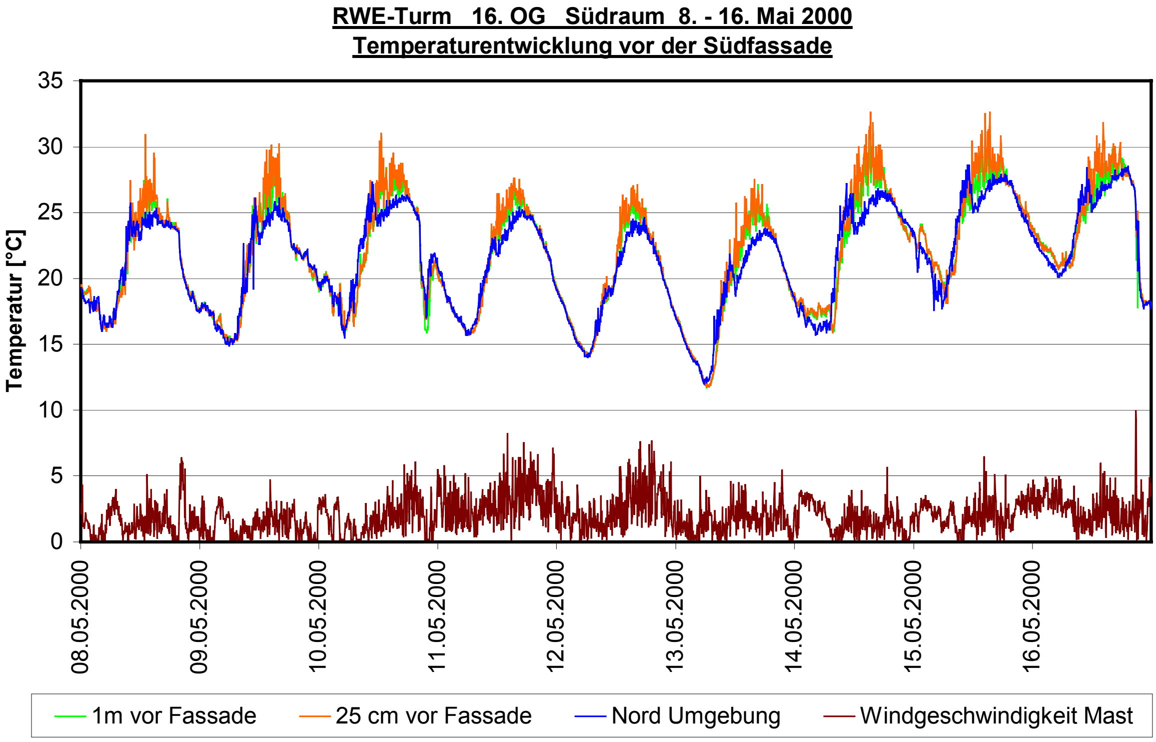

Bild 7.2-14: Temperaturentwicklung vor der Fassade, Wärmeperiode im Mai

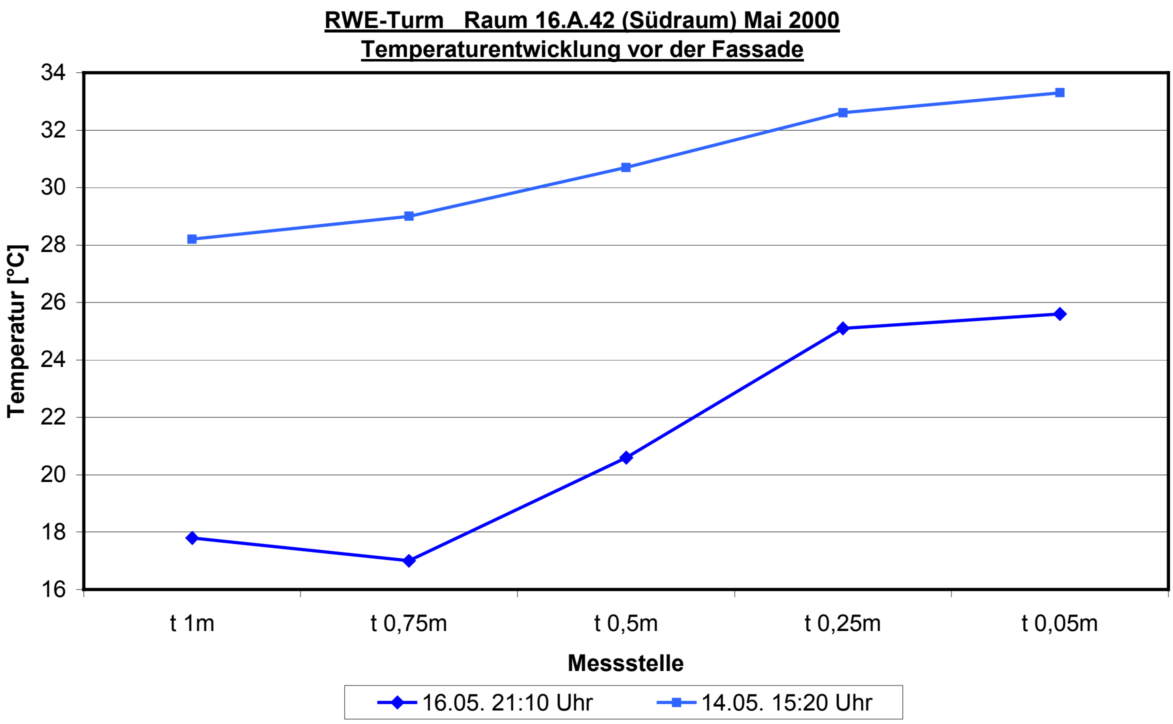

Bild 7.2-15: Temperaturschichtung vor der Südfassade im 16. OG

7.3 Victoria Versicherung Düsseldorf

Mit einem wirksamen Öffnungsanteil vom 4,1 % und einem mittleren Luftvolumenstrom von ca. 24 m³/h pro m² Fassadenfläche zwischen Fassadenzwischenraum und Umgebung liegt die Fassade der Victoria Versicherung zwischen den beiden zuvor beschriebenen Gebäuden. Die Ausrichtung der Fassade nach Osten sorgt für geringere solare Gewinne als bei der Südostfassade des Siemensgebäudes. Da beide Gebäude zur gleichen Zeit vermessen wurden, sind zumindest die meteorologischen Randbedingungen in etwa vergleichbar.

Der hinter der Fassade liegende Büroraum wird ausschließlich über die Fassade gelüftet und verfügt über eine Betonkerntemperierung. Der Wärmestrom in die Decke und die insgesamt über die Decke abgeführte Energie werden in Kapitel 7.3.3 zur besseren Einordnung der Ergebnisse dokumentiert.

7.3.1 Sommerliche Temperaturen

Bild 7.3-1 bis 7.3-3 zeigen die Temperaturen im Raum und in der Doppelfassade während der wärmsten Woche der Messperiode im August 1998. Die Raumlufttemperatur berechnet sich aus dem Mittelwert der in drei Höhen im Raum gemessenen Temperaturen und die Temperatur in der Doppelfassade aus dem Mittelwert von jeweils 10 Messstellen vor dem Sonnenschutz und dem Mittelwert von 4 Messstellen hinter dem Sonnenschutz (zum Raum hin). Die Öffnungszustände der Fenster sind nicht dargestellt, da der Fühler für das einzige betätigte Fenster während der Hitzeperiode im August zeitweise einen Wackelkontakt aufwies und nicht zuverlässig ausgewertet werden konnte.

Alle Temperaturfühler sind mit einem Strahlungsschutz ausgestattet, der innen und außen mit Aluminiumfolie belegt ist.

Bei Außenlufttemperaturen von 33 °C während der dargestellten Hitzeperiode im August traten maximale Raumlufttemperaturen von höchstens 27 °C auf. Die Temperatur in der Doppelfassade stieg während dieser Wärmeperiode, bedingt durch die Ost-Ausrichtung der Fassade, kurzzeitig am Vormittag auf 8°C bis 10°C über die Außenlufttemperatur. Der Einfluss der Betonkerntemperierung lässt sich an den unterschiedlichen Temperaturen von Raumluft und der Oberfläche der Decke ablesen.

Bei der Auswertung der maximalen Raumtemperaturen fiel auf, dass während einer Periode vom 11. Bis 20. Mai, als die Betontentemperierung noch nicht eingeschaltet war, hohe Raumtemperaturen auftraten. Die Auswertung der Beleuchtungsstärke auf die der Fassade gegenüber liegende Raumwand zeigt auch, dass der Sonnenschutz teilweise nicht geschlossen war, was bei den hohen Raumtemperaturen darauf schließen lässt, dass der Raum in dieser Zeit nicht genutzt wurde (Bild 7.3-4).

In der Darstellung der Häufigkeit der Temperaturüberschreitung während der Arbeitszeit (Bild 7.3-5) ist dies in einer zweiten korrigierten Kurve berücksichtigt, die diese Periode ausspart. Die Häufigkeitsverteilung für die einjährige Messperiode 1997/1998 belegt, dass in dem gemessenen Büroraum die Überschreitungsdauer einer Raumtemperatur von 27 °C bei richtigem Einsatz der Betonkerntemperierung und des Sonnenschutzes vernachlässigbar gering ist. Eine Raumtemperatur von 26 °C wurde dabei an 50 h (ca. eine Arbeitswoche) in dem Büro hinter der Doppelfassade überschritten.

Die Häufigkeit der in der Doppelfassade auftretenden Temperaturen von mehr als 35°C beschränkt auf 67 Stunden im Jahr.

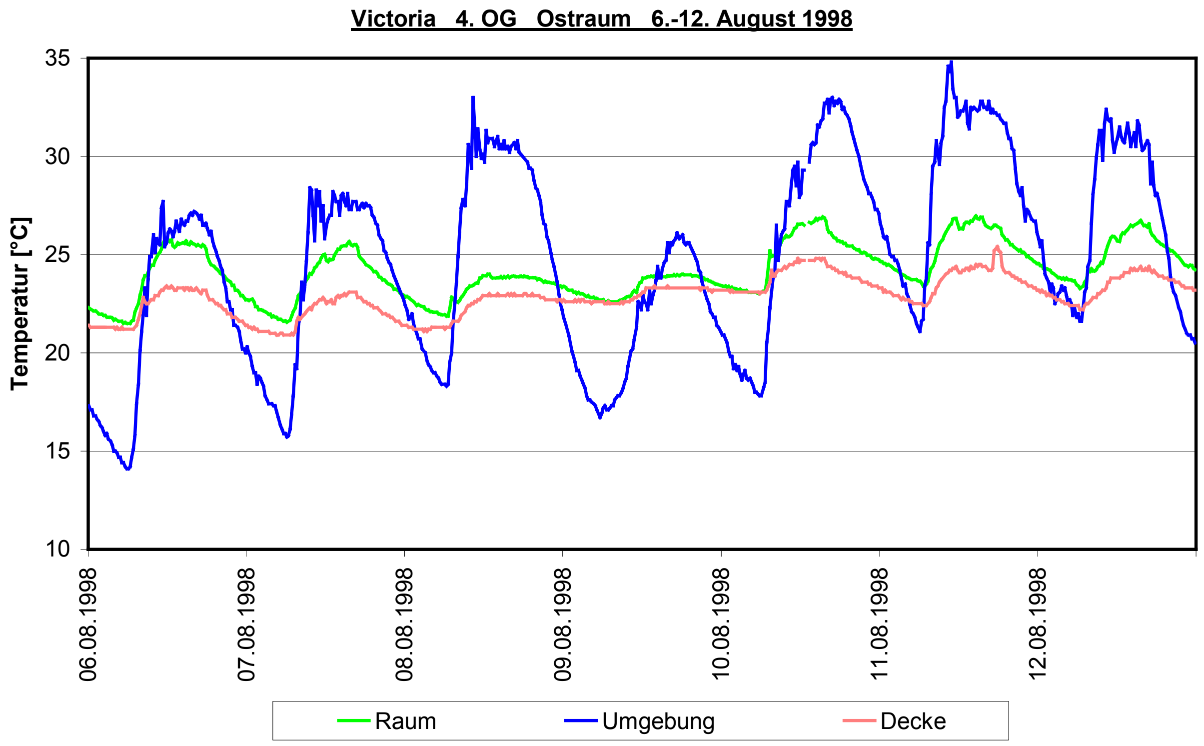

Bild 7.3-1: Temperaturen im Raum, heißeste Woche 1998

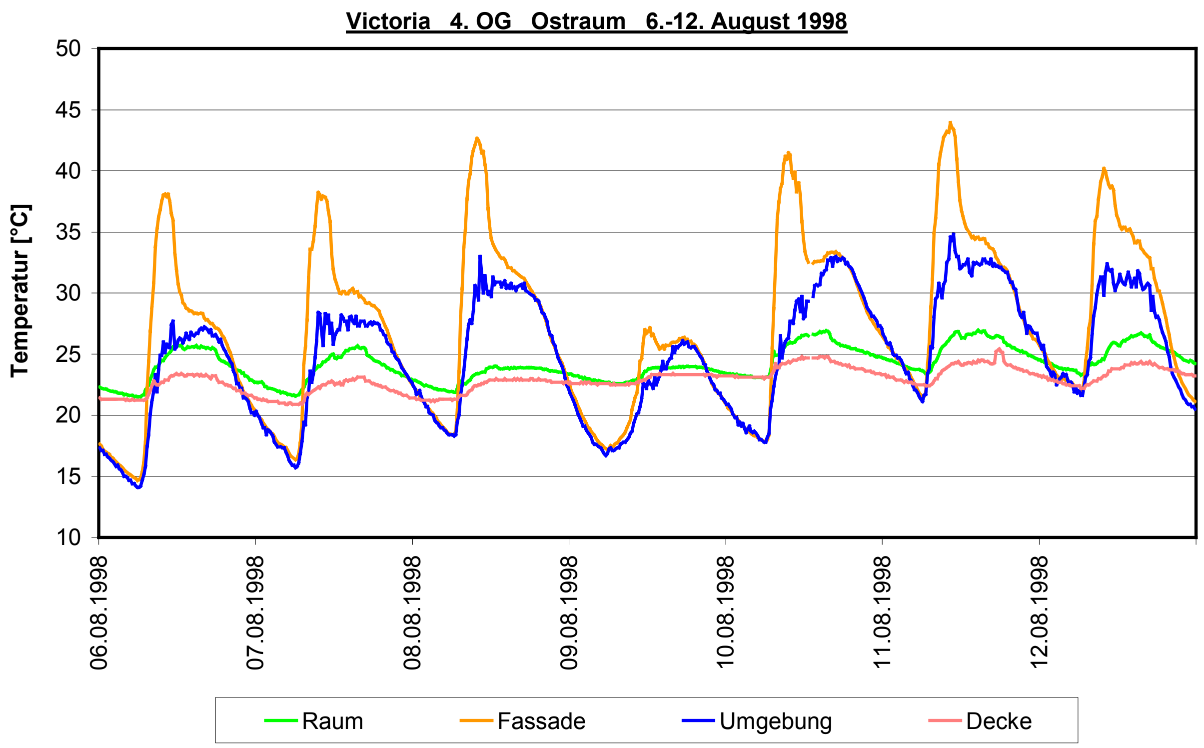

Bild 7.3-2: Temperaturen Fassade, heißeste Woche 1998

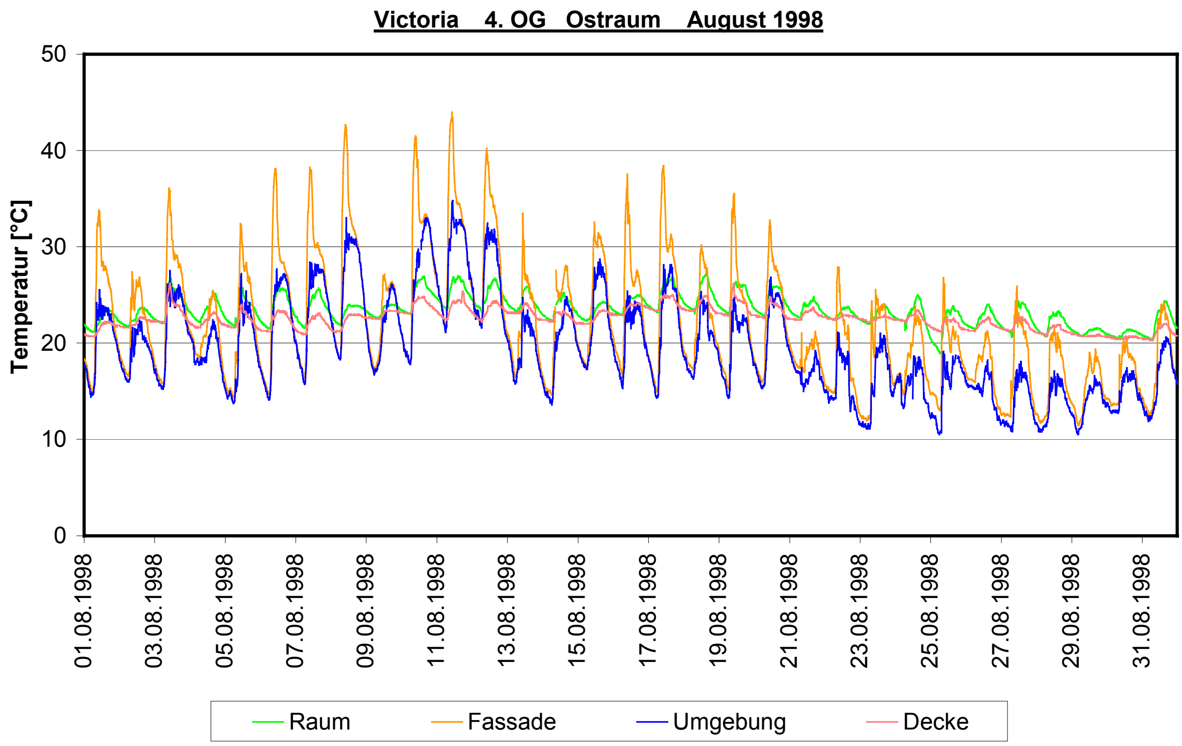

Bild 7.3-3: Temperaturverlauf August 1998

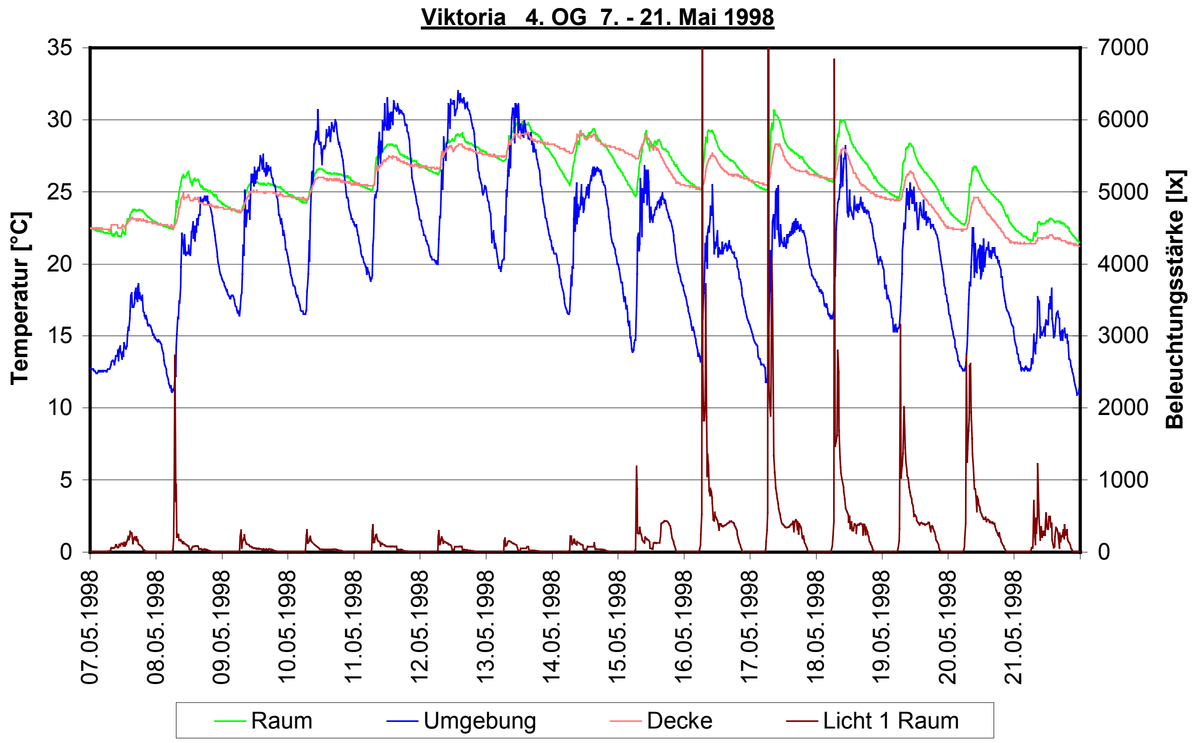

Bild 7.3-4: Wärmeperiode im Mai

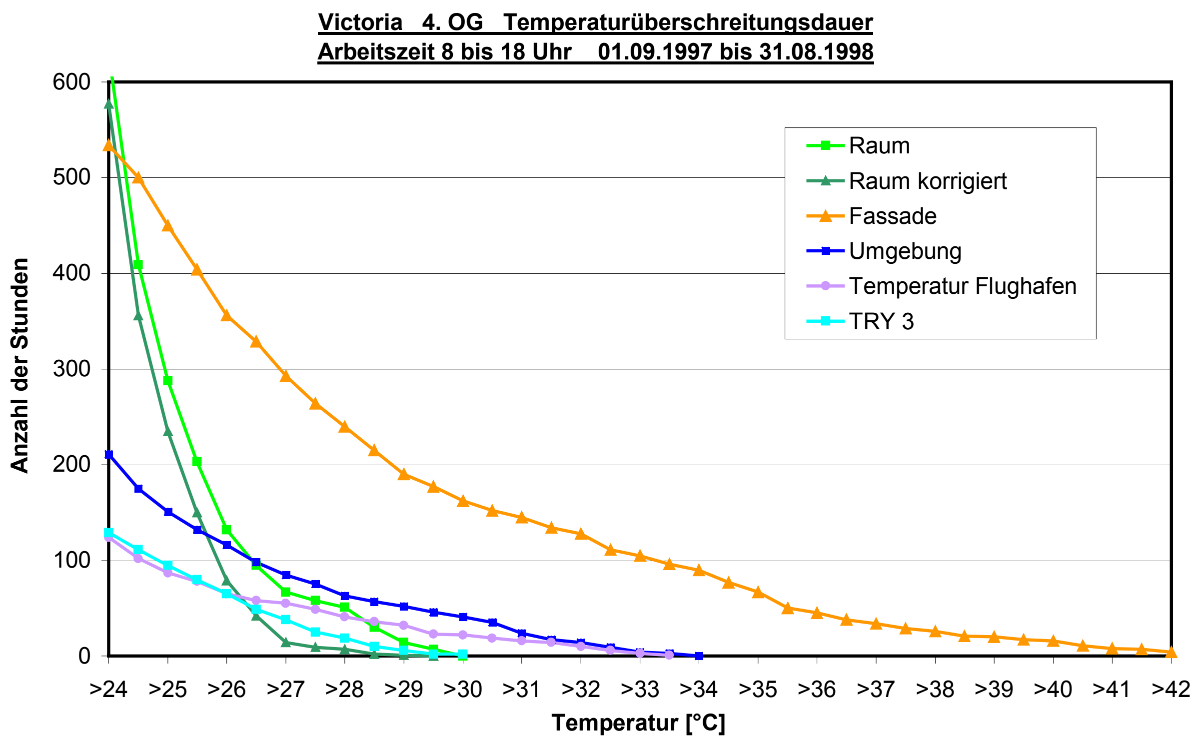

Bild 7.3-5: Stunden der Temperaturüberschreitung

7.3.2 Winterliche Temperaturen

In den Monaten Dezember 1997 bis Januar 1998 konnten im Fassadenzwischenraum der untersuchten Ostfassade trotz permanenter Hinterlüftung eine Temperaturerhöhung gegenüber der Außenluft gemessen werden. Bei einer Fensterlüftung korrespondiert die Erwärmung der Fassade mit der Abkühlung des Raumes (Bild 7.3-6 und 7.3-7). Die Heizkörper werden beim Öffnen der Fenster automatisch abgeschaltet.

Solare Gewinne sind im Januar auf der untersuchten Ostfassade, die zudem auch um ca. 15° nach Norden gedreht ist, nur geringfügig festzustellen.

Bild 7.3-8 zeigt die durch die Doppelfassade eingesparten Transmissionsverluste. Die Energieeinsparung η_{DF} berechnet sich analog zu Kapitel 2.1.2 zu

$$\eta_{DF} = 1 - \frac{t_i - t_{Fass}}{t_i - t_u} \qquad (7.3\text{-}1)$$

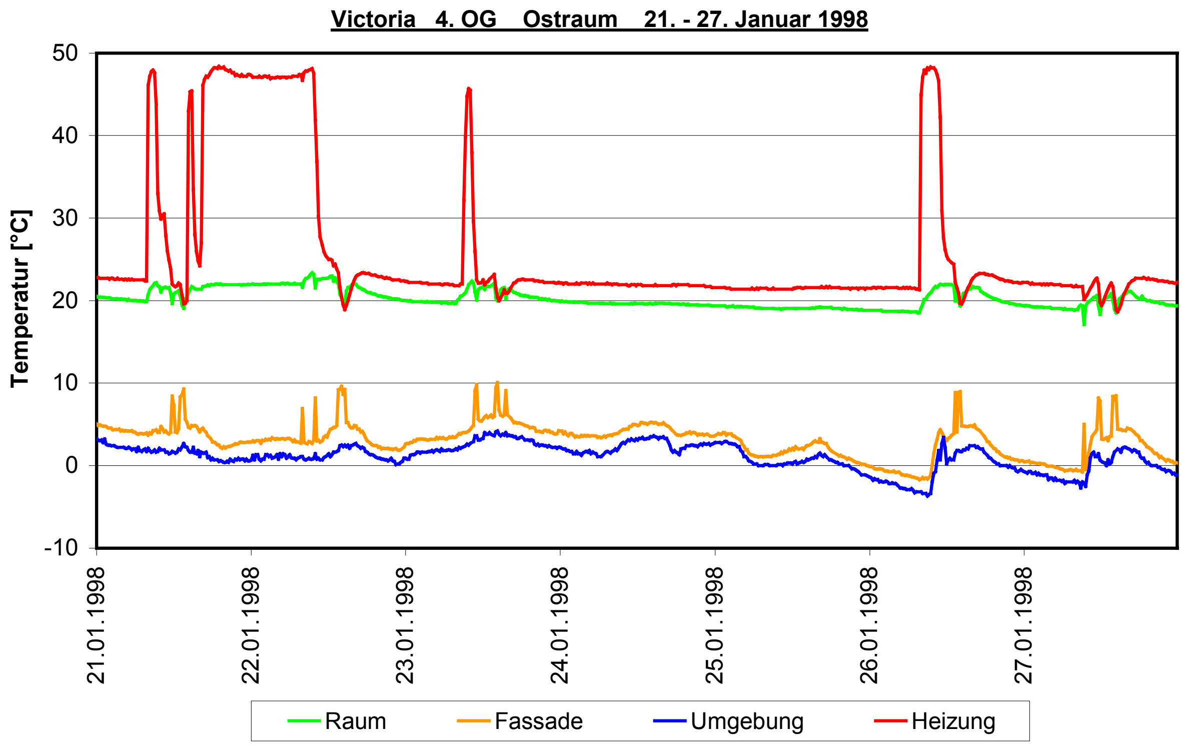

Bild 7.3-6: Kälteperiode im Winter 1997 / 1998

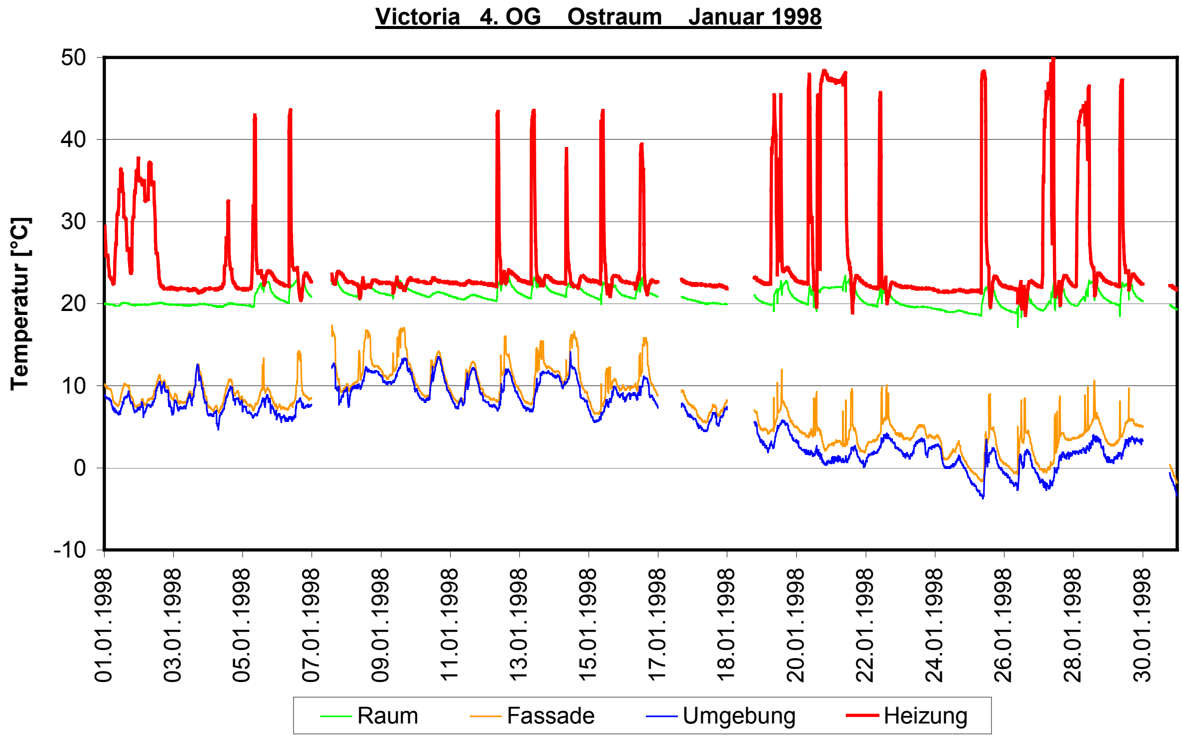

Bild 7.3-7: Temperaturen im Januar 1998

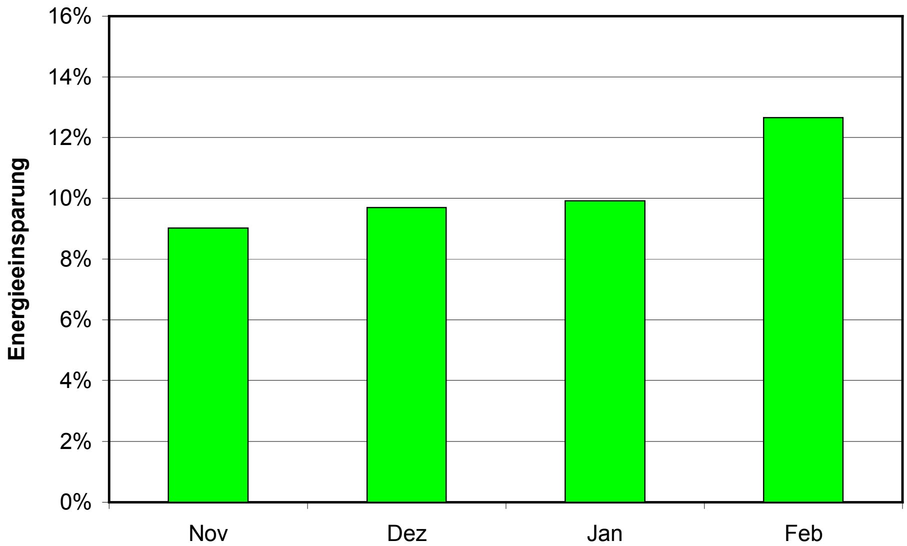

Bild 7.3-8: Einsparung an Transmissionsverlusten über die Doppelfassade

7.3.3 Natürliche Lüftung über die Doppelfassade

Während des Messzeitraumes wurden von Ziller [46] vom Lehrstuhl für Stahlbau an der RWTH-Aachen, die bei der Auslegung der Fassade mitgewirkt hat, Luftwechselmessungen nach der Konzentrations-Abkling-Methode mit dem Spurengas SF6 durchgeführt (siehe Kapitel 3).

Diese Messungen zeigen, dass der Mindestluftwechsel (30 m³ pro Person und Stunde) in 8 von 9 Messungen mit einem gekippten Fenster erreicht werden konnte (Bild 7.4-9). Der durchschnittliche Luftwechsel der Messungen liegt mit 2,1/h deutlich über dem notwendigen Luftwechsel. Die Heizung wird bei geöffnetem Fenster automatisch abgeschaltet.

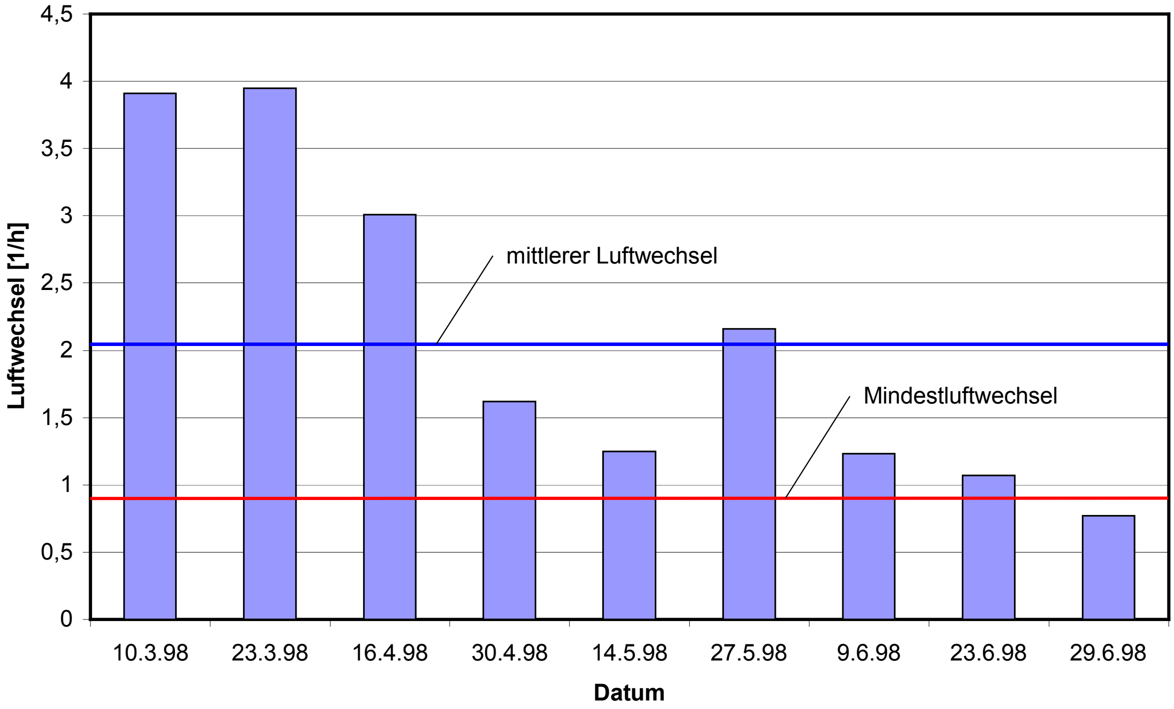

Bild 7.3-9: Natürlicher Luftwechsel bei einem gekippten Fenster (Luftwechselmessungen)

7.3.4 Einfluss der Bauteiltemperierung

Der zur Fischerstraße hin orientierte Büroriegel ist als erstes Gebäude in Deutschland mit einer Betonkerntemperierung ausgestattet. In den Räumen hinter der Doppelfassade wurden Kunststoffrohrschlangen (in der Verteilung ähnlich den Rohrleitungen einer Fußbodenheizung) in die Mitte des Betondeckenquerschnitts eingegossen. Die durch Wasserrohre kontinuierlich gekühlte Betondecke ist in der Lage bei natürlicher Lüftung auch hohe Außentemperaturen abzupuffern. In den Sommermonaten ergibt sich eine gute Kombination von aktivierten Speichermassen und der natürlichen Lüftung über die Doppelfassade.

Bild 7.4-10 zeigt die Lufttemperaturen, die Oberflächentemperatur der Decke und den Wärmestrom in die Decke beispielhaft an einem heißen Sommertag. Der Wärmefluss in die Decke wurde als Mittelwert zweier auf die Betondecke aufgeklebten Wärmeflussplatten ermittelt.

Für den wärmsten Monat der Messperiode stellt Bild 7.4-11 den Wärmefluss in die Decke, die Deckenoberflächentemperatur und die Raumtemperatur dar. Die gemessene Spitzenleistung der Decke liegt bei 20 bis 30 W/m². Die Kühlung über Strahlungsaustausch wird teilweise durch zwischen Raum und Decke liegende abgehängte Schallabsorptionselemente verringert.

Die während der Messperiode über die Decke abgeführte Energie zeigt Bild 7.4-12. Es liegt die Vermutung nahe, dass der im Winter gemessene Wärmefluss aus einer unterschiedlichen Beheizung des darüber liegenden Raumes resultiert.

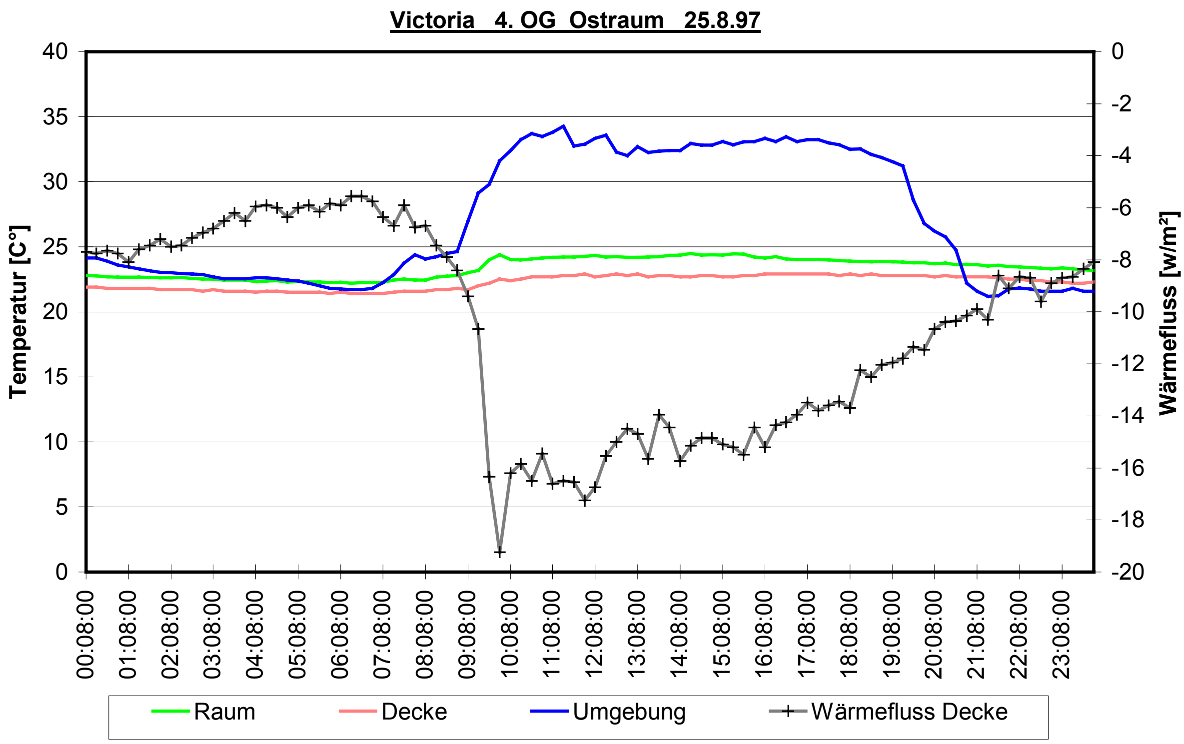

Bild 7.3-10: Wärmefluss in die Betondecke am 25.8.1997

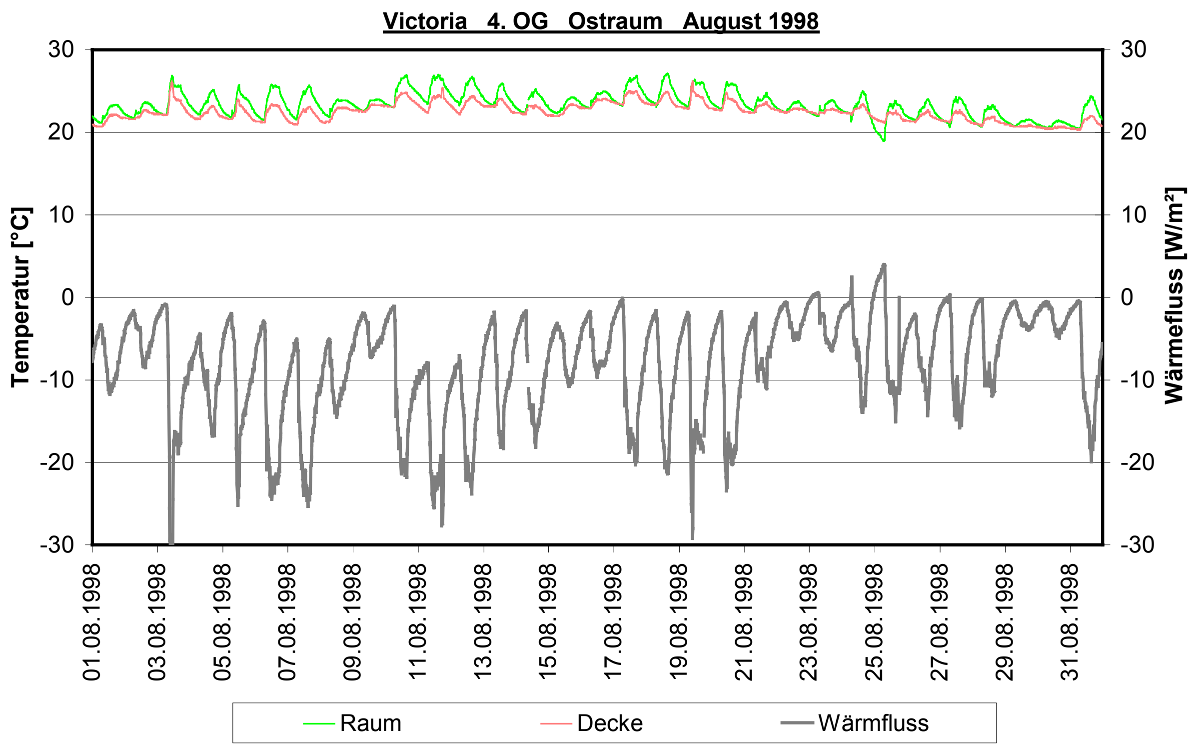

Bild 7.3-11: Wärmefluss in die Betondecke im August 1998

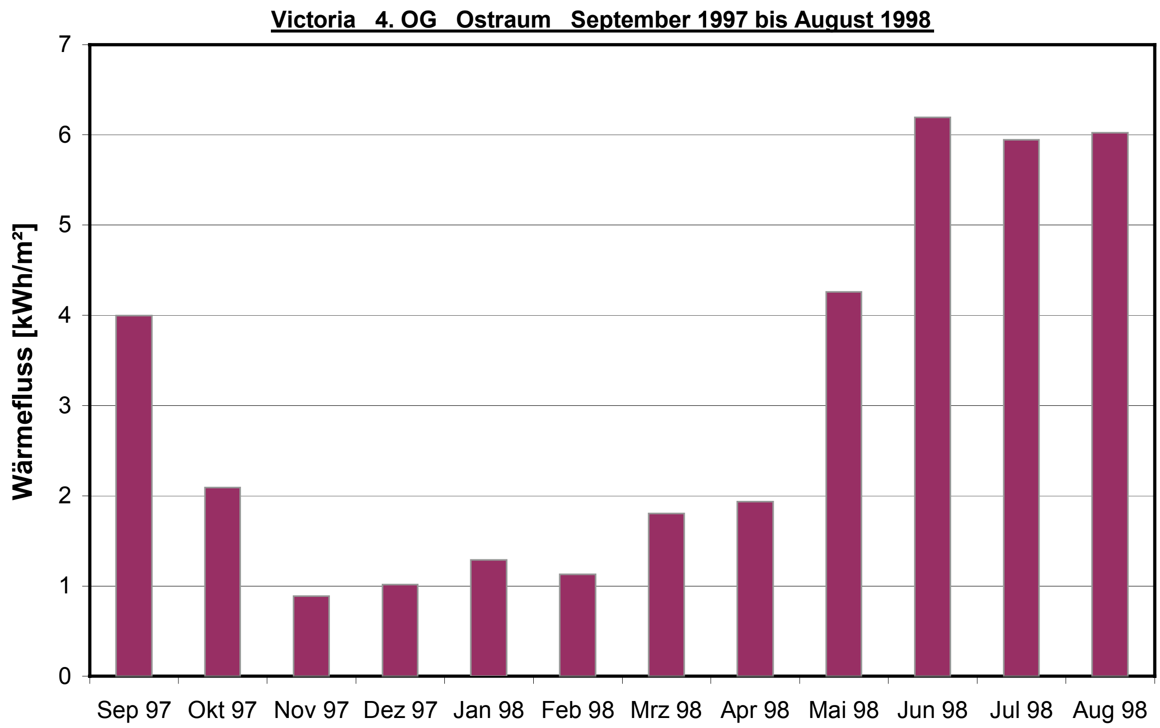

Bild 7.3-12: Wärmeabgabe des Raumes an die Betondecke

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Doppelfassaden für die Dauer von einem bzw. zwei Jahren im laufenden Betrieb detailliert vermessen. Ziel der Arbeit war es, die sich einstellenden Bedingungen auszuwerten und zu dokumentieren, den Einfluss der Randbedingungen zu quantifizieren und allgemeine Vorhersagen für die Hinterlüftung von Doppelfassaden aufzustellen.

Untersucht wurde ein Gebäude ohne jegliche Klimatisierung (Siemens-Gebäude in Dortmund), ein Gebäude mit Bauteiltemperierung (Victoria Versicherung in Düsseldorf) und ein Gebäude mit Kühldecken und Lüftungsanlage (RWE-Turm in Essen).

Natürliche Lüftung

Eine natürliche Fensterlüftung über die Doppelfassade ist in allen drei Gebäuden jederzeit und mit ausreichendem Luftwechsel möglich.

Um einen Zusammenhang zwischen dem sich einstellendem Raumluftwechsel und dem Einfluss von Wind und Temperatur herzustellen, wurden die im Siemens-Gebäude im Verlauf der Messperiode durchgeführten und bereits von *Nolte* [26] ausgewerteten ca. 100 Luftwechselmessungen nochmals statistisch ausgewertet. Dennoch ließ sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperaturdifferenz zum Fassadenzwischenraum erkennen. Der von *Ziller* [46] für die Victoria Versicherung gefundene Zusammenhang der Temperaturdifferenz zwischen Büroraum und Umgebung und dem sich einstellenden Raumluftwechsel bestätigte sich beim Siemens-Gebäude nicht. Dies ist auch auf den von *Nolte* [28] gemessenen einen Querströmungsanteil im Gebäude zurückzuführen.

Hinterlüftung des Doppelfassadenzwischenraumes

Für die Berechnung und Simulation von Doppelfassaden ist die Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes eine Größe mit großem Einfluss auf die sich einstellenden Temperaturen und die einzige Größe, die bisher aufgrund der komplexen Randbedingungen nur näherungsweise abgeschätzt werden konnte.

Zur Beurteilung der Hinterlüftung des Doppelfassadenzwischenraumes wurden in zwei Gebäuden (Siemens-Gebäude und RWE-Turm) Strömungsgeschwindigkeiten im Doppelfassadenzwischenraum gemessen. Mit Hilfe einer thermischen Bilanz kann der Zusammenhang zwischen gemessener Strömungsgeschwindigkeit und dem Volumenstrom in der Fassade belastbar kalibriert werden.

Über einen Kalibrierungszeitraum wurde der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit eine fiktive Querschnittsfläche zugewiesen, so dass für jeden Messpunkt ein Volumenstrom in der Fassade zur Verfügung steht. In der Victoria Versicherung war, durch die Möglichkeit die Messfühler vor den Lüftungsöffnungen anzuordnen, die direkte Umrechnung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten möglich.

Statistische Auswertung der Hinterlüftung

Die statistische Auswertung des Luftvolumenstromes im Fassadenzwischenraum in Abhängigkeit der maßgeblichen Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und der Temperaturdifferenz zur Umgebung gestaltet sich zunächst schwierig, wenn physikalische Zusammenhänge bzw. der erwartete Zusammenhang vorgegeben werden.

Erst das Verfahren der modernen Regression, bei dem im Rahmen der statistischen Auswertung in kleinen Schritten angenäherte Funktionen der Einflussgrößen bestimmt werden, führt zum Erfolg. Bei allen drei Gebäuden zeigt sich ein signifikanter Einfluss von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, und der Temperaturdifferenz zur Umgebung auf die Hinterlüftung der Fassade.

Bewertung der Einflussgrößen

Die gefundenen Funktionen für den Einfluss der gemessenen Randbedingungen stimmen dabei nur bedingt mit dem erwarteten Verlauf überein. Die Kurve des Windeinflusses verläuft entgegen dem erwarteten linearen Einfluss beim Siemens-Gebäude und bei der Victoria Versicherung annähernd quadratisch. Dieser Zusammenhang erklärt sich unter anderem daraus, dass sich durch die Turbulenz des Windes eine „instationäre Wechselströmung“ [8] im Fassadenzwischenraum einstellt. Ebenso besteht eine Wechselwirkung mit dem Temperatureinfluss.

Ein quadratischer Zusammenhang stellt sich auch zwischen Temperatureinfluss und Luftvolumenstrom in der Fassade ein. Dieser unerwartete Verlauf (erwartet wird ein Einfluss mit der Wurzel der Temperaturdifferenz) ist auf die Überlagerung mit dem Einfluss des Windes zurückzuführen.

Der thermische Auftrieb im Fassadenzwischenraum bewirkt eine Strömung in der Fassade, die von untern nach oben gerichtet ist. Die Windanströmung des Gebäudes kann jedoch auch zu einer Strömung von oben nach unten führen, so dass beide Einflüsse gegeneinander arbeiten. Hohe Temperaturdifferenzen zwischen Fassade und Umgebung treten in der Regel bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auf. Dies führt dazu, dass hohe Temperaturdifferenzen für den Temperatureinfluss stärker berücksichtigt werden.

Beim RWE-Turm stellt sich bei höheren Volumenströmen ein Sättigungseffekt der Durchströmung des Fassadenzwischenraumes und damit der Einflussgrößen ein.

Der Einfluss der Windrichtung stellt sich erwartungsgemäß chaotisch dar. Kleine Änderungen können große Auswirkungen haben.

Der Windeinfluss überwiegt deutlich im 16. OG. des RWE-Turms und bei der Korridorfassade des Siemens-Gebäudes. In der Kastenfensterfassade der Victoria Versicherung mit Zuluft in den Pfosten liegen der Einfluss von Wind und Temperatur in ähnlicher Größenordnung.

Abgeleitete Formeln

Für die Simulation von Doppelfassaden ist eine näherungsweise Berechnung der Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes in Abhängigkeit von meteorologischen Randbedingungen sicherlich wünschenswert. Trotz des signifikanten Einflusses der untersuchten Größen lieferte die statistische Auswertung keine auf alle Gebäude übertragbare Formel, sondern für jedes Gebäude abweichende Zusammenhänge.

Näherungsweise lässt sich jedoch der insgesamt komplexe Zusammenhang zwischen der Hinterlüftung des Fassadenzwischenraumes und den Einflussgrößen Wind, Temperaturdifferenz zur Umgebung und den baulichen Unterschieden auf eine einfache Aussage reduzieren. Es stellt sich trotz aller Unterschiede in der Fassadengestaltung für die ausgewerteten Gebäude ein linearer Zusammenhang zwischen dem wirksamen Öffnungsanteil der Außenfassade und dem mittleren Luftvolumenstrom pro m² Fassadenfläche in der Fassade ein.

Temperaturen im Raum und in der Fassade

Die Doppelfassade des Siemens-Gebäudes ist mit einem Öffnungsanteil von 6,4 % die von allen Gebäuden am besten hinterlüftete Fassade. Dieses Gebäude zeigt, dass ein komplett natürlich belüftetes Bürogebäude ohne technische Kühleinrichtungen mit Doppelfassade möglich ist, wenn im Extremfall sommerliche Temperaturen im Bereich der Außentemperatur akzeptiert werden. Eine Nachtlüftung des Gebäudes wird durch den Windschutz der Doppelfassade möglich und beeinflusst die sommerlichen Raumtemperaturen positiv. Untersucht wurde ein Eckraum mit Südost- und Südwestfassade und einer Nutzung als Call-Center mit erhöhten inneren Lasten.

Die Bauteiltemperierung der Victoria Versicherung zeigt, wie Raumkühlung mit einem relativ geringen Energieaufwand bei einer natürlichen Lüftung über die Doppelfassade betrieben werden kann. Solche Systeme können auch mit Grundwasserwärmetauscher ohne Kühlaggregat ausgeführt werden. Die sich einstellenden Raumlufttemperaturen liegen trotz einer relativ geringen Kühlleistung der Betondecke von 20 bis 30 W/m² deutlich im akzeptablen Bereich der DIN 1946. Die Temperaturen in der Doppelfassade liegen wegen der Ostausrichtung der Fassade trotz des geringeren wirksamen Öffnungsanteil von 4,1 % und der geringeren Hinterlüftung in der gleichen Größenordnung wie beim Siemens-Gebäude.

Die Ganzglasdoppelfassade des RWE-Turms in Essen besitzt einen effektiven, witterungsgeschützten, außerhalb des Innenraumes angeordneten Sonnenschutz. Andere Lösungen des sommerlichen Wärmeschutzes für Hochhäuser wie Sonnenschutzglas und innen liegender Sonnenschutz sind bei weitem weniger effektiv. Die Lüftungsanlage im Gebäude macht den Nutzer bei zeitweilig hohen Temperaturen im Fassadenzwischenraum unabhängig von der Fensterlüftung. Die technischen Einrichtungen (Kühldecke und Lüftungsanlage mit Be- und Entfeuchtung) bieten bei gleichzeitiger Möglichkeit, das Fenster zu öffnen, von allen Gebäuden den höchsten Komfort in den Büroräumen.

Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit, mit Hilfe von Langzeitmessungen in drei Gebäuden Klarheit über die energetischen Zusammenhänge bei Doppelfassaden zu schaffen, wird durch den klar gefundenen Zusammenhang zwischen den Einflüssen von Wind und Temperatur auf die Hinterlüftung einer Doppelfassade für die untersuchten Fassadentypen der Kastenfensterfassade und der Korridorfassade erreicht. Für Doppelfassaden ohne geschossweise Trennung, die nur am Boden und am Dachrand nach außen geöffnet sind, oder für Schachtsysteme gelten die gefundenen Zusammenhänge aller Voraussicht nach nicht.

Auch wenn für die einzelnen Gebäude unterschiedliche Funktionen für den Einfluss von Wind und Temperatur gefunden wurden, so wird klar, dass eine reine Betrachtung des thermischen Auftriebs alleine nicht ausreicht, um Doppelfassaden energetisch zu berechnen. Da der Windeinfluss in der Regel überwiegt, ist die Berechnung einer rein thermisch bedingten Hinterlüftung der Fassade nur zur Extremwertbetrachtung geeignet.

Zeitlich differenzierte Vorhersagen der Hinterlüftung einer Doppelfassade zur Verwendung in Simulationsprogrammen können allgemeingültig auf der Grundlage der gemessenen Gebäude nur sehr bedingt getroffen werden. Wegen des sich in der Realität einstellenden zeitlich stark schwankenden Fassadenluftwechsel erscheint der Versuch einer genaueren Abbildung allerdings auch nur bedingt sinnvoll. Bei Simulationsrechnungen empfiehlt es sich, mit einem konstanten Luftwechsel im Fassadenzwischenraum zu rechnen. Als guter Kompromiss hat sich bereits in ersten Berechnungen ein mittlerer Fassadenluftwechsel herausgestellt, der in erster Näherung über den Öffnungsanteil der Fassade abgeschätzt werden kann.

9 Literaturangaben

[1] Besonnener Turmbau - Erweiterung Victoria-Haus in Düsseldorf, AIT Spezial - Intelligente Architektur 12/1998.

[2] Blum, Hans-Jürgen et al.: Doppelfassaden, Verlag Ernst & Sohn, 2000.

[3] Christopher, J., Buckel, W., Weber, K.-H.: Simulation durch Testreferenzjahre, CCI, 10-1988.

[4] Daniels, Klaus: Technologie des ökologischen Bauens, Basel [u.a.], Birkhäuser, 1995.

[5] DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau, Berlin, Beuth Verlag, 1998.

[6] Duffy, J. A., Beckmann, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, second edition, Whily-Interscience, 1991.

[7] Faist, André. Double-Skin Walls, Ecole Polytechnique Fedérale de Lausanne, 1998.

[8] Gertis, Karl: Sind neue Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? - Teil1: Transparente Wärmedämmung, Bauphysik 21 (1999) Heft 1, S. 1-9.

[9] Gertis, Karl: Sind neue Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? - Teil2: Glas-Doppelfassaden (GDF), Bauphysik 21 (1999) Heft 2, S. 54-66.

[10] Hastie, T.J., Tibshirani, R.J.: Generalized Additive Models, London, Chapman & Hall, 1990.

[11] Hausladen, Gerhard: Doppelfassaden - energetische und raumklimatische Auswirkungen", Tagungsband 'Doppelfassaden und technische Gebäudeausrüstung', Hg. Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bonn, Selbstverlag 1997.

[12] D. Henze: Hochhaus einer Konzernverwaltung in Essen, Detail (Jubiläumsausgabe), S. 1504-1505, 8/2000.

[13] Heusler, Winfried, Compagno, Andrea: Mehrschalige Fassaden, DBZ 6/1998, S. 131-138.

[14] Hochhaus einer Konzernverwaltung in Essen, Detail 3/1997, S. 355-371.

[15] Jochheim, Elmar: Interdisziplinär - Zweischalige Fassaden am Victoria-Haus als wesentlicher Bestandteil des Gebäudekonzeptes, AIT Spezial - Intelligente Architektur 12/1998, S. 44-47.

[16] Kornadt, Oliver, Lehmann, Lutz, Zapp, Franz Josef: Doppelfassaden: Nutzen und Kosten, Bauphysik 21 Heft 1, 1999, S. 10-19.

[17] Kröling, Peter: Sick-Building-Syndrom. In: Baumeister, 1995, Nr.5, S. 50 –58.

[18] Lang, Werner: Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie, Dissertation, TU München, 2000.

[19] Lang, Werner: Zur Typologie mehrschaliger Gebäudehüllen aus Glas, Detail 7, 1998, S. 1225-1232.

[20] Liu , B. Y. H., Jordan, R. C.: „The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation" in Solar Energy, Vol IV, July, 1960, pp 1-19.

[21] Löder, Thomas: Geprüft – Erfahrungsbericht über das Sol-Skin-Gebäude der Götz GmbH in Würzburg, AIT Spezial - Intelligente Architektur 11, 1997, S. 76-79.

[22] Meierhans: Betonkernaktivierung, Veröffentlichung der Firma Velta

[23] Müller, Helmut, Nolte Christoph, Pasquay, Till: Klimagerechte Fassadentechnologie - 1: Doppelfassaden für die Sanierung bestehender Gebäude, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 4, Nr. 170, VDI Verlag 2001.

[24] Müller, Helmut, Nolte Christoph, Pasquay, Till: Klimagerechte Fassadentechnologie - 2: Monitoring von Gebäuden mit Doppelfassaden, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 4, VDI Verlag voraussichtlich 2003.

[25] Müller, Helmut, Nolte, Chistoph, Pasquay, Till: Die Mittel, aktiv zu sein. In: Danner, D., e.a. (Hg.): Die klima-aktive Fassade ISBN 3-87422-635-2, Leinfelden-Echterdingen, Verlagsanstalt Alexander Koch , 1999, S. 40 – 113.

[26] Müller, Helmut, Nolte, Christoph, Pasquay, Till: Musterfassade – Das Forschungsvorhaben „Klimagerechte Fassadentechnologie“ an der Universität Dortmund. AIT-Spezial - Intelligente Architektur, November 1998, S. 81-85.

[27] Nolte, Christoph, Pasquay, Till, Thiel, Dieter: Geprüft - Bericht zu Messvorhaben an drei Gebäuden mit Doppelfassaden, AIT Spezial - Intelligente Architektur 15, 1998, S. 81-85.

[28] Nolte, Christoph: Zum Lüftungsverhalten von Doppelfassaden Dissertation, Universität Essen, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 4, Nr. 158, VDI-Verlag, Düsseldorf. 1999.

[29] Oesterle, Lieb, Lutz, Heusler: Doppelschalige Fassaden. Callwey. München, 1999

[30] Pasquay, Till, Nolte, Christoph: Doppelschalige Fassaden im Gebrauch: Messergebnisse, Das Architekten Magazin 6/2001, S. 25-28.

[31] Pasquay, Till, Nolte, Christoph: Doppelschalige Fassaden im Gebrauch: Messergebnisse, Fassadentechnik 6, Nov. 2001, S. 14-17 (Nachdruck).

[32] Pasquay, Till, Nolte, Christoph: The Double Facade as a thermal Collector and as a Transparent Insulation. In: Proceedings „Building a new Century“, Fünfte Europäische Konferenz Solarenergie in Architektur und Stadtplanung, Bonn, Eurosolar-Verlag, 1999, S. 333 – 336.

[33] Pasquay, Till: Die Doppelfassade, Hitzefalle oder Energiesparfassade?, Messungen über ein Jahr an zwei Gebäuden mit Doppelfassaden, Bauphysikertreffen 1998, Veröffentlichung der FH Stuttgart - Hochschule für Technik, Band 44, S. 53 - 61.

[34] Pasquay, Till: Natural ventilation in high-rise buildings with double facades. Saving or waste of energy?, PLEA 2001, Florianapolis, Brazil.

[35] Perez, R., Steward, R. Seals, R, Guertin, T. „The Development and Verification of The Perez Diffuse Radiation Model“, Sandina Report SAND88-7030, (Sandina National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 87185 USA), 1988.

[36] "Roulet C.-A., Jaboyedoff P., Dorer V., Weber A., Pfeiffer A., Bluyssen P.: Pollution and Energy in Air Handling Units - Some Results of the Europe Project Airless CISBAT 2001 - EPFL, Lausanne, 3 - 4 octobre 2001.

[37] Schulze-Kegel, D. and Heidt, F.D.: Mapping of global radiation with METEOSAT. Solar Energy, Vol. 58, No. 1-3, pp. 77-90, 1996

[38] Schwab, Armin: Neue Konzepte mehrschaliger Fassaden, DAB 3/96 S451-456 und DAB 4/96 S.693-695.

[39] Schwarz, B. : Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden, HLH 24 Heft 12, 1973, S. 376-384.

[40] Stoll Joachim: Glasfassaden als energetische Hüllfläche, Stahlbau 67 Heft4, 1998, S252-267.

[41] Thiel, Dieter: Intelligenten Fassaden gehört die Zukunft, CCI 7/1994, S. 33-37.

[42] Thiel, Dieter: Möglichkeiten und Grenzen der natürlichen Nachtkühlung als Mittel zur Kühlung bei der Klimatisierung von Bürogebäuden, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 19, Nr. 54, VDI Verlag 1991.

[43] Thiel, Dieter: Doppelfassaden - Bestandteil energetisch optimierter Bürogebäude, Facility Management 1/1995.

[44] Venables, W.N.; Ripley, B.D.: Modern Regression in 'Modern Applied Statistics with S-PLUS', Springer Verlag, New York u.a., 1994, S. 247-255.

[45] Wagner, Andreas: Klimatische Parameter und ihre Bedeutung für die Planung, 'Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden', Seminarbericht des Fraunhofer-Instituts Solare Energiesysteme, Freiburg, Selbstverlag 1994.

[46] Ziller, Claudia: Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden, Dissertation, RWTH-Aachen, Shaker Verlag, 1999.