

Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Matina Mörtel
geb. in Berlin

von der Fakultät III – Prozesswissenschaften
der Technische Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr. Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. George Tsatsaronis
Gutachterin:	Prof. Dr. Ing. habil. Birgit Müller
Gutachter:	Prof. Dr. Ing. Martin Kriegel

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 17. Juli 2015

Berlin 2015

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Hermann-Rietschel-Institut, Fachgebiet für Heizungs- und Raumlufthtechnik, der Technischen Universität Berlin.

Mitte 2003 wurde von mir als wissenschaftliche Mitarbeiterin das Projekt „Temperatur der angesaugten Außenluft dezentraler Lüftungsgeräte“ bearbeitet. Aus diesem von der Forschungsvereinigung für Lüftungs- und Trocknungsbau (FLT) geförderten Projekt entstand mit Hilfe von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller (E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen, ehemals Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin) der Ansatzgedanke zur Bearbeitung eines zweijährigen Forschungsprojektes „Energetischer Vergleich von zentralen und dezentralen raumlufthtechnischen Anlagen“, das aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung (AiF) finanziert wurde.

Auf Basis dieser beiden Projekte ist die Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit ermöglicht worden. Ich bedanke mich bei den Mitgliedsfirmen der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V. (FLT) für die administrative und fachliche Unterstützung.

Ich danke Frau Prof. Dr. Ing. habil. Birgit Müller (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin) für fachliche Gespräche, die wissenschaftliche Unterstützung und die aufmerksame Betreuung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Ing. Martin Kriegel (Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin) danke ich für wertvolle Hinweise und Anregungen, die zu weiteren Impulse und zum Abschluss diese Arbeit führten.

Frau Rosemarie Mielke (Hermann-Rietschel-Institut) danke ich für die Zeichnung einiger Abbildungen.

Herrn Karl-Heinz Kring (Hermann-Rietschel-Institut) danke ich für den Aufbau und die Montage der Messeinrichtungen.

Herrn Dipl.-Ing. Tunc Askan (Hermann-Rietschel-Institut) bin ich für viele wertvolle Hinweis und Anregungen zu den Simulationsrechnungen dankbar.

Zusammenfassung

Das Modell zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ermöglicht die Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte unter Berücksichtigung der Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht.

Lüftungsanlagen saugen Außenluft an und konditionieren die Luft entsprechend den gestellten Anforderungen des Aufenthaltsbereichs im Gebäude. Neben den zentralen raumlufttechnischen Anlagen zur Belüftung und Klimatisierung von Gebäuden werden dezentrale Geräte zur Konditionierung der Raumlufte eingesetzt. Für beide Systeme ist die Temperatur der angesaugten Außenluft für die Dimensionierung der Wärmeaustauscher entscheidend.

Die Ansaugöffnungen von dezentralen Geräten sind ausschließlich in die Gebäudefassade integriert. Vor den Fassadenflächen können sich die Luftschichten konvektiv erwärmen. Die Außenluft dezentraler Geräte wird aus den fassadennahen Luftschichten angesaugt. Eine Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht hat somit einen Einfluss auf die Temperatur der angesaugten Außenluft dezentraler Geräte. Die Ansaugtemperaturen werden Werte annehmen, die größer als die Außenlufttemperaturen sind. Eine Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte unter Verwendung der Außenlufttemperaturen, führt zu falschen Angaben. Diese Tatsachen sind der Anlass ein Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte aufzustellen.

Zur Lösung dieser Aufgabe werden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Ziel der experimentellen Untersuchung ist es, die messtechnisch erfassbaren Einflussgrößen auf die Temperaturerhöhung der angesaugten Luft gegenüber der Außenluft zu messen und mit Hilfe statistischer Auswertungsverfahren eine Abhängigkeit zur Ansaugtemperatur zu finden. Es werden Temperaturmessungen innerhalb der fassadennahen Grenzschicht eines Gebäudes über ein Jahr durchgeführt. Des Weiteren werden für ein Jahr die Ansaugtemperaturen an verschiedenen Ansaugöffnungen dezentraler und zentraler Anlagen gemessen, sowie Wetterdaten aufgezeichnet. Nicht alle Einflussgrößen, die für das aufzustellende Modell erforderlich sind, werden messtechnisch erfasst. Ziel der numerischen Strömungssimulationen ist es, diese Einflussgrößen in Abhängigkeit der Gebäudeumströmung zu bestimmen. Mess- und Simulationsdaten ermöglichen die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte.

Die Berechnung der Jahreswerte der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte mit dem aufgestellten Modell muss mit Hilfe eines Programms erfolgen, in das die erforderlichen Konstanten und Wetterdaten eingelesen werden. Vereinfacht können Einzelwerte mit festgelegten Außenluft- und Fassadenoberflächentemperaturen berechnet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Aufgabenstellung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte.....	2
2.2	Einflüsse auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Anlagen.....	3
2.2.1	Ansaugströmung.....	3
2.2.2	Temperaturprofile innerhalb der Fassadengrenzschicht	4
2.2.3	Ausbildung von Grenzschichten.....	7
2.3	Regressionsanalyse zur Berechnung der Ansaugtemperatur	12
2.4	Bestimmung der Nettostrahlung auf die Fassadenfläche	14
2.4.1	Berechnung der Gesichtsfeldfaktoren.....	15
2.4.2	Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlungsanteile ..	16
2.4.3	Langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche	18
2.4.4	Berechnung von Zenitwinkel und Strahlungseinfallswinkel ..	18
2.5	Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizients	22
2.5.1	Wärmeübergangskoeffizient parallel umströmter Flächen ...	22
2.5.2	Numerische Strömungsberechnung	27
3	Voruntersuchungen	29
3.1	Geometrie der Ansaugöffnung	29
3.2	Ansaugvolumenstrom und Abmessung der Ansaugfläche	30
4	Experimentelle Untersuchungen	35
4.1	Fehlerabschätzung der Temperaturmessungen	35
4.2	Messung dezentraler Ansaugtemperaturen.....	36
4.3	Messung zentraler Ansaugtemperaturen	41
4.4	Messung der Temperaturen normal zur Fassade	42
4.5	Messung der Fassadenoberflächentemperatur	43
4.6	Messung der Wetterdaten	44
4.7	Auswertung der gemessenen Temperaturen vor der Fassade	45
4.8	Auswertung der Strömung an der VWS-Fassade	53
4.9	Auswertung der Grenzschichtdicke.....	55
4.10	Auswertung der Ansaugtemperaturen dezentraler Geräte	59
4.10.1	Einfluss der Anlagenwahl	59
4.10.2	Einfluss der Fassadenstruktur	63
4.10.3	Einfluss der Gebäudehöhe.....	64
4.10.4	Einfluss der Grenzschicht	66
4.10.5	Einfluss der Position der Ansaugöffnung	69
4.10.6	Einfluss der Ansaugvariante	73
4.10.7	Einfluss der Wetterdaten und Fassadentemperatur.....	76
4.11	Berechnungsansatz für die Übertemperatur der Ansaugung	81

5	Einfache lineare Regressionsanalyse	83
6	Berechnungsansatz für die Fassadenoberflächentemperatur	86
6.1	Wärmeübertragungsbilanz an der vertikalen Fassade	87
6.2	Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur	88
6.3	Vergleich der Messwerte mit den Berechnungswerten	90
7	Numerische Strömungsberechnung	92
7.1	Modellbildung in ANSYS ICEM 11.0	92
7.2	Entwicklung und Auswertung der Gitterstruktur	94
7.3	Gitterunabhängigkeitsstudie	95
7.4	Gewählte Gitterstruktur für die Strömungsberechnung	96
7.5	Solvereinstellungen der Randbedingungen in ANSYS CFX	98
7.5.1	Modellkörper	98
7.5.2	Kanal	98
7.6	Validierung der Simulationsmodelle	100
7.7	Auswertung, Ergebnisse und Diskussion der Simulation	103
7.7.1	Einfluss des Anströmwinkels auf die Grenzschichtdicke	104
7.7.2	Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke	106
7.7.3	Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke	108
7.8	Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	110
8	Modell zur Berechnung dezentraler Ansaugtemperaturen	114
8.1	Anwendung des Berechnungsmodells	120
8.2	Diskussion und Übertragbarkeit des Berechnungsmodells	123
9	Ausblick	126
10	Zusammenfassung	127
11	Literaturverzeichnis	130

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche der Ansaugöffnung	m ²
Ar	Archimedeszahl	-
AW	Anströmwinkel	°
AWN	Normierter Anströmwinkel	-
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s
a	Geschwindigkeitsunabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
a _w	Geschwindigkeitsabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
a ₀	Absolutglied der Regressionsgeraden	-
a ₁	Koeffizient der Ansaugung Regressionskoeffizient	-
a _s	Kurzwellige Absorptionszahl	-
B	Breite des Gebäudes	m
b	Geschwindigkeitsunabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
b _w	Geschwindigkeitsabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
b ₁	Koeffizient der Ansaugvariante	-
c	Geschwindigkeitsunabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
c _w	Geschwindigkeitsabhängiger Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients	Ws/m ³ K
c ₁	Koeffizient der Fassadenstruktur/Position	-
d	Durchmesser	m
d _R	gleichwertigen Durchmesser	m
E	Sättigungsdampfdruck über Wasser	Pa
e	Wasserdampfpartialdruck	Pa
e _i	Schätzfehler bei der Regression	-
Gr	Grashofzahl	-
g _{atm}	Atmosphärischer Gesichtsfeldfaktor	-
g _{dir}	Direkter Gesichtsfeldfaktor	-
g _{terr}	Terrestrischer Gesichtsfeldfaktor	-
H	Höhe des Gebäudes	m
I	Nettostrahlung an der Bauteilfläche	W/m ²
I _L	Langwellige Gegenstrahlung an der Bauteilfläche	W/m ²

$I_{L,atm}$	Atmosphärische Gegenstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{L,atm,k}$	Atmosphärische Gegenstrahlung bei wolkenlosem Himmel	W/m^2
$I_{L,atm,bw}$	Atmosphärische Gegenstrahlung bei bedecktem Himmel	W/m^2
$I_{L,Fa,em}$	Langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche	W/m^2
$I_{L,Fa,atm}$	Atmosphärische Gegenstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
$I_{L,Fa,refl,terr}$	Reflektierte atm. Gegenstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
$I_{L,refl,terr}$	Reflektierte atm. Gegenstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{L,em,terr}$	Terrestrische Gegenstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{L,Fa,em,terr}$	Terrestrische Gegenstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
I_S	Kurzwellige Solarstrahlung an der Bauteilfläche	W/m^2
$I_{S,diff}$	Diffuse Solarstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{S,dir}$	Direkte Solarstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{S,Fa,diff}$	Diffuse Solarstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
$I_{S,Fa,dir}$	Direkte Solarstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
$I_{S,Fa,refl,terr}$	Vom Erdboden reflektierte Solarstrahlung auf eine vertikale Fläche	W/m^2
$I_{S,refl,terr}$	Vom Erdboden reflektierte Solarstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
$I_{S,Glob}$	Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche	W/m^2
L	Länge	m
MEZ	Mitteleuropäische Zeit	-
MOZ	Mittlere Ortszeit	-
N	Bedeckungsgrad	-
Nu	Nußelt-Zahl	-
n	Tageszahl	-
n'	Tageswinkel	°
P	Profilexponent des Windprofils	-
Pr	Prandtl-Zahl	-
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m^2
$\dot{q}_{A,konv}$	Konvektive Wärmestromdichte nach außen	W/m^2

$\dot{q}_{I,konv}$	Konvektive Wärmestromdichte nach innen	W/m ²
$\dot{q}_{I,Leit}$	Wärmeleitstrom	W/m ²
R_{WD}	Gaskonstante für Wasserdampf	J/(kg K)
Ra	Rayleigh-Zahl	-
Re	Reynolds-Zahl	-
R_w	Wärmedurchgangswiderstand	m ² K/W
R_{leit}	Wärmeleitwiderstand	m ² K/W
R_{IW}	Innerer Wärmeübergangswiderstand	m ² K/W
SWZ	Sommer- oder Winterzeit (SWZ=1 h (Sommer), SWZ=0 (Winter))	h
T	Temperatur	K
S_x	Abweichungen der Einflussgrößenwerte	-
S_{xy}	Summe der gemischten Abweichungsprodukte	-
UANT	Übertemperatur der Ansaugung	K
UT_{Fa}	Übertemperatur der Fassadenoberflächentemperatur	K
VZ	Verspätung gegenüber des Zeitzonenmeridians	h
WOZ	Wahre Ortszeit	h
w	Geschwindigkeit	m/s
w_z	Geschwindigkeit im Abstand z	m/s
x	Einflussgrößen der Regressionsgeraden	-
y	Tatsächliche Werte bei der Regression	-
$\ddot{y}$	Zielgrößen der Regressionsgeraden	-
Z	Zeitgleichung	h
z	Abstand axial vor der Ansaugöffnung oder Fassade	m
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
α_{Fa}	Wärmeübergangskoeffizient der Fassade	W/m ² K
α_F	Azimutwinkel der beschienenen Fläche	°
α_{Az}	Sonnenazimut	°
β	Neigung der beschienenen Fläche	°
δ	Deklination der Sonne	°
δ	Grenzschichtdicke	m
δ_w	Dicke der Wand	m
φ_{GB}	Geographische Breite	°
λ_{GL}	Geographische Länge	°
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
λ_w	Wärmeleitfähigkeit der Wand	W/mK
λ_z	Längengrad der Zonenzeit	°
γ	Höhenwinkel (Elevation der Sonne)	°

ε_L	Langwellige Emissions- und Absorptionszahl	-
$\varepsilon_{L,k}$	Langwelliger Emissionsgrad der wolkenlosen Atmosphäre	-
η^+	Dimensionslose wandnormal Koordinate	-
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
ω	Stundenwinkel	°
θ	Einfallswinkel auf beschienene Fläche	°
θ_z	Zenitwinkel der Sonne	°
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_L	Langwelliger Reflexionsgrad	-
$\rho_{l,WD}$	Dichte von Wasserdampf	kg/m ³
ρ_S	Kurzwelliger Reflexionsgrad	-
σ	Strahlungskonstante	W/m ² K ⁴
ϑ	Temperatur	°C
ϑ^+	Dimensionslose Temperatur	-
Indizes	Bezeichnung	
A	Außen	
Al	Außenluft	
An	Ansaugung	
atm	Atmosphärisch	
bw	Bewölkt	
char	Charakteristisch	
diff	Diffus	
dir	Direkt	
E	Erzwungen	
EF	Erzwungen und Frei	
em	Emittiert	
F	Frei	
Fa	Fassadenoberfläche	
Glob	Global	
IR	Innenraum	
I	Innen	
k	Klar	
konv	Konvektiv	
L	Langwellige Strahlung	
leit	Leitung	
l	Luft	
lok	lokal	
IR	Innenraum	
IW	Innenwand	
lam	Laminare Strömung	
refl	reflektiert	
S	Kurzwellige Strahlung	

terr	Erdboden	
tp	Taupunkt	
tub	Turbulente Strömung	
W	Wand	
WD	Wasserdampf	
x	Koordinate in x-Richtung	
y	Koordinate in y-Richtung	
z	Abstand axial vor der Ansaugöffnung oder Fassade	
Abkürzungen	Bezeichnung	
BIB	Bibliothek	
HRI	Hermann-Rietschel-Institut	
RB	Randbedingung	
TC	Technische Chemie	
VWS	Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffs- bau	
WG	Windgeschwindigkeit	
WR	Windrichtung	

1 Motivation und Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte. Es ermöglicht die Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte unter Berücksichtigung der Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht. Eine Vergleichsmöglichkeit des Jahresenergiebedarfs zentraler und dezentraler Lüftungssysteme ist für eine wirtschaftlich begründete Systementscheidung gegeben.

Lüftungsanlagen saugen Außenluft an und konditionieren die Luft entsprechend den Anforderungen des Aufenthaltsbereichs. Neben den zentralen raumluftechnischen Anlagen zur Belüftung und Klimatisierung von Gebäuden werden dezentrale Geräte zur Konditionierung der Raumluft eingesetzt [1]. Für beide Systeme ist die Temperatur der angesaugten Außenluft für die Dimensionierung der Wärmeaustauscher entscheidend. Ihre Leistung kann nur unter Kenntnis der Ansaugtemperatur und der gewünschten Innenraumtemperatur ermittelt werden. Bisher wird angenommen, dass die Ansaugtemperatur der Außenlufttemperatur entspricht.

Die Ansaugöffnungen von dezentralen Geräten sind ausschließlich in die Gebäudefassade integriert. Vor den Fassadenflächen können sich die Luftschichten konvektiv erwärmen. Die Außenluft dezentraler Geräte wird aus den fassadennahen Luftschichten angesaugt. Eine Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht hat somit einen Einfluss auf die Temperatur der angesaugten Außenluft dezentraler Geräte. Die Ansaugtemperaturen werden Werte annehmen, die größer als die Außenlufttemperaturen sind.

Für die Berechnung der dezentralen Ansaugtemperaturen fehlt ein Berechnungsmodell. Aus diesem Grund werden bei der Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte bisher nur die Außenlufttemperaturen herangezogen. Das führt zu falschen Angaben. Diese Tatsachen begründen das Ziel dieser Arbeit, ein Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte aufzustellen.

Zur Lösung dieser Aufgabe werden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Ziel der experimentellen Untersuchung ist es, die messtechnisch erfassbaren Einflussgrößen auf die Temperaturerhöhung der angesaugten Luft gegenüber der Außenluft zu messen und mit Hilfe statistischer Auswertungsverfahren eine Abhängigkeit zur Ansaugtemperatur zu finden. Es werden Temperaturmessungen innerhalb der fassadennahen Grenzschicht eines Gebäudes über ein Jahr durchgeführt. Des Weiteren werden für ein Jahr die Ansaugtemperaturen an verschiedenen Ansaugöffnungen dezentraler und zentraler Anlagen gemessen, sowie Wetterdaten aufgezeichnet. Nicht alle Einflussgrößen, die für das aufzustellende Modell erforderlich sind, werden messtechnisch erfasst. Ziel der numerischen Strömungssimulationen ist es, diese Einflussgrößen in Abhängigkeit der Gebäudeumströmung zu bestimmen. Mess- und Simulationsdaten ermöglichen die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte.

2 Grundlagen

2.1 Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte dienen der Lüftung einzelner Räume. Sie sind in der VDI 6035 [2] bezüglich ihres Anwendungsbereichs, der Planungsgrundlagen und der Maßnahmen im Betrieb beschrieben.

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte saugen die Außenluft über die Fassade maschinell an und führen sie thermodynamisch aufbereitet dem Raum zu. Vorrangig erfolgt die Aufbereitung der Außenluft durch Heizen, Kühlen und Filtern. Be- und Entfeuchten ist mit einem erhöhten Investitions- und Instandhaltungsaufwand ebenfalls möglich. Die Geräte werden entsprechend ihrer Funktion in dezentrale Zuluftgeräte und in kombinierte dezentrale Zu- und Abluftgerät eingeteilt, wie Abbildung 2 und Abbildung 1 zeigen. Zur Erhöhung der Heiz- und Kühlleistung können einige dezentrale Geräte mit einem Sekundärluftanteil betrieben werden. Sie werden je nach Einbauort als Unterflur-, Brüstungs-, Decken- oder Wandgerät bezeichnet.

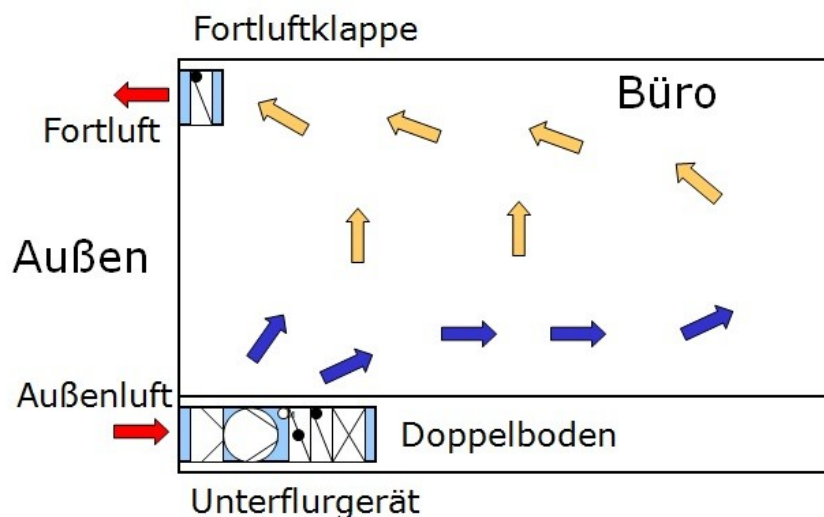


Abbildung 1 Dezentrales Zuluftgerät mit Ventilator und zentraler Abluft [2]

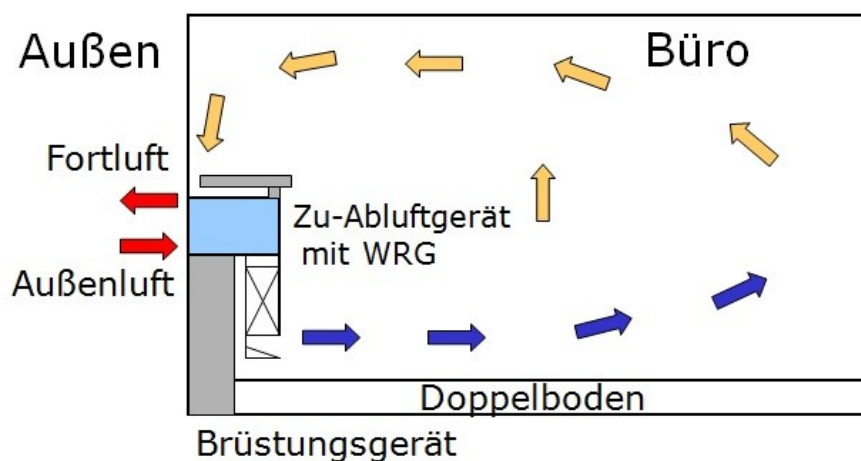


Abbildung 2 Dezentrales Zu- und Abluftgerät mit Wärmerückgewinnung und Sekundärluftanteil [2]

Die VDI 6035 rät bei Versammlungsräumen mit hohen Personenzahlen und Raumtiefen, sonstigen Räumen mit größeren innen liegenden Nutzbereichen sowie bei Räumen mit besonderer Nutzung (z.B. Operationsräume, Labore, Reinräume) von den dezentralen Fassadenlüftungsgeräten ab. Behaglichkeitsbeeinträchtigungen müssen in Aufenthaltsbereichen vermieden werden. Die VDI 6035 empfiehlt maximal 300 W/m Fassadenlänge über ein dezentrales Fassadenlüftungsgerät abzuführen und dass der Zuluftvolumenstrom 120 m³/(h m) Fassade nicht überschreitet. Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte stellen Volumenströme zwischen 30 m³/h und 500 m³/h nach aktueller Marktbetrachtung bereit.

Zur Abgrenzung von dezentralen Anlagen sind die zentralen Anlagen der VDI 3803 [3] zugeordnet. Ihre Komponenten sind über ein Kanalnetz verbunden und werden über das Zentralgerät mit aufbereiteter Zuluft (temperiert und befeuchtet) versorgt.

2.2 Einflüsse auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Anlagen

Zentrale Anlagen saugen Außenluft über Ansaugöffnungen auf dem Dach, über freistehende Ansaugtürme oder über Öffnungen in der Gebäudefassade an. Die Ansaugöffnungen von dezentralen Geräten sind ausschließlich in die Gebäudefassade integriert. Die Außenluft dezentraler Geräte wird stets aus den fassadennahen Luftschichten angesaugt (Kapitel 2.2.2), die sich durch freie und erzwungene Konvektion an der Fassadenoberfläche erwärmen.

Die Ausbildung der Fassadengrenzschicht, der Temperaturprofile innerhalb der Fassadengrenzschicht und der Ansaugströmungen vor den Ansaugöffnungen werden im Folgenden erläutert. Weitere Einflüsse auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden über die Voruntersuchungen im Kapitel 3 und die experimentellen Untersuchungen im Kapitel 4 ermittelt.

2.2.1 Ansaugströmung

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte saugen mit unterschiedlichen Volumenströmen die Luft aus der Umgebung an. Vor den Ansaugöffnungen bilden sich jeweils Geschwindigkeitsprofile aus. Ihre Ausdehnung bestimmt, ob innerhalb oder auch außerhalb der Fassadengrenzschicht angesaugt wird.

In Abbildung 3 ist die experimentell ermittelte Geschwindigkeitsverteilung w_z vor runder Ansaugöffnung mit Flansch [4] gezeigt. Sie ist nach einer Entfernung z , die dem Durchmesser d der Öffnung entspricht, bereits auf 10 % gesunken. Die Geschwindigkeitsverteilung w_z längs der Achse der Ansaugöffnung [4] kann nach D. Valle berechnet werden. Es gilt für alle runden und rechteckigen Öffnungen mit Flansch die empirische Gleichung (2-1). Zur Berechnung ist die Ansaugfläche A , die Geschwindigkeit in der Öffnung w und die Entfernung z von der Öffnung erforderlich.

$$\frac{w_z}{w} = 1,33 \cdot \frac{A}{10 \cdot z^2 + A} \quad (2-1)$$

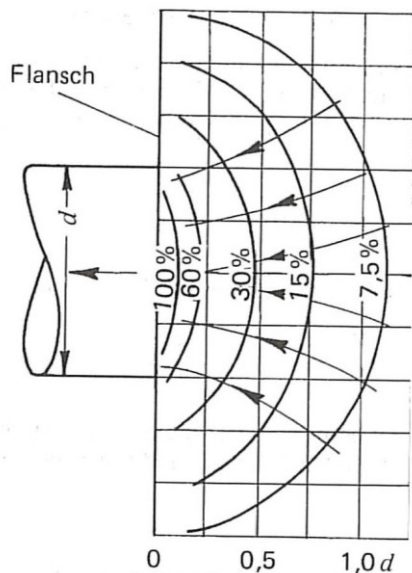


Abbildung 3 Geschwindigkeit w_z vor runder Öffnung mit Flansch. Angabe der Luftgeschwindigkeit w_z in % der Geschwindigkeit w in der Öffnung, [4]

Flansche verbessern die Saugwirkung. Bei gleichem Ansaugvolumenstrom erhöhen sich die Geschwindigkeiten vor der Ansaugöffnung gegenüber den Öffnungen mit scharfen Kanten. D. Valle nennt eine 1,33fache Geschwindigkeitserhöhung durch Flansche. Die Ansaugöffnungen sind in die Fassadenfläche integriert. Der Flansch wird daher als unendlich groß betrachtet. F. Drkal [5] hat die Strömungsverhältnisse bei runden Saugöffnungen mit Flansch theoretisch gelöst und die Gleichung (2-2) für unendlich große Flansche aufgestellt.

$$\frac{w_z}{w} = 1 - \frac{z/d}{\sqrt{(z/d)^2 + 0,25}} \quad (2-2)$$

Zur Berechnung dient der Durchmesser d der runden Öffnung und die Entfernung z von der Öffnung. Mit dem gleichwertigen Durchmesser d_R ist eine Übertragung der Gleichung (2-2) auf rechteckige Öffnungen denkbar. Er ergibt sich aus der Gleichung (2-3) und entspricht dem Durchmesser einer Kreisöffnung mit gleichem Querschnitt A .

$$d_R = d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} \quad (2-3)$$

2.2.2 Temperaturprofile innerhalb der Fassadengrenzschicht

Die Ansaugöffnungen von dezentralen Geräten befinden sich in der Fassade, die durch auftreffende kurz- und langwellige Strahlung (Kapitel 2.4) erwärmt wird. Die aufgeheizten Fassadenflächen geben die Wärme konvektiv an die fassadennahen Luftschichten ab und erwärmen sie auf Temperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur. Von der Fassadenfläche in die angrenzenden Luftschichten bilden sich Temperaturprofile aus.

Die Aufheizung von Fassadenoberflächen und die Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht werden durch die vorliegende Arbeit und andere Forschungsarbeiten bestätigt. Untersuchungen von U. Finke [6] ergeben im August Fassadenoberflächentemperaturen bis zu 50 °C. Hohe Fassadenoberflächen- und Lufttemperaturen vor der Fassade werden ebenfalls in einem von der FLT geförderten Projekt [7] an drei verschiedenen Hochhäusern gemessen. Es zeigt sich, dass eine wesentliche Temperaturerhöhung der Luft gegenüber der Außenlufttemperatur bis zu einem Abstand von 20 cm normal zur Fassade messbar ist. In einem Abstand von 0,5 cm zur Fassadenfläche werden im August Temperaturen gemessen, die um 12 K höhere Werte als die Außenlufttemperatur aufweisen.

Die Abbildung 4 zeigt vor der Fassade des Berg-und Hüttenwesens (BH-Gebäude) der Technischen Universität Berlin einen Temperaturverlauf [7]. Innerhalb des ersten Zentimeters vor der Fassade erfolgt ein großer Temperaturabbau. Danach wird der Temperaturgradient kleiner und der Temperaturabbau sinkt. Ab zehn Zentimeter beginnt die Annäherung an die Umgebungstemperatur, die ab dreißig Zentimeter abgeschlossen ist. In dieser Arbeit wird vor einer glatten Fassade (Kapitel 4.4) die Temperaturverteilung in der fassadennahen Grenzschicht gemessen. Die Auswertung erfolgt in Kapitel 4.7. Die Messungen dienen im Kapitel 7.6 der Validierung der Simulationsrechnungen.

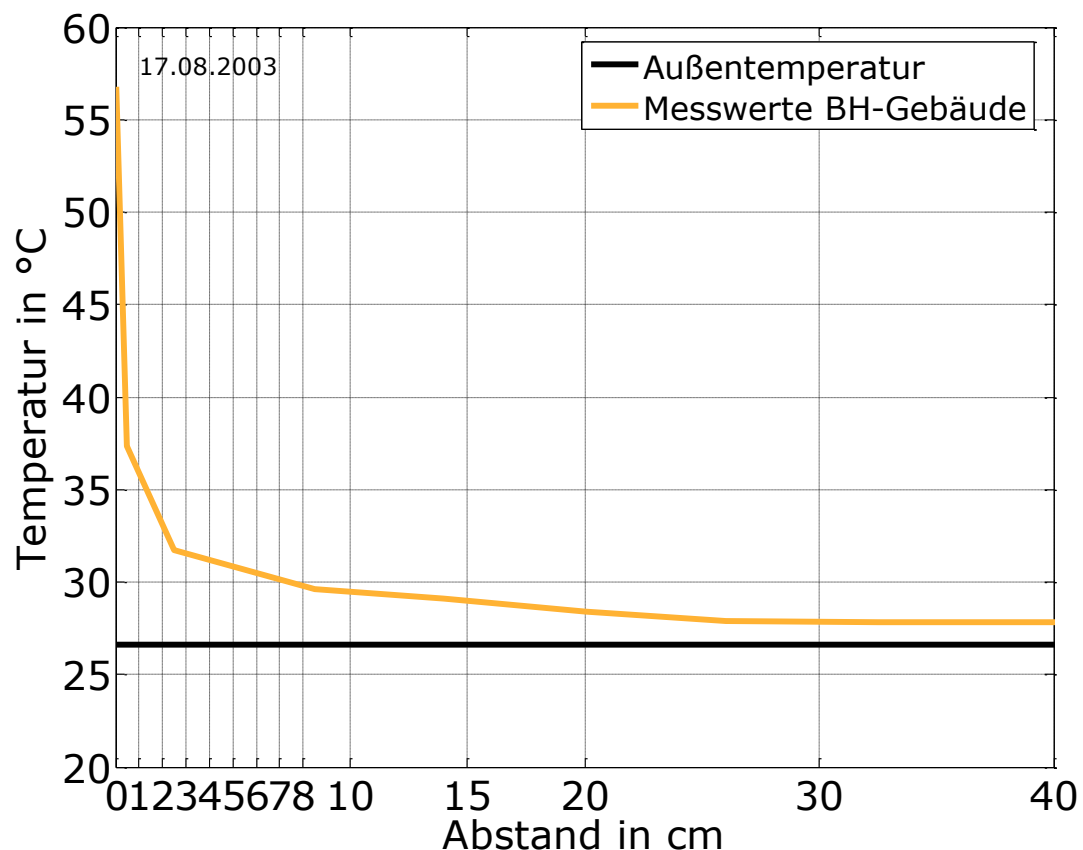


Abbildung 4 Temperaturverlauf vor einer glatten Fassade am 17.08.2003, [7]

In Abbildung 5 ist ein stationärer Temperaturverlauf vor einer beheizten Wand ohne Windeinfluss dargestellt [8]. Die Temperaturänderungen treten nur in einer wandnahen Grenzschicht mit der Dicke δ_T auf. Es bildet sich eine anwachsende Grenzschicht über der Höhe aus. Ihre Grenze verläuft da, wo die fassadennahe Lufttemperatur vernachlässigbar um 1 % von der Außenlufttemperatur abweicht.

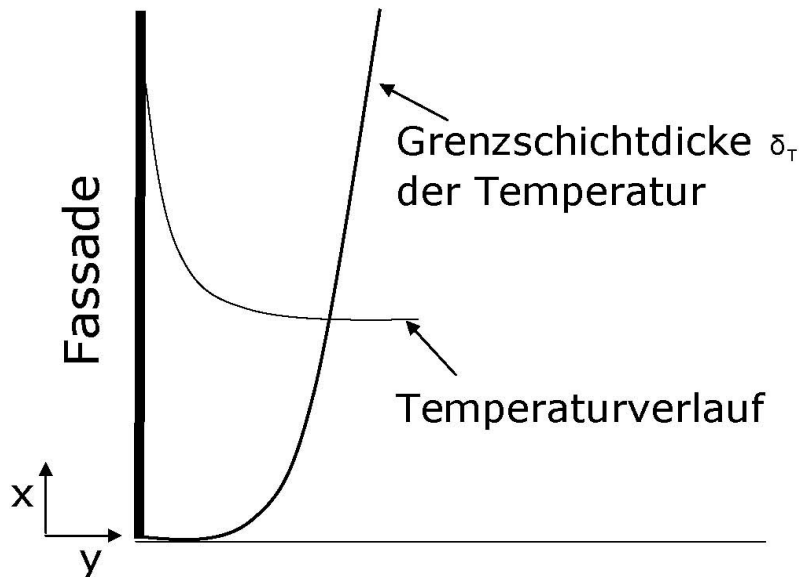


Abbildung 5 Temperaturprofil bei freier Strömung an einer beheizten Wand, [8]

Für das Temperaturprofil innerhalb der laminaren Auftriebsströmung liegt eine Lösung zur Berechnung vor. Als Ausgangsgleichung wird eine Differentialgleichung, die so genannte Energiegleichung [8], aufgestellt.

$$w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \quad (2-4)$$

Die Energiegleichung wird von E. Pohlhausen [9] durch Reihenentwicklung für die Prandtl-Zahl $Pr = 0.72$ von Luft gelöst. Die Ergebnisse für Luft sind in Abbildung 6 dargestellt. Die dimensionslose Temperatur ϑ^+ ist über dem dimensionslosen Abstand η^+ aufgetragen. Die dimensionslose Temperatur berechnet sich mit Hilfe der Fassadentemperatur T_{Fa} , der Außenlufttemperatur T_{Al} und der Temperatur T_z in der Grenzschicht im Abstand z zur Fassade.

$$\vartheta^+ = \frac{T_z - T_{Al}}{T_{Fa} - T_{Al}} \quad (2-5)$$

Der dimensionslose Abstand η^+ wird für die betrachtete Höhe H mit Hilfe des Abstandes z zur Fassade und der Grashofzahl Gr berechnet. Die Grashofzahl Gr ist in der Gleichung (2-64) definiert.

$$\eta^+ = \frac{z}{H} \cdot \left(\frac{Gr}{4}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2-6)$$

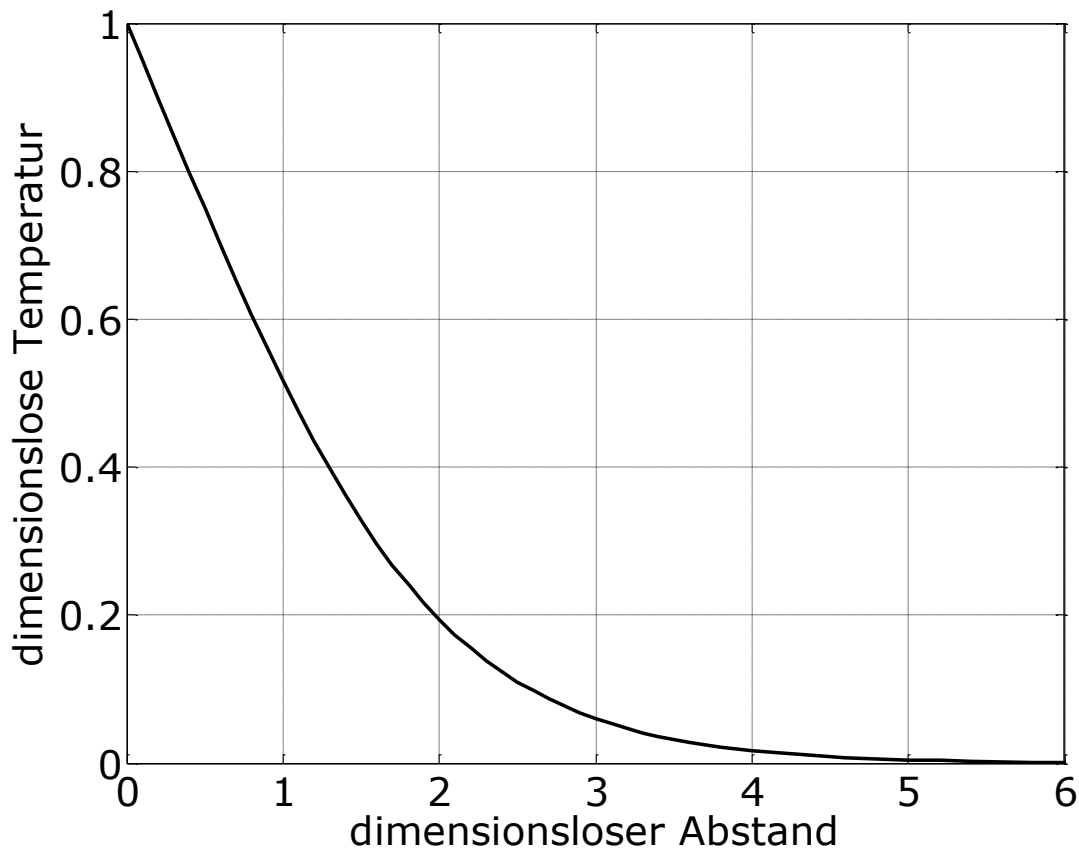


Abbildung 6 Temperaturprofil in der laminaren Grenzschicht, [8]

In Kapitel 4.9 wird die Temperaturverteilung in der laminaren Grenzschicht der Auftriebsströmung nach E. Pohlhausen [9] mit der vor einer glatten Gebäudefassade gemessenen (Kapitel 4.4) verglichen.

2.2.3 Ausbildung von Grenzschichten

Die Erwärmung der fassadennahen Luft bewirkt eine durch Dichteunterschiede hervorgerufene Auftriebsströmung, die als freie Strömung bezeichnet wird. Innerhalb der Auftriebsströmung bilden sich drei unterschiedliche Strömungsbereiche aus, die in der Dissertation von B. Kriegel [10] für Fallströmungen beschrieben werden und in Abbildung 7 dargestellt sind. Im ersten Bereich strömt die Luft laminar in einer dünnen Schicht, deren Dicke mit der Lauflänge nur gering zunimmt. Im folgenden Übergangsbereich (2) entstehen am Rand der Strömung unregelmäßige Schwankungsbewegungen. Dadurch erfolgt der Wechsel von der laminaren (1) zur turbulenten (3) Strömungsform. Im dritten Bereich strömt die Luft turbulent, wodurch es zu einem Impulsaustausch in Querrichtung kommt. Die Schichtdicke wächst an.

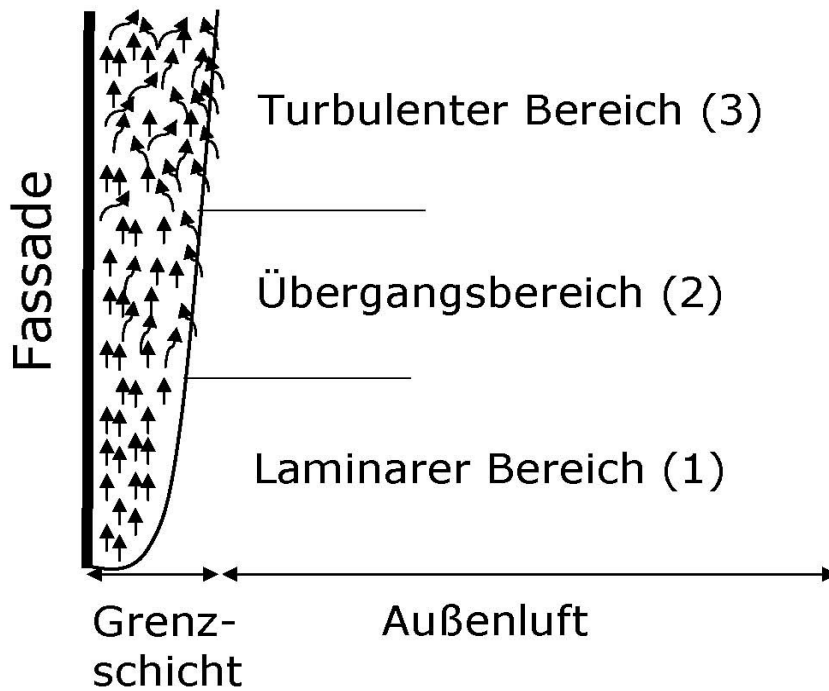


Abbildung 7 Strömungsbereiche der Auftriebsströmung vor einer heißen Wand

Die Auftriebsströmung kann sich ungestört nur an windstillen Tagen ausbilden. An umströmten Fassaden wird die freie Auftriebsströmung von einer durch Wind verursachten erzwungenen Strömung überlagert. Die vorhandene Strömung vor der Fassadenfläche beeinflusst das sich ausbildende Temperaturprofil und die entstehende Grenzschichtdicke. Die Kopplung der freien mit der erzwungenen Strömung ergibt eine Grenzschichtdicke δ_{EF} , die kleiner als die Grenzschichtdicke δ_F bei ausschließlich freier Strömung ist. Eine gute Erklärung für die Ausbildung unterschiedlicher Grenzschichtdicken liefert die Betrachtung der Wärmeübergangskoeffizienten. Nach Wattmuff, zitiert von J. A Duffie und W. A Beckmann [11], setzt sich der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{EF (Wattmuff)}$ aus einem konstanten Anteil für die freie Konvektion und einem variablen Anteil für die erzwungene Konvektion zusammen.

$$\alpha_{EF (Wattmuff)} = \underbrace{2,8 \frac{W}{m^2 K}}_{\text{freie Konvektion}} + \underbrace{3 \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w}_{\text{erzwungene Konvektion}} \quad (2-7)$$

Bei Windstille (Geschwindigkeit $w=0$) überwiegt an der Fassadenfläche die freie Konvektion. Nach Wattmuff nimmt der Wärmeübergangskoeffizient den Wert $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ an. Bei erzwungener Konvektion an der Fassadenfläche spielt die Geschwindigkeit eine Rolle. Vernachlässigt man bei hohen Geschwindigkeiten die freie Konvektion, nimmt der Wärmeübergangskoeffizient nach Wattmuff den dreifachen Wert der Geschwindigkeit an. Für Windgeschwindigkeiten w größer $0,93 \text{ m/s}$ können die Wärmeübergangskoeffizienten bei freier Konvektion α_F , bei erzwungener Konvektion

α_E und bei Kopplung von freier und erzwungener Konvektion α_{EF} in folgende Beziehung gesetzt werden.

$$\alpha_{EF} > \alpha_E > \alpha_F = 2,8 + 3 \cdot w > 3 \cdot w > 2,8 \quad (2-8)$$

Zur Betrachtung des Temperaturverlaufs innerhalb der fassadennahen Grenzschicht wird der konvektive Wärmestrom mit dem Wärmestrom durch Wärmeleitung gleichgesetzt [8]. Der konvektive Wärmestrom ist das Produkt aus Wärmeübergangskoeffizient α und Temperaturdifferenz ($T_{Fa} - T_{Al}$). Der Wärmestrom durch Wärmeleitung ist das Produkt aus Wärmeleitfähigkeit λ_{Luft} und Temperaturgradient $\frac{dT}{dy}$.

$$-\lambda_{Luft} \frac{dT}{dy} = \alpha \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) \quad (2-9)$$

In Abbildung 8 sind zwei Temperaturverläufe bei gleicher Temperatur der Fassade T_{Fa} und der Außenluft T_{Al} dargestellt. Der Temperaturverlauf 1 verläuft flacher als der Temperaturverlauf 2. Für die rot eingezeichneten Temperaturgradienten gilt daher $\frac{dT}{y_1} < \frac{dT}{y_2}$. Der Temperaturverlauf 1 weist eine größere Grenzschichtdicke auf als der Temperaturverlauf 2. Es gilt $\delta_{T1} > \delta_{T2}$.

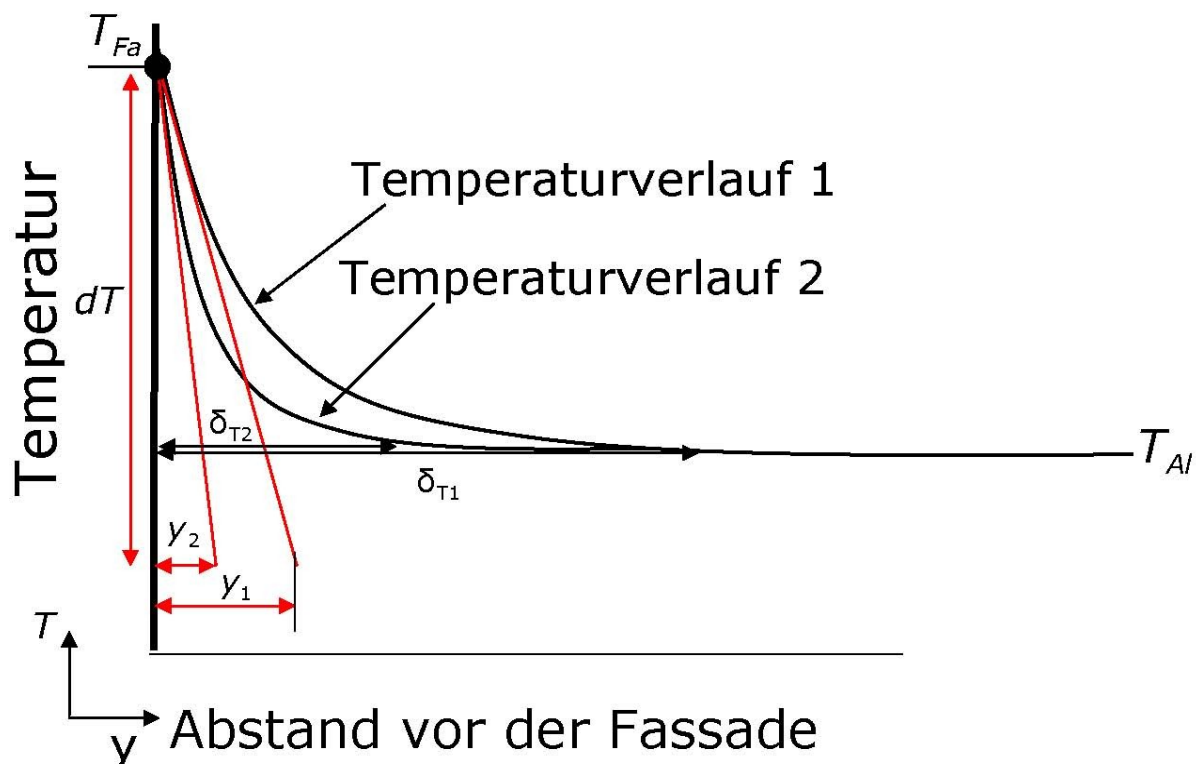


Abbildung 8 Gradienten und Grenzschichtdicken bei Temperaturverläufen

Die Grenzschichtdicke ist mit dem Temperaturgradient verknüpft. Bei kleinen Grenzschichtdicken ist der Temperaturgradient groß und bei großen Grenzschichtdicken ist der Temperaturgradient klein. Demzufolge muss nach Gleichung (2-9) der Wärmeübergangskoeffizient α bei kleinen Grenzschichtdicken groß und bei großen Grenzschichtdicken klein sein. Aus der Gleichung (2-8) kann daher über die Wärmeübergangskoeffizienten für die Grenzschichtdicken bei freier Konvektion δ_F , bei erzwungener Konvektion δ_E und bei Kopplung von freier und erzwungener Konvektion δ_{EF} folgende Aussage getroffen werden. Die Randbedingung ist, dass die Windgeschwindigkeit w größer 0,93 m/s ist.

$$\alpha_{EF} > \alpha_E > \alpha_F \Rightarrow \delta_{EF} < \delta_E < \delta_F \quad (2-10)$$

Die Grenzschichtdicke im turbulenten Bereich der Auftriebsströmung (Abbildung 7) wird im Folgenden abgeschätzt. Die Hauptrichtung der turbulenten Strömungsform der Auftriebsströmung wird von einer unregelmäßigen Schwankungsbewegung überlagert. Es ist daher bisher nicht gelungen, die turbulente Strömung theoretisch zu berechnen. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen werden theoretische Ansätze hergeleitet. Experimentelle Untersuchungen der laminaren und turbulenten Grenzschicht an einer vertikalen, isotherm erwärmten Platte in Luft stammen von E. Griffiths und A.H. Davis [12]. Die Messungen erfolgen mit einem Platindraht, der als Widerstandsthermometer verwendet wird. E.R.G. Eckert und T.W. Jackson [13] analysieren diese Messergebnisse und stellen eine Gleichung zur Berechnung der turbulenten Grenzschichtdicke δ_{tub} des Geschwindigkeitsprofils auf. Die Grenzschichtdicke δ_{tub} berechnet sich aus der Höhe H und der Grashofzahl Gr (Gleichung 2-64). Die Gleichung ist für Luft mit $Pr=0,72$ aufgeführt.

$$\delta_{tub} = 0,699 \cdot H \cdot Gr^{-\frac{1}{10}} \quad (2-11)$$

B. Kriegel [10] fasst in seiner Dissertation die gerade erwähnten experimentellen Untersuchungen und den daraus abgeleiteten theoretischen Ansatz zur turbulenten Grenzschichtdicke vor erwärmten Platten zusammen und führt an, dass der theoretische Ansatz von E.R.G. Eckert und T.W. Jackson die Messergebnisse der experimentellen Untersuchungen nur unzureichend wiedergibt. B. Kriegel beschäftigt sich mit vor kalten Flächen entstehenden Fallströmungen. Seine Recherchen zu den theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu Fallströmungen an senkrechten, kalten Flächen kommen zu dem Ergebnis, dass andere Wissenschaftler die theoretische Lösung von E.R.G. Eckert und T.W. Jackson übernehmen, um Lufttemperaturen der Fallströmungen zu berechnen. Jedoch auch beim Kaltluftabfall ergeben die durchgeführten Messungen keine Übereinstimmung mit den theoretischen Lösungen von E.R.G. Eckert und T.W. Jackson. B. Kriegel kommt zu dem Schluss, dass die bisherigen Betrachtungen ungenau sind und führt daher eigene theoretische und experimentelle Un-

tersuchungen zu Fallströmungen an senkrechten, kalten Flächen durch. B. Kriegel [10] ermittelt für die turbulente Grenzschichtdicke δ_{tub} des Geschwindigkeitsprofils die folgende Gleichung für Luft mit $Pr=0,72$. Es wird die Höhe H und die Grashofzahl Gr (Gleichung 2-64) berücksichtigt.

$$\delta_{tub} = 1,5 \cdot H \cdot Gr^{-\frac{1}{10}} \quad (2-12)$$

Ansätze zur Berechnung turbulenter Grenzschichtdicken sind für Geschwindigkeitsprofile im turbulenten Bereich der freien Auftriebsströmung aufgestellt. Ansätze für Grenzschichtdicken der Temperaturprofile bisher nicht. Es wird angenommen, dass die Temperaturgrenzschichtdicken eine Abhängigkeit zur Grashofzahl aufweisen [10]. Unter der Annahme, dass die Grenzschichtdicken der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile ähnlich sind, werden in der Auswertung (Kapitel 4.9) die turbulenten Grenzschichtdicken der Geschwindigkeit mit den Grenzschichtdicken der gemessenen fassadennahen Temperaturverläufe (Kapitel 4.4) verglichen.

2.3 Regressionsanalyse zur Berechnung der Ansaugtemperatur

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Berechnungsmodell für die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte aufzustellen. In Kapitel 4.11 wird daher ein Berechnungsansatz für die Übertemperatur der Ansaugung (Differenz der Ansaug- und Außenlufttemperatur) ermittelt. Dieser Ansatz beinhaltet unbekannte Koeffizienten, die in Kapitel 5 mit einer Regressionsanalyse bestimmt werden.

Die Regressionsanalyse ermöglicht eine Vorhersage der Koeffizienten für einen vorher festgelegten Zusammenhang zwischen einer Zielgröße und einer oder mehrerer Einflussgrößen. Im einfachsten Fall wird dieser Zusammenhang durch eine lineare Funktion beschrieben. Bei mehreren Einflussgrößen spricht man von einer mehrfach linearen Regressionsanalyse. Die einfache lineare Regressionsanalyse bildet eine Einflussgröße x linear auf die Zielgröße $\ddot{y}$ ab [14].

$$\ddot{y} = x \cdot a_1 + a_0 \quad (2-13)$$

Der Zusammenhang zwischen den Variablen x und den tatsächlichen Werten y wird durch eine Punktwolke in einem Diagramm veranschaulicht (Abbildung 9). Die ermittelte Regressionsgerade entspricht dem Trend der Punkte im Streudiagramm am besten. Trotzdem werden nicht alle Punkte genau auf der Geraden liegen. Der Schätzfehler e_i wird als Differenz zwischen dem tatsächlichen y -Wert und dem vorhergesagten $\ddot{y}$ -Wert definiert. Der Verlauf der Regressionsgeraden wird so ermittelt, dass die Summe aller Schätzfehler e_i null ergibt [15].

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - \ddot{y}_i) \quad (2-14)$$

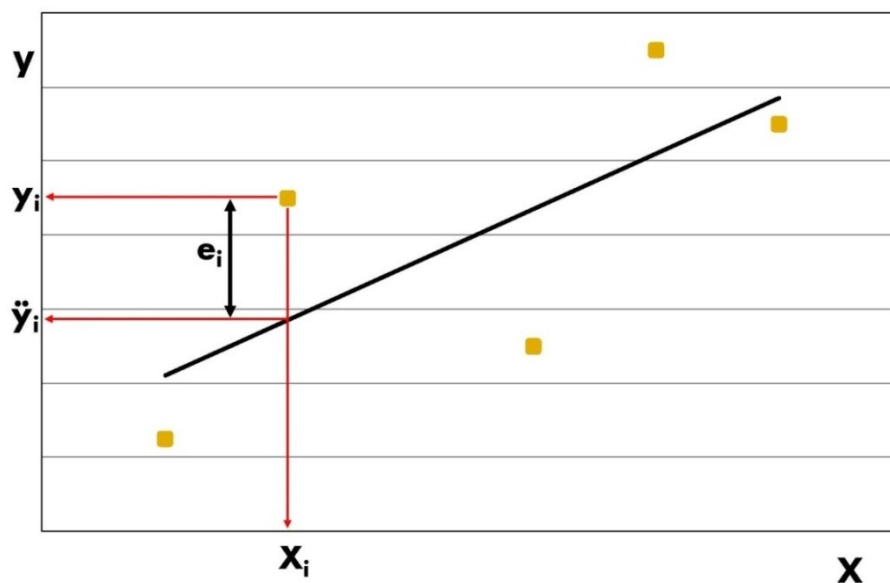


Abbildung 9 Regressionsgerade, [14]

Der Regressionskoeffizient a_1 der Geradengleichung wird so berechnet, dass die Summe der quadrierten Abweichung der abgeschätzten $\hat{y}$ -Werte zu den tatsächlichen y -Werten minimal ist. Die Abschätzung erfolgt mit der Methode der kleinsten Quadrate [15].

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \quad (2-15)$$

Zur Ermittlung des Regressionskoeffizients a_1 wird die Summe der gemischten Abweichungsprodukte S_{xy} und die Summe der quadrierten Abweichungen der Einflussgrößenwerte S_x^2 berechnet [15].

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (2-16)$$

$$S_x^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (2-17)$$

Der Regressionskoeffizient a_1 ist der Quotienten der gemischten Abweichungsprodukte S_{xy} und der quadrierten Abweichungen der Einflussgrößenwerte S_x^2 [15].

$$a_1 = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (2-18)$$

Das Absolutglied a_0 wird wie folgt berechnet [15].

$$a_0 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n y_i - a_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right] \quad (2-19)$$

Die Regressionsanalyse erfolgt im Kapitel 5 mit der Software Matlab des Unternehmens The MathWorks. Der Name Matlab leitet sich von *MATrixLABoratory* ab, da die Berechnungen auf Basis von Matrizen ausgelegt sind. In einem eigens geschriebenen Programm werden alle gemessenen Ziel- und Einflussgrößen eingelesen und die Regressionskoeffizienten bestimmt.

2.4 Bestimmung der Nettostrahlung auf die Fassadenfläche

Zur Bestimmung der Fassadenoberflächentemperatur in Kapitel 6.2 werden die Strahlungseinflüsse auf die vertikale Fassadenoberfläche [16] betrachtet und in Abbildung 10 dargestellt.

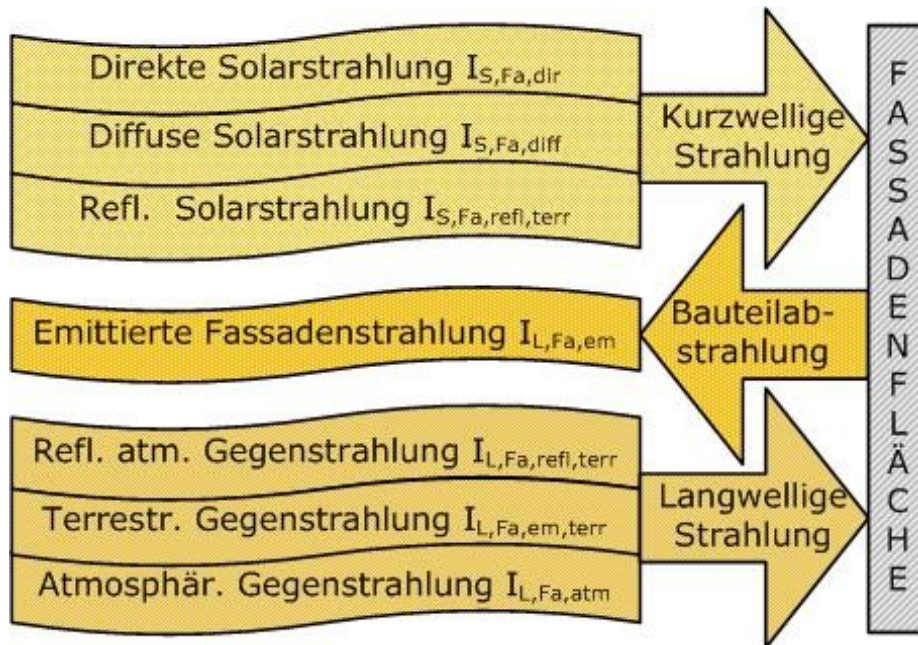


Abbildung 10 Strahlungsverhältnisse an einer vertikalen Fassadenfläche

Die auf die vertikale Fassadenfläche auftreffende kurz- und langwellige Strahlung besteht aus mehreren Strahlungsgrößen [17]. Der Term I_S summiert die auftreffenden kurzwelligen Strahlungsanteile.

$$I_S = I_{S,Fa,dir} + I_{S,Fa,diff} + I_{S,Fa,refl,terr} \quad (2-20)$$

Der Term I_L summiert die auftreffenden langwelligen Strahlungsanteile.

$$I_L = I_{L,Fa,atm} + I_{L,Fa,em,terr} + I_{L,Fa,refl,terr} \quad (2-21)$$

Die Fassadenfläche absorbiert und reflektiert anteilig die kurzwellige und emittiert die langwellige Strahlung. Die Bauteilabstrahlung $I_{L,Fa,em}$ und die kurz- und langwellige Strahlung werden zu einer Nettostrahlung I [16] an der Fassadenoberfläche zusammengefasst, indem die kurzwelligen Strahlungsanteile I_S mit dem Absorptionsgrad $a_{S,Fa}$ und die langwelligen Strahlungsanteile I_L mit dem Emissionsgrad $\epsilon_{L,Fa}$ multipliziert werden.

Ein positiver Wert der Nettostrahlung I bewirkt eine Erwärmung der Bauteiloberfläche ein negativer Wert eine Abkühlung.

$$I = a_{S,Fa} \cdot I_S + \epsilon_{L,Fa} \cdot I_L - I_{L,Fa,em} \quad (2-22)$$

Die berechnete Nettostrahlung dient im Kapitel 6.2 zur Ermittlung der Fassadenoberflächentemperatur.

2.4.1 Berechnung der Gesichtsfeldfaktoren

Die Strahlungswerte auf horizontale Flächen sind aus Wetterdaten bekannt oder können berechnet werden. Die Strahlungswerte, die auf eine beliebige, um den Winkel β geneigte Fläche treffen, werden mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren, so genannten Gesichtsfeldfaktoren, aus den Strahlungswerten der horizontalen Flächen ermittelt. Die Gesichtsfeldfaktoren werden mit Hilfe der VDI 3789 [17] wie folgt definiert und berechnet.

Der direkte Gesichtsfeldfaktor g_{dir} beschreibt das Verhältnis zwischen der Direktstrahlung auf eine beliebige Fläche $I_{\text{S,Fa,dir}}$ zur Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche $I_{\text{S,dir}}$ [17]. Er ist durch den Strahlungseinfallswinkel θ und den Zenitwinkel θ_z bestimmt. Diese Winkel werden im Kapitel 2.4.4 berechnet und erläutert.

$$I_{\text{S,Fa,dir}} = g_{\text{dir}} \cdot I_{\text{S,dir}} \quad (2-23)$$

$$g_{\text{dir}} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (2-24)$$

Der atmosphärische Gesichtsfeldfaktor g_{atm} beschreibt sowohl das Verhältnis zwischen der atmosphärischen Gegenstrahlung auf eine beliebige Fläche $I_{\text{L,Fa,atm}}$ zur atmosphärischen Gegenstrahlung auf eine horizontale Fläche $I_{\text{L,atm}}$ als auch das Verhältnis der Diffusstrahlung auf eine beliebige Fläche $I_{\text{S,Fa,diff}}$ zur Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche $I_{\text{S,diff}}$. Er wird in Abhängigkeit der Neigung β der bestrahlten Fläche wie folgt berechnet [16], [17]. Für eine vertikale Fassadenfläche beträgt der Neigungswinkel $\beta = 90^\circ$.

$$I_{\text{L,Fa,atm}} = g_{\text{atm}} \cdot I_{\text{L,atm}} \quad (2-25)$$

$$I_{\text{S,Fa,diff}} = g_{\text{atm}} \cdot I_{\text{S,diff}} \quad (2-26)$$

$$g_{\text{atm}} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) = 0,5 \cdot (1 + \cos(\beta)) \quad (2-27)$$

Der terrestrische Gesichtsfeldfaktor g_{terr} ist das Verhältnis aus der reflektierten Solarstrahlung $I_{\text{S,Fa,ref,terr}}$, der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung $I_{\text{L,Fa,ref,terr}}$ oder der terrestrischen Gegenstrahlung $I_{\text{L,Fa,em,terr}}$ auf eine beliebige Fläche zu der reflektierten Solarstrahlung $I_{\text{S,refl,terr}}$, der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung $I_{\text{L,refl,terr}}$ oder der terrestrischen Gegenstrahlung $I_{\text{L,em,terr}}$ auf eine horizontale Fläche. Er ist mit dem atmosphärischen Gesichtsfeldfaktor g_{atm} wie folgt verknüpft [16], [17].

$$I_{\text{S,Fa,refl,terr}} = g_{\text{terr}} \cdot I_{\text{S,refl,terr}} \quad (2-28)$$

$$I_{L,Fa,refl,terr} = g_{terr} \cdot I_{L,refl,terr} \quad (2-29)$$

$$I_{L,Fa,em,terr} = g_{terr} \cdot I_{L,em,terr} \quad (2-30)$$

$$g_{terr} = 1 - g_{atm} = 1 - \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) = 0,5 \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (2-31)$$

2.4.2 Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlungsanteile

Zur Berechnung der Nettostrahlung, siehe Gleichung (2-22), muss die auf die Fassade auftreffende kurz- und langwellige Strahlung ermittelt werden. Mit Hilfe der Gesichtsfeldfaktoren aus Kapitel 2.4.1 können aus der Gleichung (2-20) für die kurzwellige Strahlung I_S und aus der Gleichung (2-21) für die langwellige Strahlung I_L folgende Gleichungen aufgestellt werden.

$$I_S = g_{dir} \cdot I_{S,dir} + g_{atm} \cdot I_{S,diff} + g_{terr} \cdot I_{S,refl,terr} \quad (2-32)$$

$$I_L = g_{atm} \cdot I_{L,atm} + g_{terr} \cdot (I_{L,em,terr} + I_{L,refl,terr}) \quad (2-33)$$

Die Gleichungen enthalten jeweils drei unterschiedliche Strahlungsanteile. Aus Klimadateien z.B. des Deutschen Wetterdienstes [18] sind nur die diffuse Solarstrahlung $I_{S,diff}$, die direkte Solarstrahlung $I_{S,dir}$ und die atmosphärische Gegenstrahlung $I_{L,atm}$ bekannt. Die anderen Strahlungsanteile lassen sich auf diese drei Größen zurückführen.

Die Direktstrahlung $I_{S,dir}$ ist die Differenz der Globalstrahlung $I_{S,Glob}$ und der Diffusstrahlung $I_{S,diff}$ [17].

$$I_{S,dir} = I_{S,Glob} - I_{S,diff} \quad (2-34)$$

Die Berechnung der reflektierten Solarstrahlung $I_{S,refl,terr}$ erfolgt über Multiplikation der horizontalen Globalstrahlung mit dem kurzwelligen Reflexionsgrad $\rho_{S,terr}$ [17].

$$I_{S,refl,terr} = \rho_{S,terr} \cdot (I_{S,dir} + I_{S,diff}) \quad (2-35)$$

Die langwellige vom Boden und Bauteilen reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung $I_{L,refl,terr}$ [17] berechnet sich über die atmosphärische Gegenstrahlung $I_{L,atm}$ und den langwelligen Reflexionsgrad des Erdbodens $\rho_{L,terr}$.

$$I_{L,refl,terr} = \rho_{L,terr} \cdot I_{L,atm} \quad (2-36)$$

Die von der Erdoberfläche emittierte langwellige terrestrische Gegenstrahlung $I_{L,em,terr}$ wird über das Stefan-Boltzmann-Gesetz [17] berechnet. Der langwellige Emissionsgrad der Erdoberfläche $\varepsilon_{L,terr}$, die Strahlungskon-

stante σ und die Temperatur des Erdbodens T_{terr} sind dabei wie folgt verknüpft.

$$I_{L,\text{em},\text{terr}} = \varepsilon_{L,\text{terr}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{terr}}^4 \quad (2-37)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung $I_{L,\text{atm}}$ ist die emittierte Wärmestrahlung der Atmosphäre. Sie ist aus Klimadateien bekannt oder kann mit Hilfe der Außenlufttemperatur T_{Al} und dem Bedeckungsgrad N berechnet werden. Dieser Berechnungsansatz wird aufgeführt, da in dieser Arbeit die Außenlufttemperatur von einer Wetterstation (Kapitel 4.6) gemessen wird. Bei einem teilweise bewölkten Himmel setzt sich die atmosphärische Gegenstrahlung $I_{L,\text{atm}}$ anteilig aus den Beiträgen der Wolkenunterseiten $I_{L,\text{atm},\text{bw}}$ und der klaren Himmelsflächen $I_{L,\text{atm},\text{k}}$ zusammen [19].

$$I_{L,\text{atm}} = N \cdot I_{L,\text{atm},\text{bw}} + (1 - N) \cdot I_{L,\text{atm},\text{k}} \quad (2-38)$$

Der Bedeckungsgrad N wird mit der folgenden Gleichung berechnet [20].

$$N = \begin{cases} (9,5 \cdot \frac{I_{S,\text{diff}}}{I_{S,\text{Glob}}} - 0,3)^{0,5} & : \text{falls } I_{S,\text{Glob}} > 0 \\ 0 & : \text{falls } I_{S,\text{Glob}} = 0 \end{cases} \quad (2-39)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung bei wolkenlosem Himmel $I_{L,\text{atm},\text{k}}$ berechnet sich mit Hilfe der Außenlufttemperatur T_{Al} , der Strahlungskonstante σ und dem Emissionsgrad der wolkenlosen Atmosphäre $\varepsilon_{L,\text{k}}$ [17].

$$I_{L,\text{atm},\text{k}} = \sigma \cdot T_{\text{Al}}^6 \cdot \varepsilon_{L,\text{k}} \quad (2-40)$$

Bei vollständig bewölktem Himmel und niedrig liegenden Wolken entspricht die Temperatur der Wolkenunterseite (Kondensationsniveau) in guter Näherung der Taupunkttemperatur. Die atmosphärische Gegenstrahlung bei bewölktem Himmel $I_{L,\text{atm},\text{bw}}$ [19] lässt sich mit der Strahlungskonstante σ und der Taupunkttemperatur $T_{\text{tp},\text{Al}}$ ermitteln.

$$I_{L,\text{atm},\text{bw}} = \sigma \cdot T_{\text{tp},\text{Al}}^4 \quad (2-41)$$

Bei der Taupunkttemperatur $T_{\text{tp},\text{Al}}$ entspricht der Wasserdampfpartialdruck e dem Sättigungsdampfdruck E . Der Sättigungsdampfdruck E wird über die von H. G. Magnus 1844 abgeleitete Magnus-Gleichung [21] berechnet. Der Sättigungsdampfdruck $E(0)$ bei 0 °C entspricht 611 Pa.

$$E(T_{\text{tp},\text{Al}}) = 611 \text{ Pa} \cdot \exp\left(\frac{17,5 \cdot (T_{\text{tp},\text{Al}} - 273,15\text{K})}{241 + (T_{\text{tp},\text{Al}} - 273,15\text{K})}\right) \quad (2-42)$$

Der Wasserdampfpartialdruck e berechnet sich über die Gaskonstante für Wasserdampf R_{WD} , die Außenlufttemperatur T_{AI} und die Dichte für Wasserdampf $\rho_{I,WD}$ [4].

$$e = R_{WD} \cdot T_{AI} \cdot \rho_{I,WD} \quad (2-43)$$

Die Gleichung (2-42) wird mit der Gleichung (2-43) gleichgesetzt und nach dem Taupunkt aufgelöst.

$$T_{tp,AI} = \frac{13,7 \cdot \ln\left(\frac{e}{E(0)}\right)}{1 - 0,058 \cdot \ln\left(\frac{e}{E(0)}\right)} \quad (2-44)$$

2.4.3 Langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche

Zur Ermittlung der Nettostrahlung nach Gleichung (2-22) wird die langwellige Emissionsstrahlung der Bauteiloberfläche $I_{L,Fa,em}$ nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz [4] berechnet. Die Strahlungskonstante σ , der langwellige Emissionsgrad der Fassadenoberfläche $\varepsilon_{L,Fa}$ und die Temperatur der Fassadenoberfläche T_{Fa} sind wie folgt verknüpft.

$$I_{L,Fa,em} = \varepsilon_{L,Fa} \cdot \sigma \cdot T_{Fa}^4 \quad (2-45)$$

2.4.4 Berechnung von Zenitwinkel und Strahlungseinfallswinkel

Die Berechnung des direkten Gesichtsfeldfaktors, siehe Gleichung (2-24), erfordert die Kenntnis von Zenitwinkel θ_z und Strahlungseinfallswinkel θ . Wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, wird mit dem direkten Gesichtsfeldfaktor die auf die Fassade auftreffende kurzwellige Direktstrahlung $I_{S,Fa,dir}$ bestimmt, um in Kapitel 2.4 die Nettostrahlung zu berechnen.

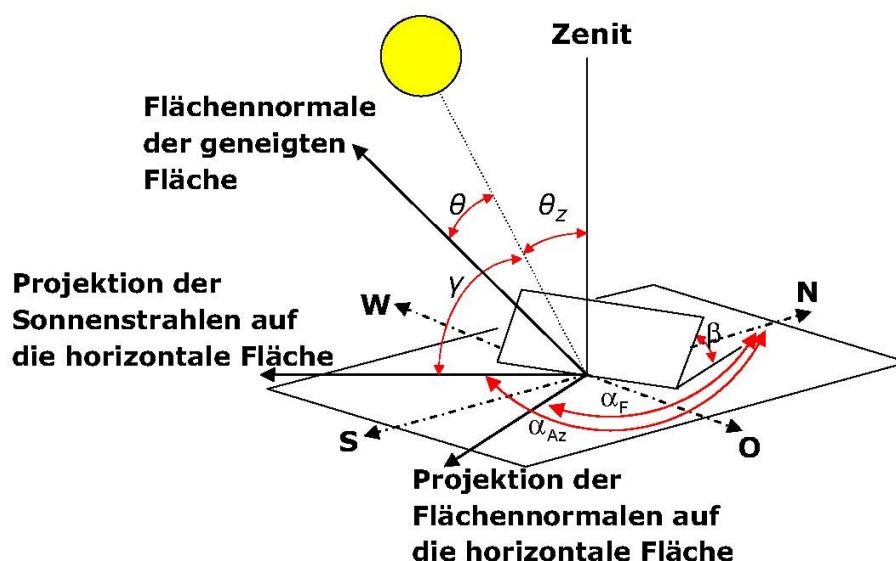


Abbildung 11 Winkel zur Beschreibung des Sonnenstandes, [22]

Die Intensität der Sonneneinstrahlung wird von der Fassadenausrichtung und vom jahreszeitlich abhängigen Sonnenstand bestimmt. Abbildung 11 führt die Winkel zur Beschreibung des Sonnenstandes auf. Der Sonnenstand wird für den jeweiligen Ort über die Sonnenhöhe γ und den Sonnenazimut α_{Az} sowie über den Zenitwinkel θ_z und die Deklination δ in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit beschrieben. Die Ausrichtung der Fassade hängt von deren Neigungswinkel β und dem Flächenazimutwinkel α_F ab. Der Flächenazimut ist der Winkel zwischen der Himmelsausrichtung nach Norden und der Projektion der Flächennormalen auf die horizontale Fläche. Die Zählweise der Winkel für Sonnenazimut und Flächenazimut ist gleich und kann der Windrose in Abbildung 12 entnommen werden. Geographische Breite φ_{GB} und Länge λ_{GL} jedes Ortes sind festgelegt.

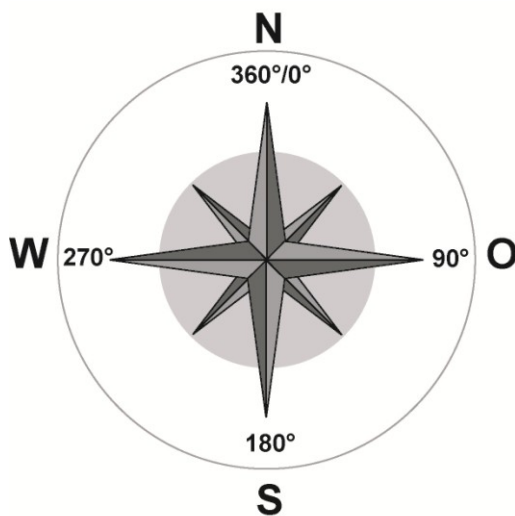


Abbildung 12 Zählweise der Winkel für Sonnen- und Flächenazimut

Im Folgenden werden Gleichungen zur Berechnung der Winkel aufgeführt, die in der Gleichung (2-59) für den Strahlungseinfallswinkel θ und in der Gleichung (2-60) für den Zenitwinkel θ_z auftreten.

Sonnendeklination δ und Zeitgleichung Z

Die Zeitgleichung Z berücksichtigt die Exzentrizität und Schiefe der Ekliptik der Erdbahn im Sonnenumlauf. Zeitgleichung und Sonnendeklination ändern sich während des Jahres. Mit n als Kalendertag des Jahres wird für ein Jahr mit 365 Tagen der Tageswinkel n' berechnet und damit die Zeitgleichung Z [23] ermittelt.

$$n' = 360^\circ \cdot \frac{n}{365} \quad (2-46)$$

$$\begin{aligned} Z = & (0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(n' + 85,9^\circ) \\ & + 9,9359 \cdot \cos \cdot (2 \cdot n' + 108,9^\circ) \\ & + 0,3387 \cdot \cos \cdot (3 \cdot n' + 105,2^\circ)) / 60 \text{ min} \end{aligned} \quad (2-47)$$

Die Deklination δ beschreibt den Winkel zwischen der Ebene, die die Sonnenbahn einschließt, und der Äquatorebene. Nach [23] wird die Deklination wie folgt berechnet.

$$\delta = 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos \cdot (n' + 9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos \cdot (2 \cdot n' + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos \cdot (3 \cdot n' + 26^\circ) \quad (2-48)$$

Wahre Ortszeit WOZ

Die Berechnung des Sonnenstandes erfolgt mit der wahren Ortszeit WOZ. Wenn die Sonne im Meridian steht, beträgt die wahre Ortszeit 12:00 Uhr. Die Uhrzeit ist zu diesem Zeitpunkt aber in Mitteleuropa bereits nach 12:00 Uhr, bei Sommerzeit sogar nach 13:00 Uhr. Für eine korrekte Uhrzeit sind zunächst die Ortszeit OZ (z.B. die mitteleuropäische Zeit MEZ) und die mittlere Ortszeit MOZ zu bestimmen. Der offizielle Ausdruck für die umgangssprachliche Winterzeit lautet Normalzeit (SWZ=0), denn nur die Sommerzeit (SWZ=1) stellt mit ihrer Verschiebung zur „normalen Zeit“ eine Besonderheit dar. Sie beginnt am letzten Sonntag im März und endet am letzten Sonntag im Oktober.

$$\text{MEZ} = \text{Uhrzeit} - \text{SWZ} \quad (2-49)$$

Der Zusammenhang zwischen mittlerer Ortszeit MOZ für den jeweils betrachteten Ort und der Zeit einer Zeitzone OZ (MEZ) ist eine feste Zeitdifferenz VZ, die über die Differenz zwischen Längengrad λ_{GL} des betrachteten Ortes zum zugehörigen Zeitzonenmeridian λ_Z bestimmt wird [17].

$$\text{MOZ} = \text{MEZ} - \text{VZ} \quad (2-50)$$

$$\text{VZ} = 4 \frac{\text{min}}{^\circ} \cdot (\lambda_Z - \lambda_{GL}) / 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \quad (2-51)$$

Die Summe von mittlerer Ortszeit MOZ und Zeitgleichung Z ergibt die wahren Ortszeit WOZ [17].

$$\text{WOZ} = \text{MOZ} + Z \quad (2-52)$$

Mit dem Zeitzonenmeridian $\lambda_Z = 15^\circ$ für Berlin gilt für die wahre Ortszeit die folgende Gleichung [17].

$$\text{WOZ} = \text{MEZ} - 1 + \frac{\lambda_{GL}}{15^\circ} + Z \quad (2-53)$$

Stundenwinkel ω und Höhenwinkel γ

Der Stundenwinkel ω wird vom Meridian aus positiv zum Nachmittag und negativ zum Vormittag gezählt. Es gilt die folgende Gleichung [17].

$$\omega = \frac{360^\circ}{24h} \cdot (12h - \text{WOZ}) \quad (2-54)$$

Der Höhenwinkel wird auch Elevation der Sonne genannt und erstreckt sich zwischen dem Horizont und der Sonne (Abbildung 11). Mit der geographischen Breite des Ortes φ_{GB} , der Deklination δ und dem Stundenwinkel ω ermittelt man den Höhenwinkel γ . Es gilt die folgende Gleichung [17].

$$\gamma = \arcsin(\sin(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (2-55)$$

Sonnenazimut α_{Az}

Der Azimut α_{Az} der Sonne ist der Winkel zwischen der geographischen Nordrichtung und der Projektion der Sonnenstrahlen auf die horizontale Fläche (Abbildung 11). Es gelten die folgende Berechnungsgleichungen [17], [22].

$$\alpha_{Az} = 180^\circ + \arccos\left(\frac{\sin(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\gamma)}\right), \text{ wenn } \text{WOZ} > 12 \text{ Uhr} \quad (2-56)$$

$$\alpha_{Az} = 180^\circ - \arccos\left(\frac{\sin(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\gamma)}\right), \text{ wenn } \text{WOZ} < 12 \text{ Uhr} \quad (2-57)$$

Strahlungseinfallswinkel θ und Zenitwinkel θ_z

Der Strahlungseinfallswinkel θ beschreibt den Winkel zwischen der Sonneneinstrahlung und der Flächennormalen (Abbildung 11). Es gilt die folgende Beziehung [22].

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_F) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_F) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha_F) \cdot \sin(\omega) \end{aligned} \quad (2-58)$$

Für senkrechte Wände ($\beta = 90^\circ$) vereinfacht sich diese Gleichung.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & -\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_F) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi_{GB}) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha_F) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha_F) \cdot \sin(\omega) \end{aligned} \quad (2-59)$$

Der Zenitwinkel θ_z beschreibt den Winkel zwischen der Sonneneinstrahlung und dem Zenit (Abbildung 11). Es gilt folgende Gleichung [22].

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi_{GB}) + \cos(\varphi_{GB}) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (2-60)$$

2.5 Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizients

Zur Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur (Kapitel 6.2) wird der Wärmeübergangskoeffizient α_{Fa} der Fassadenoberfläche ermittelt. Für überströmte Flächen unterschiedlicher Geometrie und Anströmung führt der VDI-Wärmeatlas [24] Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten auf. In Kapitel 2.5.1 werden für den vorliegenden Fall der Fassadenfläche die Gleichungen für eine parallel umströmte, senkrechte Fläche angegeben. Die Gleichungen berücksichtigen die unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten, die an Fassadenflächen durch die Windgeschwindigkeiten hervorgerufen werden. Den Einfluss unterschiedlicher Anströmrichtungen an den Fassadenflächen, hervorgerufen durch wechselnde Windrichtungen, dagegen nicht. Zur Aufstellung einer Gleichung, die den Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung berechnet, werden Strömungssimulationen (Kapitel 7) durchgeführt. Die Grundlagen zur numerischen Strömungsberechnung sind in Kapitel 2.5.2 zusammengetragen.

2.5.1 Wärmeübergangskoeffizient parallel umströmter Flächen

Der Wärmeübergangskoeffizient α kann aus der Ähnlichkeitskenngroße Nußelt Nu [24] berechnet werden. Die Kennzahl Nu setzt das Produkt aus Wärmeübergangskoeffizient α und charakteristischer Länge L_{char} der umströmten Fläche zur Wärmeleitfähigkeit λ des Fluids ins Verhältnis.

$$Nu = \alpha \cdot L_{char} / \lambda \quad (2-61)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Lage der umströmten Fläche, der Entstehung und Ausbildung der Strömung, der Geschwindigkeit w des Fluids und der Geometrie des umströmten Körpers. Für die angeströmte Fassadenoberfläche der Breite B und Höhe H werden die Nußelt-Beziehungen für eine mit der Windgeschwindigkeit w parallel angeströmte, vertikale, ebene Fläche betrachtet, siehe Abbildung 13.

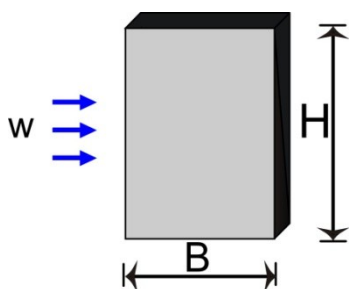


Abbildung 13 Parallel angeströmte, vertikale Fläche (Fassadenoberfläche)

Die empirischen Gleichungen der Kennzahl Nu richten sich nach der Entstehung und der Ausbildung der Strömung. Es wird zwischen freier und erzwungener Strömung und zwischen laminarer und turbulenter Strömungsform unterschieden. Während eine erzwungene Strömung durch äußere Kräfte, beispielsweise durch Wind aufgeprägte Drücke, hervorgerufen wird, entsteht die freie Strömung durch Massenkraft in einem Fluid, in welchem Dichtegradienten vorhanden sind.

2.5.1.1 Freie Strömung

Die freie Strömung an der Gebäudefassade entsteht durch Dichteunterschiede infolge eines Temperaturgradienten. Die maßgeblichen Kennzahlen zur Beschreibung dieser Auftriebsströmung sind die Grashof-Zahl Gr und die Rayleigh-Zahl Ra. Die Auftriebsströmung setzt ein, wenn die Rayleigh-Zahl größer als 1700 ist. Der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Auftriebsströmung liegt im Bereich $10^8 < Ra < 10^{10}$. Oberhalb des Übergangsbereichs ist mit turbulentem und unterhalb mit laminarem Verhalten zu rechnen. Die Rayleigh-Zahl Ra [24] ist das Produkt aus der Grashof-Zahl Gr und der Prandtl-Zahl Pr.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2-62)$$

Die Prandtl-Zahl Pr [24] ist definiert als Verhältnis zwischen kinematischer Viskosität ν und Temperaturleitfähigkeit a . Sie ist ein Maß für das Verhältnis von strömungsbehafteter und thermischer Grenzschicht.

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2-63)$$

Die Grashof-Zahl Gr [24] gibt das Verhältnis zwischen Auftriebs- und Trägheitskräften an. Sie wird in Abhängigkeit der lokalen Höhe H_{lok} , der Außenlufttemperatur T_{Al} und der Fassadentemperatur T_{Fa} berechnet.

$$Gr = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot H_{lok}^3 \cdot (1/T_{Al}) \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) / \nu^2 \quad (2-64)$$

Die Nußelt-Zahl Nu_F für freie Strömung wird für vertikale Flächen nach Churchill und Chu [25] berechnet. Die Gleichung gilt sowohl für den laminaren als auch für den turbulenten Bereich, wenn die Rayleigh-Zahl innerhalb von $10^{-1} \leq Ra \leq 10^{12}$ liegt.

$$Nu_F = [0,825 + \frac{(0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}})}{f_1}]^2 \quad (2-65)$$

Die Funktion $f_1(Pr)$ [24] beschreibt den Einfluss der Prandtl-Zahl Pr.

$$f_1(Pr) = [1 + (\frac{0,492}{Pr})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{8}{27}} \quad (2-66)$$

Oberhalb der kritischen Rayleigh-Zahl $Ra > 10^{12}$ ist die freie Strömung turbulent. Für die Nußelt-Zahl Nu_F bei freier Strömung muss für vertikale Flächen folgende Gleichung [24] angewendet werden.

$$Nu_F = 0,56 \cdot (Ra_c)^{\frac{1}{4}} + 0,13 \cdot (Ra^{\frac{1}{3}} - Ra_c^{\frac{1}{3}}) \text{ mit } Ra_c = 10^{8,9} \quad (2-67)$$

2.5.1.2 Erzwungene Strömung

Zur Beurteilung, ob die erzwungene Strömung laminar oder turbulent ist, dienen die Prandtl-Zahl Pr und die Reynolds-Zahl Re . Die Reynolds-Zahl Re [24] gibt das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften an. Sie wird berechnet mit der kinematischen Viskosität ν , der Geschwindigkeit w und der lokalen Breite B_{lok} .

$$Re = \frac{w \cdot B_{lok}}{\nu} \quad (2-68)$$

Für $Re < 5 \cdot 10^5$ und $0,6 < Pr < 2000$ ist die Strömung laminar. Für die Nußelt-Zahl $Nu_{E,lam}$ gilt bei erzwungener, laminarer Strömung für vertikale Flächen die folgende Gleichung [24].

$$Nu_{E,lam} = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2-69)$$

Für $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$ und $0,6 < Pr < 2000$ ist die Strömung turbulent. Für die Nußelt-Zahl $Nu_{E,tub}$ gilt bei erzwungener, turbulenter Strömung für vertikale Flächen die folgende Gleichung [24].

$$Nu_{E,tub} = \frac{(0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr)}{(1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1))} \quad (2-70)$$

Aus der Nußelt-Zahl $Nu_{E,lam}$ für laminare Strömung und der Nußelt-Zahl $Nu_{E,tub}$ für turbulente Strömung wird eine mittlere Nußelt-Zahl Nu_E für erzwungene Strömung nach V. Gnielinski [26] berechnet.

$$Nu_E = (Nu_{E,lam}^2 + Nu_{E,tub}^2)^{0,5} \quad (2-71)$$

2.5.1.3 Überlagerung von freier und erzwungener Strömung

Häufig überlagert sich einer erzwungenen Strömung eine freie Strömung. Maßgebend hierfür ist die Archimedeszahl Ar [24], die Grashof-Zahl Gr und Reynolds-Zahl Re ins Verhältnis setzt.

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} \quad (2-72)$$

Als Kennzahl beschreibt die Archimedes-Zahl das Gleichgewicht zwischen den Trägheits-, Reibungs- und Auftriebskräften. Bei großen Archimedes-Zahlen dominieren die Auftriebskräfte, bei kleinen die Trägheitskräfte. Archimedes-Zahlen von eins beschreiben ein Gleichgewicht zwischen den Trägheits- und den Auftriebskräften. Die erzwungene Konvektion überwiegt bei Archimedes-Zahlen, die sehr viel kleiner als eins sind. In diesem Fall können die Auftriebskräfte vernachlässigt werden. Die freie Konvek-

on überwiegt bei kleinen Windgeschwindigkeiten und Windstille. In diesem Fall ist die Archimedes-Zahl sehr viel größer als eins.

Die Nußelt-Zahl Nu_{EF} bei Überlagerung von freier und erzwungener Strömung wird nach S. W. Churchill [27] ermittelt.

$$Nu_{EF} = (Nu_F^3 + Nu_E^3)^{\frac{1}{3}} \quad (2-73)$$

Mit Hilfe der Nußelt-Zahl Nu_{EF} und der Wärmeleitfähigkeit λ_{Luft} wird der mittlere Wärmeübergangskoeffizient α_{EF} für vertikale, parallel angeströmte Flächen mit der lokalen Breite B_{lok} wie folgt berechnet.

$$\alpha_{EF (Churchill)} = \frac{Nu_{EF} \cdot \lambda_{Luft}}{B_{lok}} \quad (2-74)$$

Eine weitere Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für eine parallel angeströmte Fassadenfläche bei freier und erzwungener Konvektion durch Wind gibt Wattmuff an. Die Gleichung wird von J. A. Duffie und W. A. Beckmann [11] zitiert.

$$\alpha_{EF (Wattmuff)} = \underbrace{2,8 \frac{W}{m^2K}}_{\text{freie Konvektion}} + \underbrace{3 \frac{Ws}{m^3K} \cdot w}_{\text{erzwungene Konvektion}} \quad (2-75)$$

Tabelle 1 Daten zur Berechnung der Jahreswerte von 01.08.2007-31.07.2008

Größe	Wert
Windgeschwindigkeit w	Wetterstation VWS-Gebäude (Kapitel 4.6)
Außenlufttemperatur T_{Al}	Wetterstation VWS-Gebäude (Kapitel 4.6)
Fassadentemperatur T_{Fa}	Wetterstation VWS-Gebäude (Kapitel 4.6)
Mitte VWS-Gebäude B	13 m
8. Etage VWS-Gebäude H	27 m
Wärmeleitfähigkeit der Luft λ	0,03 W/mK
Prandtl-Zahl Pr	0,7
Kinematische Viskosität ν	153,5 10^{-7} m ² /s

Zum Vergleich der aufgeführten Ansätze (2-74) und (2-75) werden die Jahreswerte der Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{EF (Churchill)}$ und $\alpha_{EF (Wattmuff)}$ mit den Daten der Tabelle 1 berechnet. Die Messwerte der Windgeschwindigkeit, der Außenlufttemperatur und der Fassadentemperatur aus den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 4) fließen als Stundenmittelwerte für jede Stunde von 8-17 Uhr ein. Die Abbildung 14 führt die prozentualen Abweichungen der Berechnungswerte nach Churchill und Wattmuff in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit auf. Die Ansätze von Churchill und Wattmuff sind Abschätzungen, deren unterschiedliche Ergebnisse akzeptiert werden. Für Wattmuff sind die Wärmeübergangskoeffizienten über der angeströmten Fläche konstant. Für Churchill dagegen verändern sie

sich mit der lokalen Höhe und Breite der angeströmten Fläche. Churchill berechnet den Wärmeübergangskoeffizient über die empirischen Gleichungen der Kennzahl Nu_{Be}lt. Dadurch wird die Fassadentemperatur über die Grashof-Zahl und die Windgeschwindigkeit über die Reynolds-Zahl berücksichtigt. Wattmuff dagegen definiert einen konstanten Term (2,8 W/m²K) für die freie Konvektion und berücksichtigt nur die Windgeschwindigkeit im Term der erzwungenen Konvektion.

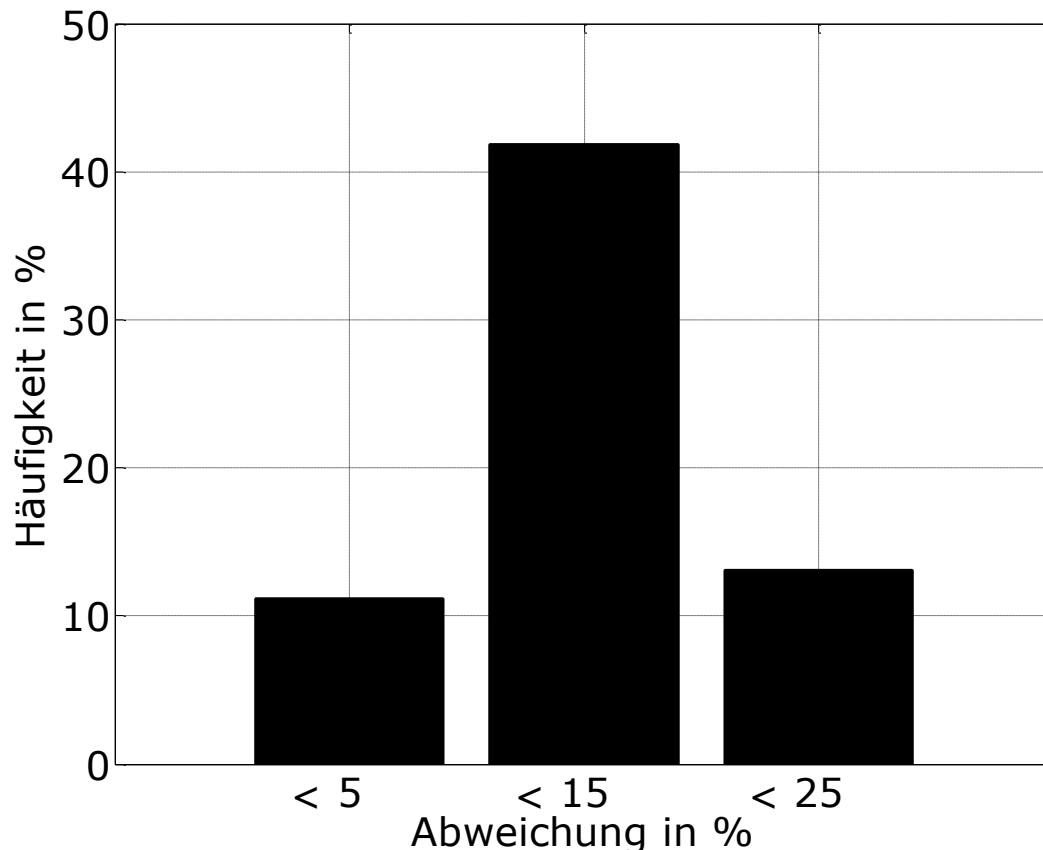


Abbildung 14 Prozentuale Abweichung der Berechnungswerte der Ansätze nach Churchill (2-74) und Wattmuff (2-75)

Der Wärmeübergangskoeffizient der Fassade α_{Fa} ist von der Windgeschwindigkeit und von der Windrichtung, aus der die Fassadenfläche angeströmt wird, abhängig. Die Ansätze zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten nach Churchill und Wattmuff beziehen sich auf parallel angeströmte Fassadenflächen und berücksichtigen die Windgeschwindigkeiten. Der Einfluss verschiedener Windrichtungen und damit verbundene unterschiedliche Anströmwinkel zur Fassadenoberfläche (Abbildung 86) bleiben unberücksichtigt. Wie stark der Wärmeübergangskoeffizient von der Anströmrichtung auf die Fassadenfläche abhängt, zeigen die numerische Strömungsberechnungen in Kapitel 7. Als Ergebnis der Simulationsrechnungen wird in Kapitel 7.8 eine Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten der Fassade α_{Fa} aufgestellt, die die Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Die Gleichung wird aus dem Ansatz von Wattmuff entwickelt, der die Fassadentemperatur nicht berücksichtigt. Denn über den Wärmeübergangskoeff-

fizient wird die Fassadentemperatur (Kapitel 6.2) berechnet, von der die Ansaugtemperatur (Kapitel 8) abhängig ist.

2.5.2 Numerische Strömungsberechnung

Die Grundlagen der Strömungsberechnung reichen zurück bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts. Die Mathematiker Claude Louis Marie Henri Navier und George Stokes fanden 1821 bzw. 1845 unabhängig voneinander die Gleichungen zur Berechnung reibungsbehafteter Strömungen. Die Navier-Stokes-Gleichungen [8] stellen ein gekoppeltes Gleichungssystem aus nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen dar, das auf den Grundsätzen der Massen- Impuls- und Energieerhaltung basiert. Mit diesem Gleichungssystem ist grundsätzlich jeder Verlauf einer beliebigen Strömung vollständig beschrieben. Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt mit Hilfe von numerischen Strömungsberechnungen.

Wärmeübergangskoeffizienten können mit numerischen Strömungssimulationen berechnet [28] werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von der Wahl des Turbulenzmodells ab. Bekannte Turbulenzmodelle sind das k - ε - und das k - ω -Modell. Diese Zweigleichungs-Turbulenzmodelle berechnen die Turbulenz mit getrennten Gleichungen. Mit k wird die turbulente kinetische Energie berechnet, die verantwortlich für die Entstehung der Turbulenz ist. Mit ε wird die Dissipationsrate von k ermittelt, die verantwortlich für das Abklingen der Turbulenz ist. Mit ω wird die charakteristische Frequenz der Wirbel ermittelt. Die spezifische Dissipationsrate ω kann als Verhältnis von ε zu k verstanden werden [29].

Das k - ε -Modell ist für vollturbulente Strömungen [30] entwickelt worden, in denen die kinematische Viskosität vernachlässigt werden kann. In den wandnahen Bereichen gibt es jedoch Regionen mit kleinen lokalen Reynolds-Zahlen der Turbulenz, so dass die viskosen Eigenschaften des Fluids an Bedeutung gewinnen. In dieser wandnahen viskosen Unterschicht werden sogenannte Wandfunktionen verwendet. Die Standardwandfunktion ist für den Fall der erzwungenen Konvektion entwickelt worden [30]. Sie weist in Verbindung mit dem k - ε -Modell eine beschränkte Gültigkeit in Bezug auf die Höhe der Gitterzellen an festen Wänden auf [28]. Sie legt über einen allgemeinen Zusammenhang die Strömungsgrößen am wandnächsten Gitterpunkt fest. Für Ergebnisse mit akzeptabler Genauigkeit sollten die Anzahl der Gitterzellen normal zu einer festen Wand im Bereich der Strömungsgrenzschicht einen minimalen Wert von ca. zehn nicht unterschreiten und der dimensionslose Wandabstand y^+ des wandnächsten Gitterpunktes muss größer zwanzig sein. Diese zwei Forderungen an das Gitter lassen sich nicht immer erfüllen, daher ist eine Sicherheit über die Ergebnisgenauigkeit schwer zu erlangen. Werden die y^+ -Werte kleiner elf, sinkt die Genauigkeit der Berechnung. Da der dimensionslose Wandabstand y^+ bereits ein Simulationsergebnis ist, muss eine gewisse Erfahrung bei der Gittererstellung vorhanden sein, damit man sich auf den wandnächsten Gitterpunkt verlassen kann.

Eine andere Alternative ist, auf die Wandfunktion zu verzichten und eine Low-Reynolds Formulierung zu verwenden [28]. Bei der Low-Reynolds Formulierung werden die Strömungsgrößen am wandnächsten Knoten nicht über ein Wandgesetz festgelegt, sondern das Strömungsfeld wird bis zur Wand aus den Bestimmungsgleichungen integriert. Der wandnahe Bereich muss daher bei einer Low-Reynolds Formulierung sehr fein aufgelöst werden. Das $k-\varepsilon$ -Modell weist in Verbindung mit der Low-Reynolds Formulierung im wandnahen Bereich ein schlechtes Konvergenzverhalten auf. Das $k-\omega$ -Modell dagegen verfügt in Kombination mit der Low-Reynolds Formulierung über ein gutes Konvergenzverhalten im wandnahen Bereich und reagiert in wandfernen Bereichen empfindlich auf kleine Änderungen der Turbulenzgrößen. Zielführend wäre ein Turbulenzmodell, welches die Eigenschaften des $k-\varepsilon$ -Modells im wandfernen mit den Eigenschaften des $k-\omega$ -Modells im wandnahen Bereich verbindet.

Das Shear Stress Transport (SST) Turbulenzmodell wurde von Menter [29] entwickelt. Es verbindet die Stärken der Turbulenzmodelle $k-\varepsilon$ und $k-\omega$. Im wandfernen Bereich wird die Turbulenz durch das $k-\varepsilon$ -Modell und im wandnahen Bereich durch das $k-\omega$ -Modell beschrieben. Das SST-Turbulenzmodell ist bis auf einen Term mit dem $k-\omega$ -Modell identisch. Dieser Term verbindet das $k-\omega$ -Modell mit dem $k-\varepsilon$ -Modell.

Die generelle Anforderung auf eine hohe Gitterauflösung im wandnahen Bereich bleibt weiterhin bestehen. Liegt der wandnächste Gitterpunkt in einem Bereich $y^+ > 11$ wird die Wandfunktion verwendet, ansonsten wird graduell auf die Low-Reynolds Formulierung umgeschaltet. Das SST-Modell bietet die Möglichkeit durch die automatische Umschaltung zwischen der Formulierung mit Wandfunktion und Low-Reynolds, dass unabhängig von der Gitterauflösung im Wandbereich ein gültiger, konvergierender Ansatz verwendet wird.

Die numerischen Strömungsberechnungen (Kapitel 7.5) erfolgen in dieser Arbeit mit dem Shear Stress Transport (SST) Turbulenzmodell. Bei der Verwendung dieses Turbulenzmodells ist zu beachten, dass es bei turbulenten erzwungenen Strömungen anwendbar ist. Bei einer Überlagerung von freier und erzwungener Strömung ist es anwendbar, wenn beide Strömungsformen turbulent sind. Die Auswertungen in Kapitel 4.8 zeigen, dass die Voraussetzungen zur Anwendung des SST-Turbulenzmodell erfüllt sind.

Die Zellenanzahl des gesamten Netzes sollte nicht zu groß sein, damit die Rechenzeiten nicht zu lang werden. Bei symmetrischen Modellen kann die Gitterzellenanzahl halbiert werden, indem nur das halbe Modell in der Simulationsrechnung betrachtet wird. Diese Möglichkeit wird bei der Gittergenerierung in Kapitel 7.4 genutzt. Die Struktur einer Gitterzelle kann verschiedenen geometrischen Formen wie Hexaedern oder Tetraedern entsprechen. Hexaeder liefern auf Grund ihrer geometrischen Struktur ein qualitativ höherwertiges Gitter.

3 Voruntersuchungen

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte saugen unterschiedliche Volumenströme über Kreis- und Schlitzöffnungen an. Die Voruntersuchungen ermitteln die Charakteristik der Ansaugströmung in Abhängigkeit der Geometrie der Ansaugöffnung. Des Weiteren werden Einflüsse des Ansaugvolumenstroms und der Abmessung der Ansaugfläche auf die Ansaugströmung betrachtet.

Die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4.2 messen die dezentralen Ansaugtemperaturen für Kreis- und Schlitzöffnungen. Der Einfluss der Geometrie der Ansaugöffnung auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wird in Kapitel 4.10.6 unter Berücksichtigung der Voruntersuchungen ausgewertet.

3.1 Geometrie der Ansaugöffnung

Die Geometrie der Ansaugöffnung beeinflusst die Charakteristik der Ansaugströmung. Die Messungen (Kapitel 4.2) dezentraler Ansaugtemperaturen erfolgen für Kreis- und Schlitzöffnungen mit gleichem Querschnitt. Kreisförmige Öffnungen saugen die Luft über die Fläche einer Halbkugel und schlitzförmige Öffnungen über die Fläche eines halben Ellipsoids an, wie Aufnahmen der Ansaugströmung in Abbildung 15 zeigen. Links sieht man die Ansaugströmung einer kreisförmigen und rechts einer schlitzförmigen Ansaugöffnung. Diese Aufnahmen sind am Hermann-Rietschel-Institut im Rahmen dieser Arbeit bei einem Ansaugvolumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ entstanden. Der Versuchsstand zur Messung von Kurzschlussströmungen bei dezentraler Ansaugung [31] ist verwendet worden. Zur Sichtbarmachung der Strömung dienen Heliumbläschen, die über einen Blasengenerator erzeugt werden. Für die Aufnahme ist die Ebene parallel zur Fassadenfläche ausgeleuchtet.

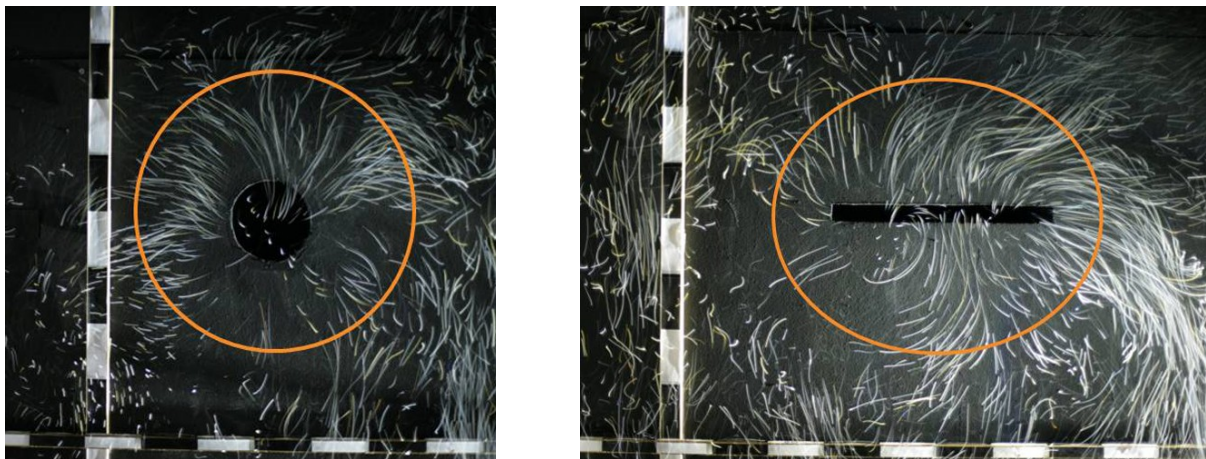


Abbildung 15 Frontale Strömung bei kreis- und schlitzförmiger Ansaugöffnung

Die Abbildung 16 betrachtet die Ansaugströmungen von der Seite und zeigt unmittelbar vor den Öffnungen ihre Charakteristiken. Die Strömung wird mit Heliumbläschen sichtbar gemacht. Orthogonal zur Fassadenfläche wird eine Ebene ausgeleuchtet, die durch die Mitte der Ansaugöffnung verläuft. Die Aufnahmen erfolgen mit langer Belichtungszeit, so dass die einzelnen Bläschen als Strömungslinien erscheinen.

Beide Öffnungen saugen die Luft aus der Umgebung trichterförmig an. Ein Teil der Luft strömt durch die Öffnungsmitte, ein anderer über die Ränder der Öffnungen. Es ist zu beobachten, dass in unmittelbarer Fassadennähe die Luft parallel zur Fassadenfläche über den Randbereich der Öffnungen angesaugt wird. Über den Kreisrand erfolgt die Ansaugung nicht so fassadennah wie bei der Schlitzöffnung. Es wird daher vermutet, dass die Ansaugtemperaturen bei Schlitzöffnungen größer als bei Kreisöffnungen sind. Die Auswertungen der Messungen in Kapitel 4.10.6 bestätigen diese Vermutung.

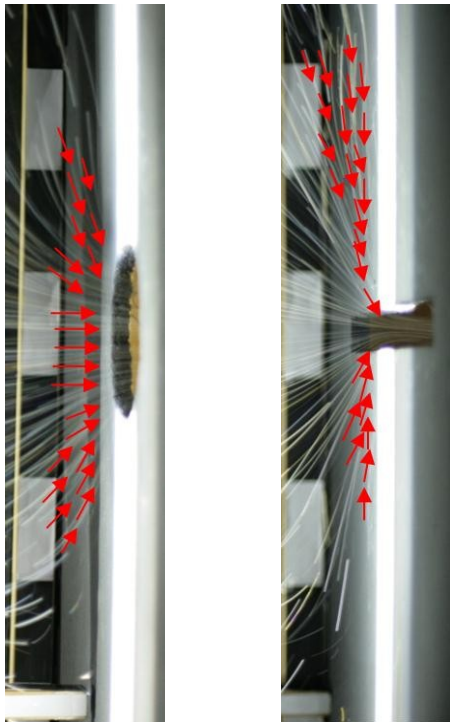


Abbildung 16 Ansaugströmungen nahe der Kreis- und Schlitzöffnung

3.2 Ansaugvolumenstrom und Abmessung der Ansaugfläche

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte saugen mit unterschiedlichen Volumenströmen die Luft aus der Umgebung an. Vor den Ansaugöffnungen bilden sich jeweils Geschwindigkeitsprofile aus. Zum Vergleich mit der Theorie in Kapitel 2.2.1 sind Aufnahmen der Ansaugströmungen vor einer Kreis- und Schlitzöffnung mit Hilfe des Versuchsstands zur Messung von Kurzschlussströmungen bei dezentraler Ansaugung [31] am Hermann-Rietschel-Institut entstanden. Orthogonal zur Fassadenfläche wird eine Ebene ausgeleuchtet, die durch die Mitte der Ansaugöffnung verläuft. Die Strömungen werden mit Heliumbläschen sichtbar gemacht. Die Aufnahmen erfolgen mit langer Belichtungszeit, so dass die einzelnen Bläschen als Strömungslinien erscheinen. Die Abbildung 17 und die Abbildung 18 zeigen die Ansaugströmungen sowohl im Bereich der Öffnung als auch entfernt vor der Fassade. Die betrachteten Öffnungen haben eine Fläche von 123 cm^2 . Der Durchmesser der Kreisöffnung entspricht $12,5 \text{ cm}$, die Höhe des Schlitzes $3,1 \text{ cm}$ und seine Breite 40 cm .

Die Abbildung 17 zeigt das Geschwindigkeitsprofil der Ansaugströmung bei einem Volumenstrom von $120 \text{ m}^3/\text{h}$ und die Abbildung 18 bei einem Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Kreisöffnung ist jeweils links und die Schlitzöffnung rechts gezeigt.

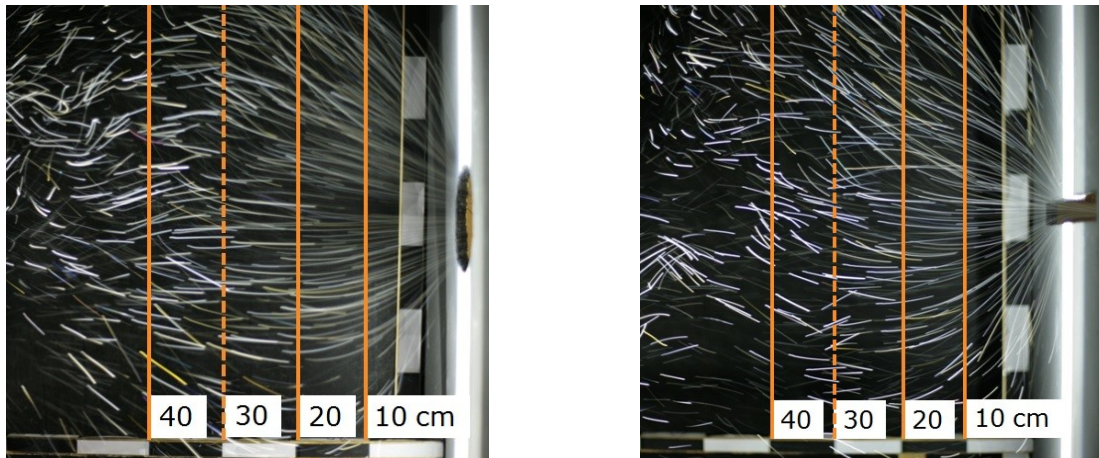


Abbildung 17 Geschwindigkeitsprofil bei Kreis- und Schlitzöffnung, $120 \text{ m}^3/\text{h}$

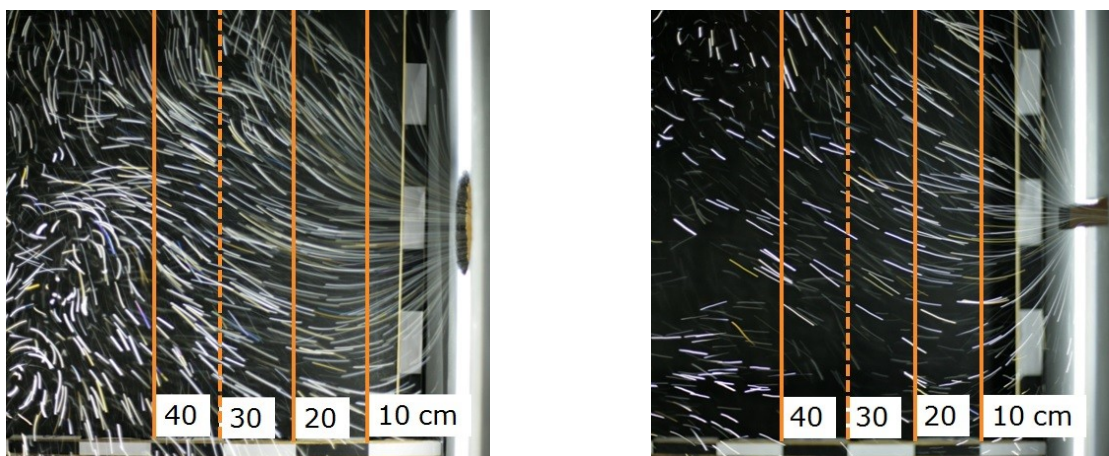


Abbildung 18 Geschwindigkeitsprofil bei Kreis- und Schlitzöffnung, $60 \text{ m}^3/\text{h}$

Kreisförmige Öffnungen saugen die Luft über die Fläche einer Halbkugel und schlitzförmige Öffnungen über die Fläche eines halben Ellipsoids an. Des Weiteren wird in Kapitel 3.1 beschrieben, dass in unmittelbarer Fassadennähe die Luft parallel zur Fassadenfläche über den Randbereich der Öffnungen angesaugt wird. Die Schlitzöffnung saugt dabei die Luft fassadennäher als die Kreisöffnung an. Diese Beobachtungen bestätigen Abbildung 17 und Abbildung 18 unabhängig vom Volumenstrom.

Ansonsten sind die Geschwindigkeitsprofile der Ansaugströmungen beider Ansaugöffnungen sowohl bei einem Volumenstrom von $120 \text{ m}^3/\text{h}$ als auch bei $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ähnlich. Im Abstand von 40 cm zur Öffnung verlaufen die Stromlinien ungeordnet und werden vom Randbereich der Ansaugströmungen über die Flächen der Halbkugel- oder des halben Ellipsoids erfasst. Im Abstand von 30 cm zur Öffnung entsteht ein Übergangsbereich. Die Stromlinien gegenüber den Öffnungen verlaufen zunächst ungeordnete und gehen in eine parallele Strömungsform über. Im Abstand von 20 cm bilden sich gegenüber den Öffnungen parallel verlaufende Stromlinien

aus. Im Abstand von 10 cm verlaufen die Stromlinien weiterhin parallel und werden über die Mitte der Kreis- oder Schlitzöffnung angesaugt. Im äußeren Bereich der Geschwindigkeitsprofile der Ansaugströmungen verlaufen die Stromlinien entlang der Halbkugel- oder halben Ellipsoidfläche und werden über den Randbereich der Öffnungen angesaugt.

Die Geschwindigkeiten w_z werden axial zu den betrachteten Kreis- und Schlitzöffnungen ermittelt. Sie werden für verschiedene Abstände z in der Tabelle 2 aufgeführt und mit der Gleichung (2-1) von D. Valle [4] und mit der Gleichung (2-2) von F. Drkal [5] berechnet. Die Werte sind für drei Volumenströme tabelliert. Sie entsprechen minimalen und maximalen Volumenströmen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte, siehe Kapitel 2.1.

Tabelle 2 Geschwindigkeit w_z im Abstand z vor den Ansaugöffnungen für unterschiedliche Volumenströme

Ansaugfläche in m^2	Volumenstrom in m^3/h	Entfernung z in m	w in Öffnung in m/s	w_z nach Drkal in m/s [3]	w_z nach Valle in m/s [2]	10 % von w in m/s
0,0123	60	0,1	1,4	0,21	0,20	
		0,125		0,15	0,14	0,1
		0,2		0,06	0,06	
		0,3		0,03	0,03	
		0,4		0,02	0,01	
	120	0,1	2,7	0,41	0,39	
		0,125		0,29	0,26	0,3
		0,2		0,12	0,11	
		0,3		0,06	0,05	
		0,4		0,03	0,03	
	240	0,1	5,4	0,82	0,79	
		0,125		0,57	0,52	0,5
		0,2		0,25	0,21	
		0,3		0,11	0,10	
		0,4		0,06	0,05	
	480	0,1	10,8	1,64	1,57	
		0,125		1,14	1,05	1,1
		0,2		0,49	0,43	
		0,3		0,23	0,19	
		0,4		0,13	0,11	

Die berechneten Geschwindigkeiten w_z werden mit zunehmendem Abstand zur Ansaugöffnung kleiner. Nach D. Valle (Kapitel 2.2.1) ist die Geschwindigkeit w_z nach einer Entfernung z , die dem Durchmesser d der Öffnung entspricht, bereits auf 10 % der Geschwindigkeit w in der Öffnung gesunken. In diesem Fall bei $z=12,5$ cm. Die fett gedruckten Tabellenwerte bestätigen diese Aussage.

Die berechneten Geschwindigkeiten w_z werden mit zunehmendem Volumenstrom größer. Sie sind überwiegend kleiner als 1 m/s. Nach der Beaufort Skala herrscht Windstille für Geschwindigkeiten kleiner als 1m/s. Geschwindigkeiten größer als 0,15 m/s empfinden Menschen in Aufenthaltszonen von Innenräumen [32] als Zug. Die Geschwindigkeiten w_z sind klei-

ner als 0,15 m/s ab einer Entfernung von 20 cm bei 60 m³/h und 120 m³/h, ab einer Entfernung von 30 cm bei 240 m³/h und ab einer Entfernung von 40 cm bei 480 m³/h.

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte (Kapitel 2.1) weisen Volumenströme zwischen 30 m³/h und 500 m³/h auf. Für ihre Ansaugströmung erfolgt nach den Auswertungen der Abbildung 17, Abbildung 18 und Tabelle 2 folgende Zusammenfassung. Mit steigendem Volumenstrom werden fernere Luftschichten über die Ansaugöffnung erfasst. Die überwiegende Ansaugung erfolgt unabhängig vom Volumenstrom bis zu einer Entfernung von 30 cm. Der Einfluss auf die Ansaugtemperatur durch die Erfassung von ferneren Luftschichten ab einem Abstand von 40 cm wird als gering eingestuft. Die Messungen dezentraler Ansaugtemperaturen (Kapitel 4.2) finden daher nur bei einem Volumenstrom statt.

Die Ansaugflächen der Schlitz- und Kreisöffnungen können unterschiedliche Größen aufweisen. Saugschlitze sind rechteckige Saugöffnungen [4], bei denen das Verhältnis von Länge zur Breite größer 10:1 ist. Tabelle 3 führt drei Ansaugflächen mit den entsprechenden Durchmessern der Kreisöffnungen und möglichen Abmessungen der Schlitzöffnungen auf. Aus architektonischer Sicht werden sie unauffällig und daher vermutlich nicht besonders groß ausfallen. Kreisöffnungen mit Durchmessern von 25 cm sind daher unwahrscheinlich und würden eher durch entsprechende Schlitze ausgeführt werden.

Tabelle 3 Mögliche Flächen der Ansaugöffnungen

Ansaugfläche in cm²	Durchmesser in cm	Breite x Höhe in cm
33	6,25	20x1,65
123	12,5	40x3,1
500	25	100x5

Die Tabelle 4 führt für drei Ansaugflächen und drei Volumenströme die berechneten Geschwindigkeiten w_z nach D. Valle [4] auf. Je größer der Ansaugvolumenstrom, desto größer die Geschwindigkeiten w_z bei gleicher Ansaugfläche. Bei gleichem Volumenstrom ist erkennbar, dass ab einem Abstand von 20 cm die Geschwindigkeiten w_z (fett gedruckt) unabhängig von der Größe der Ansaugfläche identisch sind. Die Ansaugcharakteristik ändert sich in Abhängigkeit der Größe der Ansaugfläche nicht. Somit stellt die Größe der Ansaugfläche keinen Einfluss auf die Ansaugtemperatur dar. Die Messungen dezentraler Ansaugtemperaturen (Kapitel 4.2) finden daher nur bei einer Querschnittsfläche statt.

Die Ausdehnung der Geschwindigkeitsprofile vor den Ansaugöffnungen bestimmt, ob innerhalb oder auch außerhalb der Fassadengrenzschicht angesaugt wird. Kapitel 4.9 vergleicht die Dicke der Fassadengrenzschicht mit der Ausdehnung des Geschwindigkeitsprofils.

Tabelle 4 Geschwindigkeit w_z im Abstand z vor den Ansaugöffnungen für unterschiedliche Ansaugflächen

		60 m³/h	120 m³/h	240 m³/h
Ansaugfläche in cm²	Entfernung z in m	w_z nach Valle in m/s [2]	w_z nach Valle in m/s [2]	w_z nach Valle in m/s [2]
33	0,1	0,21	0,43	0,86
	0,125	0,14	0,28	0,56
	0,2	0,05	0,11	0,22
	0,3	0,02	0,05	0,10
	0,4	0,01	0,03	0,06
123	0,1	0,20	0,39	0,79
	0,125	0,13	0,26	0,53
	0,2	0,05	0,11	0,22
	0,3	0,02	0,05	0,10
	0,4	0,01	0,03	0,05
500	0,1	0,15	0,30	0,59
	0,125	0,11	0,21	0,43
	0,2	0,05	0,10	0,20
	0,3	0,02	0,05	0,10
	0,4	0,01	0,03	0,05

4 Experimentelle Untersuchungen

In den folgenden Kapiteln werden die Versuchsaufbauten der experimentellen Untersuchungen beschrieben. Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen werden dezentrale und zentrale Ansaugtemperaturen, Temperaturen in unterschiedlichen Abständen normal zur Fassadenoberfläche, Fassadenoberflächentemperaturen und Wetterdaten gemessen. Alle Messungen werden über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt. Sie begannen am 01.08.2007 und endeten am 31.07.2008. Die Datenerfassung aller über ein Jahr erfassten Messwerte erfolgt mit Hilfe eines eigenständig programmierten Labview Programms. Die Messwerte der Ansaugtemperaturen, der Fassadenoberflächentemperaturen, der fassadennahen Temperaturwerte und der Wetterdaten werden sekundlich abfragt und als 10 Minuten Mittelwerte in einem Textfile gespeichert. Alle Messdaten werden auf Plausibilität geprüft, so dass ein bereinigter Datensatz aller Messdaten vorliegt. Die Messergebnisse werden in Kapitel 4.10 graphisch ausgewertet und liefern Aussagen zu den folgenden aufgelisteten Einflüssen auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte.

- Einfluss der Anlagenwahl
- Einfluss der Fassadestruktur
- Einfluss der Gebäudehöhe
- Einfluss der Grenzsicht
- Einfluss der Position der Ansaugöffnung
- Einfluss der Ansaugvariante
- Einflüsse der Wetterdaten und der Fassadentemperatur

In Kapitel 4.11 erfolgt mit den Ergebnissen der Auswertungen die Aufstellung des Berechnungsansatzes für die Übertemperatur der angesaugten Außenluft dezentraler Geräte.

4.1 Fehlerabschätzung der Temperaturmessungen

Die Ansaugtemperaturen, die Fassadenoberflächentemperaturen und die fassadennahen Temperaturwerte werden mit Thermoelementen gemessen, die auf 0,1 K genau kalibriert sind. Für die Messung der fassadennahen Temperaturwerte werden die Thermoelemente mit einem Strahlungsschutz versehen. Wie die folgende Abschätzung zeigt, vermeidet diese Maßnahme eine Temperaturerhöhung durch Strahlung und somit einen Messfehler. An den Thermoelementen findet ein Wärmeübergang durch Konvektion statt. Das Thermoelement wird vereinfachend als Kugel betrachtet. Für die Nußelt-Zahl Nu gilt bei erzwungener Strömung um Kugeln die folgende Beziehung [24].

$$Nu = 0,991 \cdot Re^{0,385} \cdot Pr^{0,4} \quad (4-1)$$

Die Reynolds-Zahl Re wird mit dem charakteristischem Durchmesser $d=0,8$ mm des Thermoelements, einer Anströmgeschwindigkeit $w=0,5$ m/s und der kinematischen Viskosität $\nu = 172,6 \cdot 10^{-07}$ berechnet.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = 23 \quad (4-2)$$

Die Nußelt-Zahl Nu ergibt sich mit der Prandtl-Zahl $Pr=0,7$ zu $Nu=2,7$. Damit folgt für eine Wärmeleitfähigkeit für Luft $\lambda_{Luft,40^\circ C} = 0,0271 \text{ W/mK}$ der Wärmeübergangskoeffizient α .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{Luft,40^\circ C}}{d} = 90 \frac{W}{m^2K} \quad (4-3)$$

An der Oberfläche des Thermoelements entspricht der konvektive Wärmestrom $\dot{q}_{Konvektion}$ der auftreffenden direkten Sonneneinstrahlung $\dot{q}_{Strahlung}$. Die Konvektion kann auch über den Zusammenhang von Wärmeübergangskoeffizient α und Temperaturdifferenz zwischen Thermoelement $T_{Thermoelement}$ und Außenluft T_{Luft} dargestellt werden.

$$\dot{q}_{Konvektion} = \alpha \cdot (T_{Thermoelement} - T_{Luft}) = \dot{q}_{Strahlung} \quad (4-4)$$

Die direkte Sonneneinstrahlung $\dot{q}_{Strahlung}$ wird mit $700 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Nur eine Seite des Thermoelements wird mit der direkten Sonneneinstrahlung beaufschlagt ($\dot{q}_{Strahlung} = 350 \text{ W/m}^2\text{K}$).

$$T_{Thermoelement} = T_{Luft} + \frac{\dot{q}_{Strahlung}}{\alpha} = T_{Luft} + 3,8 \text{ K} \quad (4-5)$$

Es zeigt sich, dass die Temperaturerhöhung durch Strahlung einen deutlichen Messfehler erzeugt. In dieser Abschätzung wurde eine Mindestgeschwindigkeit am Thermoelement von $0,5 \text{ m/s}$ angenommen. Höhere Geschwindigkeiten verursachen einen geringeren Messfehler.

Ein Strahlungsschutz wird für die Messung der fassadennahen Temperaturwerte (Kapitel 4.4) verwendet und somit ein Messfehler verhindert. Die Thermoelemente zur Messung der Ansaugtemperaturen (Kapitel 4.2, Kapitel 4.3) werden von der Sonne nicht beschienen und benötigen keinen Strahlungsschutz. Sie werden gleichmäßig mit dem gleichen Volumenstrom umströmt. Damit ist der Messfehler durch den Einfluss der Geschwindigkeit bei allen gleich.

4.2 Messung dezentraler Ansaugtemperaturen

Die Ansaugtemperaturen dezentraler Geräte werden für ein Jahr für sieben unterschiedliche Fälle in Abhängigkeit der Fassadestruktur, der Position der Ansaugöffnung und der Ansaugvariante gemessen. In die experimentellen Untersuchungen werden zwei Gebäude der Technischen Universität Berlin mit unterschiedlicher Fassadestruktur eingebunden, siehe Abbildung 19. Das Gebäude für Wasser und Schiffbau (VWS) weist eine

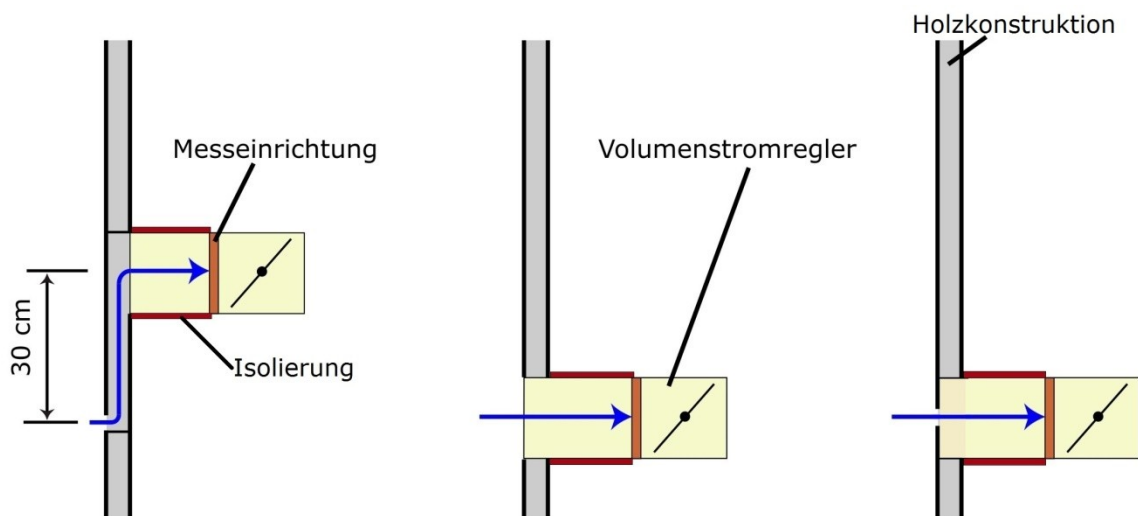
glatte Fassade auf. Das Gebäude für Technische Chemie (TC) weist eine strukturierte Fassade mit zurückgesetzten Fensternischen auf.



Abbildung 19 Wasser und Schiffbau (VWS)

Technische Chemie (TC)

Die ausgewählten Gebäude verfügen nicht über dezentrale Anlagen. Dadurch erfolgt die Messung der dezentral angesaugten Außenlufttemperatur nicht an real eingebauten dezentralen Fassadenlüftungsgeräten, sondern für eigens konstruierte Ansaugvarianten, siehe Abbildung 20.



"Versetzt zum Schlitz"

"Gegenüber vom Kreis"

"Gegenüber vom Schlitz"

Abbildung 20 Ansaugvarianten mit Messvorrichtung und Volumenstromregler

Es werden sowohl kreisförmige als auch schlitzförmige Ansaugöffnungen betrachtet, da die Geometrie der Ansaugöffnung die Charakteristik der Ansaugströmung (Kapitel 3.1) beeinflusst. Alle Ansaugöffnungen werden mit gleicher Querschnittsfläche konstruiert, damit die Geschwindigkeiten in den Öffnungen bei gleichem Außenluftvolumenstrom gleich sind. Die runden Öffnungen haben einen Durchmesser von 12,5 cm. Die schlitzförmigen Öffnungen haben eine Höhe von 2 cm und eine Breite von 61,5 cm. Die schlitzförmige oder kreisförmige Ansaugöffnung befindet sich in einer Holzkonstruktion, deren äußere Oberfläche schwarz gestrichen ist und

somit einen fassadenähnlichen Emissionsgrad aufweist. Die Holzkonstruktion wird anstelle der vorhandenen Fenster eingesetzt. Ein Ventilator saugt Außenluft über die Ansaugöffnung an. Die Messeinrichtung (Abbildung 21) misst die mittlere Temperatur der angesaugten Außenluft. Sie sitzt ca. 10 cm vor der inneren Seite der Holzkonstruktion in einem isoliertem Rohrstück. Durch die Isolierung kann der Einfluss der Wegstrecke zur Messeinrichtung auf die Ansaugtemperatur vernachlässigt werden. Die verwendeten Ansaugvarianten können wie folgt beschrieben werden.

„Versetzt zum Schlitz“: Über den Ventilator wird Außenluft über einen Zwischenraum mit einer Tiefe von 40 mm angesaugt. Die schlitzförmige Fassadenöffnung liegt 30 cm unterhalb der inneren Ansaugöffnung.

„Gegenüber vom Kreis“: Über den Ventilator wird Außenluft direkt über eine kreisförmige Fassadenöffnung nach innen geführt. Die kreisförmige Fassadenöffnung liegt gegenüber der inneren Ansaugöffnung.

„Gegenüber vom Schlitz“: Über den Ventilator wird Außenluft direkt über eine schlitzförmige Fassadenöffnung nach innen geführt. Die schlitzförmige Fassadenöffnung liegt gegenüber der inneren Ansaugöffnung.

Die drei Ansaugvarianten sind in Anlehnung an die Praxis gewählt worden. Dezentrale Geräte verfügen über runde Ansaugöffnungen, die über einen Ansaugstutzen direkt in die Fassade integriert werden können. Es liegt die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Kreis“ vor. Viele Architekten werden diese Varianten nicht bevorzugen, und eher in die Fassade Schlitze als Ansaugöffnungen integrieren. Es liegen die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz“ oder „Versetzt zum Schlitz“ vor.

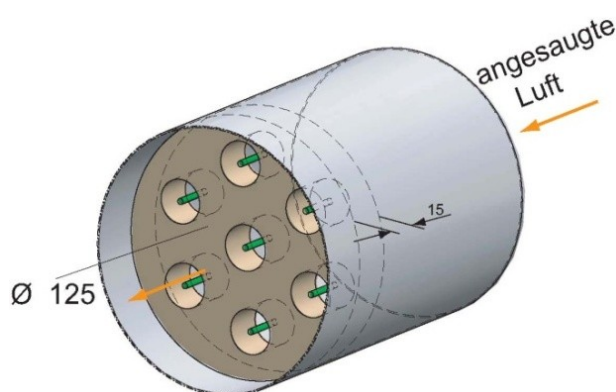


Abbildung 21 Messeinrichtung zur Messung der angesaugten Lufttemperatur

Die Geschwindigkeitsprofile vor den Ansaugöffnungen in Kapitel 3.2 bestätigen, dass die dezentralen Ansaugöffnungen die Außenluft aus verschiedenen fassadennahen Schichten mit unterschiedlichen Temperaturen ansaugen. Die mittlere Ansaugtemperatur dezentraler Ansaugöffnungen wird erfasst, indem mehrfach über dem Querschnitt der Messeinrichtung (Abbildung 21) gemessen wird. Die Messeinrichtung ist mit sieben gleich großen Löchern versehen. In jedem Loch sitzt in der Mitte ein kalibriertes Thermoelement des Typs K Nickel-Chrom-Nickel (Kapitel 4.1). Alle Ther-

moelemente werden mit dem gleichen Volumenstrom umströmt. Damit ist der Messfehler bei allen gleich. Ein Volumenstromregler von TROX aus der Serie TVR-Easy hält den Außenluftvolumenstrom auf 120 m³/h konstant. Er hat einen Durchmesser von 125 mm. Es ist nach den Voruntersuchungen (Kapitel 3.2) ausreichend, die Messungen bei einem Volumenstrom durchzuführen. Die überwiegende Ansaugung erfolgt unabhängig vom Volumenstrom bis zu einer Entfernung von 30 cm. Mit steigendem Volumenstrom werden fernere Luftschichten über die Ansaugöffnung erfasst. Dieser Einfluss auf die Ansaugtemperatur wird als gering eingestuft.



Abbildung 22 Ansaugvarianten an der Südfassade des VWS-Gebäudes

Abbildung 22 zeigt in der achten Etage des VWS-Gebäudes den Einbau der Ansaugvarianten in die glatte Südfassade. In einer Höhe von 27,4 m werden die Holzkonstruktionen mit den Ansaugvarianten „Versetzt zum Schlitz“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Gegenüber vom Kreis“ in die Fensteröffnungen eingebaut. Abbildung 23 zeigt die Position der Ansaugöffnungen in der Fassadenfläche des VWS-Gebäudes. Sie schließen bündig mit der Fassadenoberfläche ab.

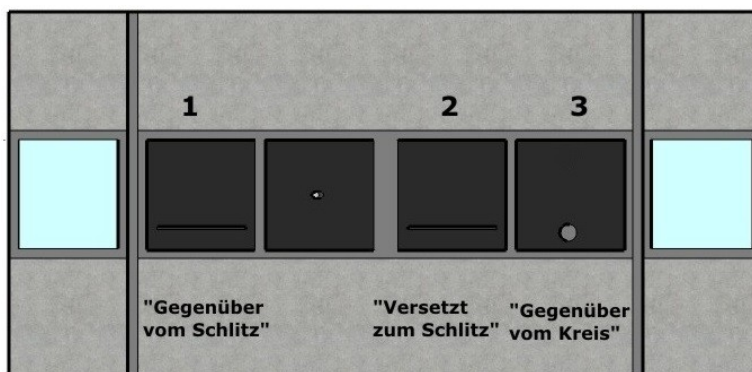


Abbildung 23 Position der Ansaugöffnungen in der Fassade des VWS-Gebäudes

Die Abbildung 24 zeigt in der zweiten Etage des Gebäudes für Technische Chemie (TC) den Einbau der Ansaugvarianten in die strukturierte Südfassade. In einer Höhe von 15,8 m werden die Holzkonstruktionen mit den Ansaugvarianten „Versetzt zum Schlitz“ und „Gegenüber vom Schlitz“ eingebaut. Die Holzkonstruktionen mit den Ansaugvarianten schließen entweder bündig mit der vordersten Fassadenoberfläche oder mit dem zurückgesetzten Fensterband ab.



Abbildung 24 Ansaugvarianten an der Südfassade des TC-Gebäudes

Die Abbildung 25 zeigt die Position der Ansaugöffnungen in der Fassadenfläche des TC-Gebäudes. Die Ansaugtemperaturen werden mit und ohne Einfluss der Fensternische gemessen. Die Ansaugvarianten, die so eingebaut sind, dass sie mit der vordersten Fassadenfläche abschließen, werden als „Versetzt zum Schlitz, Fassade“ und „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ bezeichnet. Die Ansaugvarianten, die zurückversetzt zur vordersten Fassadenfläche eingebaut sind, werden als „Versetzt zum Schlitz, Nische“ und „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ bezeichnet.

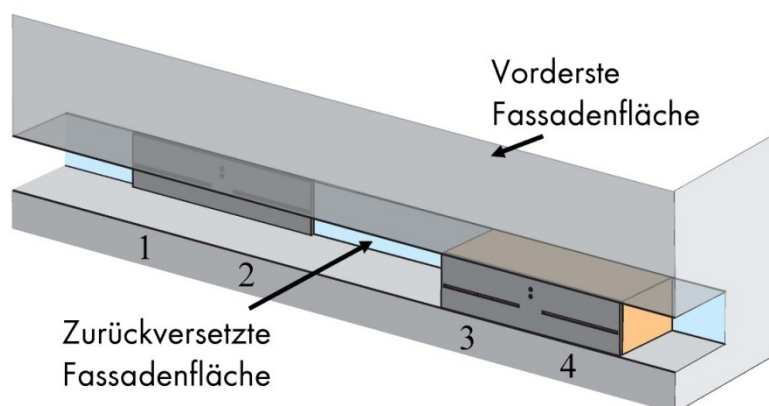


Abbildung 25 Position der Ansaugöffnungen in der Fassade des TC-Gebäudes

4.3 Messung zentraler Ansaugtemperaturen

Die Messwerte zentraler Ansaugtemperaturen werden mit Messwerten dezentraler Ansaugtemperaturen verglichen. Die vergleichenden Aussagen zur Temperaturerhöhung gegenüber der Außenlufttemperatur ermöglichen eine Beurteilung des Einflusses der Anlagenwahl auf die Ansaugtemperaturen, siehe Kapitel 4.10.1.

Die zentralen Ansaugtemperaturen werden an Ansaugöffnungen realer Anlagen gemessen. Bei der Auswahl wird berücksichtigt, dass zentrale Anlagen ihre Ansaugöffnungen nicht in die Fassade integrieren müssen. Betrachtet werden die zentralen Anlagen der VW-Bibliothek (BIB) und des Hermann-Rietschel-Instituts (HRI), siehe Abbildung 26. Diese Gebäude gehören zur Technischen Universität Berlin. Zur Messung der mittleren Ansaugtemperatur zentraler Lüftungsanlagen werden mehrere kalibrierte Thermoelemente des Typs K Nickel-Chrom-Nickel (Kapitel 4.1) gleichmäßig verteilt in den Ansaugöffnungen installiert.



Abbildung 26 VW Bibliothek (BIB)



Hermann-Rietschel-Institut (HRI)

Abbildung 27 zeigt die zentralen Ansaugvarianten. Betrachtet werden auf dem Dach der VW-Bibliothek (BIB) die Ansaugung „Dach Ost“ und „Dach West“ und auf der Ostseite des Hermann-Rietschel-Instituts (HRI) die Ansaugung „Fassade Ost“ und die Ansaugung „Turm Ost“. Die Ansaugungen „Dach Ost“ und „Dach West“ befinden sich 1 m bzw. 2 m oberhalb der Dachhaut, die aus schwarzen Bitumenbahnen besteht. Die Ansaugung „Fassade Ost“ befindet sich in der östlichen Fassade in 3 m Höhe. Der Ansaugturm „Turm Ost“ steht vor der östlichen Fassade.



„Dach Ost“ und „Dach West“ (BIB)



„Fassade Ost“ und „Turm Ost“ (HRI)

Abbildung 27 Zentrale Ansaugvarianten

4.4 Messung der Temperaturen normal zur Fassade

Die Messungen der Temperaturen normal zur Fassade ermöglichen Aussagen zur Temperaturverteilung innerhalb der Fassadengrenzschicht. Im Vergleich mit den gemessenen Ansaugtemperaturen wird der Einfluss der fassadennahen Temperaturerhöhung gezeigt, siehe Kapitel 4.10.4.

Die Temperaturmessungen normal zur Fassade finden an dem Gebäude für Wasser- und Schiffbau (VWS) der Technischen Universität Berlin statt (Abbildung 19). An diesem Gebäude werden auch die dezentralen Ansaugtemperaturen gemessen (Kapitel 4.2). Das Gebäude für Wasser- und Schiffbau (VWS) wurde nicht nur auf Grund der glatten Fassadenstruktur, sondern auch wegen der quaderförmigen Geometrie gewählt. Die Strömungsberechnungen in Kapitel 7.1 finden mit den Abmaßen dieses Gebäudes statt. Dadurch können die Strömungsberechnungen mit den gemessenen Temperaturverläufen vor der VWS-Fassade validiert werden.

Für die Temperaturmessungen werden normal zu den Südfassadenoberflächen Lanzen mit 19 Temperaturmessstellen installiert. Die Abbildung 28 zeigt eine Lanze, die in einer eigens konstruierten Holzkonstruktion befestigt ist. Die Lanze besteht aus Bambus und wird auf Grund des hohen Flächenträgheitsmoments kaum Deformationen durch Windlasten ausgesetzt. Die Holzkonstruktion ist schwarz gestrichen und weist somit einen fassadenähnlichen Emissionsgrad auf. Sie wird anstelle der vorhandenen Fenster eingesetzt. Jede Temperaturmessstelle auf der Lanze ist mit einem Strahlungsschutz bestehend aus einer Aluminiumhülle versehen. Somit werden Messfehler (Kapitel 4.1) durch Sonneneinstrahlung vermieden. Die Temperaturen werden mit kalibrierten Thermoelementen des Typs K Nickel-Chrom-Nickel (Kapitel 4.1) gemessen.

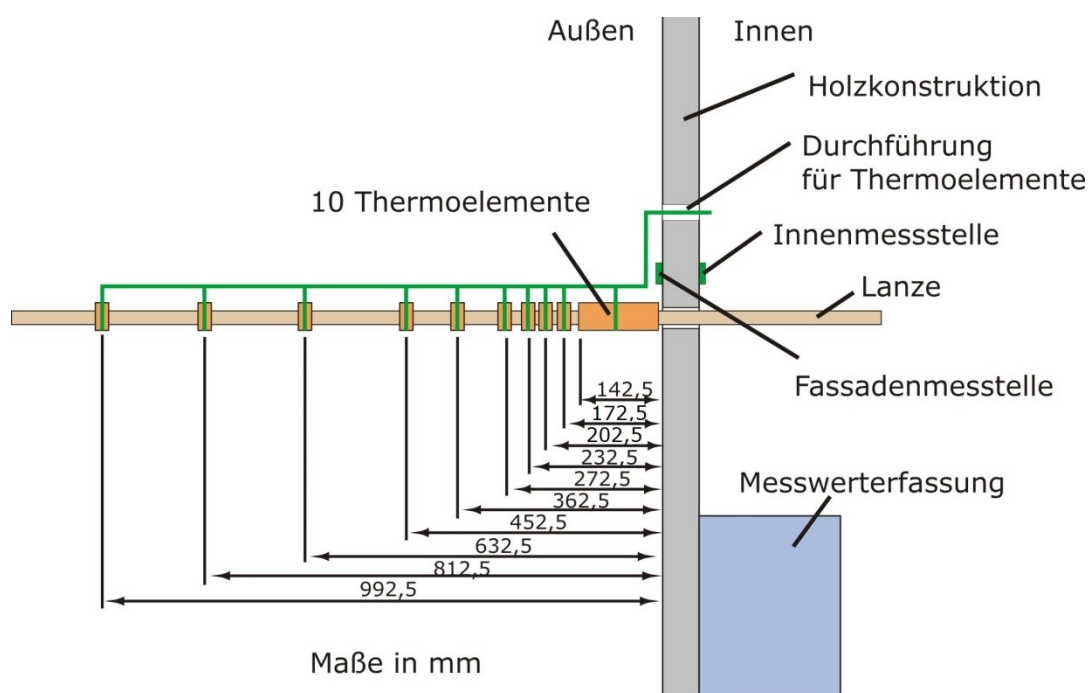


Abbildung 28 Lanze mit 19 Temperaturmessstellen und Fassadenmessstelle

Die Lanzen erfassen die Temperaturwerte im Abstand von 0,075 m bis 1 m vor der Fassade. In der Fassadennähe sind die Abstände zwischen den Thermoelementen klein. Sie nehmen mit wachsendem Fassadenabstand zu. Die fassadennahen Abstände sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Abstände der ersten 10 Messstellen zur Fassadenoberfläche

Abstand (in mm) der ersten 10 Messstellen von der Fassadenoberfläche									
0,75	2,25	3,75	5,25	6,75	8,25	9,75	11,25	12,75	14,25

Für die Messungen am Gebäude für Wasser- und Schiffbau (VWS) werden normal zur Südfassadenoberfläche in vier unterschiedlichen Höhen die in Holzkonstruktionen integrierten Lanzen anstelle der Fenster eingesetzt, siehe Abbildung 29. In der fünften, siebten und neunten Etage sind drei Lanzen übereinander angeordnet. In der achten Etage befindet sich eine Lanze zwischen den drei Ansaugvarianten aus Kapitel 4.2.



Abbildung 29 Lanzen zur Temperaturmessung am VWS-Gebäude

4.5 Messung der Fassadenoberflächentemperatur

Die Messungen der Fassadenoberflächentemperaturen ermöglichen Aussagen über die Aufheizung der Fassadenfläche und somit über die Grenzschichtbildung (Kapitel 4.10.4) und die konvektive Wärmeabgabe (Kapitel 6.1). Der Einfluss der Fassadentemperatur auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wird in Kapitel 4.10.7 ausgewertet.

Die Temperaturmessungen der Fassadenoberfläche finden an den gleichen zwei Gebäuden der Technischen Universität Berlin statt (Abbildung 19), an denen auch die dezentralen Ansaugtemperaturen gemessen werden. Die Messstellen sitzen auf der Oberfläche der Holzkonstruktionen der Ansaugvarianten. Die Oberflächentemperaturen werden mit Thermoelementen des Typs K Nickel-Chrom-Nickel gemessen, die auf 0,1 K genau kalibriert sind (Kapitel 4.1).

4.6 Messung der Wetterdaten

Der Einfluss der Wetterdaten auf die dezentralen Ansaugtemperaturen wird in Kapitel 4.10.7 ausgewertet. Die Wetterstation (Abbildung 30) ist auf dem Dach des VWS-Gebäudes der TU-Berlin installiert und seit dem 28.12.2006 in Betrieb. Sie erfasst Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Diffus- und Globalstrahlung. Die Messbereiche der Sensoren der Firma Adolf Thies GmbH & Co. KG stehen in der Tabelle 6.

Tabelle 6 Sensoren der Wetterstation

Sensor	Messgröße	Messbereich	Abweichung
Hygro-Thermogeber	Temperatur	-30 - 70 °C	+/- 0,1 K
	Rel. Feuchte	0 - 100 %	+/- 2 %
Windgeber	Geschwindigkeit	0,5 - 50 m/s	+/- 0,5 m/s
Windrichtungsgeber	Windrichtung	0 - 360°	+/- 5°
Pyranometer	Globalstrahlung	0 - 1400 W/m ²	+/- 5 W/m ²
Pyranometer	Diffusstrahlung	0 - 1400 W/m ²	+/- 5 W/m ²
Pyranometer	Fassadenstrahlung	0 - 1400 W/m ²	+/- 5 W/m ²

Das Hygro-Thermometer mit Strahlungsschutz, der Windgeber, der Windrichtungsgeber und das Pyranometer zur Messung der horizontalen Globalstrahlung sind an einem 3 m hohen Mast montiert. Der Mast steht in einem Kreuz aus U-Profilen 2 m von der Dachkante entfernt, wodurch der VDI 3786 [33] entsprochen wird, nach der Windmesser auf Flachdächern in der Dachmitte statt am Dachrand aufgestellt werden, damit etwaige Vorzugsrichtungen vermieden werden. Der Schattenring, der das Pyranometer zur Messung der horizontalen Diffusstrahlung verschattet, wird direkt auf dem U-Profil montiert. Das unter der Dachkante sitzende Pyranometer misst die kurzweilige Strahlung auf die südliche Fassadenfläche.



Abbildung 30 Wetterstation auf dem VWS-Gebäude

4.7 Auswertung der gemessenen Temperaturen vor der Fassade

Im Stadtgebiet wird die Luft durch die Abgase, die dichte Bebauung und die asphaltierten Straßen aufgeheizt. Daher können lokale Lufttemperaturen entstehen, die von gemessenen Außenlufttemperaturen einer Wetterstation abweichen. Vor der Fassade des VWS-Gebäudes befindet sich ein angrenzender Flachbau, dessen Dachfläche die Außenlufttemperatur lokal erwärmen kann. Diese lokale Erwärmung beeinflusst die Ausbildung des Temperaturprofils vor der Fassade.

Die Temperaturen vor der VWS-Fassade (Kapitel 4.4) werden als Mittelwerte der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr in unterschiedlichen Abständen normal zur Fassadenoberfläche dargestellt. In Abbildung 31 ist der Temperaturverlauf vor der VWS-Fassade für einen warmen Tag und in Abbildung 32 für einen kalten Tag abgebildet. Die lokale Umgebungstemperatur ist jeweils größer als die gemessene Außenlufttemperatur der Wetterstation (Kapitel 4.6). Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, erfolgt innerhalb des ersten Zentimeters vor der Fassade ein großer Temperaturabbau. Danach wird der Temperaturgradient kleiner und der Temperaturabbau sinkt. Die Annäherung an die lokale Umgebungstemperatur beginnt fünfzehn Zentimeter vor der Fassade. Sie ist in Abbildung 31 dreißig Zentimeter und in Abbildung 32 zwanzig Zentimeter vor der Fassade abgeschlossen.

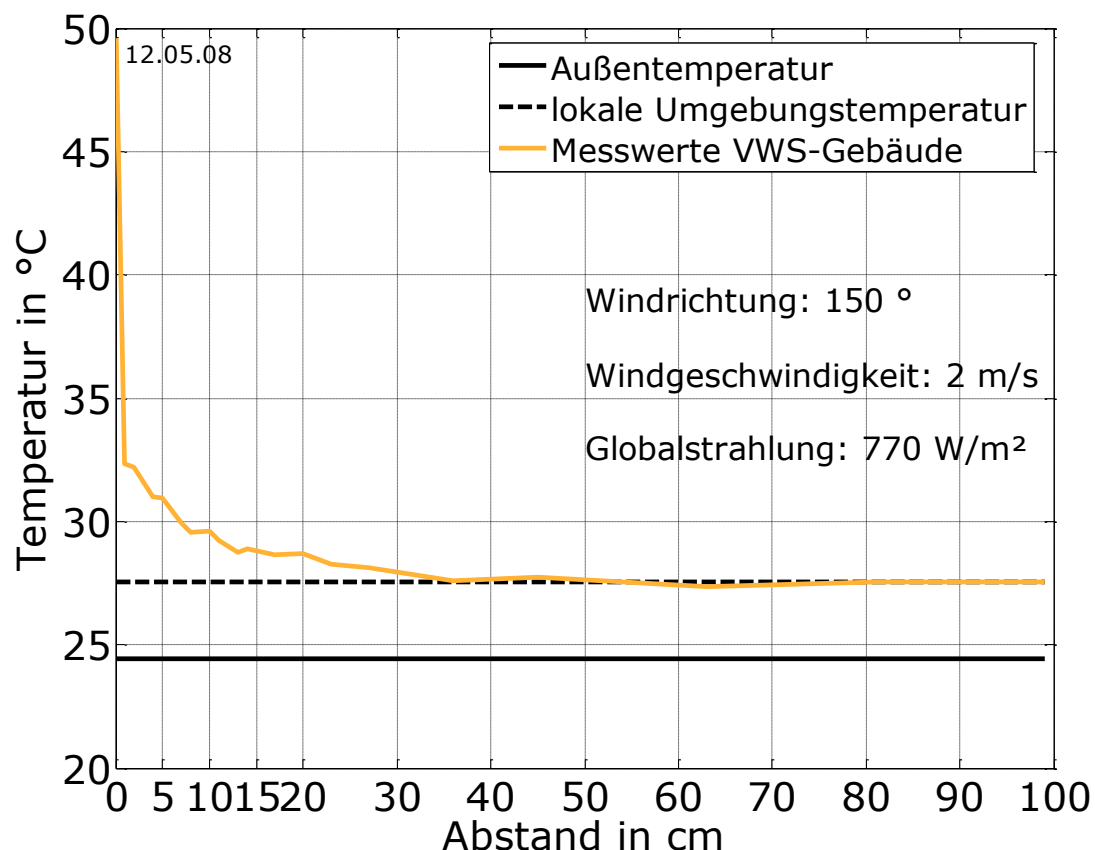


Abbildung 31 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei 60° Anströmung an einem warmen Tag

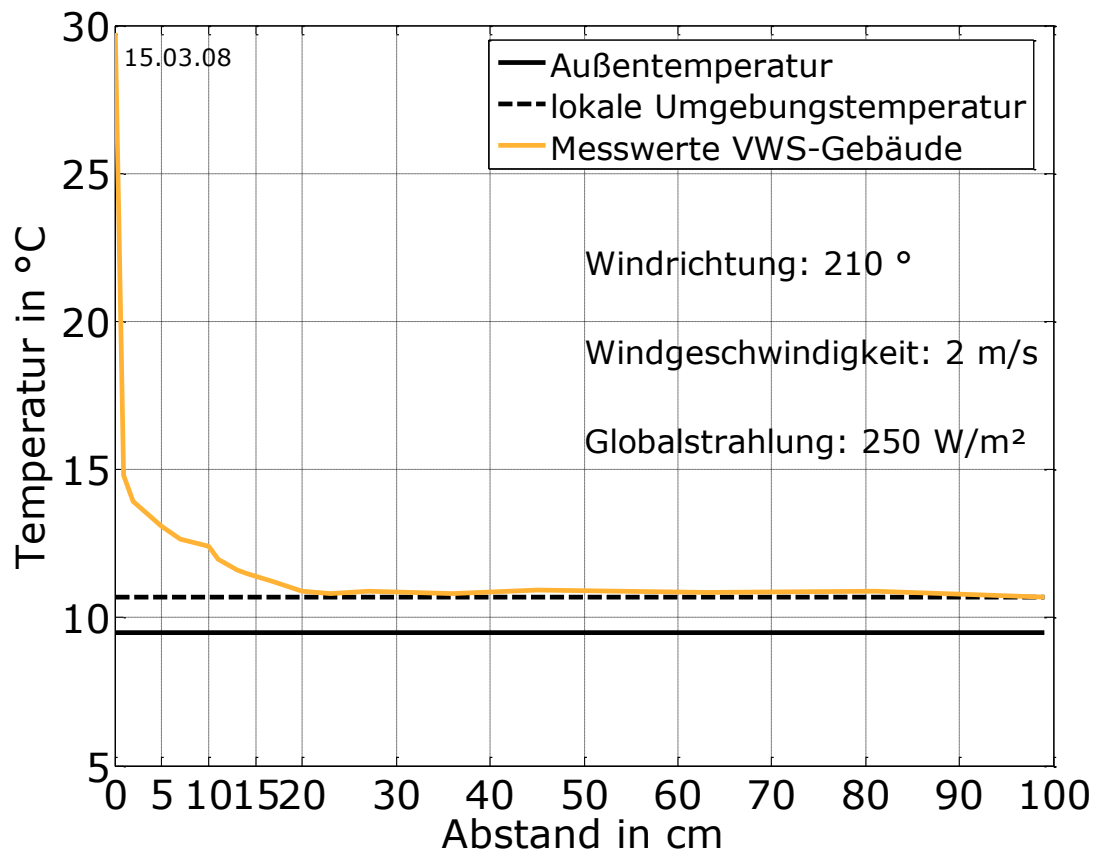


Abbildung 32 Temperaturprofile vor der VWS-Fassade bei 60° Anströmung an einem kalten Tag

Die Temperaturverläufe vor der VWS-Fassade dienen im Kapitel 7.6 zur Validierung der Strömungsberechnungen. Die Modellbildung (Kapitel 7.1) des VWS-Gebäudes erfolgt ohne den Flachbau, um Modellgröße, Gitteranzahl und Rechenzeit klein zu halten. Im Folgenden werden die Einflussgrößen diskutiert, die eine Erhöhung der lokalen Umgebungstemperatur oberhalb des Flachdachs verursachen. Es wird beurteilt, ob das Weglassen des Flachbaus ein tolerierbarer Fehler bei der Validierung der Strömungsberechnungen ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen oben links das Temperaturprofil vor der VWS-Fassade, oben rechts die Globalstrahlung, unten links die Windrichtung und unten rechts die Windgeschwindigkeit des betrachteten Tages. Abgebildet sind jeweils die Mittelwerte der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr.

Die VWS-Fassade wird bei der Windrichtung 180° frontal angeströmt. Bei Windgeschwindigkeiten kleiner 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung lokale Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur der Wetterstation aus. Eine Erhöhung der lokalen Umgebungstemperatur bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s zeigen Abbildung 33 für eine Globalstrahlung von 800 W/m² und Abbildung 34 für eine Globalstrahlung von 350 W/m². Bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung keine lokalen Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur aus, wie die Abbildung 35 für eine Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s zeigt.

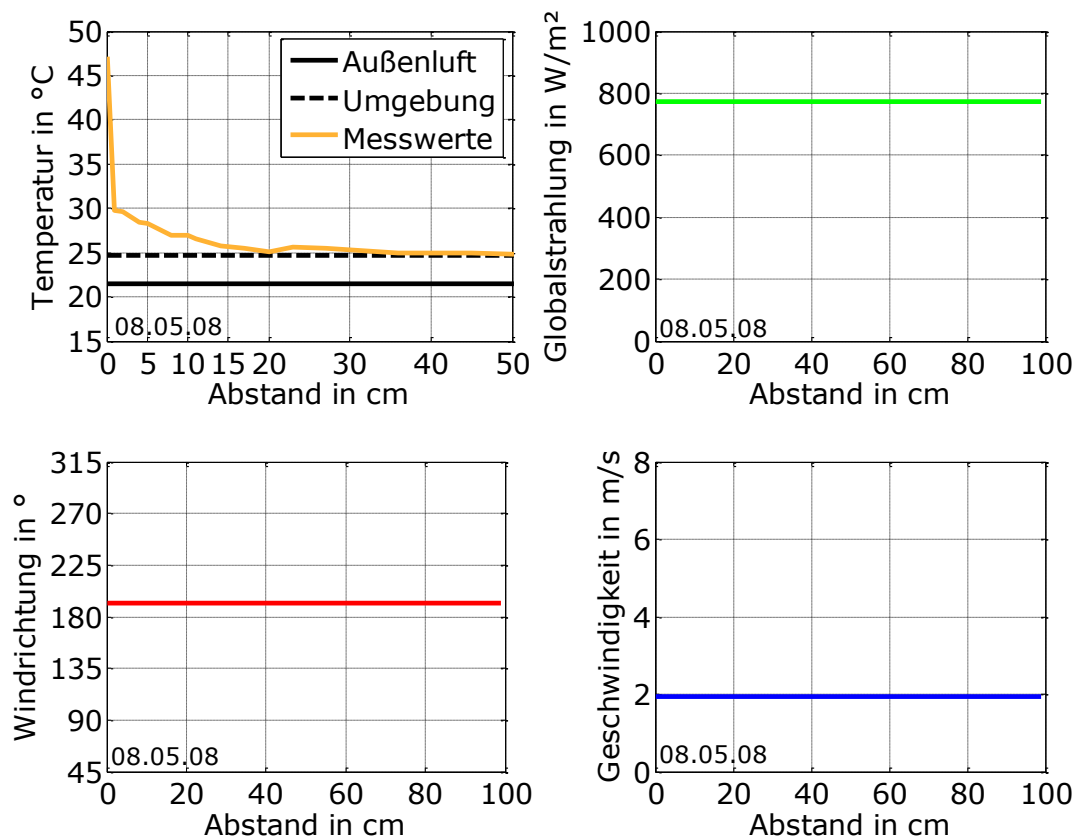


Abbildung 33 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei frontaler Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und hoher Globalstrahlung

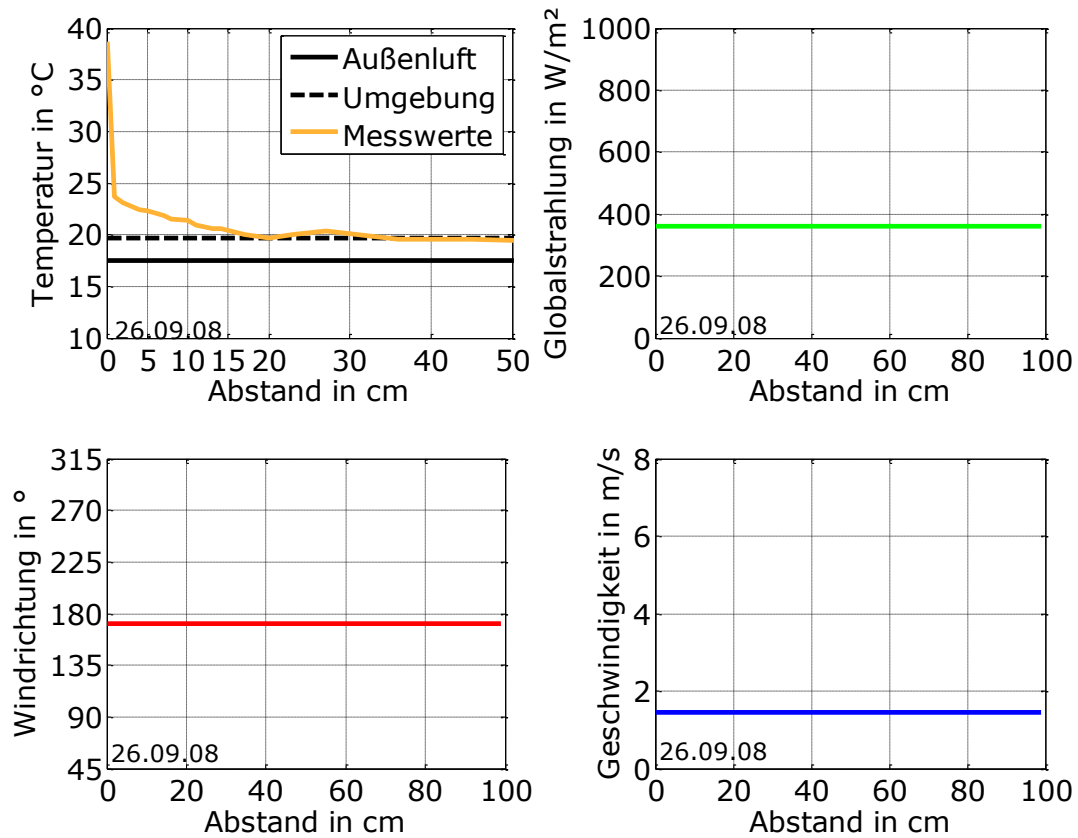


Abbildung 34 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei frontaler Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und kleiner Globalstrahlung

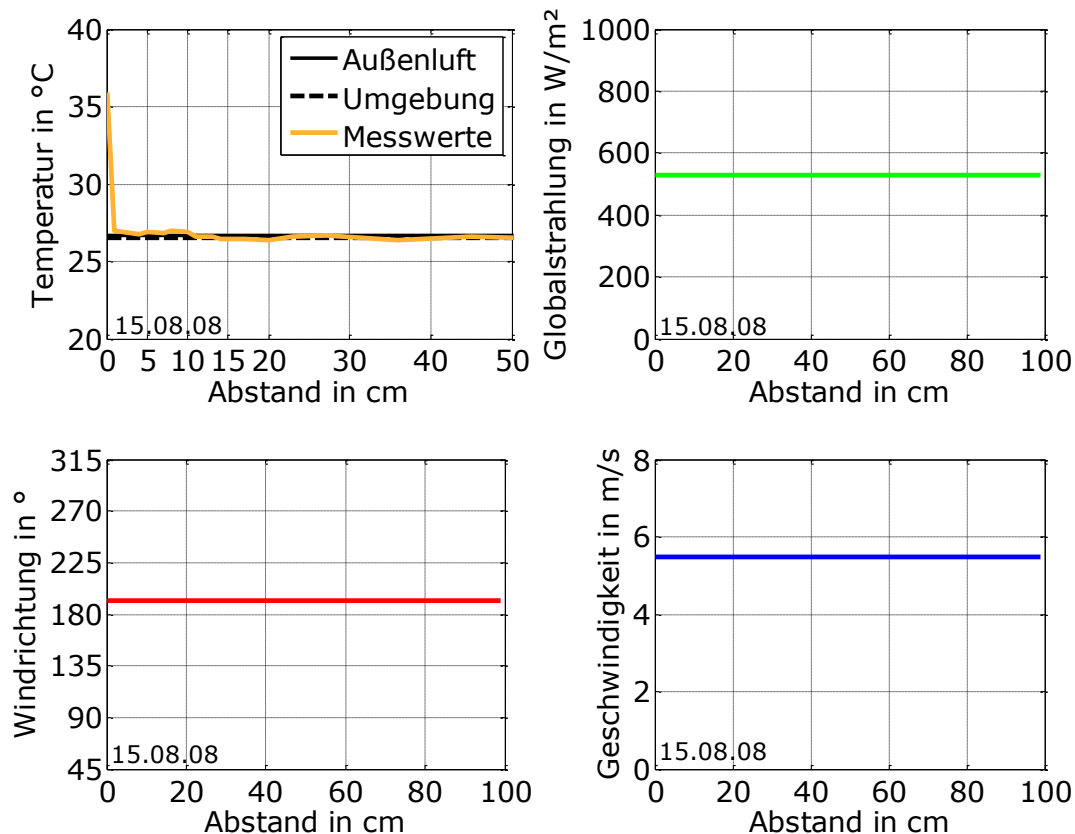


Abbildung 35 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei frontaler Anströmung an einem Tag mit hoher Windgeschwindigkeit und mittlerer Globalstrahlung

Die VWS-Fassade wird bei der Windrichtung 210° und 150° mit einem Anströmwinkel von 60° (Kapitel 7.7.1) angeströmt. Bei Windgeschwindigkeiten kleiner 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung lokale Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur der Wetterstation aus. Eine Erhöhung der lokalen Umgebungstemperatur bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s zeigt sowohl die Abbildung 31 für eine Globalstrahlung von 770 W/m^2 als auch die Abbildung 32 für eine Globalstrahlung von 250 W/m^2 . Bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung keine lokalen Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur aus, wie die Abbildung 36 für eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s zeigt.

Bei Windrichtungen 90° und 270° wird die VWS-Fassade parallel angeströmt. Unabhängig von der Globalstrahlung zeigt sich bei Windgeschwindigkeiten kleiner 3 m/s eine lokale Temperaturerhöhung gegenüber der Außenlufttemperatur der Wetterstation. Sowohl die Abbildung 37 für eine Globalstrahlung von 800 W/m^2 als auch die Abbildung 38 für eine Globalstrahlung von 400 W/m^2 bestätigen diese Aussage. Bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung keine lokalen Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur der Wetterstation aus, wie die Abbildung 39 für eine Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s zeigt.

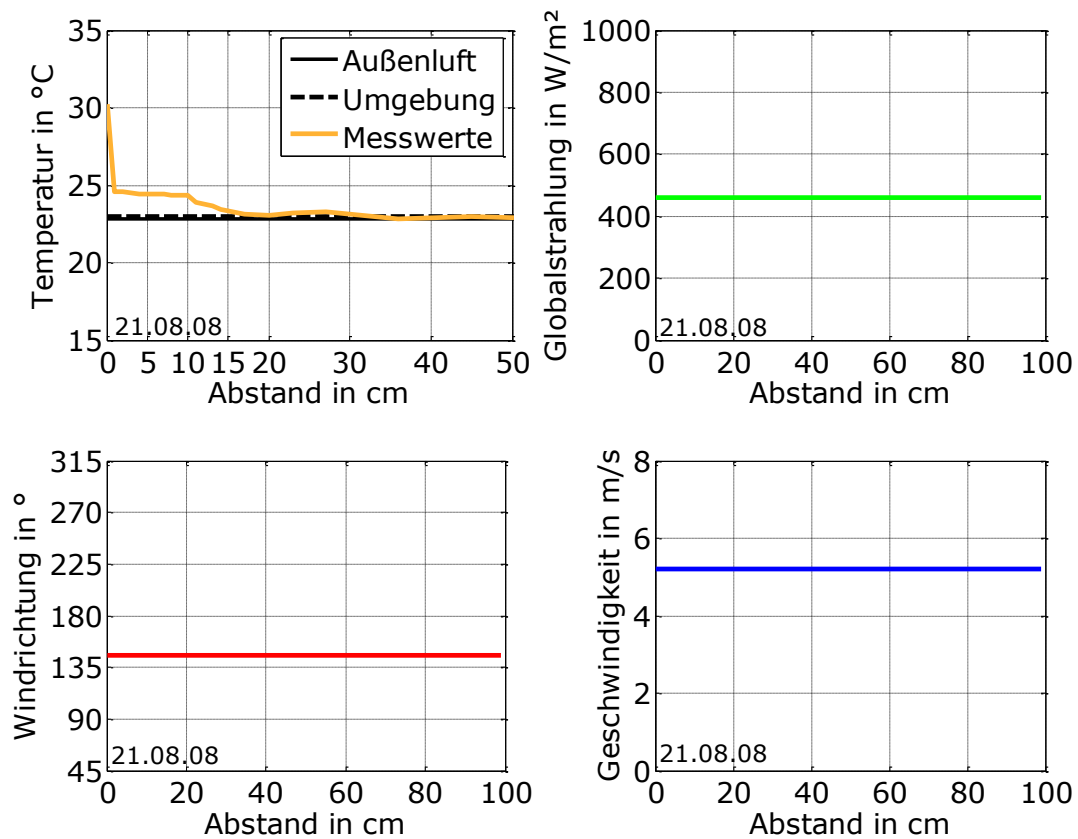


Abbildung 36 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei 60° Anströmung an einem Tag mit hoher Windgeschwindigkeit und mittlerer Globalstrahlung

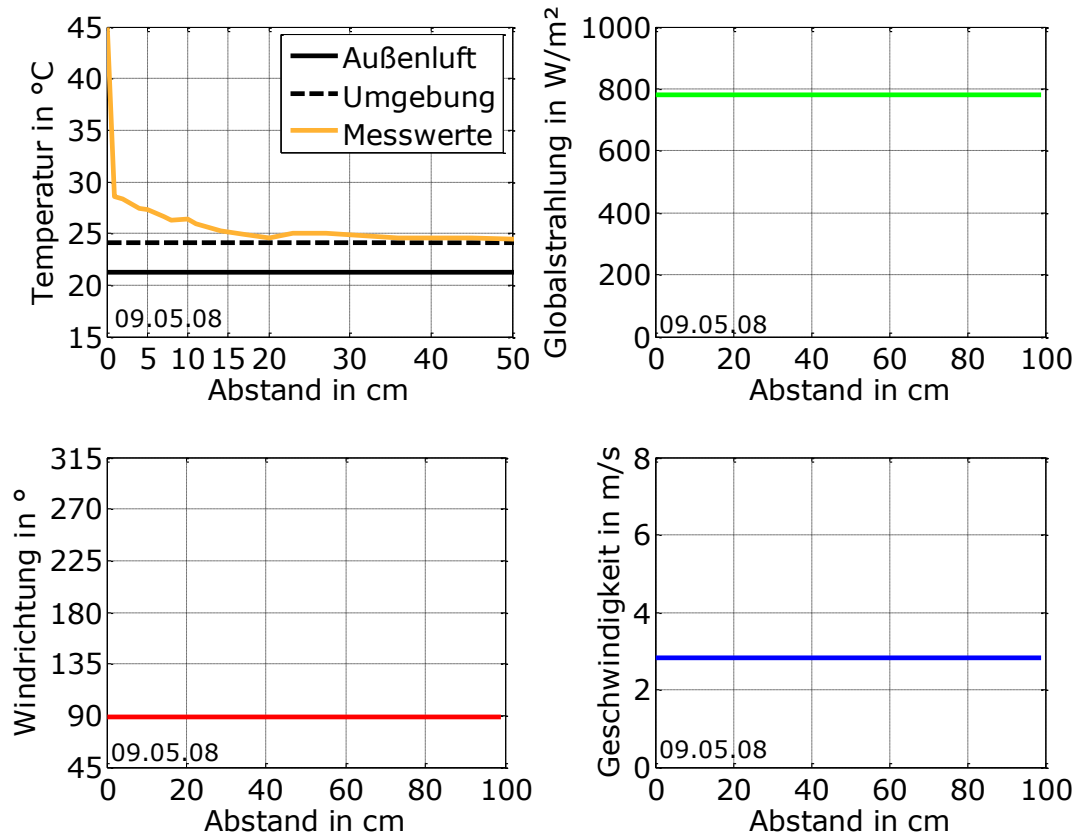


Abbildung 37 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei paralleler Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und hoher Globalstrahlung

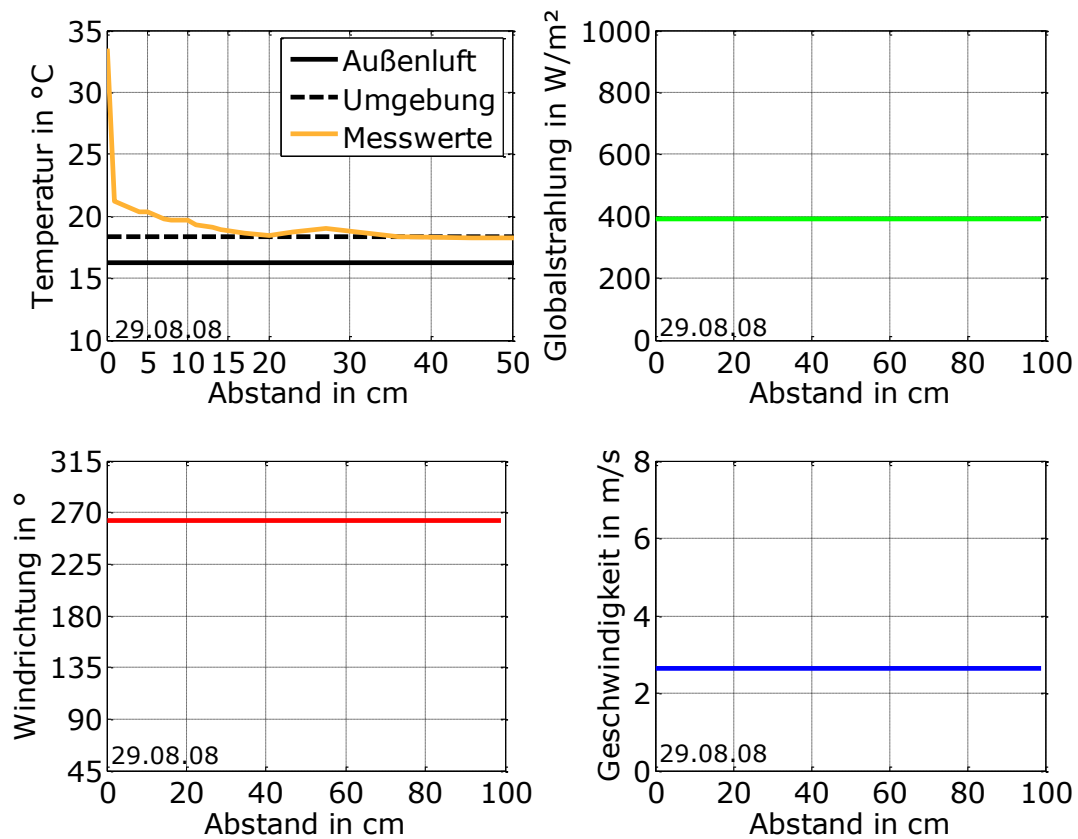


Abbildung 38 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei paralleler Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und kleiner Globalstrahlung

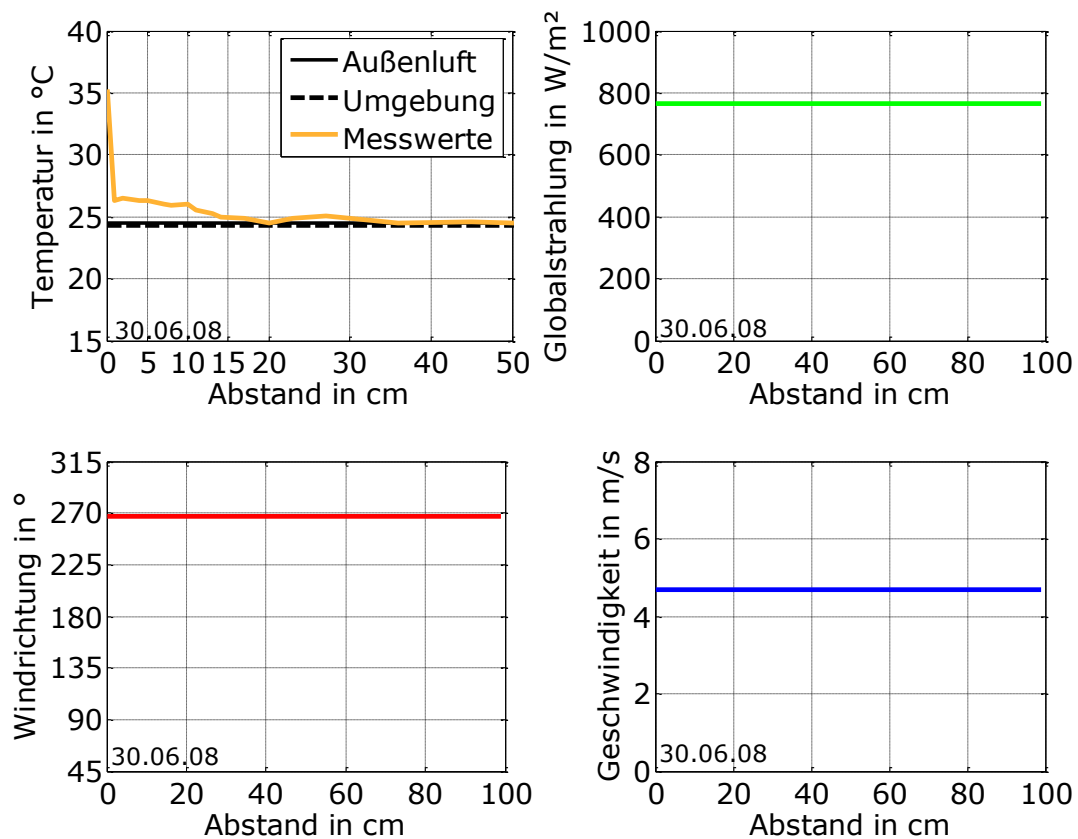


Abbildung 39 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei paralleler Anströmung an einem Tag mit hoher Windgeschwindigkeit und hoher Globalstrahlung

Bei Windrichtungen 120° und 240° wird die VWS-Fassade mit einem Anströmwinkel von 30° (Kapitel 7.7.1) angeströmt. Unabhängig von der Globalstrahlung zeigt sich bei Geschwindigkeiten kleiner 3 m/s eine lokale Temperaturerhöhung gegenüber der Außenlufttemperatur der Wetterstation. Die Abbildung 40 für eine Globalstrahlung von 800 W/m^2 und die Abbildung 41 für eine Globalstrahlung von 200 W/m^2 bestätigen diese Aussage. Bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s bilden sich unabhängig von der Globalstrahlung keine lokalen Umgebungstemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur der Wetterstation aus, wie die Abbildung 42 für eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s zeigt.

Die Beaufort-Skala beschreibt Windgeschwindigkeiten kleiner 3 m/s als schwachen Wind, der im Gesicht spürbar ist. Bei diesen kleinen Windgeschwindigkeiten verursacht der Flachbau vor der VWS-Fassade bei frontaler, paralleler, 30° und 60° Anströmung der Fassade eine Erhöhung der lokalen Umgebungstemperatur. Bei Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s nähern sich die Temperaturprofile unabhängig von der Anströmung stets der Außenlufttemperatur der Wetterstation an. Eine lokale Temperaturerhöhung verursacht durch den Flachbau tritt nicht auf. Die Validierung der Strömungssimulationen im Kapitel 7.6 erfolgt daher mit Temperaturprofilen an Messtagen mit Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s . Somit ist das Modell ohne Flachbau in Kapitel 7.6 validierbar.

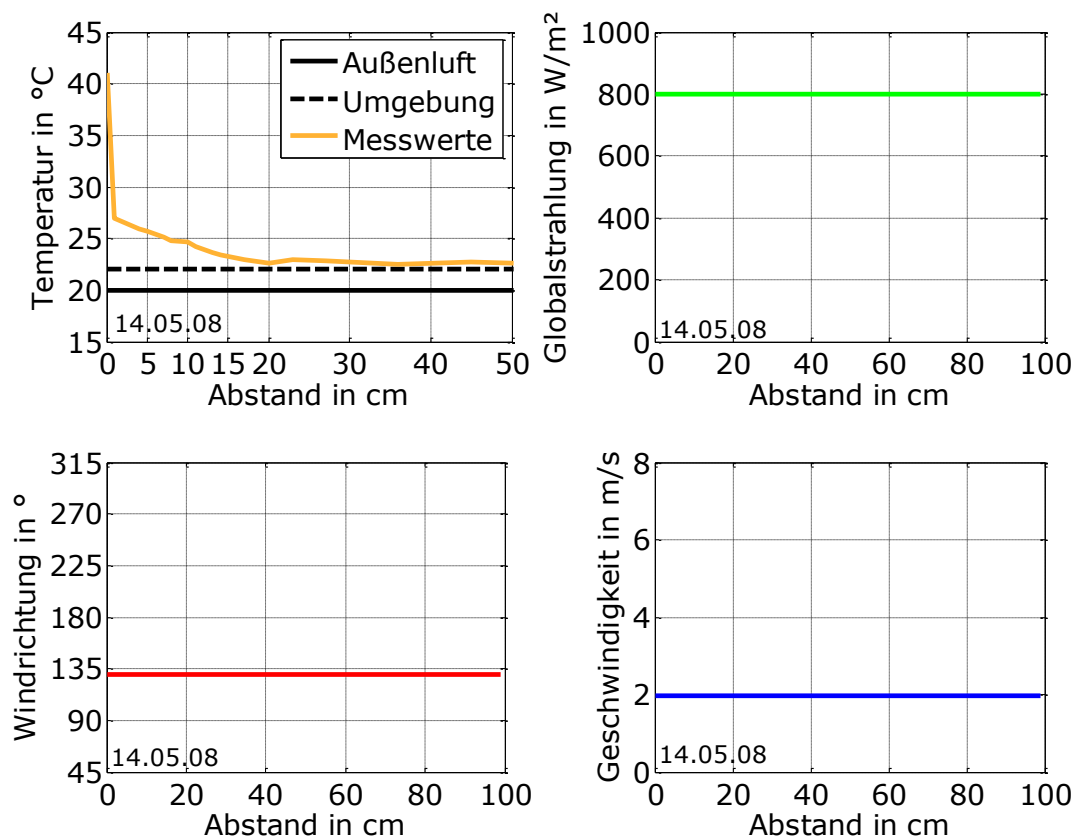


Abbildung 40 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei 30° Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und hoher Globalstrahlung

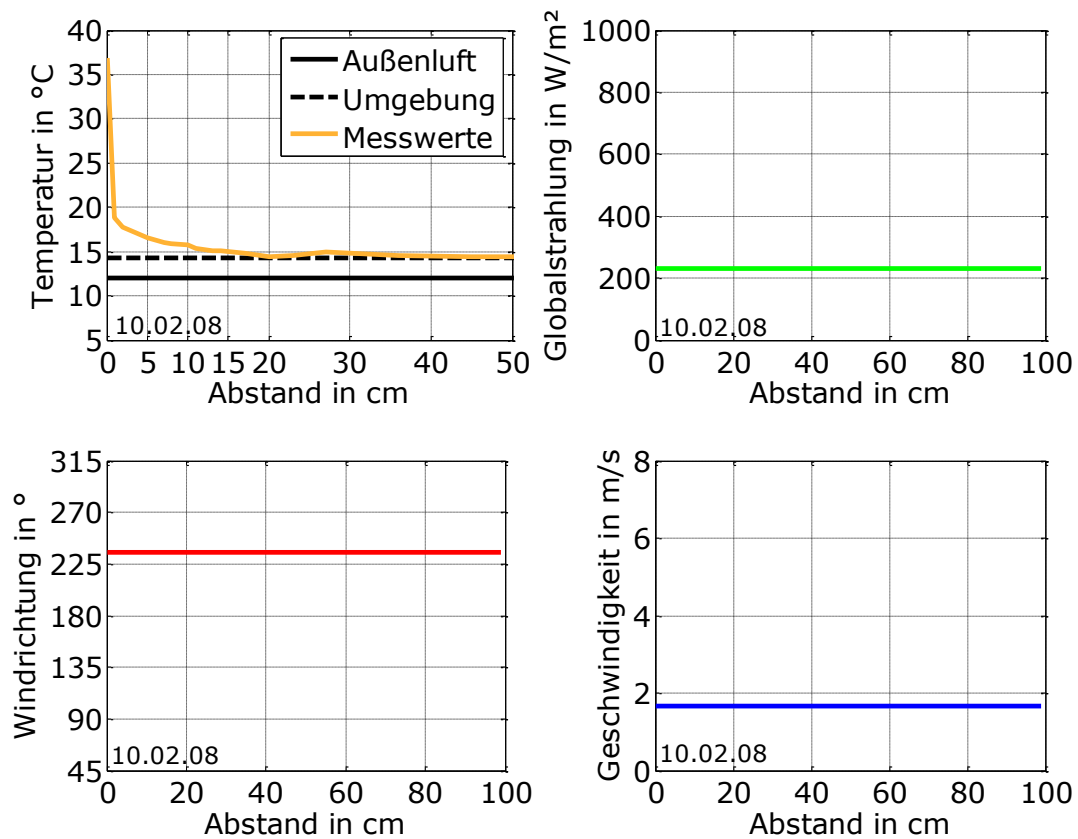


Abbildung 41 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei 30° Anströmung an einem Tag mit kleiner Windgeschwindigkeit und kleiner Globalstrahlung

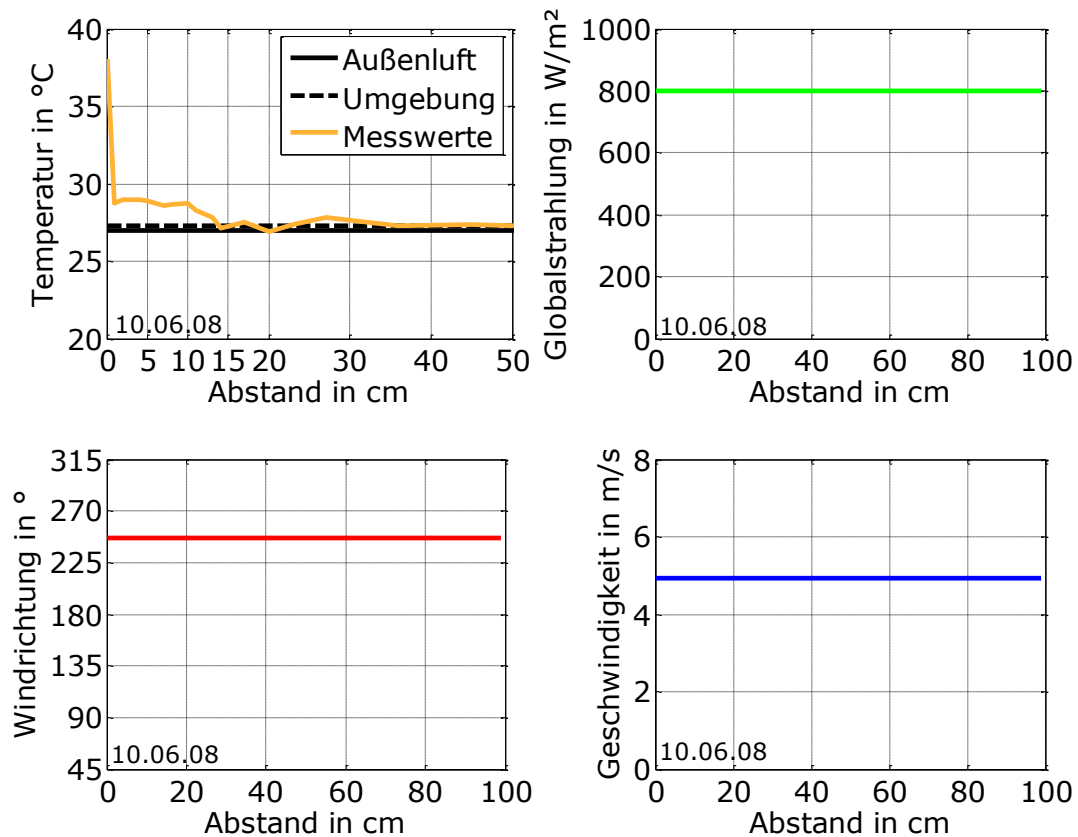


Abbildung 42 Temperaturprofil vor der VWS-Fassade bei 30° Anströmung an einem Tag mit hoher Windgeschwindigkeit und hoher Globalstrahlung

4.8 Auswertung der Strömung an der VWS-Fassade

Die Ausbildung der Strömung vor der Fassade beeinflusst die konvektive Wärmeabgabe in die fassadennahe Grenzschicht (Kapitel 2.2.2). Die Archimedes-Zahl (Kapitel 2.5.1.3) setzt Trägheits- und Auftriebskräfte ins Verhältnis und trifft eine Aussage, ob die freie oder die erzwungene Konvektion überwiegt. Bei $Ar < 1$ überwiegt die erzwungene Strömung bei $Ar > 1$ die freie Strömung. Die Stundenmittelwerte der Archimedes-Zahlen werden für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr mit den Jahresmesswerte am VWS-Gebäude berechnet. Die Tabelle 1 im Kapitel 2.5.1.3 führt die Daten zur Berechnung auf. Die obere Abbildung 43 zeigt die Werte der Archimedes-Zahl in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit. 43 % der Archimedes-Zahlen sind kleiner und 56 % größer als eins. Von einer ausschließlich freien Strömung kann daher nicht ausgegangen werden. Die freie Strömung am VWS-Gebäude wird durch die vorherrschende Windgeschwindigkeit von einer erzwungenen Strömung überlagert.

Mit Hilfe der Strömungsberechnungen (Kapitel 7) wird der Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf den Wärmeübergangskoeffizient der Fassadenoberfläche ermittelt. Für die Wahl des Turbulenzmodells (Kapitel 2.5.2), das für die Simulationsrechnungen verwendet werden soll, ist die Kenntnis wichtig, ob die Strömung laminar oder turbulent ist.

Die Rayleigh-Zahl bestimmt bei freier Strömung die Turbulenz. Die freie Strömung wird auch als Auftriebsströmung bezeichnet. Sie ist für Rayleigh-Zahlen $Ra > 10^{12}$ (Kapitel 2.5.1.1) turbulent und für $Ra < 10^8$ laminar. Der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Auftriebsströmung findet zwischen $10^8 < Ra < 10^{10}$ statt. Die Stundenmittelwerte der Rayleigh-Zahlen werden für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr mit den Jahresmesswerte am VWS-Gebäude berechnet. Die Tabelle 1 im Kapitel 2.5.1.3 führt die Daten zur Berechnung auf. Die untere Abbildung 43 zeigt die Werte der Rayleigh-Zahl in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit. 32 % der Rayleigh-Zahlen sind kleiner als 10^{12} und größer als 10^{10} . 67 % der Rayleigh-Zahlen sind größer als 10^{12} und kleiner als 10^{13} . Die Auftriebsströmung an der Fassade des VWS-Gebäudes ist nicht laminar, sondern überwiegend turbulent.

Die Reynolds-Zahl bestimmt bei erzwungener Strömung die Turbulenz. Für $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$ ist die Strömung turbulent (Kapitel 2.5.1.2). Die Stundenmittelwerte der Reynolds-Zahlen werden für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr mit den Jahresmesswerte am VWS-Gebäude berechnet. Die Tabelle 1 im Kapitel 2.5.1.3 führt die Daten zur Berechnung auf. Die Abbildung 44 zeigt die Werte der Reynolds-Zahl Re in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit. 97 % der Reynolds -Zahlen sind größer 10^5 und kleiner 10^7 . An der Fassade des VWS-Gebäudes ist die auftretende erzwungene Strömung turbulent.

Zusammenfassend herrscht an der VWS-Fassade eine überwiegend turbulente Auftriebsströmung, die von einer turbulenten erzwungenen Strömung überlagert wird. In Kapitel 7.5 ist das SST-Turbulenzmodell anwendbar.

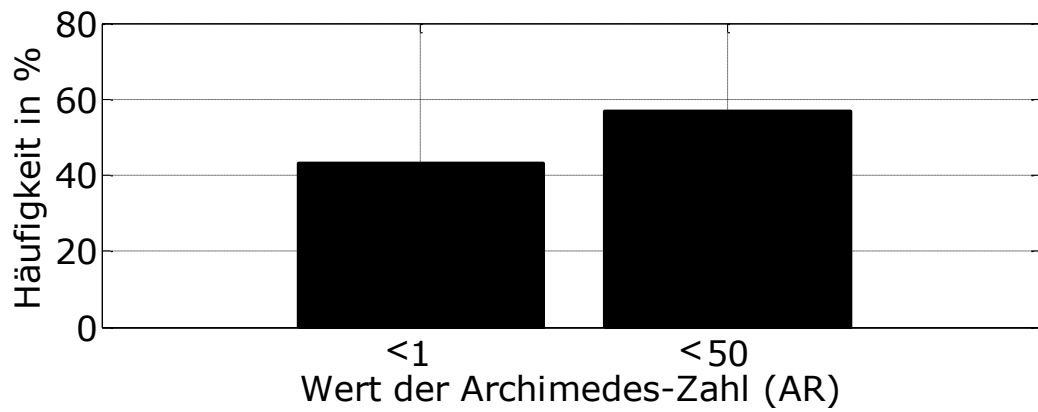


Abbildung 43 Häufigkeit der Archimedes- und Rayleigh-Zahlen der Stundenmittelwerte der Jahresmesswerte am VWS-Gebäude

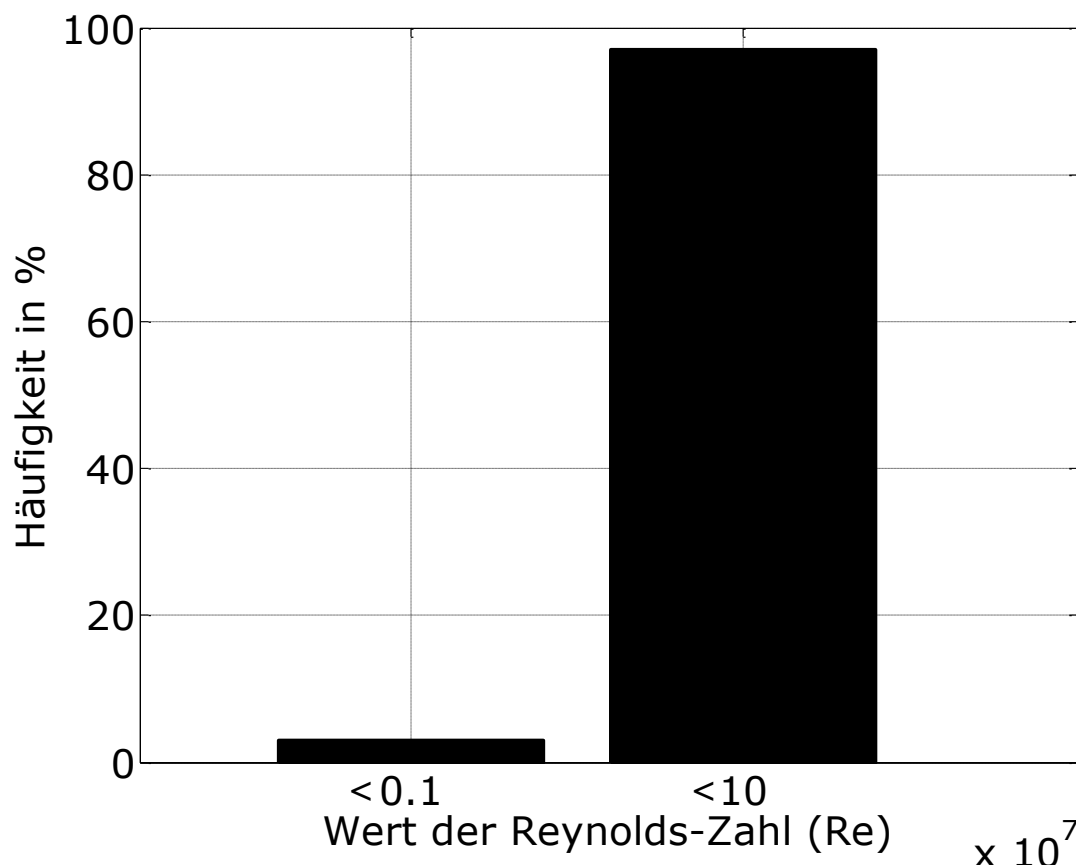


Abbildung 44 Häufigkeit der Reynolds-Zahl der Stundenmittelwerte der Jahresmesswerte am VWS-Gebäude

4.9 Auswertung der Grenzschichtdicke

Die Auswertung der Temperaturprofile vor der VWS-Fassade erfolgt in Kapitel 4.7. Der angrenzende Flachbau vor dem VWS Gebäude kann eine lokale Temperaturerhöhung gegenüber der Außenlufttemperatur der Wetterstation bei Windgeschwindigkeiten kleiner 3 m/s verursachen. In der fassadennahen Grenzschicht treten Temperaturänderungen auf. Ihre Grenze (Kapitel 2.2.2) verläuft da, wo die fassadennahe Lufttemperatur vernachlässigbar um 1 % von der lokalen Umgebungstemperatur abweicht.

Zur Auswertung der Grenzschichtdicken vor der VWS-Fassade werden die Abstände zur VWS-Fassade ermittelt, bei denen der gemessene fassadennahe Temperaturwert 99 % der lokalen Umgebungstemperatur erreicht hat. Als lokale Umgebungstemperatur wird die Temperatur vor der VWS-Fassade im Abstand von 1 m verwendet. Die Messwerte der Temperaturen vor der VWS-Fassade (Kapitel 4.4) werden als Mittelwert der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr für jeden Messtag berücksichtigt.

Die Häufigkeitsverteilung der Grenzschichtdicken vor der VWS-Fassade ist in Abbildung 45 gezeigt. 15 % der Grenzschichtdicken sind kleiner als 10 cm. Am häufigsten mit 52 % bilden sich Grenzschichtdicken zwischen 10 cm und 20 cm aus. Grenzschichtdicken größer als 30 cm treten mit einer Häufigkeit unterhalb von 5 % auf.

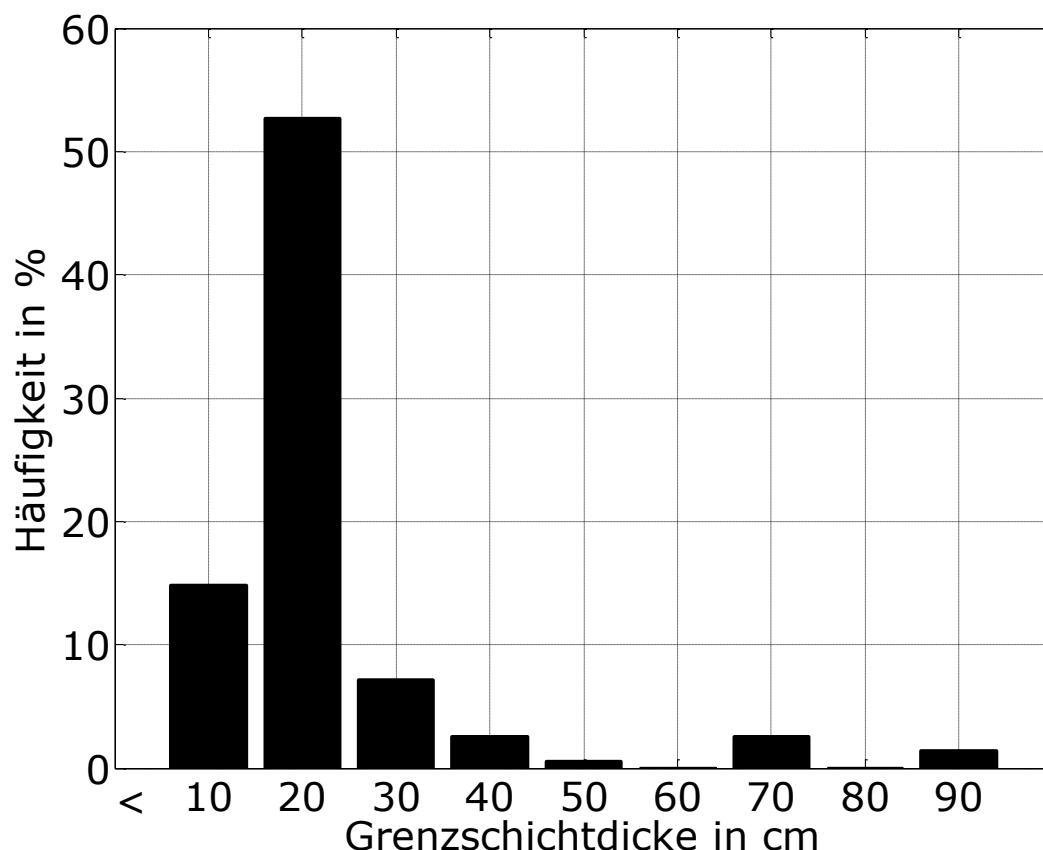


Abbildung 45 Häufigkeit der Grenzschichtdicken vor der VWS-Fassade

Unabhängig vom Volumenstrom (Kapitel 3.2) wird bei runden und rechteckigen Öffnungen die Luft überwiegend aus Entfernungen bis zu 30 cm

angesaugt. Die Ansaugung erfolgt somit mit großer Häufigkeit innerhalb der aufgebauten fassadennahen Grenzschicht. Die zu erwartende Ansaugtemperatur in Abhängigkeit der Ansaugöffnung wird in Kapitel 4.10.6 erläutert.

Die Grenzschichtdicke ist von der Strömungsart (frei oder erzwungen) und von der Turbulenz der Strömung (laminar oder turbulent) abhängig. Kapitel 2.2.3 beschreibt in Abbildung 7 die Strömungsbereiche der freien Strömung (Auftriebsströmung). Bei turbulenter Auftriebsströmung bilden sich größere Grenzschichten aus als bei laminarer.

Kapitel 2.2.2 beschreibt den theoretischen Temperaturverlauf in der laminaren Grenzschicht der Auftriebsströmung nach E. Pohlhausen [9]. An der VWS-Fassade erfolgt die Temperaturverteilung in der turbulenten Grenzschicht der Auftriebsströmung. Allerdings wird nach Kapitel 4.8 die überwiegend turbulente Auftriebsströmung ($Ra > 10^{12}$) an der VWS-Fassade von einer turbulenten erzwungenen Strömung überlagert.

Für den folgenden Vergleich zwischen Theorie und Messung werden Messtage herangezogen, an denen die Rayleigh-Zahl $Ra > 10^{12}$ und die Windgeschwindigkeiten kleiner 2m/s ist. Somit herrscht eine turbulente Auftriebsströmung an der VWS-Fassade mit geringem Einfluss der erzwungenen Strömung.

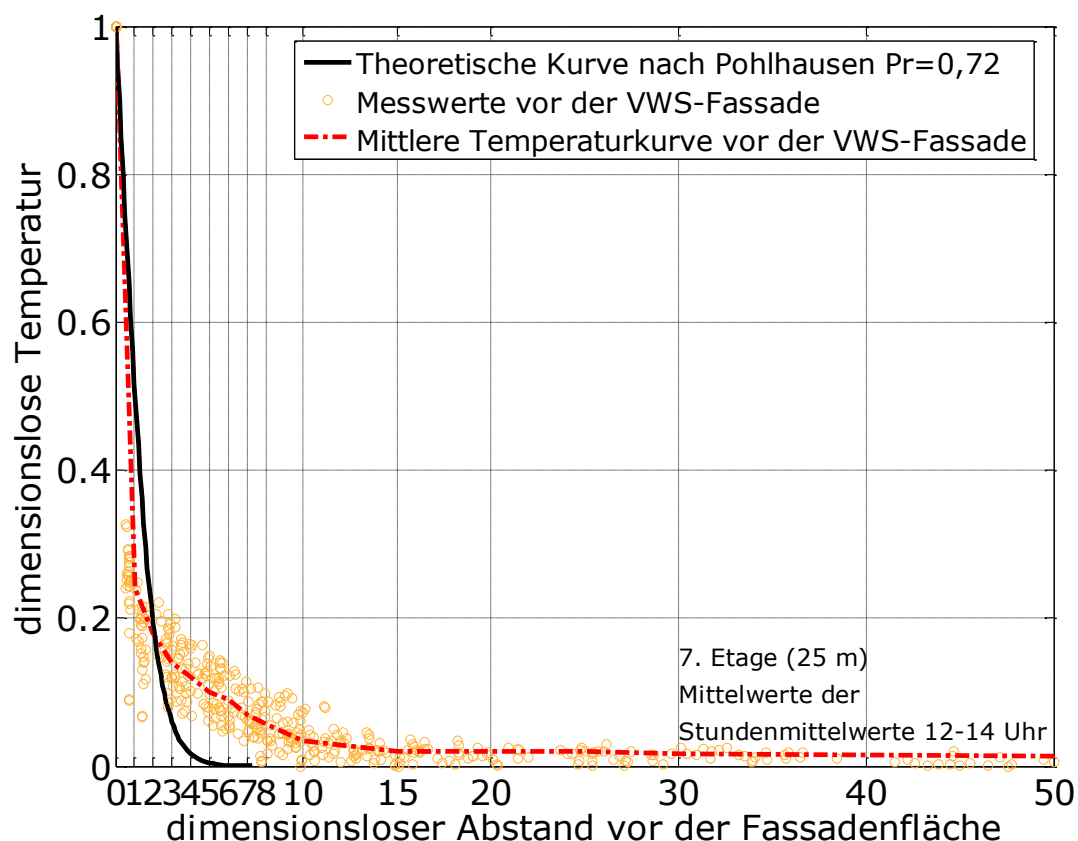


Abbildung 46 Temperaturverteilung in der laminaren Grenzschicht nach Pohlhausen im Vergleich mit den Temperaturmesswerten vor der VWS-Fassade

Die Abbildung 46 vergleicht die Temperaturverteilung in der laminaren Grenzschicht nach E. Pohlhausen mit den Temperaturmesswerte vor der VWS-Fassade. Es ist jeweils die dimensionslose Temperatur über dem di-

mensionslosen Abstand dargestellt. Für die Messwerte werden die dimensionslosen Temperaturen mit Gleichung (2-5) und die dimensionslosen Abstände vor der Fassadenfläche mit Gleichung (2-6) berechnet. Anstelle der Außenlufttemperatur T_{AL} wird die lokale Lufttemperatur im Abstand von 1 m zur VWS-Fassade verwendet. Die Messwerte der Oberfläche der VWS-Fassade (Kapitel 4.5) und der Temperaturen vor der VWS-Fassade (Kapitel 4.4) werden als Mittelwert der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr für Messtage mit turbulenter Auftriebsströmung ($Ra > 10^{12}$) und Windgeschwindigkeiten kleiner 2 m/s berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass für die Messwerte bei gleicher dimensionsloser Temperatur verschiedene dimensionslose Abstände möglich sind. Das bedeutet, dass sich vor der Fassade unterschiedliche Temperaturverläufe je nach ausgebildeter Grenzschichtdicke ausbilden. Eine mittlere Temperaturkurve ist gestrichelt eingezeichnet. Sie zeigt in Abhängigkeit des dimensionslosen Abstands die mittlere dimensionslose Temperatur der Messwerte. Der theoretische Temperaturverlauf in der laminaren Grenzschicht der Auftriebsströmung nach E. Pohlhausen weist eine überwiegend kleinere Temperaturgrenzschicht auf, als die aus den Messwerten ermittelte mittlere Temperaturkurve vor der VWS-Fassade. Die Abbildung 46 bestätigt unter der Voraussetzung, dass der Einfluss der erzwungenen Strömung gering ist, dass an der VWS-Fassade die Auftriebsströmung überwiegend turbulent ist (Kapitel 4.8).

Weitere theoretische Ansätze ([10], [13]) zur Berechnung der Grenzschichtdicken sind in Kapitel 2.2.3 aufgeführt. Sie dienen der Berechnung der Grenzschichtdicke des Geschwindigkeitsprofils bei turbulenter Auftriebsströmung. Wie bei E. Pohlhausen [9] wird die erzwungenen Strömung auch bei diesen Ansätzen nicht betrachtet.

Unter der Annahme, dass die Dicken der Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschicht ähnlich sind, werden die Grenzschichtdicken der Messwerte mit den theoretisch berechneten verglichen. Die Ermittlung der Grenzschichtdicke aus den Messwerten erfolgt über die Abstände zur VWS-Fassade, bei denen der gemessene fassadennahe Temperaturwert 99 % der Außenlufttemperatur erreicht hat. Die Berechnung der Grenzschichtdicken erfolgt über die theoretischen Ansätze für turbulente Strömungen von B. Kriegel (Gleichung 2-12) und E.R.G. Eckert und T.W. Jackson (Gleichung 2-11). Für die Berechnung und Ermittlung der Grenzschichtdicken vor der VWS-Fassade werden jeweils die Messwerte der Außenluft (Kapitel 4.6), der Oberfläche der VWS-Fassade (Kapitel 4.5) und der Temperatur in verschiedenen Abständen zur VWS-Fassade (Kapitel 4.4) als Mittelwert der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr berücksichtigt. Es werden Messtage mit turbulenter Auftriebsströmung ($Ra > 10^{12}$) und Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s betrachtet. Somit erfolgt die Auswertung für turbulente Auftriebsströmung mit überlagerter erzwungener Strömung.

In Abbildung 47 sind die näherungsweise berechneten, turbulenten Grenzschichtdicken und die ermittelten Grenzschichtdicken aus der Temperaturmessung vor der VWS-Fassade in Abhängigkeit der Übertemperatur der Fassade (Temperaturdifferenz zwischen Fassadenoberfläche und Außen-

luft) dargestellt. Die ermittelten Grenzschichtdicken vor der VWS-Fassade sind wesentlich kleiner als die näherungsweise berechneten, turbulenten Grenzschichtdicken der Auftriebsströmung.

Die Abbildung 47 beschreibt den Zusammenhang zwischen Grenzschichtdicke und Strömung, den bereits Kapitel 2.2.3 darlegt. Die Grenzschichtdicken δ_f bei freier Strömung (Auftriebsströmung) sind größer als die Grenzschichtdicken δ_{ef} bei freier Strömung, die von einer erzwungenen Strömung überlagert wird. Somit bestätigt die Abbildung 47, dass an der VWS-Fassade die vorherrschende turbulente Auftriebsströmung von einer erzwungenen Strömung überlagert wird (Kapitel 4.8). Die theoretischen Ansätze zur Berechnung der turbulenten Grenzschichtdicken ohne Wind-einfluss können nicht zur Berechnung der Grenzschichten vor Fassaden mit Windeinfluss verwendet werden.

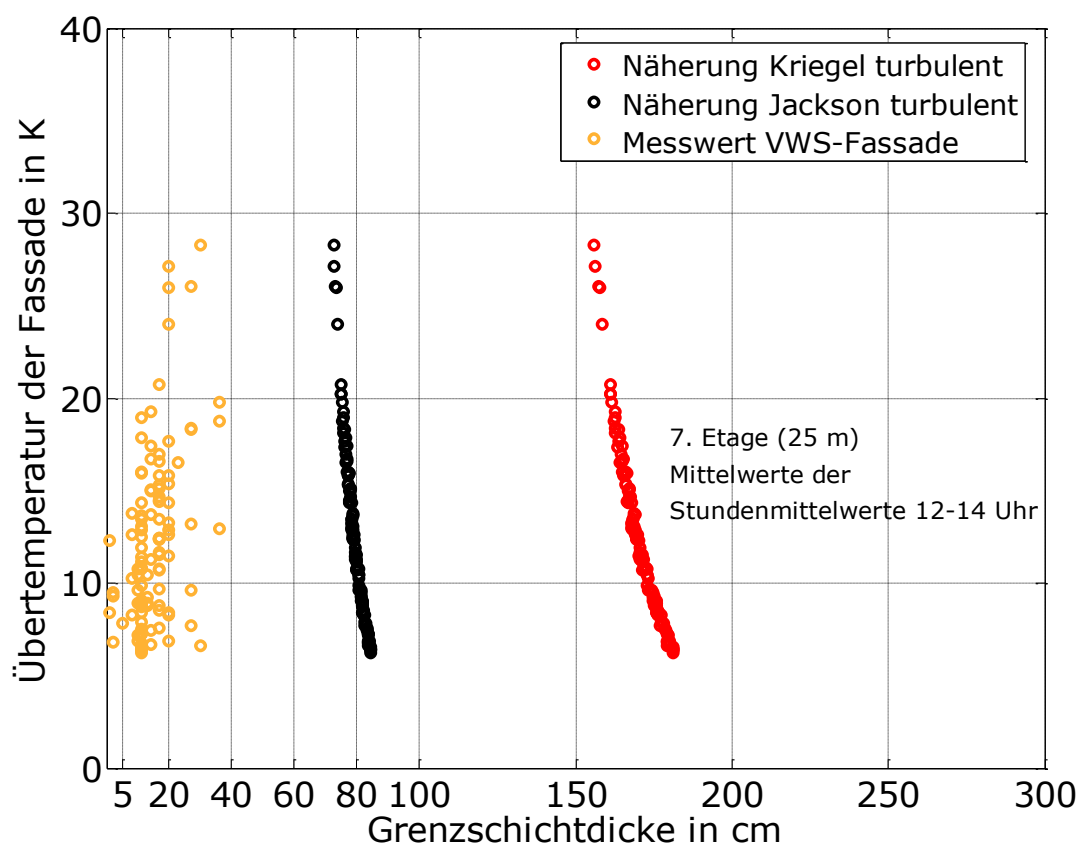


Abbildung 47 Theoretische, turbulente Grenzschichtdicken im Vergleich mit der Grenzschichtdicke vor der VWS-Fassade

Der theoretische Ansatz von E.R.G. Eckert und T.W. Jackson basiert auf experimentellen Untersuchungen. B. Kriegel [10] legt in seiner Dissertation dar, dass der theoretische Ansatz von E.R.G. Eckert und T.W. Jackson die Messergebnisse der experimentellen Untersuchungen nur unzureichend wiedergibt. Er führt eigene Messungen zur Aufstellung seines theoretischen Ansatzes durch. Die berechneten turbulenten Grenzschichtdicken der zwei Ansätze weichen daher voneinander ab.

4.10 Auswertung der Ansaugtemperaturen dezentraler Geräte

Für die Ausarbeitung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden Wetterdaten, Ansaugtemperaturen dezentraler und zentraler Anlagen, fassadennahe Temperaturwerte und Fassadentemperaturen erfasst. Die graphischen Auswertungen der kommenden Kapitel zeigen die Abhängigkeiten der gemessenen Ansaugtemperaturen der Fassadenlüftungsgeräte von folgenden Einflüssen.

- Einfluss der Anlagenwahl auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Fassadenstruktur auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Gebäudehöhe auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Grenzschieberwärmung auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Position der Ansaugöffnung auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Ansaugvariante auf die Ansaugtemperatur
- Einfluss der Wetterdaten und Fassadentemperaturen auf die Ansaugtemperatur

Im Folgenden sind für die Messungen zwischen 2007 und 2008 Tagesverläufe der Stundenmittelwerte der gemessenen Ansaugtemperaturen und Häufigkeitsverteilungen der berechneten Übertemperaturen der Ansaugvarianten dargestellt. Die Tagesverläufe der Ansaugtemperaturen bilden die Stundenmittelwerte des Zeitraumes zwischen 0–23 Uhr ab. Die Häufigkeitsanalysen werten für die Stunden zwischen 8–17 Uhr die Stundenmittelwerte der Messwerte vom 01.08.2007 bis 31.07.2008 aus. Der Zeitraum von 8–17 Uhr entspricht den Büroarbeitszeiten und fällt mit den höchsten zu erwartenden Übertemperaturen des Tages zusammen. Die Übertemperaturen werden aus der Differenz der Ansaugtemperatur und der Außenlufttemperatur berechnet. Alle Messwerte sind auf Plausibilität geprüft und die Datensätze entsprechend bereinigt.

4.10.1 Einfluss der Anlagenwahl

Die Anlagenwahl zwischen dezentral und zentral hat einen Einfluss auf die Ansaugtemperatur. In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die stündlichen Mittelwerte der Temperaturen über der Zeit aufgetragen, so dass Tages temperaturverläufe dezentraler (Kapitel 4.2) und zentraler Ansaugvarianten (Kapitel 4.3) und der Außenluft entstehen. Es zeigt sich, dass die Wahl der Anlagenform insbesondere an sonnigen Tagen einen erheblichen Einfluss auf die Ansaugtemperatur ausübt. Die Abbildung 48 zeigt für einen sonnigen Tag, dass die Ansaugtemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur liegen. Für die dezentrale Ansaugvariante „Versetzt zum Schlitz“ wird um 12 Uhr eine Übertemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur von 8 K erreicht. Für die zentrale Dachansaugung „Dach Ost“ wird um 12 Uhr eine Übertemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur von 2 K erreicht. Für den bewölkten Tag zeigt die Abbildung 49, dass sowohl für die zentrale als auch für die dezentrale Ansaugung eine Übertemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur von 1,4 K erreicht wird. Für bewölkte Tage weisen die dezentralen Ansaugvarianten keine höheren Ansaugtemperaturen als die zentralen Ansaugvarianten auf.

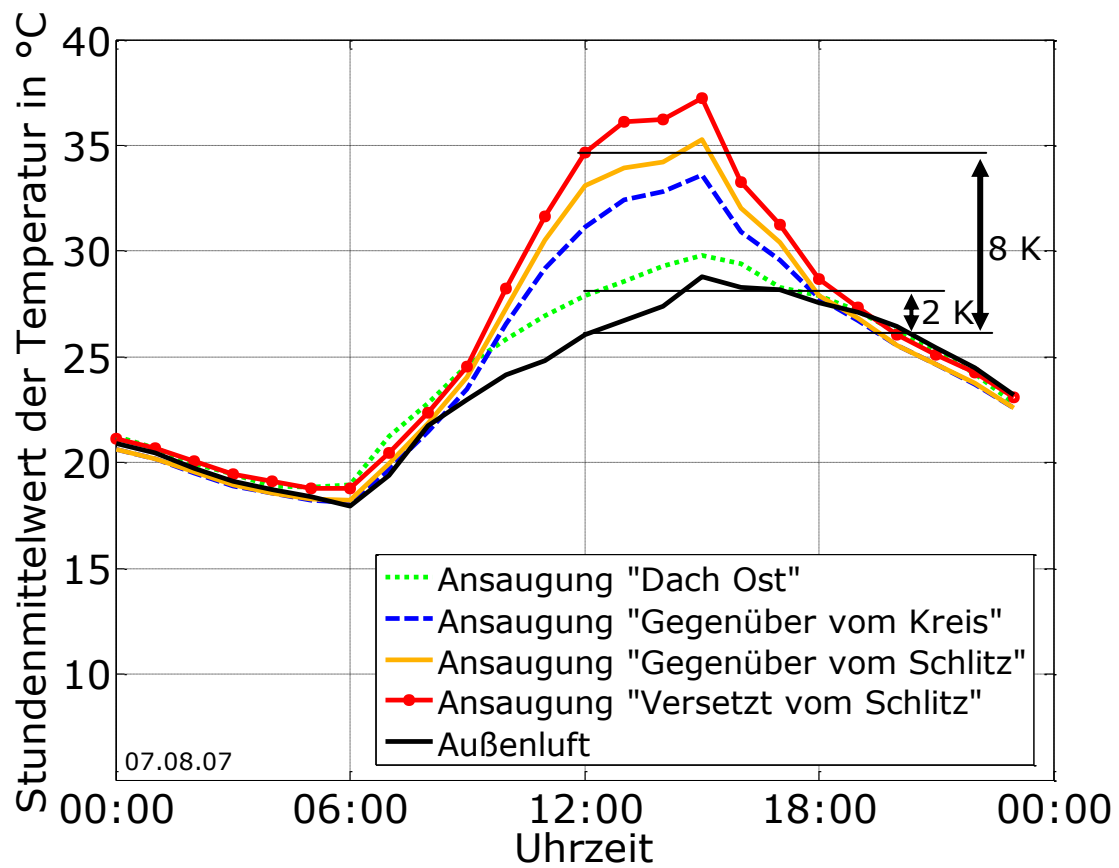


Abbildung 48 Vergleich zentraler und dezentraler Ansaugtemperaturen mit der Außentemperatur (sonnig, heißer Tag)

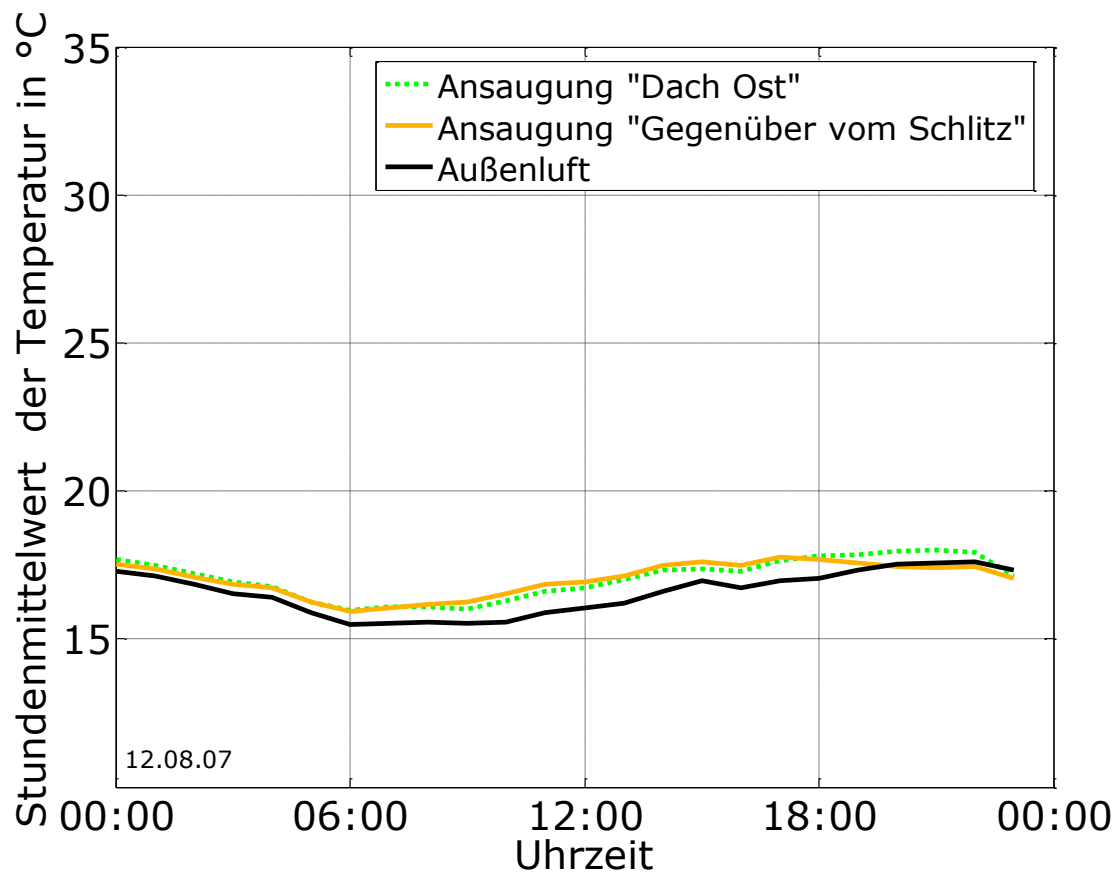


Abbildung 49 Vergleich zentraler und dezentraler Ansaugtemperaturen mit der Außentemperatur (bewölkt, kalter Tag)

Wie in Abbildung 48 für sonnige Tage gezeigt, liegen die Ansaugtemperaturen oberhalb der Außenlufttemperatur. Die Temperaturdifferenz der Ansaugtemperatur zur Außenlufttemperatur wird als Übertemperatur der Ansaugung bezeichnet. Sie wird für die Stundenmittelwerte des Zeitraums zwischen 8–17 Uhr der Jahresmesswerte berechnet. Die folgenden Kapitel zeigen, dass nicht nur die Anlagenwahl, sondern auch die Öffnungsgeometrie, die Fassadenstruktur und die Position der Ansaugöffnung einen Einfluss auf die Übertemperatur der Ansaugung haben.

Die Abbildung 48 und das Kapitel 4.10.6 zeigen beim Vergleich der Öffnungsgeometrie, dass die dezentrale Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“ am häufigsten kleine Ansaugtemperaturen aufweist. Im Kapitel 4.10.2 beim Vergleich der Fassadenstruktur zeigt sich, dass die dezentrale Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ bei strukturierten Fassaden häufiger kleinere Ansaugtemperaturen aufweist als bei glatten Fassaden. Im Kapitel 4.10.5 zeigt sich beim Vergleich der Ansaugpositionen, dass die zentrale Ansaugung „Dach Ost“ häufiger höhere Übertemperaturen der Ansaugung aufweist als die zentrale Ansaugung „Fassade Ost“.

Der Vergleich zwischen dezentraler (Kapitel 4.2) und zentraler Ansaugung (Kapitel 4.3) erfolgt zwischen „kleinen“ dezentralen und „großen“ zentralen Ansaugtemperaturen. Die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Übertemperatur der Ansaugung vergleicht somit die dezentralen Ansaugungen „Gegenüber vom Kreis“ und „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ mit der zentralen Ansaugung „Dach Ost“. In Abbildung 50 wird sie für das Jahr und in Abbildung 51 für die vier Jahreszeiten dargestellt. Sowohl bei zentraler als auch bei dezentraler Ansaugung können Übertemperaturen auftreten. Abbildung 50 zeigt, dass bei der zentralen Ansaugung Übertemperaturen kleiner 2 K mit 77 % häufiger auftreten als bei den dezentralen Ansaugungen. Übertemperaturen kleiner 8 K treten ausschließlich bei der dezentralen Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“ auf. Bei den dezentralen Ansaugungen sind 10 % und bei der zentralen Ansaugung 2 % der Übertemperaturen kleiner 6 K. Die Sonneneinstrahlung heizt das Dach unterhalb der zentralen Ansaugung im Sommer auf. Die Abbildung 51 zeigt, dass nur im Sommer Übertemperaturen der zentralen Dachansaugung kleiner 6 K sind. Sonst treten Übertemperaturen kleiner 6 K nur bei den dezentralen Ansaugungen auf. Die zentrale Dachansaugung weist Übertemperaturen kleiner 4 K im Sommer und Frühling mit 9 % und im Herbst und Winter mit 2 % auf.

Für die betrachteten Ansaugvarianten kann allgemein formuliert werden, dass Übertemperaturen oberhalb von 2 K bei dezentraler Ansaugung häufiger auftreten als bei zentraler. Jedoch zeigt sich bei der Dachansaugung, dass die Position der Ansaugöffnung auch bei zentralen Anlagen sinnvoll gewählt werden muss, um erhöhte Ansaugtemperaturen zu vermeiden. Untersuchungen der Ansaugtemperaturen für Öffnungen in der Südfassade könnten wie bei dezentralen Anlagen hohe Übertemperaturen ergeben. Diese Betrachtung erfolgt in dieser Arbeit nicht.

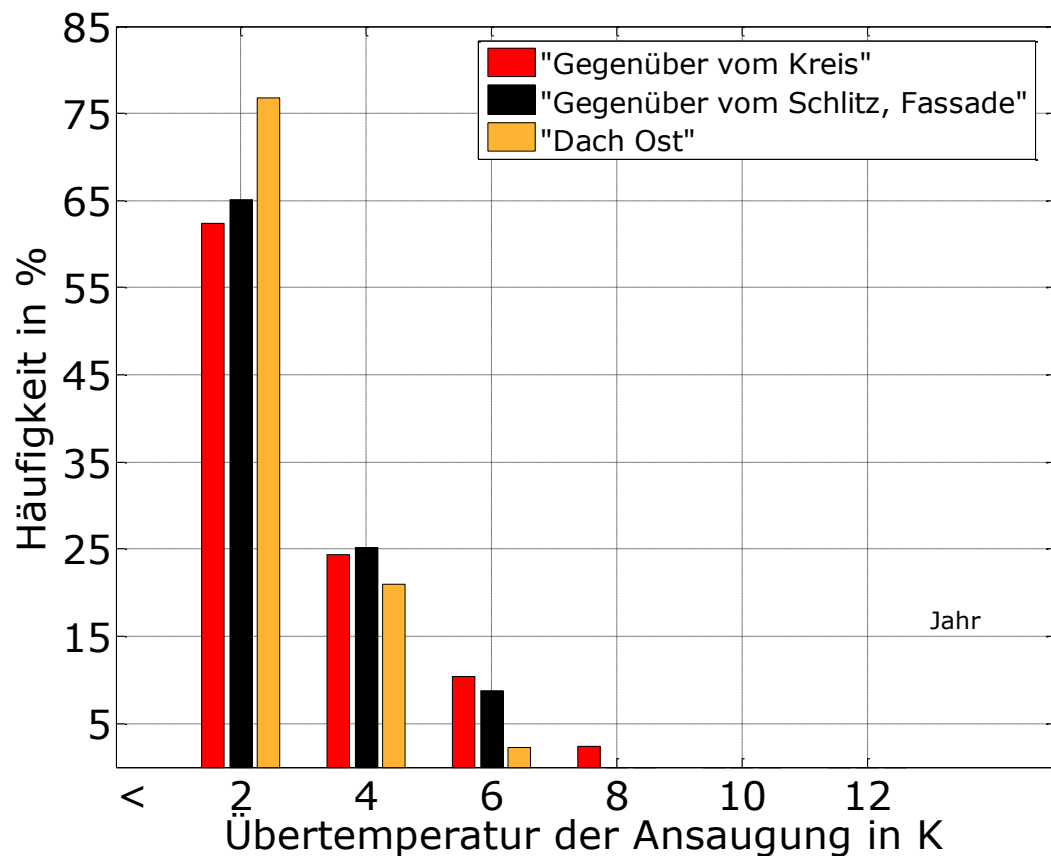


Abbildung 50 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Dach Ost“ (zentral), „Gegenüber vom Kreis“ und „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ (dezentral)

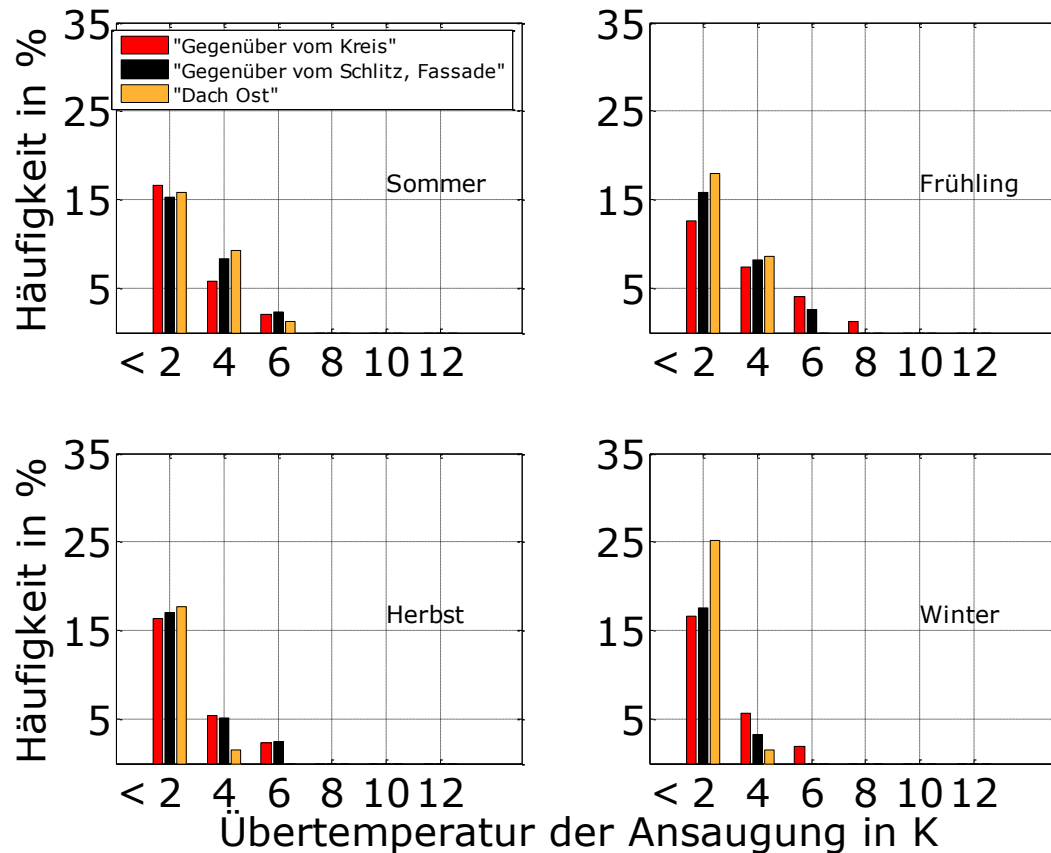


Abbildung 51 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Dach Ost“ (zentral), „Gegenüber vom Kreis“ und „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ (dezentral)

4.10.2 Einfluss der Fassadenstruktur

Die Fassadenstruktur übt einen Einfluss auf die Ansaugtemperatur aus. Die Temperaturdifferenz der Ansaugtemperatur zur Außenlufttemperatur wird als Übertemperatur der Ansaugung bezeichnet. Sie wird für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwert der Jahresmesswerte berechnet. Die folgenden Abbildungen vergleichen die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ der glatten VWS-Fassade und der strukturierten TC-Fassade (Kapitel 4.2). Beide Ansaugöffnungen schließen mit der vordersten Fassadenfläche ab. Somit werden für die strukturierte TC-Fassade die Ansaugvariante „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ und „Versetzt zum Schlitz, Fassade“ betrachtet.

Die folgenden Abbildungen zeigen, dass die Übertemperaturen der Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ bei glatten Fassaden ganzjährig höher sind als bei strukturierten Fassaden. In Abbildung 52 ist die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Übertemperatur der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ für die vier Jahreszeiten dargestellt. Im Sommer und Frühling treten Übertemperaturen kleiner 6 K häufiger bei glatten Fassaden auf. Unabhängig von der Jahreszeit treten Übertemperaturen kleiner 8 K und kleiner 10 K ausschließlich bei glatten Fassaden und Übertemperatur kleiner 2 K häufiger bei strukturierten Fassaden auf. Bei glatten Fassaden kommt es ganzjährig häufiger zu höheren Übertemperatur als bei strukturierten Fassaden.

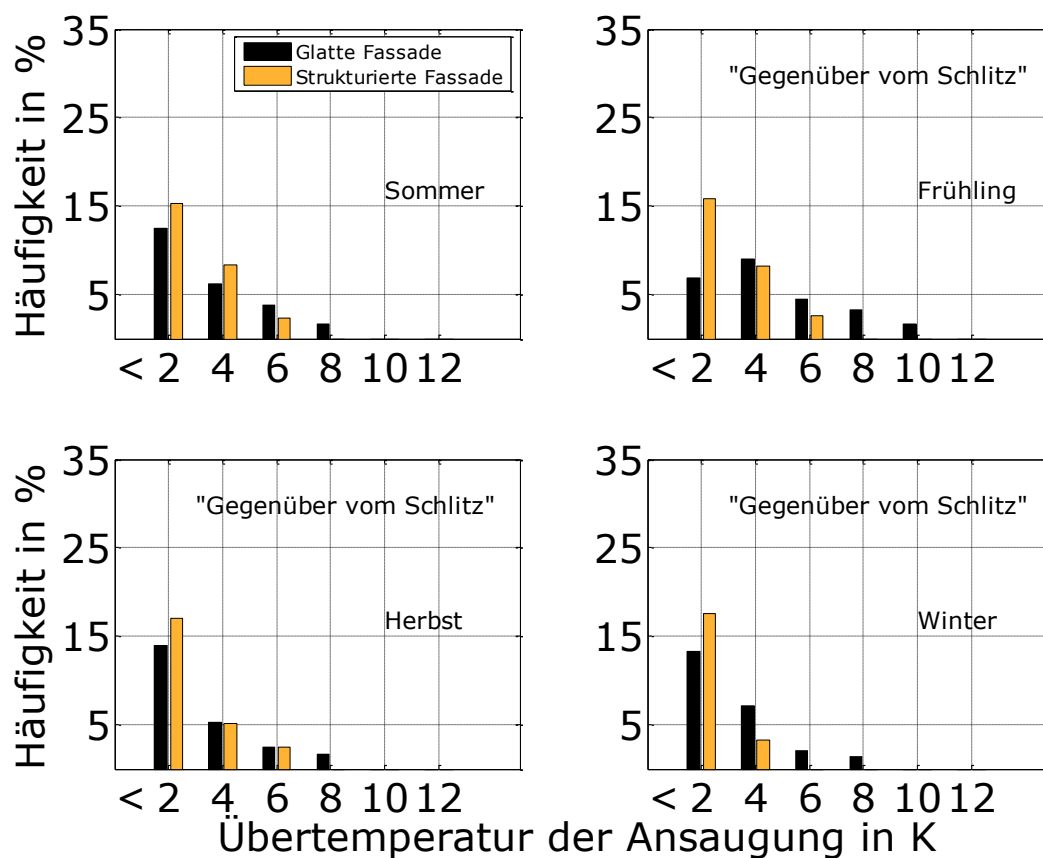


Abbildung 52 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ (dezentral) im Vergleich für glatte und strukturierte Fassaden

Der Vergleich zwischen glatter und strukturierter Fassade für die Ansaugvariante „Versetzt zum Schlitz“ erfolgt in Abbildung 53. Auch hier zeigt sich ganzjährig, dass die Übertemperaturen häufiger bei glatten Fassaden höher sind als bei strukturierten Fassaden.

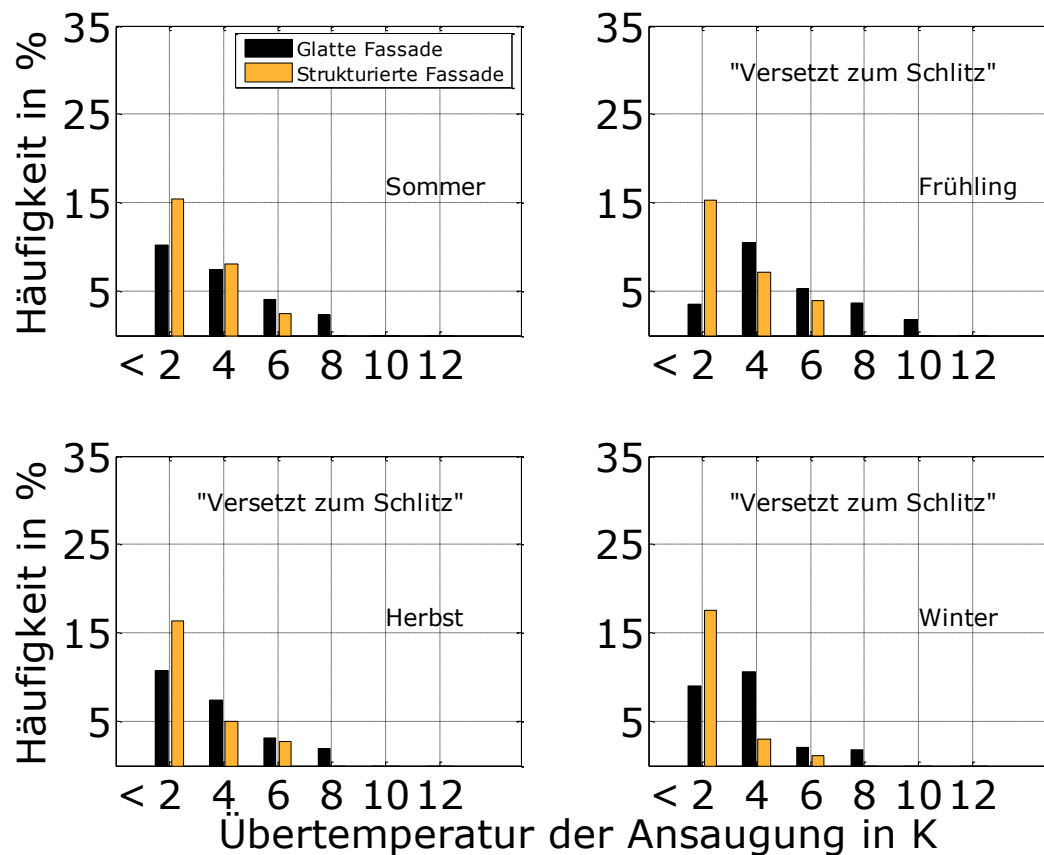


Abbildung 53 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Versetzt zum Schlitz“ (dezentral) im Vergleich für glatte und strukturierte Fassaden

4.10.3 Einfluss der Gebäudehöhe

Bei Windstille, wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, bildet sich vor einer heißen Wand eine ungestörte Auftriebsströmung aus, die eine anwachsende Grenzschicht über der Höhe erzeugt. Die Temperaturverläufe innerhalb der Grenzschicht werden mit zunehmender Grenzschichtdicke flacher (Abbildung 8), so dass die Temperatur in der Grenzschicht bei gleichem Abstand zur Fassade mit der Höhe zunimmt. Die Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden durch eine anwachsende Grenzschicht über der Gebäudehöhe beeinflusst.

Unabhängig vom Volumenstrom (Kapitel 3.2) wird bei runden und rechteckigen Öffnungen die Luft überwiegend aus Entfernungen bis zu 30 cm angesaugt. Die Ansaugung erfolgt somit mit großer Häufigkeit innerhalb der aufgebauten fassadennahen Grenzschicht (Kapitel 4.9). Nach der Auswertung in Kapitel 4.8 herrscht an der VWS-Fassade eine überwiegend turbulente Auftriebsströmung, die von einer turbulenten erzwungenen Strömung überlagert wird. Die erzwungene Strömung wird durch Wind

verursacht. Die Windgeschwindigkeiten verstärken sich über der Höhe [35]. Ein Anwachsen der Grenzschichtdicke und somit eine Zunahme der Temperatur im gleichen Abstand zur Fassade mit der Gebäudehöhe wird daher vermutlich erschwert. Bei wegfallender Zunahme der Grenzschichtdicke über der Gebäudehöhe, ist die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte von der Gebäudehöhe unabhängig.

Vor der VWS-Fassade werden die Temperaturverläufe in drei Höhen gemessen (Kapitel 4.4). Die Temperaturverläufe der fünften und siebten Etage sind gleich. Die Temperaturverläufe der fünften und neunten Etage sind annähernd gleich. Die prozentuale Häufigkeit der Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturverläufen der fünften und neunten Etage sind für verschiedene Abstände vor der Fassade in Abbildung 54 gezeigt. In die Auswertung fließen die Mittelwerte der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr der Jahresmessung vom 01.08.2007-31.07.2008 ein. Die Abweichung der Temperaturen im gleichen Abstand zwischen fünfter und neunter Etage ist gering. 70 % bis 80 % der Temperaturdifferenzen liegen unterhalb von 0,5 K. Unabhängig vom Abstand sind 20 % der Temperaturdifferenzen kleiner 1 K. Bis zu einem Abstand von 12 cm zur Fassade sind 10 % der Temperaturdifferenzen kleiner 2 K und für Abstände größer 12 cm zur Fassade sind 5 % kleiner 2 K. Der Einfluss der Gebäudehöhe im Bereich zwischen fünfter und neunter Etage auf die Temperaturverläufe ist vorhanden.

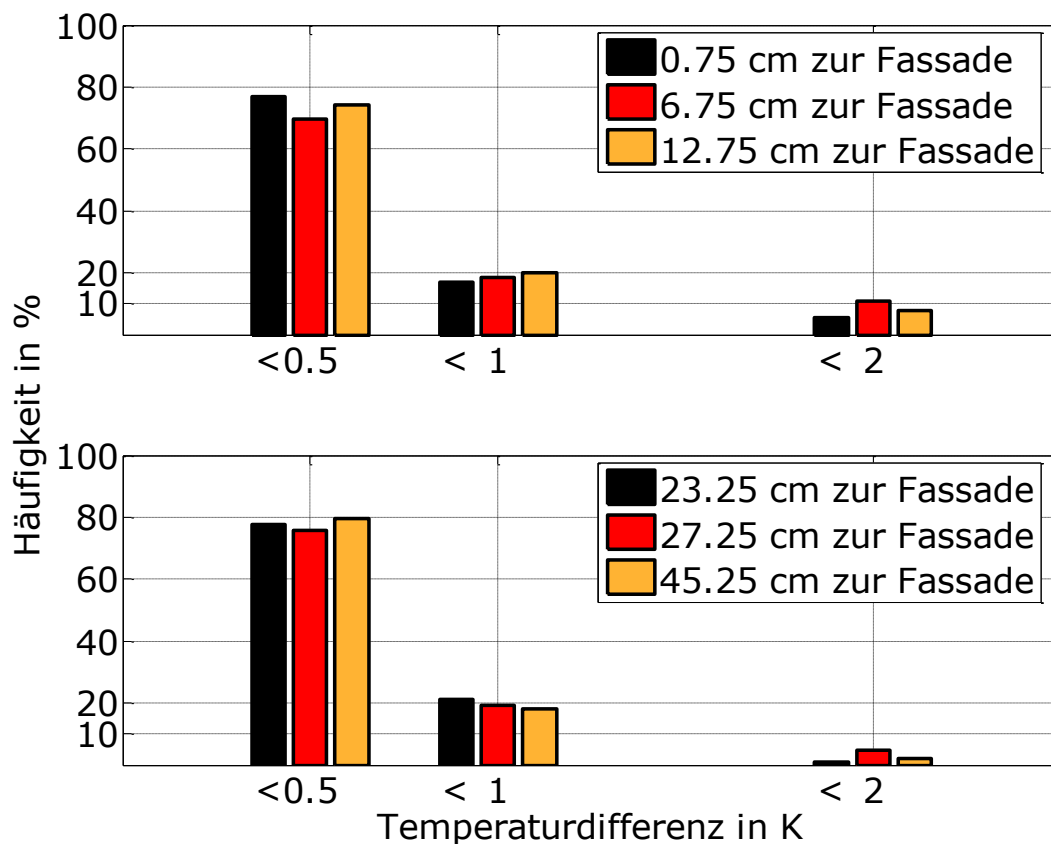


Abbildung 54 Häufigkeit der Differenzen zwischen den Temperaturverläufen der 5. und 9. Etage für verschiedene Abstände vor der Fassade

Die Messungen der Temperaturen normal zur Fassade (Kapitel 4.4) betrachten nur einen kleinen Ausschnitt möglicher Gebäudehöhen. Eine generelle Aussage zur Temperaturerhöhung in der Grenzschicht für höhere Gebäude kann nicht getroffen werden.

Zur Diskussion steht, ob die Temperaturerhöhung in der Grenzschicht über der Gebäudehöhe auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte einen Einfluss ausübt.

Eine Aussage zur Temperaturerhöhung der Ansaugtemperaturen über der Gebäudehöhe auf Basis von Messwerten ist nicht möglich, da die Ansaugtemperaturen nur in einer Gebäudehöhe gemessen werden (Kapitel 4.2). Es kann jedoch eine Einschätzung erfolgen. Die Ansaugung dezentraler Fassadenlüftungsgeräte erfasst verschieden fassadennahe Bereiche mit unterschiedlichen Temperaturen. Die Ansaugtemperatur ist ein Mittelwert dieser Temperaturschichtung (Kapitel 4.2). Demzufolge werden Ansaugtemperaturen vermutlich kleinere Temperaturerhöhungen über der Gebäudehöhe aufweisen, als die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen 1 K und 2 K der Temperaturverläufe der fünften und neunten Etage (Abbildung 54).

Für den betrachteten Bereich der Gebäudehöhe zwischen fünfter und neunter Etage wird festgelegt, dass der Einfluss der Temperaturerhöhung in der Grenzschicht über der Höhe auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte vernachlässigbar ist. Die Vernachlässigung wird begründet mit der Tatsache, dass fast 80 % der Temperaturdifferenzen (Abbildung 54) kleiner 0,5 K sind. Bei der Ermittlung des Berechnungsmodells der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte (Kapitel 8) wird der Einfluss der Gebäudehöhe nicht berücksichtigt.

4.10.4 Einfluss der Grenzschicht

Die dezentralen Ansaugtemperaturen sind von der fassadennahen Lufterwärmung, die von der konvektiven Wärmeabgabe der Fassade verursacht wird, abhängig. Das bedeutet, dass die Fassadentemperatur (Kapitel 6.2) einen Einfluss auf die Ansaugtemperatur ausübt. Die folgenden Abbildungen betrachten Tagestemperaturverläufe der Luftschicht für verschiedene Abstände vor der Fassade (Kapitel 4.4) und der angesaugten Luft der Ansaugvariante „Gegenüber vom Schlitz“ (Kapitel 4.2). Es werden ein heißer, sonniger (07.08.07), ein kalter, sonniger (29.08.07) und ein kalter, bewölkter Tag (12.08.07) im August 2007 betrachtet. Es sind die stündlichen Mittelwerte der Temperaturen über der Zeit aufgetragen. In Abbildung 55 und Abbildung 56 steigen die Temperaturen kontinuierlich an und erreichen am Nachmittag zwischen 13 und 15 Uhr ihr Maximum. In Abbildung 55 nimmt die Fassadenoberfläche des heißen, sonnigen Tages maximale Werte von 50 °C an. In der Mittagszeit beträgt die Globalstrahlung an diesem Tag 800 W/m² und die Fassadenstrahlung 600 W/m². Diese Strahlungswerte werden nur an wenigen Tagen im Sommer erreicht. Im Abstand von 1 m sind die um 12 Uhr gemessenen Temperaturwerte 3 K und die in einem Abstand von 0,7 cm 8 K höher als die Außenlufttemperatur. Die Ansaugtemperatur der dezentralen Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ liegt um 12 Uhr 8 K über der Außenlufttemperatur.

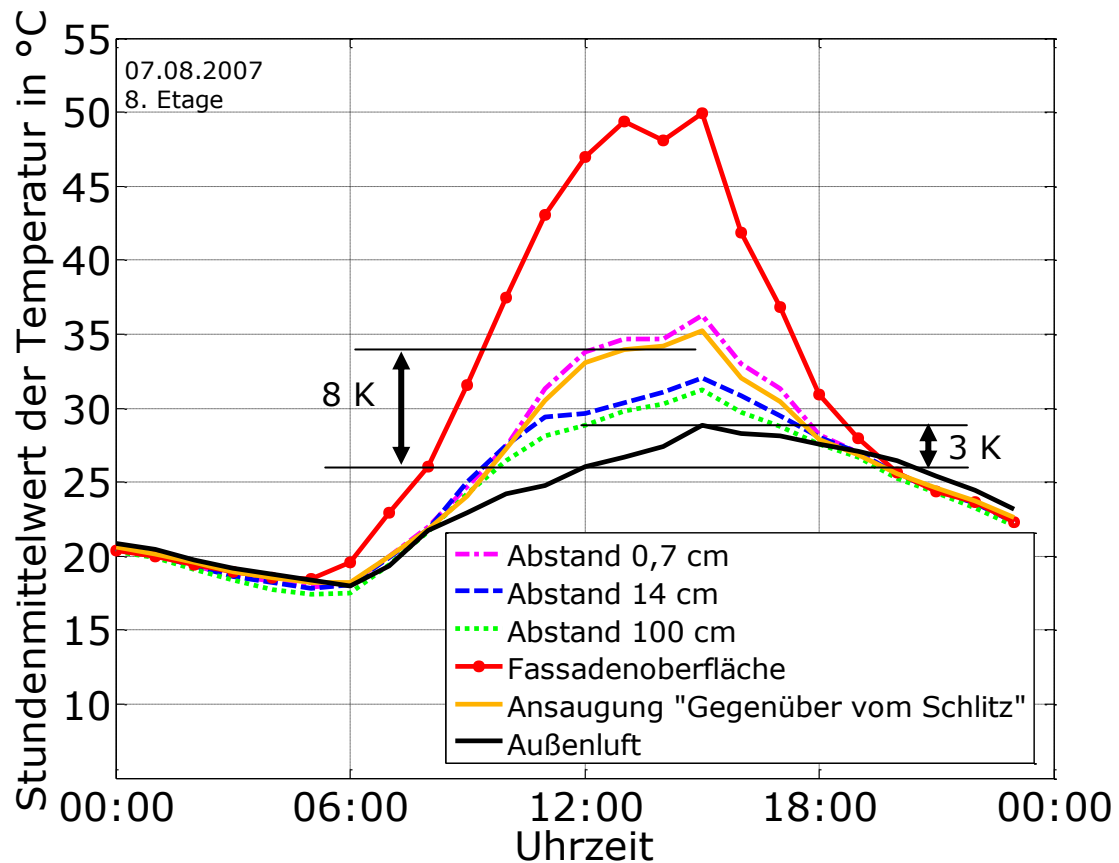


Abbildung 55 Tagestemperaturverläufe vor der glatten Fassade des VWS-Gebäudes (sonniger, heißer Tag)

Die Abbildung 56 zeigt, dass auch an kalten, sonnigen Tagen mit der durchschnittlichen Jahresaußentemperatur von 15 °C auf Grund der Sonneneinstrahlung erhöhte Fassadenoberflächentemperaturen auftreten und somit sich die fassadennahen Luftschichten konvektiv auf Temperaturwerte oberhalb der Außenlufttemperatur aufheizen. Die Fassadenoberfläche weist maximale Werte von 37 °C auf. Im Abstand von 1 m sind die um 12 Uhr gemessenen Temperaturwerte 2,5 K und die in einem Abstand von 0,7 cm 6 K höher als die Außenlufttemperatur. Die Ansaugtemperatur der dezentralen Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ liegt um 12 Uhr 6 K über der Außenlufttemperatur.

An sonnigen Tagen baut sich eine dicke Fassadengrenzschicht mit hohen Übertemperaturen auf, wodurch die Ansaugtemperaturen ebenfalls deutlich oberhalb der Außenlufttemperaturen liegen.

Die Abbildung 57 zeigt für den bewölkten Tag, dass die Temperaturverläufe der fassadennahen Luftschichten, der Fassadentemperatur und der Ansaugtemperatur knapp oberhalb der Außenlufttemperatur liegen. Die Globalstrahlung beträgt in der Mittagszeit 100 W/m² und die Fassadenstrahlung 50 W/m². Diese Globalstrahlungswerte liegen unterhalb des Jahresmittelwerts von 118 W/m².

An bewölkten Tagen baut sich eine dünne Fassadengrenzschicht mit geringen Übertemperaturen auf, wodurch die Ansaugtemperaturen ebenfalls nur geringfügig oberhalb der Außenlufttemperaturen liegen.

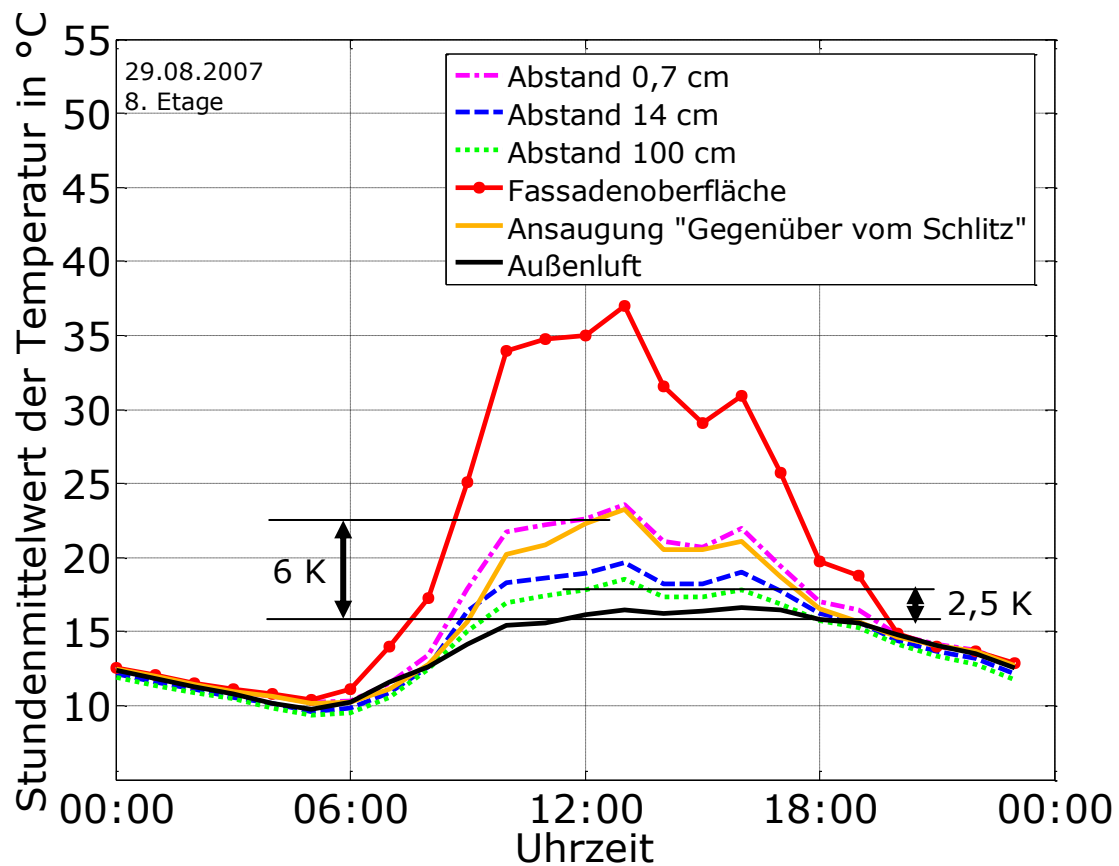


Abbildung 56 Tagestemperaturverläufe vor der glatten Fassade des VWS-Gebäudes (sonniger, kalter Tag)

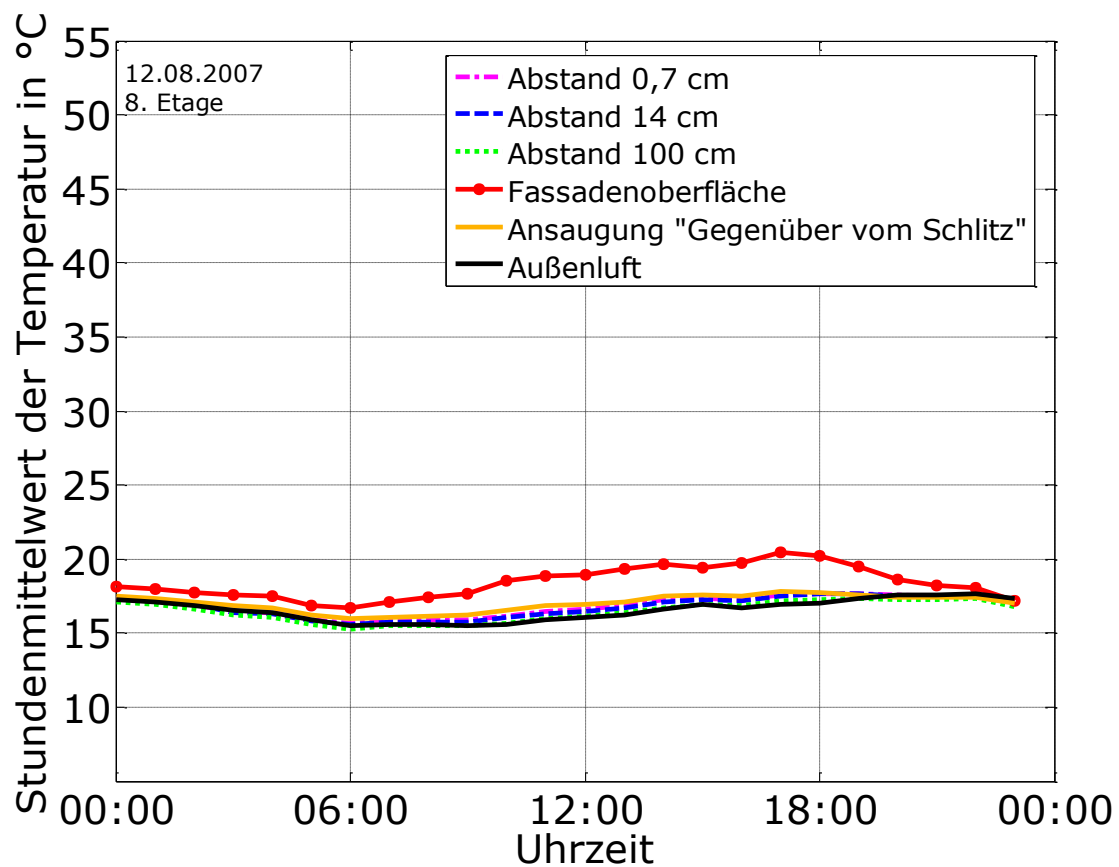


Abbildung 57 Tagestemperaturverläufe vor einer glatten Fassade des VWS-Gebäudes (bewölkter, kalter Tag)

4.10.5 Einfluss der Position der Ansaugöffnung

Die gewählte Position der Ansaugöffnung beeinflusst sowohl bei dezentralen als auch bei zentralen Anlagen die Ansaugtemperatur. Die Temperaturdifferenz der Ansaugtemperatur zur Außenlufttemperatur wird als Übertemperatur der Ansaugung bezeichnet. Sie wird für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwert der Jahresmesswerte berechnet.

Im Vergleich der verschiedenen zentralen Ansaugvarianten zeigt sich, dass die Ansaugtemperaturen zentraler Anlagen mit Ansaugöffnungen oberhalb der Dachhaut teilweise größer sind als die Ansaugtemperaturen der Turm- oder der östlichen Fassadenansaugung. Diese Aussage wird von der Abbildung 58 bestätigt. Sie zeigt für die vier Jahreszeiten die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Übertemperatur der Ansaugung für die zentralen Ansaugungen (Kapitel 4.3) „Fassade Ost“, „Turm Ost“ und „Dach Ost“.

Im Sommer sind 26 % der Übertemperaturen der Ansaugungen „Fassade Ost“ und „Turm Ost“ und 16 % der Ansaugung „Dach Ost“ kleiner 2 K. Die Dachhaut erwärmt sich stärker als die Fassade, daher sind 9 % der Übertemperatur der Ansaugung „Dach Ost“ und 1 % der Ansaugung „Fassade Ost“ kleiner 4 K. Übertemperaturen kleiner 6 K treten bei den zentralen Ansaugvarianten „Fassade Ost“ und „Turm Ost“ bereits nicht mehr auf. Ganzjährig kommt es bei der Dachansaugung zu höheren Übertemperaturen.

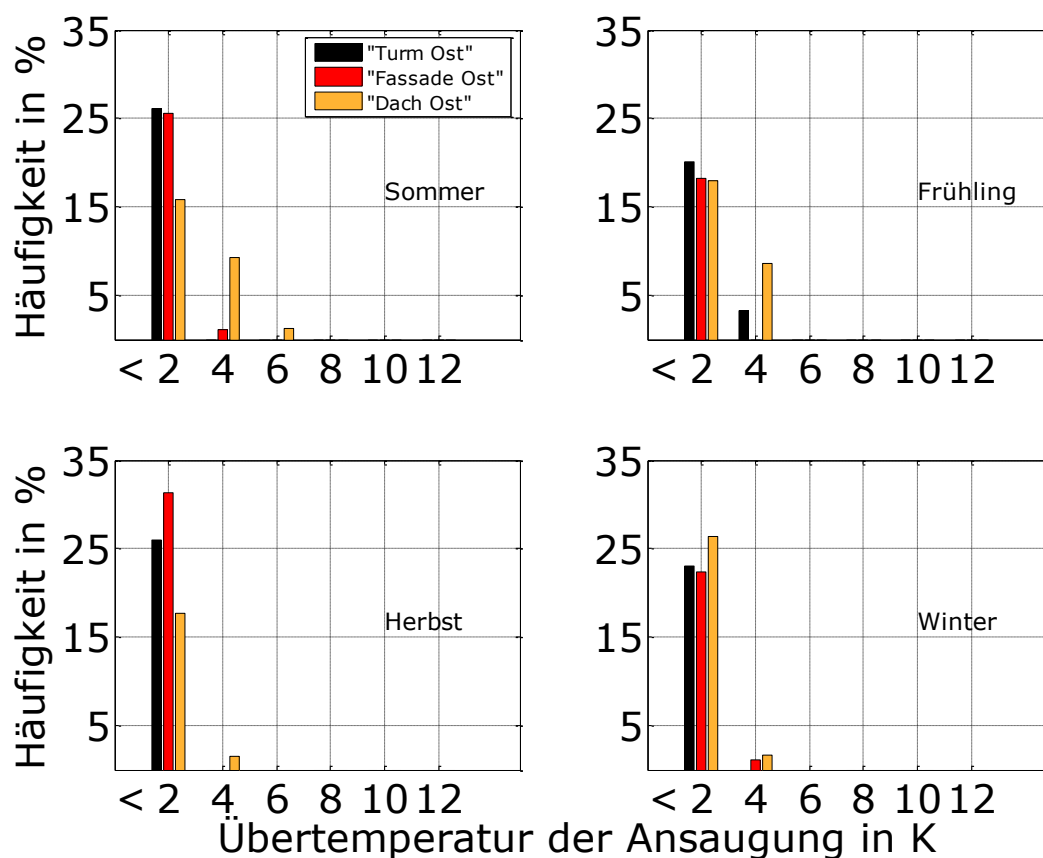


Abbildung 58 Häufigkeit der Übertemperatur der zentralen Ansaugung „Dach Ost“, „Turm Ost“ und „Fassade Ost“ für alle Jahreszeiten

Bei strukturierten Fassaden ist die Ansaugtemperatur davon abhängig, ob sich die dezentrale Ansaugöffnung an der Nischenrückwand oder am Vorsprung befindet. Im Folgenden sind die stündlichen Mittelwerte der Temperaturen über der Zeit aufgetragen, so dass Tagestemperaturverläufe entstehen. Die Ansaugtemperaturen der Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ und „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ werden gezeigt. Abbildung 59 stellt die Tagestemperaturverläufe für einen sonnigen Sommertag und Abbildung 60 für einen sonnigen Wintertag dar. Es zeigt sich im Sommer, dass die Ansaugtemperatur „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ geringer ist als die Ansaugtemperatur „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“. Im Sommer wird die Nischenrückwand nicht direkt bestrahlt. Somit sind die Oberflächentemperaturen der zurückversetzten Fassadenfläche (Nischenrückwand) geringer als die der vordersten Fassadenfläche. Im Winter dagegen steht die Sonne tiefer als im Sommer, so dass die Nischenrückwand direkt bestrahlt wird. An sonnigen Tagen sind die Ansaugtemperaturen „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ im Winter höher als die Ansaugtemperaturen „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“.

Die Abbildung 61 vergleicht für die vier Jahreszeiten die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Übertemperatur der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ mit „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“. Sie bestätigt die Abhängigkeit der Ansaugtemperaturen von der Öffnungsposition und der Jahreszeit. In den Sommermonaten wird die Nischenrückwand kaum beschienen. Es treten Übertemperaturen kleiner 6 K ausschließlich bei der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ auf. In den Wintermonaten steht die Sonne tiefer, so dass die Fassadentemperatur der zurückgesetzten Nischenwand aufgeheizt wird. Es treten Übertemperaturen kleiner 6 K ausschließlich bei der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ auf. Für den Vergleich der Ansaugungen „Versetzt zum Schlitz, Nische“ mit „Versetzt zum Schlitz, Fassade“ können die gleiche Aussagen getroffen werden, siehe Abbildung 62.

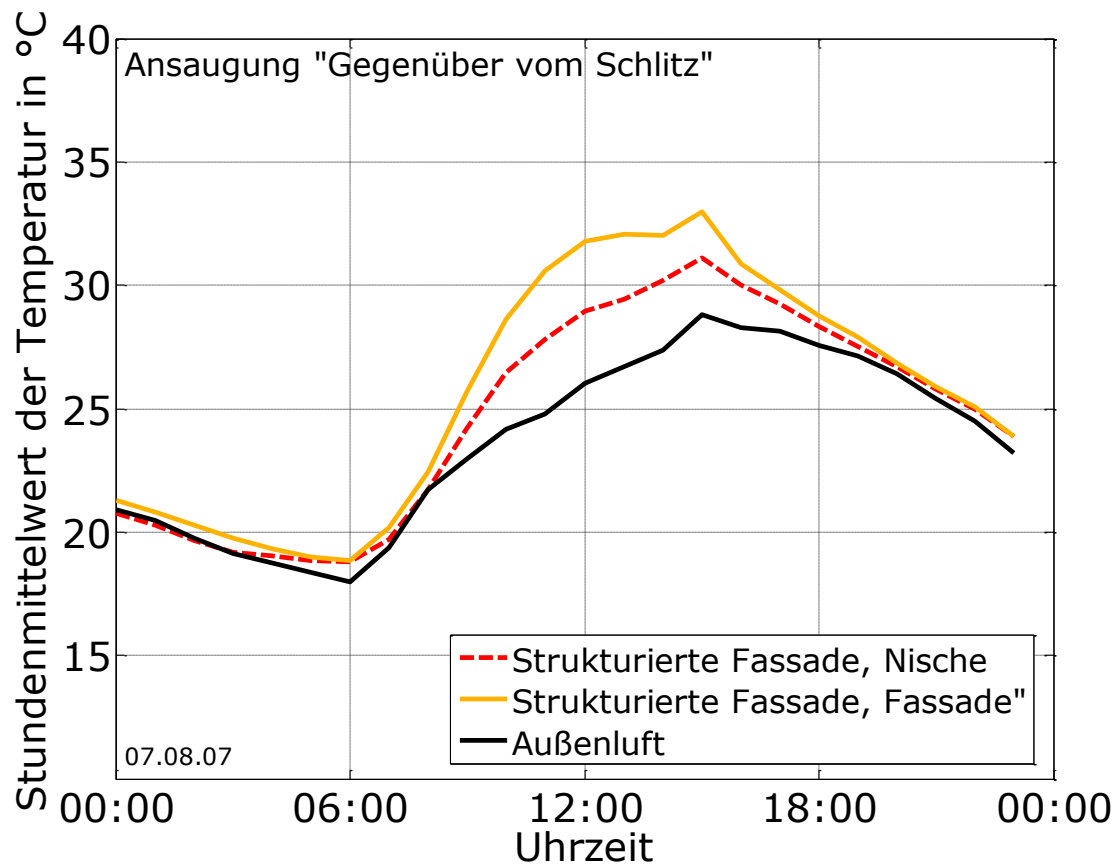


Abbildung 59 Ansaugtemperatur in Abhängigkeit der Position der Ansaugöffnung (sonniger, heißer Sommertag)

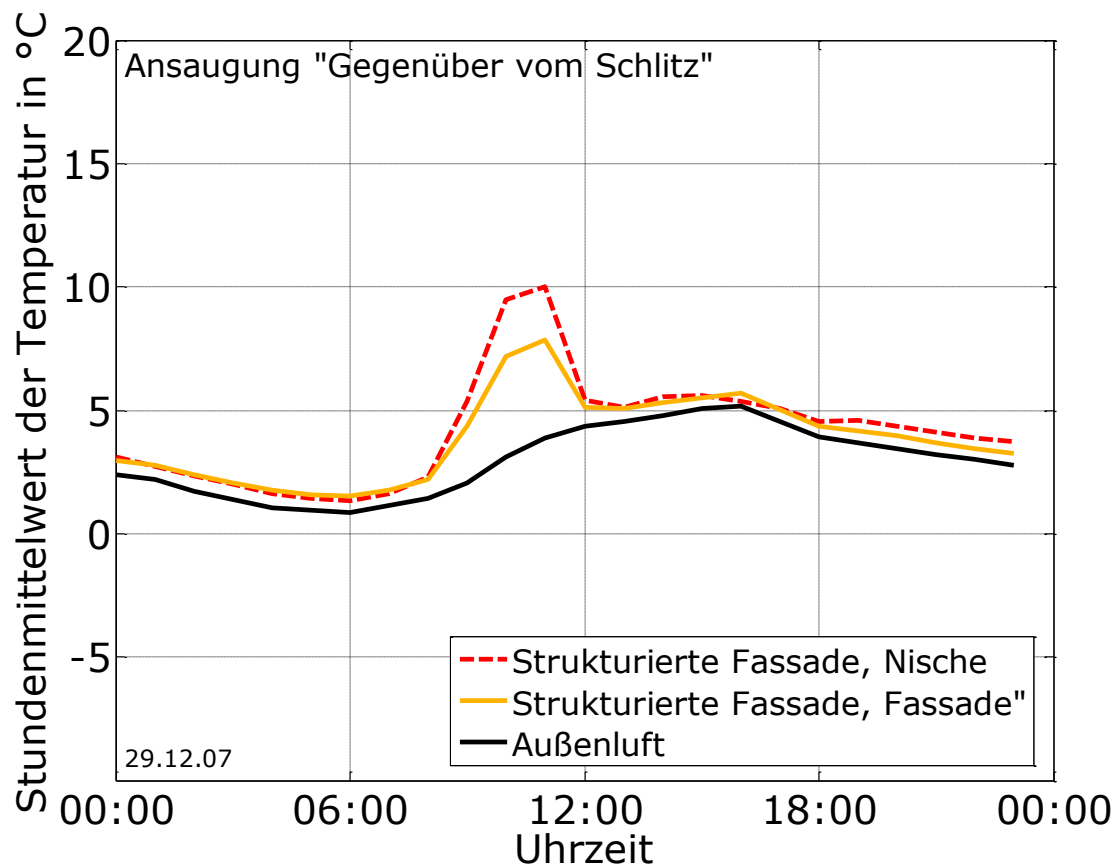


Abbildung 60 Ansaugtemperaturen in Abhängigkeit der Position der Ansaugöffnung (sonniger, kalter Wintertag)

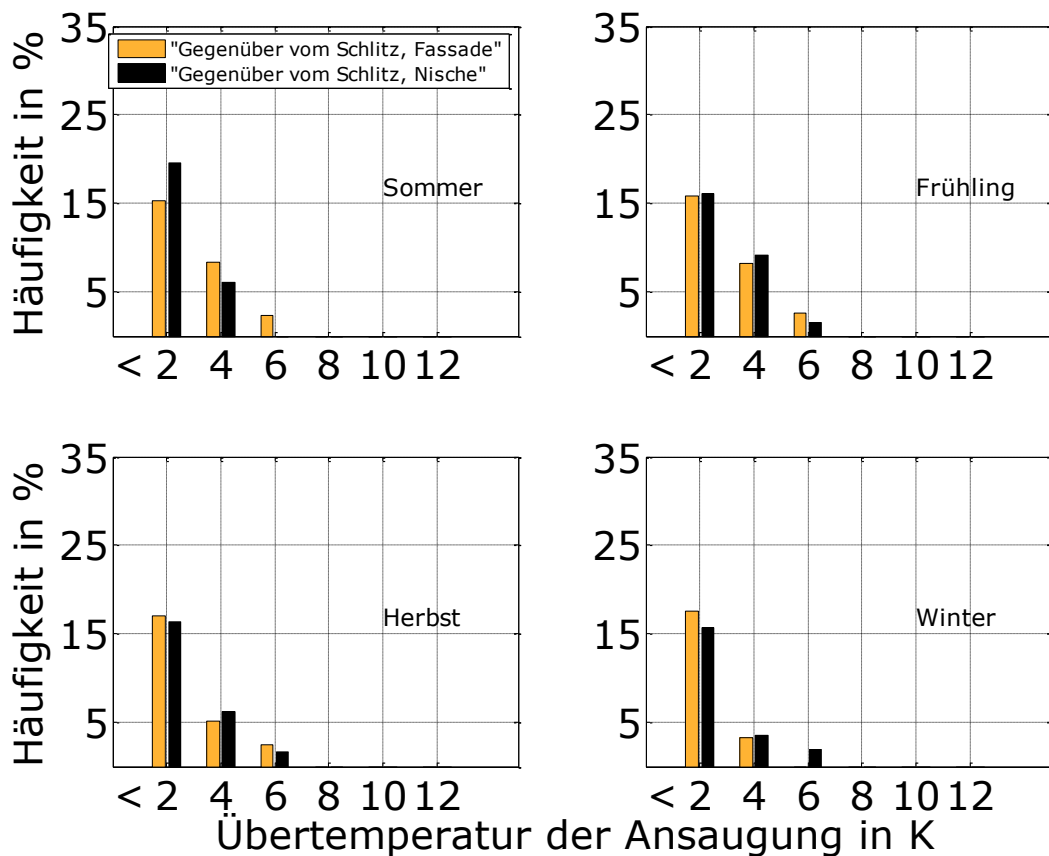


Abbildung 61 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ und „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ für alle Jahreszeiten

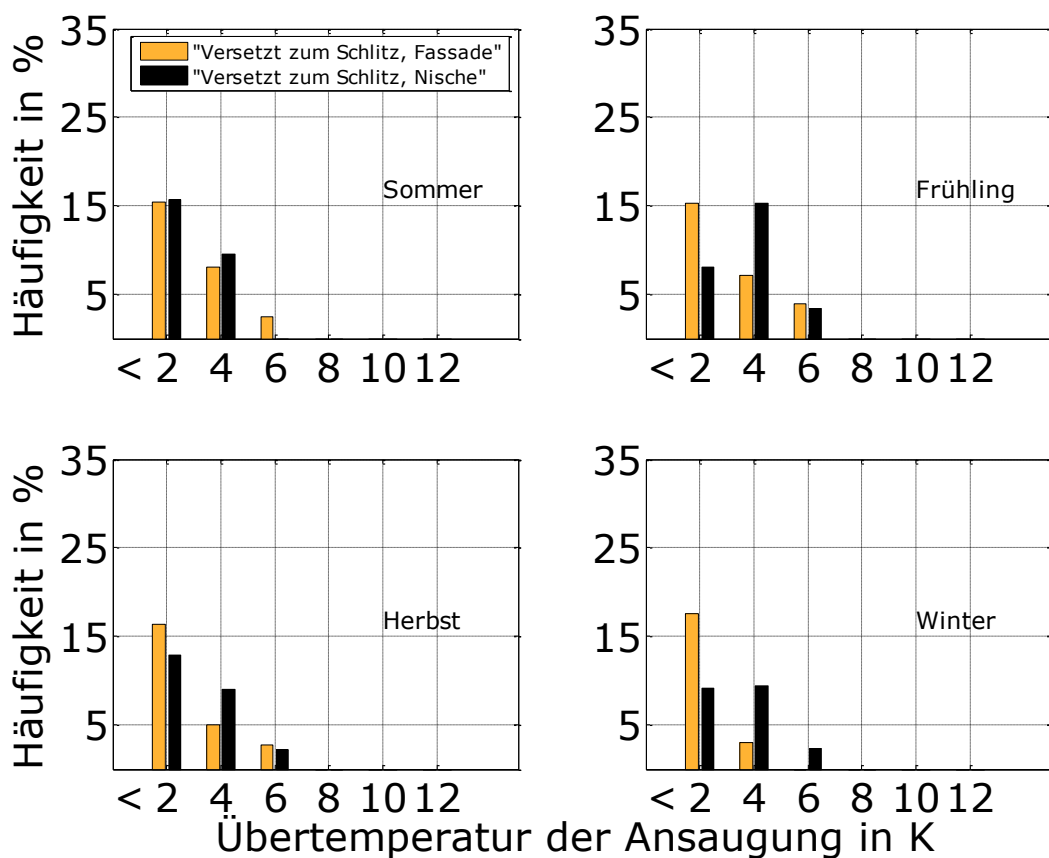


Abbildung 62 Häufigkeit der Übertemperatur der Ansaugung „Versetzt zum Schlitz, Fassade“ und „Versetzt zum Schlitz, Nische“ für alle Jahreszeiten

4.10.6 Einfluss der Ansaugvariante

Die Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ werden betrachtet. Sie unterscheiden sich durch die Geometrie der Ansaugöffnung in der Fassade und die Position der Fassadenöffnung zum inneren Geräteanschluss.

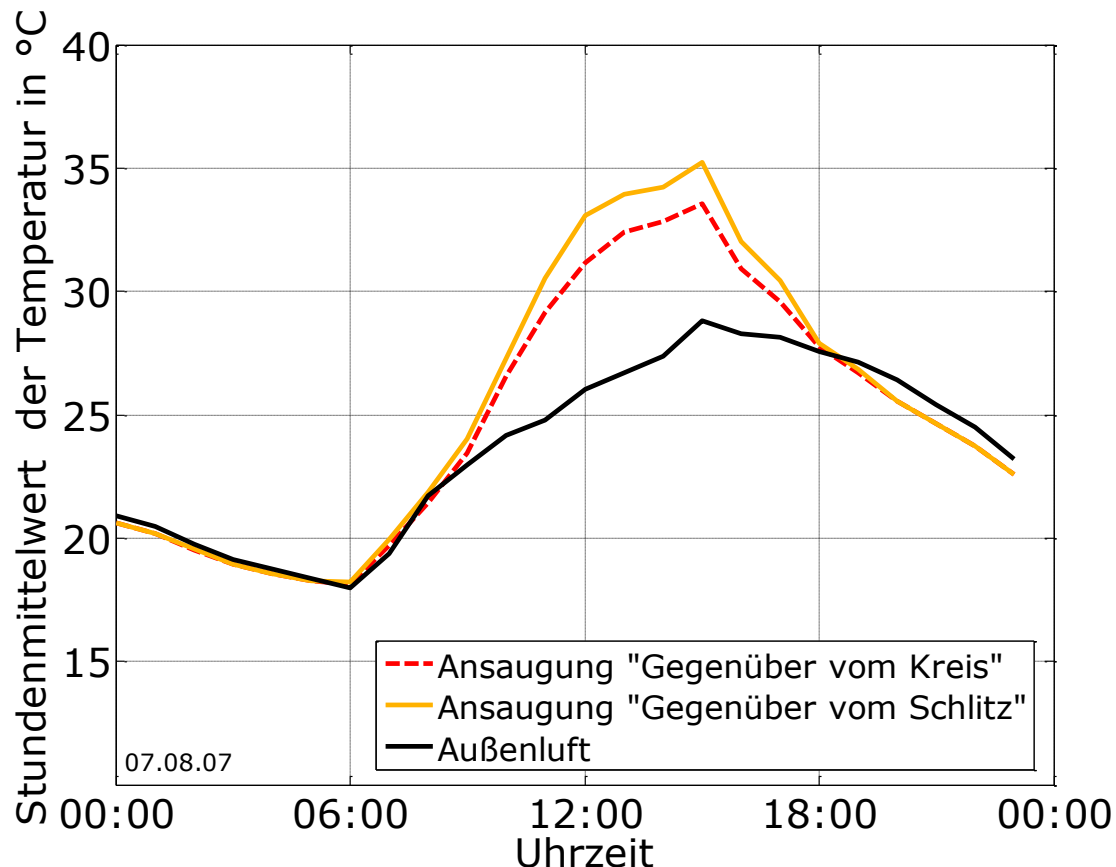


Abbildung 63 Ansaugtemperatur in Abhängigkeit der Geometrie der Ansaugöffnung, Vergleich Kreis- mit Schlitzöffnung

Die Messungen der Ansaugtemperaturen in Kapitel 4.2 erfolgen für eine gewählte Größe der Kreis- und Schlitzöffnungen. Die Größe der Ansaugfläche (Kapitel 3.2) beeinflusst die Ansaugströmung nicht und übt somit keinen Einfluss auf die Ansaugtemperatur aus. Unabhängig vom Volumenstrom (Kapitel 3.2) wird bei runden und rechteckigen Öffnungen die Luft überwiegend aus Entfernungen bis zu 30 cm angesaugt. Die Ansaugung erfolgt somit mit großer Häufigkeit innerhalb der aufgebauten fassaden-nahen Grenzschicht (Kapitel 4.9). Die Abbildung 63 zeigt die Ansaugtemperatur in Abhängigkeit der Geometrie der Ansaugöffnung. Es sind die Stundenmittelwerte der Ansaugtemperaturen als Tagesverlauf dargestellt. Der Unterschied in der Ansaugcharakteristik zwischen Kreis- und Schlitzöffnungen entsteht in unmittelbarer Fassadennähe. Beide Öffnungen saugen über die Schlitzränder an. Dabei bilden sich zur Fassade parallele Stromlinien aus, die bei der Schlitzöffnung fassadennäher als bei der Kreisöffnung verlaufen (Kapitel 3.1). Demzufolge liegen die Ansaugtemperaturen bei schlitzförmigen Öffnungen höher als bei runden.

Die Temperaturdifferenz der Ansaugtemperatur zur Außenlufttemperatur wird als Übertemperatur der Ansaugung bezeichnet. Sie wird für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwert der Jahresmesswerte berechnet. Die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Übertemperatur der Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ ist in Abbildung 64 für das Jahr und in Abbildung 65 für die vier Jahreszeiten dargestellt.

Die Häufigkeitsverteilung der Übertemperaturen für das Jahr bestätigt die Aussage der Abbildung 63, dass die Ansaugtemperatur bei schlitzförmiger Ansaugöffnung höher ist als bei runder. Wird die Luft zusätzlich noch über einen Zwischenraum („Versetzt zum Schlitz“) geführt, liegen die Übertemperaturen noch etwas höher. Im Jahr treten Übertemperaturen kleiner 2 K am häufigsten mit 62 % für die Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“ und am geringsten mit 33 % für die Ansaugung „Versetzt zum Schlitz“ auf. Dagegen treten die Übertemperaturen kleiner 4 K am häufigsten mit 36 % für die Ansaugung „Versetzt zum Schlitz“ und am geringsten mit 24 % für die Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“ auf. Die Ansaugung „Gegenüber vom Schlitz“ liegt jeweils dazwischen. Mehr als 8 % der Übertemperaturen der Ansaugungen „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ sind kleiner 8 K. Für alle Ansaugvarianten sind weniger als 15 % der Übertemperaturen kleiner 6 K.

Die Häufigkeitsverteilung für das Jahr spiegelt sich prinzipiell in den einzelnen Jahreszeiten der Abbildung 65 wieder. Unabhängig von der Jahreszeit treten Übertemperaturen kleiner 2 K häufiger bei der Ansaugung „Gegenüber vom Kreis“ und Übertemperaturen kleiner 4 K, kleiner 6 K und kleiner 8 K häufiger bei den Ansaugungen „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ auf. Im Sommer, Herbst und Winter treten Übertemperaturen kleiner 8 K nur bei den Ansaugungen „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ auf. Im Vergleich zum Sommer nimmt im Frühling die Häufigkeit der Übertemperaturen, die zwischen 4 K und 8 K liegen für alle Ansaugvarianten zu. Nur im Frühling treten für die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ Übertemperaturen kleiner 10 K auf. Die Begründung sowohl für die Steigerung der Häufigkeit als auch für die höheren Übertemperaturen ist, dass im Frühling und Sommer ähnliche Globalstrahlungswerte und Fassadentemperaturen auftreten und die fassadennahen Schichten ähnlich Temperaturwerte annehmen. Die Übertemperaturen der Ansaugung sind jedoch durch die kleineren Außenlufttemperaturen im Frühling größer als im Sommer. Die Häufigkeitsverteilung im Herbst und im Winter ist ähnlich.

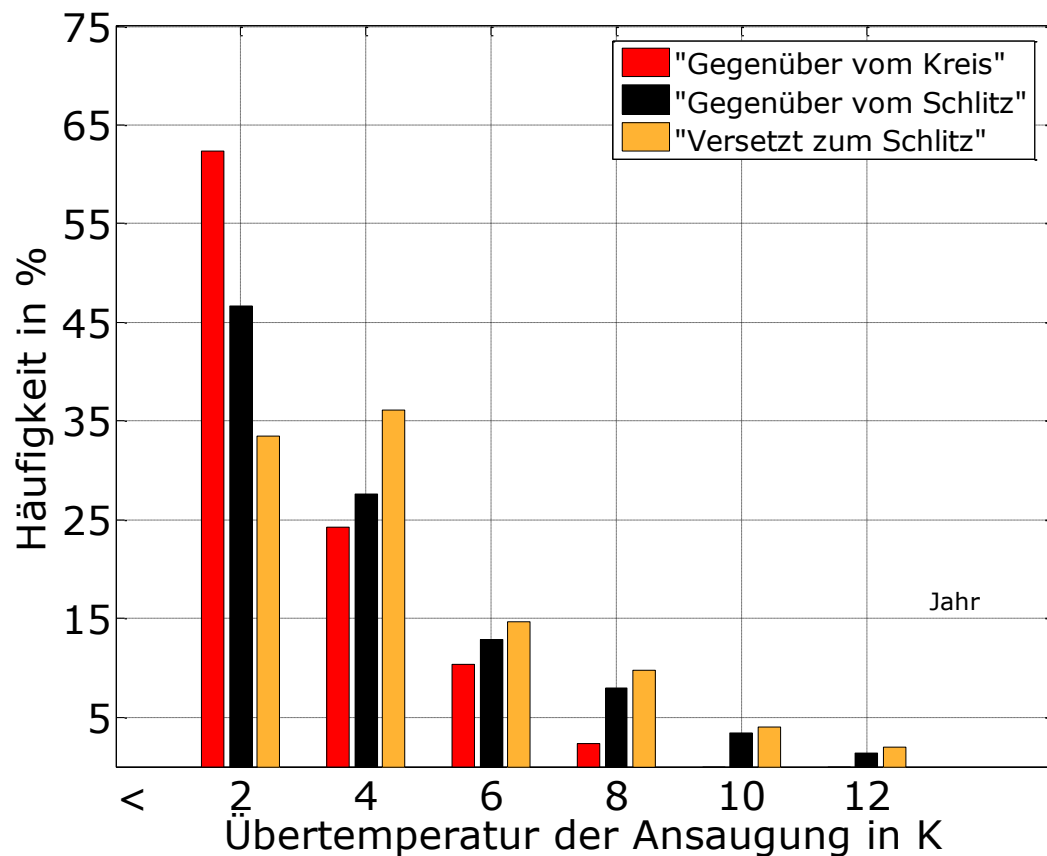


Abbildung 64 Vergleich der Übertemperaturen „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ für das gesamte Jahr

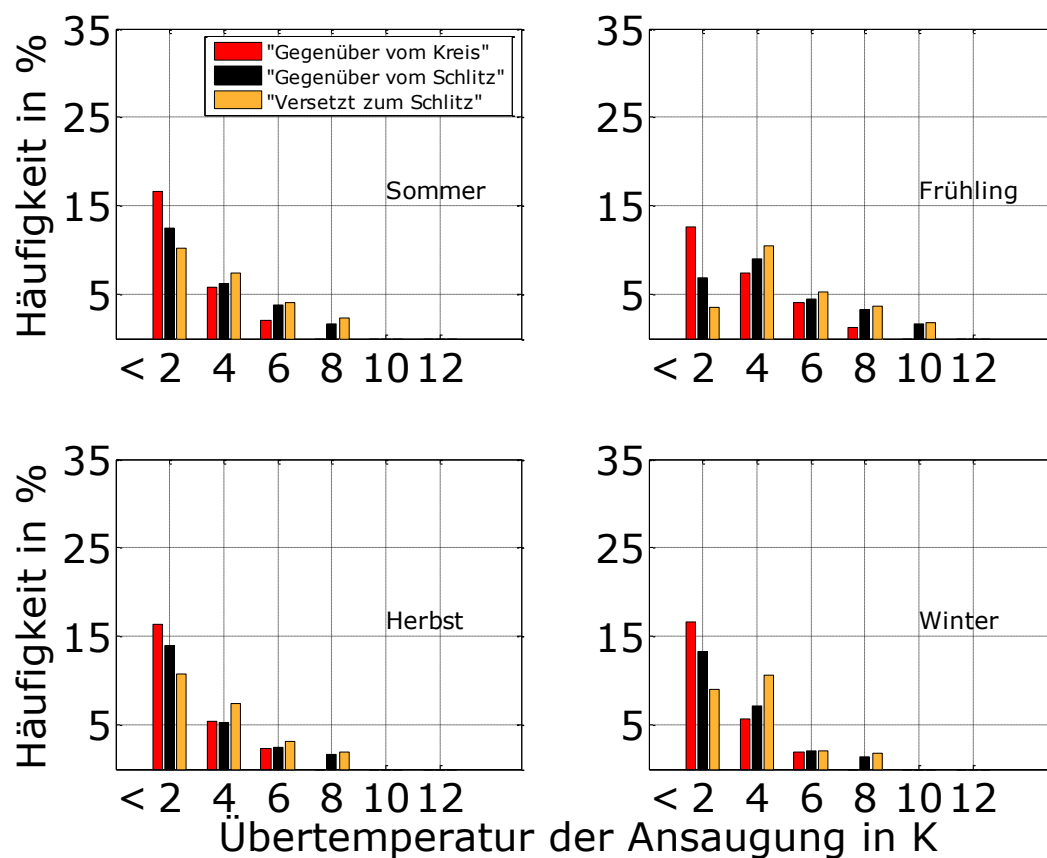


Abbildung 65 Vergleich der Übertemperaturen „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ für alle Jahreszeiten

4.10.7 Einfluss der Wetterdaten und Fassadentemperatur

Die Wetterdaten (Kapitel 4.6) und die Fassadentemperatur (Kapitel 4.5) werden einen Einfluss auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ausüben. Eine Einschätzung ihrer Abhängigkeiten zur Ansaugtemperatur erfolgt über graphische Auswertungen. Für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr werden die Stundenmittelwerte der Messwerte vom 01.08.2007 bis 31.07.2008 der betrachteten Größen verwendet. Der Zeitraum von 8-17 Uhr entspricht den Büroarbeitszeiten und fällt mit den höchsten zu erwartenden Übertemperaturen des Tages zusammen. Es werden sowohl Messtage betrachtet mit Windrichtungen von 90° und 270° und somit einer parallelen Anströmung der Südfassade als auch Messtage mit Windrichtungen von 180° und somit einer frontalen Anströmung der Südfassade. Des Weiteren erfolgt eine Unterteilung der nach Windrichtung sortierten Messtage nach den Windgeschwindigkeiten. Die Aufteilung erfolgt für Windgeschwindigkeiten kleiner 4 m/s und größer 4 m/s.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit der Ansaugtemperatur von der Außenlufttemperatur. Abbildung 66 und Abbildung 67 bei paralleler, Abbildung 68 und Abbildung 69 bei frontaler Anströmung zur Fassade. Es ist ein linearer Zusammenhang unabhängig von der Anströmung der Fassade und der Windgeschwindigkeit erkennbar.

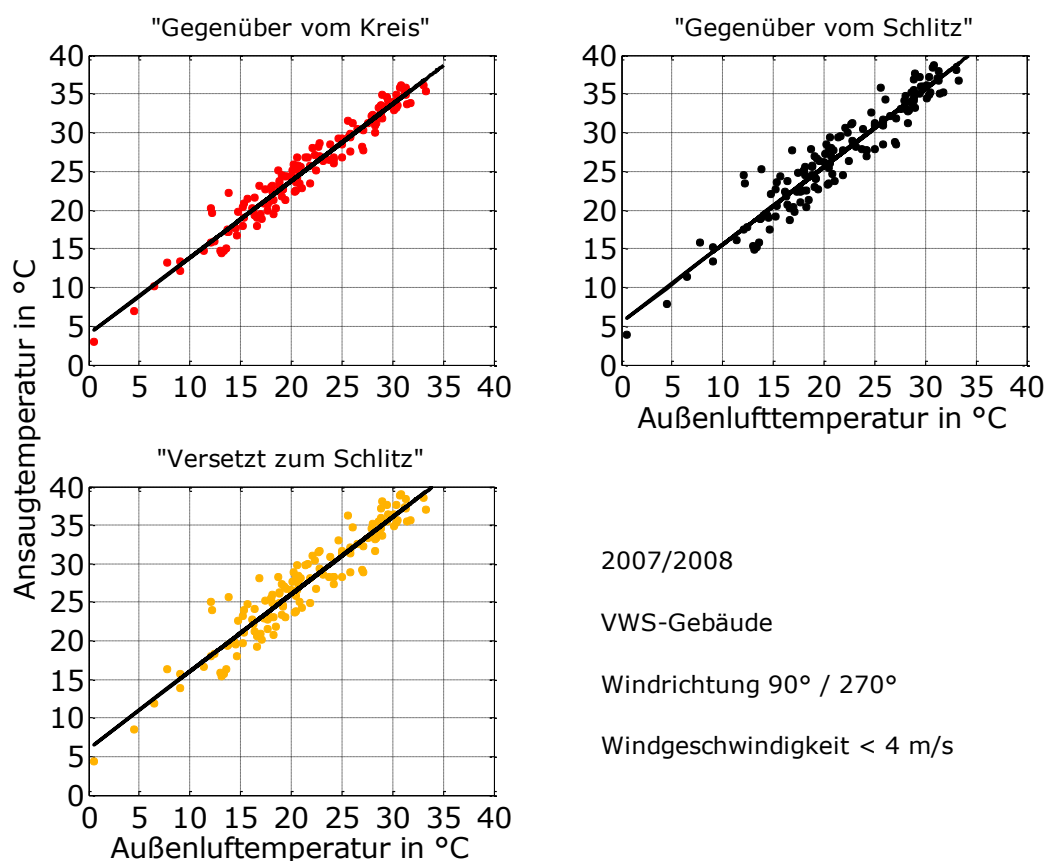
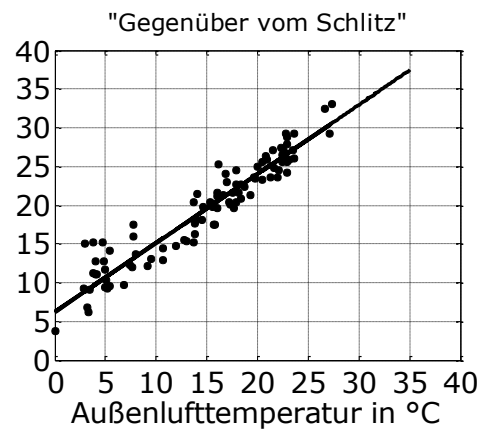
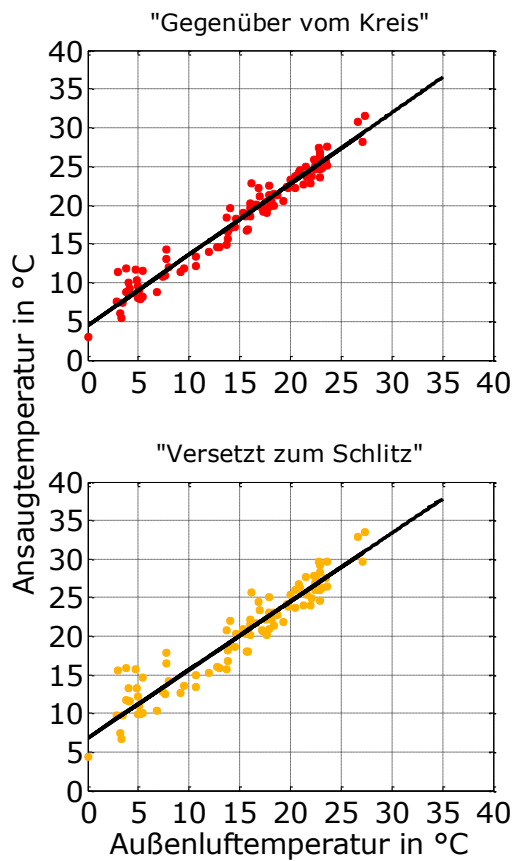


Abbildung 66 Ansaugtemperatur über Außenlufttemperatur bei paralleler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten kleiner 4m/s



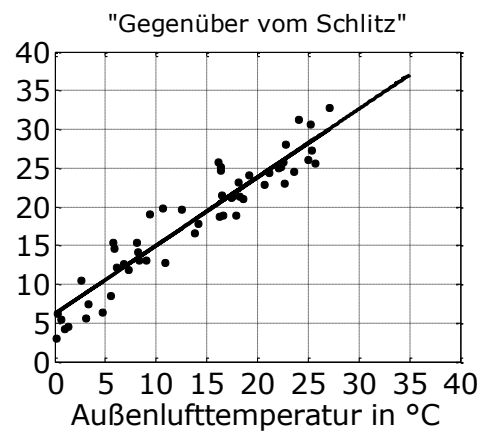
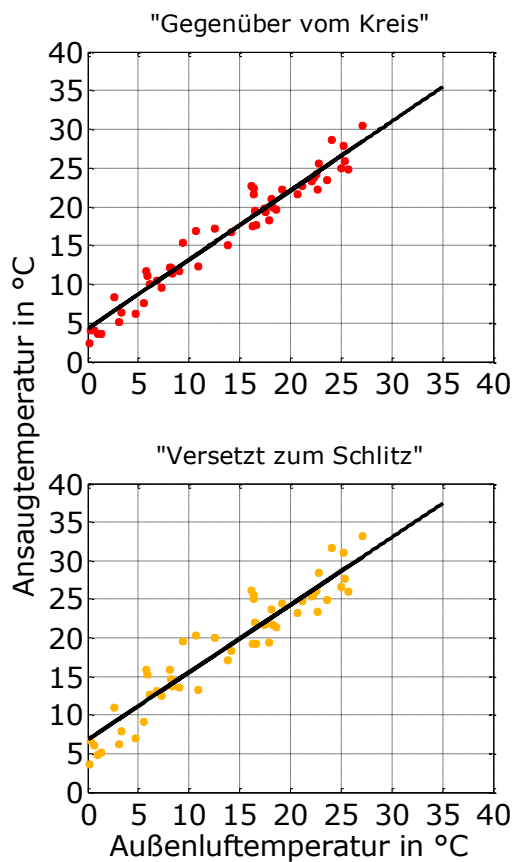
2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 90° / 270°

Windgeschwindigkeit > 4 m/s

Abbildung 67 Ansaugtemperatur über Außenlufttemperatur bei paralleler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten größer 4m/s



2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 180°

Windgeschwindigkeit < 4 m/s

Abbildung 68 Ansaugtemperatur über Außenlufttemperatur bei frontaler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten kleiner 4m/s

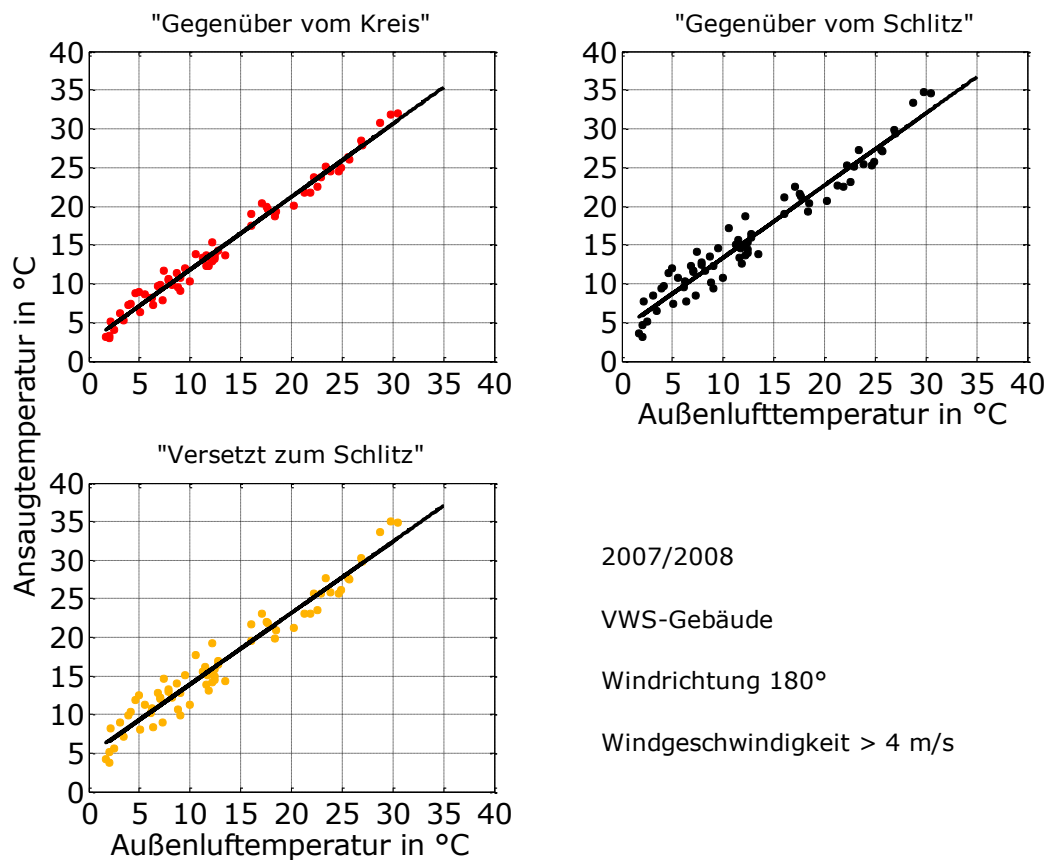
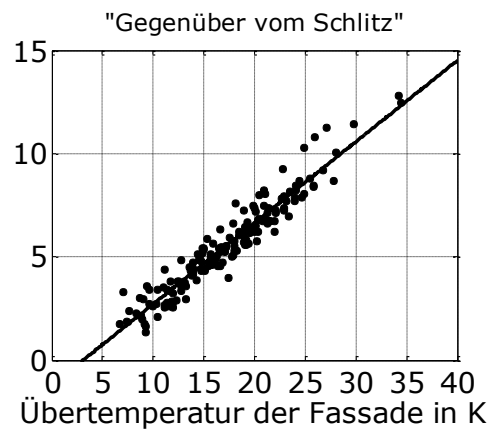
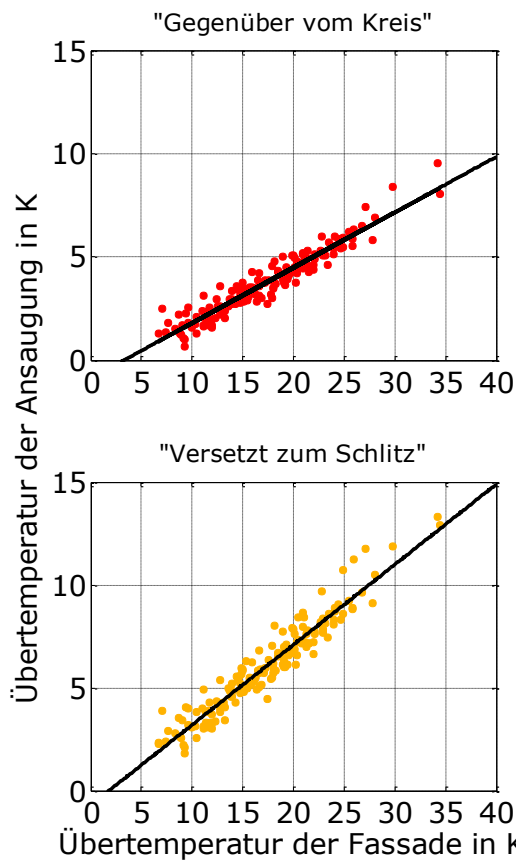


Abbildung 69 Ansaugtemperatur über Außenlufttemperatur bei frontaler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten größer 4m/s

Der deutliche lineare Einfluss zwischen der Außenlufttemperatur und der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wird bei der weiteren Auswertung berücksichtigt. Im Folgenden wird für die Übertemperatur der Ansaugung, die sich aus der Differenz zwischen Ansaugtemperatur und Außenlufttemperatur ergibt, der Einfluss der Fassadentemperatur, der Diffus- und Direktstrahlung, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit eingeschätzt.

Die Ansaugtemperatur wird von der Erwärmung der fassadennahen Grenzschicht beeinflusst (Kapitel 4.10.4). Die Fassadengrenzschicht-erwärmung wird durch Konvektion an der Fassadenoberfläche verursacht (Kapitel 6.1). Die Erwärmung der Fassadenfläche und somit die Fassadenoberflächentemperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ansaugtemperatur. Die Differenz aus Fassadenoberflächentemperatur und Außenlufttemperatur ergibt die Übertemperatur der Fassade. Die folgenden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit der Übertemperatur der Ansaugung zur Übertemperatur der Fassade. Abbildung 70 und Abbildung 71 bei paralleler, Abbildung 72 und Abbildung 73 bei frontaler Anströmung zur Fassade. Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Übertemperatur der Ansaugung und der Übertemperatur der Fassade unabhängig von der Anströmung der Fassade und der Windgeschwindigkeit erkennbar. Wie bereits im Kapitel 4.10.6 beschrieben, zeigen sich unterschiedliche Ansaugtemperaturen je nach Ansaugvariante. Die größten Ansaugtemperaturen ergeben sich bei der Ansaugvariante „Versetzt zum Schlitz“. Die angenäherte Gerade ist am steilsten.



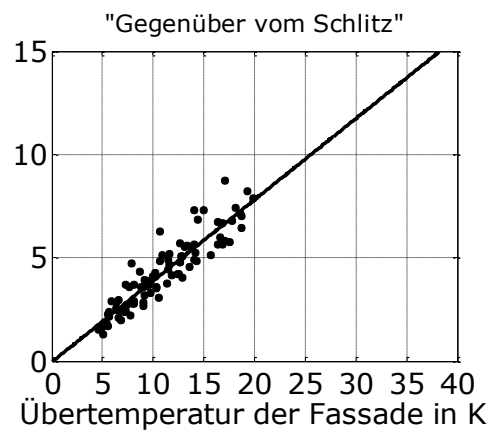
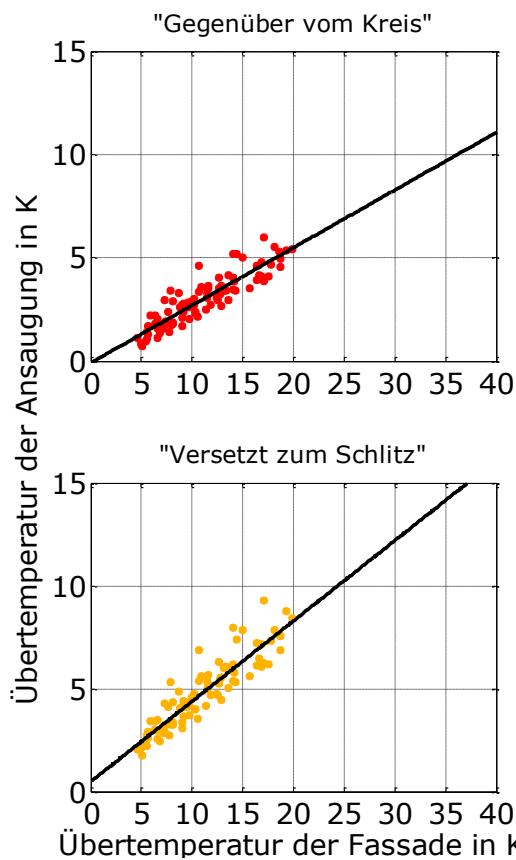
2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 90° / 270°

Windgeschwindigkeit < 4 m/s

Abbildung 70 Übertemperatur der Ansaugung über Übertemperatur der Fassade bei paralleler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten kleiner 4m/s



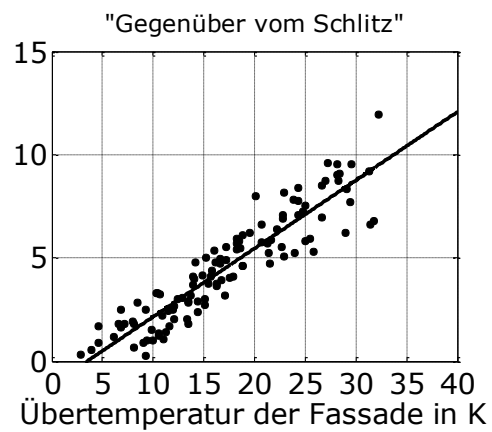
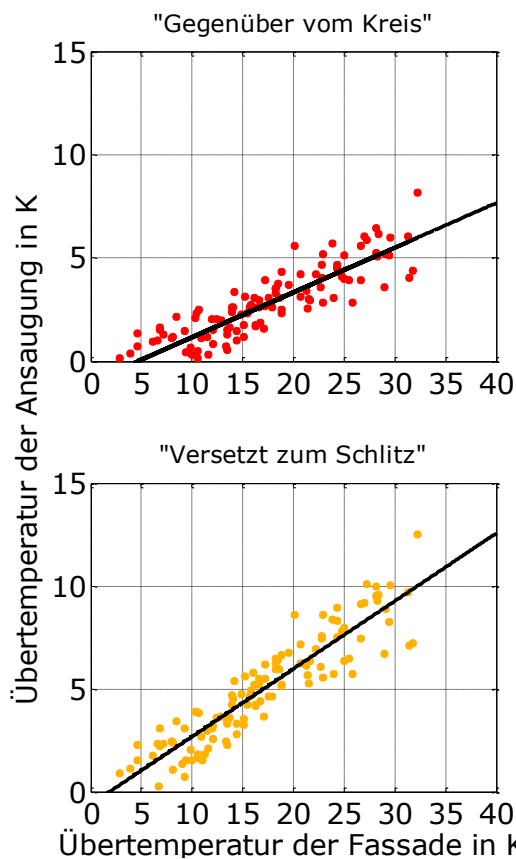
2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 90° / 270°

Windgeschwindigkeit > 4 m/s

Abbildung 71 Übertemperatur der Ansaugung über Übertemperatur der Fassade bei paralleler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten größer 4m/s



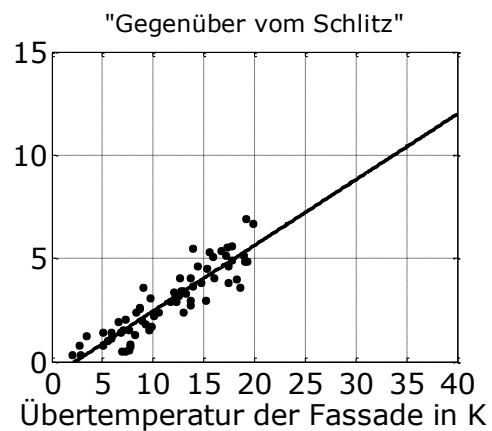
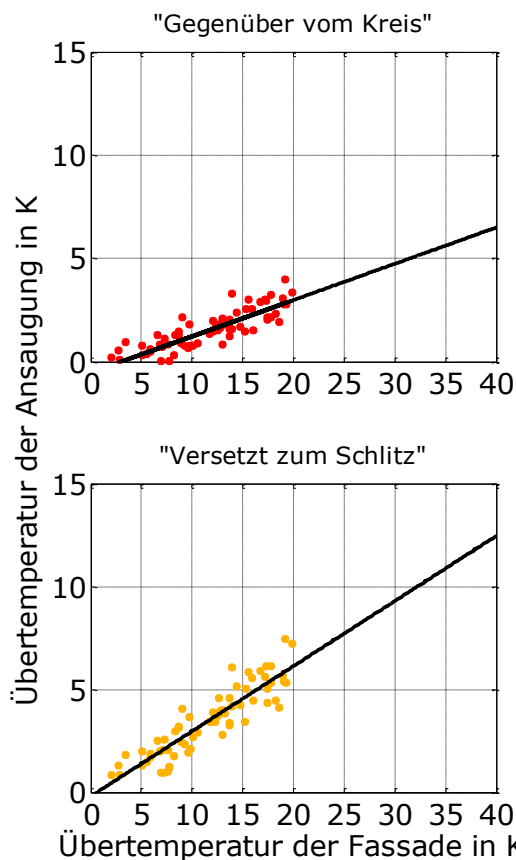
2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 180°

Windgeschwindigkeit < 4 m/s

Abbildung 72 Übertemperatur der Ansaugung über Übertemperatur der Fassade bei frontaler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten kleiner 4m/s



2007/2008

VWS-Gebäude

Windrichtung 180°

Windgeschwindigkeit > 4 m/s

Abbildung 73 Übertemperatur der Ansaugung über Übertemperatur der Fassade bei frontaler Anströmung der Fassade mit Windgeschwindigkeiten größer 4m/s

Die Diffus- und Direktstrahlung zeigen keinen direkten Zusammenhang zur Übertemperatur der Ansaugung dezentraler Fassadenlüftungsgeräte. Indirekt üben sie einen Einfluss aus, da sie in die Bilanz der Nettostrahlung auf die Fassadenoberfläche einfließen. Die Bilanz der Nettostrahlung wird im Kapitel 2.4 aufgestellt. Sie bilanziert die kurz- und langwelligen Strahlungsanteile. Die kurzwellige Gesamtstrahlung I_s (Kapitel 2.4) auf die Fassade setzt sich aus der direkten, diffusen und reflektierten Strahlung zusammen. Die Fassadenoberflächentemperatur hängt von der auftreffenden Nettostrahlung auf die Fassadenoberfläche (Kapitel 6.2) ab. Die Übertemperatur der Fassade weist wie in Abbildung 70 bis Abbildung 73 dargestellt einen linearen Zusammenhang zur Übertemperatur der Ansaugung auf. In der weiterführenden Betrachtung wird der Einfluss der Diffus- und Direktstrahlung auf die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte über die Fassadentemperatur berücksichtigt, die mit Hilfe der Nettostrahlung berechnet wird.

Windrichtung und Windgeschwindigkeit weisen keinen direkten Zusammenhang zur Übertemperatur der Ansaugung dezentraler Fassadenlüftungsgeräte auf. Weder für die Windgeschwindigkeit noch für die Windrichtung besteht ein linearer Zusammenhang. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird die Übertemperatur der Ansaugung sinken. Denn Windrichtung und Windgeschwindigkeit beeinflussen den Wärmeübergangskoeffizient und somit die konvektive Wärmeabgabe der Fassadenoberfläche an die Luftschicht. Es bildet sich eine Temperaturgrenzschicht vor der Fassadenfläche aus. Der Zusammenhang zwischen Wärmeübergangskoeffizient und Grenzschichtdicke ist in Kapitel 2.2.3 erläutert. Die Auswertung der Simulation beschreibt in Kapitel 7.7.2 den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke. An windigen Tagen ist die fassadennahe Grenzschicht dünn und der Wärmeübergangskoeffizient groß. Die Windgeschwindigkeit kühlt die Fassadenoberfläche ab, wodurch die konvektive Wärmeabgabe an die fassadennahe Luftschicht geringer wird und sich somit geringere Übertemperaturen der Ansaugung ergeben. Diese Aussage bestätigen die Abbildung 71 und Abbildung 73. Bei Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s ergeben sich ausschließlich Übertemperaturen der Fassade kleiner 20 K. Bei Windgeschwindigkeiten kleiner 4 m/s (Abbildung 70, Abbildung 72) entstehen auch Übertemperaturen der Fassade größer 20 K und somit auch größere Übertemperaturen der Ansaugung.

Der Einfluss des Windes wird in der weiteren Betrachtung ausschließlich über die vom Wärmeübergangskoeffizient abhängige Fassadentemperatur berücksichtigt. Für die Fassadentemperatur in Kapitel 6.2 und für den Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Kapitel 7.8 werden Berechnungsgleichungen aufgestellt.

4.11 Berechnungsansatz für die Übertemperatur der Ansaugung

Die Außenlufttemperatur weist in Kapitel 4.10.7 einen linearen Zusammenhang zur Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte auf. Sie gibt das Temperaturniveau vor, von dem die Ansaugtemperatur abweicht. Die Differenz zwischen Ansaugtemperatur T_{An} und Außenlufttem-

peratur T_{Al} wird als Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} bezeichnet. Für die Fassadentemperatur T_{Fa} wird ebenfalls eine Differenz zur Außenlufttemperatur T_{Al} gebildet und als Übertemperatur der Fassade UT_{Fa} benannt. Die Übertemperatur der Fassade weist in Kapitel 4.10.7 einen linearen Zusammenhang zur Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} auf. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Diffus- und Direktstrahlung dagegen nicht. Ihre Abhängigkeit zur Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} wird über die Fassadentemperatur berücksichtigt. Laut Kapitel 6.2 hängt die Fassadentemperatur von der auftreffenden Strahlung auf die Fassade und vom Wärmeübergangskoeffizienten ab. Diffus- und Direktstrahlung sind Strahlungsanteile der auftreffenden kurzwelligigen Strahlung (Kapitel 2.4). Der Wärmeübergangskoeffizient (Kapitel 7.8) ist von Windgeschwindigkeit und Windrichtung abhängig.

Der Berechnungsansatz zur Bestimmung der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte bildet den linearen Zusammenhang zwischen Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} und Übertemperatur der Fassade UT_{Fa} ab. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Diffus- und Direktstrahlung werden über die Fassadentemperatur berücksichtigt.

$$U_{ANT} = a_1 \cdot UT_{Fa} \quad (4-6)$$

Zur Bestimmung des Koeffizienten a_1 wird in Kapitel 5 ein statistisches Analyseverfahren durchgeführt. Dabei handelt es sich, wie in Kapitel 2.3 erläutert, um eine einfache lineare Regressionsanalyse, da als einzige Einflussgröße die Übertemperatur der Fassade UT_{Fa} betrachtet wird.

Die Auswertungen zeigen, dass die Fassadenstruktur (Kapitel 4.10.2), die Position der Ansaugöffnung (Kapitel 4.10.5) und die Ansaugvariante (Kapitel 4.10.6) die Ansaugtemperaturen beeinflussen. Die Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) unterscheiden sich durch die Geometrie der Ansaugöffnung in der Fassade und durch die Position der Fassadenöffnung zum inneren Geräteanschluss. Es wird ein erweiterter Berechnungsansatz aufgestellt. Der Koeffizient a_1 wird als Produkt eines Koeffizienten b_1 zur Beschreibung der Ansaugvariante und eines Koeffizienten c_1 zur Beschreibung der Position der Ansaugöffnung und der Fassadenstruktur ausgedrückt.

$$U_{ANT} = a_1 \cdot UT_{Fa} = b_1 \cdot c_1 \cdot UT_{Fa} \quad (4-7)$$

Die ermittelten Koeffizienten a_1 werden verglichen und die Koeffizienten b_1 und c_1 bestimmt. Tabelle 9 führt in Kapitel 5 die Koeffizienten auf.

Der aufgestellte Berechnungsansatz (4-7) wird in Kapitel 8 zur Aufstellung des Berechnungsmodells der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte verwendet. Denn wie in diesem Kapitel bereits erwähnt, beschreibt die Übertemperatur die Differenz der Ansaugtemperatur oder der Fassadentemperatur zur Außenlufttemperatur. Die Gleichung zur Berechnung der Fassadentemperatur wird in Kapitel 6.2 ermittelt.

5 Einfache lineare Regressionsanalyse

Der Berechnungsansatz zur Aufstellung des Berechnungsmodells der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wird in Kapitel 4.11 aufgestellt. Er beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen der Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} und der Übertemperatur der Fassade $U_{T_{Fa}}$. Die Übertemperatur beschreibt die Differenz der Ansaugtemperatur T_{An} oder der Fassadentemperatur T_{Fa} zur Außenlufttemperatur T_{Al} . Die Ansaugtemperaturen werden für ein Jahr für sieben unterschiedliche Fälle in Abhängigkeit der Fassadenstruktur, der Position der Ansaugöffnung und der Ansaugvariante gemessen, siehe Kapitel 4.2. Für jeden der sieben Fälle wird der Berechnungsansatz gemäß Gleichung (4-6) erstellt.

$$U_{ANT}^{\text{"Gegenüber vom Kreis", Glatte Fassade}} = a_{1,1} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-1)$$

$$(T_{An}^{\text{"Gegenüber vom Kreis", Glatte Fassade}} - T_{Al}) = a_{1,1} \cdot (T_{Fa, \text{Glatte Fassade}} - T_{Al})$$

$$U_{ANT}^{\text{"Gegenüber vom Schlitz", Glatte Fassade}} = a_{1,2} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-2)$$

$$U_{ANT}^{\text{"Versetzt zum Schlitz", Glatte Fassade}} = a_{1,3} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-3)$$

$$U_{ANT}^{\text{"Gegenüber vom Schlitz", Vorsprungfassade, Fassade}} = a_{1,4} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-4)$$

$$U_{ANT}^{\text{"Versetzt zum Schlitz", Vorsprungfassade, Fassade}} = a_{1,5} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-5)$$

$$U_{ANT}^{\text{"Gegenüber vom Schlitz", Vorsprungfassade, Nische}} = a_{1,6} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-6)$$

$$U_{ANT}^{\text{"Versetzt zum Schlitz", Vorsprungfassade, Nische}} = a_{1,7} \cdot U_{T_{Fa}} \quad (5-7)$$

Mit linearen Regressionsanalysen, wie in Kapitel 2.3 erläutert, werden die unbekannten Koeffizienten $a_{1,1}$ bis $a_{1,7}$ bestimmt. Sie erfolgen mit der Software Matlab des Unternehmens The MathWorks mit einem eigens geschriebenen Programm. Die Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} wird als Zielgröße und die Übertemperatur der Fassade $U_{T_{Fa}}$ als Einflussgröße betrachtet. Die Messwerte der Außenluft-, der Fassaden- und der Ansaugtemperatur fließen für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwerte in die Regressionsanalyse ein. Jedoch nur, wenn die Stundenmittelwerte der Außenlufttemperaturen kleiner als die Ansaug- und Fassadentemperaturen sind. Somit sind die Übertemperaturen stets positiv. Für jede der sieben aufgeführten Gleichungen (5-1)–(5-7) werden fünf Regressionsanalysen in Matlab durchgeführt. Die erste Analyse betrachtet alle Messwerte der Jahresmessung von 01.08.2007-31.07.2008. Die zweite Analyse betrachtet nur die Messwerte vom Frühling, die dritte nur die Messwerte vom Sommer, die vierte nur die Messwerte vom Herbst und die fünfte nur die Messwerte vom Winter. Somit bekommt man Koeffizienten, die den linearen Zusammenhang zwischen der Übertemperatur der Ansaugung U_{ANT} und der Übertemperatur der Fassade $U_{T_{Fa}}$ für das ge-

samte Jahr und für die einzelnen vier Jahreszeiten beschreiben. Tabelle 7 zeigt die ermittelten Koeffizienten $a_{1,1}$ bis $a_{1,7}$ für die sieben Fälle.

Tabelle 7 Koeffizienten $a_{1,1}$ bis $a_{1,7}$ aus der Regressionsanalyse

Fassadenstruktur	Ansaugvariante		Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Glatt	"Gegenüber vom Kreis"	$a_{1,1}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Glatt	"Gegenüber vom Schlitz"	$a_{1,2}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Glatt	"Versetzt zum Schlitz"	$a_{1,3}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Strukturiert	"Gegenüber vom Schlitz, Fassade"	$a_{1,4*}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Strukturiert	"Versetzt zum Schlitz, Fassade"	$a_{1,5*}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Strukturiert	"Gegenüber vom Schlitz, Nische"	$a_{1,6**}$	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
Strukturiert	"Versetzt zum Schlitz, Nische"	$a_{1,7**}$	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5

* bezogen auf die Fassadentemperatur der vordersten Fassadenfläche (Vorsprung)

** bezogen auf die Fassadentemperatur der zurückversetzten Fassadenfläche

Vergleicht man in Tabelle 7 die ermittelten Koeffizienten für die einzelnen Jahreszeiten einer Ansaugvariante, zeigt sich, dass die Koeffizienten jahreszeitlich unabhängig voneinander sind. Nur für die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ und „Versetzt zum Schlitz, Nische“ zeigen sich jahreszeitliche Abhängigkeiten. Im Kapitel 4.10.5 wird auf diese Abhängigkeit eingegangen. Im Winter heizt sich die Nischenrückwand stärker auf als im Sommer. Die Übertemperaturen der Ansaugung aus der Nische sind im Winter höher als im Sommer. Bisher erfolgten die Regressionen für die Ansaugvarianten „Versetzt zum Schlitz, Nische“ und „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ mit der Fassadentemperatur der zurückversetzten Fassadenfläche. Zum besseren Vergleich der Koeffizienten a_1 erfolgen weitere Regressionen mit der Fassadentemperatur der vordersten Fassadenfläche des Vorsprungs (Abbildung 74). Diese Temperatur fließt auch in die Regressionen für die Ansaugvarianten „Versetzt zum Schlitz, Fassade“ und „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“ ein. Die Tabelle 8 zeigt die jahreszeitlich unabhängigen Koeffizienten $a_{1,6*}$ und $a_{1,7*}$.

Tabelle 8 Koeffizienten $a_{1,6*}$ und $a_{1,7*}$ aus der Regressionsanalyse

Fassadenstruktur	Ansaugvariante		Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Strukturiert	"Gegenüber vom Schlitz, Nische"	$a_{1,6*}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Strukturiert	"Versetzt zum Schlitz, Nische"	$a_{1,7*}$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

* bezogen auf die Fassadentemperatur der vordersten Fassadenfläche (Vorsprung)

Ein Vergleich der in Tabelle 7 und in Tabelle 8 aufgeführten Koeffizienten $a_{1,1}$ bis $a_{1,5*}$ und $a_{1,6*}$ bis $a_{1,7*}$ ergibt, dass die Fassadestruktur, die Position der Ansaugöffnung und die Ansaugvariante einen Einfluss auf die Ansaugtemperatur haben. In Kapitel 4.11 wird diese Abhängigkeit im erweiterten theoretischen Modell berücksichtigt. Der Koeffizienten a_1 wird in der Gleichung (4-7) als Produkt eines Koeffizienten b_1 zur Beschreibung der Ansaugvariante und eines Koeffizienten c_1 zur Beschreibung der Fassadestruktur und der Position der Ansaugöffnung ausgedrückt. Der Zusammenhang zwischen den Koeffizienten b_1 , c_1 und a_1 ergibt sich aus der Tabelle 7 und Tabelle 8. Tabelle 9 führt die Koeffizienten b_1 und c_1 für das gesamte Jahr auf. Abbildung 74 zeigt die Position der Ansaugöffnungen.

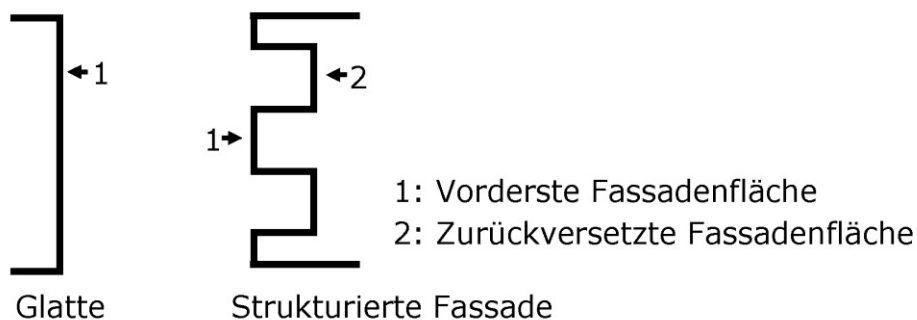


Abbildung 74 Position der Ansaugöffnungen in der Fassade

Für die Ansaugvariante „Gegenüber vom Kreis“ liegen keine Messwerte für die strukturierte Fassade vor. Der aufgeführte Koeffizient c_1 in Tabelle 9 ist daher eine Abschätzung. Ähnlich wie bei der glatten Fassade werden bei strukturierten Fassaden die Ansaugtemperaturen der Ansaugvariante „Gegenüber vom Kreis“ geringer sein als die Ansaugtemperaturen der Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“.

Tabelle 9 Koeffizienten zur Berechnung der Ansaugtemperatur

Fassadestruktur		Glatt	Strukturiert			
Position der Ansaugöffnung		Vorderste Fassadenfläche	Vorderste Fassadenfläche	Zurückversetzte Fassadenfläche		
					Frühling/ Sommer	Herbst/ Winter
Ansaugvariante	b_1	c_1	c_1	c_1	c_1	c_1
"Gegenüber vom Kreis"	0,2	1	0,7	0,5 *	1**	1,3**
"Gegenüber vom Schlitz"	0,3					
"Versetzt zum Schlitz"	0,4					

* bezogen auf die Fassadentemperatur der vordersten Fassadenfläche (Vorsprung)

** bezogen auf die Fassadentemperatur der zurückversetzten Fassadenfläche

Die Koeffizienten für die Gleichungen (5-1) bis (5-7) sind ermittelt. Der aufgestellte Berechnungsansatz (4-7) fließt in die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte in Kapitel 8 ein.

6 Berechnungsansatz für die Fassadenoberflächentemperatur

In Kapitel 4.11 ist der Berechnungsansatz für die Übertemperatur der Ansaugung aufgestellt, der die lineare Abhängigkeit zur Übertemperatur der Fassade beschreibt. Die Übertemperatur beschreibt die Differenz der Ansaug- oder der Fassadentemperatur zur Außenlufttemperatur. Für die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte in Kapitel 8 ist die Berechnungsgleichung der Fassadentemperatur erforderlich, die sich aus dem folgenden Berechnungsansatz herleitet.

Die dezentralen Lüftungsgeräte saugen fassadennahe Luft an. Die Lufttemperaturen ändern sich innerhalb eines Grenzschichtbereichs von der Fassadenoberflächentemperatur T_{Fa} bis zur Außenlufttemperatur T_{Al} . Es bildet sich, wie in Abbildung 75 beispielhaft dargestellt, vor der Fassade ein Temperaturprofil aus. Dieses Temperaturprofil wird in dieser Arbeit sowohl von den durchgeführten Temperaturmessungen (Kapitel 4.7) in unterschiedlichen Abständen normal zur Fassadenoberfläche als auch von den berechneten Strömungssimulationen (Kapitel 7.6) bestätigt.

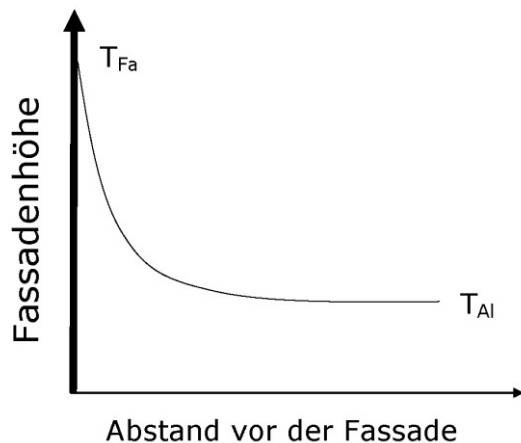


Abbildung 75 Temperaturverlauf vor einer Fassadenwand

Durch den Temperaturunterschied ($T_{Fa} - T_{Al}$) zwischen Fassadenoberfläche und Außenluft geht Wärme von der Fassade in die fassadennahe Luft über. Für diesen konvektiven Wärmeübergang kann die Wärmestromdichte $\dot{q}_{A,konv}$ [8] mit Hilfe eines Wärmeübergangskoeffizienten α_{Fa} wie folgt berechnet werden.

$$\dot{q}_{A,konv} = \alpha_{Fa} \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) \quad (6-1)$$

Aus der Gleichung (6-1) kann die Fassadenoberflächentemperatur T_{Fa} ermittelt werden, sobald die konvektive Wärmeabgabe $\dot{q}_{A,konv}$ und der Wärmeübergangskoeffizient α_{Fa} bekannt sind. Im Kapitel 6.1 wird die Bilanz zur Berechnung der konvektiven Wärmeabgabe $\dot{q}_{A,konv}$ aufgestellt. Die Berechnungsgleichung für den Wärmeübergangskoeffizient α_{Fa} geht aus der Auswertung der Strömungsberechnungen hervor und wird in Kapitel 7.8 hergeleitet.

6.1 Wärmeübertragungsbilanz an der vertikalen Fassade

Die Fassadenoberflächentemperaturen werden von den Mechanismen der Wärmeübertragung Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung beeinflusst. Zur Berechnung der konvektiven Wärmeabgabe kann die Gleichung (6-1) oder eine Bilanz der Wärmeübertragung an der Fassadenwand aufgestellt werden. Die verwendeten Bilanzgrößen sind in der Abbildung 76 aufgeführt. Bei einem Temperaturunterschied zwischen der Wandoberfläche und der sich bewegenden Luftschicht wird Wärme konvektiv übertragen. Die auftretenden konvektiven Wärmeströme sind $\dot{q}_{A,konv}$ der äußeren Fassadenoberfläche und $\dot{q}_{I,konv}$ der inneren Wandfläche. Die Wärmeleitung $\dot{q}_{I,Leit}$ entsteht in Abhängigkeit des Temperaturgradienten innerhalb der Fassadenwand. Des Weiteren sendet jeder Körper mit einer Temperatur, die oberhalb des absoluten Nullpunktes liegt, Strahlung in Form von elektromagnetischen Wellen aus. Somit wird die Fassadenoberfläche langwellige Strahlung $I_{L,Fa,em}$ emittieren und aus der Umgebung langwellige Abstrahlung I_L erhalten. Zusätzlich wird die Fassade tagsüber durch die kurzwellige Solarstrahlung I_S erwärmt.

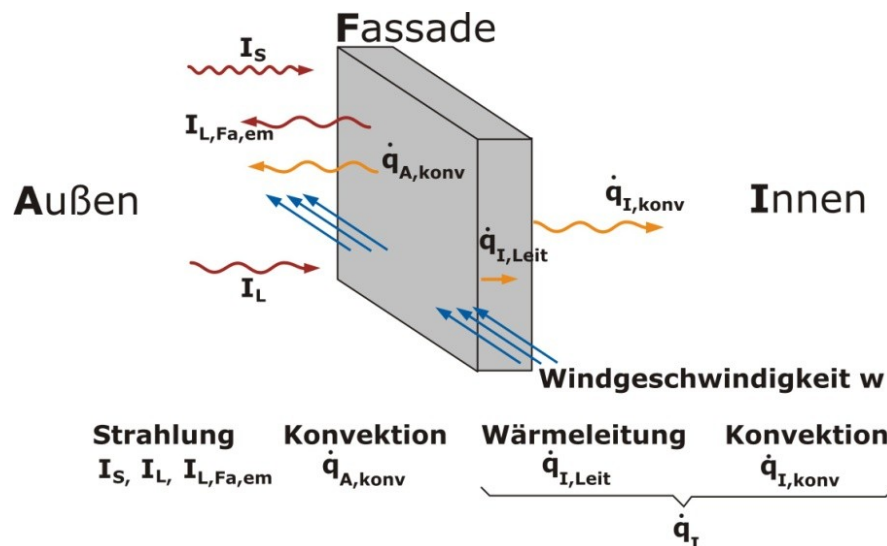


Abbildung 76 Bilanzgrößen der Wärmeübertragung an der Fassadenwand

Bei der Bilanzierung wird berücksichtigt, dass die auf die Fassade auftreffende langwellige Strahlung I_L emittiert und die kurzwellige Strahlung I_S absorbiert bzw. reflektiert wird. Die lang- und kurzweligen Strahlungsanteile werden daher entsprechend mit dem Emissionsgrad $\epsilon_{L,Fa}$ bzw. dem Absorptionsgrad $a_{S,Fa}$ multipliziert. Für die konvektive Wärmeabgabe ergibt sich folgende Bilanzgleichung.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{A,konv} &= a_{S,Fa} \cdot I_S + \epsilon_{L,Fa} \cdot I_L - I_{L,Fa,em} - (\dot{q}_{I,Leit} + \dot{q}_{I,konv}) \\ &= I - \dot{q}_I \end{aligned} \quad (6-2)$$

Die Wärmeströme $\dot{q}_{I,konv}$ und $\dot{q}_{I,Leit}$ werden zur Wärmestromdichte $\dot{q}_I$ zusammengefasst und die Strahlungsgrößen durch die Nettostrahlung I der Fassadenoberfläche aus Kapitel 2.4 ausgedrückt.

6.2 Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur

Die Fassadenoberflächentemperatur beeinflusst den über die Fassade konvektiv abgegebenen Wärmestrom, der die Luft in Fassadennähe erwärmt und somit Einfluss auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Lüftungsgeräte hat. Die konvektive Wärmestromdichte $\dot{q}_{A,konv}$ wird sowohl über die Gleichung (6-1) in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_{Fa} und der Temperaturdifferenz zwischen Fassadenoberfläche und Außenluft als auch über die aufgestellte Bilanzgleichung (6-2) beschrieben. Die Gleichungen (6-1) und (6-2) werden gleichgesetzt. Es ergibt sich die folgende Beziehung aus der die Fassadentemperatur ermittelt wird.

$$\alpha_{Fa} \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) = a_{S,Fa} \cdot I_S + \epsilon_{L,Fa} \cdot I_L - I_{L,Fa,em} - \dot{q}_I \quad (6-3)$$

Die Wärmestromdichte $\dot{q}_I$, die über die Fassadenwand nach innen abgeführt wird, kann mit Hilfe des Wärmedurchgangswiderstandes R_W und der Temperaturdifferenz zwischen Fassadenfläche T_{Fa} und Innenwand T_{IR} abgeschätzt werden. Es wird die folgende Gleichung verwendet.

$$\dot{q}_I = \frac{1}{R_W} \cdot (T_{Fa} - T_{IR}) \quad (6-4)$$

Der Wärmedurchgangswiderstand R_W setzt sich aus dem Wärmeleitwiderstand R_{leit} und dem inneren Wärmeübergangswiderstand R_{IW} zusammen. Die Terme der folgenden Gleichung sind den Gleichungen für den Wärmedurchgang mehrschichtiger Wände [34] entnommen.

$$R_W = R_{leit} + R_{IW} = \sum_i \frac{\delta_{W,i}}{\lambda_{W,i}} + 0,13 m^2 K / W \quad (6-5)$$

In Gleichung (6-3) werden die Gleichung (6-4) für die Wärmestromdichte $\dot{q}_I$ und aus Kapitel 2.4.3 die Gleichung (2-45) für die langwellige Fassadeinstrahlung $I_{L,Fa,em}$ eingesetzt, um die folgende Gleichung zu erhalten.

$$\alpha_{Fa} \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) + \epsilon_{L,Fa} \cdot \sigma \cdot T_{Fa}^4 = a_{S,Fa} \cdot I_S + \epsilon_{L,Fa} \cdot I_L - \frac{1}{R_W} (T_{Fa} - T_{IR}) \quad (6-6)$$

Die vorhergehende Gleichung kann wie folgt umgestellt werden.

$$\epsilon_{L,Fa} \cdot \sigma \cdot T_{Fa}^4 + (\alpha_{Fa} + \frac{1}{R_W}) T_{Fa} - a_{S,Fa} \cdot I_S - \epsilon_{L,Fa} \cdot I_L - \frac{1}{R_W} T_{IR} - \alpha_{Fa} T_{Al} = 0 \quad (6-7)$$

Die Gleichung (6-7) entspricht einer Potenzfunktion der folgenden Form.

$$\psi_1 \cdot T_{Fa}^4 + \psi_2 \cdot T_{Fa} - \Delta = 0 \quad (6-8)$$

Für die Größen Ψ_1 , Ψ_2 und Δ gelten die folgenden Zusammenhänge.

$$\Psi_1 = \varepsilon_{L,Fa} \cdot \sigma \quad (6-9)$$

$$\Psi_2 = \alpha_{Fa} + \frac{1}{R_w} \quad (6-10)$$

$$\Delta = a_{S,Fa} \cdot I_S + \varepsilon_{L,Fa} \cdot I_L + \frac{1}{R_w} \cdot T_{IR} + \alpha_{Fa} \cdot T_{AI} \quad (6-11)$$

Für eine Funktion $f(x)=0$ gilt nach dem Newtonschen Näherungsverfahren folgende Iterationsvorschrift [14].

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})} \quad (6-12)$$

Zur Bestimmung der Fassadenoberflächentemperatur ergibt sich unter Verwendung des Newtonschen Näherungsverfahrens aus der Gleichung (6-8) folgender Zusammenhang.

$$T_{Fa,n} = T_{Fa,n-1} - \frac{(\Psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^4 + \Psi_2 \cdot T_{Fa,n-1} - \Delta)}{4 \cdot \Psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^3 + \Psi_2} \quad (6-13)$$

Mit der Fassadenoberflächentemperatur $T_{Fa,n-1}$ des letzten Zeitschritts lässt sich der neue Wert der Oberflächentemperatur $T_{Fa,n}$ iterativ bestimmen. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe eines Programms, das die erforderlichen Konstanten und Wetterdaten in die Gleichung (6-13) einließt. Zum Beispiel kann die kommerzielle Software Matlab des Unternehmens The MathWorks verwendet werden. Mit den Wetterdaten des Testreferenzjahres [18] können Jahreswerte der Fassadenoberflächentemperatur ermittelt werden. Erscheint die Programmierung der Gleichung (6-13) zu aufwendig, kann die Fassadenoberflächentemperatur, wie in Kapitel 8.1 geschildert, als Tageswert abgeschätzt werden.

Die Gleichung (6-13) zur Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur ist aufgestellt und fließt in Kapitel 8 in das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ein. Die Fassadenoberflächentemperatur kann jedoch erst berechnet werden, wenn der Wärmeübergangskoeffizient α_{Fa} bekannt ist. Die Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{Fa} wird mit Hilfe numerischer Strömungsberechnungen in Kapitel 7.8 hergeleitet.

6.3 Vergleich der Messwerte mit den Berechnungswerten

Zur Validierung der hergeleiteten Gleichung (6-13) wird die Fassadentemperatur des VWS-Gebäudes berechnet und mit den Messwerten der Fassadentemperatur des VWS-Gebäudes (Kapitel 4.5) verglichen. Zur Berechnung wird der Wärmeübergangskoeffizient über die Gleichung (7-6) ermittelt, die erst in Kapitel 7.8 hergeleitet wird. Die Außenlufttemperatur T_{Al} , die Diffusstrahlung $I_{S,diff}$ und die Globalstrahlung $I_{S,Glob}$ werden von der Wetterstation auf dem VWS-Gebäude (Kapitel 4.6) erfasst und fließen genau wie die in der Tabelle 10 angegebenen Stoffwerte und Konstanten in die Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur ein. Alle Messwerte vom 01.08.2007-31.07.2008 werden für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwerte berücksichtigt.

Tabelle 10 Stoffwerte und Konstanten

Größen	Werte
Gaskonstante für Wasserdampf R_{WD} [4]	461 J/kgK
Strahlungskonstante σ [4]	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Langwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens $\rho_{L,terr}$ [17]	0,93 (Asphalt)
Kurzwelliger Reflexionsgrad des Erdbodens $\rho_{S,terr}$ [17]	0,12 (Asphalt)
Langwelliger Emissionsgrad des Erdbodens $\epsilon_{L,terr}$ [17]	0,93
Absorptionsgrad der Fassadenoberfläche $a_{S,Fa}$	0,94
Emissionsgrad der Fassadenoberfläche $\epsilon_{L,Fa}$	0,98
Emissionsgrad der wolkenlosen Atmosphäre $\epsilon_{L,k}$ [17]	$9,9 \cdot 10^{-6}$

Die Abbildung 77 zeigt die Häufigkeitsverteilung der prozentualen Abweichung zwischen Mess- und Berechnungswert der Fassadentemperaturen in °C des VWS-Gebäudes. Im Sommer betragen die Abweichungen maximal 15 %. 55 % der Abweichungen sind kleiner 5 %. Im Frühling sind 27 %, im Herbst 22 % und im Winter 20 % der Abweichungen kleiner 5 %. Im Frühling und Herbst sind 10 % der Abweichungen kleiner 20 %. Verglichen mit den anderen Jahreszeiten treten im Winter mit 23 % Häufigkeit die Abweichungen kleiner 20 % am häufigsten auf.

Im Sommer und in der Übergangszeit ist der Fehler zwischen Mess- und Berechnungswert akzeptabel. Im Winter ist mit größeren Abweichungen zu rechnen. Im Sommer sind 93 % (Summe von 5 % und 10 % Abweichung), im Frühling und Herbst 65 % und im Winter 54 % der Abweichungen kleiner 10 %. Die Abweichungen können sowohl durch Messungenauigkeiten als auch durch Berechnungsfehler begründet werden. Die Temperaturmessungen (Kapitel 4.1) erfolgen mit Thermoelementen, die auf 0,1 K genau kalibriert sind. Die Abweichungen der Sensoren der Wetterstation sind in Kapitel 4.6 aufgeführt. Die Fassadentemperatur wird über das Newtonsche Näherungsverfahren berechnet (Kapitel 6.2). Es

wird der Wärmeübergangskoeffizient berücksichtigt, dessen Abweichung in Kapitel 7.8 aufgeführt ist.

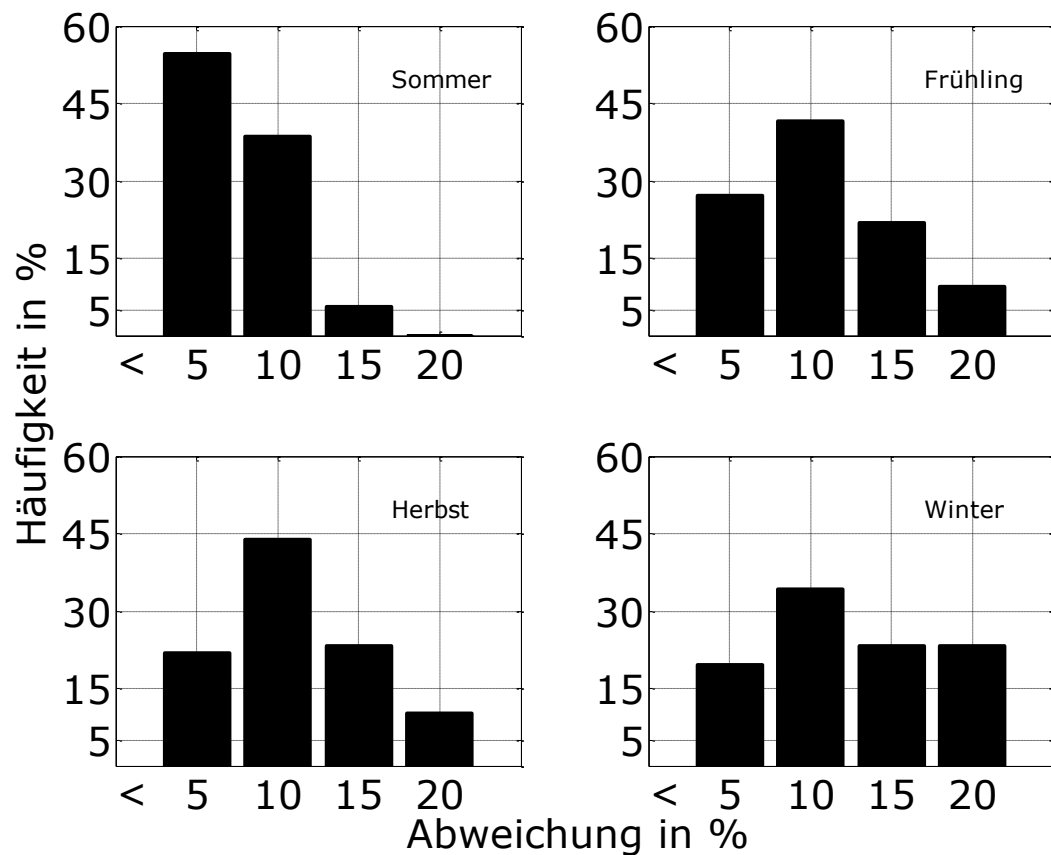


Abbildung 77 Vergleich der Abweichungen gemessener und berechneter Fassadentemperaturen

Die aufgestellte Gleichung (6-13) zur Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur fließt in Kapitel 8 in das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ein.

7 Numerische Strömungsberechnung

Der Wärmeübergangskoeffizient beeinflusst die fassadennahen Temperaturwerte und somit die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf den Wärmeübergangskoeffizient der Fassadenoberfläche wird mit Hilfe der Strömungsberechnungen ermittelt. Für die Strömungsberechnungen wird das Programm ANSYS CFX 11.0 verwendet. Der stationäre Verlauf der Luftgeschwindigkeiten und der Temperatur im Luftvolumen vor der Fassade wird berechnet. Zur Validierung der Simulationsrechnungen wird das gemessene Temperaturprofil in der thermischen Grenzschicht vor der Fassade (Kapitel 4.7) mit den simulierten Ergebnissen verglichen.

7.1 Modellbildung in ANSYS ICEM 11.0

Die Modellbildung und das Gitter werden mit dem Programm ANSYS ICEM 11.0 erstellt. Das Modell für die Strömungsberechnungen ist in der Abbildung 78 dargestellt. Ein quaderförmiger Modellkörper bildet das Gebäude ab. Die Abmaße des Modellkörpers mit glatter Fassade entsprechen dem VWS-Gebäude in Kapitel 4.2. Die Länge des Modellkörpers beträgt 15 m, die Breite 25 m und die Höhe 32 m. Der Flachbau vor dem VWS-Gebäude wird weggelassen, um Zellenanzahl und Rechenzeiten minimal zu halten. Das Simulationsmodell ist nur mit den Messwerten an Tagen mit Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s, wie im Kapitel 4.7 und im Kapitel 7.6 erläutert, validierbar.

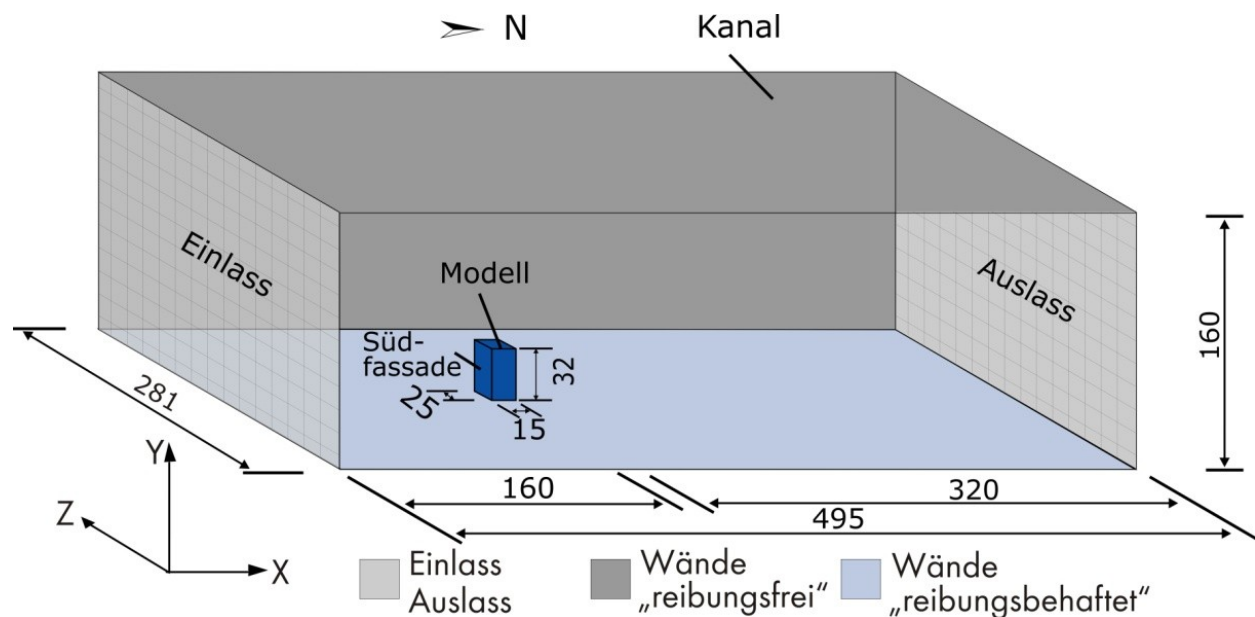


Abbildung 78 Modell zur Strömungsberechnung

Reale Gebäude werden vom Wind umströmt. Der Modelkörper wird daher von einem Kanal umgeben, in dem sich ein Geschwindigkeitsprofil ausbildet, das nach der folgenden empirischen Gleichung [35] berechnet wird.

$$w = w_{10\text{ m}} \cdot \left(\frac{H}{10\text{ m}}\right)^p \quad (7-1)$$

Der Profilexponent P charakterisiert das Gelände. Für offenes Gelände ist $P=0,16$, für die Vorstadt $P=0,28$ und für die Innenstadt $P=0,4$. Die Simulationsrechnungen erfolgen für offenes Gelände mit $P=0,16$. Die Windgeschwindigkeit $w_{10\text{ m}}$ wird über der Höhe des gesamten Einlasses konstant vorgegeben. Die Höhe H ist die Kanalhöhe. Mit Eintritt in den Kanal bildet sich das Geschwindigkeitsprofil auf Grund des reibungsbehafteten Bodens aus. Der Modellkörper wird umströmt. Für die Ausbildung dieser Umströmung muss der Kanal entsprechend groß sein. Länge, Breite und Höhe des Kanals sind Mehrfache der Modellhöhe. In den Kanal wird der Modellkörper so positioniert, dass die Einlaufstrecke vor dem Modell fünfmal der Modellhöhe (160 m) und die Auslaufstrecke hinter dem Modell zehnmal der Modellhöhe (320 m) entspricht. Östlich und westlich vom Modell breitet sich der Kanal mit jeweils viermal der Modellhöhe aus. Der Kanal weist insgesamt eine Länge von 495 m und eine Breite von 281 m auf. Die Höhe entspricht mit 160 m dem fünffachen der Modellhöhe. Gebäude werden aus unterschiedlichen Himmelsrichtungen umströmt. Mit den CFX-Modellen in Abbildung 79 wird der Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergangskoeffizient der Fassadenoberfläche bestimmt.

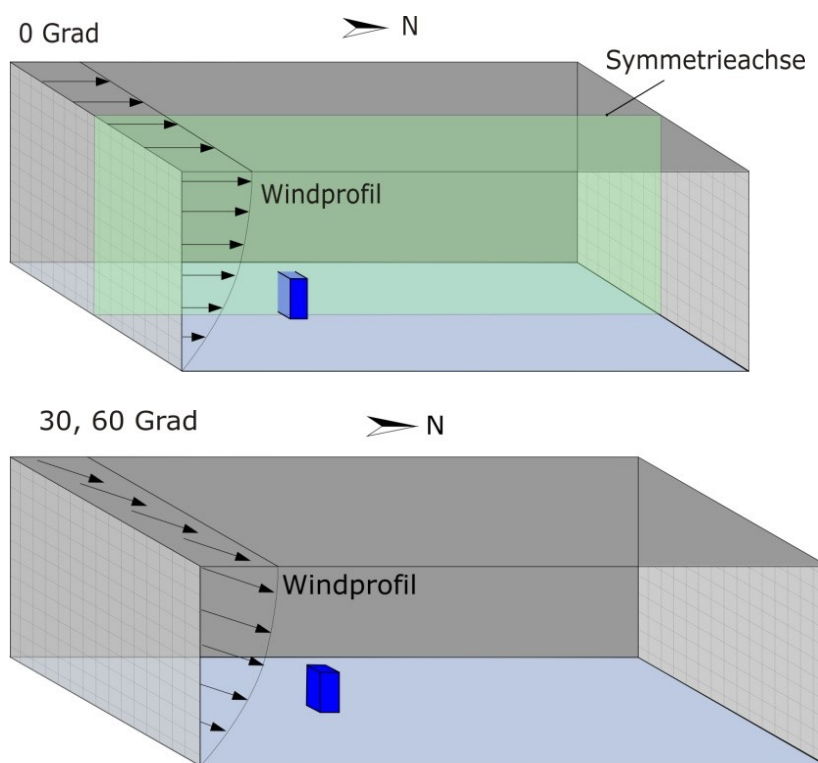


Abbildung 79 Simulationsmodelle mit variiertem Anströmung der Südfassade

Beim Modell „0 Grad“ wird die betrachtete Südfassade senkrecht angeströmt, die Windrichtung beträgt 180° . Bei dem Modell „30, 60 Grad“ wird das Windprofil um 30° bzw. 60° gedreht, so dass die Südfassade von Süd / West überströmt wird. Die Windrichtung beträgt 210° oder 240° . In der Solvereinrichtung (Kapitel 7.5) wird das Windprofil für die X, Y, Z Koordinaten als Randbedingung festgelegt. Es werden folgende Geschwin-

digkeitsprofile für die kartesischen Koordinaten vorgegeben, die von dem Anströmwinkel AW abhängen. Der Anströmwinkel spannt sich zwischen Windrichtung und Fassadenfläche auf, siehe Kapitel 7.7.1.

X-Koordinate: $WG_X = w \cdot \sin(AW)$ mit $AW=30^\circ$, 60° oder 90°

Y-Koordinate: $WG_Y = 0$

Z-Koordinate: $WG_Z = w \cdot \cos(AW)$ mit $AW=30^\circ$, 60° oder 90°

7.2 Entwicklung und Auswertung der Gitterstruktur

Ziel der Gitterstruktur ist es, dass sich die Gebäudeumströmung realitätsgetreu ausbildet und das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil vor der Modelloberfläche fein auflöst. Größe und Form der Zellen werden diesen Zielen angepasst. Die Gittergenerierung erfolgt in ANSYS ICEM 11.0. Die dargelegte Entwicklung der Gitterstruktur führt zum gewählten Gitter in Kapitel 7.4.

Die ersten Gittergenerierungen erfolgen mit strukturierten Hexaedernetzen. Das gesamte Modell wird jeweils mit Hexaedern vergittert. Zur Beurteilung der Gitter werden Netzkriterien [36] herangezogen, die in ICEM erfüllt sein müssen. Die Mindestqualität (Min quality) muss größer 0,3 und der Mindestwinkel (min angle) größer 18° sein. Die Tabelle 11 führt die Anzahl der Zellen und die Qualitätsmerkmale des groben und feinen Hexaedergitters auf. Es zeigt sich, dass die Netzkriterien erfüllt sind. Jedoch bietet auch die feine Netzstruktur keine ausreichende Auflösung zur Ausbildung des Temperaturprofils unmittelbar vor der Modelloberfläche. Eine weitere Verfeinerung des Gitters führt zu einer zu großen Zellanzahl, so dass die Rechenzeiten zu lang werden.

Tabelle 11 Anzahl der Zellen und Qualitätsmerkmale der Hexaedergitter

	Hexaedergitter grob	Hexaedergitter fein	Netzkriterien in ICEM
Anzahl Knoten	4257729	11172563	
Anzahl aller Elemente	4357260	11371344	
Anzahl Hexaeder	4160112	10976488	
Mindestqualität (Min Quality)	0,7	0,6	> 0,3
Mindestwinkel (Min angle)	54	47	> 18

Im Folgenden wird daher um den Modellkörper ein Bereich gelegt, der überwiegend mit Hexaedern fein vergittert wird. Der Bereich wird im Folgenden mit „Density-Box“ bezeichnet. Außerhalb der „Density-Box“ entsteht ein grobes Tetraedernetz. Die „Density-Box“ wird in ihrer Größe der Umströmung des Gebäudes angepasst. Diese Anpassung erfolgt, indem nach der Simulationsrechnung die Umströmung des Gebäudes beurteilt wird. Liegt die Umströmung außerhalb der „Density-Box“ wird sie vergrößert und eine erneute Simulationsrechnung gestartet. Diese Rechnungen

erfolgen für das Modell „0 Grad“ und für das Modell „30, 60 Grad“ mit den Randbedingungen der Tabelle 12 und der Solvereinstellung in Kapitel 7.5.

Tabelle 12 Randbedingung der Rechnungen zur Entwicklung der Gitterstruktur

T_{AL} in K	T_{Fa} in K	WG in m/s	Modell CFX	Anströmung zur Fassadenfläche
293	309	9	0 Grad	Frontal (90°) zur Südfassade

Nach Festlegung der Größe der „Density Box“ erfolgt eine Verfeinerung der Vernetzung unmittelbar vor der Modelloberfläche. Die erste Gittergenerierung erfolgt so, dass die Höhe der ersten Zelle vor der Modelloberfläche 5 mm beträgt. Bei der zweiten beträgt die Höhe der ersten Zelle vor der Modelloberfläche 2,5 mm. Die Tabelle 13 führt die Anzahl der Zellen und die Qualitätsmerkmale der Gitter auf. Die Zellen sind hauptsächlich Tetraeder und Hexaeder. Es zeigt sich, dass die Qualitätsmerkmale schlechter geworden sind und die Kriterien nicht erfüllen. Die schlechten Zellen befinden sich ausschließlich im Tetraedernetz, welches außerhalb des relevanten Bereichs der Gebäudeumströmung liegt. Das Hexaedernetz innerhalb der „Density Box“ weist keine schlechten Zellen auf und erfüllt die Netzkriterien in ICEM, wie die angegebenen Mittelwerte (fett gedruckt) von Netzqualität und Winkel bestätigen. Eine Halbierung der ersten Zelle vor der Modelloberfläche von 5 mm auf 2,5 mm ist sinnvoll, um das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil vor der Modelloberfläche feiner auflösen zu können.

Tabelle 13 Anzahl der Zellen und Qualitätsmerkmale der Gitterstruktur aus Tetraedern und Hexaedern mit „Density Box“

	1. Zelle 5 mm breit	1. Zelle 2,5 mm breit	Netzkriterien in ICEM
Anzahl Knoten	1117802	1297659	
Anzahl aller Elemente	2621212	3145802	
Anzahl Tetraeder	799417	1041079	
Anzahl Hexaeder	228885	223220	
Mindestqualität (Min Quality)	0,022	0,05	> 0,3
Mittelwert Qualität (Mean Quality)	0,8	0,8	> 0,3
Mindestwinkel (Min angle)	7	5	> 18
Mittelwert Winkel (Mean angle)	46	48	> 18

7.3 Gitterunabhängigkeitsstudie

In Kapitel 7.2 wird der Aufbau der Gitterstruktur begründet und die Qualitätsmerkmale des Netzes beschrieben. Ein weiteres Gitter mit einer Zellenhöhe von 1,25 mm vor der Modellfläche wird erstellt. Eine Vergleichsrechnung zeigt, dass diese weitere Verfeinerung keine besseren Ergebnisse liefert. Die Validierung des Strömungsmodells in Kapitel 7.6 zeigt, dass das gewählte Gitter mit der ersten Zellenhöhe von 2,5 mm vor der Modellfläche gute Ergebnisse liefert. Das Gitternetz wird in Kapitel 7.4 ausführlich beschrieben.

7.4 Gewählte Gitterstruktur für die Strömungsberechnung

Das gewählte Gitter bildet die Gebäudeumströmung realitätsgetreu aus und löst das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil vor der Modelloberfläche fein auf. Größe und Form der Zellen sind diesen Zielen angepasst, so dass es zu unterschiedlichen Gitterstrukturen innerhalb des Modells kommt. In Abbildung 80 ist ein Schnitt durch die Symmetrieebene des Gitters gezeigt. Um den Modellkörper wird eine sogenannte „Density-Box“ gelegt. Ihre Größe ist der Ausbildung der Gebäudeumströmung angepasst. Innerhalb der „Density-Box“ liegt eine feine Gitterauflösung vor, so dass eine gut ausgebildete Gebäudeumströmung entsteht. Außerhalb der „Density-Box“ wird ein grobes Tetraedernetz erzeugt, da dieser Bereich außerhalb des relevanten Bereichs der Gebäudeumströmung liegt. Das grobe Tetraedernetz reduziert die Zellenanzahl und somit die Rechenzeit.

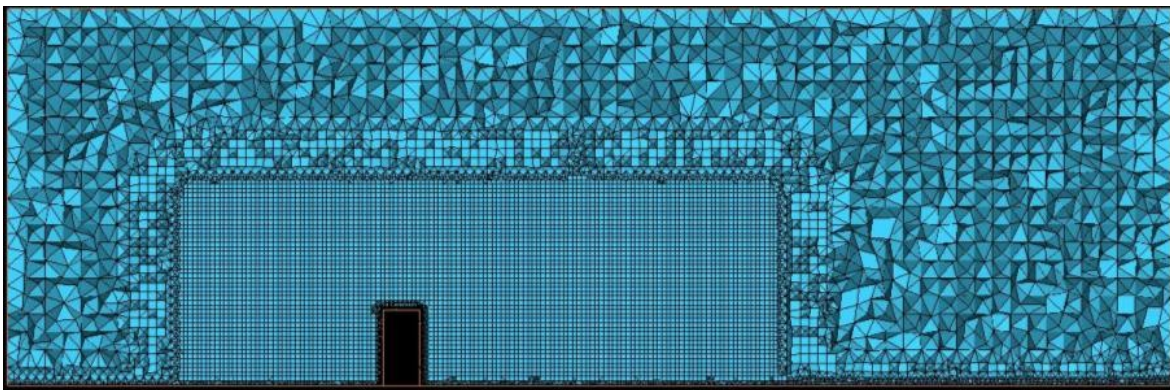


Abbildung 80 Schnitt durch die Symmetrieebene des Gitters

Innerhalb der „Density-Box“ werden in Wandnähe aller 5 Flächen des Modellkörpers 17 Prismenschichten erzeugt, siehe Abbildung 81. Die einzelnen Zellen stehen im 90° Winkel zur Wand, so dass die Modelloberfläche orthogonal angeströmt wird. Die erste wandnahe Prismenschicht hat eine Zellhöhe von 2,5 mm. Die letzte Prismenschicht endet 264 mm vor der Modelloberfläche. Damit ist garantiert, dass die Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschicht an der Gebäudeoberfläche fein genug aufgelöst werden. In der ferneren Umgebung zum Modellkörper werden Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten größer und somit vergrößert sich die Gitterstruktur zu einem Hexaedernetz. Die Verbindung zwischen der Prismen- und der Hexaederstruktur bildet ein Tetraedernetz (Abbildung 81).

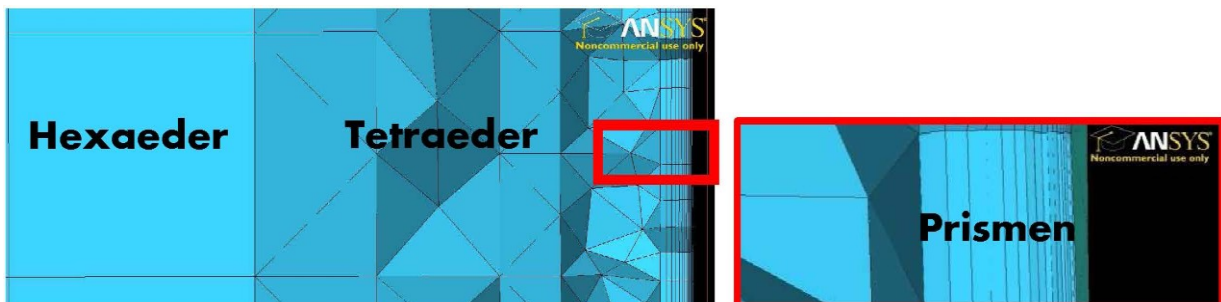


Abbildung 81 Gitterstruktur vor den Modellkörperoberflächen

Der Kanalboden wird ebenfalls mit Prismenschichten (Abbildung 82) vergittert, damit sich das Windprofil ausbilden kann. Der einzige Unterschied ist, dass die maximale Zellbreite auf dem Kanalboden 2500 mm und nicht wie in Wandnähe des Modellkörpers 250 mm beträgt.

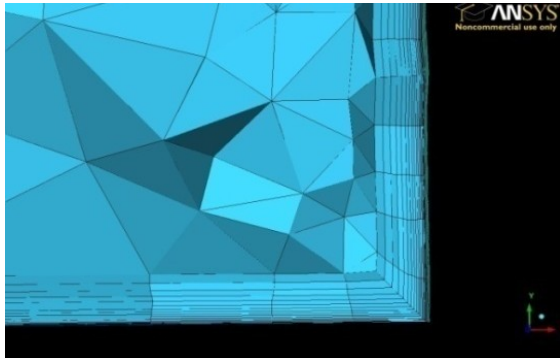


Abbildung 82 Gitterstruktur in Bodennähe des Kanals innerhalb der Density-Box

Das unstrukturierte Gitter unterteilt sich in Tetraedern, Prismen und Hexaedern. Diese Unterteilung in Bereiche mit feineren und gröberen Netzstrukturen spart Zellen und reduziert die Rechenzeit. Eine komplette Vernetzung mit einem Hexaedergitter (Kapitel 7.2) erfolgt nicht, da durch die erforderlich feine Auflösung der Gebäudegrenzschicht die Zellenanzahl zu groß wäre. Das „0 Grad“ und das „30, 60 Grad“ Modell unterscheiden sich zunächst in der Anströmung des Modellkörpers (Kapitel 7.1). Beim Modell „0 Grad“ wird die betrachtete Südfassade senkrecht angeströmt. Beim Modell „30, 60 Grad“ wird das Windprofil um 30° bzw. 60° gedreht, so dass die Südfassade von Süd / West überströmt wird. Das aufgeprägte Windprofil umströmt den Modellkörper symmetrisch beim „0 Grad“ Modell. Durch die Gebäudemitte wird daher eine Symmetrieebene gelegt und das Gitter für das halbe „0 Grad“ Modell generiert. Das „30, 60 Grad“ Modell entsteht, indem das „0 Grad“ Modell an der Symmetrieebene mit dem kompletten Gitter gespiegelt wird. Dadurch hat das „30, 60 Grad“ Modell das gleiche Gitternetz und ist mit den Ergebnissen des „0 Grad“ Modells vergleichbar. Die Tabelle 14 führt die Anzahl der Gitterzellen des erstellten, unstrukturierten Netzes auf. Aus der Tabelle 14 ist erkennbar, dass das „30, 60 Grad“ Modell im Verhältnis zum „0 Grad“ Modell doppelt so viele Gitterzellen hat.

Tabelle 14 Anzahl der Gitterzellen

	Modell „0 Grad“	Modell „30, 60 Grad“
Gitter		
Anzahl Knoten	1297659	2506094
Anzahl aller Elemente	3145802	5899112
Anzahl Tetraeder	1041079	1820481
Anzahl Hexaeder	223220	461943
Anzahl Pyramiden	69732	132127
Anzahl Prismen	1811771	3484561

7.5 Solvereinstellungen der Randbedingungen in ANSYS CFX

Die Solvereinstellungen definieren die Art des Systems und beeinflussen den Ablauf der Rechnung. Sie sind in der folgenden Tabelle 15 aufgeführt. Über die begrenzenden Oberflächen können Anfangs- und Randbedingungen festgelegt werden. Diese sind abhängig von der Definition der Oberfläche. Definiert werden können Wände, Einlässe und Auslässe.

In Kapitel 2.5.2 werden die Zweigleichungs-Turbulenzmodelle erläutert. Das Shear Stress Transport (SST) Turbulenzmodell wird für die Simulationsrechnungen verwendet. Es ist bei einer Überlagerung von freier und erzwungener Strömung nur begrenzt anwendbar und liefert nur gute Ergebnisse, wenn beide Strömungsformen turbulent sind. An der VWS-Fassade herrscht eine überwiegend turbulente Auftriebsströmung, die von einer turbulenten erzwungenen Strömung überlagert wird (Kapitel 4.8).

7.5.1 Modellkörper

Alle Flächen des Modellkörpers werden als „Wände“ definiert, welche opak mit einem Emissionsgrad von eins und adiabat bezüglich des Wärmetransfers sind. Die Wandgeschwindigkeit wird auf null gesetzt und somit die „Wände“ als reibungsbehaftet definiert. Es wird ohne Strahlungsmodell gerechnet. Stattdessen wird für die Südfassade des Modellkörpers eine Oberflächentemperatur vorgegeben.

7.5.2 Kanal

Der gesamte Kanal ist mit Luft gefüllt, deren physikalischen Eigenschaften bei 25 °C Umgebungstemperatur definiert sind. Es ist ein Referenzdruck von 1 atm eingestellt, der unter dem Einfluss der Erdbeschleunigung bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C steht. Es herrschen somit die für Europa festgelegten Standardbedingungen. Die vordere Oberfläche des Kanals wird als „Einlass“ für die Windströmung definiert. Konstante Werte für die Außenlufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung werden vorgegeben. Die hintere Oberfläche des Kanals wird als „Auslass“ definiert. Ihr wird ein statischer Druck von 0 Pa aufgeprägt, damit ein Windfluss entsteht. Die verbleibenden Begrenzungsflächen des Kanals werden als adiabate „Wände“ definiert. Zusätzlich werden die seitlichen und die obere Begrenzungsfläche als reibungsfreie „Wände“ festgelegt, so dass dort die Scherspannung $\tau=0$ ist und es somit keinen Einfluss auf die Ausbildung des Strömungsprofils gibt. Für den Kanalboden wird die Geschwindigkeit am Kanalboden auf null gesetzt und somit die „Wand“ als reibungsbehaftet definiert.

Tabelle 15 Solvereinstellungen in ANSYS CFX 11.0

Festlegung der Umgebung		
Festlegungen	Typ der Umgebung	Fluid
	Medium	Luft
	Druck	1 atm
	Auftrieb	Thermischer Auftrieb
	Gravitation X, Y, Z	0, -9,81, 0
	Ref. Temperatur	25 °C
	Referenzstelle	Automatisch
	Modellbetrachtung	Stationär
	Netzdeformation	Keine
Fluid-Model	Wärmetransport	Thermisch
	Turbulenz	Shear Stress Transport
	Wandfunktion	Automatisch
	Auftrieb Turbulenz	Keine
Solvereinstellung		
Basis-Einstellungen	Modell	Hohe Auflösung
	Max. Iterationsschritte	2000
	Zeiteinteilung	Automatisch
Konvergenz-Kriterium	Residual Typ	RMS
	Residual Ziel	1,00E-06
	Lösung der Gleichung	Kontinuierlich
Einlass		
Grenzflächen	Masse und Impuls	Kart. Geschwindigkeitsprofil
	Turbulenz	Hoch
	Wärmetransport	Festgelegte Temperatur
Auslass		
Grenzflächen	Masse und Impuls	Druck: 0 Pa
	Druck	Durchschnitt über Auslass
Wand		
Wand (Kanalseite, -decke)	Einfluss auf Strömung	Keine Reibung
	Wärmetransport	Adiabat
Wand (Kanalboden)	Einfluss auf Strömung	Reibung
	Wärmetransport	Adiabat
Wand (Modellkörper)	Einfluss auf Strömung	Reibung
	Wärmetransport	Festgelegte Temperatur
Grenzfläche		
Kanal (Seite Ost/West)	Masse und Impuls	Quellfreier Fluss
	Turbulenz	Quellfreier Fluss
	Wärmetransport	Quellfreier Fluss

7.6 Validierung der Simulationsmodelle

Das VWS-Gebäude wird im Simulationsmodell (Kapitel 7.1) ohne Flachbau vor der Fassade modelliert. In Kapitel 4.7 wird erläutert, dass das Dach des Flachbaus bei kleinen Windgeschwindigkeiten eine lokale Temperaturerhöhung verursacht. Die Temperaturprofile vor der VWS-Fassade nähern sich dieser lokalen Temperatur anstelle der Außenlufttemperatur der Wetterstation an. Bei Geschwindigkeiten größer 3 m/s verursacht der Flachbau keine lokale Temperaturerhöhung. Die Temperaturprofile nähern sich der Außenlufttemperatur an.

Die Validierung der Simulationsmodelle „0 Grad“ und „30, 60 Grad“ mit der gewählten Gitterstruktur (Kapitel 7.4) erfolgt an Messtagen mit Windgeschwindigkeiten größer 3 m/s und einer parallelen, frontalen oder schrägen Anströmung. Die Messwerte der Fassadentemperatur (Kapitel 4.5), der Außenlufttemperatur und der Windgeschwindigkeit (Kapitel 4.6) fließen als Randbedingungen (Tabelle 16) in die Simulationen ein. Sie entsprechen Mittelwerten der Stundenmittelwerte von 12, 13 und 14 Uhr.

Tabelle 16 Randbedingungen aus den Messungen am VWS-Gebäude

Messtag	T_{AL} in K	T_{Fa} in K	WR in °	WG in m/s	Modell CFX	Anströmung zur Fassadenfläche
14.09.2008	293	309	180	4	0 Grad	Frontal (90°) zur Südfassade
30.05.2008	302	323	90	4	0 Grad	Parallel (0°) zur Westfassade
09.07.2008	293	298	240	5	60 Grad	Schräg (30°) zur Südfassade
21.07.2008	288	293	210	5	30 Grad	Schräg (60°) zur Südfassade

Bei der Windrichtung 180° wird die Südfassade des VWS-Gebäudes frontal angeströmt. Die Simulation erfolgt mit dem „0 Grad“ Modell. Das Temperaturprofil vor der Südfassade wird ausgewertet und mit den Temperaturmesswerten vor der VWS-Fassade verglichen. Bei der Windrichtung 270° oder 90° wird die Südfassade des VWS-Gebäudes parallel angeströmt. Die Simulation erfolgt ebenfalls mit dem „0 Grad“ Modell, es wird jedoch das Temperaturprofil vor der Westfassade, die im Simulationsmodell parallel angeströmt wird, ausgewertet und mit den Messwerten verglichen. Kommt der Wind aus Süd-Osten (150°, 120°) oder Süd-Westen (210°, 240°) wird die Südfassade schräg angeströmt. Die Simulationen erfolgen mit dem „30, 60 Grad“ Modell mit entsprechender Anströmung der Fassade. Das Temperaturprofil vor der Südfassade wird ausgewertet.

Tabelle 17 Prozentuale Abweichung der Mess- und Simulationswerte der Temperaturen vor der Fassade

Messtag	Anströmung zur Fassadenfläche	Maximale Abweichung Messwert vom Simulationswert
14.09.2008	Frontal (90°) zur Südfassade	3%
30.05.2008	Parallel (0°) zur Westfassade	3%
09.07.2008	Schräg (30°) zur Südfassade	3%
21.07.2008	Schräg (60°) zur Südfassade	3%

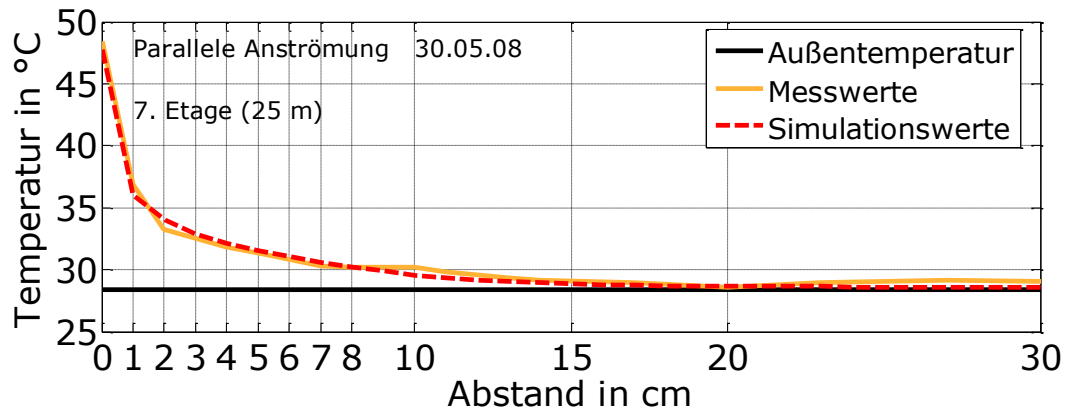
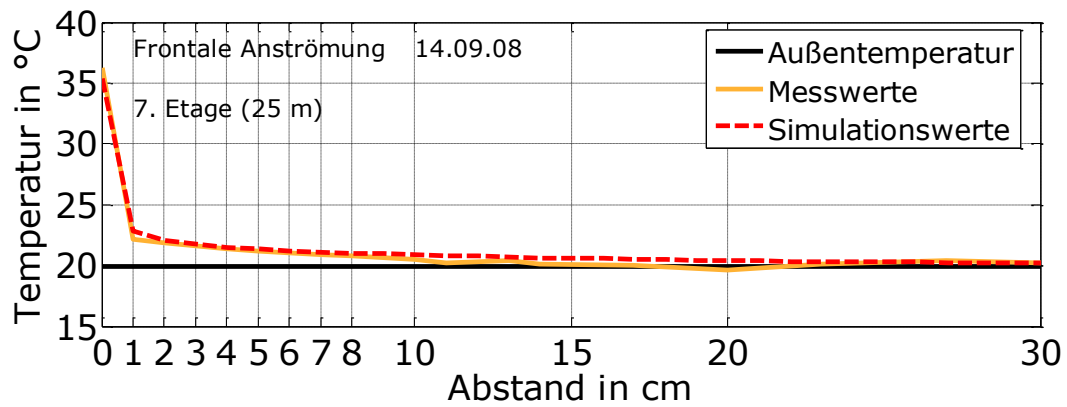


Abbildung 83 Gemessener und simulierter Temperaturverlauf vor der Fassade bei frontaler und paralleler Anströmung der Fassade

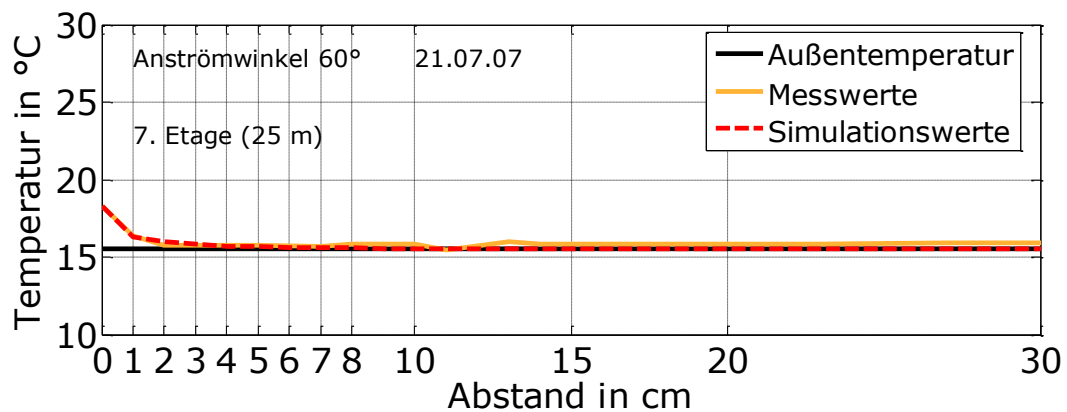
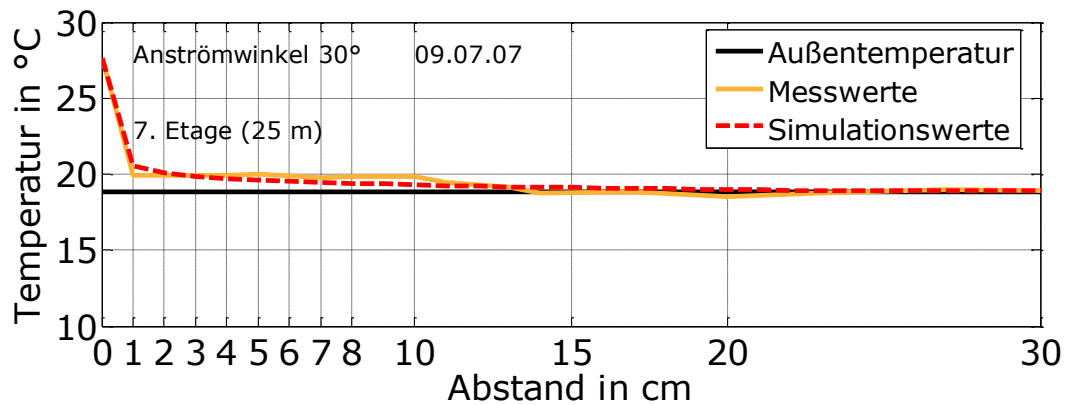


Abbildung 84 Gemessener und simulierter Temperaturverlauf vor der Fassade bei 30° und 60° Anströmung der Fassade

Die Abbildung 83 und Abbildung 84 vergleichen die gemessenen und simulierten Temperaturverläufe vor der Fassade. Die simulierten Temperaturverläufe bilden die gemessenen Verläufe realitätsnah ab. Die Tabelle 17 führt die prozentualen Abweichungen zwischen Mess- und Simulationswert auf. Sie liegen maximal bei drei Prozent. Das Simulationsmodell kann zur Bestimmung der Einflüsse von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergangskoeffizienten angewendet werden.

Erfolgt die Anströmung parallel zur Fassade, kann der Wärmeübergangskoeffizient mit dem empirischen Ansatz von Wattmuff (Gleichung 2-75) aus Kapitel 2.5.1.3 berechnet werden. Wie im Kapitel 7.7.1 erläutert, beträgt bei paralleler Anströmung der Anströmwinkel zur Fassade 0° . Die simulierten und berechneten Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für den Anströmwinkel 0° sind in Abbildung 85 dargestellt.

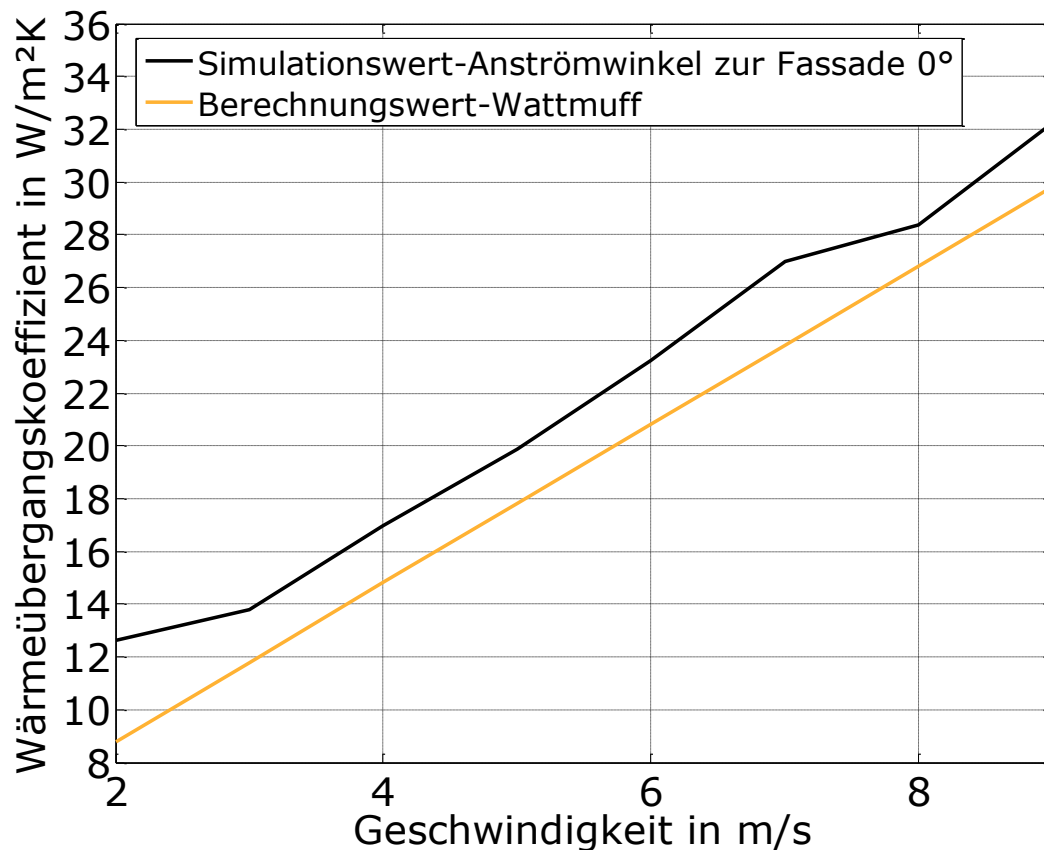


Abbildung 85 Simulierte und berechnete Wärmeübergangskoeffizienten

Die aus der Simulationsrechnung ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten weichen von denen nach Wattmuff berechneten um ca. $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ab. Die Abweichung ist bei kleinen Geschwindigkeiten größer und bei großen Geschwindigkeiten kleiner.

Die Verwendung des SST-Turbulenzmodells erklärt diese Unterschiede (Kapitel 2.5.2). Bei kleinen Geschwindigkeiten überwiegt die freie Strömung. Die Verwendung des SST-Turbulenzmodells ist bei ausschließlich freier Konvektion nicht anwendbar und führt zu einer ungenauen Bestim-

mung des Wärmeübergangskoeffizients. Bei großen Geschwindigkeiten überwiegt die erzwungene turbulente Strömung und das SST-Turbulenzmodell liefert gute Ergebnisse. Der Vergleich zeigt, dass es zu Fehlern bei der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizients kommt. Dieser Fehler ist nicht genau zu bestimmen. Der Ansatz von Wattmuff stellt eine Abschätzung mit unbekanntem Fehler dar. Die Simulationsrechnung mit dem SST-Turbulenzmodell erzeugt ebenfalls einen Fehler. Trotz dieser Erkenntnisse werden weitere Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Einflüsse von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergangskoeffizienten mit dem Simulationsmodell fortgesetzt.

7.7 Auswertung, Ergebnisse und Diskussion der Simulation

Für die Ausarbeitung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden zusätzlich zu den Messungen der Wetterdaten, der dezentralen und zentralen Ansaugtemperaturen und der fassadennahen Temperaturwerte Strömungssimulationen durchgeführt. Die Simulationsrechnungen erfolgen mit den CFX-Modellen „0 Grad“ oder „30, 60 Grad“ (Kapitel 7.1). Die validierte Gitterstruktur aus Kapitel 7.6 und die Solvereinstellungen aus Kapitel 7.5 werden verwendet. Als Randbedingungen werden die Werte aus Tabelle 18 berücksichtigt.

Tabelle 18 Randbedingungen der Strömungssimulationen

T_{AL} in K	T_{Fa} in K	WR in °	WG in m/s	Modell CFX	Anströmung zur Fassadenfläche
298	328	180	2-9	0 Grad	Frontal, 90° zur Südfassade
		180	2-9	0 Grad	Parallel, 0° zur West Fassade
		150, 210	2-9	30 Grad	Schräg, 60° zur Südfassade
		120, 240	2-9	60 Grad	Schräg, 30° zur Südfassade

Die Auswertung der Simulationen hat den Wärmeübergangskoeffizient im Fokus, der Einfluss auf die fassadennahe Temperaturerhöhung und somit auf die Ansaugtemperatur hat. Kapitel 2.2.3 erläutert den Zusammenhang zwischen dem Wärmeübergangskoeffizient und der Grenzschichtdicke. Mit zunehmender Grenzschichtdicke wird der Wärmeübergangskoeffizient kleiner. Die folgende Diskussion der Simulationsergebnisse betrachtet zunächst die Ausbildung der Grenzschichtdicke und schließt dann auf den Wärmeübergangskoeffizient. Die Auswertung berücksichtigt die folgenden Einflüsse.

- Einfluss des Anströmwinkels auf die Grenzschichtdicke
- Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke
- Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke

7.7.1 Einfluss des Anströmwinkels auf die Grenzschichtdicke

Die Anströmung der Fassadenfläche kann in unterschiedlichen Anström-winkeln erfolgen, die von der Windrichtung und der Fassadenausrichtung abhängen. Der Anströmwinkel spannt sich zwischen Windrichtung und Fassadenfläche auf. Die Anströmwinkel zur Fassade gehen aus der Abbil-dung 86 hervor. Bei einem Anströmwinkel von 0° liegt eine Anströmung parallel zur Fassadenfläche vor. Bei einem Anströmwinkel von 90° wird die Fassade frontal angeströmt. Bei den Anströmwinden 30° und 60° erfolgt eine schräge Anströmung der Fassadenfläche. Die Anströmwinkel AW be-rechnen sich aus der Windrichtung WR für die Südfassade wie folgt. Glei-chungen der Nord-, Ost- und Westfassade sind in Kapitel 8.2 tabelliert.

$$180^\circ \leq WR \leq 270^\circ: AW = 270^\circ - WR \quad (7-2)$$

$$90^\circ \leq WR \leq 180^\circ: AW = WR - 90^\circ \quad (7-3)$$

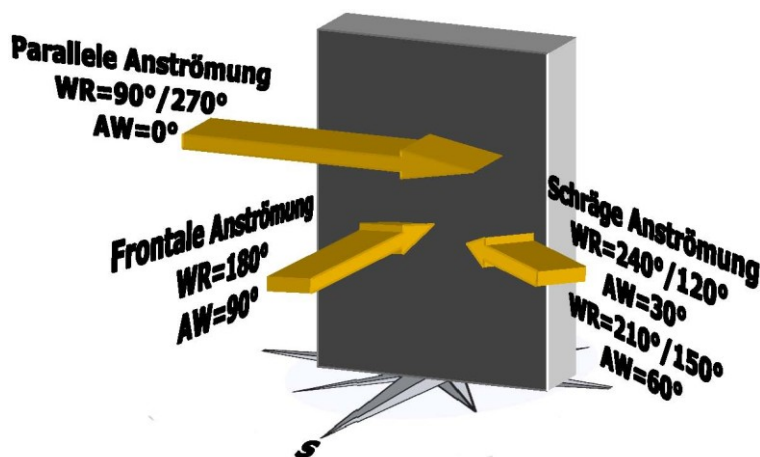


Abbildung 86 Anströmwinkel zur Südfassade

Simulierte Temperaturverläufe vor der Fassade für unterschiedliche An-strömwinkel werden in der Abbildung 87 bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s und in der Abbildung 88 bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s gezeigt. Unabhängig von der Windgeschwindigkeit wird folgendes beobachtet. Wird die Fassade mit einem Anströmwinkel von 0° parallel angeströmt, bildet sich eine kleinere Grenzschichtdicke aus als bei frontaler Anströmung mit einem Anströmwinkel von 90° . Erfolgt eine schräge Anströmung zur Fassade im Winkel von 60° ist die Grenzschichtdicke größer als bei schräger Anströmung zur Fassade im Winkel von 30° . Bei Anströmwinden zur Fassade zwischen 45° und 90° bilden sich größere Grenzschichten als bei Anströmwinden zur Fassade zwischen 0° und 45° aus.

Die Abbildung 89 zeigt die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Anströmwinkel für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten. Die Überlegung aus Kapitel 2.2.3, je kleiner die Grenzschichtdicke, desto größer der Wärmeübergangskoeffizient, bestätigt sich. Bei Anströmwinden von 0° und 30° sind die Wärmeübergangskoeffizienten größer als bei Anströmwinden von 90° und 60° . Für Windgeschwindigkeiten kleiner 4 m/s sind die Wärmeübergangskoeffizienten unabhängig vom Anströmwinkel.

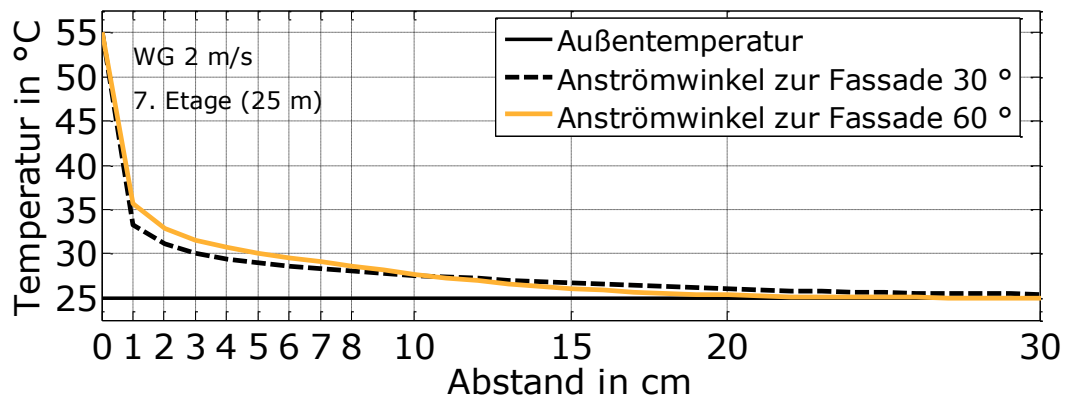
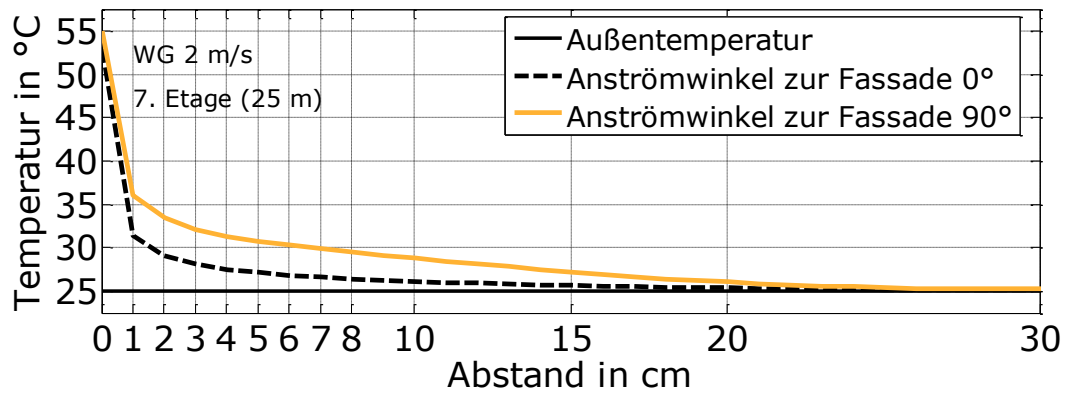


Abbildung 87 Einfluss des Anströmwinkels auf die Grenzschichtdicke bei 2 m/s

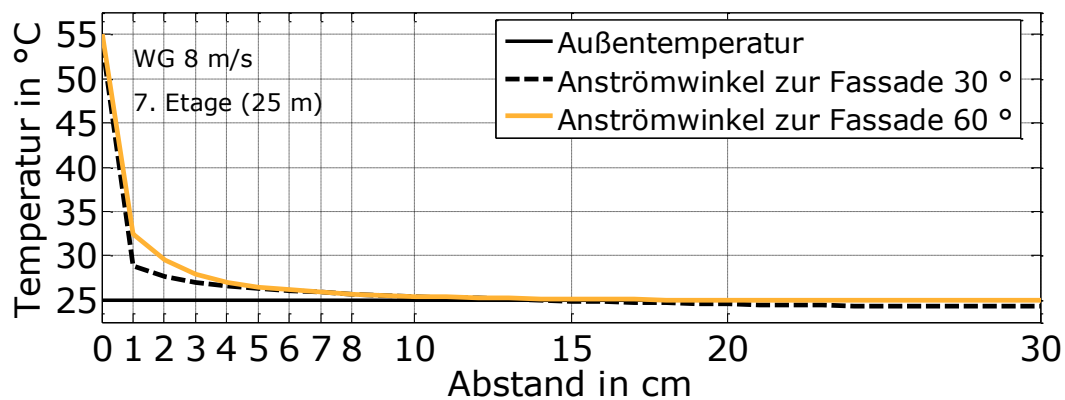
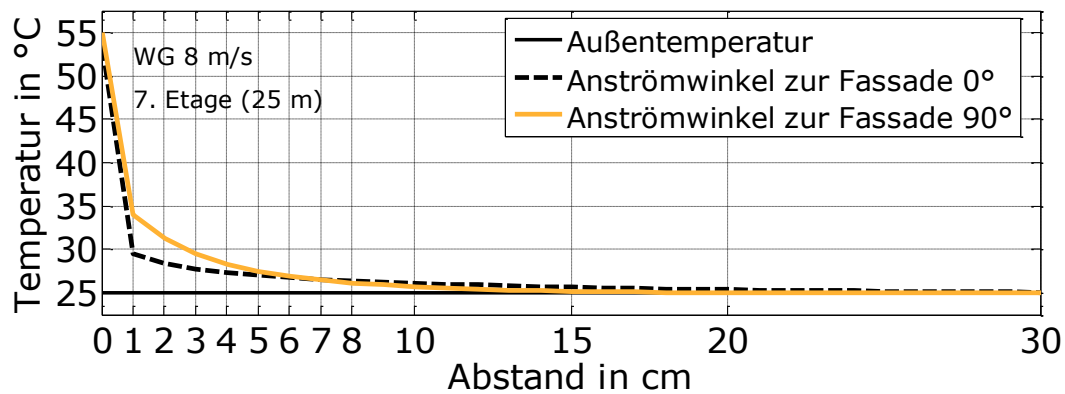


Abbildung 88 Einfluss des Anströmwinkels auf die Grenzschichtdicke bei 8 m/s

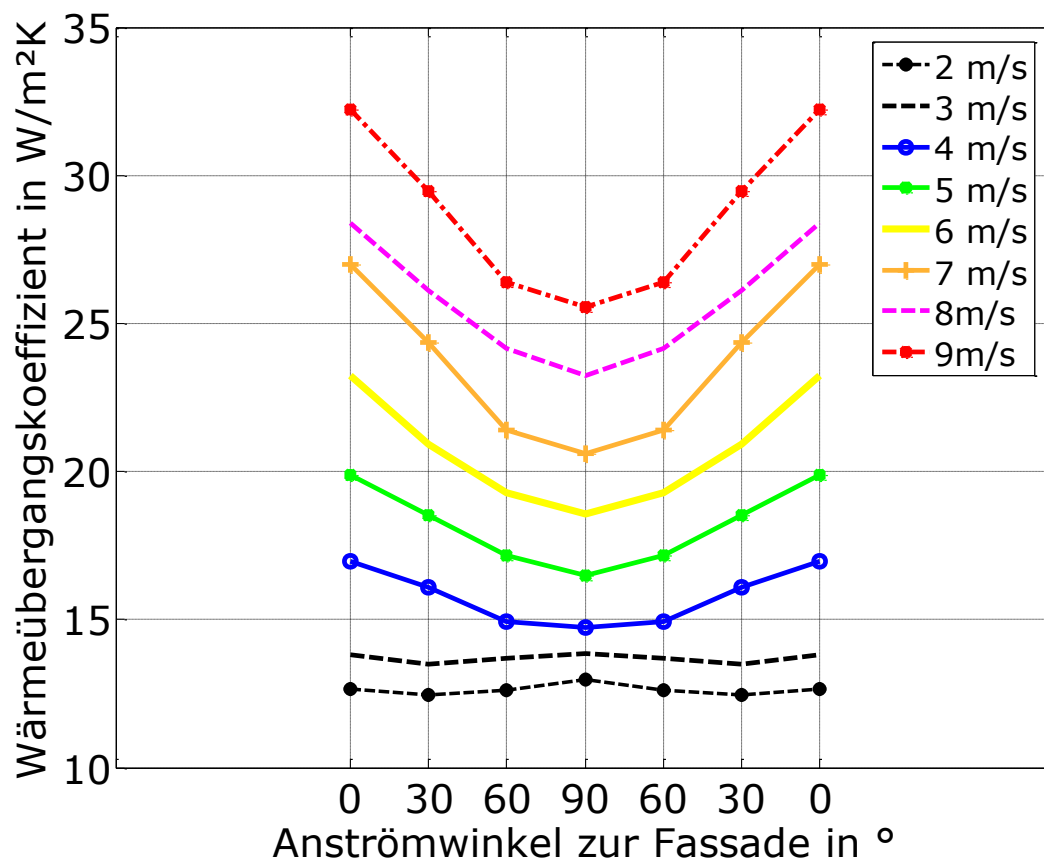


Abbildung 89 Einfluss des Anströmwinkels auf den Wärmeübergangskoeffizient bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten

7.7.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke

Die Abbildung 90 und die Abbildung 91 zeigen die simulierten Temperaturverläufe vor der Fassade für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Anströmwinkel zur Fassade bei konstanter Außenlufttemperatur T_{AL} und Fassadentemperatur T_{FA} (Tabelle 18). Die Temperaturverläufe erreichen im Abstand 10 cm von der Fassadenoberfläche die Außenlufttemperatur bei höheren Windgeschwindigkeiten (>2 m/s). Bei kleinen Windgeschwindigkeiten (<2 m/s) kann die Temperaturgrenzschicht 20 cm bis 30 cm dick werden. Dieser Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Ausbildung der Grenzschichtdicke zeigt sich unabhängig von der Anströmung frontal, parallel oder schräg zur Fassade. Es treffen stets die zwei folgenden Aussagen zu.

Je kleiner die Windgeschwindigkeit, desto größer die Grenzschichtdicke.
 Je größer die Windgeschwindigkeit, desto kleiner die Grenzschichtdicke.
 Die Überlegung aus Kapitel 2.2.3, je kleiner die Grenzschichtdicke, desto größer der Wärmeübergangskoeffizient, bestätigt die Abbildung 92. Bei kleinen Windgeschwindigkeiten sind die Wärmeübergangskoeffizienten kleiner als bei großen Windgeschwindigkeiten.

Die nach Wattmuff [11] aufgestellte empirische Gleichung (2-75) aus Kapitel 2.5.1.3 bestätigt sich ebenfalls. Danach erhöht sich der Wärmeübergangskoeffizient um den Faktor drei mit der Geschwindigkeit.

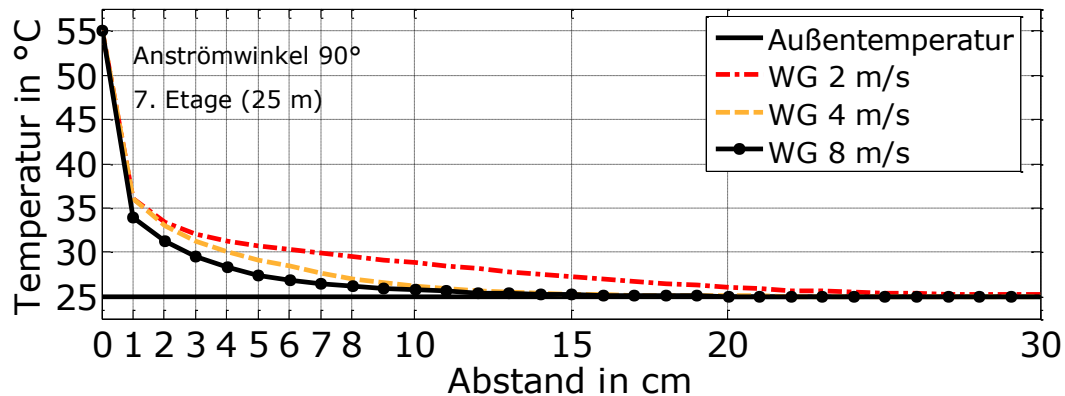
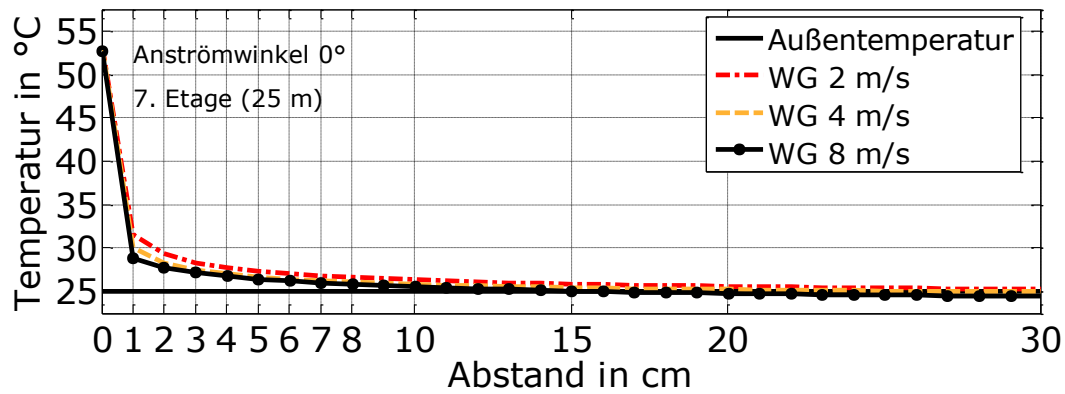


Abbildung 90 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke bei frontaler und paralleler Anströmung der Fassade

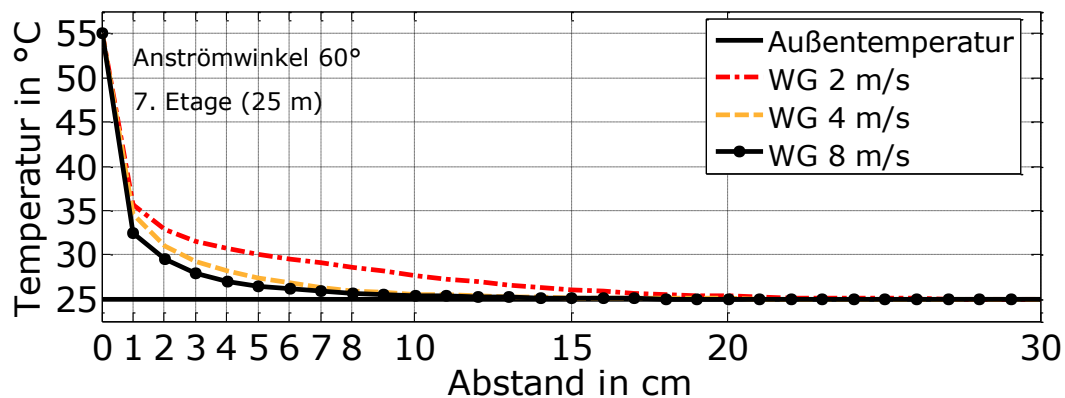
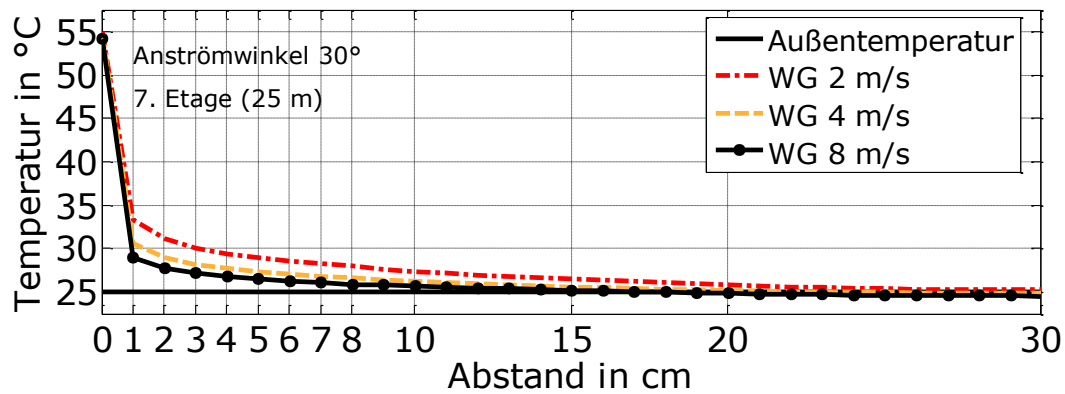


Abbildung 91 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Grenzschichtdicke bei 30° und 60° Anströmung der Fassade

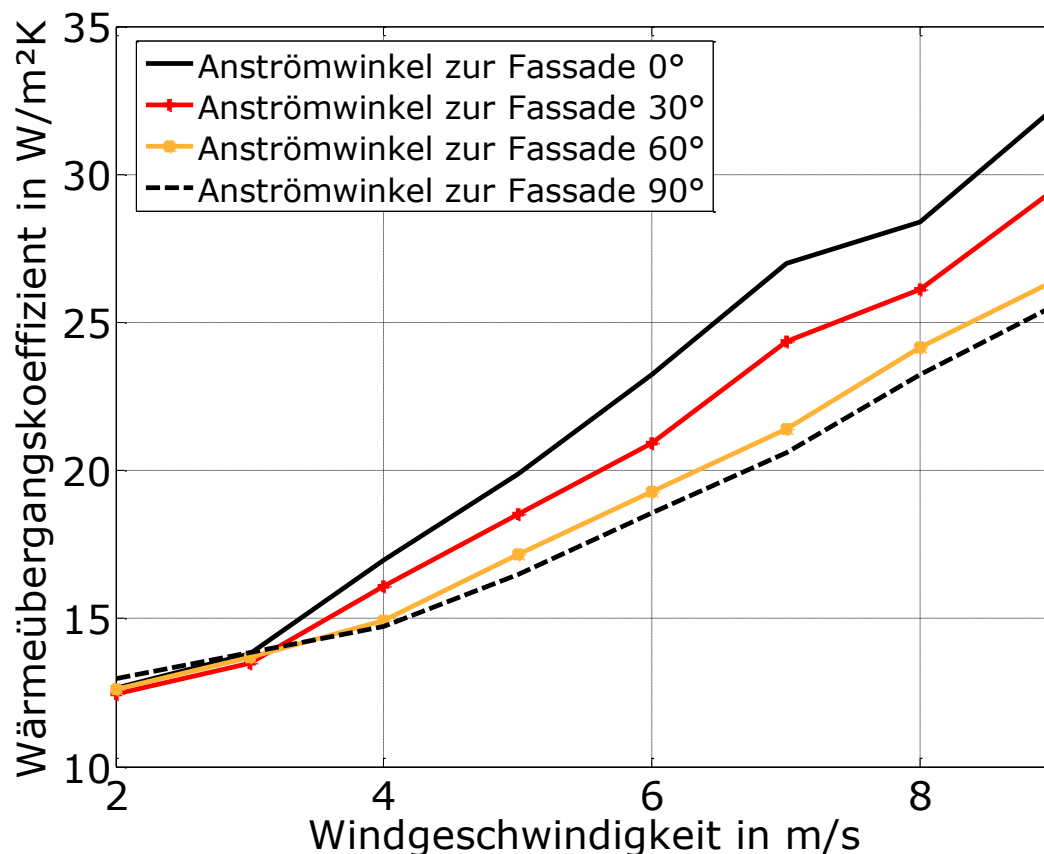
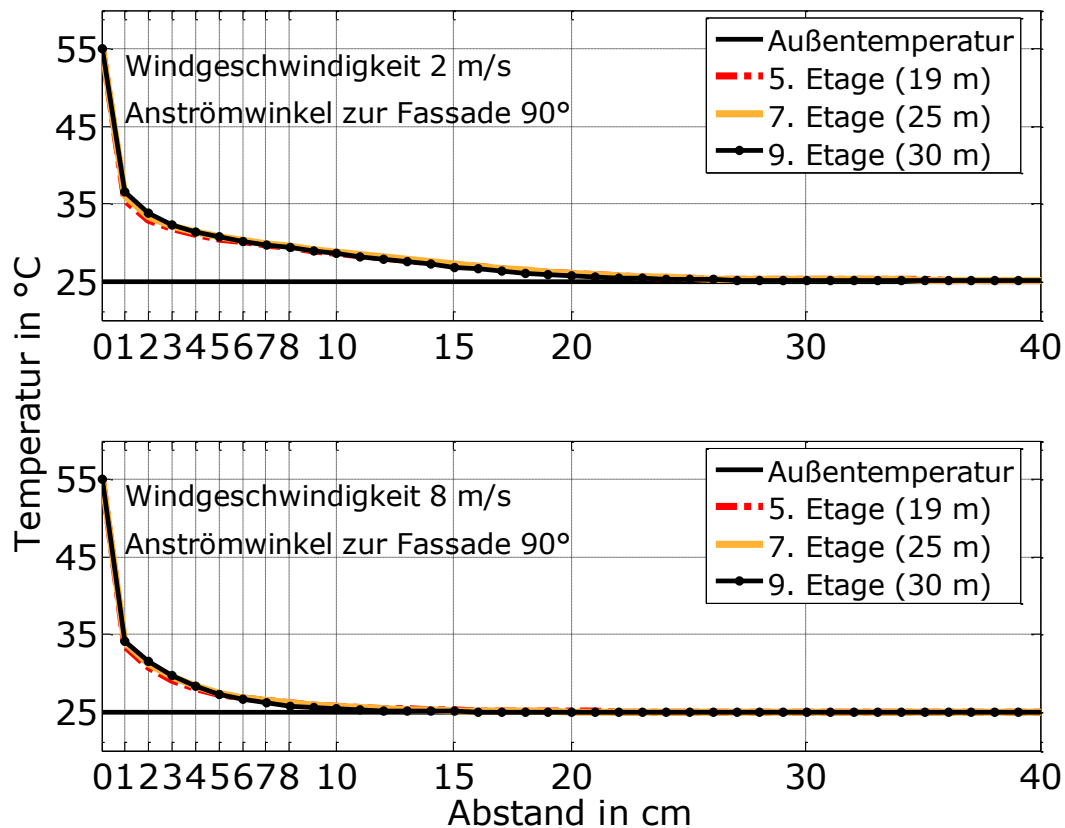


Abbildung 92 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf Wärmeübergangskoeffizient

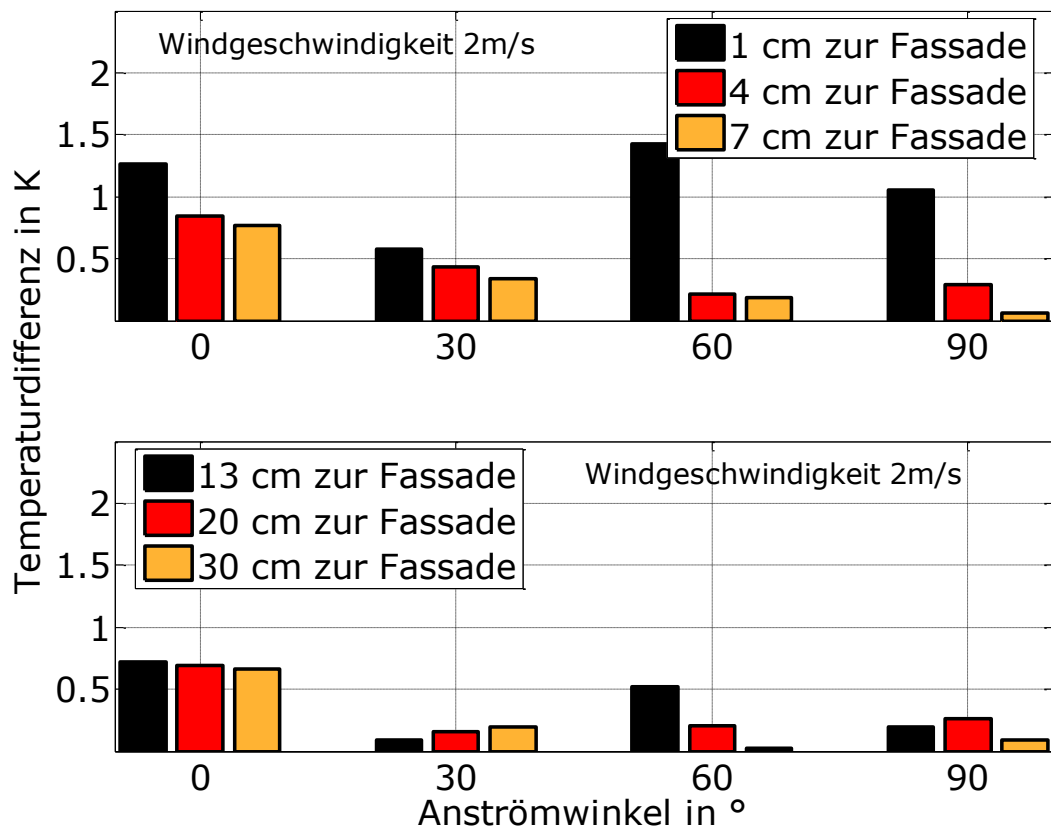
7.7.3 Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke

Die Grenzschichtdicke beeinflusst den Wärmeübergangskoeffizient, wie Kapitel 2.2.3 erläutert. Je kleiner die Grenzschichtdicke, desto größer der Wärmeübergangskoeffizient und umgekehrt. Die Abbildung 93 zeigt den Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke bei frontaler Anströmung (Anströmwinkel $AW=90^\circ$) für eine kleine Windgeschwindigkeit von 2m/s und eine große von 8 m/s. Sowohl bei kleiner als auch bei großer Windgeschwindigkeit nehmen die Grenzschichtdicken über den betrachteten Bereich der Gebäudehöhe kaum zu. Dieses Ergebnis zeigt sich auch für die Anströmwinkel 0° , 30° und 60° . Abbildung 94 und Abbildung 95 zeigen für die Windgeschwindigkeiten 2 m/s und 8 m/s die Temperaturdifferenzen zwischen fünfter und neunter Etage für verschiedene Abstände zur Fassadenfläche in Abhängigkeit der Anströmwinkel. Die Abweichung der Temperaturen im gleichen Abstand zwischen fünfter und neunter Etage ist gering. Sie liegen überwiegend unter 1 K und größten Teils sogar unter 0,5 K.

Der Einfluss der betrachteten Gebäudehöhe zwischen fünfter und neunter Etage auf die Grenzschichtdicke und somit auf den Wärmeübergangskoeffizient ist gering. Dieses Ergebnis wird durch die Messungen für die betrachtete Gebäudehöhe zwischen fünfter und neunter Etage bestätigt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgen im Kapitel 4.10.3. Der Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke und somit auf den Wärmeübergangskoeffizient wird nicht berücksichtigt.



**Abbildung 93 Einfluss der Gebäudehöhe auf die Grenzschichtdicke bei Anström-
winkeln 90° und Anströmgeschwindigkeiten von 2m/s und 8 m/s**



**Abbildung 94 Temperaturdifferenz zwischen 5. und 9. Etage bei verschiedenen
Abständen zur Fassadenfläche bei einer Anströmgeschwindigkeit von 2 m/s**

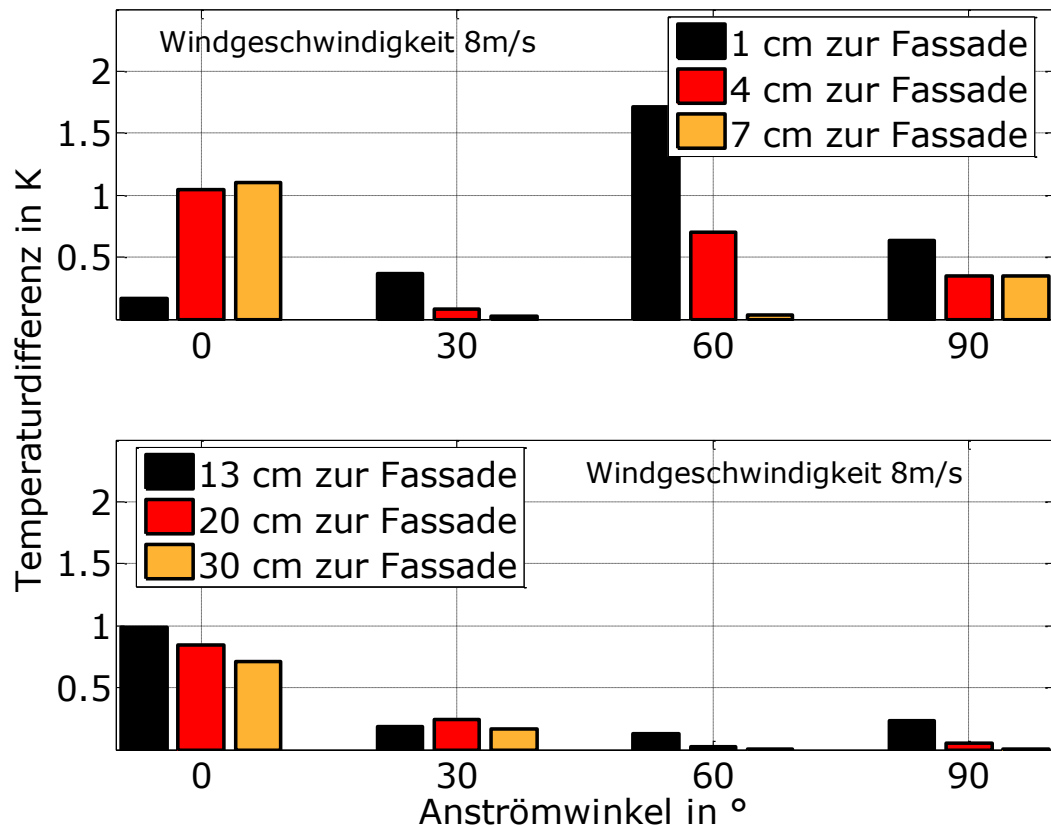


Abbildung 95 Temperaturdifferenz zwischen 5. und 9. Etage bei verschiedenen Abständen zur Fassadenfläche bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m/s

7.8 Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients

Im Kapitel 4.11 wird der Berechnungsansatz (Gleichung 4-7) für die Über-temperatur der Ansaugung dezentraler Ansaugvarianten hergeleitet. Die Ansaugtemperatur ist von der Fassadentemperatur abhängig. Die Berechnungsgleichung der Fassadentemperatur in Kapitel 6.2 (Gleichung 6-13) zeigt eine Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten. Zur Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte (Kapitel 8) muss der Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden.

Die Anströmung der Fassadenfläche wird von den herrschenden Windverhältnisse hervorgerufen und hat einen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizient. Die Größe Wind setzt sich aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit zusammen. Windrichtung und Ausrichtung der Fassade sind über den Anströmwinkel AW (Abbildung 86) verknüpft. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass der Wärmeübergangskoeffizient sowohl von der Windgeschwindigkeit als auch vom Anströmwinkel abhängt.

Im Kapitel 2.5.1.3 (Gleichung 2-75) wird der empirischen Ansatz von Wattmuff [11] aufgeführt. Er ist für parallele Anströmung (Anströmwinkel $AW=0^\circ$) aufgestellt und berechnet den Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Zur Diskussion steht die Verwendung dieses Ansatzes bei nicht paralleler Anströmung (Anströmwinkel $0^\circ < AW \leq 90^\circ$). Die Abbildung 89 zeigt für Windgeschwindigkeiten unterhalb von 4 m/s, dass der Wärmeübergangskoeffizient vom Anströmwinkel

unabhängig ist. In diesem Fall wird der Wärmeübergangskoeffizient über den empirischen Ansatz von Wattmuff [11] berechnet.

Des Weiteren zeigt sich in Abbildung 89 für Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s, dass der Wärmeübergangskoeffizient vom Anströmwinkel abhängig ist. Der Ansatz von Wattmuff [11] kann nicht verwendet werden. Er wird im Folgenden um den Einfluss der Anströmwinkel $0^\circ < AW \leq 90^\circ$ erweitert.

Der Anströmwinkel AW wird für die weitere Auswertung normiert. Der normierte Anströmwinkel AWN ist wie folgt definiert.

$$AWN = \frac{AW}{90^\circ} \quad (7-4)$$

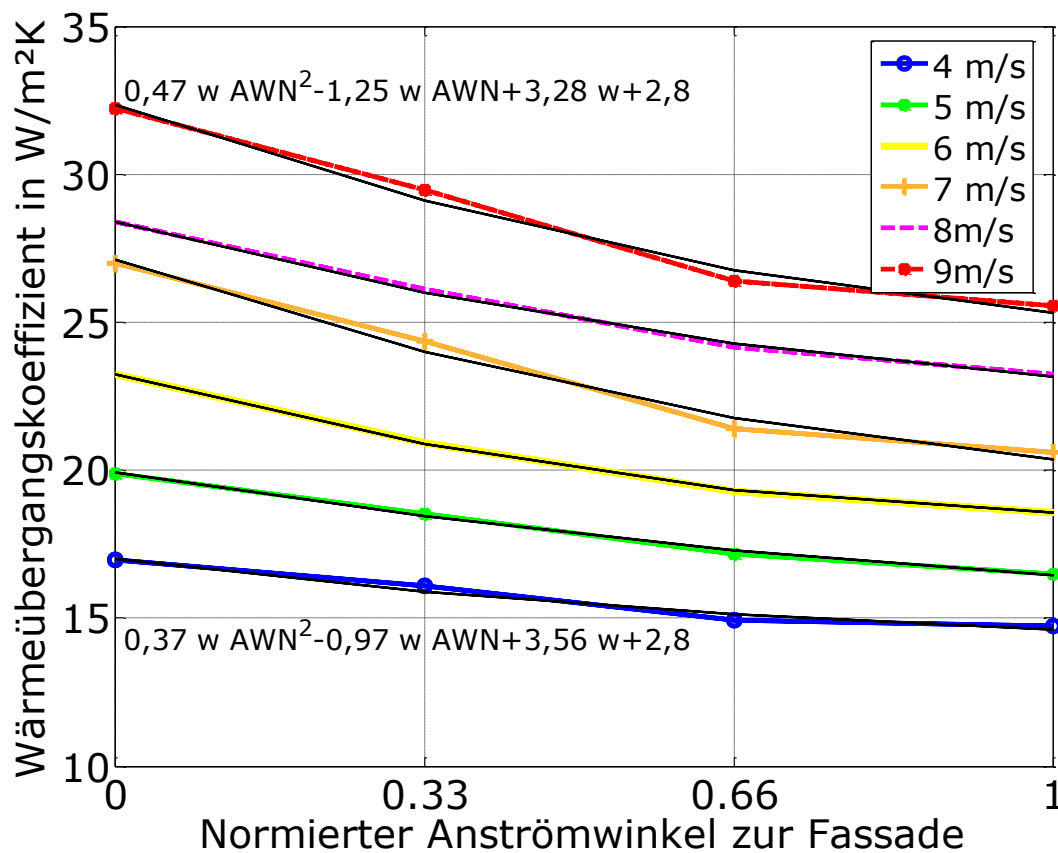


Abbildung 96 Quadratische Funktion für den Wärmeübergangskoeffizient

Die Abbildung 96 zeigt den Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit des normierten Anströmwinkels. Die simulierten Verläufe sind für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten abgebildet. Der Zusammenhang entspricht einem quadratischen Funktionsverlauf, wie die angenäherten Funktionsverläufe (dünne schwarze Linien) zeigen. Für 4 m/s und 9 m/s ist jeweils die Funktionsvorschrift angegeben. Ein Gleichungsansatz zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients wird aus den neun Funktionsvorschriften für Anströmwinkel im Bereich $0^\circ \leq AW \leq 90^\circ$ aufgestellt.

$$\alpha_{Fa} = a_w \cdot w \cdot \left(\frac{AW}{90^\circ}\right)^2 - b_w \cdot w \cdot \frac{AW}{90^\circ} + c_w \cdot w + 2,8 \frac{W}{m^2K} \quad (7-5)$$

Die Koeffizienten a_w , b_w , c_w sind geschwindigkeitsabhängig. Sie sind in der Tabelle 19 für die angenäherten, quadratischen Verläufe der Abbildung 96 angegeben. Zur Vereinfachung wird aus den geschwindigkeitsabhängigen Koeffizienten a_w , b_w , c_w jeweils ein Mittelwert über alle Geschwindigkeiten berechnet.

Tabelle 19 Koeffizienten der angenäherten quadratischen Verläufe

Geschwindigkeit in m/s	a_w in Ws/m^3K	b_w in Ws/m^3K	c_w in Ws/m^3K
9	0,5	1,3	3,3
8	0,4	1,3	3,2
7	0,6	1,6	3,5
6	0,6	1,6	3,4
5	0,3	1,0	3,4
4	0,4	1,0	3,6
Mittelwert	a= 0,5	b= 1,3	c= 3,4

Die geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten a , b , c aus Tabelle 19 werden in die Gleichung (7-5) anstelle der geschwindigkeitsabhängigen Koeffizienten a_w , b_w , c_w eingesetzt.

$$\alpha_{Fa} = a \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w \cdot \left(\frac{AW}{90^\circ}\right)^2 - b \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w \cdot \frac{AW}{90^\circ} + c \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w + 2,8 \frac{W}{m^2 K} \quad (7-6)$$

Die geschwindigkeitsunabhängige Berechnungsgleichung (7-6) wird den Wärmeübergangskoeffizienten fehlerbehaftet berechnen. Die folgende Analyse schätzt diesen Fehler ab und beurteilt, ob die durchgeführte Mittelwertbildung der geschwindigkeitsabhängigen Koeffizienten a_w , b_w , c_w akzeptabel ist.

Die prozentuale Abweichung zwischen Berechnungswert (Gleichung 7-6) und Simulationswert ist in Abbildung 97 in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten für die vier Anströmwinkel dargestellt. Sie beträgt für die Anströmwinkel 0° , 30° und 60° maximal 5 % und für den Anströmwinkel 90° maximal 8 %. Abweichungen von 5 % treten bei den Anströmwinkeln 30° und 60° bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s und bei dem Anströmwinkel 0° bei einer Geschwindigkeit von 8 m/s auf. Die Abweichung von 8 % tritt bei dem Anströmwinkel 90° bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s auf. Bei der Geschwindigkeit 6 m/s liegen die Abweichung unabhängig vom Anströmwinkel unter 1 %.

Die geschwindigkeitsunabhängigen Koeffizienten a , b , c führen bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizients α_{Fa} im Vergleich zu den simulierten Werten überwiegend zu Abweichungen kleiner 5 % und somit zu einem geringen Fehler. Der Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Anströmwinkel $0^\circ \leq AW \leq 90^\circ$ kann über die Gleichung (7-6) bestimmt werden. Die erforderlichen Koeffizienten a , b , c sind in der Tabelle 20 tabelliert. Sie entsprechen bei Windgeschwindigkeiten von 4 m/s bis 9 m/s den Mittelwerten der Tabelle 19 und bei

Windgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 3 m/s dem Ansatz von Wattmuff aus Kapitel 2.5.1.3. Somit wird der Wärmeübergangskoeffizient bei kleinen Windgeschwindigkeiten (< 4 m/s) unabhängig und für große Windgeschwindigkeiten (≥ 4 m/s) abhängig vom Anströmwinkel berechnet.

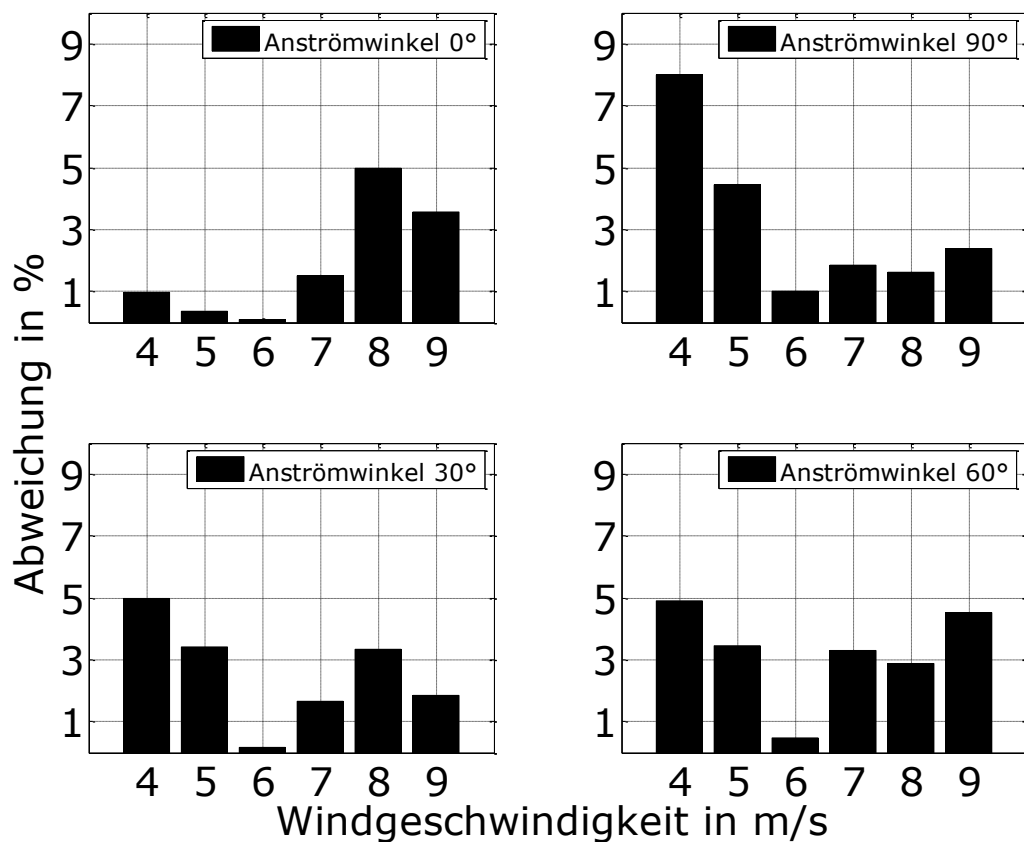


Abbildung 97 Prozentuale Abweichung der Simulations- und Berechnungswerte der Gleichung (7-6)

In Kapitel 8 erfolgt die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte mit Hilfe des bestimmten Wärmeübergangskoeffizients α_{Fa} der Gleichung (7-6). Die erforderlichen Koeffizienten a, b, c sind in Tabelle 20 tabelliert.

Tabelle 20 Koeffizienten der Gleichung (7-6)

Geschwindigkeit in m/s	a in Ws/m ³ K	b in Ws/m ³ K	c in Ws/m ³ K
9	0,5	1,3	3,4
8			
7			
6			
5			
4			
3	0	0	3
2			
1			
1			

8 Modell zur Berechnung dezentraler Ansaugtemperaturen

Die Gleichung zur Berechnung der Ansaugtemperatur T_{An} wird aus dem ermittelten Ansatz (4-7) zur Bestimmung der Übertemperatur der Ansaugung entwickelt. Die Übertemperatur der Ansaugung UANT ist die Differenz der Ansaugtemperatur T_{An} und der Außenlufttemperatur T_{Al} .

$$UANT = (T_{An} - T_{Al}) \quad (8-1)$$

Die Übertemperatur der Fassadentemperatur UT_{Fa} ist die Differenz aus der Fassadentemperatur T_{Fa} und der Außenlufttemperatur T_{Al} .

$$UT_{Fa} = (T_{Fa} - T_{Al}) \quad (8-2)$$

In die Gleichung (4-7) werden die Gleichungen (8-1) und (8-2) eingefügt und nach der Ansaugtemperatur aufgelöst. Das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ist aufgestellt.

$$T_{An} = T_{Al} + b_1 \cdot c_1 \cdot (T_{Fa} - T_{Al}) \quad (8-3)$$

Die Ansaugtemperatur ist von der Fassadenoberflächen- und der Außenlufttemperatur abhängig. Die Außenlufttemperatur T_{Al} legt nur das Temperaturniveau für die Ansaugtemperatur fest. Wie stark die Ansaugtemperatur von diesem Temperaturniveau abweicht, hängt von der Fassadenoberflächentemperatur, der Fassadenstruktur, der Position der Ansaugöffnung und der Ansaugvariante ab. Die Koeffizienten b_1 und c_1 sind im Kapitel 5 in der Tabelle 9 aufgeführt. Die Fassadenoberflächentemperatur T_{Fa} kann wie in Kapitel 8.1 beschrieben abgeschätzt oder über die folgende Gleichung, die in Kapitel 6.2 aufgestellt wird, berechnet werden.

$$T_{Fa} = T_{Fa,n-1} - \frac{(\psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^4 + \psi_2 \cdot T_{Fa,n-1} - \Delta)}{4 \cdot \psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^3 + \psi_2} \quad (8-4)$$

In Kapitel 6.2 werden die Größen ψ_1 , ψ_2 und Δ wie folgt beschrieben.

$$\psi_1 = \varepsilon_{L,Fa} \cdot \sigma \quad (8-5)$$

$$\psi_2 = \alpha_{Fa} + \frac{1}{R_w} \quad (8-6)$$

$$\Delta = a_{S,Fa} \cdot I_S + \varepsilon_{L,Fa} \cdot I_L + \frac{1}{R_w} \cdot T_{IR} + \alpha_{Fa} \cdot T_{Al} \quad (8-7)$$

Mit Hilfe der durchgeführten Simulationsrechnungen ist in Kapitel 7.8 die Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{Fa} hergeleitet und im Folgenden aufgeführt. Die erforderlichen Koeffizienten a , b , c sind in der Tabelle 20 tabelliert.

$$\alpha_{Fa} = a \cdot \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w \cdot \left(\frac{AW}{90^\circ}\right)^2 - b \cdot \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w \cdot \frac{AW}{90^\circ} + c \cdot \frac{Ws}{m^3 K} \cdot w + 2,8 \frac{W}{m^2 K} \quad (8-8)$$

Die Abbildung 98 dient als Hilfestellung, wenn die Fassadentemperatur T_{Fa} über die Gleichung (8-4) bestimmt wird. Konstanten und Gleichungen werden mit diesem Wegweiser aufgezeigt.

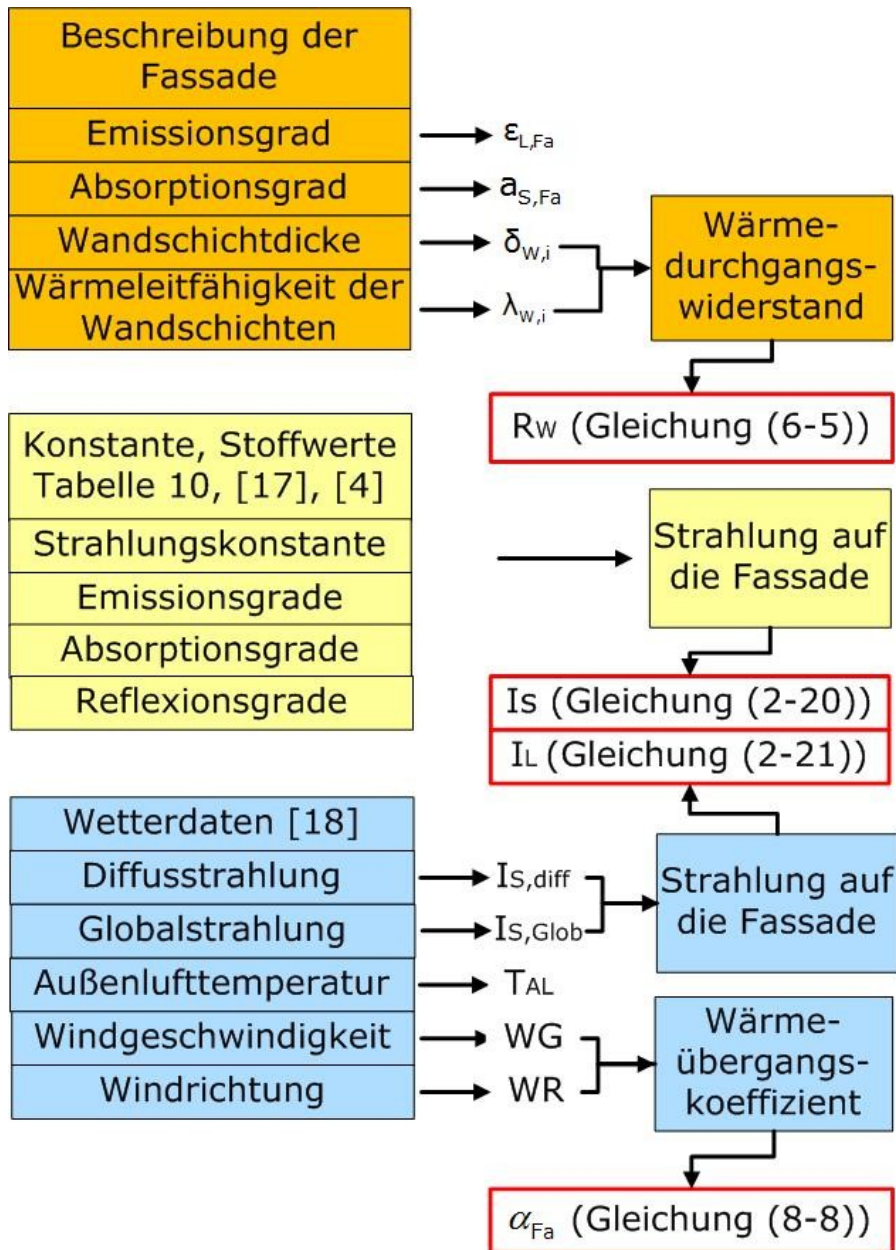


Abbildung 98 Wegweiser zur Bestimmung der Fassadentemperatur (8-4)

In die Gleichung (8-3) wird die Gleichung (8-4) eingesetzt. Das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte mit der Gleichung zur Berechnung der Fassadentemperatur ist aufgestellt.

$$T_{An} = T_{Al} + b_1 \cdot c_1 \left[(T_{Fa,n-1} - \frac{(\psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^4 + \psi_2 \cdot T_{Fa,n-1} - \Delta)}{4 \cdot \psi_1 \cdot T_{Fa,n-1}^3 + \psi_2}) - T_{Al} \right] \quad (8-9)$$

Die Ansaugtemperaturen der Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) werden mit der Gleichung (8-9) für verschiedene Tage berechnet. Die Berechnung erfolgt mit den Stundenmittelwerten der benötigten Wetterdaten der Jahresmesswerte vom 01.08.2007-31.07.2008. Die Abbildung 100 und die Abbildung 99 zeigen für verschiedene Ansaugvarianten den Tagesverlauf der Stundenmittelwerte der Mess- und Berechnungswerte. Die Gleichung (8-9) liefert gute Ergebnisse.

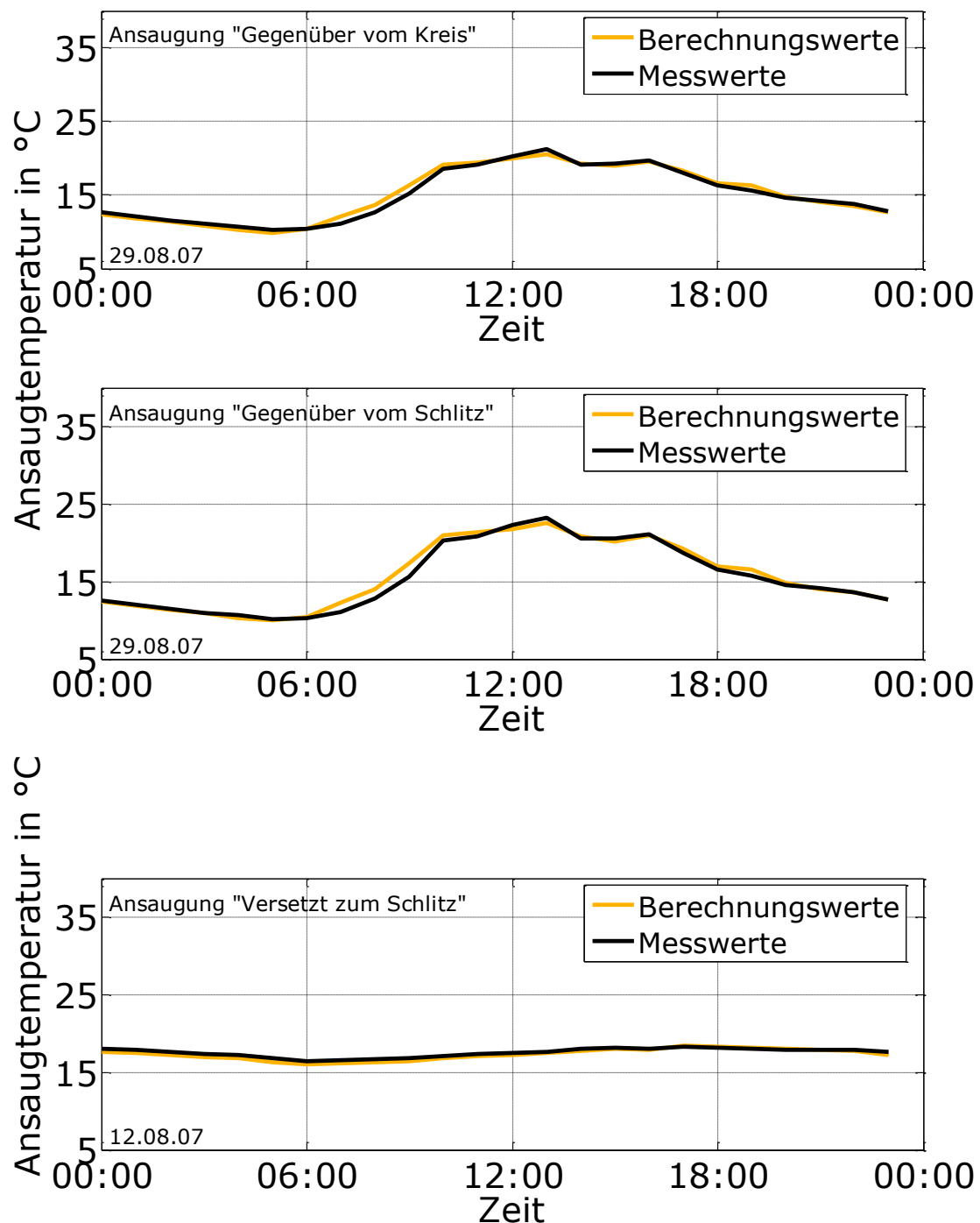


Abbildung 99 Berechnete und gemessene Ansaugtemperatur am VWS-Gebäude, „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“, „Versetzt zum Schlitz“

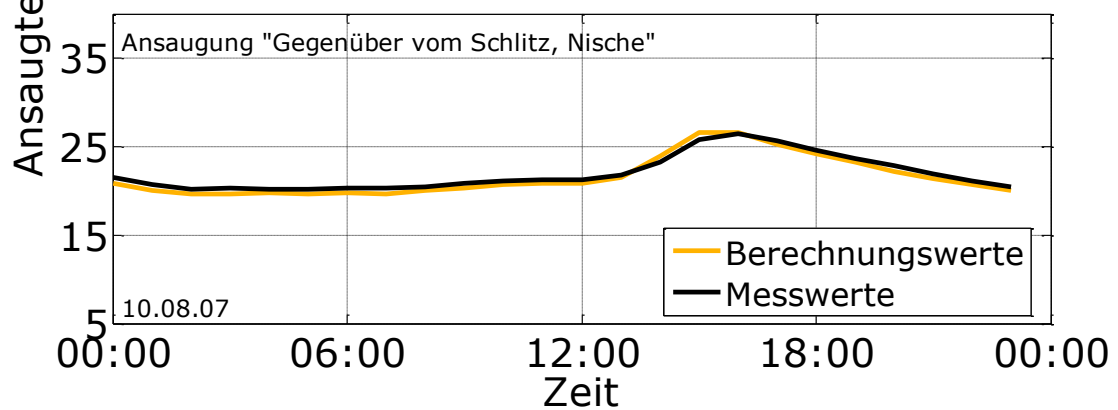
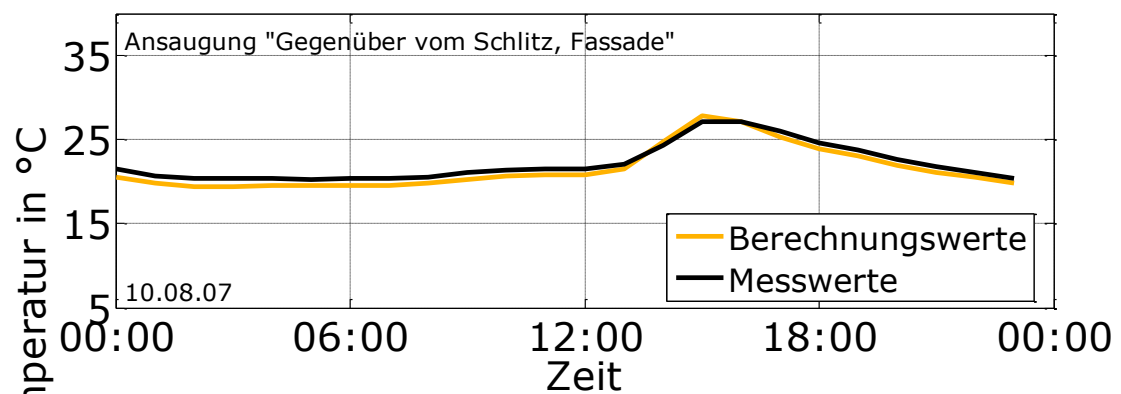
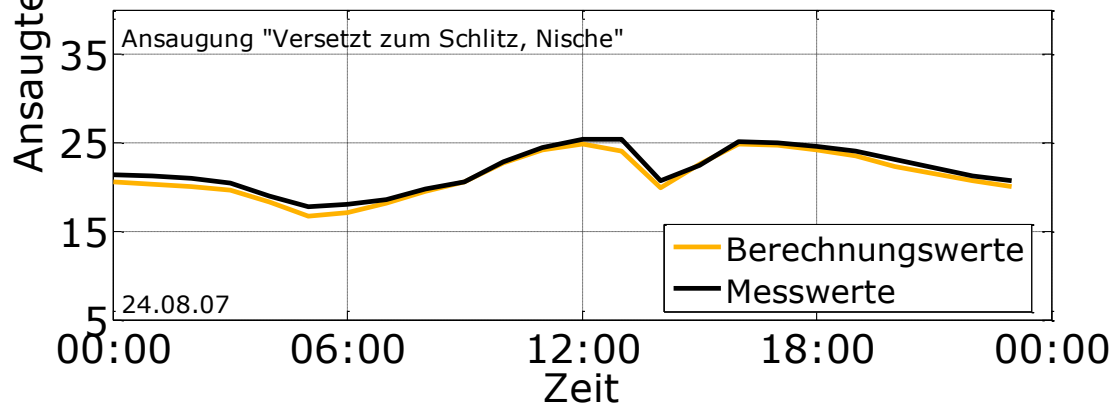
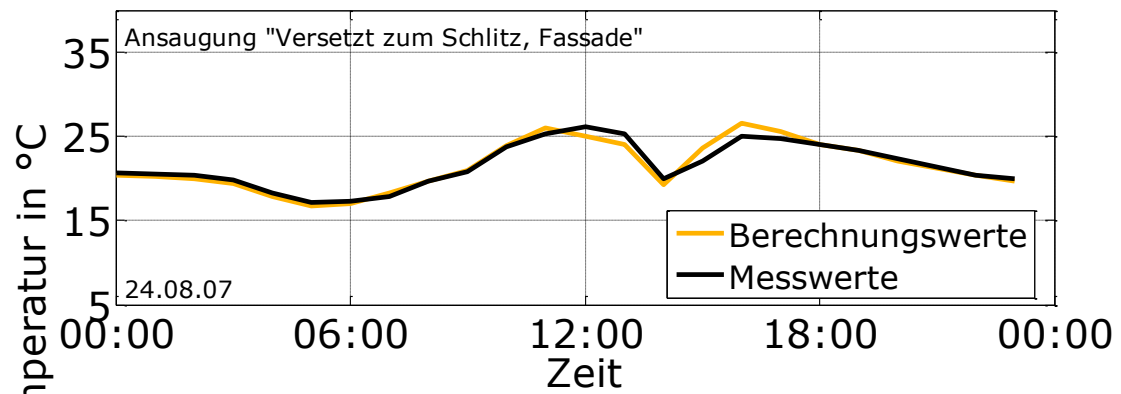


Abbildung 100 Berechnete und gemessene Ansaugtemperatur am TC-Gebäude, Ansaugung „Versetzt zum Schlitz, Fassade“, „Versetzt zum Schlitz, Nische“, „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“, „Gegenüber vom Schlitz, Nische“

Die Ansaugtemperaturen der Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) werden mit der Gleichung (8-9) für das Jahr vom 01.08.2007-31.07.2008 berechnet. Die benötigten Wetterdaten und die Fassadenoberflächentemperaturen der Jahresmessung fließen für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr als Stundenmittelwerte ein.

Die Stundenmittelwerte für jede Stunde zwischen 8-17 Uhr der Jahresmesswerte der Ansaugtemperaturen der Ansaugvarianten werden ermittelt und mit den Berechnungswerten verglichen. Abbildung 101 und Abbildung 102 stellen die Häufigkeitsverteilung der prozentualen Abweichung der Berechnungswerte von den Messwerten der Ansaugtemperaturen der unterschiedlichen Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) dar. Die Abbildung 101 zeigt die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ der glatten VWS-Fassade. Die Abbildung 102 zeigt die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Schlitz, Fassade“, „Versetzt zum Schlitz, Fassade“, „Gegenüber vom Schlitz, Nische“ und „Versetzt zum Schlitz, Nische“ der strukturierten TC-Fassade.

Die Abweichung der Berechnungswerte von den Messwerten beträgt ganzjährig am häufigsten weniger als 5 %. Je nach Ansaugvariante sind mindestens im Sommer 82 %, im Frühling 60 %, im Herbst 51 % und im Winter 40 % der Abweichungen kleiner 5 %. Im Sommer sind die maximalen Abweichungen kleiner 10 %. Im Frühling, Herbst und Winter sind höchstens 13 % der Abweichungen kleiner 15 % und 11 % der Abweichungen kleiner 20 %.

Der Fehler zwischen Mess- und Berechnungswert ist ganzjährig akzeptabel. In der Übergangszeit und im Winter ist mit größeren Abweichungen zu rechnen. Die Abweichungen können sowohl durch Messungenauigkeiten als auch durch Berechnungsfehler begründet werden. Die Temperaturmessungen (Kapitel 4.1) erfolgen mit Thermoelementen, die auf 0,1 K genau kalibriert sind. Die Abweichungen der Sensoren der Wetterstation sind in Kapitel 4.6 aufgeführt. Die Fassadentemperatur (Kapitel 6.2) wird über das Newtonsche Näherungsverfahren berechnet. Es wird der Wärmeübergangskoeffizient berücksichtigt, dessen Abweichung in Kapitel 7.8 aufgeführt ist.

Die aufgestellte Gleichung (8-9) zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte liefert Werte mit akzeptablen Abweichungen.

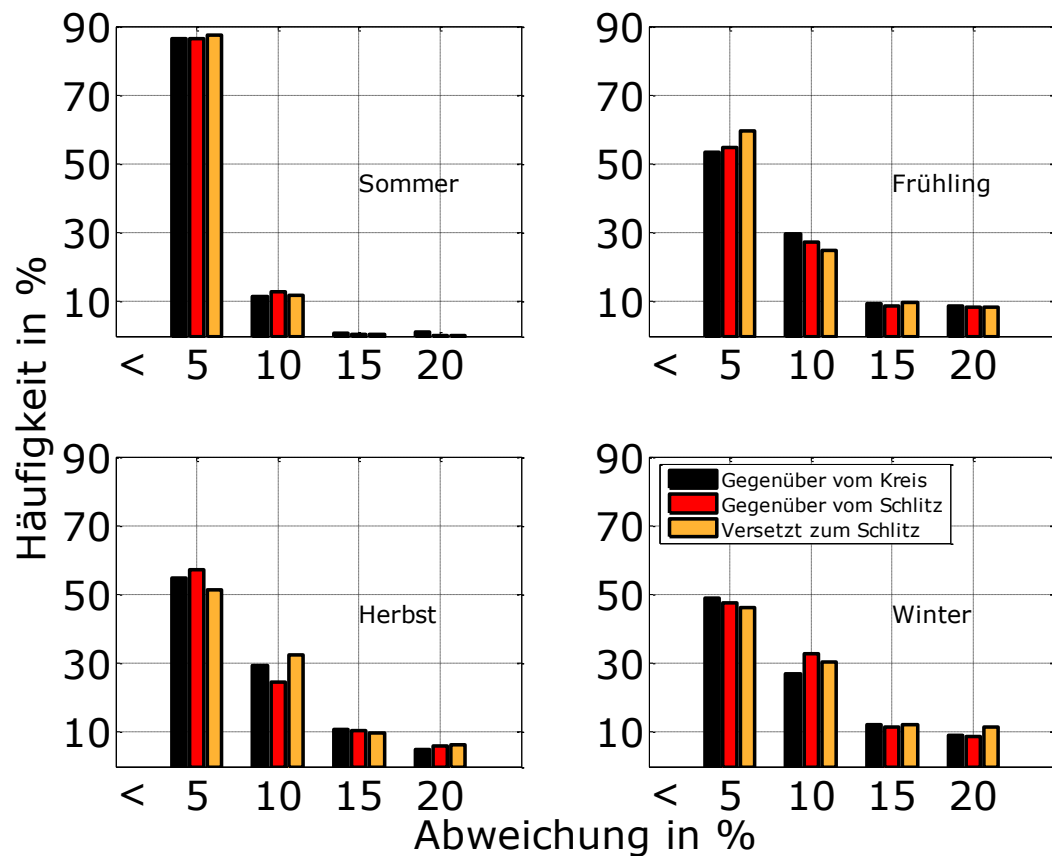


Abbildung 101 Prozentuale Abweichung der Berechnungswerte, VWS-Gebäude

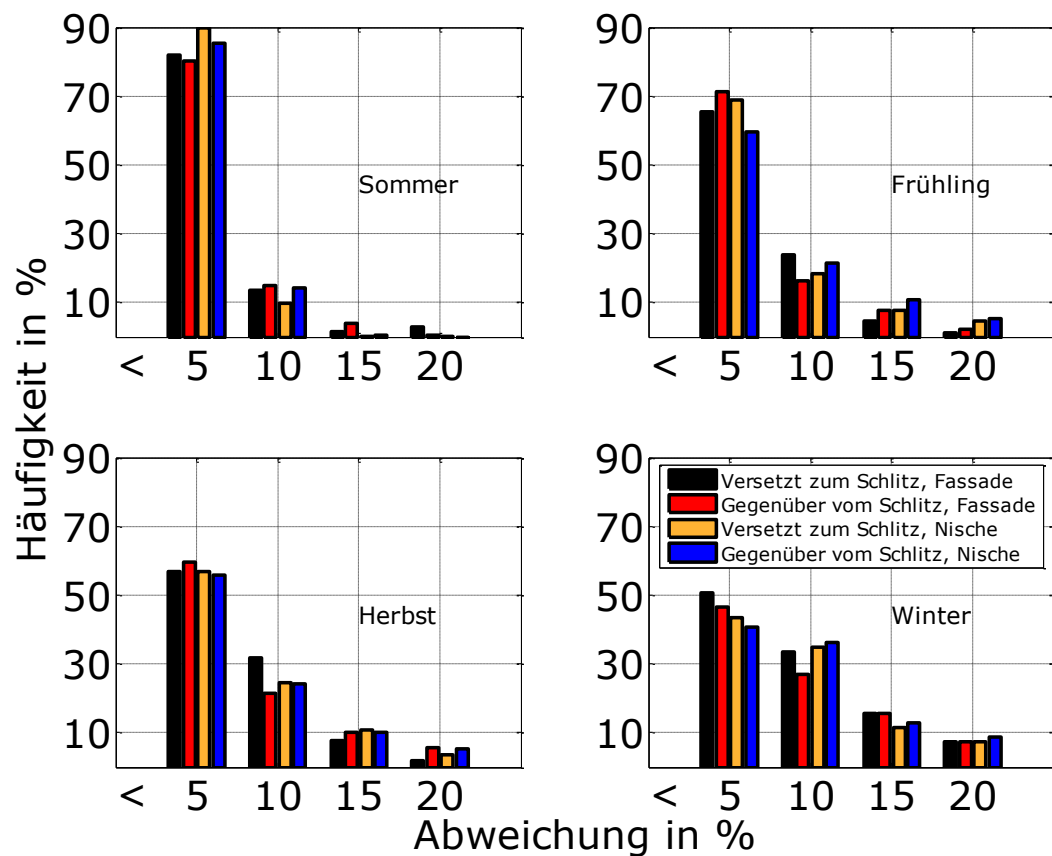


Abbildung 102 Prozentuale Abweichung der Berechnungswerte, TC-Gebäude

8.1 Anwendung des Berechnungsmodells

Mit der Gleichung (8-3) ist das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte aufgestellt. Eine Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte unter Berücksichtigung der Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht ist möglich. Der Jahresenergiebedarf zentraler und dezentraler Lüftungssysteme ist für eine wirtschaftlich begründete Systementscheidung vergleichbar.

Die Abbildung 103 zeigt den Ablauf der Anwendung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte. Zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden die Koeffizienten b_1 und c_1 aus der Tabelle 9 im Kapitel 5 ermittelt. Dazu müssen die Fassadenstruktur, die Position der Ansaugöffnung und die Ansaugvarianten festgelegt werden. Zur Auswahl stehen für die Fassadenstruktur glatt oder strukturiert, für die Position der Ansaugöffnungen in der vordersten Fassadenfläche oder in der zurückversetzten Fassadenfläche und für die Ansaugvarianten „Versetzt zum Schlitz“, „Gegenüber vom Kreis“ oder „Gegenüber vom Schlitz“.

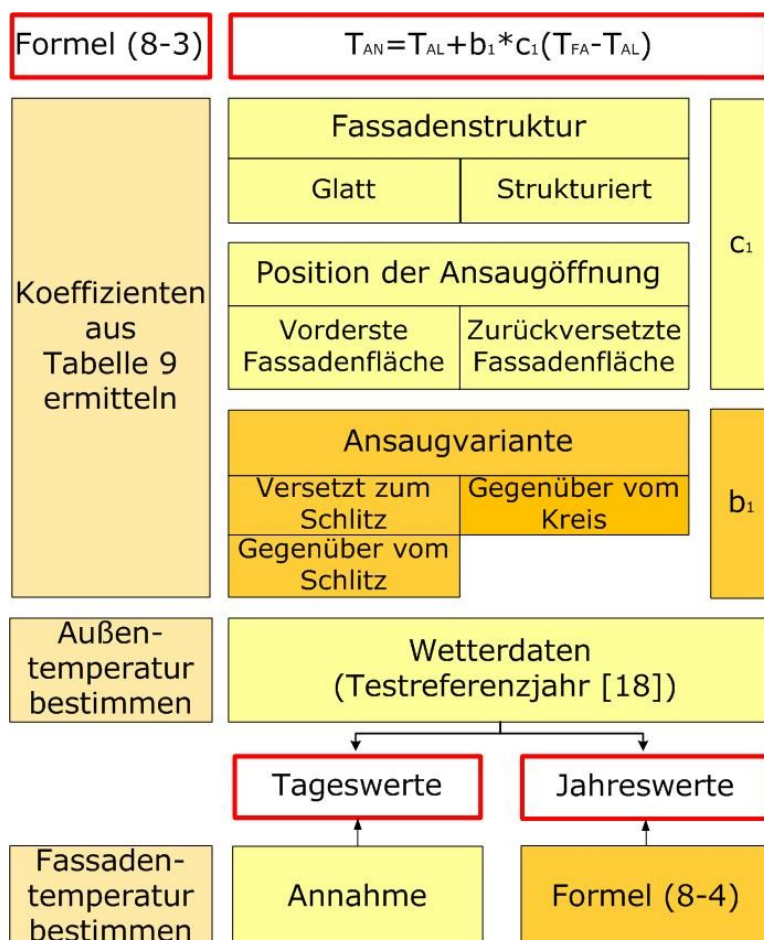


Abbildung 103 Ablauf der Anwendung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte

Mit der Gleichung (8-3) können Jahres- und Tageswerte berechnet werden. Die Berechnung der Jahreswerte der Ansaugtemperaturen muss mit Hilfe eines Programms erfolgen, in das die erforderlichen Konstanten und

Wetterdaten zur Berechnung der Gleichung (8-9) eingelesen werden. Zum Beispiel kann die kommerzielle Software Matlab des Unternehmens The MathWorks verwendet werden. Die Jahreswerte der Außenlufttemperatur werden mit Hilfe von Wetterdaten [18] ermittelt. Die Berechnung der Jahreswerte der Fassadentemperatur erfolgt über die Gleichung (8-4) mit Hilfe von Wetter- und Strahlungsdaten [18]. Die Abbildung 98 unterstützt die Verwendung der Gleichung (8-4).

Eine vereinfachte Berechnung der Ansaugtemperatur erfolgt über die Abschätzung von Tageswerten. Als Tageswerte werden Einzelwerte der Außenluft- und der Fassadentemperatur festgelegt. Die Temperaturmesswerte der Fassadenoberfläche des VWS-Gebäudes (Kapitel 4.5) und der Außenluft (Kapitel 4.6) zeigen, dass hohe Fassadentemperaturen sowohl bei kleinen als auch bei hohen Außenlufttemperaturen auftreten.

Beispielhafte Tageswerte der Ansaugtemperatur sind in der Tabelle 21, Tabelle 22 und Tabelle 23 aufgeführt. Die Ansaugtemperaturen sind für verschiedene Fassadentemperaturen bei jeweils einer Außenlufttemperatur berechnet. Die gewählten Außenlufttemperaturen entsprechen dem Jahresdurchschnitt von 15 °C, einem sommerlichen Wert von 20 °C und einem extremen Wert von 30 °C. Die Fassadentemperaturen entsprechen dem Jahresdurchschnitt von 20 °C, einem Wert von 40 °C und einem maximalen Wert von 60 °C. Die Koeffizienten b_1 und c_1 sind im Kapitel 5 in der Tabelle 9 aufgeführt. Zu beachten ist, dass für die strukturierte Fassade der Koeffizient c_1 für die Ansaugvariante „Gegenüber vom Kreis“ abgeschätzt ist (Kapitel 5).

Tabelle 21 Beispielhafte Tageswerte der Ansaugtemperaturen für eine Außentemperatur von 15 °C

		Außentemperatur in °C		15		
		Fassadentemperatur in °C		20	40	60
Fassadenstruktur	Position der Ansaugöffnung	Ansaugvariante	$b_1 \times c_1$	Ansaugtemperaturen in °C		
Glatt	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,2	16	20	24
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,3	17	23	29
		"Versetzt zum Schlitz"	0,4	17	25	33
Strukturiert	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,14	16	19	21
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,21	16	20	24
		"Versetzt zum Schlitz"	0,28	16	22	28
Strukturiert	Zurückversetzte Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,1	16	18	20
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,15	16	19	22
		"Versetzt zum Schlitz"	0,2	16	20	24

Tabelle 22 Beispielhafte Tageswerte der Ansaugtemperaturen für eine Außentemperatur von 20 °C

		Außentemperatur in °C		20		
		Fassadentemperatur in °C		20	40	60
Fassadenstruktur	Position der Ansaugöffnung	Ansaugvariante	$b_1 \times c_1$	Ansaugtemperaturen in °C		
Glatt	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,2	20	24	28
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,3	20	26	32
		"Versetzt zum Schlitz"	0,4	20	28	36
Strukturiert	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,14	20	23	26
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,21	20	24	28
		"Versetzt zum Schlitz"	0,28	20	26	31
Strukturiert	Zurückversetzte Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,1	20	22	24
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,15	20	23	26
		"Versetzt zum Schlitz"	0,2	20	24	28

Tabelle 23 Beispielhafte Tageswerte der Ansaugtemperaturen für eine Außentemperatur von 30 °C

		Außentemperatur in °C		30		
		Fassadentemperatur in °C		20	40	60
Fassadenstruktur	Position der Ansaugöffnung	Ansaugvariante	$b_1 \times c_1$	Ansaugtemperaturen in °C		
Glatt	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,2	28	32	36
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,3	27	33	39
		"Versetzt zum Schlitz"	0,4	26	34	42
Strukturiert	Vorderste Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,14	29	31	34
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,21	28	32	36
		"Versetzt zum Schlitz"	0,28	27	32	38
Strukturiert	Zurückversetzte Fassadenfläche	"Gegenüber vom Kreis"	0,1	29	31	33
		"Gegenüber vom Schlitz"	0,15	29	32	35
		"Versetzt zum Schlitz"	0,2	28	32	36

Die berechneten Ansaugtemperaturen sind kleiner als die Außenlufttemperatur, wenn die Fassadentemperaturen kleiner als die Außenlufttemperatur sind, siehe Tabelle 23.

Die berechneten Ansaugtemperaturen sind gleich der Außenlufttemperatur, wenn die Fassadentemperatur ebenfalls die gleiche Temperatur wie die Außenluft aufweist, siehe Tabelle 22.

Sind die Temperaturen der Fassadenoberfläche größer als der Außenluft und weisen Außenluft- und Fassadentemperatur Differenzen größer zehn Kelvin auf, liegen die Ansaugtemperaturen bei glatten Fassaden höher als bei strukturierten Fassaden. Desweiteren sind die Ansaugtemperaturen bei strukturierten Fassaden für die Position der Ansaugöffnung in der vordersten Fassadenfläche höher als für die Position der Ansaugöffnung in der zurückversetzten Fassadenfläche, siehe Tabelle 22.

Sind die Temperaturen der Fassadenoberfläche größer als der Außenluft und weisen Außenluft- und Fassadentemperatur Differenzen von zehn Kelvin auf, liegen die Ansaugtemperaturen bei glatten Fassaden höher als bei strukturierten Fassaden. Die Ansaugtemperaturen bei strukturierten Fassaden für Ansaugöffnungen in der vordersten und zurückversetzten Fassadenfläche sind gleich, siehe Tabelle 23.

Sind die Temperaturen der Fassadenoberfläche größer als der Außenluft und weisen Außenluft- und Fassadentemperatur Differenzen kleiner fünf Kelvin auf, sind die Ansaugtemperaturen bei glatten Fassaden und strukturierten Fassaden gleich, siehe Tabelle 21.

8.2 Diskussion und Übertragbarkeit des Berechnungsmodells

Die Übertragbarkeit des Berechnungsmodells wird für die aufgeführten Abhängigkeiten erläutert und diskutiert.

- Fassadenausrichtung (Nord, Süd, Ost, West)
- Geometrie und Größe der Ansaugöffnung
- Position der Ansaugöffnung je nach Fassadenstruktur
- Position der Ansaugöffnung in unterschiedlichen Gebäudehöhen
- Volumenstrom
- Anlagenwahl
- Ansaugvariante

Fassadenausrichtung

Das aufgestellte Modell ist von der Fassadentemperatur abhängig. Die Messung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte erfolgt an Südfassaden. Die Sonneneinstrahlung ist auf dieser Fassadenfläche gegenüber den westlich, nördlich und östlich orientierten Fassaden am höchsten. Die Südfassaden heizen sich dementsprechend stark auf und weisen hohe Fassadentemperaturen auf. Auch Westfassaden werden hohe Temperaturen aufweisen, Nord- und Ostfassaden dagegen nicht. Je nach Orientierung der Fassade wird die Fassadentemperatur variieren und somit auch die berechnete Ansaugtemperatur.

Die Fassadentemperatur ist von der Nettostrahlung auf die Fassadenfläche (Kapitel 2.4) abhängig. Die Nettostrahlung I beinhaltet die auftreffenden

kurzwelligen Strahlungsanteile. Die kurzwellige Direktstrahlung auf die Fassadenfläche $I_{S,Fa,dir}$ berücksichtigt über den Strahlungseinfallswinkel θ (Kapitel 2.4.4) die Fassadenorientierung über den Flächenazimut α_F . Des Weiteren ist die Fassadentemperatur vom Wärmeübergangskoeffizient abhängig. Der Wärmeübergangskoeffizient (Gleichung 8-8) wird in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Anströmwinkel zur Fassade berechnet. Der Anströmwinkel spannt sich zwischen Windrichtung und Fassadenfläche auf. Er ist in Kapitel 7.7.1 für die Südfassade angegeben. Für die Nord-, Ost- und Westfassade berechnet sich der Winkel entsprechend den Angaben in Tabelle 24. Die Übertragung des Modells zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte auf andere Fassadenorientierung ist gegeben.

Tabelle 24 Berechnung der Anströmwinkel gemäß der Fassadenausrichtung

Fassadenausrichtung	Windrichtung WR	Anströmwinkel AW
Süd	$180^\circ \leq WR \leq 270^\circ$	$AW = 270^\circ - WR$
	$90^\circ \leq WR \leq 180^\circ$	$AW = WR - 90^\circ$
Nord	$270^\circ \leq WR \leq 360^\circ$	$AW = WR - 270^\circ$
	$0^\circ \leq WR \leq 90^\circ$	$AW = 90^\circ - WR$
West	$90^\circ \leq WR \leq 180^\circ$	$AW = 180^\circ - WR$
	$0^\circ \leq WR \leq 90^\circ$	$AW = WR - 0^\circ$
Ost	$180^\circ \leq WR \leq 270^\circ$	$AW = WR - 180^\circ$
	$270^\circ \leq WR \leq 360^\circ$	$AW = 360^\circ - WR$

Geometrie und Größe der Ansaugöffnung

Die Ansaugflächen der Schlitz- und Kreisöffnungen können unterschiedliche Größen aufweisen. Aus architektonischer Sicht werden sie unauffällig und daher vermutlich nicht besonders groß ausfallen. Es ist jedoch ausreichend die Messungen der Ansaugtemperaturen und somit die Datenerhebung zur Aufstellung des Modells für zwei Öffnungsgeometrien mit gleicher Ansaugfläche durchzuführen, da sich die Ansaugcharakteristik in Abhängigkeit der Größe der Ansaugfläche (Kapitel 3.2) nicht ändert. Somit stellt die Größe der Ansaugfläche keinen Einfluss auf die Ansaugtemperatur dar und wird im Modell zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte nicht berücksichtigt.

Der Einfluss der Geometrie wird über die tabellierten Koeffizienten in Tabelle 9 berücksichtigt. Die Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte kann für Schlitz- und Kreisöffnungen erfolgen.

Position der Ansaugöffnung je nach Fassadenstruktur

Ansaugöffnungen in glatten Fassaden können mit der Fassadenoberfläche bündig abschließen. Ansaugöffnungen in strukturierten Fassaden können mit der vordersten Fassadenflächen der Vorsprünge abschließen oder zurückgesetzt in die Nischenrückwand eingebaut sein. Die Fassadenstruktur

und die Position der Ansaugöffnung auf die Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden berücksichtigt. Entsprechende Koeffizienten sind in der Tabelle 9 tabelliert. Zur Auswahl stehen für die Fassadestruktur glatt oder strukturiert, für die Position der Ansaugöffnungen in der vordersten oder in der zurückversetzten Fassadenfläche.

Position der Ansaugöffnung in unterschiedlichen Gebäudehöhen

Die Position der Ansaugöffnungen kann in unterschiedlichen Etagen erfolgen. Das Modell zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte berücksichtigt eine mögliche Abhängigkeit der Ansaugtemperaturen von der Gebäudehöhe nicht. In Kapitel 4.10.3 werden die Temperaturverläufe der fünften und neunten Etage verglichen. Sie sind annähernd gleich. Die Einflussnahme der Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturverläufen der fünften und neunten Etage für gleiche Abstände zur Fassade auf die Ansaugtemperatur ist vernachlässigbar. Die Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden von der Gebäudehöhe in dem betrachteten Höhenbereich als unabhängig bewertet (Kapitel 4.10.3). Die Anwendung des Modells ist nicht auf beliebige Gebäudehöhen übertragbar, sondern beschränkt sich auf Gebäude mit einer Höhe von 32 m.

Volumenstrom

Dezentrale Fassadenlüftungsgeräte werden unterschiedliche Volumenströme ansaugen. Sie sind für Volumenströme zwischen 30 m³/h und 500 m³/h (Kapitel 2.1) ausgelegt. Mit steigendem Volumenstrom werden fernere Luftschichten über die Ansaugöffnung erfasst. Unabhängig vom Volumenstrom (Kapitel 3.2) wird bei runden und rechteckigen Öffnungen die Luft überwiegend aus Entfernungen bis zu 30 cm angesaugt. Die Ansaugung erfolgt somit mit großer Häufigkeit innerhalb der aufgebauten fassadennahen Grenzschicht (Kapitel 4.9). Der Einfluss auf die Ansaugtemperatur durch die Erfassung von ferneren Luftschichten ab einem Abstand von 40 cm wird als gering eingestuft. Die Ansaugtemperatur dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ist vom Volumenstrom unabhängig und wird im Berechnungsmodell nicht berücksichtigt (Kapitel 3.2). Die Anwendung des Modells beschränkt sich auf Volumenströme bis 500 m³/h.

Anlagenwahl

Erfolgt die Ansaugung bei zentralen Anlagen über in die Fassade integrierte Ansaugöffnungen, kann das Berechnungsmodell zur Einschätzung der Ansaugtemperaturen verwendet werden. Ein genauer Berechnungswert kann bei Volumenströmen größer 500 m³/h nicht ermittelt werden, da vermutlich fernere Luftschichten im Abstand von 40 cm angesaugt werden. Die Ansaugtemperaturen müssten kleiner als die berechneten Ansaugtemperaturen sein.

Ansaugvariante

Das Modell zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte berücksichtigt unterschiedliche Ansaugvarianten. Diese

unterscheiden sich durch die Geometrie der Ansaugöffnung in der Fassade und die Position der Fassadenöffnung zum inneren Geräteanschluss. Zur Auswahl stehen die Ansaugvarianten (Kapitel 4.2) „Versetzt zum Schlitz“, „Gegenüber vom Kreis“ oder „Gegenüber vom Schlitz“.

Die Anwendung des Modells zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgerät auf die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Kreis“ und „Gegenüber vom Schlitz“ ist mit den Koeffizienten der Tabelle 9 möglich. Die direkte gerade Verbindung zwischen Fassadenöffnung und innerem Geräteanschluss muss besonders bei längeren Strecken isoliert werden.

Bei der Anwendung des Modells zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgerät auf die Ansaugvariante „Versetzt zum Schlitz“ muss der Einbau berücksichtigt werden. Das aufgestellte Modell bezieht sich auf die Variante, dass sich die Fassadenöffnung 30 cm unterhalb des inneren Geräteanschlusses befindet und die angesaugte Luft über einen unisolierten Zwischenraum geführt wird. Wird der Einbau auf diese Weise umgesetzt oder erfolgt der Einbau mit einer längeren unisolierten Strecke, sind die Koeffizienten der Tabelle 9 zur Berechnung der Ansaugtemperaturen anwendbar. Es ist jedoch zu beachten, dass sich bei einer längeren unisolierten Strecke vermutlich höhere Ansaugtemperaturen einstellen als berechnet. Es liegt daher nahe, die Strecke zwischen Fassadenöffnung und innerem Geräteanschluss isoliert auszuführen. In diesem Fall wird die Berechnung der Ansaugtemperaturen mit den Koeffizienten der Tabelle 9 vermutlich höhere Werte ermitteln als sich real einstellen werden. Die Ansaugtemperaturen sind in diesem Fall vermutlich mit den Ansaugtemperaturen der Ansaugvariante „Gegenüber vom Schlitz“ vergleichbar.

9 Ausblick

Eine Erweiterung des Modells zur Berechnung dezentraler Ansaugtemperaturen ist für zentrale Anlagen denkbar, deren Ansaugöffnungen in die Fassadenfläche integriert sind. Für diese Modellerweiterung müssten Messungen zentraler Ansaugtemperaturen für Ansaugöffnungen in Südfassaden erfolgen. Die Auswertungen dieser Messungen müssen den Einfluss der Ansaugung von Volumenströmen größer $500 \text{ m}^3/\text{h}$ auf die Ansaugtemperaturen ermitteln.

Die Berechnung der Jahreswerte der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte muss mit Hilfe eines Programms erfolgen, in das die erforderlichen Konstanten und Wetterdaten eingelesen werden. Die kommerzielle Software Matlab des Unternehmens The MathWorks kann dazu verwendet werden. Die Berechnung der Ansaugtemperaturen bedingt die Berechnung der Fassadentemperatur, deren Gleichung umfangreich ist. Zur Vereinfachung des bisherigen aufgestellten Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wäre es hilfreich, wenn für die Gleichung zur Berechnung der Fassadentemperatur eine Abschätzung aufgestellt wird. Ob eine solche vereinfachende Gleichung zur Berechnung der Fassadentemperatur aufgestellt werden kann, ist zu prüfen.

10 Zusammenfassung

Das Modell zur Berechnung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte liegt vor. Es ermöglicht die Auslegung der Heiz- und Kühlleistung dezentraler Geräte unter Berücksichtigung der Temperaturerhöhung in der Fassadengrenzschicht.

Für die Aufstellung des Modells zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte werden experimentelle (Kapitel 4) und numerische Untersuchungen (Kapitel 7) durchgeführt. Die Herangehensweise zur Aufstellung des Berechnungsmodells zeigt Abbildung 104.

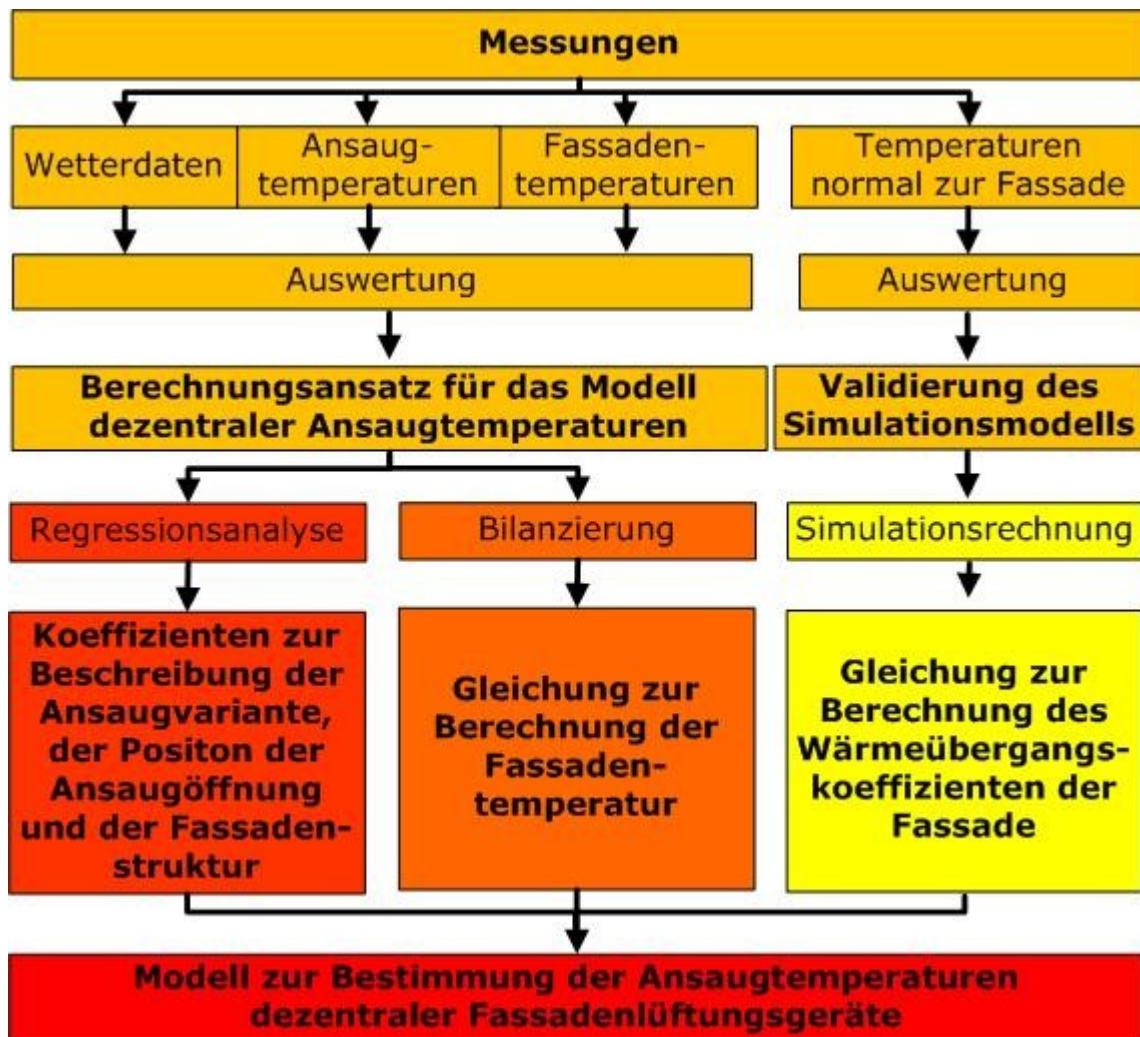


Abbildung 104 Herleitung des Modells dezentraler Ansaugtemperaturen

Ansaugtemperaturen von dezentralen und zentralen Anlagen, Wetterdaten, Fassadenoberflächentemperaturen und Temperaturen normal zur Fassadenoberfläche werden experimentell gemessen. Für die Messungen der Ansaugtemperaturen dezentraler Anlagen (Kapitel 4.2) werden zwei Gebäuden der Technischen Universität Berlin mit unterschiedlicher Fassadenstruktur ausgewählt. Dezentrale Anlagen sind in diesen Gebäuden nicht installiert. Aus diesem Grund werden in die Fassaden dieser Gebäude Ansaugöffnungen mit kreis- und schlitzförmiger Geometrie eingebaut. Die Außenluft wird mit einem Ventilator angesaugt. Die mittlere Temperatur

der angesaugten Luft wird gemessen. Die zentralen Ansaugtemperaturen (Kapitel 4.3) werden an realen Anlagen gemessen, deren Ansaugöffnungen überwiegend außerhalb der Fassadenoberflächen angeordnet sind. Die Wetterdaten werden von einer eigenen Wetterstation (Kapitel 4.6) erfasst. Sie ist auf dem Dach eines der Gebäude installiert, die für die Messungen der dezentralen Ansaugtemperaturen ausgewählt sind.

Die Auswertungen der Messungen von Wetterdaten, Ansaugtemperatur und Fassadentemperatur ergeben einen Berechnungsansatz (Kapitel 4.11) zur Aufstellung des Berechnungsmodells der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte.

Normal zur Südfassade des Gebäudes mit der Wetterstation finden Temperaturmessungen (Kapitel 4.4) statt, die für die Validierung der numerischen Simulationsrechnungen verwendet werden.

Der aufgestellte Berechnungsansatz (Kapitel 4.11) zur Aufstellung des Berechnungsmodells der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte beinhaltet die Außenluft- und die Fassadenoberflächentemperatur und berücksichtigt über Koeffizienten die Ansaugvarianten, die Position der Ansaugöffnungen und die Fassadenstruktur. Die Koeffizienten werden mit einer Regressionsanalyse (Kapitel 5) ermittelt. Eine Gleichung zur Berechnung der Fassadenoberflächentemperatur (Kapitel 6.2) wird aufgestellt. Sie beinhaltet die Nettostrahlungsbilanz (Kapitel 2.4) und ist von dem Wärmeübergangskoeffizient der Fassadenoberfläche abhängig. Die Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten (Kapitel 7.8) in Abhängigkeit der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit wird mit Hilfe der Simulationsrechnungen ermittelt. Der Wärmeübergangskoeffizient der Fassadenfläche ist zur Berechnung der Fassadentemperatur (Kapitel 6.2) erforderlich. Die Fassadentemperatur fließt in das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte ein.

Das Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte wird in Kapitel 8 mit Hilfe der ermittelten Koeffizienten aus der Regressionsanalyse und den hergeleiteten Gleichungen zur Berechnung von Fassadenoberflächentemperatur und Wärmeübergangskoeffizient aufgestellt. Es ist mit Hilfe der gemessenen Ansaugtemperaturen erfolgreich validiert worden. Die Anwendung des Modells ist in Kapitel 8.1 beschrieben.

Die Ansaugtemperaturen hängen von der Fassadenoberflächentemperatur und von der Außenlufttemperatur ab. Des Weiteren üben die Position der Ansaugöffnungen (Kapitel 4.10.5), die Fassadenstruktur (Kapitel 4.10.2) und die Ansaugvariante (Kapitel 4.10.6) einen Einfluss auf die dezentralen Ansaugtemperaturen aus. Die Ansaugvarianten „Gegenüber vom Kreis“, „Gegenüber vom Schlitz“ und „Versetzt zum Schlitz“ werden betrachtet. Sie unterscheiden sich durch die Geometrie der Ansaugöffnung in der Fassade und die Position der Fassadenöffnung zum inneren Geräteanschluss. Schlitzförmige Ansaugöffnungen saugen fassadennähere und somit wär-

mere Luftschichten an als kreisförmige Ansaugöffnungen. Die Ansaugtemperaturen der Ansaugvariante „Gegenüber vom Schlitz“ sind höher als der Ansaugvariante „Gegenüber vom Kreis“. Wird die Luft zusätzlich wie bei der Ansaugvariante „Versetzt zum Schlitz“ über einen Zwischenraum geführt, liegen die Ansaugtemperaturen höher als bei der Ansaugvariante „Gegenüber vom Schlitz“.

Die Abbildung 105 zeigt die Abhängigkeit der Ansaugtemperaturen von der Fassadenstruktur und der Position der Ansaugöffnungen. Wird die Außenluft über glatte Fassaden angesaugt, liegen die Ansaugtemperaturen höher als bei strukturierten Fassaden (Vorsprungfassaden). Bei Vorsprungfassaden hat die Position der Ansaugöffnungen Einfluss auf die Ansaugtemperaturen. Die Ansaugöffnungen können mit der vordersten Fassadenfläche (1) abschließen oder zurückversetzt in der Nischenrückwand (2) angeordnet sein. Wird über die zurückversetzte Fassadenfläche (2) angesaugt, sind die Ansaugtemperaturen im Winter größer als für die Ansaugöffnungen in der vordersten Fassadenfläche (1). Im Sommer verhält es sich genau umgekehrt. Die Sonne steht höher, so dass die Nischenrückwand nicht beschienen wird. Die Oberflächentemperaturen der Nischenrückwand (2) sind geringer als die der vordersten Fassadenfläche (1). Daher sind im Sommer die Ansaugtemperaturen für die Ansaugöffnungen in der zurückversetzten Fassadenfläche (2) geringer als für die Ansaugöffnungen in der vordersten Fassadenfläche (1).

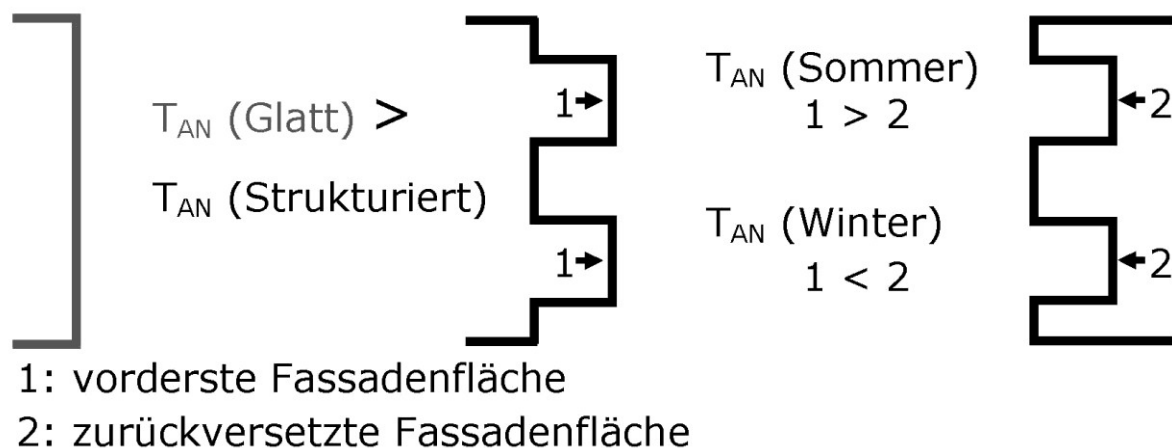


Abbildung 105 Ansaugtemperaturen T_{AN} abhängig von der Fassadenstruktur und der Position der Ansaugöffnungen

11 Literaturverzeichnis

- [1] Sefker, T.:
Dezentrale RLT-Anlagen, BHKS-Almanach 2006, Bundesindustrieverband Heizungs-, Klima-, Sanitärtechnik, Technische Gebäudesysteme e.V.-BHKS-, Bonn
- [2] VDI 6035 (September 2009)
Raumluftechnik, Dezentrale Lüftungsgeräte, Fassadenlüftungsgeräte (VDI-Lüftungsregeln), Beuth Verlag GmbH
- [3] VDI 3803 (Februar 2010)
Raumluftechnik, Zentrale Raumluftechnische Anlagen, Bauliche und technische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Beuth Verlag GmbH
- [4] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.-R.:
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 03/04, Oldenbourg Industrie-verlag München, 2003, ISBN 3-486-26534-2
- [5] Drkal, F.
Strömungsverhältnisse bei runden Saugöffnungen mit Flansch, HLH, Band 21, Nr. 8, August 1970, S. 271-273
- [6] Finke, U.:
Dezentrale Außenluftansaugung bei raumluftechnischen Geräten, HLH Band 53, Nr.10, Oktober 2002, S. 32-37
- [7] Müller, D.; Reske, M.:
Temperatur der angesaugten Außenluft bei dezentralen Lüftungsgeräten, Forschungsbericht FLT, Dezember 2003
- [8] Baehr, H.D., Stephan, K.:
Wärme- und Stoffübertragung, 2. Auflage, 1996, Springer-Verlag, ISBN 3-540-60374-3
- [9] Polhausen, E.:
Der Wärmeaustausch zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten mit kleiner Reibung und kleiner Wärmeleitung, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 1, 1921, S. 115-121, zitiert in [8]
- [10] Kriegel, B.:
Fallströmungen vor Abkühlungsflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen, Dissertation TU-Berlin, 1973
- [11] Duffie, J. A.; Beckman, W. A.:
Solar Engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-51056-4

-
- [12] Griffiths, E.; Davis, A.H.:
The transmission of heat by radiation and convection , Special Report No9,
Food Investigation Board, Brit. Dept. of Sci. and Ind. Research, London,
1922, zitiert in [10]
- [13] Eckert, E.R.G.; Jackson, T.W.:
Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate, NACA
Report 1015, 1951, zitiert in [10]
- [14] Bartsch, H.-J.:
Mathematische Formeln, Fachbuchverlag Leipzig, 1991,
ISBN 3-343-00746-3
- [15] John, B.:
Statistische Verfahren für Technische Meßreihen, Arbeitsbuch für den In-
genieur, Carl Hanser Verlag München Wien, 1979, ISBN 3-446-12381-4
- [16] Kehrer, M.; Schmidt, T.:
Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen,
Tagungsband BauSim 2006, ISBN 10-3-00-019823-7
- [17] VDI Richtlinie 3789 (Oktober 1994):
Umweltmeteorologie–Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ober-
flächen, Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung, Beuth Ver-
lag GmbH
- [18] Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M.:
Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungs-
verhältnisse TRY, 2004, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes,
ISBN 3-88148-398-5
- [19] Blümel, K.; Hollan, E.; Kähler, M.; Peter, R.:
Entwicklung von Testreferenzjahren für Klimaregionen der Bundesrepublik
Deutschland, BMFT, Forschungsbericht T86-051, 1986, ISSN 0340-7608
- [20] Kasten, F.; Czeplak, G.:
Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud,
Solar Energy, Vol. 24, Pergamon Press, 1980, S. 177-189
- [21] Sonntag, D.; Heinze, D.:
Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und
Eis (1. Aufl.), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1982
- [22] Esdorn, H.:
Rietschel-Raumklimatechnik 1 Grundlagen, 16. Auflage, Springer Verlag,
1994

-
- [23] Rouvel, L.; Seifert, Ch.:
Wärmeeintrag in den Raum aufgrund kurzweiliger Einstrahlung (Teil 1),
KI Kälte Luft Klimatechnik, Juli/August 2007
- [24] Verein Deutscher Ingenieure:
VDI-Wärmeatlas 4. Auflage, Düsseldorf, VDI-Verlag 1984
- [25] Churchill, S. W.; Chu, H. H. S.:
Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a
vertical plate, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 18, Pergamon Press,
1975, S. 1323-1329, zitiert in [24]
- [26] Gnielinski, V.:
Berechnung mittlerer Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten am lami-
nar und turbulent überströmten Einzelkörper mit Hilfe einer einheitlichen
Gleichung, Forschung im Ingenieurwesen, Vol. 41, 1975, S. 145-153, zi-
tiert in [24]
- [27] Churchill, S. W.:
A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and
free convection, AIChE Journal, Vol 23, 1977, Nr. 1, S. 10-16
- [28] Menter, F.R.; Tielbörger, H.:
Wärmeübergangsberechnungen mit modernen Zweigleichungs-Turbulenz-
modellen, ATZ-online, atz-springerfachmedien-wiesbaden.de, 2003-01
- [29] Menter, F.R.:
„Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applica-
tions“, AIAA Journal, Vol.32, S.1598-1650, 1994, zitiert in [30]
- [30] Martin Kriegel
Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation eines Quell-
luftsystems, Dissertation 2005, ISBN 3-86504-152-3
- [31] Bräuer, F.; Haase, T.; Müller, B.:
Untersuchung der Ansaugsituation von dezentralen Lüftungsfassadengerä-
ten, BMWi / IGF-Nr. 16235, Abschlussbericht 2011
- [32] DIN EN 13779 (September 2007)
Lüftung von Nichtwohngebäuden-Allgemeine Grundlagen und Anforderun-
gen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme, Beuth Verlag,
September 2007
- [33] VDI 3786 Blatt 2 (Dezember 2000):
Umweltmeteorologie - Meteorologische Messungen für Fragen der Luft-
reinhaltung – Wind, Beuth Verlag GmbH

[34] DIN EN ISO 6946 (April 2008):
Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007), Beuth Verlag, April 2008

[35] Graubner, C.-A.; Bachmann, A.:
Windeinwirkung auf Hochhäuser im innerstädtischen Bereich, Bauingenieur Band 76, Juli/August 2001, Springer VDI-Verlag

[36] <http://www.cfd-online.com/Forums/blogs/diamondx/1549-mesh-quality-criteria-icem.html>