



Christoph Ferk, BSc

CFD Modellierung eines klimaadaptiven Fassadenelementes mit Fokus auf aktiver und passiver Solarenergienutzung

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt

Institut für Hochbau

Mitbetreuender Universitätsassistent
Dipl.-Ing. Uwe Schabernak BSc Bmstr.

Graz, im August 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Nahezu am Ende meines Studiums blicke ich auf einige lehrreiche, interessante aber auch sehr fordernde und lustige Jahre zurück und stelle fest, dass es an der Zeit ist, allen Personen, die mich in diesen Jahren bis hin zum Abschluss meiner Diplomarbeit begleitet haben, zu danken.

Zuerst gebührt mein Dank Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt, welcher meine Arbeit hervorragend betreut und durch das Einbringen interessanter Aspekte und Sichtweisen immer in die passende Richtung gelenkt hat. Für die fachlichen Gespräche, hilfreichen Anregungen und konstruktiven Kritiken gilt Dipl.-Ing. Uwe Schabernak BSc. ein besonderer Dank. Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts für Hochbau für die angenehme Arbeitsatmosphäre und für die zur Verfügung gestellten Ressourcen danken.

Besonderen Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen, welche mir das Studium finanziell ermöglicht haben, mir in schweren Zeiten Selbstvertrauen geschenkt haben und als Unterstützung immer für mich da waren. Ferner hat mich ihre berufliche Tätigkeit zur Durchführung dieser Arbeit angeregt und motiviert. Weiters danke ich meiner Schwester Michaela für ihren fachlichen und mentalen Beistand. Ihrer Leistung gebührt mein größter Respekt.

Ebenfalls möchte ich meiner langjährigen Freundin Vera für ihre liebende Unterstützung, sowie für die Geduld und Rücksichtnahme, welche sie in den letzten Monaten aufbringen musste, danken. Auch Veras Familie möchte ich an dieser Stelle einen Dank aussprechen.

Zu guter Letzt möchte ich all meinen Studienkollegen und Freunden für eine entspannte und lustige Zeit sowohl an als auch abseits der Universität ganz besonders danken. Namentlich anführen möchte ich an dieser Stelle Georg, Michael, Egzon, Chris, Simon, Philipp, Florian, Romana, Verena, Christopher, Lukas, Markus, Metin, Gor, Thomas und Andreas. Ihr seid die Besten!

Abschließend möchte ich allen namentlich nicht erwähnten Freunden, Bekannten und Verwandten meinen herzlichen Dank aussprechen.

Christoph Ferk
Graz, 23. August 2016

Kurzfassung

Die Fassade nimmt den größten Flächenanteil der Gebäudehülle in Anspruch und bringt damit erhebliche Herausforderungen mit sich, allen Anforderungen, wie etwa Witterungsschutz, thermischem Komfort oder Erscheinungsbild, gerecht zu werden. Diesen Herausforderungen steht ein hohes Potenzial, Fassaden sowohl zur Einsparung als auch zur Produktion von Energie einzusetzen, gegenüber. Besonders in gemäßigten Klimazonen schwanken Klimaelemente im Jahresgang sehr stark, wodurch sich die Anforderung an Fassaden ergibt, ihre bauphysikalischen Eigenschaften dem Außenklima dynamisch anzupassen. So werden seit Jahrzehnten beispielsweise Doppelfassaden zur Optimierung des saisonalen Wärmeschutzes eingesetzt.

In der vorliegenden Arbeit werden numerische 2D-Strömungssimulationen (CFD) an einem idealisierten Fassadenelement durchgeführt. Die Parameterstudie geht von vier verschiedenen Außenklimata aus, welche je einen sonnigen und bedeckten Winter- und Sommertag repräsentieren. Veränderbare Parameter sind die Lage der Verschattung im Fassadenzwischenraum, deren Öffnungswinkel, ob die Fassade als Puffer- oder 2.-Haut-Fassade fungiert und zuletzt die Höhe über welche der thermische Auftrieb wirkt (ein oder zwei Fassadenelemente). Die Arbeit zeigt, welche Fassadenkonfiguration hinsichtlich der passiven Solarenergienutzung (Wärmestrom in den Innenraum) bzw. hinsichtlich der aktiven Solarenergienutzung (max. Erwärmung im Fassadenzwischenraum zum effizienten Betrieb von Wärmeübertragern) die tauglichsten sind.

Eine optimale, passive Nutzung ist an den Sommertagen durch geschlossene Lamellen nahe an der Außenverglasung und an Wintertagen durch geöffnete Lamellen nahe an der Isolierverglasung gegeben. Hinsichtlich der aktiven Solarenergienutzung zeigt eine schräge Anordnung des Sonnenschutzes (unten nahe an der Isolierverglasung; oben nahe an der Außenverglasung) unabhängig von dem Öffnungswinkel der einzelnen Lamelle die vielversprechendsten Ergebnisse. Darüber hinaus ist kaum Veränderung hinsichtlich der passiven Solarenergienutzung zwischen Konfigurationen, welche sich nur durch die Auftriebshöhe unterscheiden, bemerkbar. Die aktive Solarenergienutzung wird durch das Hinzufügen eines zweiten Fassadenelementes und den daraus resultierenden größeren Auftriebshöhen stets verbessert.

Schlüsselwörter: Klimaadaptive Fassade, Doppelfassade, 2.-Haut-Fassade, Pufferfassade, Fassadenelemente, CFD, aktive und passive Solarenergienutzung

Abstract

The facade occupies the biggest part of a building's envelope. Thus, it faces a major challenge to fulfil requirements such as weather protection, thermal comfort or visual appearance. Facades, however, also offer a great potential to save and produce energy. Especially in temperate climate zones climatic factors are fluctuating strongly between the hot and cold months. This is the reason why facades should be able to adapt their physical properties according to the outdoor climate. In fact, Double-Skin-Facades (DSF) have been used for decades to optimize the seasonal thermal protection.

The purpose of this thesis is to conduct numerical 2D fluid dynamics simulations (CFD) for an idealized facade element. The parametric study is based on four different outdoor climates: a cloudy and a sunny winter's and summer's day. Further dynamic parameters are the position of the shading device (blinds), its inclination angle, if the facade acts as buffer- or multi-storey-facade and the height over which the chimney effect operates (one or two elements). The aim of this thesis is to determine and contrast which configuration is most suitable for passive solar energy utilization (heat flux into the room) and which one for active utilization (max. temperature increase in the cavity for an efficient operation of heat exchangers).

Closed blinds close to the outer single glazing achieve the best passive solar energy utilization on summer days. On winter days, open blinds close to the inner double glazing reach the optimum. Regarding the active solar energy utilization, the best configuration is a tilted one where the shading device is close to the double glazing at the bottom and close to the outer single glazing at the top. Moreover, there is no dependency on the inclination angle or the outdoor climate. Besides, there is hardly any change in the passive solar utilization in configurations recognizable in which the height of the solar chimney (one or two elements) is the only different parameter. The active solar utilization is enhanced through the arrangement of a second element and the thereby resulting greater buoyancy height.

Keywords: Climate adaptive facade, double-skin facade, multi-storey double-skin facade, buffer facade, facade elements, CFD, active and passive solar energy utilization

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Methodik	3
1.4	Aufbau der Masterarbeit	4
2	Klimaadaptive Fassaden	6
2.1	Allgemeine Anforderungen an Fassaden	6
2.2	Definition	8
2.3	Analyse	9
2.3.1	Grad der Anpassung	11
2.3.2	Steuerung	11
2.3.3	Zeithorizont	12
2.3.4	Effekte der Anpassung	13
2.3.5	Inspirationspool	14
2.3.6	Dimension der Anpassung	14
3	Doppelschalige Fassaden	15
3.1	Klassifizierung nach der geometrischen Unterteilung des Fassadenzwischenraums	15
3.1.1	Kastenfensterfassade	16
3.1.2	Schacht-Kasten-Fassade	17
3.1.3	Korridorfassade	18
3.1.4	Mehrgeschossfassade bzw. Zweite-Haut-Fassade	19
3.2	Klassifizierung nach Lüftungskonzept	20
3.3	Klimaelemente und Klimafaktoren	21
3.3.1	Solarstrahlung und Breitengrad	22
3.3.2	Lufttemperatur	23
3.3.3	Luftdruck	24
3.3.4	Wind	24
3.3.5	Luftfeuchte	25

3.4	Thermodynamische Grundlagen	25
3.4.1	Wärmeleitung	27
3.4.2	Strahlung	28
3.4.3	Konvektion	32
3.5	Aerophysikalische Grundlagen	35
3.5.1	Ursachen der Strömung	35
3.5.2	Grundgleichungen	37
3.6	Designkriterien	38
3.6.1	Designparameter der Fassade	38
3.6.2	Gebäudeparameter	40
3.6.3	Nebenparameter	41
3.7	Adaptive Attribute	42
4	CFD - Grundlagen	45
4.1	Modellierungsgleichungen	46
4.1.1	Kontinuitätsgleichung	46
4.1.2	Impulsgleichungen	47
4.1.3	Energiegleichung	48
4.1.4	Vereinfachungsmöglichkeiten	49
4.1.5	Turbulenzmodellierung	50
4.1.6	Strahlungsmodellierung	54
4.2	Eigenschaften numerischer Berechnungsverfahren	56
4.3	Diskretisierung	57
4.3.1	Finite-Volumen-Methode	57
4.3.2	Finite-Element-Methode	61
4.3.3	Finite-Differenzen-Methode	62
4.4	Lösungsansätze für komplexe Strömungen	62
4.4.1	Druckbasierte Lösungsalgorithmen	63
4.4.2	Unterrelaxation	64
4.5	Rechengitter	64
4.5.1	Strukturierte Gitter	65
4.5.2	Unstrukturierte Gitter	66
4.5.3	Hybride Gitter	66
4.5.4	Netzverdichtung	66
4.5.5	Rechengitterqualität	67
5	Parameterstudien - Aufbau	69
5.1	Konzeption	69

5.2	Geometrie	70
5.2.1	Sonnenschutz	72
5.3	Randbedingungen	74
5.4	Auswertungsmethodik	75
5.5	Variantenmatrix und symbolische Darstellung	78
6	Parameterstudien - Durchführung	80
6.1	Geometrieerstellung	81
6.2	Vernetzung	85
6.2.1	Vernetzungsstrategie	85
6.2.2	Netzattribute	88
6.2.3	Netzabhängigkeitsstudie	90
6.3	Solver-Setup	93
6.3.1	Turbulenzmodellierung	94
6.3.2	Strahlungsmodellierung	96
6.3.3	Material- und Fluideigenschaften	97
6.3.4	Randbedingungen	100
6.3.5	Solvereinstellungen und numerische Methoden	103
6.4	Strömungsberechnung	104
6.4.1	Konvergenzkriterien und Kontrolle	105
7	Parameterstudien - Ergebnisse und Diskussion	107
7.1	Passive Solarenergienutzung: 2.-Haut-Fassaden	110
7.1.1	Bestkonfigurationen	112
7.1.2	Beeinflussung durch zweites Fassadenelement	113
7.1.3	Weitere Erkenntnisse	117
7.2	Aktive Solarenergienutzung: 2.-Haut-Fassaden	120
7.2.1	Bestkonfigurationen	121
7.2.2	Beeinflussung durch zweites Fassadenelement	122
7.3	Passive Solarenergienutzung: Pufferfassaden	125
7.3.1	Bestkonfigurationen	126
7.3.2	Beeinflussung durch zweites Fassadenelement	129
7.3.3	Weitere Erkenntnisse	132
7.4	Aktive Solarenergienutzung: Pufferfassaden	136
7.4.1	Bestkonfigurationen	137
7.4.2	Beeinflussung durch zweites Fassadenelement	139
7.5	Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung	141
7.5.1	2.-Haut-Fassade	141
7.5.2	Pufferfassade	143

8 Zusammenfassung und Ausblick	144
8.1 Zusammenfassung	144
8.2 Ausblick	146
Literatur	147

Nomenklatur

Auswerteparameter

$T_{i,air}^k$	°C	Flächengemittelte Lufttemperatur
$T_{i,j}^k$	°C	Oberflächentemperatur
ΔT_{1-2}	°C	Lufttemperaturerhöhung zwischen Profil 1 und 2
ΔT_{1-4}	°C	Lufttemperaturerhöhung zwischen Profil 1 und 4
T_{in}^k	°C	Flächengemittelte Lufttemperatur am Lufteintritt
T_{out}^k	°C	Flächengemittelte Lufttemperatur am Luftaustritt
v_{in}^k	m/s	Flächengemittelte Geschwindigkeit am Lufteintritt
v_{out}^k	m/s	Flächengemittelte Geschwindigkeit am Luftaustritt
\dot{m}_{in}^k	kg/s	Massenstrom am Lufteintritt
\dot{m}_{out}^k	kg/s	Massenstrom am Luftaustritt
\dot{V}_{in}^k	m ³ /h	Volumenstrom am Lufteintritt
\dot{V}_{out}^k	m ³ /h	Volumenstrom am Luftaustritt
Q_{tot}^k	W/m ²	Totaler Energieeintrag in den Innenraum
Q_{rad}^k	W/m ²	Strahlungsenergieeintrag in den Innenraum
Q_{conv}^k	W/m ²	Konvektiver Energieeintrag in den Innenraum

Indizes

i	Auswertequerschnitt (1 bis 4)
j	Lage am jeweiligen Querschnitt
	1 Außenverglasung außen
	2 Außenverglasung innen
	3 Lamelle
	4 Isolierverglasung außen
	5 Isolierverglasung innen
k	Anzahl der Fassadenelemente
	1 ein Fassadenelement
	2 zwei Fassadenelemente

Sonstige Kenngrößen

T_0	°C	Bezugs- und Außentemperatur
T_{int}	°C	Innentemperatur
T_w	°C	Wandtemperatur

T_b	$^{\circ}\text{C}$	„Bulk“-Temperatur
ρ_0	kg/m^3	Luftdichte bei Bezugstemperatur
ρ	kg/m^3	Festkörperdichte
β	$1/\text{K}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
c_p	J/kgK	Wärmekapazität
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	W/m^2	Wärmestromdichte
\dot{e}_q	W/m^3	Wärmequellendichte
U	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
R_{si}	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	Wärmeübergangswiderstand innen
R_{se}	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	Wärmeübergangswiderstand außen
A	m^2	Fläche
d	m	Schichtdicke
φ	$\%$	Relative Luftfeuchtigkeit
p_A	Pa	Partialdampfdruck
p_S	Pa	Sättigungsdampfdruck
L	m	charakteristische Länge
h_{ext}	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Wärmeübergangskoeffizient außen
h_{int}	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Wärmeübergangskoeffizient innen
α_K	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
ν	m^2/s	Kinematische Viskosität
μ	Ns/m^2	Dynamische Viskosität
Ra	-	Rayleigh-Zahl
Nu	-	Nusselt-Zahl
Gr	-	Grashof-Zahl
Pr	-	Prandtl-Zahl
Re	-	Reynolds-Zahl
I	W/m^2	Strahlungsintensität
Z	$^{\circ}$	Zenit-Winkel
λ	μm	Wellenlänge
σ	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$E_S(T)$	W/m^2	Leistungsstrahlungsdichte
$E_{S,\lambda}(T)$	$\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$	Leistungsstrahlungsdichte pro Wellenlänge
A	$1/\text{m}$	Absorptionskoeffizient
RI	-	Brechungsindex
ϵ	-	Emissionsgrad

α	-	Absorptionsgrad
τ	-	Transmissionsgrad
ρ	-	Reflexionsgrad

Abkürzungen

CFD	Computational fluid dynamics
FZR	Fassadenzwischenraum
BC	Boundary Conditions (Randbedingungen)
KV	Kontrollvolumen
FDM	Finite-Differenz-Methode
FEM	Finite-Element-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode

1 Einleitung

Im einleitenden Kapitel wird die Ausgangssituation des behandelnden Themenschwerpunkts beschrieben, woraus sich die Motivation zur Durchführung der Arbeit ableiten lässt. Es werden Zielsetzungen der Arbeit definiert und das methodische Vorgehen, mit welchem diese Zielsetzungen erreicht werden, angeführt. Abgeschlossen wird die Einleitung durch kurze Beschreibungen der Themenschwerpunkte, welche innerhalb der einzelnen Kapitel bearbeitet werden.

1.1 Motivation und Ausgangslage

Nach Erhebungen der europäischen Kommission ist der Gebäudesektor für etwa 40 % des Gesamtenergieverbrauchs sowie für rund 36 % des gesamten CO₂-Ausstoßes innerhalb der Europäischen Union verantwortlich. Verbindliche Rechtsvorschriften sind die Folge dieser verheerenden Zahlen - so führt die Europäische Union die sogenannten 20-20-20 Ziele ein, welche definieren, dass die Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2020 folgende Ziele erreichen [13]:

- 20 % der Energie muss aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden.
- Treibhausgasemissionen müssen im Vergleich zu den CO₂-Emissionen im Jahr 1990 um 20 % gesenkt werden.
- Die Gesamtenergieeffizienz muss um 20 % verbessert werden.

Die Fassade nimmt den größten Flächenanteil von Gebäudehüllen in Anspruch und stellt zugleich die Schnittstelle zwischen den konditionierten Innenräumen und dem unkontrollierten Außenklima dar. Es liegt auf der Hand, dass die Fassade maßgeblich den Energiehaushalt des Gebäudes sowie Komfortparameter im Innenraum beeinflusst. Folglich bringt die Fassade große Herausforderungen mit sich, den vielschichtigen Anforderungen, wie etwa Erscheinungsbild, Witterungsschutz, thermischer und hygienischer Komfort, passive und aktive Solarenergie-nutzung uvm., gerecht zu werden. Diesen vielschichtigen Anforderungen steht ein hohes Potenzial, Fassaden sowohl zur Einsparung als auch zur Produktion von Energie einzusetzen, gegenüber.

Bauphysikalische Kenngrößen einer Fassade werden zumeist statisch betrachtet, obwohl das Außenklima eine dynamische Größe ist. Das führt dazu, dass Parameter, wie etwa der Wärmedurchgangskoeffizient oder der Energiedurchlassgrad, über den gesamten Nutzungszeitraum konstant sind. Beispielsweise ist ein hoher Energiedurchlassgrad während der Heizperiode zur passiven Solarenergienutzung sinnvoll, während er allerdings in den Sommermonaten zur unerwünschten Überhitzung der Innenräume beiträgt. Mit einem innovativen Lösungsansatz, den sogenannten **adaptiven Fassadensystemen** oder auch **klimaadaptiven Fassaden** wurde in den vergangenen Jahren vermehrt auf diese Problematik eingegangen. Diese Fassaden sind in der Lage ihre Eigenschaften, wie etwa die Lichttransmission oder das Dämmverhalten an ständig variierende, klimatische Außenbedingungen (im Tages- und Jahresgang) wie auch an Nutzeranforderungen optimal anzupassen.

Besonders in gemäßigten Klimazonen schwanken Klimafaktoren zwischen den warmen und kalten Monaten sehr stark, wodurch dem sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz ein hoher Stellenwert zugeordnet werden muss. Vor allem bei Doppelfassaden, deren Haupt-Anwendungsgrund zwar ein optimaler Schallschutz ist, kann durch Adaptivität diverser Parameter der saisonale Wärmeschutz verbessert werden. So können beispielsweise Öffnungen in der Außenverglasung, über welche der Luftein- und austritt erfolgt, geschlossen werden, womit ein thermischer Puffer entsteht. Dieser hat zur Folge, dass Transmissionswärmeverluste in der Heizperiode gesenkt werden können. In den Sommermonaten andererseits, kann die im Fassadenzwischenraum entstehende Wärme durch die Öffnungen effektiv abgeführt werden, was sogar eine Fensterlüftung ermöglichen kann. Eine passive Solarenergienutzung ist in den Wintermonaten erwünscht, während im Sommer passive Einträge in den Raum zu vermeiden sind. Auch die aktive Solarenergienutzung, beispielsweise durch die Übertragung der ohnehin entstehenden Wärme im Fassadenzwischenraum (zum Beispiel durch Wärmeübertrager oder Abluftwärmepumpen) ist eine zielführende Strategie zur Entwicklung eines adaptiven Fassadensystems.

Doppelfassaden sind in ihrer Wirkungsweise sehr komplex und ihr Strömungsverhalten ist mit der daraus folgenden konvektiven Wärmeübertragung im Fassadenzwischenraum sowie den Energieeinträgen (oder Verlusten) in den Raum, welche sich aus allen Wärmetransportmechanismen zusammensetzen, kaum vorhersehbar. Oft kommt es sogar vor, dass Doppelfassaden den definierten Anforderungen nicht gerecht werden und die Innenräume bei geringster solarer Belastung bereits überhitzen. Mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) können das aerophysikalische Verhalten, sowie die entstehenden Energietransportmechanismen simuliert und kritisch bewertet werden. Unerwünschte Auswirkungen während der Nutzung, wie etwa Überhitzung der Innenräume oder hohe Transmissionswärmeverluste, können somit in einem frühen Stadium der Planung bereits ausgeschlossen werden. Daher sollte die Analyse des Strömungsverhaltens und des Wärmetransportes mittels numerischer Simulation einen festen Bestandteil der Fassadenplanung darstellen.

1.2 Zielsetzung

Themenschwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die numerische Strömungssimulation (CFD) von Luftströmungen innerhalb und außerhalb eines adaptiven (idealisierten¹) Fassadenelements. Dieses Fassadenelement wird dabei sinngemäß als Doppelfassade ausgeführt. Ziele, nach welchen in der vorliegenden Arbeit gestrebt wird, sind:

- eine Erweiterung des bereits bestehenden Know-Hows auf dem Gebiet der klimaadaptiven Fassaden (insbesondere der Doppelfassaden)
- Grundkenntnisse im Bereich der numerischen Strömungsmechanik, speziell angewandt auf aerophysikalische Problemstellungen gewinnen
- numerische Strömungsberechnungen an Fassadenelementen mit diversen dynamischen Parametern durchführen, um daraus Erkenntnisse (Bestkonfigurationen) zu generieren, welche Fassadenkonfiguration unter welcher klimatischer Außenbedingung die besten Ergebnisse hinsichtlich aktiver und auch passiver Solarenergienutzung liefert
- Gegenüberstellungen der besten Ergebnisse zur aktiven Solarenergienutzung mit den besten Ergebnissen der passiven Solarenergienutzung durchführen
- die Erstellung von „Wenn-Dann“-Beziehungen für beide Hauptauswerteparametern (aktive und passive Solarenergienutzung)
- Gewinnung von Erkenntnissen, wie sich Simulationsergebnisse durch Erhöhung (Verdoppelung durch Anordnung eines zweiten Fassadenelements über dem unteren) der thermischen Auftriebshöhe verändern

1.3 Methodik

Um die in Kapitel 1.2 definierten Ziele zu erreichen, wird wie folgt vorgegangen:

- Aufbereitung theoretischer Grundlagen auf dem Gebiet klimaadaptiver Fassaden, wobei eine Fokussierung auf Doppelfassaden sowie auf die Anpassung zur Optimierung des saisonalen Wärmeschutzes erfolgt. Des Weiteren werden Grundlagen der numerischen

¹ Dem Fassadenelement wird die Eigenschaft idealisiert zugeordnet, weil auf eine bautechnische Umsetzbarkeit im Zuge vorliegender Arbeit nicht genauer eingegangen wird. Für die angenommenen und simulierten Anpassungen gibt es nach jetzigem Stand der Technik noch keine bautechnische Umsetzung. Jedoch wurden Möglichkeiten zur baulichen Realisierung immer im Gedanken behalten. Somit wird eine bautechnische Umsetzung des betrachteten Fassadenelements aus Sicht des Verfassers als durchaus realistisch eingeschätzt.

Darüber hinaus stellt die Auslegung und Bewertung des Nutzens der Komponenten der aktiven Solarenergienutzung ein Nicht-Ziel dieser Arbeit dar. Es soll im Zuge dieser Arbeit lediglich festgestellt werden, welche Fassadenkonfiguration die besten Voraussetzungen für solch eine aktive Solarenergienutzung bietet.

Strömungsmechanik theoretisch aufbereitet. Dieser methodische Schritt wird mittels Literaturrecherchen durchgeführt.

- Durchführung von Parameterstudien an einem bzw. zwei Fassadenelementen, zur Verifizierung von Bestkonfigurationen. Dynamische Parameter sind dabei die Fassadenhöhe (ein oder zwei Elemente), die Wirkungsweise (2.-Haut-Fassade oder Pufferfassade), die Lage des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum (fünf verschiedene Lagen), der Öffnungswinkel der Einzellamelle (drei verschiedene Winkel) sowie das Außenklima (vier Simulationstage: zwei im Sommer, zwei im Winter mit je hoher und geringer solarer Belastung).
- Diskussion sowie Formulierung weiterführender Forschungsthemen anhand der erzielten Ergebnisse

1.4 Aufbau der Masterarbeit

Kapitel 2: Klimaadaptive Fassaden

Die Unerlässlichkeit von klimaadaptiven Fassaden ergibt sich daraus, dass sich Anforderungen, welche an Fassaden gestellt werden über mehrere Zeitskalen verändern. Beispielsweise verändern sich außenklimatische Bedingungen sowohl im Tages- als auch im Jahresgang, weshalb Fassaden in der Lage sein sollten die daraus entstehenden, unterschiedlichen Anforderungen zu erfüllen. Im Kapitel 2 soll genauer verdeutlicht werden, weshalb sich die Notwendigkeit der Anwendung klimaadaptiver Fassaden ergibt. Darüber hinaus erfolgt eine Definition und Analyse diverser Aspekte klimaadaptiver Fassaden.

Kapitel 3: Doppelschalige Fassaden

Doppelfassaden werden bereits seit Jahrzehnten eingesetzt, um vor allem den Schallschutz zu verbessern bzw. bei sehr hohen Gebäuden die Möglichkeit auszunutzen den Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum anzuordnen und ihn dadurch vor Windbelastung zu schützen. Dabei wird häufig vergessen, dass auch der saisonale Wärmeschutz durch diverse Anpassungen positiv beeinflusst werden kann. Daher soll in diesem Kapitel, nach einer Klassifizierung von Doppelfassadensystemen besonders auf thermodynamische und aerophysikalische Grundlagen eingegangen werden, um die komplexe Wirkungsweise von Doppelfassaden zu veranschaulichen.

Kapitel 4: CFD - Grundlagen

Das Strömungsverhalten von Doppelfassaden kann kaum vorhergesagt werden. Durch numerische Strömungssimulationen (CFD) ist es aber möglich Luftströmungen und dadurch den Energietransport innerhalb der Fassade abzubilden. Da im Gebiet der Fassadenplanung solch Betrachtungen aktuell eine Herausforderung darstellen, werden in Kapitel 4 die Grundlagen

der numerischen Strömungssimulation aufgezeigt. Vor allem die Diskretisierung mittels FVM (Finite-Volumen-Methode), sowie die zugrundeliegenden Modellierungsgleichungen werden detaillierter betrachtet.

Kapitel 5: Parameterstudien - Aufbau

Um die Zielsetzungen dieser Arbeit zu erreichen werden Parameterstudien durchgeführt. Innerhalb des Kapitels „Parameterstudien - Aufbau“ werden alle statischen und veränderbaren Randbedingungen definiert. Darüber hinaus werden die Geometrie des Fassadenelements sowie die Auswertemethodik vorgestellt.

Kapitel 6: Parameterstudien - Durchführung

Die Durchführung der Parameterstudien richtet sich nach dem Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung. Hierzu wird zunächst die Geometrieerstellung sowie die Erzeugung der Rechengitter beschrieben. Darauffolgend werden numerische Modelle sowie Solvareinstellungen, welche im Zuge der Strömungsberechnung eingesetzt werden, vorgestellt. Schlussendlich wird das Konvergenzverhalten der Simulationen beschrieben.

Kapitel 7: Parameterstudien - Ergebnisse und Diskussion

Im vorletzten Kapitel dieser Arbeit wird ein großer Teil des sogenannten Post-Processing numerischer Simulationen vorgestellt. Hierzu werden Ergebnisse ausgewertet, Diagramme sowie Colourplots erstellt. Die Ergebnisse werden dabei so aufbereitet, dass aktive und passive Solarenergienutzung im Fokus stehen. Für jedes Außenklima werden Empfehlungen hinsichtlich aller dynamischer Parameter angeführt.

Kapitel 8: Zusammenfassung und Ausblick

Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit durch eine Zusammenfassung der durchgeführten Parameterstudien sowie der erzielten Ergebnisse. Darüber hinaus wird ein Ausblick über Bereiche, in welchen weiterer Forschungsbedarf vorhanden ist, formuliert.

Anhang:

Im Anhang sind die Variantenmatrizen aller Auswerteparameter zusammengestellt.

2 Klimaadaptive Fassaden

Wie einleitend bereits dargestellt, entsteht aufgrund innerhalb verschiedener Zeitskalen variierender Außenbedingungen und auch veränderlicher Nutzeranforderungen die Anforderung der Adaptivität von Fassaden. Die Forderung von Adaptivität kann leicht durch Betrachtung der allgemeinen Fassadenanforderungen, welche mehrfach in der Literatur beschrieben werden, sichtbar gemacht werden. Daher wird im vorliegenden Kapitel zunächst auf allgemeine Anforderungen eingegangen, um zu analysieren, weshalb adaptive Fassadensysteme vorteilhaft sind. Darüber hinaus erfolgt eine detaillierte Analyse, welche Attribute klimaadaptive Fassaden aufweisen.

2.1 Allgemeine Anforderungen an Fassaden

Fassaden dienen als Schnittstelle zwischen dem unkontrollierten Außenklima und den konditionierten Innenräumen. Oft wird die Fassade daher als Hülle oder auch Haut bezeichnet, weil sie sowohl externen klimatischen Einflüssen als auch internen Beanspruchungen ausgesetzt ist. In Abbildung 2.1, welche sich nach der Darstellung von Herzog et al. [29] richtet, sind schematisch die externen Beanspruchungen links, die internen Einflüsse rechts sowie die Funktionen bzw. Anforderungen von Fassaden mittig dargestellt.

Außenbedingungen, wie etwa Temperaturen, Windgeschwindigkeiten, Niederschlagsmengen und vor allem solare Strahlung sind für jeden Standort spezifisch und müssen daher in der Fassadenplanung berücksichtigt werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Sonne, welche den wichtigsten direkten und auch indirekten Energielieferanten darstellt. Diese Klimaelemente, welche in Kapitel 3.3 noch detaillierter beschrieben werden, sind im Laufe des Tages bzw. auch im Jahresverlauf stark veränderlich. Die Berücksichtigung dieser veränderlichen Außenbedingungen des Makroklimas, sowie untergeordnet auch die Berücksichtigung von variierender Mikroklimata (Lärm-, Staub-, Geruchsbelästigung in unmittelbarer Nähe) stellen die Grundlage innerhalb des Planungsprozesses klimaadaptiver Fassadensysteme dar [29].

Die internen Einflüsse auf Fassaden bzw. die Anforderungen an das Innenklima ergeben sich aus der definierten Gebäudenutzung und sind dabei im Vergleich zu den externen Einflüssen

nur geringfügigen Schwankungsbreiten ausgesetzt. Ob die Anforderungen, welche Nutzer an das Innenklima stellen erreicht werden können, wird zumeist mit dem Begriff der Behaglichkeit definiert. Neben den allgemeinen Nutzeranforderungen (thermische, visuelle, hygienische und akustische Anforderungen) kann sich unter Umständen auch das Erfordernis spezieller Maßnahmen, wie etwa einem erhöhten Einbruchsschutz ergeben [29].

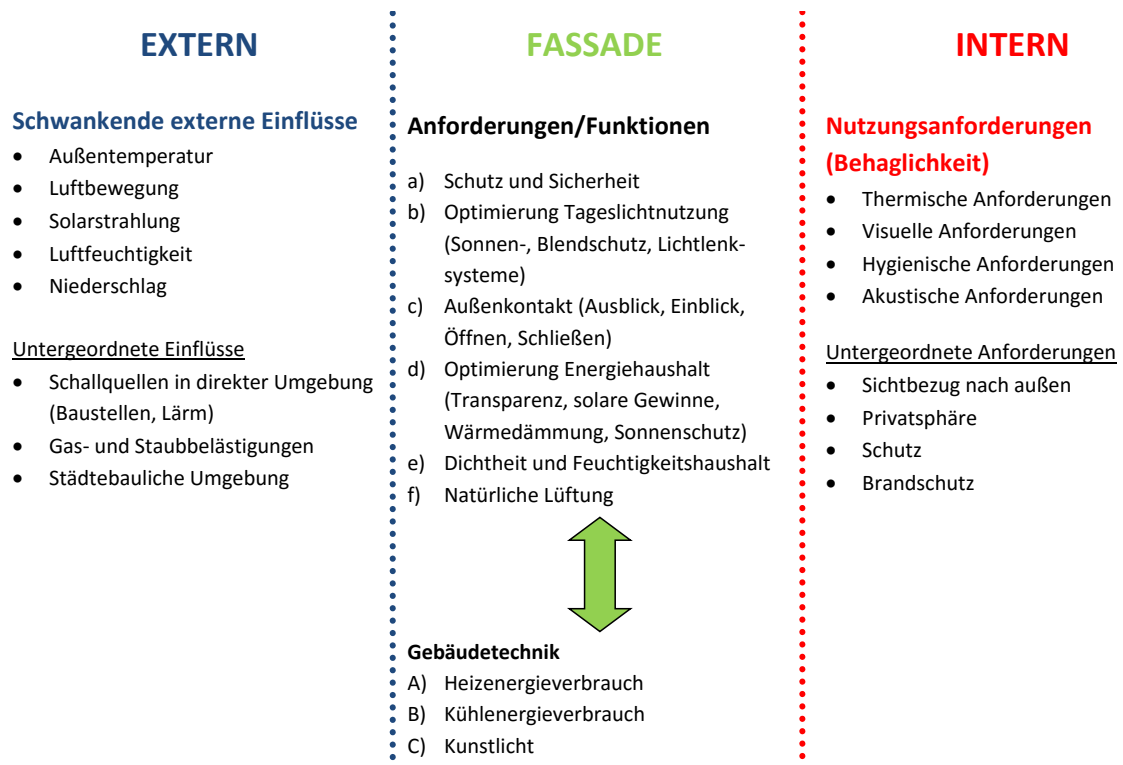


Abbildung 2.1: Externe und interne Beanspruchungen auf Fassaden sowie deren Anforderungen bzw. Funktionen

Knaack et al. [37] gliedern die Anforderungen um ein behagliches Raumklima zu erreichen in vier Kategorien:

1. Thermische Behaglichkeit:

Die Temperatur der Raumumschließungsflächen, welche durch die Fassade stark beeinflusst wird, ist ein wichtiger Indikator zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit. Genauer bedeutet dies, dass Temperaturen der Begrenzungsflächen von Räumen nicht zu unterschiedlich sein sollten und keine große Differenzen zur Raumlufttemperatur aufweisen sollten, da dies vom Nutzer als unbehaglich empfunden wird. Weitere Kriterien zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit sind die Lufttemperatur und -geschwindigkeit.

2. Visuelle Behaglichkeit:

Der wohl wichtigste Aspekt der visuellen Behaglichkeit ist, dass der Innenraum mit genügend natürlichem Sonnenlicht versorgt wird, da der Stoffwechsel des Menschen Sonnenstrahlung benötigt. Dem gegenüber steht die Gefahr durch Überhitzung des Innenraums sowie der Blendung.

3. Hygienische Behaglichkeit:

Ein ausreichender Luftwechsel ist zum Erreichen der hygienischen Behaglichkeit unabdingbar. Oft werden hierfür natürliche Lüftungskonzepte innerhalb der Fassade gegenüber Klimaanlage bzw. Lüftern vom Nutzer bevorzugt.

4. Akustische Behaglichkeit:

Die akustische Behaglichkeit wird zum einen von Lärmquellen außerhalb des Gebäudes (Verkehr, Baustellen etc.), sowie von Schallquellen innerhalb des Gebäudes (Telefonie, Trittschall etc.) beeinflusst. Vor allem die Ausbreitung von Luftschall muss durch die Fassade eingeschränkt werden.

Wie in Abbildung 2.1 mittig dargestellt und bereits kurz in den Aufzählungen angedeutet, können Fassaden die Behaglichkeit durch mehrere Funktionen regulieren. Die Optimierung der Tageslichtnutzung kann dabei mit diversen Sonnen- und Blendschutzvorrichtungen erzielt werden. Dabei ist offensichtlich, dass hiermit nicht nur visuelle Behaglichkeit erzielt werden kann, sondern auch thermische. Im Sommer können bspw. durch adaptive Abschattung solare Energieeinträge und somit auch die Überhitzung des Innenraums vermieden werden. Es ist demnach eine starke Beeinflussung zwischen der Tageslichtnutzung und dem Energiehaushalt des Gebäudes erkennbar. Hygienische Anforderungen können vor allem durch Lüften über in der Fassade integrierte Fenster oder durch Fugenlüftung erfolgen. Auch die Funktion der maschinellen Lüftung kann in die Fassadenebene verlagert werden. Daneben können Fassaden noch eine Vielzahl weiterer Funktionen übernehmen bzw. Anforderungen erfüllen [37].

Es kann festgestellt werden, dass je besser die Anpassungsfähigkeit von Fassadenfunktionen an variierende Außenbedingungen ist, umso eher wird ein behagliches Innenklima erreicht. Ist die Anpassung weniger zufriedenstellend müssen die Nutzeranforderungen durch Anwendung gebäude-technischer Elemente erfüllt werden. Daraus folgen steigende Verbräuche von Heiz- und Kühlenergie sowie von Kunstlicht.

2.2 Definition

Loonen et al. [41] definieren klimaadaptive Fassaden vom englischen ins deutsche übersetzt wie folgt:

„Eine klimaadaptive Gebäudehülle hat die Fähigkeit einige ihrer Funktionen, Besonderheiten oder ihr Verhalten wiederholt und reversibel als Antwort auf über die Zeit variierende Anforderungen und variable Randbedingungen, mit dem Ziel die gesamte Gebäude-Performance zu verbessern, zu verändern.“¹

¹[41] S. 485

Es gibt einige Definitionen sowie ähnliche Bezeichnungen für das Konzept der anpassungsfähigen Fassade. Unter dieser Vielfalt erscheint dem Verfasser jene Beschreibung von Loonen et al. [41], die bereits wiedergegeben wurde, am passendsten. Weitere Attribute mit denen klimaadaptive Fassaden häufig belegt werden sind beispielsweise aktiv, fortschrittlich, dynamisch, intelligent, interaktiv, kinetisch, ansprechbar, smart, schaltbar uvm. Oft haben all diese Begriffe eine leicht unterschiedliche Bedeutung, werden nur für den Einzelfall verwendet oder sind gegebenenfalls sogar durch andere beschreibende Attribute austauschbar [41].

2.3 Analyse

In Abbildung 2.2 sind alle Attribute klimaadaptiver Fassaden, welche im Zuge der Literaturrecherche analysiert wurden, grafisch abgebildet. Die Aspekte sind dabei alle innerhalb eines sogenannten Deming-Zyklus (auch PDCA-Zyklus, Deming-Kreis oder Plan-Do-Check-Act-Zyklus genannt) dargestellt. Der Grundgedanke, auf welchem der Zyklus basiert, stammt ursprünglich aus dem Qualitätsmanagement und zielt auf eine ständige Prozessoptimierung ab. So werden in der Plan-Phase Probleme erkannt und Lösungsmaßnahmen entworfen. Im Zuge der Do-Phase werden zuvor geplante Maßnahmen umgesetzt. Innerhalb der Check-Phase erfolgt die Überprüfung, ob die gesetzten Maßnahmen den gewünschten Erfolg gebracht haben. Darauffolgend findet eine Standardisierung von erfolgreichen Lösungsmaßnahmen innerhalb der Act-Phase statt, welche ab sofort als Grundlage für weitere Verbesserungen dient [10].

Aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit kann eine eindeutige Analogie zwischen der Optimierung von Prozessen nach dem Deming-Zyklus und dem ständigen Drang nach Optimierung von Behaglichkeitskriterien und Energieverbräuchen durch klimaadaptive Fassaden erkannt werden. So werden beispielsweise innerhalb der Plan-Phase Abweichungen zwischen Soll- und Istzustand bestimmt. Diese Erkennung erfolgt mittels sensorischer Einrichtungen, wie zum Beispiel Temperatursensoren. Weiters findet in dieser Phase die Planung, wie der Sollzustand wieder erreicht werden kann, statt. Ist beispielsweise die Lufttemperatur in einem Raum durch solare Gewinne zu hoch, so könnten Lösungsmaßnahmen unter anderem die geometrische Optimierung einer Sonnenschutzvorrichtung umfassen. Die Umsetzung der geplanten geometrischen Optimierung des Sonnenschutzes erfolgt dann in der Do-Phase, wo dessen Position zumeist mit Aktoren in verschiedensten Ausführungsmöglichkeiten verändert wird. Ein erneuter Vergleich des Soll- mit dem Istzustand ist der nächste Schritt, welcher in der Check-Phase durchgeführt wird. Dabei muss jedoch für das vorliegende Beispiel darauf geachtet werden, dass dieser Vergleich nicht sofort nach der Do-Phase erfolgt. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Lufttemperatur durch die gesetzte Maßnahme gewiss nicht unmittelbar die Solltemperatur erreicht. War diese Maßnahme erfolgreich, so wird sie zum Beispiel in einem Speicher innerhalb der Steuerung vermerkt und als Standardisierung eingesetzt, um

ähnlichen Problemstellungen unverzüglich entgegen zu wirken, beziehungsweise dafür zu sorgen, dass solche Abweichungen vom Sollwert erst gar nicht mehr auftreten. Das genannte Beispiel ist hierbei nur eines von vielen, welches zeigt, dass die gewählte Darstellung aller Attribute klimaadaptiver Fassaden innerhalb des Deming-Kreises sinnvoll ist.

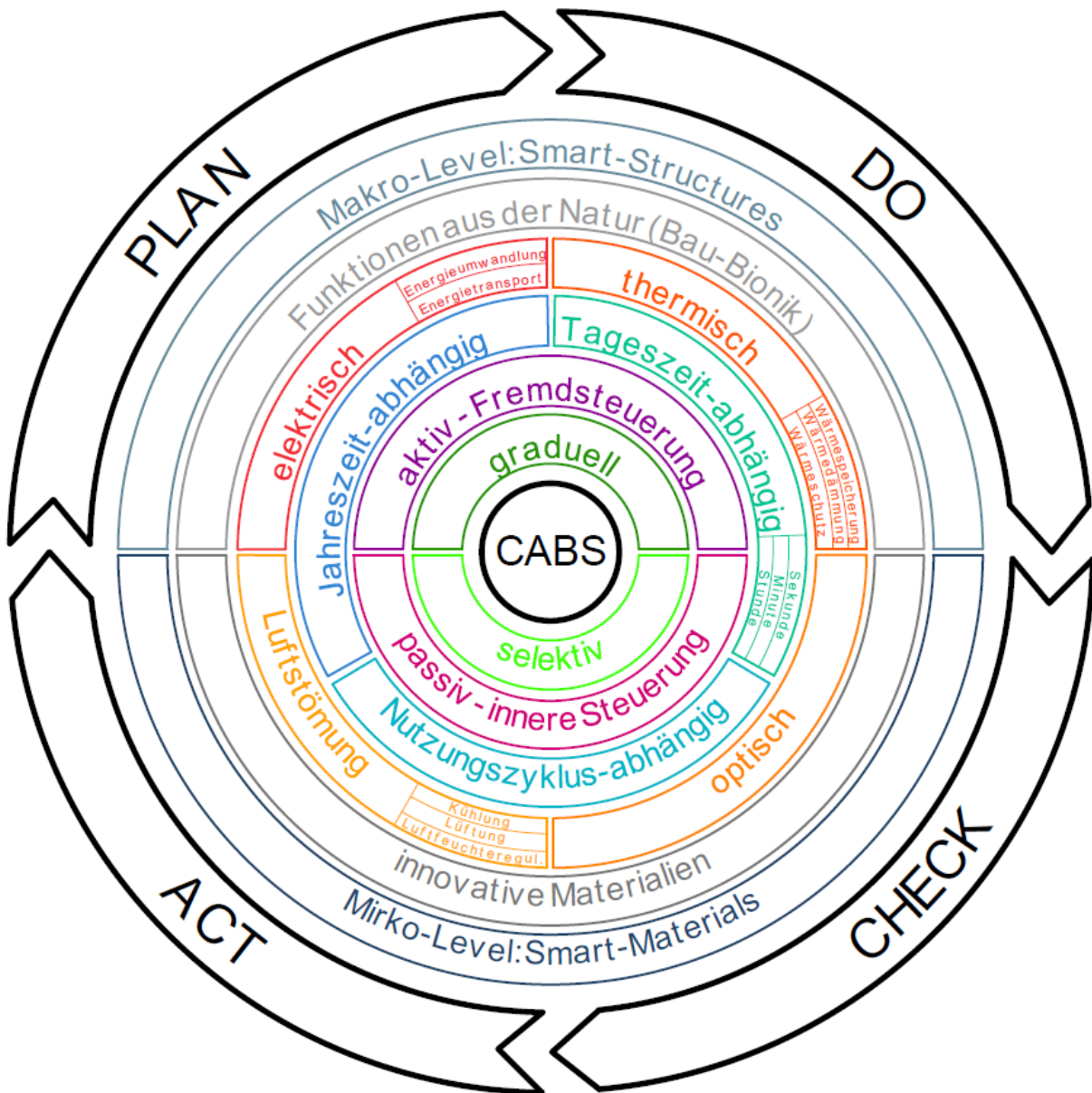


Abbildung 2.2: Analyse klimaadaptiver Fassaden: Attribute innerhalb des Deming-Zyklus

In den nachfolgenden Kapiteln werden alle analysierten Aspekte kurz erläutert. Die Reihenfolge der Beschreibung richtet sich dabei nach Abbildung 2.2, beginnend mit dem innersten Aspekt (Grad der Anpassung) und endend mit dem äußersten Aspekt (Dimension der Anpassung). Die Bezeichnung CABS im innersten Kreis von Abbildung 2.2 ist dabei von Loonen [40] übernommen und steht für Climate Adaptive Building Shells (klimaadaptive Gebäudehüllen).

2.3.1 Grad der Anpassung

Für den Grad der Anpassung klimaadaptiver Fassaden können prinzipiell zwei verschiedene Aspekte festgestellt werden. **Graduelle Adaptivität** bedeutet, dass eine stufenlose Anpassung im Gegensatz zu den binären Betriebszuständen („Ein“ und „Aus“) ermöglicht wird. Fassaden, welche **selektiv** anpassbar sind, weisen die Fähigkeit auf, dass sich nur bestimmte Bereiche der Fassade aufgrund einer Anforderung anpassen. Dies ist vor allem bedeutsam, wenn innere oder äußere Beanspruchungen (z.B. Wolkenbildung) innerhalb gewisser Fassadenbereiche verschieden ausgeprägte Intensitäten aufweisen [9].

2.3.2 Steuerung

Die Steuerung, also die Fähigkeit auf bestimmte Anforderungen selbstregulierend Anpassungen vorzunehmen, kann auf zwei Arten erfolgen. Die Erste wird zumeist als **aktive-, extrinsische- oder Fremdsteuerung** bezeichnet. Die Anpassung von Eigenschaften einer aktiv gesteuerten Fassade wird durch ein übergeordnetes System (Steuerung oder Regelung) angeregt. Ein großer Vorteil aktiv gesteuerter Systeme ist, dass die Regelgröße (z.B. eine Temperatur der UV-Strahlung) ständig mit der Sollgröße verglichen werden kann. Liegen Abweichungen zwischen diesen beiden Größen vor, so kann darauf unmittelbar mit einer Anpassung reagiert werden. Komponenten aktiver Steuerungen sind Sensoren, Aktoren sowie Regler (Prozessoren). Die Anpassung selbst wird mittels Aktoren, welche beispielsweise Stellmotoren, pneumatische, formverändernde oder piezoelektrische Bauteile sein können, ausgeführt. Sensoren stellen hingegen die Bauteile dar, welche eine Einflussgröße (UV-Strahlung, Temperatur, Verformung, etc.) digital wiedergeben [9][41].

Die zweite Art der Steuerung ist die sogenannte **passive-, innere- oder intrinsische Steuerung**. Klimaadaptive Fassaden mit innerer Steuerung sind selbstadaptiv, da ihr anpassungsfähiges Verhalten direkt von Umweltfaktoren (Temperatur, UV-Strahlung, Windgeschwindigkeit etc.) ausgelöst wird. Diese Steuerung kann auch als direkt bezeichnet werden, weil sie keine Komponenten aufweist, die Entscheidungen treffen können und deshalb werden die Auswirkungen der Natur direkt in Aktionen überführt. Klimaadaptive Fassaden mit innerer Steuerung werden auch häufig als **Smart Materials** bezeichnet. Die bedeutsamsten Vorteile klimaadaptiver Fassaden mit passiver Steuerung sind, dass zur Änderung der Konfiguration keine elektrische Energie oder fossile Brennstoffe eingesetzt werden müssen, sowie keine Hardware, wie etwa Sensoren, Aktoren oder Kabel, für ihre Funktion notwendig ist. Die Tatsache, dass diese Steuerung keine manuellen Eingriffe erlaubt, muss jedoch negativ bewertet werden. [41].

2.3.3 Zeithorizont

Fassaden obliegen einer Vielzahl äußerer Einflüsse. Diese Einflüsse treten dabei innerhalb verschiedener Zeithorizonte auf. Die zeitliche Größenordnung der auftretenden Einflüsse reicht dabei von Bruchteilen einer Sekunde bis zu lediglich einem einmaligen Eintreten innerhalb des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Loonen et al. [41] definieren verschiedene Zeithorizonte:

- **Sekunde**

Variierende Außenbedingungen innerhalb dieser Zeitskala sind zufälliger Natur. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Fassaden, die auf Veränderung der Windrichtung oder -geschwindigkeit reagieren.

- **Minute**

Typische äußere Beanspruchung innerhalb dieses Zeithorizontes sind Wolkenbedeckung und daraus folgend Tageslichtnutzung und Abschattung. Daher sollten alle klimaadaptiven Fassaden, welche zur Optimierung der Abschattung oder Tageslichtversorgung (und dadurch zur Reduktion des Energieverbrauchs) eingesetzt werden, ihre Eigenschaften innerhalb von Minuten ändern.

- **Stunde**

Die Bewegung der Erde um die Sonne ist ein kontinuierlicher Prozess. Klimaadaptive Fassaden, welche ihre Eigenschaften aufgrund des Sonnenstandes anpassen, führen diese Adaptionen üblicherweise stündlich durch. Außerdem führen Fassaden, welche ihre Attribute aufgrund innerer oder äußerer Temperaturänderungen festlegen, diese Anpassung in der Regel auch in vorliegender Zeitskala durch.

- **Tag bzw. Nutzungszyklus**

Viele klimaadaptive Fassaden verändern ihre Eigenschaften in Abhängigkeit eines fixen 24 Stunden Pfades. Diese Überlegungen basieren auf gewissen meteorologischen Bedingungen, wie etwa dem Vorhandensein von Solarstrahlung, die einem wiederkehrenden Pfad folgen. Gleichmaßen ist die Anwesenheit von Raumnutzern, vor allem bei Gebäuden mit Büronutzung, immer nur zu bestimmten Zeiten gegeben, wodurch die Anpassung gewisser Eigenschaften der Fassade nach einem täglichen Pfad sinnvoll ist.

- **Jahreszeit**

Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter weichen durch verschiedene Außenbedingungen deutlich voneinander ab. Da diese Veränderungen zwischen den Jahreszeiten in den mittleren bis hohen Breitengraden, also vor allem auch in Mitteleuropa verstärkt auftreten, sind insbesondere klimaadaptive Fassaden, welche ihre Eigenschaften aufgrund der Jahreszeit ändern, wohl das am weitesten verbreitete Anwendungsfeld von intelligenten Fassaden.

2.3.4 Effekte der Anpassung

Da die Gebäudehülle die Schnittstelle zwischen dem unkontrollierten Außenbereich und den konditionierten Innenräumen darstellt, liegt es auf der Hand, dass verschiedene physikalische Prozesse in der Fassadenebene stattfinden. Jede klimaadaptive Fassade beeinflusst das physikalische Verhalten innerhalb der Fassadenebene auf eine eigene Art und Weise. Die Beeinflussung erfolgt beispielsweise durch Umwandeln, Filtern, Sammeln, Durchlassen oder Speichern diverser physikalischen Größen. Loonen [40] definiert in seiner Arbeit vier verschiedene physikalische Bereiche, in welchen die Anpassungen Effekte ausüben. Gosztonyi et al. [18] geben hinsichtlich der Einteilung sehr ähnliche Festlegungen an. Im Folgenden werden die Hauptgruppen von Loonen und die darin befindlichen Untergruppen von Gosztonyi et al. vorgestellt:

- **thermischer Effekt**

Die durchgeführte Anpassung verändert den Energiehaushalt des Gebäudes, indem entweder einer der drei Wärmetransportmechanismen (Leitung, Strahlung und Konvektion) innerhalb der Fassadenebene eine Veränderung erfährt oder durch die Speicherung thermischer Energie. Klimaadaptive Fassaden, welche thermische Effekte aufweisen, können außerdem in die Bereiche Wärmeschutz (sommerlicher Wärmeschutz), Wärmedämmung (winterlicher Wärmeschutz) sowie Wärmespeicherung unterteilt werden.

- **optischer Effekt**

Die Anpassung verändert das Verhalten der transparenten Teile der Fassade, wodurch die optische Wahrnehmung durch den Raumnutzer (Tageslichtnutzung) beeinflusst wird.

- **Effekt durch Luftströmungen**

Klimaadaptive Fassaden, welche Effekte durch Luftströmungen auslösen sind durch Bewegung von Luft durch die Fassade oder durch adaptives Verhalten, welches durch Windrichtung oder Windgeschwindigkeit beeinflusst wird, charakterisiert. Die durch variierende Funktionen entstehenden Luftströmungen durch die Fassade können hierbei für natürliche Lüftung, natürliche Kühlung und Luftfeuchtereulation genutzt werden.

- **elektrischer Effekt**

Wird mit klimaadaptiven Fassaden Energie erzeugt oder gespeichert, so können diese Fassaden dem vorliegenden Bereich zugeteilt werden. Neben der Energieerzeugung kann auch noch der verlustfreie Energietransport als elektrischer Effekt angeführt werden.

Sowohl Loonen [40] als auch Gosztonyi et al. [18] kommen in ihren Definitionen zu den physikalischen Bereichen zum Schluss, dass eine eindeutige Zuordnung einer klimaadaptiven Fassade in einen dieser Bereiche kaum möglich ist. Dies liegt daran, dass der Einfluss, welcher durch die Anpassung der Fassadeneigenschaften entsteht, nicht nur Effekte in einem Bereich

auslöst. Viel mehr handelt es sich hierbei um eine Kombination mehrere Auswirkungen in verschiedenen physikalischen Bereichen. Zum Beispiel wird die Anpassung eines Sonnenschutzes sowohl Effekte innerhalb des optischen (Tageslichtnutzung) als auch innerhalb des thermischen Bereichs (solare Gewinne) aufweisen.

2.3.5 Inspirationspool

Die **Natur** ist das größte Inspirationspool klimaadaptiver Fassaden. So basieren zum Beispiel eine Vielzahl von Konzepten adaptiver Fassaden auf dem sogenannten Tropismus. Tropismus bezeichnet die Orientierung von Pflanzen nach bestimmten Anregungen, wie zum Beispiel Licht (Phototropismus) oder Sonnenstrahlung (Heliotropismus). Einen weiteren häufig gewählten Ansatz stellen **innovative Materialien** dar, welche oft durch andere Fachdisziplinen, wie etwa die Display- oder Drucktechnologie, inspiriert sind. Viele klimaadaptive Fassaden beruhen beispielsweise auf Beschichtungen, welche Oberflächen feuerresistent, kratz-beständig oder selbstreinigend machen [41].

2.3.6 Dimension der Anpassung

Die Größenskala, auf welcher die Anpassung der Fassadeneigenschaften erfolgt, kann prinzipiell in zwei Kategorien unterteilt werden, wobei auch Kombinationen beider möglich sind. Liegt eine sichtbare Bewegung, also eine Bewegung auf Makroebene vor, so handelt es sich um sogenannte **Smart-Structures oder kinetische Hüllen**. Dabei verändert sich die Fassade typischerweise durch bewegende Ergänzungsteile oder Untersysteme. Jedoch ist auch eine Bewegung der gesamten Fassade bzw. des gesamten Gebäudes möglich. Mögliche Bewegungen können dabei Klappen, Gleiten, Ausdehnen, Rollen, Rotieren, Winden und viele mehr sein. Weisen klimaadaptive Fassaden Materialien auf, welche ihre interne Struktur bei einer Änderung von Außenbedingungen verändern so spricht man von sogenannten **Smart-Materials**. Da diese Veränderungen mit dem freien Auge meist nicht erkennbar sind spricht, man von Anpassungen auf Mikroebene. Der Großteil von klimaadaptiven Fassaden, bei welchen Änderungen auf Mikroebene erfolgen, beeinflusst die Lichttransmissionseigenschaften von transparenten Bauteilen. Jedoch sind auch Anpassungen thermophysikalischer Eigenschaften („schaltbare“ Wärmedämmung) oder Eigenschaften opaker Bauteile (Absorptions- und Reflexionseigenschaften) möglich [41].

3 Doppelschalige Fassaden

Geschichtlich reichen die Anfänge von Doppelfassaden bis etwa ins Jahr 1929 zurück. Der sogenannte „mur neutralisant“, also die neutralisierende Mauer, welche von Le Corbusier erfunden wurde gilt auch heutzutage noch als Vorläufer der Doppelfassade. Das Konzept basiert darauf, dass der eigentlichen Mauer eine Membran wenige Zentimeter vorgesetzt ist. Durch den entstandenen Luftspalt wird, je nach geographischer Lage warme oder kalte Luft geleitet, sodass die Temperatur der Innenwand immer auf behaglich, konstanten Werten gehalten wird. Die Konzepte von Le Corbusier haben nie zu einer erfolgreich umgesetzten Lösung geführt, jedoch sind aus seinen Gedanken viele Fassadenkonzepte hervorgegangen [37].

Die vielen entstandene Konzepte weisen dabei eine Gemeinsamkeit - und zwar die Mehrschaligkeit auf. Der eigentlichen Fassade wird in einem gewissen Abstand eine Außenfassade vorgesetzt, welche für Witterungsschutz sorgt und die Innenräume vor externen Schallquellen schützt. Außerdem weist die Außenfassade, welche zumeist aus Einfachverglasungen (ESG - Einscheibensicherheitsglas) realisiert wird, schließbare Öffnungen auf, wodurch eine Anpassungsfähigkeit an außenklimatische Bedingungen erreicht werden kann. Im Fassadenzwischenraum wird zumeist ein beweglicher Sonnenschutz angeordnet, welcher zum einen die Innenräume vor hohen Kühllasten schützt und zum anderen gezielt zur Absorption von Solarstrahlung eingesetzt wird. Dadurch erwärmt sich die Luft im Fassadenzwischenraum und es entsteht ein Druckgradient. Dies wird als thermischer Auftrieb bezeichnet, welcher neben der Windeinwirkung die wichtigste Ursache von Luftströmungen im Fassadenzwischenraum, darstellt. Der Begriff der Doppelfassade (oder doppelschaligen Fassade) ist jedenfalls als Oberbegriff zu verstehen. Vor allem eine Einteilung in Abhängigkeit der geometrischen Unterteilung des Fassadenzwischenraums und der Lüftungsfunktion erscheint sinnvoll [46].

3.1 Klassifizierung nach der geometrischen Unterteilung des Fassadenzwischenraums

Zunächst wird auf Konzepte von Doppelfassaden, welche sich aufgrund der geometrischen Unterteilung des Fassadenzwischenraum unterscheiden, eingegangen. Abhängig von der Lage

und Existenz von horizontalen oder vertikalen Schotts, welche den Fassadenzwischenraum unterteilen, können vier Fassadentypen hervorgehoben werden.

3.1.1 Kastenfensterfassade

Die Kastenfensterfassade hat sich, wie ihr Name vermuten lässt, aus dem Konzept des Kastenfensters entwickelt. Der Fassadenzwischenraum einer Kastenfensterfassade wird sowohl horizontal als auch vertikal abgeschottet. Die Lage der Schotts wird hierfür zumeist im Achsmaß gewählt. Das heißt die horizontalen Schotts liegen in der Deckenebene und die vertikalen je nach Achsmaß in einigen, wenigen Metern Abstand voneinander. Als Folge dieser kleinformatigen Abschottung des Fassadenzwischenraums muss die Außenverglasung, welche der eigentlichen Fassade vorgesetzt ist, in jedem unterteilten Segment im unteren Bereich Öffnungen für die Zuluft und im oberen Bereich Öffnungen für die Abluft aufweisen. Schematisch ist eine Kastenfensterfassade mit allen Komponenten links in Abbildung 3.1 dargestellt [37].



Abbildung 3.1: Schematische Darstellung einer Kastenfensterfassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Karmeliterhof Graz/Österreich) rechts [53]

Die Vorteile von Kastenfensterfassaden zeichnen sich durch individuelle Regelungsmöglichkeiten sowie aufgrund der umlaufenden Abschottung, durch optimalen Schall- und Brandschutz aus. Des Weiteren kann durch seitliches Versetzen der Zu- und Abluftöffnungen vermieden werden, dass bereits erwärmte, aus dem unteren Bereich ausströmende Luft im darüber liegenden, abgeschotteten Bereich wieder einströmt. Auch die Geruchsbelästigung durch angrenzende Bereiche kann hierdurch verbessert werden [46].

In Abbildung 3.1 (rechts) ist im Übrigen ein ausgeführtes Beispiel einer Kastenfensterfassade dargestellt. Hierbei handelt es sich um den Karmeliterhof in Graz/Österreich. Den raumhohen Fensterflügeln sind quadratische Fixverglasungen mit umlaufenden Rahmen vorgestellt. Die Zuluftöffnungen befinden sich jeweils im Elementrahmen unten und die Abluftöffnungen auf der Seite [36].

3.1.2 Schacht-Kasten-Fassade

Eine sehr effiziente Ausführungsmöglichkeit von Doppelfassaden stellt die Schacht-Kasten-Fassade dar. Dabei entlüften Fassadenelemente, welche als Kastenfensterfassade ausgeführt sind, in einen mehrere Geschosse überreichenden Schacht (siehe Abbildung 3.2). Daraus folgt, dass die Kastenfensterelemente nur noch Öffnungen für die Zuluft aufweisen. Durch die höhere Auftriebshöhe des Schachts und des dadurch verstärkt wirkenden Kamineffekts kann die Luft effektiv über Ventilationsöffnungen aus den Kastenfensterelementen gesaugt werden und über den Kopf des Schachts nach außen geleitet werden. Obwohl die Entlüftung über die Schächte bereits sehr effizient durch natürliche Konvektion erfolgt, kann die Entlüftung der Schächte mithilfe mechanischer Absaugung weiter verbessert werden. Aufgrund der wenigen Öffnungen der Außenfassade kann vor allem der Schallschutz durch Schacht-Kasten-Fassaden positiv hervorgehoben werden. Die Steuerung und konstruktive Ausführung dieser Fassaden-Kategorie ist jedoch sehr aufwendig. Da der Kamineffekt und damit die Temperaturen im Schacht mit dessen Höhe ansteigen, sollte die Höhe der Schächte begrenzt werden [46][37].

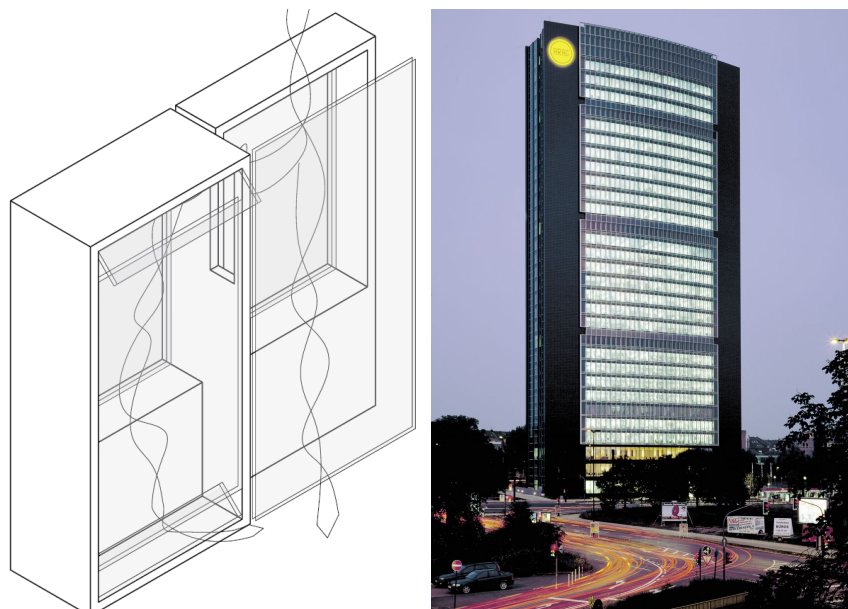


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer Schacht-Kasten-Fassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (ARAG Tower Düsseldorf/Deutschland) rechts [52]

Die geforderte Begrenzung der Schachthöhe ist darüber hinaus dem Ausführungsbeispiel in Abbildung 3.2 rechts zu entnehmen. Der ARGE Tower in Düsseldorf ist in vier Geschossstapel zu je acht Geschossen unterteilt. Die Schächte der Schacht-Kasten-Fassade umschließen sechs oder sieben Stockwerke und werden am oberen Ende vor einem Technik- bzw. Gartengeschoss nach außen entlüftet [46].

3.1.3 Korridorfassade

Korridorfassaden führen die Luft geschossweise. Das heißt der Fassadenzwischenraum wird nur horizontal pro Geschoss abgeschottet. Um den Brand- sowie Schallschutz zu verbessern, können vertikale Schotts vereinzelt nachgerüstet werden. Ähnlich wie die Kastenfensterfassade weist die Korridorfassade Öffnungen für Zu- und Abluft in Boden- und Deckennähe auf. Diese werden zumeist seitlich, achsweise versetzt angeordnet, um den thermischen Kurzschluss zwischen Zu- und Abluft zu verhindern. Aufgrund der nur sehr geringen Höhe, über welche thermische Auftriebsströmungen wirksam sind, kann eine Überhitzung des Fassadenzwischenraums vermieden werden. Der Korridor zwischen der Außen- und Innenverglasung wird meistens so tief ausgeführt, sodass er für Instandhaltungsmaßnahmen begehbar ist [37].

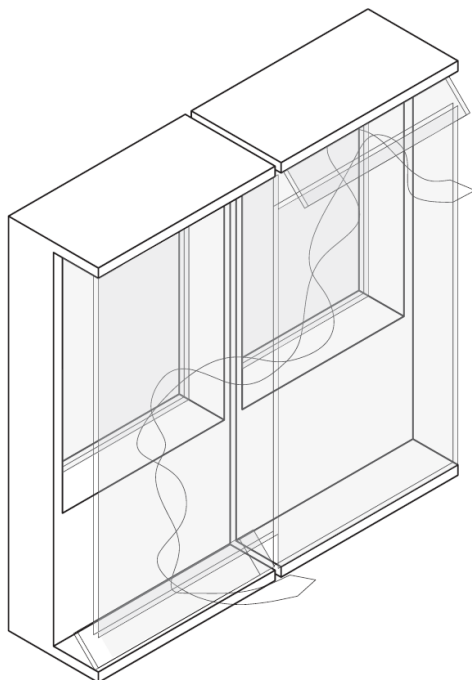


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung einer Korridorfassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Stadttor Düsseldorf/Deutschland) rechts [46]

Im Ausführungsbeispiel in Abbildung 3.3 rechts ist der 1,4 m breite Korridor inklusive der versetzten Zu- und Abluftgitter der Fassade des Düsseldorfer Stadttores dargestellt. Der Korridor ist dabei innerhalb der beiden Türme und des darüber liegenden, dreigeschossigen Attikariegels

bis auf wenige Meter Unterbrechung, durchlaufend, sodass 75 % des Jahres frei gelüftet werden kann [46].

3.1.4 Mehrgeschossfassade bzw. Zweite-Haut-Fassade

In Zweite-Haut-Fassaden, welche auch häufig als Mehrgeschossfassaden bezeichnet werden, grenzen mehrere (im Extremfall alle) Innenräume an denselben Fassadenzwischenraum. Dieser ist demnach weder in horizontaler noch in vertikaler Richtung abgeschottet (siehe Abbildung 3.4). Daher wird dieser Fassadenklasse auch häufig das Attribut „unsegmentiert“ zugeordnet. Die Fassade wird mit großzügigen Öffnungen in boden- und deckennähe (oberste Geschossdecke) belüftet. Wenige bewegliche Teile und dadurch eine einfache konstruktive Ausführung sowie hoher Schallschutz sprechen für die Anwendung Zweite-Haut-Fassaden. Als negative Aspekte müssen der Brandschutz, das Überhitzungsrisiko und die zumeist notwendige mechanische Lüftung genannt werden [46][37].

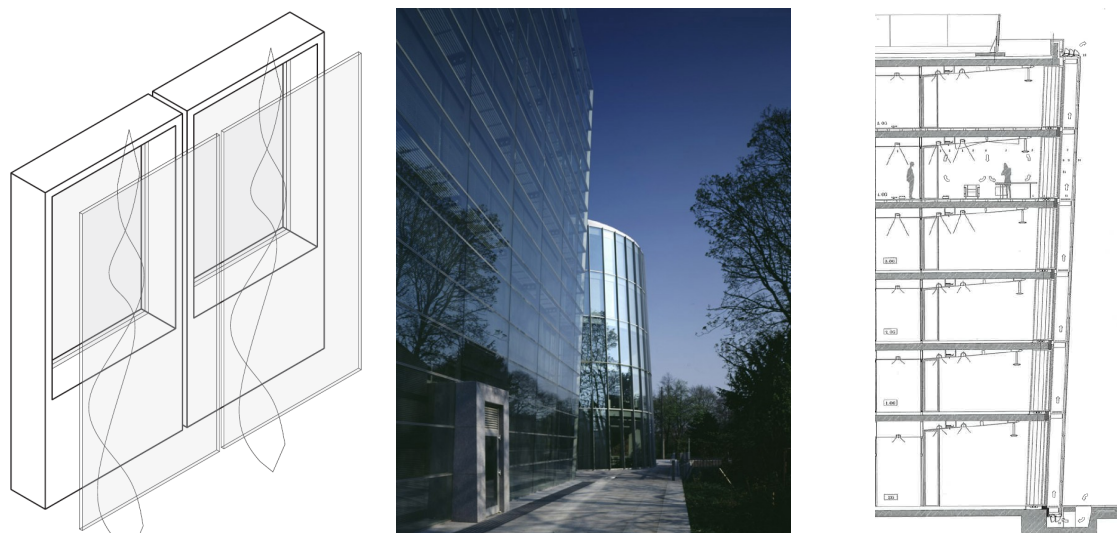


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung einer Zweite-Haut-Fassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Victoria Ensemble Köln/Deutschland) mittig [42] mit dazugehörigem Fassadenschnitt rechts [46]

Als Praxisbeispiel ist in Abbildung 3.4 mittig sowie rechts das Victoria Ensemble in Köln dargestellt. Die $2,6^\circ$ geneigte, sechsgeschossige Fassade ist als Zweite-Haut-Fassade ausgeführt und dient lediglich der Anpassung des Wärmeschutzes. Die Innenräume müssen daher mechanisch klimatisiert werden [46].

3.2 Klassifizierung nach Lüftungskonzept

Eine weitere wichtige Klassifizierungsmöglichkeit von Doppelfassaden richtet sich nach der Lüftungsfunktion der Fassade. Haase et al. [22] definieren fünf verschiedene Lüftungsmodi (siehe Abbildung 3.5), wobei die beiden erst genannten Modi direkten Bezug zwischen Innenraum und Außenluft aufweisen und daher eine natürliche Lüftung zulassen. Die weiteren drei Modi können realisiert werden, indem der Innenraum vollständig, jedoch in verschiedener Art und Weise, eingehüllt wird, wodurch eine mechanische Belüftung erforderlich ist [22]:

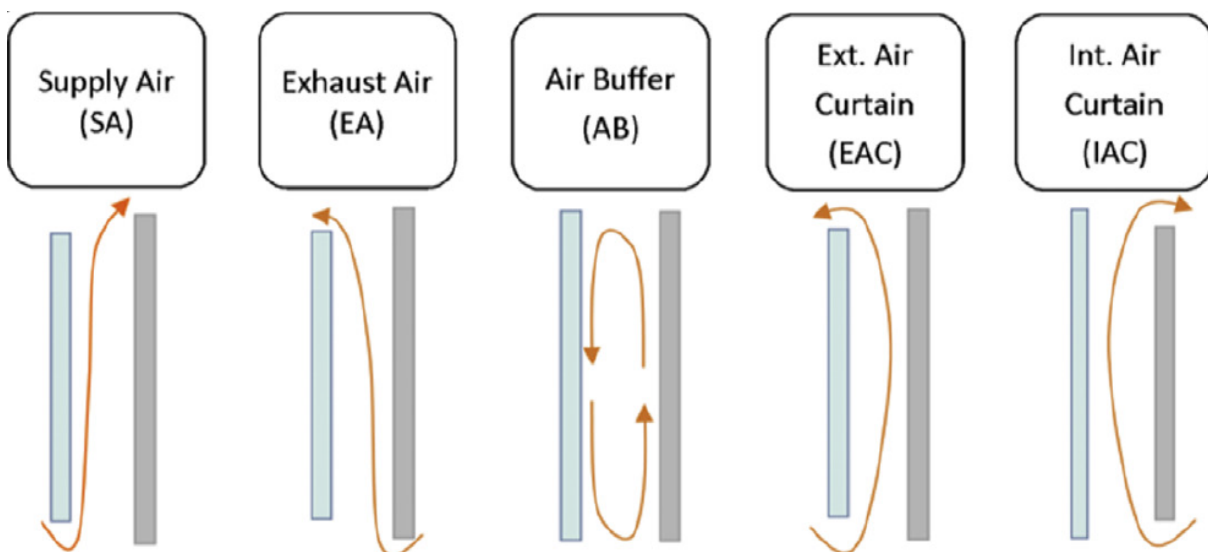


Abbildung 3.5: Einteilung von Doppelfassaden nach dem Lüftungskonzept [50]

1. **Supply Air (SA)**: Mithilfe von diesem Lüftungskonzept wird der Innenraum über die Doppelfassade mit Frischluft versorgt.
2. **Exhaust Air (EA)**: Die Doppelfassade entzieht dem Raum Luft.
3. **Air Buffer (AB)**: Innerhalb des Fassadenzwischenraums entsteht ein thermischer Puffer mit konvektiver Strömung lediglich innerhalb des geschlossenen Zwischenraums.
4. **External Air Curtain (EAC)**: Der Fassadenzwischenraum der Doppelfassade wird mit Außenluft durchlüftet. Es kann festgestellt werden, dass alle Fassaden, welche in Kapitel 3.1 beschrieben wurden, Sonderformen bzw. Unterkategorien des External Air Curtains sind.
5. **Internal Air Curtain (IAC)**: Der Fassadenzwischenraum der Doppelfassade wird mit erwärmter Raumluft durchlüftet und danach zur Lüftungszentrale zurückgeführt [29].

Im deutschsprachigen Raum sind für die Betriebsmodi drei bis fünf vor allem die Bezeichnungen **Pufferfassade**, **Zweite-Haut-Fassade** und **Ablufffassade** gebräuchlich.

Abbildung 3.6 links zeigt als Ausführungsbeispiel die Fassade des LEO-Gebäudes, welches den Hauptsitz der ING-DiBa darstellt. Die ausklappbare Fassade wurde dabei als Closed-Cavity-

Fassade (CCF) ausgeführt [34]. Closed-Cavity-Fassaden sind Sonderformen von Pufferfassaden. Der Fassadenzwischenraum wird dabei unter leichten Überdruck gesetzt und trockene, reine Luft zugeführt. Dadurch können vor allem Kondensatbildung und Verschmutzung innerhalb des Fassadenzwischenraums verhindert werden [28]. Mittig in Abbildung 3.6 ist das Wacker-Haus in München dargestellt, welches eine Zweite-Haut-Fassade aufweist [29]. Rechts ist der Burj-al-Taqa (oder Energy-Tower) in Dubai abgebildet. Der 322 m hohe Turm befindet sich derzeit im Bauzustand und wird mit einer Abluftfassade ausgestattet, welche dem Innenraum die verbrauchte Luft entzieht [27].

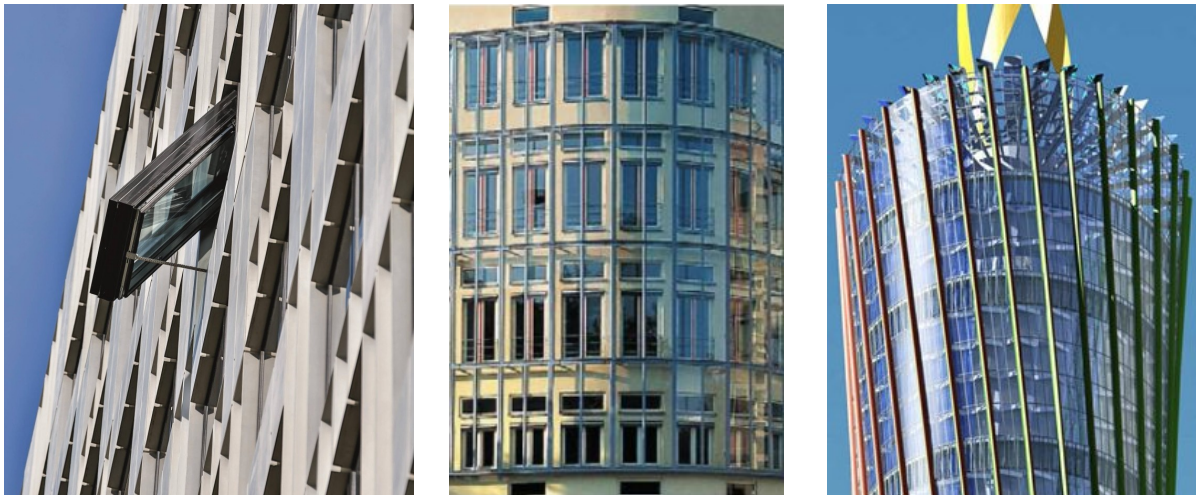


Abbildung 3.6: Closed-Cavity-Fassade des LEO-Gebäudes in Frankfurt links [12], Zweite-Haut-Fassade des Wacker-Hauses in München mittig [29] und die Abluftfassade des Burj-al-Taqa in Dubai rechts [27]

3.3 Klimaelemente und Klimafaktoren

Die Fassade stellt die Schnittstelle zwischen den konditionierten Innenräumen und dem unkontrollierten Außenklima dar. Das Design, die Wirkungsweise und daher die Performance von Doppelfassaden hängen stark von Klimaelementen und Klimafaktoren ab. Dies ist der Grund, weshalb an dieser Stelle die wichtigsten Elemente und Faktoren beschrieben werden.

Klimaelemente werden zur Beschreibung des Klimas herangezogen. Dazu zählen unter anderem Solarstrahlung, Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Bewölkung und Wind. Klimafaktoren, hingegen, sind Zustände oder Abläufe, die ein Klima ändern, bewahren oder hervorbringen. Typische Klimafaktoren sind der Breitengrad, die Höhenlage des Standortes und die Land-See-Verteilung (Kontinentalität) [24].

3.3.1 Solarstrahlung und Breitengrad

Ohne Sonnenstrahlung wäre ein Leben auf unserem Planeten nicht möglich. Aufgrund dieser Tatsache liegt es auf der Hand, dass Solarstrahlung für die Fassadenplanung einen wesentlichen Entwurfsparameter darstellt und vor allem als Licht- und Energiequelle dient. Prinzipiell setzt sich die Solarstrahlung (Globalstrahlung) aus direkter und diffuser Strahlung zusammen und liegt stets unter der Solarkonstante ($G_{sol} = 1373 \text{ W/m}^2$). Der direkte Anteil tritt ohne Streuung und Absorption auf der Erdoberfläche auf. Diffuse Strahlung hingegen, wird innerhalb der Atmosphäre gestreut und tritt gleichmäßig aus allen Richtungen auf der Erdoberfläche auf. Das heißt diffuse Strahlung ist auch auf schattigen Gebäudeflächen vorhanden [24][43].

Der beschreibende Klimafaktor ist der Breitengrad, also die geographische Lage eines Ortes. Er gibt die Änderung des Einstrahlwinkels, die Tageslänge sowie die Intensität der Solarstrahlung im Jahres- und Tagesgang an. Die Erdachse ist um etwa $23,5^\circ$ geneigt, wodurch innerhalb eines Jahres abwechselnd die Nord- und die Südhalbkugel der Sonne zugeneigt sind. Dies ist auch die Grundlage der Entstehung von Jahreszeiten: Aufgrund der höheren Strahlungsintensität auf der zur Sonne zugewandten Halbkugel herrscht dort Sommer und auf der anderen Halbkugel, aufgrund des geringen Einstrahlwinkels, respektive Winter. Es liegt auf der Hand, dass die jahreszeitlichen Unterschiede umso höher werden, je größer der Breitengrad, also je näher die geografische Lage zu den Polen ist. Umgekehrt sind die Schwankungen am Äquator im Jahresgang nur sehr gering. Da die Erde sich nicht kreisförmig, sondern in einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, verändert sich der Abstand zur Sonne im Jahresgang. Der geringste Abstand zur Sonne tritt im Nordwinter auf und der größte im Nordsommer. Innerhalb der Wendekreise (das heißt zwischen den Breitengraden $23,5^\circ \text{ S}$ und $23,5^\circ \text{ N}$) liegt der Bereich der höchsten Solarstrahlung, weil aufgrund der großen Höhenwinkel der Sonne, der Weg der Solarstrahlung durch die Atmosphäre sinkt. Am Äquator steht die Sonne jeweils am 21. März und 21. September am Zenit (das heißt der Zenitwinkel ist gleich 0° bzw. der Höhenwinkel gleich 90°). Am 21. Juni erreicht die Sonne am nördlichen Wendekreis ($23,5^\circ \text{ N}$) den Zenit, sowie dieser am 21. Dezember am südlichen Wendekreis ($23,5^\circ \text{ S}$) erreicht wird. Daraus folgt, dass am 21. Juni auf der Nordhalbkugel der Tag am längsten und die Nacht am kürzesten ist. Aufgrund all dieser Erkenntnisse, welche auch in Abbildung 3.7 abgelesen werden können, kann festgestellt werden, dass der Breitengrad (das heißt der Standort des Gebäudes) die Tageslichtsituation sowie das Verschattungskonzept von Gebäuden enorm beeinflusst. Daneben sind auch die Effizienz von aktiver und passiver Solarenergienutzung von ihm abhängig. Schlussendlich wird die Intensität der Solarstrahlung auf ein Gebäude auch durch die Gebäudeorientierung (Azimutwinkel) beeinflusst [24].

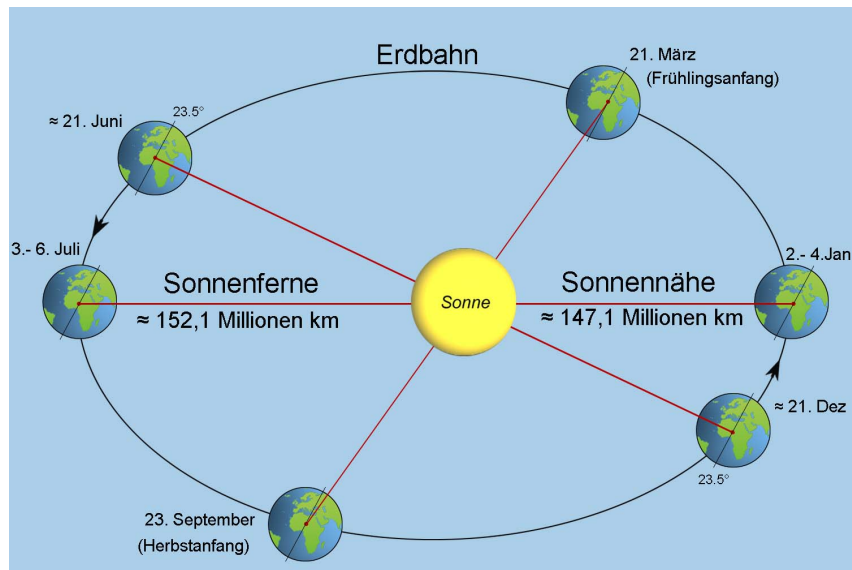


Abbildung 3.7: Erdumlaufbahn mit Extremwerten der Sonnenabstände sowie Tage der Sommer- und Winter Sonnenwende [4]

3.3.2 Lufttemperatur

Die Temperatur der Außenluft ergibt sich aus der Temperatur der zuströmenden Luft sowie der solaren Einstrahlung. Der Jahresgang der Außenlufttemperatur kann in Mitteleuropa näherungsweise durch eine harmonische Funktion charakterisiert werden (siehe Abbildung 3.8 links). Wärmeschutzmaßnahmen, welche im Funktionsbereich von Fassaden liegen, sowie das Erfordernis von Lüftungs- und Kühlsystemen ergeben sich in Abhängigkeit zum Jahresgang der Außenlufttemperatur. Die höchsten Lufttemperaturen ergeben sich allerdings nicht an den Tagen der maximalen Einstrahlung (höchster Sonnenstand bzw. Sonnenwenden), sondern zeitlich um ein bis vier Monate versetzt. Dies liegt an der thermischen Trägheit der Erdoberfläche (Boden, Luft, Wasser), welche sich erst aufheizen muss. Der Tagesgang der Außenlufttemperatur wird nicht durch eine harmonische Funktion, sondern durch Exponentialfunktionen beschrieben (siehe Abbildung 3.8 rechts). Aufgrund des Wärmespeichereffektes des Bodens wird sowohl der Aufheizvorgang der Lufttemperatur am Vormittag als auch der Abkühlvorgang der Temperatur durch eine Exponentialfunktion beschrieben. Für die Realisierbarkeit von passiven Kühlstrategien, wie zum Beispiel die Nachtlüftung, spielt der Tagesgang der Außenlufttemperatur eine bedeutende Rolle. Ein effizientes Auskühlen kann dabei nur erreicht werden, wenn die Lufttemperaturen in der Nacht niedrig genug sind und genügend Speichermasse vorhanden ist [16][24].

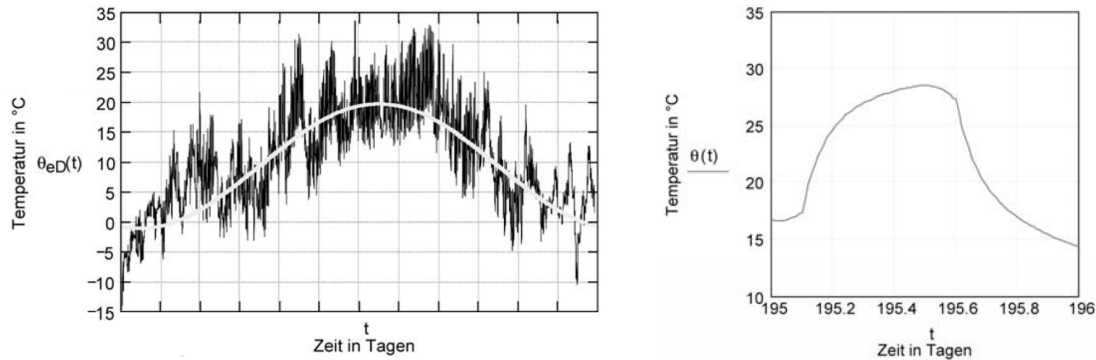


Abbildung 3.8: Beispielhafte Darstellung eines typischen Jahresganges der Außenlufttemperatur links und eines typischen Tagesganges rechts [16]

3.3.3 Luftdruck

Der Luftdruck ist der hydrostatische Druck, welcher aus der Gewichtskraft der Luft resultiert. Der barometrische Luftdruck nimmt mit der Höhenlage exponentiell ab und beträgt auf Meeresspiegelniveau $p_0 = 101\,325\text{ Pa} \approx 1\text{ bar}$ [57]. Die gewollte Erzeugung von Druckdifferenzen, welche dazu führen, dass die Luft in Gebieten mit Überdruck zu Gebieten mit Unterdruck strömt (Druckausgleich), ist eine weit verbreitete Methode zur Lüftung von Gebäuden (natürliche Lüftung). Daraus folgt, dass der Luftdruck für die Planung von Lüftungsstrategien, welche auch sehr häufig im Funktionsbereich der Fassade liegen, ein wichtiges Klimaelement darstellt.

3.3.4 Wind

Die Windsituation am Gebäudestandort ist für die Fassadenplanung von großer Bedeutung. Die Windlast, welche dabei auf die Gebäudehülle einwirkt, ergibt sich aus Druck- und Sogkräften. Die Gebäudeform bestimmt die Windbelastung jedoch nicht alleine (steigende Gebäudehöhe hat steigende Windlast zur Folge) und meteorologische Angaben stellen oft nur ein allgemeines Bild der Windlast und Windrichtung dar. Viel mehr ist das Mikroklima entscheidend: Umliegende Bebauung, Bepflanzung sowie Geländeformen können beispielsweise dafür sorgen, dass Düseneffekte auftreten, welche die Windlast erhöhen. Im Allgemeinen gilt jedoch, dass Windgeschwindigkeiten in Küstennähe höher als im Binnenland sind. Eine jahreszeitliche Betrachtung ergibt die höchsten Windlasten in der Übergangszeit. Häufig werden Windkräfte eingesetzt um Druckdifferenzen zu den Innenräumen zu erzeugen, welche eine natürliche Belüftung der Räume bewirken. Hierfür ist es notwendig im Bereich der Gebäudehülle Öffnungen vorzusehen [25][24].

3.3.5 Luftfeuchte

Grundsätzlich kann zwischen der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit unterschieden werden. Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt den Anteil von Wasserdampf in Gramm pro m^3 Luft an und hängt vor allem vom Standort (Meeresnähe, Niederschlagsmengen) ab. Dieser absolute Wert des Wasserdampfes in der Luft erfährt im Tagesgang kaum Veränderung. Hinsichtlich der absoluten Luftfeuchtigkeit im Jahresgang sind an kalten Tagen (Winter) geringere Werte feststellbar, während die Luft an warmen Tagen (Sommer) feuchter ist. Die relative Luftfeuchtigkeit [%], welche das Verhältnis von Partialdruck p_A des Wasserdampfes zu dessen Sättigungsdruck p_S angibt und den Wert 100 % (gesättigte Luft) nie überschreitet, schwankt im Tagesgang recht stark. Diese Schwankungen weisen als Ursache die gravierende Temperaturabhängigkeit (Temperaturschwankung im Tagesgang) des Sättigungsdampfdruckes von Wasserdampf auf [16][24].

Vor allem die Anforderung zur Frischluftversorgung, welche häufig durch die Fassade erfolgt, kann die Notwendigkeit einer Entfeuchtung der Zuluft mit sich bringen. Dies liegt an der Taupunktproblematik, dass sowohl feuchtere als auch kühlere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann, wodurch der Sättigungszustand schneller erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt kann kein Wasserdampf mehr von der Luft aufgenommen werden und daher kondensiert dieser an den kalten Oberflächen. Besonders kritisch ist diese Problematik, wenn Flächenkühlsysteme eingesetzt werden [24].

3.4 Thermodynamische Grundlagen

Die Wirkungsweise von Doppelfassaden ist sehr komplex. Das liegt vor allem daran, dass eine Vielzahl von physikalischen Phänomenen, wie zum Beispiel alle Wärmetransportvorgänge und Strömungsprobleme überlagert werden. In Abbildung 3.9, welche von Hoseggen et al. [31] illustriert wurde, kann die Komplexität von Doppelfassaden inklusive aller beteiligten Phänomene entnommen werden. Zu diesen Phänomenen zählen beispielsweise die solare Bestrahlung und wie diese durch diverse Festkörper (Verglasung, Sonnenschutz) beeinflusst wird, konvektive Wärmeübertragung durch an Festkörpern vorbei strömendes Fluid, langwelliger Strahlungsaustausch (Wärmestrahlung), Wärmeleitung durch die Festkörper und viele mehr.

Aufgrund dieser Vielschichtigkeit ist es sinnvoll sowohl thermodynamische (im vorliegenden Kapitel 3.4) als auch aerophysikalische Grundlagen (im nachfolgenden Kapitel 3.5) in Bezug auf Doppelfassaden zu erarbeiten. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass die Energiegleichung sowie die Strahlungstransportgleichung (RTE - Radiative Transfer Equation), mit welchen alle Wärmetransportmechanismen mathematisch beschrieben werden können in Kapitel 4.1 angeführt werden.

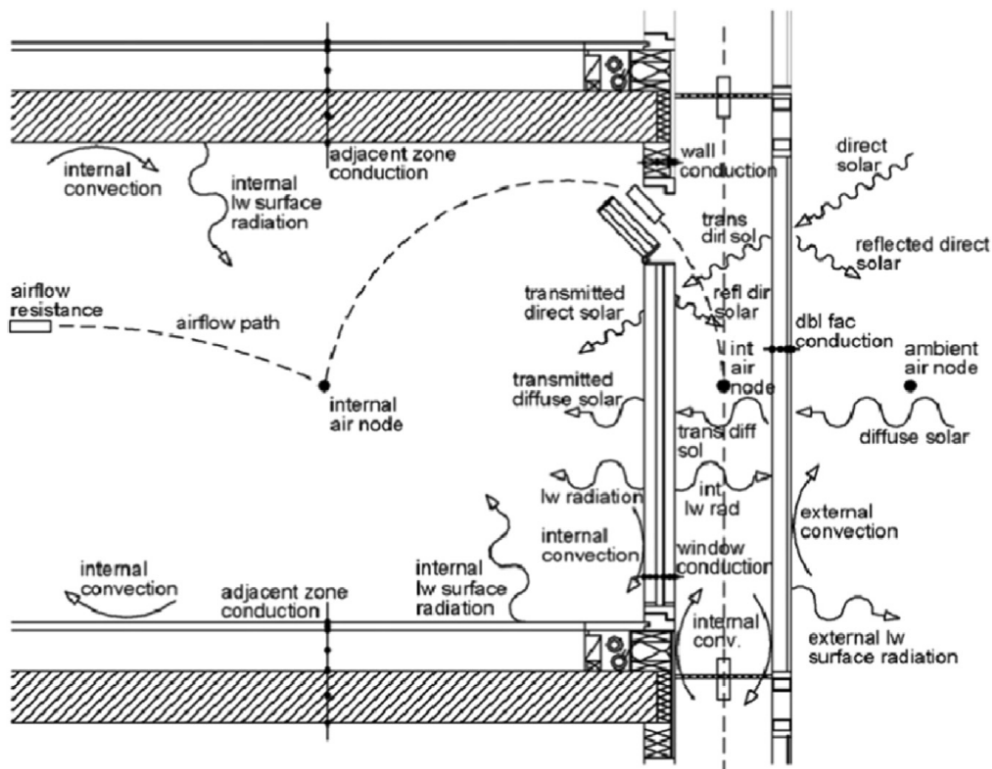


Abbildung 3.9: Querschnitt durch eine Doppelfassade und den angrenzenden Innenraum inklusive aller Wärme-transportmechanismen und einem Luftströmungspfad [31]

Zunächst wird definiert, dass Wärme eine Erscheinungsform von Energie ist. Diese Erscheinungsform kann dabei zum Beispiel das Freisetzen, Übertragen oder Speichern von Wärme bedeuten. Grundsätzlich besitzt jeder Körper, egal ob Gas, Flüssigkeit oder Feststoff, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, innere Energie. Das bedeutet Atome und Moleküle, aus welchen sich der Körper zusammensetzt schwingen leicht. Die Wärmekapazität [J/K] zusammen mit der Temperatur [K] sind das Maß für die Höhe der inneren Energie in einem Körper. Die Temperatur ist dabei nicht nur ein Maß für die enthaltene Energie, sondern gibt auch den Drang der Atome an deren Wärme weiterzugeben. Schwingen innerhalb eines Festkörpers die Atome verschieden stark, bedeutet das, dass sie verschiedene Temperaturen aufweisen und sich daher solange beeinflussen, bis sie den Temperaturnausgleich erzielt haben. Dieser Wärmetransportmechanismus wird als **Wärmeleitung** bezeichnet. Ein weiterer Wärmetransportmechanismus ist **Konvektion**. Da Atome in Flüssigkeiten oder Gasen an kein festes Kristallgitter gebunden sind, können sie sich frei bewegen und daher ihre Wärme an andere Orte transportieren. Konvektion kann in freie (Wärmeübertragung erfolgt durch Dichteunterschiede aufgrund von Temperaturdifferenzen, welche Auf- oder Abtriebsströmungen erzeugen) und erzwungene Konvektion (Bewegung wird durch äußere Kräfte induziert, wie zum Beispiel durch Wind) eingeteilt werden. Der dritte Wärmetransportmechanismus wird als **Strahlung** bezeichnet. Sie überträgt die Wärme mithilfe elektromagnetischer Wellen (in

diversen Wellenlängenbereichen). Hierbei handelt es sich um den einzigen Mechanismus, der an kein Medium gebunden ist und daher kann Wärme mittels Strahlung auch durch ein Vakuum hindurch übertragen werden [46].

3.4.1 Wärmeleitung

Wie im vorangegangenen Absatz bereits angedeutet, entsteht Wärmeleitung aufgrund atomarer und molekularer Wechselwirkung und ungleichmäßiger Beeinflussung durch das Temperaturfeld. Bedeutend ist Wärmeleitung daher eher in Festkörpern, tritt jedoch auch in Gasen und Flüssigkeiten auf. Der Grund dafür liegt darin, dass in Festkörpern zwischen den Atomen aufgrund der engen Anordnung im Kristallgitter viel höhere Wechselwirkungen bestehen, welche die Wärmeleitung enorm beeinflussen. Liegen die Atome, wie beispielsweise bei allen Gasen, weit auseinander wird wenig Wärme geleitet. Daher gilt insbesondere Luft als sehr gut wärmedämmend. Das Maß, wie gut ein Stoff Wärme durch Leitung übertragen kann, wird mithilfe eines Proportionalitätsfaktors, der sogenannten Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK], beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit ist von der Temperatur abhängig, jedoch wird diese Abhängigkeit aufgrund zumeist geringer Temperaturunterschiede in der Praxis häufig vernachlässigt [46][43].

Mithilfe der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung (Gleichung 3.1) können im allgemeinen Fall Wärmetransporte innerhalb eines mehrdimensionalen, instationären Temperaturfeldes $T(\vec{x}, t)$ mit inneren Wärmequellen gelöst werden. Die Gleichung ergibt sich mit der Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ [m^2/s] und der Wärmequellendichte \dot{e}_q [W/m^3] laut [43] zu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{e}_q}{\rho \cdot c_p} = a \cdot \Delta T + \frac{\dot{e}_q}{\rho \cdot c_p} \quad (3.1)$$

Für viele baupraktische Anwendung kann dieser Ansatz vereinfacht werden. Beispielsweise ist der Wärmedurchgang durch Fassaden (in hinreichendem Abstand zu Anschlüssen und Detailpunkten) ein eindimensionales, stationäres Problem. Somit kann der Wärmestrom $\dot{Q}(x)$ [W] bzw. die Wärmestromdichte $\dot{q}(x)$ [W/m^2] bezogen auf die Fläche $A(x)$ in Abhängigkeit der Ortskoordinate x (Dickenrichtung des eindimensionalen Problems) angegeben werden [43]:

$$\dot{Q}(x) = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{bzw.} \quad \dot{q}(x) = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.2)$$

Liegt ein mehrschichtiger Aufbau vor, kann der Wärmedurchgang aufgrund Wärmeleitung durch stückweise lineare Temperaturprofile beschrieben werden. Diese Überlegung sowie

Gleichung 3.2 bilden die Grundlage zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) $[W/m^2K]$, welcher einen der wichtigsten Parameter zur Beurteilung des Wärmeschutzes von Gebäudehüllen darstellt. Der U-Wert ergibt sich aus dem Reziprok-Wert der Summe der Wärmeübergangswiderstände, welche aufgrund von Strahlung und Konvektion außen und innen berücksichtigt werden sowie den Wärmedurchgangswiderständen der einzelnen Schichten (d_i, λ_i) des Bauteilaufbaus [16]:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad (3.3)$$

3.4.2 Strahlung

Wärme- oder auch thermische Strahlung stellt einen Energietransport durch elektromagnetische Wellen dar. Da Strahlung auch durch das Weltall möglich ist (Sonnenstrahlung) liegt es auf der Hand, dass dieser Wärmetransportmechanismus an kein Medium gebunden ist und daher auch in einem Vakuum funktioniert. Verschiedene Arten von Strahlung lassen sich anhand der Wellenlänge λ , mit welcher die elektromagnetische Strahlung ausgesandt wird, unterscheiden. So ergibt sich beispielsweise für Ultraviolette Strahlung (UV) ein Wellenlängenbereich von etwa 280 bis 380 nm, für sichtbares Licht (VIS) ein Bereich von etwa 380 bis 780 nm und für infrarote Strahlung ein Wellenlängenbereich über 780 nm. Wärmestrahlung ist ein Teil der Infrarotstrahlung und somit langwellig, wodurch sie für das menschliche Auge nicht sichtbar, sondern nur fühlbar ist [43].

Grundsätzlich senden alle Oberflächen, welche Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt aufweisen, Strahlung aus. Der Strahlungsaustausch erfolgt dabei nach dem Sender-Empfänger-Prinzip. Ein Körper sendet sowohl Strahlung aus (**emittiert**) und nimmt auftreffende Strahlung auch wieder auf (**absorbiert**). Nach dem Stefan-Boltzmann'schen-Gesetz (Gleichung 3.4) kann der Strahlungswärmestrom bzw. dessen Wärmestromdichte zwischen zwei Oberflächen angegeben werden. σ_{12} spiegelt dabei die Oberflächeneigenschaften der beteiligten Körper wider und hängt zudem von der Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$) ab [43].

$$\dot{Q}_{\epsilon 12} = \sigma_{12} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{bzw.} \quad \dot{q}_{\epsilon 12} = \sigma_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.4)$$

Elektromagnetisches Spektrum: Wie zuvor bereits definiert, gibt es mehrere Arten von Strahlung, welche von den Wellenlängen sind und durch verschiedene Mechanismen erzeugt werden können. Abbildung 3.10 stellt das gesamte elektromagnetische Spektrum beginnend mit der Höhenstrahlung (kosmische Strahlung) bis hin zu elektrischen Wellen (Wechselströme) dar. Die in elektromagnetischer Strahlung enthaltene Energie ist indirekt proportional zur Wellenlänge.

Das heißt kurzwellige Strahlung ist energiereicher als langwellige. In baupraktischen Anwendungen sind vor allem die drei Bereiche der thermischen Strahlung (Ultraviolett-Strahlung, sichtbares Licht, Infrarot-Strahlung) von Interesse [43].

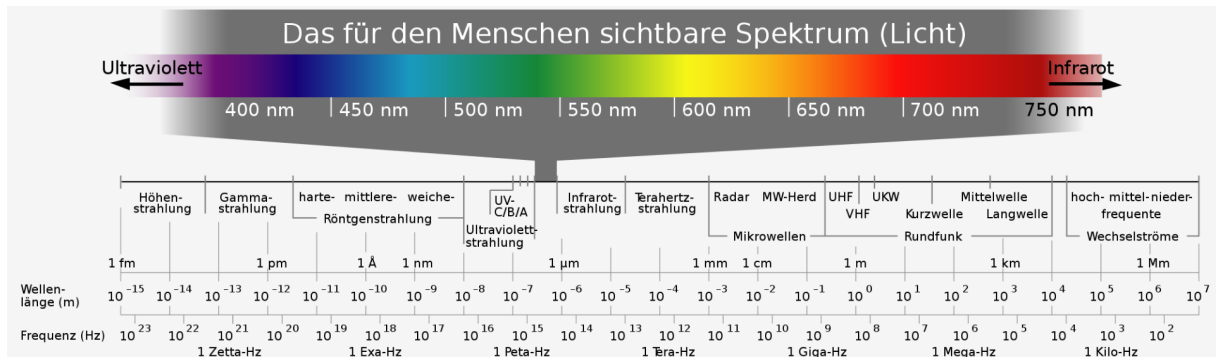


Abbildung 3.10: Elektromagnetisches Spektrum [30]

Bei Temperaturen im baupraktischen Bereich (also etwa zwischen -10 und 100°C) strahlen alle Körper im Infrarotbereich. Erst bei Temperaturen über etwa 800 K wird für das Auge sichtbare Strahlung ausgesandt. Daher muss der Wolframdraht in Glühlampen auf über 2000 K aufgeheizt werden, um Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichtes zu emittieren. Die Sonne weist eine Strahlungstemperatur von etwa 5800 K auf und emittiert somit den größten Teil ihrer Energie (knapp unter 50%) im Bereich des sichtbaren Lichtes (siehe Abbildung 3.11). Da die Sonne Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 280 nm und etwa 3000 nm emittiert, wird folglich auch UV- und Infrarot-Strahlung ausgesandt. Diese Erkenntnisse gehen auch aus dem Modell des schwarzen Körpers hervor [43].

Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers: Der schwarze Körper stellt einen idealen Strahlungskörper dar. Das heißt die gesamte einfallende Strahlung wird vom schwarzen Körper absorbiert und auch wieder emittiert. Da diese Annahme ein thermisches Gleichgewicht voraussetzt, verändert sich die Temperatur des schwarzen Körpers auch nicht. Das **Stefan-Boltzmann'sche Gesetz** (Gleichung 3.5) gibt die Leistungsstrahlungsdichte $E_S(T)$, die ein schwarzer Körper über den gesamten Wellenlängenbereich emittiert, an [17]:

$$E_S(T) = \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \quad (3.5)$$

Oft ist es von Interesse die spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers bei einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten Wellenlänge, also nicht über das gesamte Spektrum summiert, abzuleiten. Hierzu dient das **Planck'sche Strahlungsgesetz**, welches in Gleichung 3.6 und Abbildung 3.11 angegeben ist. Die Variablen C_i stellen Strahlungskonstanten dar. Weiters kann die Lage der Ausstrahlungsmaxima (Rote Linie in Abbildung 3.11) mithilfe des **Wien'schen Verschiebungsgesetzes** ermittelt werden [17].

$$E_{S,\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1\right)} \quad (3.6)$$

Der Abbildung 3.11 kann entnommen werden, dass die Sonne ihr spezifisches Strahlungsmaximum bei etwa $0,5 \mu\text{m}$ erreicht, womit die Aussage, dass die Sonne den größten Teil ihrer Strahlung in Form sichtbaren Lichtes aussendet, bestätigt werden kann. Als weiteres Beispiel kann eine 27°C (entspricht etwa 300K) warme Außenwand betrachtet werden. Die maximale spektrale Emission wird mit einer Wellenlänge knapp unter $10 \mu\text{m}$ erreicht [17].

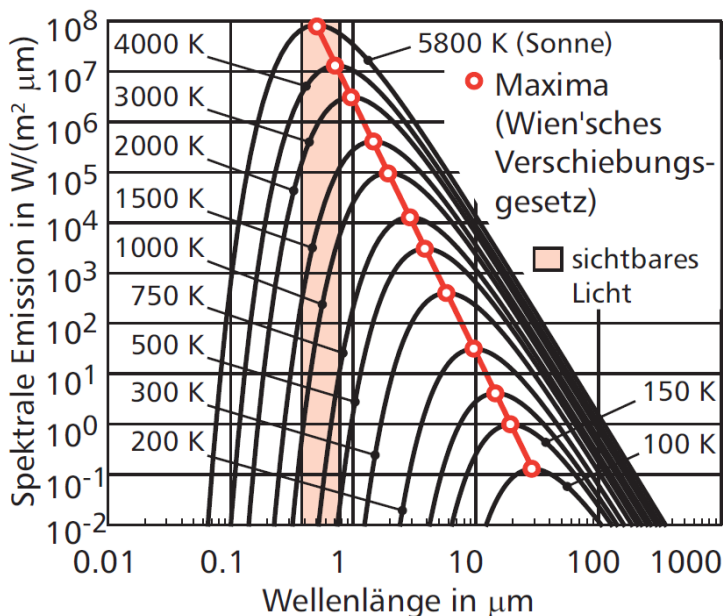


Abbildung 3.11: Spezifische Ausstrahlung (Emission) in Abhängigkeit zur Temperatur und Wellenlänge [43]

Strahlungsgesetze realer Körper: Trifft elektromagnetische Strahlung auf reale Körper werden Teile der Strahlung **absorbiert** (in Wärme umgewandelt), **reflektiert** (zurückgeworfen) und bei transparenten Medien **transmittiert** (durch das Medium durchgelassen). Wie groß die absorbierten, reflektierten und transmittierten Strahlungsanteile sind, hängt sowohl von den Materialeigenschaften des Körpers als auch von der Wellenlänge der Strahlung ab. Im vorherigen Kapitel wurde der perfekte schwarze Körper vorgestellt, welcher die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert. Weitere Grenzfälle sind der ideale Spiegel, der die gesamte Strahlung reflektiert und das ideale Fenster, welches die gesamte Strahlung durchlässt. Für alle realen Körper hingegen muss die Energiebilanz gelten, sodass die einfallende Strahlung der Summe aus absorbierten, reflektierten und transmittierten Strahlung entspricht. Bringt man jeden der drei Anteile in Bezug mit der gesamten, einfallenden Strahlung so können der Absorptionsgrad α , der Reflexionsgrad ρ und der Transmissionsgrad τ eingeführt werden. Die Summe dieser drei Kenngrößen muss stets 100% ergeben (Gleichung 3.7) [17].

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3.7)$$

Der **Emissionsgrad** ϵ eines realen Körpers gibt das Verhältnis der von seiner Oberfläche emittierten Strahlung zu der von der Oberfläche eines schwarzen Körpers (bei gleicher Temperatur) ausgesandten Strahlung an. Das heißt, dieser Kennwert gibt an, wie gut ein realer Körper im Vergleich zum schwarzen Körper Strahlung emittiert. Der Emissionsgrad kann demnach Werte zwischen 0 und 1 annehmen und entspricht im Falle von thermischem Gleichgewicht dem Absorptionsgrad α . Da bereits der Absorptionskoeffizient von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung abhängt, gilt die Abhängigkeit von der Wellenlänge natürlich auch für den Emissionsgrad. Außerdem beeinflussen das Material, dessen Temperatur und der Abstrahlwinkel den Emissionsgrad. Ändert sich der Emissionsgrad eines Körpers innerhalb eines Wellenlängenbereiches nicht, so ist dieser Körper ein **grauer Strahler** und damit eine Sonderform des schwarzen Strahlers (Körpers) [17][43].

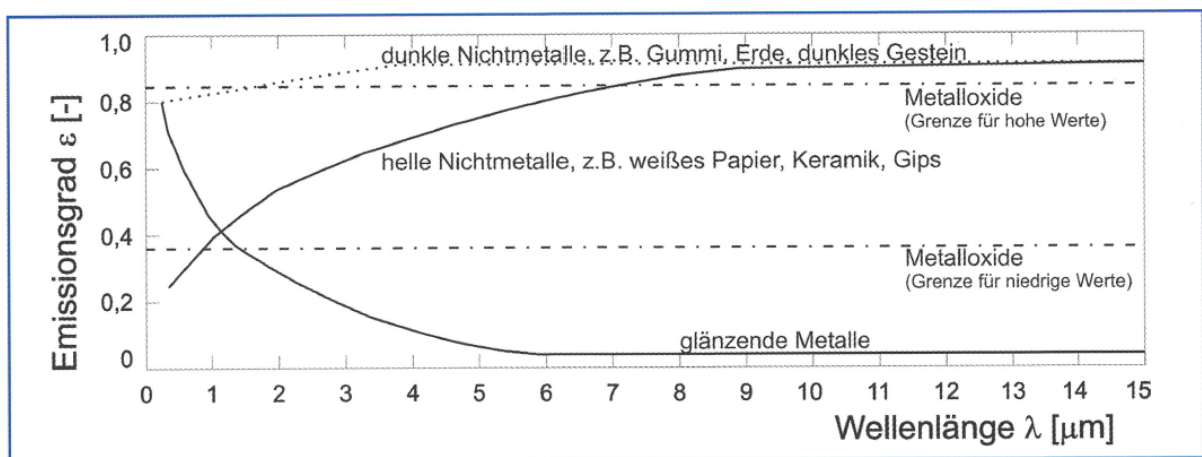


Abbildung 3.12: Emissionsgrade diverser Stoffe bei Raumtemperatur [17]

Abbildung 3.12 zeigt Emissionsgrade diverser Materialien, welche Raumtemperatur aufweisen und über ein Wellenlängenspektrum von 0 bis 15 μm aufgetragen sind. Es ist ersichtlich, dass im kurzwelligeren Bereich vor allem die Farbe des Materials für das Emissionsverhalten entscheidend ist. Dunkle Materialien, wie etwa Gummi oder Erde aber auch glänzende Metalle emittieren (bzw. absorbieren) sehr stark, während helle Materialien, wie Papier oder Keramik, kurzwellige Strahlung stark reflektieren. Für langwellige Strahlung (>8 μm) ist die Oberflächenbeschaffenheit ausschlaggebend. Man unterscheidet zwischen blanken, glänzenden Metallen, welche kaum emittieren und Nichtmetallen (inklusive nicht polierter Metalle), welche sehr hohe Emissionsgrade aufweisen [17].

Eine wichtige Eigenschaft von Glas ist, dass es für kurzwellige Strahlung (Solarstrahlung) durchlässig ist, also einen hohen Transmissionsgrad τ aufweist. Für langwellige Strahlung weist Glas jedoch ein hohes Emissionsvermögen auf. Das bedeutet, es ist für langwellige Wärmestrahlung nahezu undurchlässig und weist daher einen geringen Transmissionsgrad τ auf. Dieser Umstand kann Abbildung 3.13 entnommen werden und bildet auch die Ursache des sogenannten **Glashauseffekts** [17].

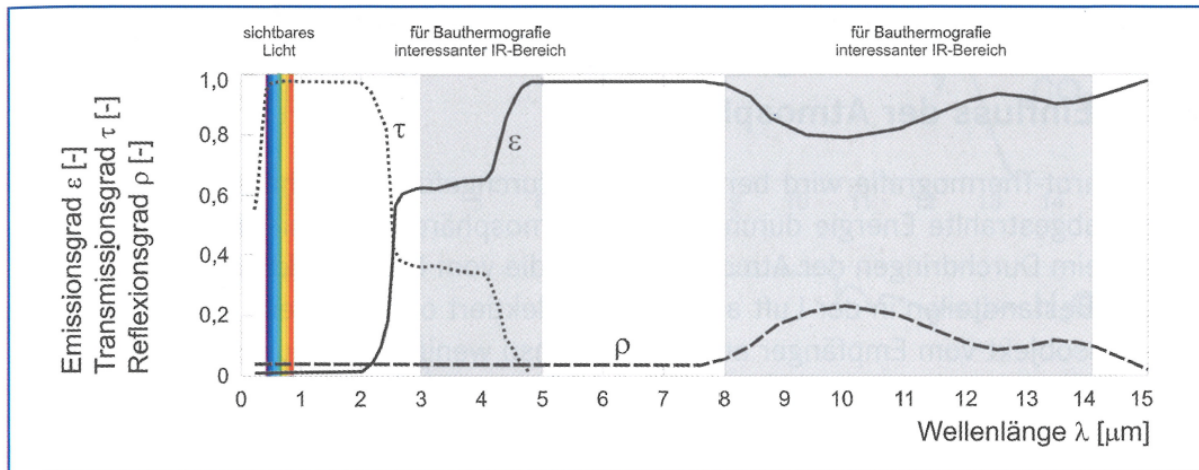


Abbildung 3.13: Emissions-, Reflexion- und Transmissionsgrad von Glas [17]

Glashauseffekt: Wie bereits erkannt, ist Glas für kurzwellige Solarstrahlung durchlässig. Das heißt, die Sonnenstrahlung wird durch das Glas hindurch transmittiert und trifft darauffolgend auf andere Gegenstände, wie etwa Wände, Böden oder Möbel. Diese Gegenstände absorbieren den größten Teil der Solarstrahlung. Diese Absorption hat einen geringfügigen Temperaturanstieg der Gegenstände zur Folge. Aufgrund dieser zwar gestiegenen, jedoch nach wie vor sehr geringen Temperatur (im Vergleich zur Temperatur der Sonne) strahlen die Gegenstände lediglich langwellige elektromagnetische Wellen aus. Da Glas für diese langwellige Strahlung undurchlässig ist, heizt sich der Raum weiter auf. Mithilfe dieses einfachen Prinzips lassen sich viele Möglichkeiten zur passiven Solarenergienutzung realisieren, um beispielsweise natürliche Lüftungskonzepte zu entwickeln oder im Winter den Heizwärmeverbrauch zu senken [37].

3.4.3 Konvektion

Der Energietransport durch strömende Fluide wird als Konvektion bezeichnet. Je nach dem wie die Strömung vorangetrieben wird, kann zwischen **freier** (natürlicher) und **erzwungener Konvektion** unterschieden werden. Auch eine Mischform beider Antriebsarten ist möglich. Diese wird als Mischkonvektion bezeichnet. Freie Konvektionsphänomene sind komplexer, da das Temperaturfeld und das Geschwindigkeitsfeld durch den thermischen Auftrieb gekoppelt sind. Zwangskonvektion weist entkoppelte Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder auf, weil die Strömung mittels äußerer Druckgradienten angetrieben wird. Der Wärmestrom bzw. die Wärmestromdichte zwischen einem Festkörper und dem vorbei strömenden Fluid wird als konvektiver Wärmeübergang definiert, wobei die maßgebenden Vorgänge innerhalb der Grenzschichten stattfinden (thermische und hydrodynamische Grenzschicht). Der Wärmeübergang kann gemäß des Newton'schen Abkühlungsgesetz (Gleichung 3.8) beschrieben werden [43]:

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha_K \cdot A \cdot (T_w - T_b) \quad \text{bzw.} \quad q_\alpha = \alpha_K \cdot (T_w - T_b) \quad (3.8)$$

Gleichung 3.8 gibt an, dass der Wärmestrom proportional zum Temperaturunterschied zwischen Wand und der Fluidtemperatur in hinreichendem Abstand zur Wand, zur wärmeübertragenden Fläche und zum **konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten** α_K [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] ist. Dieser Koeffizient hängt von einer Großzahl von Faktoren (Fluideigenschaften, Geometrie, laminare/turbulente Strömung, Strömungsgeschwindigkeit) ab und ist daher nur mit hohem Aufwand (numerische Berechnungen, experimentelle Ermittlung) berechenbar. Daher werden in der Praxis dimensionslose Kennzahlen (Prandtl-, Grashof-, Rayleigh-, Nusselt-Zahl uvm.) im Zuge einer Ähnlichkeitstheorie zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs herangezogen. Wärmetransport durch natürliche Konvektion weist typischerweise kleinere Wärmeübergangskoeffizienten auf als Transport durch erzwungene Konvektion. Das heißt, mit erzwungener Konvektion wird die Wärmeübertragung durch höhere Werte für α_K „besser“ [43].

Ähnlichkeitstheorie zur Bestimmung dimensionsloser Kennzahlen: Physikalische Vorgänge bezeichnet man als ähnlich, wenn die beispielsweise in Experimenten gemessenen Größen durch geeignete Änderung der Maßstäbe ineinander überführbar sind. Die Vorgänge werden demnach mit denselben dimensionslosen (normierten) Differentialgleichungen beschrieben. Besitzen Problemstellungen dieselben dimensionslosen Kennzahlen werden sie als strömungstechnisch ähnlich bezeichnet. Wilhelm Nußelt wandte diese Ähnlichkeitstheorie 1909 das erste Mal erfolgreich für den Wärmeübergang durch erzwungene und freie Konvektion an. Im Folgenden werden die wichtigsten dimensionslosen Kennzahlen mit ihrer Bedeutung und Berechnungsformel angegeben [43]:

- Die **Nusselt-Zahl** (Gleichung 3.9) beschreibt das Verhältnis zwischen dem Wärmestrom infolge von Konvektion und dem Wärmestrom infolge von Leitung. Außerdem gibt sie den dimensionslosen Temperaturgradienten an der Wand an und wird daher auch häufig als dimensionsloser Temperaturkoeffizient bezeichnet. Aus diesem Grund liegt es auf der Hand, dass mithilfe bekannter Nusselt-Zahlen der Wärmeübergangskoeffizient α_K ermittelt werden kann. Die Nusselt-Zahl sowie der Wärmeübergangskoeffizient α_K sind dabei vom Oberflächenort abhängig. In vielen Anwendungen ist jedoch die Berechnung mit gemittelten Nusselt-Zahlen sinnvoll.

$$Nu := \frac{\alpha_K \cdot L}{\lambda_{Fluid}} \quad (3.9)$$

- Die **Prandtl-Zahl** (Gleichung 3.10) definiert das Verhältnis zwischen dem Impulstransport infolge von Reibung und dem Wärmetransport infolge von Leitung. Daher beschreibt die Zahl auch das Verhältnis zwischen der Dicke der Geschwindigkeitsgrenzschicht und jener der Temperaturgrenzschicht (siehe Abbildung 3.14).

$$Pr := \frac{\nu}{a} \quad (3.10)$$

- Die **Grashof-Zahl** (Gleichung 3.11) gibt die Größe der Auftriebskräfte im Verhältnis zu den Zähigkeitskräften an und wird daher für freie Konvektionsphänomene angewandt.

$$Gr := \frac{g \cdot \beta \cdot |T_w - T_b| \cdot L^3}{\nu^2} \quad (3.11)$$

- Die **Rayleigh-Zahl** (Gleichung 3.12) leitet sich aus der Grashof- und der Prandl-Zahl ab und stellt das Beurteilungskriterium, ob eine freie Konvektionsströmung laminar oder turbulent ist, dar.

$$Ra := Gr \cdot Pr \quad (3.12)$$

- Die **Reynolds-Zahl** (Gleichung 3.13) gibt das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und Zähigkeitskräften an und dient zur Bestimmung der Strömungsart im Falle erzwungener Konvektionsphänomene.

$$Re := \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (3.13)$$

Die Stoffwerte, welche den Berechnungsformeln vorgegeben werden, sind temperaturabhängig. Daher setzt man sie bei einer bestimmten Bezugstemperatur zur Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen an. Bei Umströmungsproblemen wird für die Bezugstemperatur der Mittelwert aus der Temperatur des strömenden Fluids in hinreichendem Abstand zur Wand und aus der Wandtemperatur gewählt - bei Durchströmungen hingegen der Mittelwert aus Ein- und Austrittstemperatur. Darüber hinaus ist die charakteristische Länge L von der Geometrie der Problemstellung abhängig. Für längs umströmte Platten wird beispielsweise die Plattenlänge L angesetzt. Für Rohrströmungen hingegen entspricht der Rohrdurchmesser der charakteristischen Länge [43].

Korrelation für Nusselt-Zahlen bei freier Konvektion: In den durchgeführten Parameterstudien werden lediglich freie Konvektionsströmungen modelliert. Das heißt, es werden nur Auf- und Abtriebsströmungen, welche aufgrund von Dichteunterschieden von warmer und kalter Luft entstehen, modelliert. Im vorliegenden Absatz wird daher lediglich eine Korrelation für Nusselt-Zahlen für freie Konvektionsströmungen über ebene Platten angegeben. In Abbildung 3.14 sind je freie Konvektionsströmungen über vertikale, ebene Platten mit den beiden Grenzschichten dargestellt. Links weist die ebene Platte eine höhere Temperatur als das strömende Fluid auf. Das Fluid erwärmt sich, wodurch die Dichte sinkt und daher eine nach oben gerichtete Auftriebsströmung entsteht. Bei rechts dargestellter Abtriebsströmung ist es genau umgekehrt, da die Wandtemperatur unterhalb der Fluidtemperatur liegt. Bei freien Konvektionsströmungen über ebene Platten ist die Strömung in der Grenzschicht am Plattenanfang laminar, schlägt ab einer kritischen Plattenlänge x_{krit} in einen Übergangsbereich um, bis die Strömung schlussendlich turbulent wird. Laut dem Theory Guide von Ansys [2] liegt der Wert x_{krit} für freie Konvektionsströmungen bei jener charakteristischen Länge, bei welcher die Rayleigh-Zahl einen Wert von 10^8 annimmt [43].

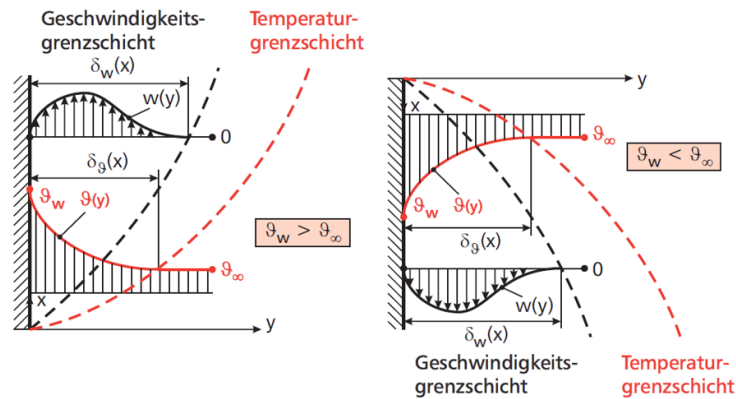


Abbildung 3.14: Auftriebsströmung an einer beheizten Wand links und Abtriebsströmung an einer gekühlten Wand rechts [43]

Für vertikale ebene Platten kann die Korrelation zur Bestimmung der Nusselt Zahl nach Churchill und Chu angegeben werden. Die Formel ist dabei für laminare und turbulente Strömungen gültig. Als charakteristische Länge zur Ermittlung der Nusselt-Zahl gilt die vertikale Höhe der Platte [43]:

$$Nu = \left[0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right]^2 \quad \text{mit} \quad f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad (3.14)$$

3.5 Aerophysikalische Grundlagen

Die Aerophysik beschäftigt sich grundsätzlich mit allen Problemstellungen, die Luftströmungen um und in Gebäuden anbelangen. Diese Disziplin ist dabei als Oberbegriff zu verstehen, da sowohl Aspekte der Thermodynamik, als auch Aspekte der Aerodynamik (Teil der Fluidmechanik, welcher sich der Strömung von Luft widmet) der Aerophysik zugeordnet werden müssen. Dazu kommt noch eine Vielzahl von Vorschriften und Anforderungen, wie zum Beispiel Behaglichkeitsanforderungen oder Vorschriften zur freien Fensterlüftung. Zunächst wird auf die Ursachen der Luftbewegungen eingegangen [46].

3.5.1 Ursachen der Strömung

Im Allgemeinen betrachtet sind immer Druckdifferenzen die antreibende Größe der Luftströmungen. Luft strömt, um den Druckausgleich zu erzielen, von Gebieten mit Überdruck in Gebiete mit Unterdruck. Voraussetzung hierfür ist, dass die Gebiete mit Über- bzw. Unterdruck miteinander verbunden sind. Grundsätzlich kann im Bereich von Doppelfassaden nach Oesterle [46] zwischen drei verschiedene Druckdifferenzen als antreibende Größe der Strömung unterschieden werden:

- Druckdifferenz durch Windeinwirkung
- Druckdifferenz durch mechanischen Antrieb
- Druckdifferenz durch thermischen Auftrieb

Druckdifferenz durch Windeinwirkung: Gebäude stellen für den Wind Hindernisse dar, weil er einen Umweg um das Gebäude herum machen muss. Dies ist der Grund, weshalb an der windzugewandten Seite (Luv) Überdruck und auf der windabgewandten Seite (Lee) Unterdruck entsteht. Der maximale Überdruck auf der Luv-Seite tritt ein, wenn die Luft an dieser Seite komplett abgebremst wird. Dieser Staudruck ergibt sich in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Die Luftmassen, welche gerade noch dem Gebäude ausweichen konnten, erhöhen an dieser Stelle ihre Geschwindigkeit. Dies ist erforderlich, weil der „Strömungsquerschnitt“ des Windes durch das Gebäude verengt wird und die Masse der Luft erhalten werden muss (Massenerhaltung). Dies wird durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten erzielt. Hinter dem Gebäude spielen Trägheitseffekte eine große Rolle, weshalb die beschleunigte Luft hinter dem Gebäude geradeaus weiter rauscht. Dadurch entsteht auf der Lee-Seite Unterdruck, welcher der vorbei strömenden Luft immer wieder turbulente Wirbel entzieht und die windabgewandte Seite mit Luft füllt. [46].

Druckdifferenz durch mechanischen Antrieb: Die Druckdifferenzen und daraus folgend die Luftströmung wird durch äußere Kräfte, zum Beispiel durch Ventilatoren, induziert. Das Funktionsprinzip von Ventilatoren ist dabei recht simpel: Der Antrieb enthält einen Rotor, dessen Drehbewegung dafür sorgt, dass Luft in eine bestimmte Richtung geschoben wird. Durch das Zusammenschieben der Luft entsteht ein Gebiet mit Überdruck. Auf der Rückseite des Ventilators entsteht aufgrund des freiwerdenden Platzes (weniger Luft im Volumen) Unterdruck. Beide Bereiche streben dann mit ihren benachbarten Luftbereichen den Druckausgleich an [46].

Druckdifferenz durch thermischen Auftrieb: Thermischer Auftrieb entsteht aufgrund des Effekts, dass Atome in warmer Luft stärker schwingen und daher mehr Platz benötigen. Da dadurch die Dichte sinkt, kann festgestellt werden, dass warme Luft leichter als kühle ist. Als Folge daraus steigt warme Luft auf, während kühle absinkt. Gerade im Hinblick auf doppelschalige Fassaden lassen sich durch thermischen Auftrieb elegant antreibende Druckdifferenzen erzeugen: Solare Strahlung gelangt durch die Außenverglasung in den Fassadenzwischenraum. Dort wird die Strahlung vom Sonnenschutz und anderen Bauteilen im FZR absorbiert - also in Wärme umgewandelt. Aufgrund der Temperaturerhöhung der Festkörper erhöht sich in weiterer Folge auch die Luft im FZR, welche somit höhere Werte als die Außenluft aufweist und somit auch leichter ist. Durch die Zu- und Abluftöffnungen steht die Luft im FZR mit der Außenluft in Kontakt, wodurch der Druckausgleich erzielt wird. Aus Sicht der warmen Fassade herrscht unten ein Unterdruck, welcher die Außenluft in den

FZR hineinzieht. Oben im FZR herrscht dagegen ein Überdruck, welcher dafür sorgt, dass die erwärmte Luft nach außen gedrückt wird (siehe Abbildung 3.15). Die Differenz zwischen dem Überdruck oben und dem Unterdruck unten entspricht dann genau dem thermischen Auftrieb. Die Größe des thermischen Auftriebs ist dabei von der effektiven Auftriebshöhe und der Übertemperatur im FZR abhängig und kann ohne Berücksichtigung von Reibungsverlusten mit der in Kapitel 6.3.3 vorgestellten Boussinesq-Approximation überschlägig ermittelt werden [46].

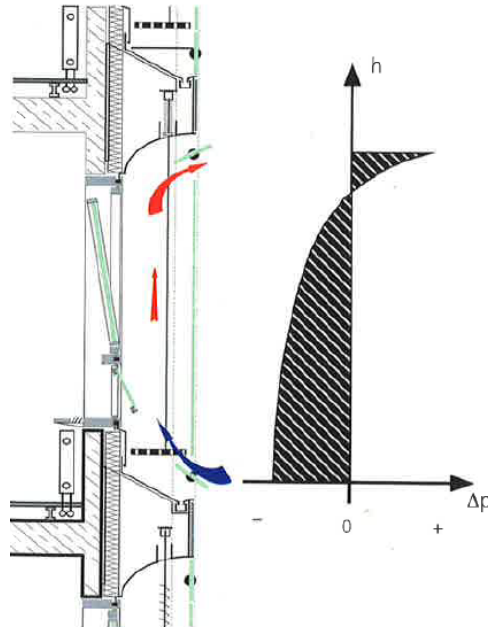


Abbildung 3.15: fig: Druckverteilung innerhalb einer Kastenfensterfassade [46]

3.5.2 Grundgleichungen

Die exakten Gleichungen, mit welchen die Strömungsphänomene innerhalb des Fassadenzwischenraums beschrieben werden können, werden an späterer Stelle in Kapitel 4.1 vorgestellt. An dieser Stelle soll lediglich angemerkt werden, dass die treibende Druckdifferenz durch Druckverluste beeinflusst wird. Diese Druckverluste sind zumeist bei den Öffnungen für Zu- und Abluft am höchsten, da dort aufgrund der geringen Öffnungshöhen sehr hohe Geschwindigkeiten (im Vergleich zu den Geschwindigkeiten im FZR) vorliegen. Für schnelle Dimensionierungen reicht es daher aus lediglich die Druckverluste an den Zu- und Abluftöffnungen zu berücksichtigen. Worauf in jedem Fall geachtet werden muss, ist die Erhaltung von Masse (Kontinuitätsgleichung). Dies bedeutet, dass durch die Zuluftöffnung genau so viel Luft einströmen muss, wie durch die Abluftöffnung ausströmt ($\dot{V}_{in} = \dot{V}_{out}$) [46].

3.6 Designkriterien

Aufgrund der komplexen Wirkungsweise von Doppelfassaden müssen, um einen zufriedenstellenden Betriebszustand zu gewährleisten, eine Vielzahl von Kriterien im Design und in der Planung berücksichtigt werden. Diese Kriterien werden im vorliegenden Kapitel genauer vorgestellt. Es werden für die Kriterien insbesondere Empfehlungen aus der Literatur angegeben, wobei vor allem darauf eingegangen werden soll, ob gewisse Designkriterien für einen optimalen sommerlichen bzw. einen optimalen winterlichen Wärmeschutz widersprüchlich sind. Barbosa et al. [7] definieren drei Gruppen von Kriterien, welche die Performance von Doppelfassaden beeinflussen. Es handelt sich hierbei um Designparameter der Fassade selbst, Gebäudeparameter und Nebenparameter.

3.6.1 Designparameter der Fassade

Die Designparameter der Fassade fassen alle Designkriterien innerhalb des Fassadenzwischenraums sowie der äußeren Verglasung zusammen. Dazu zählen beispielsweise die Tiefe des Fassadenzwischenraums, Art und Anordnung des Sonnenschutzes oder Lage und Form von Lüftungsöffnungen in der Außenverglasung [7].

Tiefe des Fassadenzwischenraums: Grundsätzlich ist eine große Vielfalt von verschiedenen Tiefen des Fassadenzwischenraums (von etwa 0,1 bis 2 m) realisierbar. Aus der Arbeit von Radhi et al. [51] geht hervor, dass der thermische Auftrieb bei schmäleren Fassadenzwischenräumen ansteigt. Dadurch entstehen stärkere Luftströmungen und die warme Luft im FZR kann effektiver abgeführt werden. Breitere Fassadenzwischenräume haben demnach einen höheren Energieeintrag in den Raum zur Folge, weil die Auftriebsströmungen geringer sind. Daher empfehlen Radhi et al. [51] Tiefen zwischen 0,7 und 1,2 m, da mit diesen eine Balance zwischen Energieeintrag (passive Solarenergienutzung) im Winter und Abführung der warmen Luft im Sommer erreicht wird.

Neigung der Außenverglasung: Brandl et al. [8] konnten in ihren Studien feststellen, dass eine geneigte Außenverglasung für eine Reduktion des Energieeintrages sorgen kann. Konkret stellten sie fest, dass dieser um 20% sinkt, wenn die Tiefe des FZR von 0,3 m auf 1,3 m erhöht wird. Diese Reduktion entsteht dadurch, dass der Anteil reflektierter Strahlung an der Außenverglasung durch die Neigung der Außenverglasung höher ist und daher weniger Energie transmittiert und absorbiert wird. Diese im Sommer durchaus erwünschten Effekte führen jedoch auch dazu, dass die Tageslichtversorgung der Innenräume verschlechtert wird [8].

Hypothetisch kann angenommen werden, dass die Neigung der Außenverglasung für einen optimalen winterlichen Wärmeschutz genau gegengleich geneigt sein sollte. Das heißt, es kann angenommen werden, dass sich der Fassadenzwischenraum von 1,3 m unten bis 0,3 m oben verjüngen soll. Hierdurch wird der umgekehrte Effekt, also die Erhöhung des Strahlungsenergieeintrages (passive Solarenergienutzung), erwartet.

Verschattungselement: Gratia und de Herde [21] untersuchten in ihrer Arbeit die effektivste Position des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum. Liegt der Sonnenschutz nahe an der inneren Fassade, weist diese dadurch höhere Temperaturen auf und der Energieeintrag in den Raum erhöht sich. Dieser Effekt ist im Winter erwünscht - im Sommer allerdings nicht. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass ein mittig angeordneter Sonnenschutz von beiden Seiten effektiv mit Luft umströmt wird, wodurch die Wärmeabfuhr aus dem Fassadenzwischenraum effizient erfolgt.

In einer weiteren Studie von Ji et al. [33] wird festgestellt, dass die Anordnung eines Verschattungselementes nicht nur die direkte solare Bestrahlung verhindert, sondern auch die Auftriebsströmungen entscheidend verbessert. In ihrer Arbeit wird außerdem der Öffnungswinkel der Lamelle variiert (fünf Winkel zwischen 0° und 80°). Durch geschlossene Lamellen (80°) kann die natürliche Belüftung (thermischer Auftrieb) des Fassadenzwischenraums um 35 % verbessert werden.

Materialeigenschaften der Außenverglasung: Perez-Grande et al. [49] haben in ihrer Arbeit den Einfluss verschiedener Glaseigenschaften auf das thermische Verhalten von Glasdoppelfassaden untersucht. Um einen geringen Energieeintrag in den Raum im Sommer zu erhalten, schlagen sie einen niedrigen Transmissionsgrad (0,1) und hohen Absorptionsgrad (0,8) der Außenverglasung kombiniert mit einem geringen Emissionsgrad (0,4) der inneren Verglasung vor. Die höchsten Massenströme innerhalb der Fassade werden hingegen mit einem hohen Absorptionsgrad (0,8) der inneren Verglasung kombiniert mit einem mittleren Absorptions- und Transmissionsgrad (je 0,4) der Außenverglasung erreicht [49].

Fassadenklasse: Die Klassifizierung von Fassaden nach Oesterle [46] wurde bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt. In den Sommermonaten, in welchen hohe Temperaturen im Fassadenzwischenraum effektiv abgeführt werden sollen, sind Fassadenklassen mit hoher Auftriebshöhe, also Schacht- oder unsegmentierte Zweite-Haut-Fassaden, zu bevorzugen. Dies liegt daran, dass die Auftriebskräfte höher sind und die daraus resultierende stärkere Luftströmung die Wärme effizient abführen kann [7].

In den Wintermonaten hingegen, sind hohe Temperaturen im FZR erwünscht, da dadurch Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste verringert werden. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass Kastenfenster- und Korridorfassaden in der kalten Jahreszeit eher empfehlenswert sind.

Lüftungsöffnungen: Die Lage und Größe der Lüftungsöffnungen sind zwei Schlüsselparameter, welche die Performance von Doppelfassaden beeinflussen. Sie haben Einfluss auf die Lufttemperatur im FZR, den thermischen Auftrieb sowie den Druckverlust, der beim Ein- bzw. Ausströmen durch die Öffnungen entsteht [7].

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass größere Lüftungsöffnungen die Wärme im FZR effektiver abführen, da höhere Strömungsgeschwindigkeiten (wegen geringeren Druckverlusten) auftreten. Torres et al. [55] geben hierfür konkrete Zahlen an: Durch Vergrößerung der Öffnungsfläche von 5 % der gesamten Fläche der Außenverglasung auf 15 % bei einer Korridorfassade können Kühllasten um etwa 3 % gesenkt werden. Im Falle einer Zweite-Haut-Fassade können durch eine Vergrößerung der Öffnungsfläche von 0,8 % der gesamten Fassadenfläche auf 2,4 % Kühllasten um 5 % gesenkt werden. Auf der anderen Seite werden durch diese Vergrößerungen im Falle der Korridorfassade die Heizlasten um 10 % und im Falle der Zweiten-Haut-Fassade die Heizlasten sogar um 21 % erhöht. Es kann demnach festgestellt werden, dass im Sommer ein großer und im Winter ein geringer Anteil der Außenverglasung offen sein sollte [55].

3.6.2 Gebäudeparameter

Gebäudeparameter sind Kriterien, welche direkt mit dem Gebäude in Verbindung gebracht werden und das Verhalten von Doppelfassaden beeinflussen. Hierzu zählen beispielsweise Materialeigenschaften der inneren Fassade oder die Gebäudehöhe und demnach die Höhe der Fassade [7].

Materialeigenschaften der Innenfassade: Üblicherweise wird für die Innenfassade neben Verglasungen, Material mit hoher thermischen Masse eingesetzt. So hat Beton beispielsweise die Fähigkeit aufgrund seiner Masse träge auf Temperaturfluktuationen zu reagieren und Temperaturspitzen zu dämpfen [7].

Verglasungsanteil: Der Verglasungsanteil wird im englischen auch Wall-Window-Ratio, also als das Verhältnis zwischen opaker Wand und Verglasungen bezeichnet. Aus hohen Verglasungsanteilen folgen hohe Energieeinträge in den Innenraum und somit das Entstehen von großen Kühllasten. Demnach sollte der Verglasungsanteil insbesondere in den Sommermonaten zu hohe Werte nicht überschreiten [6].

Gebäudehöhe bzw. Höhe des Fassadenzwischenraums: Die Größe des thermischen Auftriebs wird zu einem großen Teil durch den Höhenunterschied zwischen Lufteintritt und Luftaustritt beeinflusst. Ding et al. [11] haben den Einfluss der Fassadenhöhe in ihrer Arbeit beurteilt. Ein sogenannter „solar chimney“ überragt das Gebäude nach ihrer Empfehlung um mindestens

zwei Stockwerke. Durch die gesteigerte Höhe können die Druckdifferenzen zwischen den Zu- und Abluftöffnungen vergrößert und daher der Massenstrom im FZR gesteigert werden. Mit dieser Methode ist es daher möglich selbst die obersten Stockwerke eines Gebäudes natürlich zu belüften.

3.6.3 Nebenparameter

Auch einige externe Parameter beeinflussen das thermische Verhalten von Doppelfassaden gravierend. Hierzu zählen zum Beispiel die Orientierung der Fassade, Windgeschwindigkeiten und solare Belastung [7].

Solarstrahlung und Orientierung: Die im Fassadenzwischenraum gegenüber der Außentemperatur höhere Temperatur ist einer der wichtigsten Parameter zur Erzeugung thermischer Auftriebsströmungen. Diese Temperaturerhöhung ist jedoch nicht alleine von der Solarstrahlung abhängig, sondern auch von der Orientierung der Fassade und des umliegenden Mikroklimas. Besonders kritisch sind dabei von benachbarter Bebauung erzeugte Schatten. Die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung im FZR von der einfallenden Solarstrahlung wird auch durch Studien von Gratia und de Herde [19] belegt. Sie konnten an sonnigen Tagen eine Temperaturerhöhung von etwa 20 °C feststellen, während an bedeckten Tagen diese Steigerung lediglich etwa 10 °C betrug. Bezüglich der Orientierung gingen sie von einer nach Süden ausgerichteten Fassade aus. Sie stellten des Weiteren fest, dass vor allem Fassaden mit einer Ausrichtung nach Osten oder Westen besonders kritisch hinsichtlich der Überhitzung, des passiven Energieeintrages und der daraus resultierenden hohen Kühllasten sind. Der Grund hierfür liegt in der jeweils sehr flach stehenden Sonne in den Morgen- (Ostfassade) bzw. Abendstunden (Westfassade).

Windrichtung und Windgeschwindigkeit: In Kapitel 3.5 wurden bereits die Ursachen der Luftströmungen innerhalb des Fassadenzwischenraums definiert. Demnach kann angegeben werden, dass neben der Solarstrahlung einwirkende Windkräfte entscheidende Antriebsursachen für die Strömung sind und diese an windigen Tagen stark beeinflussen können. Gratia und de Herde [19] konnten in ihren Studien feststellen, dass Übertemperaturen im Fassadenzwischenraum von bis zu 50 °C, ohne Windeinwirkung möglich sind. Wenn zusätzlich eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s modelliert wurde, sank die Übertemperatur auf 30 °C. Gratia und de Herde [20] konnten außerdem in einer weiteren Arbeit feststellen, dass bei einer von der Fassade wegströmenden Windrichtung (Lee) alle Stockwerke gleichmäßig in den Fassadenzwischenraum entlüftet werden können (siehe Abbildung 3.16 links). Dreht sich die Windrichtung, sodass der Wind auf die Fassade zuströmt (Luv) konnten nur die unteren Stockwerke natürlich entlüftet werden, die oberen aufgrund der vorliegenden Druckdifferenzen jedoch nicht mehr (siehe Abbildung 3.16 rechts).

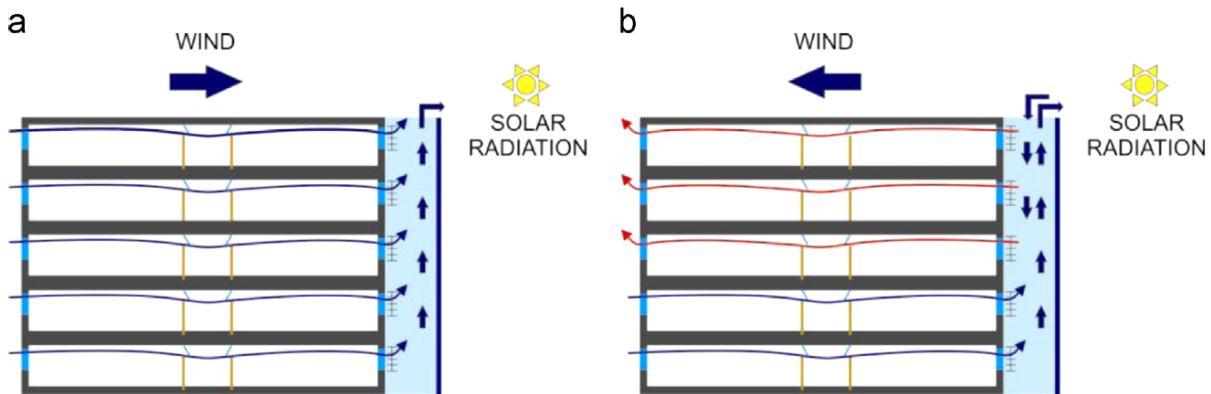


Abbildung 3.16: Natürliche Lüftung von Räumen unter dem Einfluss verschiedener Windrichtungen [20]

3.7 Adaptive Attribute

Das Konzept der Doppelschaligkeit ist eines der meistgenutzten Prinzipien, um äußeren Einflüssen zu trotzen. Geschichtlich betrachtet wurde durch die Erfindung des Kastenfensters auch schon vor langer Zeit der Grundgedanke der klimaadaptiven Fassade verfolgt. Das Kastenfenster besteht simpel aus zwei Einfachverglasungen, die einen gewissen Scheibenzwischenraum einschließen. Im Winter sind beide Verglasungen geschlossen und der Zwischenraum wird als thermischer Puffer genutzt. In der Übergangszeit bzw. im Sommer kann eine der beiden Verglasungen oder auch beide geöffnet und somit eine Durchlüftung der Räume erzielt werden.

Nicht nur mit Kastenfenstern, sondern auch mit vielen weiteren Doppelfassadentypen, welche in Kapitel 3.1 und 3.2 vorgestellt wurden, wird versucht durch diverse Anpassungen ihrer Attribute die Gebäudeperformance im Tages- und Jahresgang zu verbessern. Zu diesen Anpassungen zählt beispielsweise, dass der Fassadenzwischenraum geöffnet werden kann, sodass eine Durchlüftung erfolgt. Dies ist erforderlich, um einer Überhitzung der Innenräume in den Sommermonaten entgegen zu wirken. In den Wintermonaten können hingegen Transmissionswärmeverluste gesenkt werden, wenn die Öffnungen für Zu- und Abluft geschlossen sind. Neben dieser adaptiven Funktion ist innerhalb des Fassadenzwischenraums zumeist ein anpassungsfähiger Sonnenschutz angeordnet.

Dass es sich bei Doppelfassaden um klimaadaptive Fassadensysteme handelt, konnte im vorangegangenen Absatz festgestellt werden. Nun soll anhand der in Kapitel 2.3 gewonnenen Erkenntnisse verifiziert werden, welche Attribute doppelschalige Fassaden in Bezug auf Anpassungsfähigkeit im Detail aufweisen:

Graduelle und Selektive Adaptivität: Im Allgemeinen kann der im Fassadenzwischenraum angeordnete Sonnenschutz zumeist graduell herabgelassen und auch der Öffnungswinkel der

Lamellen variabel eingestellt werden. Gegensätzliches gilt für die Öffnungen in der Außenfassade, welche entweder geöffnet oder geschlossen sind und daher den binären Zuständen „ein“ und „aus“ entsprechen. Ebenso wird in den meisten Fällen eine selektive Adaptivität erreicht, da die Abschattung nicht innerhalb der gesamten Fassade analog angepasst werden muss. Bezüglich der selektiven Anpassung der Lüftungsöffnungen kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, da die Anzahl und Lage der Öffnungen stark vom Typ der Doppelfassade (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) abhängt. Handelt es sich zum Beispiel um eine Kastenfensterfassade ist ein selektives Öffnen möglich. Wird allerdings eine unsegmentierte Doppelfassade angewandt, kann es die Möglichkeit der selektiven Anpassung erst gar nicht geben, da nur am unteren und am oberen Ende der Fassade Öffnungen vorhanden sind.

Steuerung: Die Änderung von Eigenschaften einer Doppelfassade wird stets aktiv gesteuert. Das heißt die Lüftungsöffnungen werden beispielsweise mit pneumatischen Kolben oder Stellmotoren angetrieben. Die Anpassung des Sonnenschutzsystems kann ebenso mittels Stellmotoren, jedoch auch häufig mithilfe manueller Lösungen erfolgen.

Zeithorizont: Die verstellbaren Öffnungen für Zu- und Abluft innerhalb der Außenverglasung werden der jahreszeitlichen Zeitskala zugeordnet. Da der Sonnenschutz vor allem die Tageslichtnutzung und die Abschattung beeinflusst, wird die Anpassung durch den Raffstore innerhalb von Minuten erfolgen.

Effekte der Anpassung: Doppelschalige Fassaden sind ein Paradebeispiel dafür, dass klimadaptive Fassaden durch ihre Anpassung quasi nie nur auf einen der in Kapitel 2.3.4 definierten Bereiche Effekte ausüben. Durch das Vorhandensein der Verschattung liegt es auf der Hand, dass durch deren Anpassung optische Effekte (Tageslichtnutzung) resultieren. Durch geöffnete Lüftungsöffnungen werden Luftströmungen in Form natürlicher Konvektionsströmungen erzeugt, wodurch Doppelfassaden auch dem physikalischen Bereich „Luftströmungen“ (Kühlung durch Luftbewegung, natürliche Lüftung) zugeordnet werden können. Daneben verbessert die Konfiguration mit geöffneter Außenverglasung den (sommerlichen) Wärmeschutz. Geschlossene Lüftungsöffnungen hingegen erhöhen die Wärmedämmung. Es kann demnach erkannt werden, dass auch thermische Effekte aus den Anpassungen der Fassadeneigenschaften folgen. Hypothetisch können Anpassungen von Doppelfassaden selbst elektrische Effekte auslösen. Hierzu kann beispielsweise die aktive Nutzung der im Fassadenzwischenraum entstehenden Wärme durch Wärmeübertrager oder Abluftwärmepumpen gezählt werden (Energietransport).

Inspirationspool: Da die Grundanpassungen von Doppelfassaden keineswegs durch innovative Materialien erfolgen, kann daraus der Schluss gezogen werden, dass das Grundkonzept aus Phänomenen der Natur hervorgeht. In der Tat wenden zum Beispiel Termiten thermische Lüftungen über Solareffekte in ihren Bauten an. Termitenbauten bestehen im oberen Bereich

aus kaminartigen Dukten. Erwärmt sich die Luft innerhalb dieser Kamine aufgrund solarer Einstrahlung, steigt die erwärmte Luft auf und der dadurch entstehende Unterdruck zieht kühlere Luft aus der Basis der Bauten nach [44]. Dieser analoge Effekt wird für die Funktion von Doppelfassaden eingesetzt. Auch hier sorgt ein entstehender Unterdruck innerhalb des Fassadenzwischenraums dafür, dass kühle Luft durch die untere Lüftungsöffnung in den FZR einströmt und die erwärmte Luft an der oberen Öffnung der Außenverglasung wieder austritt.

Dimension der Anpassung: Da die Anpassung sichtbare Bewegungen innerhalb der Fassade zur Folge hat, werden Doppelfassaden als Smart-Structures bezeichnet. Die auftretenden Bewegungen sind dabei Klappen der Lüftungsöffnungen, Rotation der Einzellamelle sowie Gleiten der Lamellen entlang einer Schienen- oder Seilführung.

4 CFD - Grundlagen

Die numerische Untersuchung von diversen Strömungsprozessen wird als CFD (englisch: computational fluid dynamics) bezeichnet. Strömungsprobleme werden in mathematischer Form durch partielle, nichtlineare Differentialgleichungen (Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie) dargestellt, welche analytisch bis auf wenige Spezialfälle nicht gelöst werden können. Mittels CFD werden diese sogenannten Grundgleichungen der Strömungsmechanik mittels Methoden, welche aus der numerischen Mathematik hervorgehen gelöst. Hierfür wird das Rechengebiet in kleine Gebiete unterteilt (Vernetzung, Diskretisierung, englisch: Meshing) und das Strömungsfeld durch Definition von Randbedingungen in diskreten Punkten im Rechendomän berechnen [54].

CFD wird vor allem dann eingesetzt, wenn eine experimentelle Untersuchung nicht möglich oder die Kosten dafür zu hoch sind. Numerische Strömungsmechanik wird unter anderem zur Ermittlung von Auftriebswerten im Flugzeugbau oder zur Verifizierung von Innenströmungen in Gebäuden eingesetzt. Dies sind nur zwei von vielen Anwendungsmöglichkeiten von CFD-Berechnungen. Als Anwender von CFD-Tools muss man sich jedoch bewusst sein, dass es sich bei numerischen Lösungen immer um Näherungslösungen handelt, die nicht den exakten Lösungen entsprechen. Die Genauigkeit von numerischen Lösungen muss daher kritisch betrachtet und analysiert werden. Abweichungen zwischen genauer- und Näherungslösung können während allen Teilschritten einer CFD-Simulation entstehen [15][54]:

- Durch **Modellierung**, da Differentialgleichungen beispielsweise Näherungen enthalten können und somit das physikalische Phänomen nicht akkurat beschrieben wird.
- Durch **Diskretisierung**, da Ergebnisse der diskretisierten, algebraischen Gleichungen Abweichungen zu den exakten Lösungen der partiellen Differentialgleichungen aufweisen.
- Durch das Lösen der Gleichungen (**Iteration**) - eine exakte Lösung würde erst nach unendlich vielen Iterationsschritten erzielt werden.

4.1 Modellierungsgleichungen

Wie einleitend bereits dargestellt müssen physikalische Problemstellungen mathematisch formuliert und modelliert werden. Dies erfolgt durch Erhaltungssätze für Masse, Impuls in allen Koordinatenrichtungen und thermischer Energie. Die fünf Erhaltungsgleichungen werden als (vollständige) **Navier-Stokes-Gleichungen** bezeichnet. Als vollständig werden diese bezeichnet, weil mit ihnen Strömungen vollständig beschrieben sind, also auch mit den kleinsten Turbulenzen. Oft ergeben sich für Navier-Stokes-Gleichungen auch Vereinfachungen, wie zum Beispiel bei stationären oder reibungsfreien Strömungen. Formal besitzen alle Erhaltungssätze den selben Aufbau, welcher durch die prototypische Modellgleichung in Gleichung 4.1 beschrieben wird. In dieser kann ϕ jede Strömungsgröße, wie etwa eine Geschwindigkeit oder die innere Energie, annehmen. Eine genaue Herleitung der Grundgleichungen der Strömungsmechanik kann beispielsweise [39] entnommen werden. Nachfolgend werden die Gleichungen lediglich angeführt und beschrieben [39][54].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + Q_\phi \quad (4.1)$$

Gleichung 4.1 ist in Differentialform dargestellt. Neben dieser Darstellung können die Erhaltungsgleichungen auch in Integralform dargestellt werden. Die geforderte Darstellungsart hängt von der Diskretisierungsmethode ab. Während die Finite-Differenzen-Methode von Grundgleichungen in Differentialform ausgeht, müssen sie für die Finite-Volumen-Methode in integraler Form vorliegen [39].

Des Weiteren sind neben den zuvor erwähnten Grundgleichungen der Strömungsmechanik auch weitere Modellierungsgleichungen notwendig, um alle physikalischen Phänomene abbilden zu können. Im Zuge der nachfolgenden Beschreibungen wird nur auf jene Modellierungsgleichungen eingegangen, welche im Zuge der Durchführung der Parameterstudien zur Anwendung kommen.

4.1.1 Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \rho\vec{v}) = 0 \quad (4.2)$$

Gleichung 4.2 zeigt die **Kontinuitätsgleichung**, den Erhaltungssatz für Masse. Sie sagt aus, dass die zeitliche Änderung der Masse des Kontrollvolumens der Summe der einströmenden Massenströme minus der Summe der ausströmenden Massenströme entspricht. In Formel 4.2 ist die Kontinuitätsgleichung in Vektorschreibweise dargestellt. Alternativ kann sie durch Auswertung des Nabla-Operators ∇ auch wie folgt angeschrieben werden [45]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

Im Falle eines inkompressiblen Fluids, das heißt eines Fluids mit konstanter Dichte kann die Kontinuitätsgleichung weiter vereinfacht werden, indem die Dichte gekürzt wird (siehe Gleichung 4.4) [45].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

4.1.2 Impulsgleichungen

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u \cdot v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot u \cdot w - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v \cdot u - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v^2 + p - \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v \cdot w - \tau_{zy}) - \rho \cdot g_y = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot w \cdot u - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot w \cdot v - \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w^2 + p - \tau_{zz}) - \rho \cdot g_z = 0 \quad (4.7)$$

Die Formeln 4.5 bis 4.7 stellen die Impulsgleichungen für die drei Koordinatenrichtungen x, y, z in kartesischen Koordinaten dar. Die Gleichungen sagen aus, dass die zeitliche Änderung des Impulses des Kontrollvolumens der Summe der eintretenden Impulsströme minus der Summe der austretenden Impulsströme plus die Summe der auf das Volumenelement wirkenden Scherkräfte und Normalspannungen plus den Massenkräften entspricht [45][39].

Die noch unbekanntenen Schub- und Normalspannungen, welche durch Reibung entstehen, können durch Geschwindigkeitsgradienten beschrieben werden. Hierbei wird zwischen sogenannten Newtonschen- und Nicht-Newtonschen Fluiden unterschieden. Bei erst genannten sind die Spannungen direkt proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten, während bei Nicht-Newtonschen Fluiden keine Proportionalität besteht. Die Stokesschen Beziehungen geben den Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten und den Spannungen an [39]:

$$\tau_{xx} = \mu \cdot \left[2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] \quad (4.8)$$

$$\tau_{yy} = \mu \cdot \left[2 \cdot \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] \quad (4.9)$$

$$\tau_{zz} = \mu \cdot \left[2 \cdot \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] \quad (4.10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \cdot \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \quad (4.11)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.12)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \cdot \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (4.13)$$

Der Proportionalitätsfaktor μ wird als dynamische Viskosität oder Zähigkeit des Fluids bezeichnet und hat die Einheit $\frac{N \cdot s}{m^2}$ [39].

Schlussendlich lassen sich die drei Impulsgleichungen für inkompressible Fluide in Vektorschreibweise wie folgt darstellen [45]:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla} u) \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho f_x^B \quad (4.14)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla} v) \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho f_y^B \quad (4.15)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla} w) \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho f_z^B \quad (4.16)$$

Die linke Seite der in den Formeln 4.14 bis 4.16 dargestellten Impulsgleichungen beschreibt eine lokale und konvektive Beschleunigung, welche durch den Transport einer Strömungsgröße ϕ entsteht. Verantwortlich für die Strömungsbeschleunigung sind Reibungs- und Druckkräfte. Auf der rechten Seite stehen die Terme, welche den diffusiven Impulstransport beschreiben sowie Massenkräfte (Volumenkräfte) und Oberflächenkräfte [45][54].

4.1.3 Energiegleichung

Der Energieerhaltungssatz geht aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik hervor (siehe Gleichung 4.17). Dieser sagt aus, dass die zeitliche Änderung der Gesamtenergie E_{ges} am Kontrollvolumen der Leistung \dot{W} plus dem Wärmestrom \dot{Q} in das Volumenelement entspricht. Die Gesamtenergie E_{ges} setzt sich aus der inneren, der kinetischen und der potentiellen Energie zusammen. Die Leistung \dot{W} erhält man aus dem Produkt von Kraft mal Geschwindigkeitskomponente in Kraftangriffsrichtung. Folglich setzt sich die Leistung ebenso aus drei Komponenten zusammen: Der Erdbeschleunigung g , welche auf das Volumenelement wirkt, dem Druck p , welcher als Oberflächenkraft am Kontrollvolumen wirkt und den Normal- und Schubspannungen welche ebenso an der Oberfläche des Volumenelements wirken. Der Wärmestrom \dot{Q} setzt sich aus einem Anteil aus Wärmeleitung über die Oberfläche des KV, einem Anteil aus Wärmestrahlung, der auf das KV wirkt und einem Anteil aus Konvektion, welcher allerdings unberücksichtigt bleibt, da sich das Kontrollvolumen mit der Strömung mit bewegt, zusammen. Werden nun alle Komponenten berücksichtigt ergibt sich aus Gleichung 4.17 der Energieerhaltungssatz (siehe Gleichung 4.18) [39].

$$\frac{dE_{ges}}{dt} = \dot{W} + \dot{Q} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \cdot \left(e + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \cdot u \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \cdot v \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{yx} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \cdot w \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{v}^2 \right) - (u \cdot \tau_{zx} + v \cdot \tau_{zy} + w \cdot \tau_{zz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ - \rho \cdot (u \cdot g_x + v \cdot g_y + w \cdot g_z) = 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.1.4 Vereinfachungsmöglichkeiten

Rechenzeiten für Problemstellungen der numerischen Strömungsmechanik liegen oft bei einigen Stunden oder gar Tagen. Oft ist es außerdem notwendig viele Varianten mit leicht verändernder Geometrie in kurzer Zeit zu berechnen. Daher ist es für technische Anwendungen zwingend erforderlich Rechenzeiten zu minimieren. Infolgedessen werden für Anwendungsfälle häufig CFD-Tools herangezogen, welche auf vereinfachten Erhaltungsgleichungen beruhen. So können beispielsweise Druckverteilungen um Profile bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten (hohe Reynoldszahlen) auch relativ genau reibungsfrei mit Euler-Gleichungen berechnet werden. Können auch Verdichtungsstöße ausgeschlossen werden, so kann mit Zuhilfenahme von Potentialgleichungen eine ausreichende Genauigkeit der Ergebnisse erreicht werden. Abbildung 4.1 zeigt einige Vereinfachungsmöglichkeiten der Grundgleichungen der Strömungsmechanik [39].

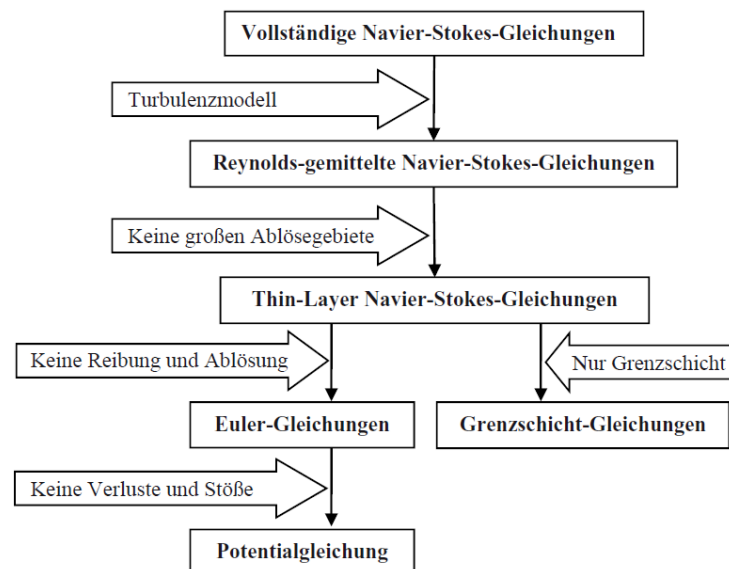


Abbildung 4.1: Vereinfachungsmöglichkeiten von Navier-Stokes-Gleichungen [39]

Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen: Da die meisten CFD-Programme auf Reynolds-Gleichungen (oder Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen) beruhen, werden diese im Folgenden etwas detaillierter beschrieben.

Das Grundkonzept für diese Vereinfachung stellt die sogenannte Reynolds-Zerlegung dar, in welcher turbulent schwankende Strömungsgrößen ϕ in einen Mittelwert $\bar{\phi}$ und die Fluktuation ϕ' zerlegt werden. Dies ist in Gleichung 4.19 dargestellt [54][39].

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.19)$$

In technischen Anwendungsfällen sind zumeist nur die Mittelwerte der Strömungsgrößen von Interesse. Die Schwankungen hingegen sind in ihrem Detail schwer bestimmbar und

auch weniger interessant als die Größen der Mittelwerte. Wohl aber ist es wichtig die Auswirkungen der stochastischen Schwankungen auf die mittlere Strömung zu erfassen. Durch die Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen in Reynolds-Gleichungen wird also eine zeitliche Mittelung der Zustandsgrößen, in welchen Einflüsse durch turbulente Schwankungen erfasst werden, erzielt. Navier-Stokes-Gleichungen sind für zeitlich, veränderliche Strömungen gültig. Als Folge daraus müssen sie auch für die Mittelwerte der Strömungsgrößen gelten. Das prinzipielle Vorgehen besteht darin jeden Term der Navier-Stokes-Gleichung zeitlich zu mitteln, das heißt Gleichung 4.19 in die Grundgleichungen einzusetzen. Nach Umformungen können die Reynolds-Gleichungen (Kontinuität Gleichung 4.20; Impuls in x-Richtung 4.21) für inkompressible Strömungen angegeben werden [38]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4.20)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{\rho u'^2} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{\rho u'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho u'w'} \right) \quad (4.21)$$

Durch die Mittelung sind neue Terme (zweite Klammer auf der rechten Seite der Gleichung 4.21) in der Impulsgleichung entstanden, welche als Reynoldsspannungen oder turbulente Spannungen bezeichnet werden. Diese Größen werden mit Hilfe von Turbulenzmodellen in Abhängigkeit von den mittleren Strömungsgrößen durch zusätzliche Transportgleichungen, bestimmt. Einige Turbulenzmodelle werden im folgenden Kapitel vorgestellt [38].

4.1.5 Turbulenzmodellierung

Turbulenzmodelle gibt es grundsätzlich viele, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass keines generell einem anderen überlegen ist. Je nach Anwendungsfall eignen sich einzelne Turbulenzmodelle mehr als anderes. Das mit Abstand am weitesten verbreitete Modell in CFD-Simulationen ist das Standard-k-ε-Turbulenzmodell. In weiterer Folge wird lediglich dessen Modifizierung, das **RNG-k-ε-Turbulenzmodell** vorgestellt, da es auf Empfehlung von Pasut und de Carli [48] im Zuge der durchgeführten Parameterstudien angewandt wird. An dieser Stelle werden lediglich weitere Turbulenzmodelle der Vollständigkeit halber angegeben [54]:

Zwei-Gleichungsmodelle:

- Standard-k-ε-Modell
- RNG-k-ε-Modell
- Realizable-k-ε-Modell
- Wilcox-k-ω-Modell, Menter-SST-k-ω-Modell

Ein-Gleichungsmodelle

- Spalart-Allmaras-Modell

Reynolds-Spannungs-Modelle

- LRR-RSM-Modell

RNG-k- ϵ -Turbulenzmodell: Ganz allgemein zählt die Gruppe der Zwei-Gleichungsmodelle zu den Transportmodellen. Das bedeutet, dass die charakteristischen Größen der Turbulenz mittels Transportgleichungen modelliert werden. Dabei treten, wie zuvor schon diskutiert, zwei Transportmechanismen auf: Zum einen der Transport mit der Strömung (Konvektion) und zum anderen der Transport durch Vermischung (Diffusion). Das heißt Turbulenz wird an einer bestimmten Stelle in der Strömung produziert, an einen anderen Ort weiter transportiert und an dieser Stelle durch Reibung aufgebraucht. Dieser Mechanismus muss mit Differentialgleichungen beschrieben werden. Das Standard-k- ϵ -Modell (und daher auch das RNG-Modell) zählt zu den Wirbelviskositätsmodellen, in welchen die verschiedenen Reynoldsspannungen, welche im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, durch einen einzigen Parameter und zwar durch die **Wirbelviskosität** μ_t modelliert werden. Aus der Turbulenztheorie geht hervor, dass es sich bei Turbulenz um ein zweiparametriges Problem handelt. Das heißt Turbulenz muss durch zwei Parameter beschreibbar sein. Die k- ϵ -Modelle ziehen hierfür die beiden unabhängigen Größen **k (turbulente kinetische Energie)** und **ϵ (Dissipationsrate)** zur Modellierung heran. Die Bewegungsenergie ist dabei vorwiegend in den großskaligen Wirbeln enthalten. Diese Wirbel sind instabil und zerfallen in kleinere Wirbel. So entsteht eine Vielzahl von Wirbeln mit verschiedener Form und Größe, welche das turbulente Frequenzspektrum abbilden. Anders als die kinetische Energie, welche an großskalige Wirbel gebunden ist, ist die Wirkung von Reibung und Dissipation umso ausgeprägter, je kleiner die Wirbel sind. Für beide Parameter werden unabhängige Transportgleichungen, die ϵ - und die k-Gleichung eingeführt [38]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\mu_t \partial k}{G_k \partial x_j} \right] - \rho \dot{\epsilon} \quad (4.22)$$

Gleichung 4.22 stellt die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie dar, welche für das Standard- und das RNG-k- ϵ -Modell analog ist. Der erste Term links steht für die zeitliche Änderung von k. Der zweite Term bezeichnet den Transport der kinetischen Energie mit der Strömung (Konvektion). Auf der rechten Seite befindet sich ein Quellterm mit den enthaltenen Reynoldsspannungen, zwei Diffusionsterme (molekulare- und turbulente Diffusion) sowie ein Dissipationsterm pro Kontrollvolumen (rechts außen). G_k ist ein empirischer Korrekturfaktor [38][54].

Beim RNG-k- ϵ -Turbulenzmodell (RNG steht für renormalization group) wird eine statistische Technik angewandt, welcher sich aus der Renormierungstheorie entwickelt hat. Wie

anhand der k -Gleichung schon erkannt wurde, weist das RNG- und das Standard- k - ϵ -Modell Analogien auf, jedoch verfügt das RNG-Modell über Verfeinerungen, welche die Ergebnisse der Simulationen genauer und verlässlicher machen. Zu den Verfeinerungen zählen beispielsweise ein zusätzlicher Term in der ϵ -Gleichung und eine analytische Berechnung für turbulente Prandtl Zahlen. Bei der Herleitung ergeben sich ϵ -Gleichungen mit anderen Konstanten, als sie beispielsweise im Standard-Modell auftreten. Die Transportgleichung für die Dissipation ist in Gleichung 4.23 dargestellt [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (4.23)$$

In der ϵ -Gleichung repräsentiert G_k die Erzeugung turbulenter kinetischer Energie aufgrund Geschwindigkeitsgradienten und G_b die Erzeugung kinetischer Energie aufgrund thermischen Auftriebs. Der Parameter α_ϵ beschreibt die effektive Prandtl Zahl, welche durch eine analytische Gleichung ermittelt wird. S_ϵ stellt einen benutzerdefinierten Quellterm dar. Wie diese Parameter sowie die effektive Wirbelviskosität μ_{eff} , der zusätzliche Term R_ϵ , welcher den Hauptunterschied zwischen dem Standard- k - ϵ -Turbulenzmodell und dem RNG- k - ϵ -Modell ausmacht und die Modellkonstanten $C_{1\epsilon}$ und $C_{2\epsilon}$ berechnet werden, kann beispielsweise [2] oder [54] entnommen werden [2].

Behandlung an Festkörperändern: Turbulente Strömungen werden signifikant durch das Vorhandensein von Festkörperändern beeinflusst. Die Haftbedingung, welche an den Wänden erfüllt werden muss, steht in Beziehung mit dem mittleren Geschwindigkeitsfeld. Sehr nahe an der Wand gibt es verschiedene Größenskalen und physikalische Prozesse, welche in verschiedenen Abständen zur Wand stattfinden. So kann die nahe Wandregion in drei Schichten unterteilt werden [2]:

- In der innersten Schicht, der sogenannten **viskosen Unterschicht** ist die Strömung nahezu laminar und die Viskosität spielt beim Transport von Impuls, Masse oder Energie eine entscheidende Rolle.
- In der äußersten Schicht, der **voll-turbulenten Schicht** ist großskalige Turbulenz von großer Bedeutung.
- In der dazwischenliegenden, mittleren Schicht sind sowohl die Effekte aus der molekularen Viskosität als auch Turbulenz sehr wichtig. Diese Schicht wird als **Bufferschicht** bezeichnet.

Die Dicken der unterschiedlichen Schichten werden mithilfe des universellen Wandgesetzes durch Einführung einer dimensionslosen Koordinate y^+ festgelegt. Diese wird in Gleichung 4.24 definiert. Dabei stellt u_τ die Schubspannungsgeschwindigkeit, τ_W die Schubspannung an der Wand, ρ die Dichte des Fluids, ν die kinematische Viskosität und y den tatsächlichen

Abstand zum Festkörperwand dar. Des weiteren ist die entdimensionierte Geschwindigkeit u^+ angegeben [38].

$$y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_W}{\rho}} \quad u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (4.24)$$

In Abbildung 4.2 ist das universelle Wandgesetz, welches die Geschwindigkeitsverteilung, $u^+(y^+)$ beschreibt, dargestellt. Die Verteilung gliedert sich, wie zuvor beschrieben, in drei Bereiche. Der erste, die viskose Unterschicht, erstreckt sich von der Wand bis etwa $y^+ = 5$. In diesem ist ein näherungsweise linearer Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung $u^+ = y^+$ erkennbar. Im äußersten Bereich, welcher etwa ab $y^+ > 70$ beginnt, geht die Strömung in den voll-turbulenten Bereich über und die Geschwindigkeitsverteilung lässt sich durch das sogenannte **logarithmische Wandgesetz** beschreiben (siehe Gleichung 4.25). κ bezeichnet die Karman-Konstante, welche für alle Fluide etwa einen Wert von 0,4 einnimmt. Die Konstante C spiegelt die Oberflächenrauigkeit der umströmten Oberfläche wider und kann für glatte Oberflächen etwa $C \approx 5,5$ gesetzt werden. Im mittleren Bereich, der Bufferschicht ist weder der lineare Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung, noch das logarithmische Wandgesetz gültig. Folglich kann die Verteilung der Geschwindigkeit dieser Schicht nur über einen komplexen Zusammenhang, also durch die vollständige Auswertung des zugrundeliegenden Integrals ermittelt werden [54].

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (4.25)$$

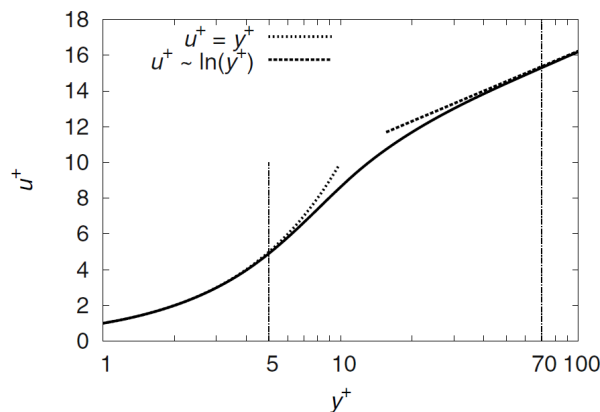


Abbildung 4.2: Universelles Wandgesetz [54]

Abschließend müssen dem Turbulenzmodell Randbedingungen für das Geschwindigkeitsprofil an Festkörperwänden vorgegeben werden. Hierfür können zwei Strategien angewandt werden (siehe Abbildung 4.3) [38]:

1. Vorgabe der tatsächlichen Randbedingungen: Hierzu muss die viskose Unterschicht, sowie die weiteren Schichten innerhalb der Wandregion numerisch aufgelöst werden. Dabei

ist es von großem Interesse, dass der dimensionslose Wandabstand zum ersten Netzpunkt ungefähr $y^+ \approx 1$ beträgt, um die Auflösung der laminaren (viskosen) Unterschicht genau genug durchzuführen. Direkt am Festkörperwand gilt die Haftbedingung in welcher, der zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsvektor dem Null-Vektor entspricht. Der Ansatz der tatsächlichen Randbedingungen wird als **Enhanced-Wall-Treatment** (deutsch: erweiterte-Wand-Behandlung) bezeichnet und wird zumeist für das RNG-k- ϵ -Turbulenzmodell und Strömungen mit niedrigen Reynoldszahlen angewandt [38][2].

- Bei Strömungen mit hohen Reynoldszahlen ergeben sich unter Anwendung des logarithmischen Wandgesetzes hinreichend genaue Ergebnisse, um die Region nahe zur Wand zu approximieren. Dieser Ansatz wird häufig als **Wall-Function** (deutsch: Wandfunktion) bezeichnet. Das Gitter muss im Vergleich zur erst genannten Strategie relativ grob sein ($y^+ > 30$), da die hohen Gradienten zwischen Wand und dem ersten Netzpunkt überbrückt werden. Diese Strategie wird mit dem Standard-k- ϵ -Modell verfolgt [38].

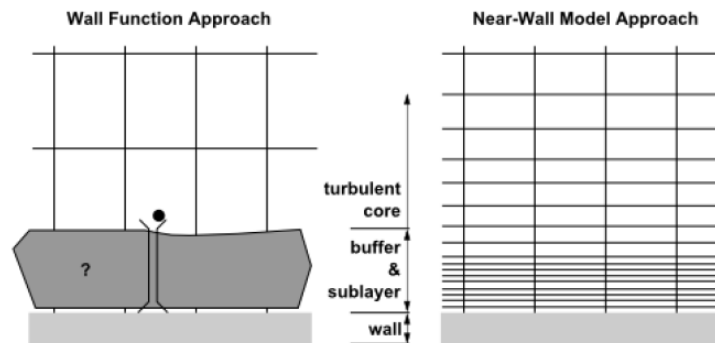


Abbildung 4.3: Strategien zur Behandlung der wandnahen Zone [2]

4.1.6 Strahlungsmodellierung

Zur Lösung der Strahlungstransportgleichung (RTE - radiative transfer equation) gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. An dieser Stelle wird lediglich die diskrete Ordinate-Methode (englisch: Discrete Ordinates Radiation Model - DO model) genauer beschrieben. Die DO-Methode modelliert die Strahlungstransportgleichung für eine finite Anzahl an Raumwinkel, wobei jeder dieser Raumwinkel mit einem Richtungsvektor \vec{s} in Verbindung steht. Die Feinheit der räumlichen Diskretisierung muss dabei vorgegeben werden. Jeder Oktant des dreidimensionalen Raumes 4π wird an jeder räumlichen Stelle in $N_\theta \times N_\phi$ Raumwinkel (Kontrollwinkel) diskretisiert. Die Ausdehnung aller Kontrollwinkel ist dabei konstant. Die Winkel Φ und ϕ repräsentieren den Polar- und den Azimutwinkel. Das DO Modell löst pro Richtungsvektor \vec{s} eine Transportgleichung (siehe Gleichung 4.26) für die Strahlungsintensität, wobei die Lösungsmethode analog zu jenen für die Grundgleichungen ist [2].

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s}, \vec{s}')d\Phi' \quad (4.26)$$

Ebenso ist es möglich nicht-graue Strahler, also Körper deren strahlungsrelevante Eigenschaften Wellenlängen-abhängig sind, zu modellieren. Dies erfolgt mit einem sogenannten grauen-Band-Modell. Diese Implementierung erfordert, dass das Wellenlängenspektrum der elektromagnetischen Strahlung in N Bänder unterteilt wird, wobei die Bänder zwingend aneinander angrenzen müssen. Die Strahlungstransfergleichung wird über beide Wellenlängenintervalle integriert und Randbedingungen für das Strahlungsmodell können pro Band angegeben werden. In der Strahlungstransfergleichung (Gleichung 4.26) gibt λ die Wellenlänge an, a_λ den Absorptionskoeffizient pro Band und $I_{b\lambda}$ stellt die Strahlungsintensität des schwarzen Körpers dar, welche durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben wird. Der Streukoeffizient σ_s sowie der Brechungsindex n weisen keine Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung auf [2].

Werden kartesische Netze (Elementränder stehen orthogonal aufeinander) verwendet so kann die globale räumliche Diskretisierung an die Flächen der Kontrollvolumina angeglichen werden. In unstrukturiertes Gittern ist dies im Allgemeinen allerdings nicht möglich, was zu dem Problem des Kontrollwinkel-Überhangs führt. In Abbildung 4.4 ist links dargestellt, wie die räumliche Diskretisierung gut an das globale Rechengitter angepasst ist, wodurch kein Kontrollwinkel-Überhang entsteht. Auf der rechten Seite ist ein überhängender Kontrollwinkel dargestellt, welcher zum Teil auf der Seite des einstrahlenden KV-Rand und zum anderen Teil auf der Seite des ausstrahlenden KV-Rand liegt. Die überhängenden Raumwinkel müssen durch besondere Maßnahmen berücksichtigt werden. Dies erfolgt mithilfe der sogenannten Pixelation der Kontrollwinkel, mit welcher alle überhängenden Raumwinkel in $N_{\Phi p} \times N_{\phi p}$ -Pixel unterteilt werden [2].

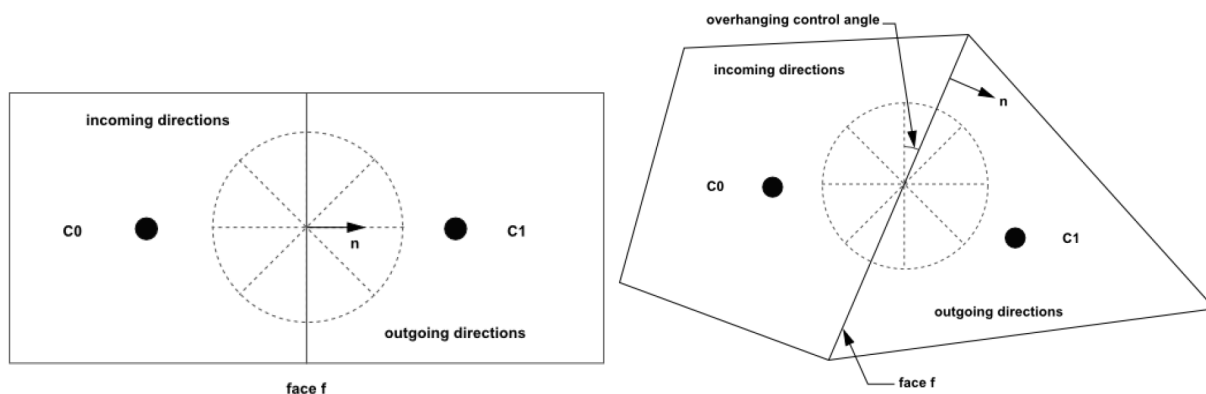


Abbildung 4.4: Gute Verknüpfung der räumlichen Diskretisierung mit der globalen Vernetzung am strukturierten Gitter links und Kontrollwinkel-Überhang am unstrukturierten Gitter rechts [2]

4.2 Eigenschaften numerischer Berechnungsverfahren

Konsistenz: Bei numerischen Lösungen handelt es sich um keine exakten Lösungen. Die Abweichung von den exakten zugrundeliegenden Differentialgleichungen zu den diskretisierten Gleichungen wird als Abbruchfehler bezeichnet. Um eine konsistente Lösung zu gewährleisten muss dieser Abbruchfehler gegen Null konvergieren [15].

Stabilität: Bei iterativen Lösungsmethoden bedeutet Stabilität, dass Lösungen nicht divergieren. Das heißt, dass der Unterschied des Ergebnisses einer Strömungsgröße zwischen zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten nicht anwächst und gegen unendlich steigt [15].

Konvergenz: Als konvergent wird eine Methode bezeichnet, bei jener die Lösung der diskretisierten Gleichungen bei kleinen Gitterabständen zu jener Lösung der exakten Differentialgleichungen tendiert [15].

Konservativität: Da Erhaltungsgleichungen gelöst werden, muss das numerische Verfahren diese Gesetzmäßigkeiten auch erfüllen. Das heißt es muss sowohl eine lokale- als auch globale Erhaltung von Strömungsgrößen erzielt werden. Je nach Diskretisierungsmethode ist diese Forderung sowohl für das einzelne KV als auch für das gesamte Rechengebiet von vornherein garantiert (FVM) oder es sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich (FDM) [15].

Beschränktheit: Unter Beschränktheit versteht man, dass numerische Lösungen für gewisse Größen in bestimmten Grenzen liegen, oder dass manche Größen (wie etwa die Dichte oder kinetische Energie) keine negativen Vorzeichen annehmen können [15].

Realisierbarkeit: Zu komplizierte Phänomene, welche durch CFD-Modelle nicht direkt behandelt werden können (z.B. Turbulenz, Verbrennung), müssen so abgebildet werden, dass physikalisch realistische Ergebnisse garantiert werden können [15].

Genauigkeit: Numerische Lösungen sind Näherungslösungen. Prinzipiell kann zwischen drei Arten von Fehlern unterschieden werden. **Modellfehler**, welche als Differenz zwischen der realen Strömung und des mathematischen Modells auftreten. **Diskretisierungsfehler** geben den Unterschied zwischen der exakten Lösung der partiellen Differentialgleichung und der numerischen Lösung des algebraischen Gleichungssystems an. Und **Iterations- oder Konvergenzfehler**, welche die Differenzen zwischen der genauen und der iterativen Lösung des Gleichungssystems angeben. Des Weiteren wird der Konvergenzfehler häufig mit einer gitterunabhängigen Lösung in Verbindung gebracht [15].

4.3 Diskretisierung

Strömungsphänomene sind nur in sehr seltenen Fällen analytisch lösbar. Daher müssen die partiellen Differentialgleichungen für relevante Problemstellungen numerisch gelöst werden. Hierzu werden die partiellen Ableitungen in endliche Differenzen umgewandelt. Dieser Vorgang wird als Diskretisierung bezeichnet. Die aus der Umwandlung generierten linearen, algebraischen Gleichungen werden auf einem Rechengitter gelöst. An den Netzpunkten (oder Zellzentren) liegen dann jeweils die Zahlenwerte diverser Strömungsgrößen, wie etwa ρ , u , v , w , E vor [39].

Herangehensweisen zur Diskretisierung gibt es mehrere, die wichtigsten von ihnen sind die **Finite-Element- (FE)**, die **Finite-Volumen- (FV)** und die **Finite-Differenzen-Methode (FDM)**. Die drei Methoden sind gleichwertig und können auch ineinander übergeführt werden. Sind die Rechengitter fein genug erzielen alle drei Varianten dieselben Ergebnisse. Jede Methode weist seine eigenen Vor- und Nachteile auf und es ergibt sich, dass für manche Problemgruppen manche Herangehensweisen geeigneter, als andere sind. Die meisten kommerziellen CFD-Anwendungen basieren auf der Finiten-Volumen-Methode, da sie sowohl gute Genauigkeit als auch ein hohes Maß an Flexibilität aufweist (siehe Abbildung 4.5). Dies ist auch der Grund, weshalb auf die FVM im Folgenden etwas genauer eingegangen wird und die anderen beiden Methoden nur kurz beschrieben werden [39][15].

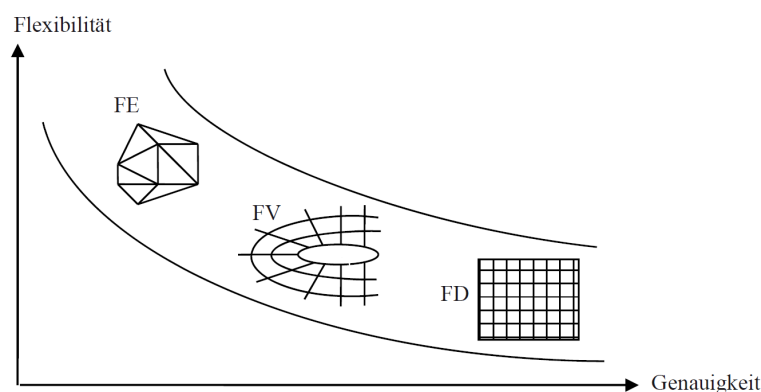


Abbildung 4.5: Vergleich Diskretisierungsmöglichkeiten [39]

4.3.1 Finite-Volumen-Methode

In Abbildung 4.6 ist die grundlegende Strategie, welche durch die Finite-Volumen-Methode verfolgt wird, dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Erhaltungsgleichungen im Falle der FVM in Integralform vorliegen müssen. Dabei wird zur weiteren Erläuterung von der prototypischen Modellgleichung ausgegangen, welche in Gleichung 4.1 in differentieller Form dargestellt ist.

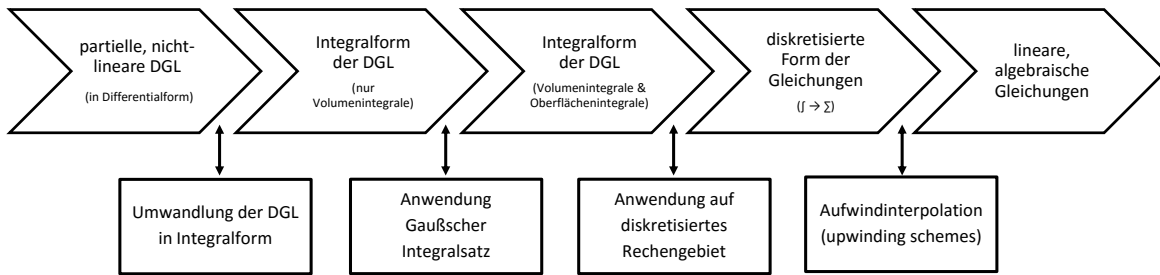


Abbildung 4.6: FVM Strategie

Umgewandelt in integrale Form lautet sie [54]:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV = \int_V [\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) - \nabla \cdot (\vec{u}\rho\phi) + Q_\phi] dV \quad (4.27)$$

Durch Anwendung des Gaußschen Integralsatz können die konvektiven und diffusiven Transportanteile in Oberflächenintegrale umgewandelt werden [54].

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV = \oint_{OF} (\Gamma \nabla \phi) \cdot \hat{n} dA - \oint_{OF} (\vec{u}\rho\phi) \cdot \hat{n} dA + \int_V Q_\phi dV \quad (4.28)$$

Weil das numerische Schema dies verlangt, wird das gesamte Rechengebiet in kleine Kontrollvolumina (KV) im dreidimensionalen Raum oder in kleine Zellen im zweidimensionalen Raum unterteilt (siehe Abbildung 4.7). Ein wesentlicher Vorteil der Finiten-Volumen-Methode liegt darin, dass die integrale Erhaltungsgleichung (Formel 4.27) nicht nur für jedes KV gilt, sondern auch für das gesamte Rechengebiet, weil sich die Oberflächenintegrale über die Innenseiten der KV aufheben. Es folgt daraus, dass die geforderte Konservativität in dieser Methode eingebaut ist. Dies bedeutet, dass Ströme über die Grenzen der KV (lokale Bilanz), als auch über das gesamte Rechengebiet (globale Bilanz) erhalten bleiben [15][54].

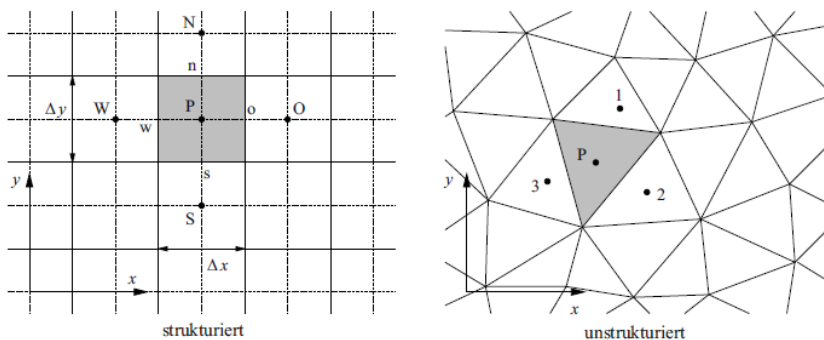


Abbildung 4.7: Nachbarschaftsbeziehungen in strukturierten Gittern links und unstrukturierten Gittern rechts [54]

Bevor Gleichung 4.28 weiter ausgewertet wird, werden Nachbarschaftsbeziehungen eingeführt. Jedes dieser KV besitzt einen zentralen Knoten P, welcher für die Speicherung der numerischen Daten eine bedeutende Rolle spielt. Die Beziehung zu benachbarten Volumina werden für

den Fall von zweidimensionalen, strukturierten Gittern in Kompass-Notation angegeben. So werden die Zentralknoten der benachbarten KV mit N, O, S, W bezeichnet. Bei unstrukturierten Netzen werden die Zentralknoten der benachbarten Zellen simpel durchnummeriert, weil eine Kompass-Notation nicht anwendbar ist [54].

Um die Werte der gewünschten Größe ϕ und ihrer Ableitungen an den Zellflächen zu ermitteln sind also numerische Methoden notwendig, um eine Auswertung der Oberflächen- und Volumenintegrale aus Gleichung 4.28 zu ermöglichen. Die Methodik wird anhand eines eindimensionalen, stationären Problems aufgezeigt (siehe Abbildung 4.8). Fluid strömt mit einer konstanten Geschwindigkeit u und konstantem Querschnitt A durch ein gleichförmiges Gitter mit einer Zellweite Δx . Mit beschriebenen Bedingungen vereinfacht sich Gleichung 4.28 dahingehend, dass die zeitliche Änderung der Größe $\rho\phi$ sowie alle Quellen und Senken von ϕ im Kontrollvolumen vernachlässigt werden können [54].

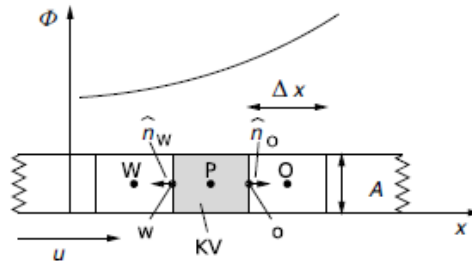


Abbildung 4.8: Methodik der Diskretisierung durch numerische Approximation anhand eines stationären, eindimensionalen Problems [54]

In folgender Gleichung ist die numerische Integration der übrig gebliebenen Oberflächenintegrale aus Gleichung 4.28 dargestellt. Für die weitere Diskretisierung ist es notwendig die noch unbekanntenen Größen ϕ_o, ϕ_w in den konvektiven Termen durch numerische Interpolation und deren Ableitungen in den diffusen Termen durch numerische Differentiation zu bestimmen [54].

$$\Gamma \Delta A \left(\frac{d\phi}{dx} \right)_o - \Gamma \Delta A \left(\frac{d\phi}{dx} \right)_w - \rho u \Delta A \phi_o + \rho u \Delta A \phi_w = 0 \quad (4.29)$$

Numerische Interpolation: Im nächsten Schritt müssen für die Diskretisierung der konvektiven Terme die Werte für ϕ an den Seitenflächen der KV aus bekannten Werten für die Ortskoordinate x und die Strömungsgröße ϕ an den Zentralpunkten des KV ermittelt werden. Dieser Vorgang wird als **Interpolation** bezeichnet. Ein Verfahren, welches in CFD-Modellen zur Interpolation häufig angewandt wird stellt die sogenannte Aufwindinterpolation dar (englisch: upwinding scheme). Beim **Upwinding-Verfahren 1. Ordnung** wird der unbekannte Wert ϕ_f durch den Wert für ϕ des nächsten stromauf-gelegenen Zentralknoten beschrieben. Für das eindimensionale Beispiel in Abbildung 4.8 ergeben sich für die Face-Werte des KV für Geschwindigkeiten mit positivem Vorzeichen [54]:

$$\phi_w = \phi_W \qquad \phi_o = \phi_P \qquad (4.30)$$

Aufwind-Verfahren 1. Ordnung sind ungenau und sollten daher nur für wenige technische Problemstellungen (z.B. hoch-konvektive Strömungen) angewandt werden. Besonders bei dreidimensionalen Rechengittern ergibt sich ein hoher Fehler durch numerische Diffusion (numerischer Fehler, welcher mit tatsächlicher Diffusion „verwechselt“ wird und dadurch die Ergebnisse beeinflusst), wenn die Strömung schräg zum Gitter verläuft. Daher sind insbesondere unstrukturierte Dreiecks-Vernetzungen unter der Anwendung von Interpolationsverfahren 1. Ordnung problematisch. Als Verbesserung wird zumeist die **quadratische Aufwind-Interpolation** (englisch: 2nd-order-upwinding scheme) angewandt. Hier wird das Variablenprofil zwischen zwei Punkten P und O nicht linear approximiert sondern parabolisch. Hierfür ist die Kenntnis der Strömungsgröße an einem dritten Punkt notwendig (Zentralknoten stromaufwärts). Angewandt auf das Beispiel aus 4.8 ergibt sich beispielsweise für den Face-Wert ϕ_o unter der zusätzlichen Anwendung der Strömungsgröße ϕ_W [15]:

$$\phi_o = \phi_P + g_1(\phi_O - \phi_P) + g_2(\phi_P - \phi_W) \qquad (4.31)$$

Die Koeffizienten g_1 und g_2 werden durch Ortskoordinaten wie folgt ausgedrückt [15]:

$$g_1 = \frac{(x_o - x_P)(x_o - x_W)}{(x_O - x_P)(x_O - x_W)} \qquad g_2 = \frac{(x_o - x_P)(x_o - x_o)}{(x_P - x_W)(x_O - x_W)} \qquad (4.32)$$

Zur Interpolation des Druckes auf die Seitenflächen der Kontrollvolumina gibt es neben der Aufwindinterpolation 1. und 2. Ordnung noch einige weitere Upwinding Schemen, wie etwa das lineare, Standard, PRESTO! oder Body-Force-Weighted-Schema.

Numerische Differentiation: Für die numerische Differentiation werden die unbekanntenen Ableitungen auf den Face-Werten der Kontrollvolumina ebenfalls durch die bekannten Werte an den Zentralpunkten approximiert. Der diffuse Term aus Gleichung 4.29 kann mittels Einführung des Differenzenquotient (**zentrales Differenzschema**) wie folgt diskretisiert werden [54]:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_w = \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \qquad \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_o = \frac{\phi_O - \phi_P}{\Delta x} \qquad (4.33)$$

Gradienten einer Strömungsgröße ϕ werden dabei nicht nur für die Seitenflächen des KV, wie oben beschrieben benötigt, sondern zur Diskretisierung der Konvektions- und Diffusionsterme der Impulsgleichungen auch im Zentralknoten einer Zelle $(\nabla \phi)_P$ (siehe Gleichung 4.28). Diese Gradienten können mit verschiedenen Möglichkeiten, wie zum Beispiel durch das Green-Gauß Theorem, welches in Gleichung 4.34 dargestellt ist, numerisch gelöst werden. ϕ_f repräsentiert den Wert der Strömungsgröße ϕ im Zentrum der Zellfläche. Dieser Wert kann durch zwei Varianten bestimmt werden, der sogenannten Green-Gauß-Zellen-basierten

Evaluierung (Gleichung 4.35) oder der Green-Gauß-Knoten-basierten Evaluierung (Gleichung 4.36) [54][2].

$$(\nabla\phi)_P = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\phi}_f \bar{A}_f \quad (4.34)$$

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_P + \phi_O}{2} \quad (4.35)$$

$$\bar{\phi}_f = \frac{1}{N_f} \sum_n^{N_f} \bar{\phi}_n \quad (4.36)$$

N_f ist die Anzahl der Knoten auf der Zellseitenfläche. Die Knotenwerte für $\bar{\phi}_n$ ergeben sich aus einem gewichteten Mittelwert der Werte für ϕ an den Zentralpunkten der Zellen, welche den entsprechenden Knoten umgeben. Der in Gleichung 4.36 beschriebene Ansatz der Knoten-basierten Evaluierung gilt dabei vor allem bei unstrukturierten Netzen als präziser, wodurch allerdings die Rechenzeiten wiederum ansteigt [2].

diskretisierte (algebraische) Gleichungen: Mit dem Aufwind-Verfahren 1. Ordnung und dem zentralen Differenzenschema kann als Beispiel eine diskretisierte, algebraische Gleichung für die Problemstellung aus Abbildung 4.8, angeführt werden [54]:

$$\Gamma\Delta A \left(\frac{\phi_O - \phi_P}{\Delta x} \right) - \Gamma\Delta A \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \right) - \rho u \Delta A \phi_P + \rho u \Delta A \phi_W = 0 \quad (4.37)$$

$$\left(\frac{2\Delta A \Gamma}{\Delta x} + \rho u \Delta A \right) \phi_P = \left(\frac{\Gamma\Delta A}{\Delta x} + \rho u \Delta A \right) \phi_W + \left(\frac{\Gamma\Delta A}{\Delta x} \right) \phi_O \quad (4.38)$$

Durch Umformung von Gleichung 4.37 kann Gleichung 4.38 angeschrieben werden. Die Vorfaktoren für die Strömungsgrößen ϕ_P , ϕ_W und ϕ_O werden in Kurzschreibweise als a_P , a_W und respektive a_O bezeichnet. Wird die Diskretisierung nun für jedes Kontrollvolumen durchgeführt entsteht ein gekoppeltes Gleichungssystem, welches **iterativ** gelöst wird. Die Iteration wird in der Regel so lange fortgesetzt, bis der Unterschied der berechneten Strömungsgrößen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen kleinere Ausmaße als bestimmte Grenzwerte einnimmt [54].

4.3.2 Finite-Element-Methode

Die Finite-Elemente-Methode ist der zuvor beschriebenen Finite-Volumen-Methode gewissermaßen ähnlich (d.h. sie geht auch von der integralen Form der Erhaltungssätze aus). Das Rechengebiet wird in diskrete Volumen oder finite Elemente unterteilt, welche sowohl als Dreiecke/Tetraeder (unstrukturiert) oder Vierecke/Hexaeder (strukturiert) ausgebildet werden können und als Elemente (im Vergleich zu Kontrollvolumen bzw. Zellen bei der FVM) bezeichnet werden. Als Unterschied zur FVM werden die Gleichungen jedoch mit einer Gewichtsfunktion multipliziert, bevor eine Integration über das gesamte Rechengebiet erfolgt.

Die Gewichtsfunktion wird dabei aus den Variablenwerten der Eckwerte der Elemente so konstruiert, dass die Erhaltung der Strömungsgrößen entlang der Elementränder gegeben ist. Ein wichtiger Vorteil der FEM ist die Flexibilität, beliebige Geometrien behandeln zu können [15].

4.3.3 Finite-Differenzen-Methode

Ausgangspunkt für die Finite-Differenzen-Methode ist, anders als bei der in Kapitel 4.3.1 vorgestellten FVM, die Differentialform der Erhaltungsgleichungen. Hierbei werden die Differentialgleichungen an jedem Gitterpunkt (nicht Zentralknoten) approximiert, indem die Differentiale wie zum Beispiel $\frac{\partial u}{\partial x}$ durch Differenzen zum benachbarten Knoten ersetzt werden. Das Ergebnis der FDM ist je eine algebraische Gleichung pro Gitterpunkt, in welcher die Strömungsgröße im selben und einigen Nachbarnpunkten als Unbekannte vorkommt. Die Finite-Differenzen-Methode wird vor allem bei einfachen Geometrien angewandt, in welchen strukturierte Vernetzungen möglich sind. Einer der größten Nachteile der Methode ist, dass die Konservativität (globale und lokale Erhaltung von Strömungsgrößen) nicht ohne besondere Maßnahmen gegeben ist [15].

4.4 Lösungsansätze für komplexe Strömungen

Es wird grundsätzlich zwischen zwei Verfahren unterschieden, mit welchen Problemstellungen der Strömungsmechanik numerisch gelöst werden können. Hierzu zählen zum einen der **druck- (pressure-based)** und zum anderen der **dichtebasierte (density-based) Algorithmus** (bzw. Solver). Dichtebasierte Solver lösen zuerst die Größen ρ , u , v , w , h und T sowie den Druck p in einem Zwischenschritt. Diese Algorithmen werden vorwiegend für kompressible Strömungen angewandt und werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt, da sie zur Durchführung der Parameterstudien nicht relevant sind. Im Zuge des druckbasierten Lösungsverfahrens werden Strömungsgrößen u , v , w , p , h und T zuerst berechnet. Die Größe des Druckes kann jedoch nicht direkt aus den Grundgleichungen bestimmt werden, wodurch spezielle numerische Verfahren notwendig sind (Druckkorrektur-Verfahren). Druckbasierte Solver werden vor allem für CFD-Simulationen von inkompressiblen Strömungen eingesetzt, können jedoch auch zur Lösung kompressibler Strömungen herangezogen werden (ist die Dichte ρ auch variabel kann sie danach mithilfe der Zustandsgleichung aus der Temperatur und dem Druck bestimmt werden) [54].

4.4.1 Druckbasierte Lösungsalgorithmen

Der Algorithmus des druckbasierten Solvers nutzt eine Druck- (oder Druckkorrektur-) Gleichung um die Zwangsbedingung zur Massenerhaltung des Geschwindigkeitsfeldes zu erzielen. Diese Druckgleichung leitet sich aus den Kontinuitäts- und Impulsgleichungen in jener Form ab, dass das Druck-korrigierte Geschwindigkeitsfeld die Kontinuitätsbedingung erfüllt. Prinzipiell können druckbasierte Lösungsalgorithmen in zwei Verfahren unterteilt werden: **gekoppelte (coupled)** oder **entkoppelt bzw. getrennt (segregated) Lösungsverfahren**. Beim entkoppelten Algorithmus werden alle individuellen zugrundeliegenden Gleichungen für die Strömungsgrößen nacheinander gelöst. Jede Gleichung ist dabei während der Berechnung getrennt oder entkoppelt von den anderen Gleichungen. Beim gekoppelten Algorithmus hingegen wird ein gekoppeltes System von Gleichungen gelöst, welches aus den Impulsgleichungen und der druckbasierten Kontinuitätsgleichung besteht. Der Unterschied ist demnach jener, dass beim gekoppelten Algorithmus zwei Schritte des entkoppelten Algorithmus (Lösen der Impulsgleichungen sowie Lösen der Druckkorrekturgleichung) zu einem einzigen Schritt zusammengefasst werden können [2].

Druckkorrektur-Verfahren: Wie bereits erläutert kann der Druck bei der Anwendung eines entkoppelten Algorithmus nicht direkt aus den zugrundeliegenden Grundgleichungen ermittelt werden, wodurch es notwendig ist eine weitere Modellierungsgleichung einzuführen. Hierbei handelt es sich um die sogenannte Druckkorrekturgleichung. Die prinzipielle Problemstellung der entkoppelten Lösung liegt darin, dass $u^{(n+1)}, v^{(n+1)}, w^{(n+1)}$ und $p^{(n+1)}$ in der Folgeiteration (n+1) nicht zur gleichen Zeit bekannt sind, sondern aufeinanderfolgend bestimmt werden müssen. Im Zuge des Druckkorrektur-Verfahren wird demzufolge versucht die beiden Strömungsgrößen nacheinander zu berechnen, was durch die Anwendung eines Prädiktor-Korrektor-Algorithmus erfolgt. Sind die Strömungsgrößen $u^{(n)}, v^{(n)}, w^{(n)}$ und $p^{(n)}$ im Schritt (n) bekannt so erfolgt zuerst eine Schätzung der nächsten Werte $u^{(*)}, v^{(*)}, w^{(*)}$ und $p^{(*)}$ bevor sich mittels errechneten Korrekturen $u^{(K)}, v^{(K)}, w^{(K)}$ und $p^{(K)}$ die Größen für den Iterationsschritt (n+1) ergeben (siehe Gleichungen 4.39 und 4.40 in Vektorschreibweise) [54]:

$$\vec{u}^{(n+1)} = \vec{u}^{(*)} + \vec{u}^{(K)} \quad (4.39)$$

$$p^{(n+1)} = p^{(*)} + p^{(K)} \quad (4.40)$$

Dies stellt jedoch lediglich eine sehr allgemeine Form des Druckkorrektur-Verfahrens dar. Das in CFD-Simulationen wohl am häufigsten angewandte Druckkorrektur-Verfahren ist der SIMPLE Algorithmus. Dieses Verfahren vernachlässigt einige unbekannte Terme, welche durch den Ablauf des Korrektur-Verfahrens und der Diskretisierung entstehen, daher ist es auch notwendig sowohl die Geschwindigkeit als auch den Druck einer Unterrelaxation (siehe Kapitel 4.4.2) zu unterziehen um konvergente Lösungen des iterativen Prozesses zu erhalten. Aus

Gleichungen 4.39 und 4.40 ergeben sich mit den Unterrelaxationsfaktoren α_p für den Druck und α_M für die Geschwindigkeiten die Strömungsgrößen am nachfolgenden Iterationsschritt (Gleichungen 4.41 und 4.42) [54]:

$$\vec{u}^{(n+1)} = \alpha_M \left(\vec{u}^{(*)} + \vec{u}^{(K)} \right) + (1 - \alpha_M) \vec{u}^{(n)} \quad (4.41)$$

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} + \alpha_p p^{(K)} \quad (4.42)$$

Wie die Geschwindigkeit im Prädiktor-Schritt sowie die Druck- und Geschwindigkeitskorrektur bestimmt werden kann beispielsweise [54] entnommen werden. Neben dem SIMPLE Algorithmus gibt es noch weitere Möglichkeiten zur Druck-Korrektur, wie etwa den SIMPLEC- oder den PISO-Algorithmus, auf welche jedoch nicht genauer eingegangen wird [2].

4.4.2 Unterrelaxation

Da die beschriebenen Algorithmen die zugrundeliegenden Gleichungen iterativ lösen neigen die Verfahren gelegentlich zu einem instabilen Verhalten. Diese Instabilitäten haben dann zum Beispiel ein starkes und schnelles Ansteigen des Residuums zur Folge. Durch Unterrelaxation kann das iterative Verfahren stabilisiert werden. Dabei kontrolliert der Solver durch Unterrelaxation die Veränderung der berechneten Variablen im darauffolgenden Iterationsschritt. Jeder Strömungsgröße, welche durch eine zugrundeliegenden Gleichungen beschrieben wird, wird ein Unterrelaxationsfaktor zugeteilt. Die neue Form der Strömungsgröße ergibt sich nach Gleichung 4.43 mit dem Unterrelaxationsfaktor α zu [54][2]:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (4.43)$$

4.5 Rechengitter

Numerische Methoden verlangen es, dass das Rechengebiet in diskrete Gebiete unterteilt wird, an welchen die diskretisierten Erhaltungsgleichungen gelöst werden. Die Qualität des Rechengitters beeinflusst das Konvergenzverhalten sowie die Genauigkeit der numerischen Lösung sehr stark. Netze sollten so fein wie nötig bzw. so grob wie möglich sein. Auf der einen Seite müssen alle Strömungsdetails genau abgebildet werden, während auf der anderen Seite die Rechenzeit für technische Anwendungen in einem angemessenen Ausmaß bleiben muss [39].

4.5.1 Strukturierte Gitter

Strukturierte Rechengetze bestehen im zweidimensionalen Raum aus Vierecken und im dreidimensionalen Raum aus Hexaedern und können in **kartesische**-, **schiefwinklige**- und **blockstrukturierte Gitter** unterteilt werden. Oft (zum Beispiel bei der Umströmung von Körpern) ist ein rein kartesisches Rechengetz, welches lediglich aus rechtwinkligen Zellen besteht nicht möglich. In solchen Fällen können kartesische Rechengitter mit konturangepassten Zellen erzeugt werden. Abbildung 4.9 zeigt ein Beispiel, in welchem die Zellen im Domain orthogonal und die wandnahen Zellen an den Rand angepasst sind [39].

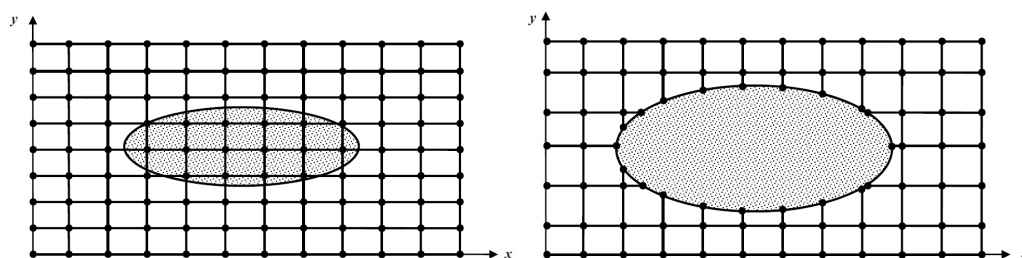


Abbildung 4.9: Kartesisches Rechengetz ohne Randanpassung links und mit konturangepassten Zellen rechts [39]

Bei schiefwinkligen Gittern passen sich die Netzlinien der Geometrie an, wodurch auch die Vernetzung komplexerer Geometrien mit strukturierten Rechengetzen möglich ist. Das kartesische Koordinatensystem (x,y,z) wandelt sich in ein schiefwinkliges (ξ,η,ζ) um. Es kann je nach Verlauf der Netzlinien zwischen O-,C- und H-Rechengetzen unterschieden werden. Beim O-Gitter ergeben sich geschlossene Netzlinien, welche auch von dem äußeren und inneren Rand des Strömungsgebietes gebildet werden. Beim C-Gitter sind Netzlinien einseitig offen während sie bei einem H-Gitter beidseitig offen sind (vgl. Abbildung 4.10). Typische Einsatzgebiete sind für O-Gitter beispielsweise Berechnungen an querangeströmten stumpfen Körpern, wie etwa Zylindern, für C-Gitter die Berechnungen um halbschlanke Geometrien (z.B. Tragflügel) und für H-Gitter die Simulation in durchströmten Bauteilen (Düsen, Diffuser etc.) [39][54].



Abbildung 4.10: Topologien für schiefwinklige, strukturierte Rechengitter [38]

Blockstrukturierte Netze bestehen aus mehreren strukturierten Netzblöcken. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass die Strömungsgrößen an den Blockgrenzen richtig weitergegeben

werden. Sind die Netzpunkte beider Blöcke identisch so stellt die Weitergabe kein Problem dar. Sind jedoch die Knotenpunkte nicht identisch so muss zwischen den Werten des einen Blockrandes zu den Werten des anderen Blockrandes interpoliert werden. Blockstrukturierte Rechengitter haben den Vorteil, dass mit ihnen komplexere Geometrien vernetzt werden können und auch die Feinheit des Gitters im Rechengebiet variieren kann [39].

4.5.2 Unstrukturierte Gitter

Unstrukturierte Netze weisen eine sehr hohe Flexibilität auf und lassen sich daher leicht an komplexe Geometrien und scharfkantige Ecken anpassen. Die Elemente oder Kontrollvolumina bestehen aus Dreiecken, Tetraedern oder Prismen können aber auch andere beliebige Formen sein. Netzlinienscharen treten in unstrukturierten Gittern nicht auf, weshalb die Formulierung der Nachbarschaftsbeziehungen komplizierter, als bei strukturierten Netzen ausfällt. Abbildung 4.11 zeigt ein unstrukturiertes Dreiecksgitter zur Berechnung der Umströmung eines Flugzeugtragflügels [38][39].

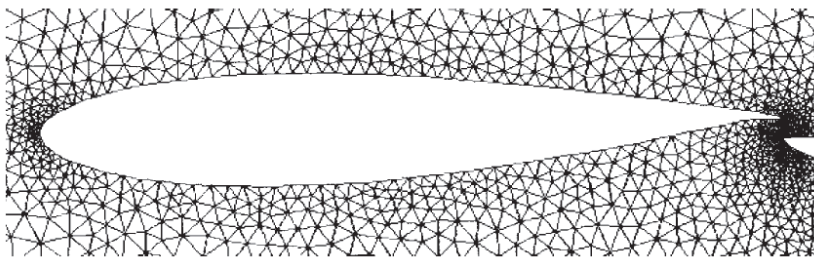


Abbildung 4.11: Unstrukturiertes Netz um einen Tragflügel [38]

4.5.3 Hybride Gitter

Hybride Gitter weisen Bereiche auf, in denen eine strukturierte und Bereiche, in welchen eine unstrukturierte Vernetzung vorhanden ist. So kann beispielsweise durch ein strukturiertes C-Netz um einen Tragflügel herum die Geschwindigkeit innerhalb der Grenzschicht besser erfasst werden, während Bereiche weiter vom Tragflügel entfernt mit Dreiecken unstrukturiert vernetzt werden [54].

4.5.4 Netzverdichtung

Bei reibungsbehafteten Strömungen ist die Geschwindigkeit am Festkörperperrand aufgrund der Haftbedingung gleich null. In hinreichendem Abstand vom Festkörperperrand strömt die Strömung mit einer gewissen Geschwindigkeit u_∞ . Zwischen diesen beiden Punkten erstreckt

sich die sogenannte (fluiddynamische oder Geschwindigkeits-) Grenzschicht, in welcher die Geschwindigkeit einen parabolischen Verlauf aufweist. Aufgrund der starken Veränderung der Geschwindigkeiten innerhalb der Grenzschicht entstehen im Fluid Kräfte und Momente sowie gegebenenfalls Ablösungen. Um diese Phänomene richtig aufzufassen muss bei reibungsbehafteten Strömungen das Rechengitter zum Festkörperwand hin feiner aufgelöst werden. Abbildung 4.12 zeigt das Geschwindigkeitsprofil innerhalb der Grenzschicht, sowie die Verfeinerung des Rechengitters in Wandnähe [39].

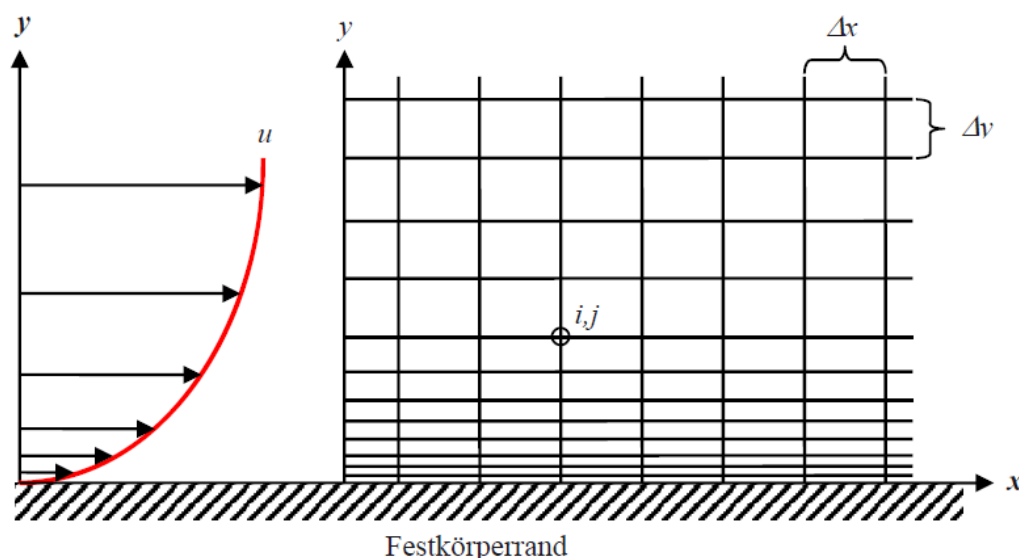


Abbildung 4.12: Geschwindigkeitsverlauf und Netzverdichtung innerhalb der Grenzschicht in der Nähe eines Festkörperperrandes bei reibungsbehafteten Strömungen [39]

4.5.5 Rechengitterqualität

Wie zuvor bereits festgestellt hängt das Konvergenzverhalten sowie die Qualität der numerischen Lösung stark von der Qualität des Rechengitters ab. Daher gibt es einige Eigenschaften, wie etwa Glätte oder Schiefe, welche die Netzqualität beschreiben. Die wichtigsten werden im Folgenden beschrieben [3].

Skewness: Die Skewness (Schiefe) ist durch die Differenz der Form eines Elements zu einem gleichseitigen Element des selben Volumens definiert. Sehr schiefe Elemente können dabei Ungenauigkeiten sowie Instabilitäten während der numerischen Berechnung verursachen. Die maximale Schiefe des maßgebenden Elements sollte immer unter 0,95 liegen, wobei der Durchschnittswert aller Elemente einen deutlich kleineren Wert annehmen sollte [3].

Orthogonal quality: Die orthogonale Qualität einer Zelle wird mittels Gleichungen aus der Vektoranalysis mittels Vektoren, welche normal auf die Zellränder stehen, vom Zellzentrum bis zum Mittelpunkt der Ränder zeigen und vom Zellzentrum zu den Zellzentren der benachbarten

Elemente zeigen, bestimmt. Die minimale orthogonale Qualität eines Elementes sollte 0,01 nicht unterschreiten, wobei der Durchschnittswert aus allen Elementen deutlich höher sein sollte [3].

Aspect Ratio: Das Aspect Ratio (Seitenverhältnis) ist ein Attribut, welches die Streckung eines Elementes angibt. Generell sollten zu große Seitenverhältnisse und vor allem plötzliche Änderung des Verhältnisses in Gebieten mit starken Gradienten vermieden werden [3].

5 Parameterstudien - Aufbau

Im vorliegenden Kapitel wird die Konzeption der Parameterstudien, sowie alle dynamischen und auch statischen Parameter der Studien beschrieben. Allen veränderbaren Parametern werden symbolische Darstellungen zugeordnet, mit welchen in weiterer Folge die Lesbarkeit von Diagrammen im Zuge der Ergebnisauswertung verbessert wird. Darüber hinaus werden die Geometrie sowie die Methodik, mit welcher die Ergebnisauswertung erfolgt, definiert. Am Ende dieses Kapitels wird die Variantenmatrix dargestellt. In dieser führen alle variierenden Parameter zu einer gewissen Fassadenkonfiguration für welche in weiterer Folge CFD-Simulationen durchgeführt werden.

5.1 Konzeption

Das Grundkonzept, auf welchem die CFD-Parameterstudien basieren, stellt ein Fassadenelement, welches als Doppelfassade ausgeführt und rechts in Abbildung 5.1 dargestellt ist, dar. Innerhalb der Außenfassade befinden sich schließbare Öffnungen für Zu- und Abluft. Bei geöffneter Außenfassade kann eine Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade erzielt werden, in welcher kalte Luft unten einströmt, sich im Fassadenzwischenraum (FZR) erwärmt und die warme Luft schließlich oben wieder freigegeben wird. Hingegen, bei geschlossener Außenfassade fungiert das Fassadenelement als Pufferfassade, in welcher die Luft im FZR keinen Bezug zur Außenluft aufweist. Durch die adaptiven Öffnungen für Zu- und Abluft kann demnach eine regulierbare Hinterlüftung des FZR erzielt werden. Diese Art der Anpassung an das Außenklima durch Regulierung der Hinterlüftung ist ein Ansatz, welcher schon seit vielen Jahren angewandt wird. Ein Beispiel hierfür stellt die Doppelfassade der Heidelberg Print Media Akademie [35] dar.

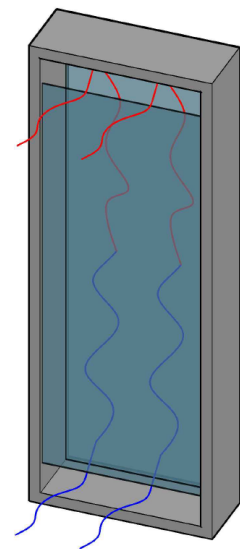


Abbildung 5.1: Fassadenelement mit einer Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade

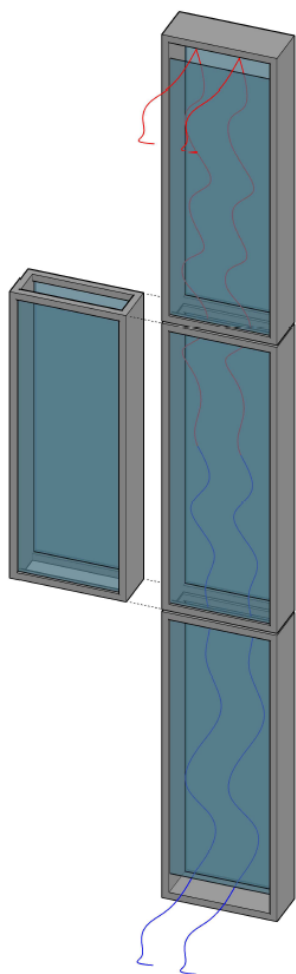
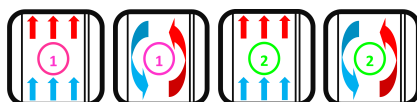


Abbildung 5.2: Durch Anpassung des Elements erzeugte Schachtfassade

Das Fassadenelement weist weiters schließbare Öffnungen in den horizontalen Riegeln des Elementrahmens auf. In Abbildung 5.2 sind die geöffneten Riegel für ein herausgelöstes Element illustriert. So ist es möglich, durch die offene Stellung aus einer Kastenfenster-Fassade, in welcher die Konvektionsströmung über ein Stockwerk (ein Fassadenelement) wirkt, Schachtfassaden zu generieren, in welcher der thermische Auftrieb über eine beliebige Anzahl von Fassadenelementen wirkt. Sind die Öffnungen in der Außenverglasung darüber hinaus geschlossen, lassen sich hiermit auch Pufferfassaden, welche über mehrere Stockwerke reichen, realisieren. Als Folge daraus kann die Fassade je nach vorherrschenden Außenbedingungen als Kastenfenster- oder Schachtfassade und als Puffer- oder 2.-Haut-Fassade wirken (siehe symbolische Darstellung im Folgenden). Damit kann die passive (zu Nutzungszeiten des Innenraums) oder aktive Solarenergienutzung (außerhalb und während der Nutzungszeiten) optimiert werden.

Als weiteren hypothetischen Gedanken könnten auch die vertikalen Pfosten des Elementrahmens mit schließbaren Öffnungen versehen werden, wodurch die geometrische Unterteilung des Fassadenzwischenraums vollkommen adaptiv angepasst werden könnte. Dadurch wäre eine Wirkungsweise neben den bereits erzielbaren Kastenfenster- und Schachtfassaden, auch als unsegmentierte Doppel- und Korridorfassaden möglich.



5.2 Geometrie

Die Geometrie des Fassadenelements ist in Abbildung 5.3 dargestellt, wobei vorweg darauf geachtet wird, dass diese für die Durchführung der CFD-Simulationen so simpel wie möglich gehalten wird. Das Fassadenelement weist eine Höhe von 3 200 mm auf und ist 440 mm tief, wobei die Tiefe des Fassadenzwischenraums 400 mm beträgt. Die Breite des Elements ist vorerst nicht relevant, da die CFD-Simulationen im zweidimensionalen Raum durchgeführt werden. Im Falle geöffneter Öffnungen in den Elementrahmen verjüngt sich die Tiefe des FZR im Bereich des Elementstoßes auf 250 mm. Diese Annahme folgt aus der Überlegung,

dass sowohl die äußere monolithische Verglasung, als auch die innere Isolierverglasung im Elementrahmen gelagert werden muss. Nach der Empfehlung von Brandl et al. [8] wird die Größe der Öffnungen für Luftein- und austritt mit mindestens 8 % der gesamten Fassadenfläche angenommen, um einer Überhitzung des FZR in den Sommermonaten entgegenzuwirken. Die Summe aus den beiden 200 mm hohen Lüftungsöffnungen ergibt einen Flächenanteil von 12,5 % und entspricht daher dieser Forderung.

Die äußere Verglasung wird mit einer 8 mm starken ESG-Scheibe (Einscheibensicherheitsglas) ausgeführt und die Isolierverglasung besteht aus zwei 8 mm starken TVG-Scheiben (teilvorgespanntes Glas), welche durch einen 16 mm tiefen Scheibenzwischenraum mit Luftfüllung getrennt sind. Als Material für den Elementrahmen wird Stahl und für das Verschattungselement Aluminium angenommen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Modellierung des Fassadenelements wird durch das Einbinden eines Außenbereichs erreicht. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei einer Modellierung ohne Außenbereich am Luftein- und -austritt Randbedingungen, wie etwa die Richtung der Strömung an jedem Punkt, vorgegeben werden müssten. Solch Randbedingungen sind kaum vorhersehbar, wodurch das Hinzufügen eines Außenbereichs und der dadurch entstehenden Mit-Modellierung des Strömungsfeldes im Bereich des Luftein- und austritts, unerlässlich wird. Der Außenbereich wird mit einer Höhe von 4 800 mm modelliert, wodurch er 800 mm über und unter das Fassadenelement reicht. Die Tiefe beträgt 700 mm. Pasut et al. [48] sind unter anderem zum Schluss gekommen, dass durch das Hinzufügen eines Außenbereichs die Ergebnisse sowohl hinsichtlich des Geschwindigkeits- als auch bezüglich des Temperaturfeldes deutlich verbessert werden können. Da der Außenbereich hinzugefügt wird um das Ein- und Ausströmverhalten besser abzubilden, kann als Folge daraus abgeleitet werden, dass dieser für die Modellierung von Pufferfassaden, in welchen ein geschlossenes System vorliegt, keine Verbesserungen mit sich bringt. Aus diesem Grund wurden alle Modelle, in welchen sich eine Wirkungsweise als Pufferfassade ergibt, ohne Außenbereich abgebildet.

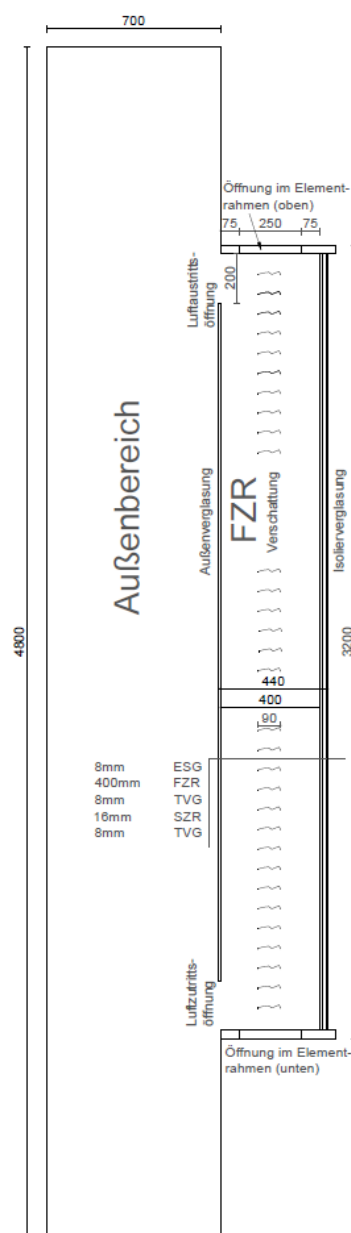


Abbildung 5.3: Geometrie Fassadenelement

5.2.1 Sonnenschutz

Als Sonnenschutzvorrichtung wird ein Verbund-Raffstore mit sogenannten Z-Lamellen vorgesehen, welche 90 mm breit und 2 mm stark sind. Abbildung 5.4 zeigt eine Ausführungsvariante der Fa. Valetta Sonnenschutztechnik GmbH [14]. Das Besondere an diesen Lamellen ist, dass sie durch ihre Dichtlippen quasi luftdicht verschließbar sind und der Fassadenzwischenraum dadurch in zwei so gut wie dichte Bereiche unterteilt werden kann. Des Weiteren stellt die Anwendung von einem Raffstore mit Z-Lamelle ein Unterscheidungsmerkmal zu ähnlichen Studien, wie etwa von Hazem et al. [26], welche gerade Lamellen modellieren oder von Ji et al. [33], welche leicht gekrümmte Lamellen als Sonnenschutz einsetzen, dar.

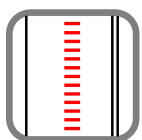


Abbildung 5.4: Verbund-Raffstore mit Z-Lamelle [14]

Im Zuge der durchgeführten Parameterstudien wird die Position des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum als dynamischer Parameter angenommen. Prinzipiell wird zwischen fünf verschiedenen Positionen unterschieden, welche im Folgenden beschrieben und deren Betrachtung begründet wird:

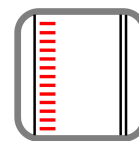


Sonnenschutz nahe an der Isolierverglasung: In unmittelbarer Umgebung zum Sonnenschutz ergeben sich aufgrund von Absorption der kurzwelligeren Solarstrahlung die höchsten Temperaturen im Fassadenzwischenraum. Befindet sich der Sonnenschutz knapp vor der Isolierverglasung, ist die Lufttemperatur in diesem Bereich hoch. Dies kann man sich vor allem in den kalten Monaten während der Heizperiode zu Nutze machen, indem durch die geringeren Temperaturunterschiede zwischen Innentemperatur und der Temperatur im Fassadenzwischenraum Transmissionswärmeverluste gesenkt werden können.

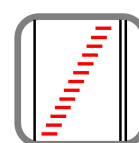


Sonnenschutz mittig im Fassadenzwischenraum: Ein weiterer Aspekt, um einer Überhitzung des Fassadenzwischenraums und ferner des Innenraums in der warmen Jahreszeit entgegenzuwirken, ist es, die durch Absorption entstehende Wärme effektiv durch Konvektion abzuführen. Es wird erwartet, dass durch die beidseitig gute Umströmung im Falle mittig angeordneter Lamellen die Wärmeübertragung effizient erfolgt.

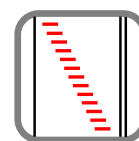
Sonnenschutz nahe an der Außenverglasung: Durch die Positionierung des Sonnenschutzes nahe an der Außenverglasung wird erwartet, die hohen Temperaturen weiter entfernt von der Isolierverglasung zu halten. Dieser im Vergleich zum zuvor beschriebenen, gegenteiligen Ansatz hat zur Folge, dass die Temperaturen an der Isolierverglasung klein gehalten werden. In den warmen Monaten, in denen Doppelfassaden immer das Risiko mit sich bringen einer Überhitzung des Innenraums beizutragen, können die unerwünschten Transmissionswärmegewinne durch diese Konfiguration verringert werden.



Sonnenschutz schräg im FZR - unten nahe an der Außenverglasung, oben nahe an der Isolierverglasung: In erster Linie begründet sich diese Positionierung durch den vermuteten erhöhten Anteil an absorbierter und den verringerten Anteil an reflektierter Sonnenstrahlung am Raffstore. Dies und auch die vergrößerten Abstände zwischen zwei Lamellen, welche durch die schräge Anordnung erzielt werden und welche dafür sorgen, dass ein höherer Anteil solarer Strahlung den Raffstore passieren und direkt im Raum passiv genutzt werden kann, ist vor allem in den Wintermonaten wünschenswert.



Sonnenschutz schräg im FZR - unten nahe an der Isolierverglasung, oben nahe der Außenverglasung: Durch diese Positionierung wird ein gegenteiliges Verhalten zur zuvor beschriebenen schrägen Konfiguration erwartet. Geringere Absorption und höherer Anteil reflektierter Sonnenstrahlung an den Sonnenschutz-Lamellen führen womöglich zu einer besseren Performance der Fassade in den Sommermonaten. Des Weiteren kann die noch nicht erwärmte Luft hoch in den Fassadenzwischenraum hineinströmen, bevor sie auf den warmen Sonnenschutz trifft - ein weiterer Vorteil während der warmen Jahreszeit.



Ein weiterer anpassungsfähiger Parameter, dessen Einfluss unter anderem schon von Hazem et al. [26] oder Iyi et al. [32] erfasst wurde, ist der Neigungswinkel (Öffnungswinkel) der Einzellamelle. Um vollständige Parametersätze zu erhalten und vor allem auch um den saisonalen Wärmeschutz zu fokussieren, ist eine dynamische Betrachtung dieser Eigenschaft unumgänglich. Aus diesem Grund werden drei verschiedene Öffnungswinkel betrachtet:

Durch die **horizontale Stellung** (0°) der Einzellamellen wird am meisten Solarstrahlung in den Innenraum durchgelassen, um diese passiv zu nutzen und zum Beispiel den Heizenergieverbrauch in den Wintermonaten zu senken.





Eine **schräge Stellung** (40°) der Einzellamellen stellt einen Mittelweg beider Extremwerte (0° und 80°) dar. Mit schrägen Lamellen kann eine Vielzahl von Fassadenanforderungen zufriedenstellend erfüllt werden, wodurch die Behaglichkeit im Innenraum gesteigert werden kann. So schützt diese Konfiguration beispielsweise vor Blendung, stellt Außenbezug her, versorgt den Innenraum mit Tageslicht und erzielt passive Gewinne, ohne dass diese zwingend zur Überhitzung führen. Deshalb und nicht zuletzt, weil ein Optimum der Umströmung der Einzellamellen erwartet wird, wird dieser Öffnungswinkel Teil der Parameterstudien sein.



Durch eine **vertikale Stellung** (80°) der Einzellamelle wird an strahlungsreichen Tagen der passive Solarenergieeintrag in den Raum minimiert, was vor allem in den Sommermonaten zu behaglichem Raumklima führt.

5.3 Randbedingungen

Die Parameterstudien basieren auf einer nach Westen ausgerichteten Fassade mit Standort in Graz. Sie weist somit hinsichtlich des Überhitzungsrisikos eine kritische Orientierung auf. Als Randbedingungen werden vier verschiedene Außenklimata berücksichtigt: In Tabelle 5.1 sind für je einen sonnigen und bedeckten Sommer- und Wintertag Kenngrößen, welche diese Außenbedingungen beschreiben, dargestellt. Das Innenklima wird entsprechend ÖNORM 8110-2 [47] mit 20°C bei allen Außenbedingungen als konstante Randbedingung vorgegeben. Weiters sind die Wärmeübergangskoeffizienten innen h_{int} und außen h_{ext} sowie das Temperatur-Tagesmittel der mittleren jährlichen Tiefstwerte für den Standort Graz ($-9,4^\circ\text{C}$) der ÖNORM 8110-2 [47] zu entnehmen. Diese Temperatur wird dem bedeckten Wintertag (Simulationstag C) als Außentemperatur zugrunde gelegt. Im Jahr 2015 betrug der Maximalwert der einfallenden Solarstrahlung in Graz 1262 W/m^2 [23]. Da dieser Wert dem Verfasser sehr hoch erscheint (vgl. Solarkonstante $G_{sol} = 1373\text{ W/m}^2$ [43]) wird die solare Belastung am sonnigen Sommertag mit einer Strahlungsintensität $I = 1000\text{ W/m}^2$ angesetzt. Die weiteren Werte für die Strahlungsintensität sind sinngemäß angepasst. Die Außenlufttemperatur kann in den Sommermonaten 30°C durchaus übersteigen [23], wodurch sich die Außentemperatur für den sonnigen Sommertag ergibt. Die weiteren Außentemperaturen sind auf die bereits definierten Temperaturen abgestimmt. In den Wintermonaten wird außerdem ein flacherer Einfallwinkel der Solarstrahlung modelliert, welcher durch den hohen Zenitwinkel Z in Tabelle 5.1 angegeben ist.

Hinweis:

Der externe Wärmeübergangskoeffizient h_{ext} hat nur im Falle der Modellierung von Pufferfassaden Relevanz, da diese Modelle ohne Außenbereich simuliert werden. Im Falle der 2.-Haut-Fassade bestimmt die Strömung im Außenbereich den Wärmeübergang an der Außenseite der Außenverglasung. Der

externe Wärmeübergangskoeffizient wird aufgrund der abgebildeten Strömungsverhältnisse automatisch berechnet.





	T_0 °C	I $\frac{W}{m^2}$	h_{ext} $\frac{W}{m^2K}$	Z °	T_{int} °C	h_{int} $\frac{W}{m^2K}$
bedeckter Sommertag (Tag A) 	25	50	25	55	20	7,7
sonniger Sommertag (Tag B) 	30	1000	25	55	20	7,7
bedeckter Wintertag (Tag C) 	-10	20	25	70	20	7,7
sonniger Wintertag (Tag D) 	-5	500	25	70	20	7,7

Tabelle 5.1: Kenngrößen zur Beschreibung des Innen- und Außenklimas

5.4 Auswertungsmethodik

Die Auswertung der CFD-Ergebnisse basiert in erster Linie auf zwei Hauptkriterien. Das erste stellt dabei ein Kriterium zur Bewertung der aktiven Solarenergienutzung dar, während das zweite Kriterium die passive Solarenergienutzung bewertet:

1. Als Kenngröße der **aktiven Solarenergienutzung** wird die Größe ΔT_{1-2} eingeführt. Sie ergibt sich aus der Differenz zweier über die Fläche gemittelten Lufttemperaturen an zwei Querschnitten: $\Delta T_{1-2} = T_{2,air} - T_{1,air}$. Die beiden Temperaturprofile (Querschnitte) befinden sich etwa 600 mm vom unteren (Profil 1, $T_{1,air}$) und vom oberen Elementrahmen (Profil 2, $T_{2,air}$) entfernt (siehe Abbildung 5.5). Die Entfernung vom Elementrahmen ist recht hoch angesetzt, damit Effekte, wie etwa Rückströmungen, welche beim Einströmen oder beim Ausströmen der Luft in den Fassadenzwischenraum entstehen, die gemittelte Lufttemperatur an dieser Stelle nicht zu stark beeinflussen. Ein weiteres Kriterium zur Festlegung der Lage (jedoch nur im Detailbereich) der Querschnitte ist die Anforderung, dass jedes Profil in jeder betrachteten Fassadenkonfiguration eine Lamelle schneidet. Dadurch können Oberflächentemperaturen an der Lamelle simpel ermittelt werden. Die definierte Temperaturdifferenz ΔT_{1-2} ist infolgedessen eine Kenngröße, welche angibt, wie effektiv sich die Luft über eine gleichbleibende Höhe bei den in Kapitel 5.1, 5.2 und 5.3 definierten Randbedingungen erwärmt. Diese erwärmte Temperatur könnte dann beispielsweise mithilfe einer Abluftwärmepumpe aktiv genutzt werden. Die beschriebene

Nutzung stellt dabei lediglich einen hypothetischen Ansatz dar. Ob die erwärmte Lufttemperatur in dieser Form genutzt werden kann und ob eine bautechnische Umsetzung realisierbar ist, soll nicht im Zuge der vorliegenden Arbeit behandelt werden. Darüber hinaus muss auch angemerkt werden, dass diese aktive Nutzung durch Wärmeübertrager die Strömungssituation im Fassadenelement gravierend beeinflusst, woraus sich die Notwendigkeit weiterer Betrachtungen ergibt.

2. Zur Beurteilung der **passiven Solarenergienutzung** wird der totale Energieeintrag in den Innenraum Q_{tot} (siehe Abbildung 5.5) herangezogen. Die Bezeichnung passive Solarenergienutzung mit dem totalen Energieeintrag zu beschreiben ist dabei nicht ganz passend, da der totale Energieeintrag nicht nur durch Solarstrahlung, sondern auch durch langwellige Wärmestrahlung und konvektiven Energieeintrag bestimmt wird. Des Weiteren stellen sich Oberflächentemperaturen, welche die zuvor beschriebenen Wärmetransportmechanismen stark beeinflussen, auch infolge Wärmeleitung durch die Isolierverglasung hindurch, ein. Trotz alledem wird an der beschriebenen Bezeichnung festgehalten, da insbesondere an strahlungsreichen Tagen die einfallende Sonnenstrahlung den Hauptanteil des gesamten Energieeintrags in den Innenraum ausmacht.

Während in den Sommermonaten versucht wird die passive Solarenergienutzung zu minimieren, um Überhitzung zu vermeiden, wird in den Wintermonaten vor allem der Fokus darauf gelegt werden durch passive Solarenergienutzung den Heizenergieverbrauch zu senken.

Es werden für beide Hauptauswertungskenngrößen Bestkonfigurationen (Empfehlungen) hinsichtlich aller adaptiver Parameter für jedes Außenklima angegeben. Außerdem wird beurteilt, ob mit derselben Konfigurationen beide Kriterien zu einem zufriedenstellenden Grad erfüllt werden können. Nachdem diese Empfehlungen und Gegenüberstellungen für ein Fassadenelement erfolgt sind, folgt die Festlegung, welche Fassadenkonfigurationen durch ein zweites Fassadenelement erweitert werden. Es wird darauf hingewiesen, dass aufgrund von hohen Rechenzeiten der Konfigurationen bestehend aus zwei Fassadenelementen und aufgrund der Erkenntnisse, welche an einem Fassadenelement gewonnen werden können, einige Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen aus der Durchführung der Parameterstudien ausscheiden.

Weitere Ergebnisse, welche den CFD-Simulationen entnommen werden sind, vertikale Temperaturprofile a und b mit welchen der Temperaturanstieg im FZR dargestellt werden kann, Oberflächentemperaturen an der Außenverglasung außen ($T_{i,1}$) und innen ($T_{i,2}$), an der Lamelle ($T_{i,3}$) und an der Isolierverglasung außen ($T_{i,4}$) und innen ($T_{i,5}$). Der Index i steht für die Temperaturen an den Profilen 1, 2, 3 oder 4. Die Profile 3 und 4 sind dabei jene Profile, welche im Falle eines zweiten, oberen Fassadenelementes eingeführt werden. Sie haben dieselbe Position wie Profil 1 und 2, nur eben in einem darüber liegenden Element. Folglich

werden auch an diesen Profilen gemittelte Lufttemperaturen ($T_{3,air}$ und $T_{4,air}$) ausgewertet. Als Maß für die **aktive Solarenergienutzung** gilt für Fassadenkonfigurationen, in welchen der thermische Auftrieb über zwei Fassadenelemente wirkt ΔT_{1-4} , also die Temperaturdifferenz der Luft zwischen Profil 4 ($T_{4,air}$) und Profil 1 ($T_{1,air}$), da ein Temperaturanstieg der Luft über die doppelte Auftriebshöhe möglich ist. Über die Fläche gemittelte Lufttemperaturen (T_{in} , T_{out}) und Geschwindigkeiten (v_{in} , v_{out}) an Luftein- und austritt, Massenströme (\dot{m}_{in} , \dot{m}_{out}) an diesen Positionen, sowie der Strahlungseintrag in den Raum (Q_{rad}) komplettieren die Kenngrößen, welche den Simulationsergebnissen zur Auswertung entnommen werden (siehe Abbildung 5.5).

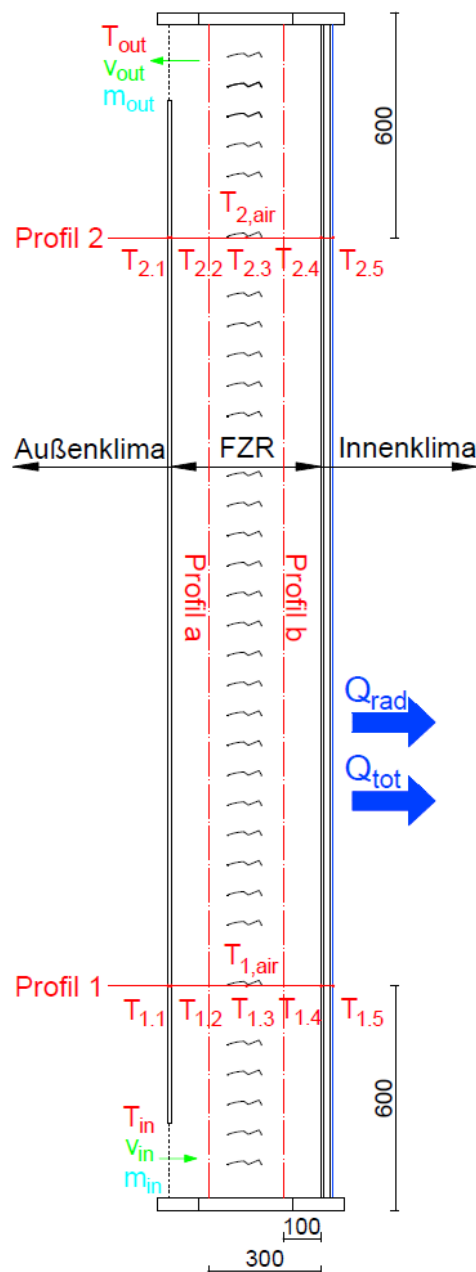


Abbildung 5.5: Kenngrößen zur Auswertung

Mithilfe dieser Kenngrößen wird im Zuge der Auswertung versucht sogenannte Wenn-Dann-Beziehungen zu erarbeiten. Ein Beispiel hierfür wäre folgendes: Nimmt der Energieeintrag in den Innenraum Maximalwerte an, dann nehmen die Oberflächentemperaturen an der Außenverglasung Minimalwerte an. Außerdem werden aus den gewonnenen Ergebnisgrößen einige weitere Kenngrößen, wie etwa aus Massenströmen Volumenströme, mithilfe des gesamten Energieeintrags und des Strahlungseintrages ein konvektiver Energieeintrag und einige Temperaturdifferenzen, indem Simulationsergebnisse mit der Außentemperatur in Bezug gebracht werden, abgeleitet.

5.5 Variantenmatrix und symbolische Darstellung

In Tabelle 5.2 ist die Variantenmatrix der Parameterstudie dargestellt. Sie enthält alle möglichen Fassadenkonfigurationen, welche aufgrund von Kombinationen der in den Kapiteln 5.1, 5.2 und 5.3 vorgestellten Parametern entstehen. Es wird neuerdings darauf hingewiesen, dass vorerst eine vollständige Betrachtung an einem Fassadenelement (Konfigurationen 1 bis 30) durchgeführt wird. In einem nächsten Schritt erfolgt eine Extremwertbetrachtung anhand der Ergebnisse an einem Fassadenelement. Der Grund hierfür liegt darin, dass nur für diejenigen Konfigurationen, welche für einen der beiden Hauptauswertungsparameter (Q_{tot} bzw. ΔT_{1-2}) Extremwerte erzielen weitere Betrachtungen an Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen durchgeführt werden. Eine genauere Beschreibung und Begründung, welche Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen betrachtet werden, wird in Kapitel 7 thematisiert.

Für jede Kenngröße, welche zur Auswertung herangezogen wird, wird eine eigene Matrix erstellt und die jeweilige Kenngröße für die dementsprechende Fassadenkonfiguration eingetragen. In Tabelle 5.2 ist beispielhaft die Variantenmatrix für die gemittelte Lufttemperatur am Profil 1 ($T_{1,air}$) dargestellt.

$T_{1,air}$ [°C]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1
		Raffstore offen				2
		Raffstore offen				3
		Raffstore offen				4
		Raffstore offen				5
		Raffstore offen				6
		Raffstore offen				7
		Raffstore offen				8
		Raffstore offen				9
		Raffstore offen				10
		Raffstore offen				11
		Raffstore offen				12
		Raffstore offen				13
		Raffstore offen				14
		Raffstore offen				15
	Raffstore offen				16	
	Pufferfassade	Raffstore offen				17
		Raffstore offen				18
		Raffstore offen				19
		Raffstore offen				20
		Raffstore offen				21
		Raffstore offen				22
		Raffstore offen				23
		Raffstore offen				24
		Raffstore offen				25
		Raffstore offen				26
		Raffstore offen				27
		Raffstore offen				28
		Raffstore offen				29
		Raffstore offen				30
thermischer Auftrieb über 2 Elemente		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			
	Raffstore offen					32
	Raffstore offen					33
	Raffstore offen					34
	Raffstore offen					35
	Raffstore offen					36
	Raffstore offen					37
	Raffstore offen					38
	Raffstore offen					39
	Raffstore offen					40
	Raffstore offen					41
	Raffstore offen					42
	Raffstore offen					43
	Raffstore offen					44
	Raffstore offen					45
	Raffstore offen				46	
	Pufferfassade	Raffstore offen				47
		Raffstore offen				48
		Raffstore offen				49
		Raffstore offen				50
		Raffstore offen				51
		Raffstore offen				52
		Raffstore offen				53
		Raffstore offen				54
		Raffstore offen				55
		Raffstore offen				56
		Raffstore offen				57
		Raffstore offen				58
		Raffstore offen				59
		Raffstore offen				60
			A	B	C	D

Tabelle 5.2: Variantenmatrix der Parameterstudie

6 Parameterstudien - Durchführung

Numerische Strömungsberechnungen können nach einem typischen Ablaufschema durchgeführt werden. In Abbildung 6.1 ist eine Übersicht für solch einen Ablauf dargestellt, welcher auf einer Beschreibung von Lecheler [39] für die Simulationsumgebung Ansys CFX basiert.

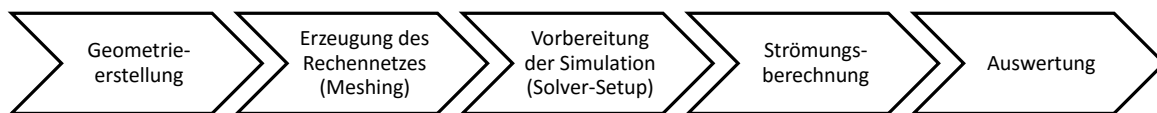


Abbildung 6.1: Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung

Die vorliegende Arbeit wird mithilfe der Studentenversion des kommerziellen Software-Paketes **Ansys Workbench 16.2** durchgeführt. Die Workbench gliedert sich in Komponentensysteme (Designmodeller, Meshing Tool, Fluent etc.), welche für die einzelnen Schritte des Ablaufschemas einer numerischen Strömungssimulation eingesetzt werden. Im ersten der fünf Schritte erfolgt die Geometrieerstellung, in welcher Geometriedateien eingelesen und aus ihnen Volumen- (3D) oder Oberflächenkörper (2D) erstellt werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Diskretisierung des Rechengebiets, in welchem dem Netz globale und lokale Gittereinstellungen vorgegeben werden. Außerdem werden Ränder (wie etwa Festkörper-, Zu- und Abstromränder) definiert, um die Vorgabe der Randbedingungen später effizienter durchführen zu können. Im dritten Schritt erfolgt die Beschreibung des physikalischen Problems durch mathematische Modelle. Es werden diverse Berechnungsparameter, Material- und Fluideigenschaften sowie die Randbedingungen des Strömungsgebiets definiert. Während der Strömungsberechnung, dem vierten Schritt einer numerischen Strömungssimulation, erfolgt die Überprüfung des Konvergenzverhaltens. Komplexe Berechnungen können in diesem Schritt auf mehrere Computer (oder CPU-Kerne) ausgelagert werden. Dadurch steigt die Rechenleistung und die Rechenzeit sinkt. Im letzten Schritt, der Auswertung, werden Ergebnisse grafisch oder in Form von Zahlenwerten dargestellt.

Oft werden die ersten beiden Schritte auch als sogenanntes **Pre-Processing**, die Schritte drei und vier als **Solver-Setup** und der letzte Schritt als **Post-Processing** bezeichnet.

6.1 Geometrieerstellung

Der angestrebte Ablauf zur Geometrieerstellung gliedert sich in vier Teilschritte (siehe Abbildung 6.2), wobei im ersten Schritt eine Koordinatenliste für alle Punkte des Rechengebietes mittels Microsoft Office Excel erstellt wird. Da die Meshing-Strategie auf einem blockstrukturierten, hybriden Gitter basiert, wird das Rechengebiet in mehrere Blöcke unterteilt (siehe Kapitel 6.2). Als Folge daraus muss eine hohe Anzahl von Punkten in die Software Grasshopper Version 0.9.0076 im zweiten Schritt zur Geometrieerstellung eingelesen werden. Die parametrisierte Geometrie wird dann mit einem „Bake“-Befehl in der Software Rhinoceros 5 dargestellt und später als IGES-Datei exportiert. Aus dieser im Ansys Designmodeler wiederum importierten Datei wird im letzten Schritt der Geometrieerstellung ein Oberflächenkörper erstellt.

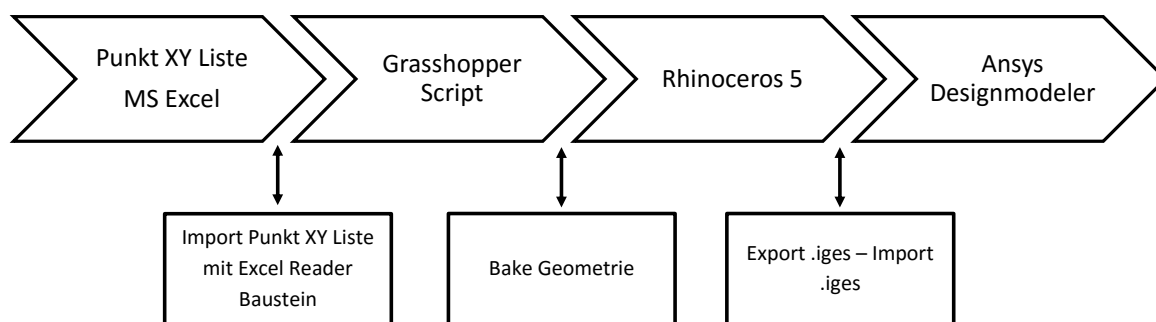


Abbildung 6.2: Ablauf der Geometrieerstellung

Das Scripten der Geometrie in Grasshopper (Schritt 2 in Abbildung 6.2) hat vor allem den Vorteil, dass verschiedene Geometrien (Lage des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum, Öffnungswinkel) durch Parametervorgaben schnell erstellt werden können. Da für die Vernetzung überlappende Geometrien unzulässig sind, ist ein weiterer Vorteil, dass Oberflächenoperationen, wie etwa Differenzen zwischen zwei Oberflächen (Solid-Difference) oder Vereinigungen zweier Oberflächen (Solid-Union), mit Grasshopper simpel durchgeführt werden können. Dieser Vorteil wird vor allem bei der Modellierung der Lamellen ausgenutzt, indem die Oberflächen der Einzellamelle von den Oberflächenblöcken des Fassadenzwischenraums abgezogen (Solid-Difference) werden. In Abbildung 6.3 ist das gesamte Grasshopper Script dargestellt, welches zur Beschreibung in mehrere Bereiche unterteilt wird. Dieses schaut im ersten Moment kompliziert und unstrukturiert aus, jedoch wird in den Bereichen 1 bis 8 lediglich die Koordinatenliste eingelesen und eine Vielzahl von Oberflächen aus den einzelnen Punkten erstellt. Mit diesen Oberflächen werden daraufhin Oberflächenoperationen durchgeführt. Zur Komplexität trägt, wie bereits angesprochen, die angestrebte blockstrukturierte Strategie zur Netzerstellung bei, welche es verlangt das Rechengebiet in eine Vielzahl von Blöcken zu unterteilen. Es wird im Folgenden kurz erläutert, welche Operationen in welchem Bereich

durchgeführt werden. Außerdem wird auf den Bereich 10, in welchem die Parametereingaben für die Sonnenschutzlamellen erfolgen, etwas genauer eingegangen.

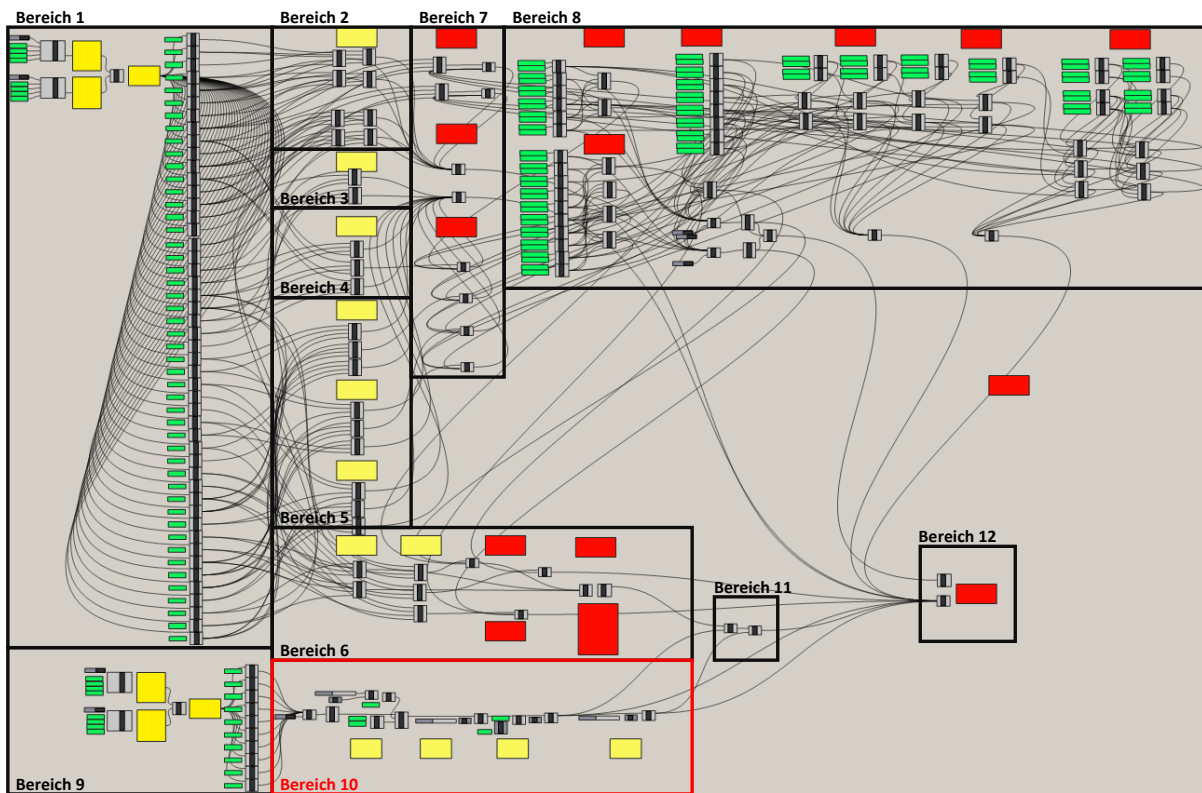


Abbildung 6.3: Grasshopper Script zur Parametrisierung der Geometrie

Der Beschreibung der einzelnen Bereiche wird vorweggenommen, dass es sich bei den gelben und roten Kästchen in Abbildung 6.3 um Kommentarfelder handelt. Die grünen Felder hingegen stellen Eingabefelder für diverse Parameter dar.

- **Bereich 1:** Es werden X- und Y-Koordinaten aus einer Liste von Punkten aus MS Excel spaltenweise eingelesen, welche dann zu einer Punktliste („XY-Point“) in Grasshopper zusammengefasst werden. Zur weiteren Bearbeitung werden aus dieser Liste die einzelnen Punkte mit dem Baustein „List-Item“ herausgefiltert.
- **Bereich 2:** Aus je vier Einzelpunkten werden acht Oberflächenblöcke (Baustein „4-Point-Surface“) zur Abbildung des Außenbereichs erstellt.
- **Bereich 3:** Die Öffnungen für Zu- und Abluft werden ebenso als einzelne Oberflächen aus vier Einzelpunkten erstellt.
- **Bereich 4:** Die geometrische Abbildung der Außenverglasung mittels drei Oberflächenblöcken ist Aufgabe des vorliegenden Bereichs.
- **Bereich 5:** Wiederum durch den Baustein „4-Point-Surface“ werden diverse Oberflächenblöcke für die äußere und innere Scheibe der Isolierverglasung sowie für den Scheibenzwischenraum erstellt.

- **Bereich 6:** Es werden Oberflächenblöcke für die Geometrie des Fassadenzwischenraums erstellt. Dieser gliedert sich in einen oberen, mittleren und unteren Block, wobei der mittlere Block wiederum in drei Blöcke (links, mittig, rechts) unterteilt wird (siehe Meshing-Strategie Kapitel 6.2.1). Außerdem erfolgt in diesem Bereich die Vereinigung der Einzelblöcke des FZR oben, unten und jenem mittigen Block, in welchem die Lamellen abgebildet werden. Diese Blöcke werden vereint, damit im Zuge der Gittergenerierung keine Ränder, an welchen Zwangsbedingungen für Rechenzellen gelten, zwischen diesen Blöcken vorhanden sind. Weiters wird in diesem Bereich die Differenz zwischen den Blöcken des Fassadenzwischenraums und des vertikalen Elementrahmens, welcher den FZR einengt, gebildet.
- **Bereich 7:** Dieser sowie der nachfolgende Bereich stellen Erweiterungen für die Geometrierstellung für Fassadenkonfigurationen mit zwei Fassadenelementen dar. Da im Stoßbereich der Elemente der Fassadenzwischenraum aufgrund der dortigen Lage des Elementrahmens verjüngt wird, müssen auch die Vernetzungsstrategie und die Geometrie angepasst werden. In diesem Bereich werden demnach Differenzen zwischen den im Bereich 8 erstellten Oberflächen im Stoßbereich und den Oberflächen der Außen-, Isolierverglasung sowie des Fassadenzwischenraums gebildet.
- **Bereich 8:** Wie bereits zuvor angedeutet, werden im vorliegenden Bereich Oberflächenblöcke erstellt, welche den Stoßbereich zwischen den beiden Fassadenelementen abbilden. Dieser Bereich enthält vergleichsweise viele Bausteine, was daran liegt, dass die Definition der Punkt-Koordinaten direkt in der Skript-Umgebung und nicht mittels MS Excel erfolgt.
- **Bereich 9:** Analog zu Bereich 1 werden X- und Y-Koordinaten aus einer Liste von Punkten aus MS Excel spaltenweise eingelesen. Diese Punkte werden zur weiteren Verarbeitung durch eine geschlossene Polylinie verbunden, welche die Kontur der untersten Lamelle im Fassadenzwischenraum abbildet.
- **Bereich 10:** Es erfolgen Parametereingaben hinsichtlich der Position und des Öffnungswinkels der Lamelle, welche anhand Abbildung 6.4 später genauer erläutert werden.
- **Bereich 11:** Eine zentrale Aufgabe des Grasshopper-Scripts ist die Differenzenbildung zwischen den Oberflächenblöcken im Fassadenzwischenraum und jenen des Sonnenschutzes. Dies erfolgt in Bereich 11.
- **Bereich 12:** Es erfolgt die Zusammenführung aller (nicht-überlappenden) Oberflächen zu einem „Gruppierungs“-Baustein, was den Aufwand minimiert die einzelnen Geometrieblöcke in Rhinoceros darzustellen (Bake-Befehl).

Abbildung 6.4 zeigt den Bereich 10 vergrößert dargestellt. Er lässt sich wiederum in vier Teilbereiche unterteilen. Im ersten **Bereich 10a** wird die Einzellamelle um einen definierten Punkt (Mittelpunkt der Lamelle) durch einen vorgegebenen Winkel, welcher von Grad in Winkelmaß umgerechnet wird, rotiert. In **Bereich 10b** kann der bereits rotierten, einzelnen

Lamelle ihre Position in X-Koordinaten-Richtung (entspricht der Tiefen-Richtung des FZR) vorgegeben werden. Dabei können mittels des Eingabeinstrumentes „Number-Slider“ drei Positionen realisiert werden: 20 mm vor der Außenverglasung, genau mittig im FZR und 20 mm vor der Isolierverglasung. Im nachfolgenden **Bereich 10c** wird die Einzellamelle, welche bereits den korrekten Öffnungswinkel, sowie die passende X-Position aufweist, mehrfach (39 Mal) vervielfacht und mit einem Abstand von $n \cdot 80$ mm nach oben kopiert. Im letzten **Bereich 10d** ist das Vorgehen analog, das heißt alle 39 Lamellen werden mit ihren Attributen in das darüber liegende Fassadenelement kopiert.

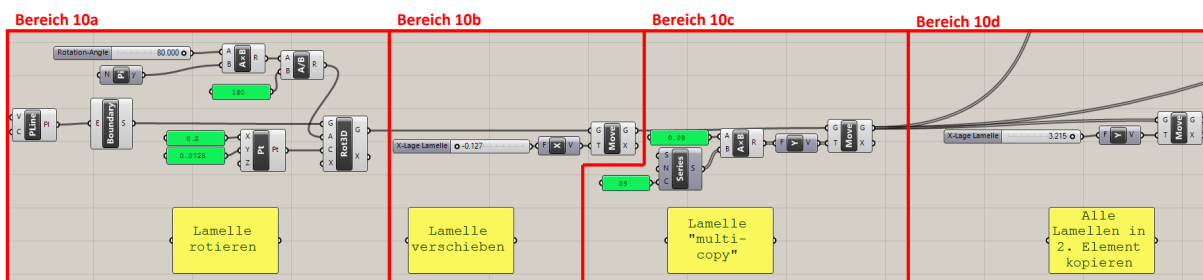


Abbildung 6.4: Grasshopper Script - Detail Bereich 10

Hinweis:

Mit dem beschriebenen Script lassen sich alle Fassadenkonfigurationen mit zwei Elementen und geradem Sonnenschutz abbilden. Für Konfigurationen, in welchen die Verschattung schräg im FZR angeordnet ist, wird der FZR nicht mehr in mehrere Blöcke unterteilt, sondern besteht aus nur einem Oberflächenblock. Der Grund hierfür liegt in einer leicht abgeänderten Vernetzungsstrategie. Das beschriebene Script stellt jedoch das aufwendigste und komplexeste dar, da sich für die beiden anderen Scripte (Abbildung eines Elementes bzw. Abbildung schräger Sonnenschutz) stets Vereinfachungen ergeben.

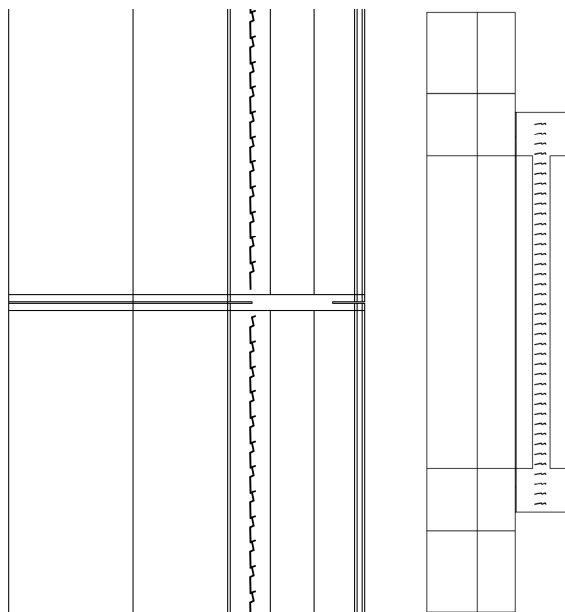


Abbildung 6.5: Ergebnis Parametrisierung der Geometrie in Rhinoceros

In Abbildung 6.5 sind beispielhaft zwei Ergebnisse der parametrisierten Geometrie in Rhinoceros 5 dargestellt. Links sind die Oberflächengeometrien im Stoßbereich zwischen zwei Elementen und rechts ist die gesamte gescriptete Geometrie eines Einzelements dargestellt.

6.2 Vernetzung

Die Erzeugung der Rechengitter erfolgt mit dem in der Ansys Workbench 16.2 implementierten Meshing-Tool. Vernetzungsstrategien, welche zur Anwendung kommen, Attribute, welche die Rechnetze besitzen, sowie die Unabhängigkeit der Simulationsergebnisse von dem Rechengitter werden im Folgenden beschrieben. Des Weiteren werden im Zuge der Vernetzung Strömungsgebiete, Festkörper sowie alle Ränder des Rechenggebietes mit Schlüsselwörtern (wie z.B. fluid, solid, wall, pressure inlet, outlet etc.) definiert. Dadurch gestaltet sich die Definition der tatsächlichen Randbedingungen im Zuge des Solver-Setups durch diverse Voreinstellungen, welche während dem Netz-Import aufgrund erkannter Schlüsselwörter festgelegt werden, wesentlich effizienter.

6.2.1 Vernetzungsstrategie

Es wird eine Meshing-Strategie angewandt, welche auf einem hybriden Rechengitter basiert. Dies bedeutet, dass das Rechenggebiet in verschiedene Blöcke unterteilt werden muss, um diesen Blöcken und vor allem den Kanten, welche die Blöcke unterteilen, verschiedene Netzattribute zuweisen zu können. Die in Blöcke unterteilte Geometrie konnte schon in Kapitel 5.2 definiert werden und ist des Weiteren in Abbildung 6.6 für diverse Fassadenkonfigurationen dargestellt (von links nach rechts: ein Fassadenelement gerader Sonnenschutz, ein Fassadenelement schräger Sonnenschutz, zwei Fassadenelemente - verkleinert, Detail Elementrahmen).

Abbildung 6.6 kann entnommen werden, welche der Blöcke strukturiert, also mit quadratischen Zellen und welche der Blöcke unstrukturiert, das heißt mit dreieckigen Zellen, vernetzt werden. Prinzipiell beruht die Einteilung in strukturierte und unstrukturierte Blöcke auf dem Gedanken, unstrukturierte Gebiete dort anzuwenden, wo aufgrund komplizierter Geometrien eine strukturierte Vernetzung nicht oder nur durch sehr viel Aufwand möglich ist. Des Weiteren dort, wo stark fluktuierende Strömungsgrößen, also Turbulenzen, Rückströmungen etc. auftreten.

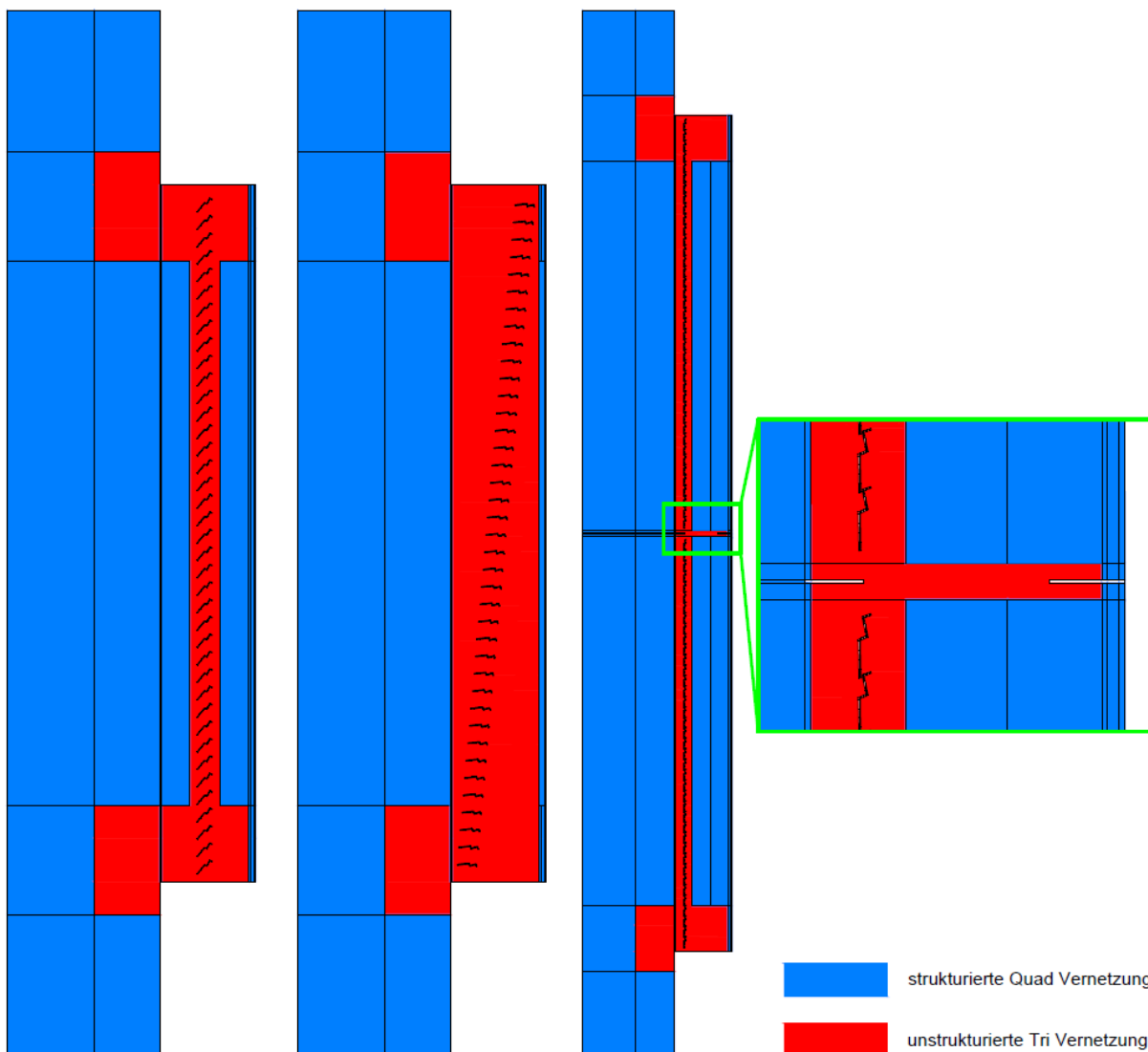


Abbildung 6.6: Meshing-Strategie

Aus diesen Überlegungen heraus werden in den Bereichen, in welchen das Verschattungselement liegt, sowie in unmittelbarer Umgebung der Zu- und Abluftöffnungen unstrukturierte Netze angewandt. Ein weiterer unstrukturierter Block befindet sich im Übergangsbereich zwischen zwei Fassadenelementen, welcher rechts in Abbildung 6.6 dargestellt ist. Dieser ist aufgrund der, durch das Vorhandensein des Elementrahmens bedingten Einengung des FZR gerechtfertigt. Wird der Sonnenschutz schräg im FZR positioniert, ist die Vernetzungsstrategie ein wenig abgewandelt und der gesamte FZR wird unstrukturiert vernetzt. Festkörper innerhalb des Rechengebiets werden, bis auf die Lamellen, aufgrund ihrer einfachen geometrischen Form stets strukturiert vernetzt. Den Lamellen wird lediglich eine Zelle in Dickenrichtung zugewiesen, wodurch Rechenzeiten stark reduziert werden können. Aufgrund der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium (das heißt Wärmeleitung durch die Lamelle ist vernachlässigbar klein) stellt dies eine zulässige Vereinfachung dar.

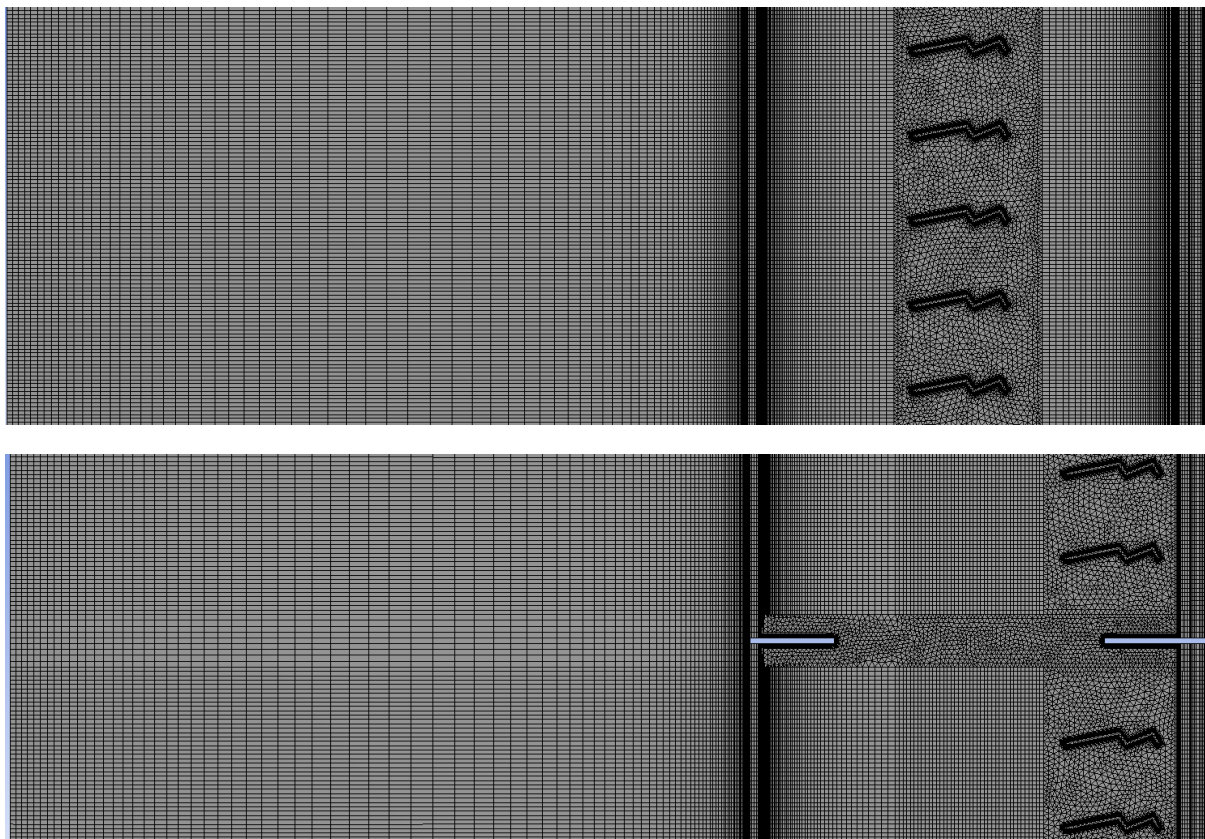


Abbildung 6.7: Beispielhafte Darstellung des Rechengitters etwa auf halber Höhe des Fassadenelements oben sowie im Übergangsbereich zwischen zwei Fassadenelementen unten

Beispielhaft sind in Abbildung 6.7 zwei Rechengitter dargestellt. In obiger Illustration ist das Netz etwa im Bereich der halben Elementhöhe einer 2.-Haut-Fassade abgebildet, während die untere Abbildung das Gitter im Übergangsbereich (Elementstoß) einer Konfiguration bestehend aus zwei Fassadenelementen aufzeigt. In beiden Abbildungen ist die Netzverdichtung zu den Festkörperwänden (Außen- und Isolierverglasung, Lamellen) ersichtlich. Die hohe Auflösung innerhalb der Grenzschicht ergibt sich aus der Anwendung des sogenannten enhanced-wall-treatment (siehe Kapitel 4.1.5), durch welches die Behandlung der Geschwindigkeitsverteilung im wandnahen Bereich vorgegeben wird. Dabei ist vor allem wichtig, dass sich der erste Zellknoten nach dem Festkörperwand in der viskosen Unterschicht befindet und diese daraufhin mit genügend Schichten aufgelöst wird. Das Beurteilungskriterium, ob diese Anforderungen erfüllt werden, kann man durch Berücksichtigung der dimensionslosen Koordinate y^+ überprüfen. Diese sollte einen Wert von $y^+ \approx 1$ oder knapp darüber aufweisen. Die dimensionslose Koordinate y^+ kann erst nach der Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes ermittelt werden und sollte daher ein fester Bestandteil der Plausibilitätsüberprüfung der Ergebnisse sein. Damit y^+ die geforderten Werte erzielt, kann die Höhe der ersten Zelle nach dem Festkörperwand durch Vorgabe der Dichte und Viskosität des Fluids sowie einer ungefähren Geschwindigkeit der freien Strömung abgeschätzt werden. Die Abschätzung ergibt eine Zellhöhe von etwa

0,2 mm für Konfigurationen mit einem Fassadenelement und 0,1 mm für Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen. Im Zuge des Post-Processings der CFD-Simulationen ergeben sich mit diesen Vorgaben für alle Festkörperländer (Lamelle, Außen- und Isolierverglasung) Werte für $y^+ \leq 1$. Die einzige Ausnahme, bei der die geforderten Werte geringfügig überschritten werden, sind Zellen direkt am Luftaustritt, bei denen die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Dort betragen die Werte $y^+ \approx 2$. Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass der wandnahe Bereich mit vorliegender Vernetzung zufriedenstellend verdichtet bzw. aufgelöst ist und dadurch die Randbedingungen für die Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung angemessen vorgegeben werden können.

6.2.2 Netzattribute

Aufgrund vieler verschiedener, geometrischer Randbedingungen muss für jede Fassadenkonfiguration (Geometrien 1 - 30 für ein Fassadenelement und 31 - 60 für zwei Fassadenelemente: Nummerierung laut der Variantenmatrix in Kapitel 5.5) ein eigenes Rechengitter erstellt werden. Diverse Eigenschaften, wie etwa die Anzahl der Zellen oder die in Kapitel 4.5.5 definierten Qualitätskriterien, sind Gegenstand dieses Kapitels und in den nachfolgenden Tabellen 6.1 und 6.2 dargestellt.

Die maximale Elementanzahl der Rechengitter für Konfigurationen mit einem Fassadenelement richtet sich zunächst nach ähnlichen Studien, wie etwa nach jener von Hazem et al. [26], welche die Berechnungen auf Netzen mit etwa 280 000 Zellen durchführen. Des Weiteren muss vor allem bei jenen Fassadenkonfigurationen, welche Strömungen über zwei Fassadenelemente erfassen, darauf geachtet werden, dass die Anzahl der Zellen die maximal erlaubte Zellenanzahl der Studentenversion von Ansys Workbench 16.2 nicht überschreitet. Die Einschränkung der Studentenversion liegt für fluiddynamische Berechnungen bei 512 000 Zellen.

Wie Tabelle 6.1 entnommen werden kann, beträgt die durchschnittliche Netzgröße für ein Fassadenelement im Falle der 2.-Haut-Fassade (Geometrien 1 bis 15) 275 000 und für eine Wirkungsweise als Pufferfassade (Geometrien 16 bis 30) 194 000 Zellen. Die maximale orthogonale Schiefe der maßgebenden Zelle liegt immer deutlich unter 0,95 und die durchschnittliche orthogonale Schiefe aller Zellen ist deutlich geringer (Durchschnittswert aller Geometrien beträgt 0,03 für 2.-Haut- und 0,04 für Pufferfassaden). Da die orthogonale Qualität der maßgebenden Zelle 0,01 keineswegs unterschreitet und der Durchschnittswert aller Zellen pro Geometrie deutlich höher ist kann auch aufgrund der orthogonalen Qualität eine hohe Netzqualität erzielt werden. Des Weiteren sind Kennwerte für das Seitenverhältnis dargestellt, wobei die hohen Seitenverhältnisse vorwiegend in den Bereichen der Grenzschicht auftreten, in welcher die Strömungsrichtung mit der Längsrichtung der Zellen übereinstimmt. Dadurch kommt es trotz dieser hohen Seitenverhältnisse zu keiner negativen Beeinflussung der Ergebnisse.

Konfiguration	Elementanzahl	orth. Schiefe		orth. Qualität		Seitenverhältn.	
		Max.	Aver.	Min.	Aver.	Max.	Aver.
Geometrie 1	282k	0,77	0,03	0,04	0,95	25	3,1
Geometrie 2	282k	0,77	0,03	0,04	0,95	25	3,1
Geometrie 3	281k	0,77	0,03	0,04	0,94	26	3,1
Geometrie 4	268k	0,79	0,04	0,05	0,94	26	3,1
Geometrie 5	281k	0,77	0,04	0,06	0,93	26	3,0
Geometrie 6	274k	0,77	0,03	0,10	0,95	26	3,2
Geometrie 7	279k	0,77	0,03	0,11	0,95	26	3,2
Geometrie 8	274k	0,77	0,03	0,08	0,95	26	3,1
Geometrie 9	279k	0,59	0,03	0,26	0,94	26	3,0
Geometrie 10	270k	0,77	0,04	0,09	0,93	26	3,1
Geometrie 11	270k	0,80	0,03	0,10	0,95	68	3,3
Geometrie 12	268k	0,85	0,03	0,09	0,95	93	3,9
Geometrie 13	268k	0,80	0,03	0,06	0,96	76	3,6
Geometrie 14	279k	0,83	0,03	0,05	0,95	82	3,1
Geometrie 15	265k	0,81	0,03	0,06	0,95	77	3,2
Mittelwert	275k	0,78	0,03	0,08	0,95	42	3,2
Geometrie 16	235k	0,62	0,04	0,22	0,93	22	2,9
Geometrie 17	201k	0,62	0,04	0,21	0,93	26	3,5
Geometrie 18	195k	0,62	0,03	0,22	0,92	26	3,2
Geometrie 19	196k	0,62	0,05	0,11	0,90	26	3,1
Geometrie 20	186k	0,62	0,05	0,13	0,90	26	3,2
Geometrie 21	192k	0,62	0,04	0,19	0,93	26	3,0
Geometrie 22	202k	0,62	0,04	0,21	0,93	26	3,2
Geometrie 23	193k	0,62	0,04	0,30	0,92	26	3,2
Geometrie 24	181k	0,63	0,06	0,28	0,88	26	3,0
Geometrie 25	195k	0,61	0,05	0,16	0,90	26	3,1
Geometrie 26	190k	0,90	0,04	0,24	0,94	139	3,4
Geometrie 27	199k	0,77	0,04	0,13	0,94	64	3,4
Geometrie 28	190k	0,74	0,05	0,13	0,92	54	3,5
Geometrie 29	185k	0,80	0,04	0,23	0,94	51	3,4
Geometrie 30	172k	0,80	0,04	0,04	0,93	74	3,6
Mittelwert	194k	0,68	0,04	0,17	0,92	41	3,2

Tabelle 6.1: Netzattribute der Konfigurationen mit einem Fassadenelement

Aus Tabelle 6.2 kann entnommen werden, dass die durchschnittliche Zellenanzahl der Rechengitter für zwei Fassadenelemente im Falle der 2.-Haut-Fassade (Geometrien 31 bis 45) 475 000 und für eine Wirkungsweise als Pufferfassade (Geometrien 46 bis 60) 387 000 beträgt. Die maximale orthogonale Schiefe der maßgebenden Zelle liegt stets unter 0,95 und die durchschnittliche orthogonale Schiefe aller Zellen ist deutlich geringer (Durchschnittswert aller Geometrien beträgt 0,04 für 2.-Haut- und 0,05 für Pufferfassaden). Auch die orthogonale Qualität der Zellen kann die geforderten Qualitätskriterien erfüllen.

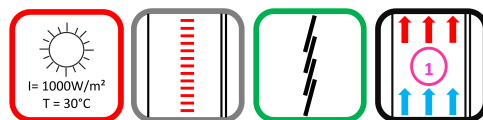
Konfiguration	Elementanzahl	orth. Schiefe		orth. Qualität		Seitenverhältn.	
		Max.	Aver.	Min.	Aver.	Max.	Aver.
Geometrie 31	476k	0,86	0,03	0,04	0,95	31	3,4
Geometrie 34	476k	0,87	0,04	0,03	0,92	29	3,3
Geometrie 35	478k	0,87	0,04	0,04	0,91	29	3,3
Geometrie 39	480k	0,86	0,03	0,03	0,95	27	3,9
Geometrie 40	482k	0,77	0,04	0,03	0,92	39	3,3
Geometrie 41	474k	0,86	0,04	0,04	0,92	87	3,3
Geometrie 43	468k	0,86	0,03	0,05	0,96	88	3,6
Geometrie 44	473k	0,87	0,04	0,03	0,93	112	3,4
Geometrie 45	471k	0,87	0,04	0,05	0,93	61	4,2
Mittelwert	475k	0,85	0,04	0,04	0,93	56	3,5
Geometrie 46	350k	0,73	0,04	0,12	0,93	31	3,4
Geometrie 47	381k	0,73	0,04	0,16	0,93	31	3,5
Geometrie 48	358k	0,64	0,04	0,18	0,92	39	3,4
Geometrie 49	423k	0,65	0,06	0,18	0,88	48	3,1
Geometrie 53	364k	0,71	0,07	0,10	0,88	31	4,8
Geometrie 54	404k	0,68	0,06	0,07	0,93	25	3,4
Geometrie 56	404k	0,32	0,06	0,08	0,88	23	3,8
Geometrie 57	376k	0,84	0,03	0,03	0,95	96	4,6
Geometrie 59	402k	0,80	0,06	0,13	0,89	96	4,1
Geometrie 60	408k	0,79	0,06	0,12	0,89	54	3,8
Mittelwert	387k	0,69	0,05	0,12	0,91	47	3,8

Tabelle 6.2: Netzattribute der Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen

6.2.3 Netzabhängigkeitsstudie

Von großer Bedeutung ist es, dass berechnete Ergebnisse unabhängig vom Rechengitter sind. Das bedeutet, dass sich für feinere Netze dieselben Ergebnisse wie für gröbere Netze ergeben sollten. Ist dies gewährleistet, liegen die Ergebnisse des groben Gitters in netzunabhängiger Form vor. Es werden zwei Netz-Abhängigkeitsstudien durchgeführt, um zu kontrollieren, ob die Ergebnisse, welche mit den in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Netzen erzielt werden, bereits unabhängig von der Feinheit der Rechengitter sind.

Studie für 2.-Haut-Fassade: Die Netzabhängigkeit der Ergebnisse wird für die Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade am Beispiel der Geometrie 12 am sonnigen Sommertag durchgeführt. Diese Konfiguration weist einen geschlossenen, mittig im Fassadenzwischenraum angeordneten Sonnenschutz auf, wobei die Strömung über die Höhe eines Fassadenelementes wirkt.



Den Ausgangspunkt für die Netzverfeinerung stellt das grobe Netz mit etwa 270 000 Zellen dar. Daraufhin wird die Auflösung des Rechengitters in allen Blöcken etwa um den Faktor 1,5 erhöht, sodass sich ein feineres Netz mit etwa 410 000 Zellen ergibt. Abbildung 6.8 stellt diverse Ergebnisse für das grobe (strichlierte Linien) und das feine Rechengitter (durchgezogene Linien) gegenüber. Gegenübergestellt werden jeweils der Temperatur- (links oben) und Geschwindigkeitsverlauf (links unten) an beiden horizontalen, in Abbildung 5.5 definierten Auswertungsprofilen 1 und 2 sowie der Temperaturverlauf an den vertikalen Profilen a und b.

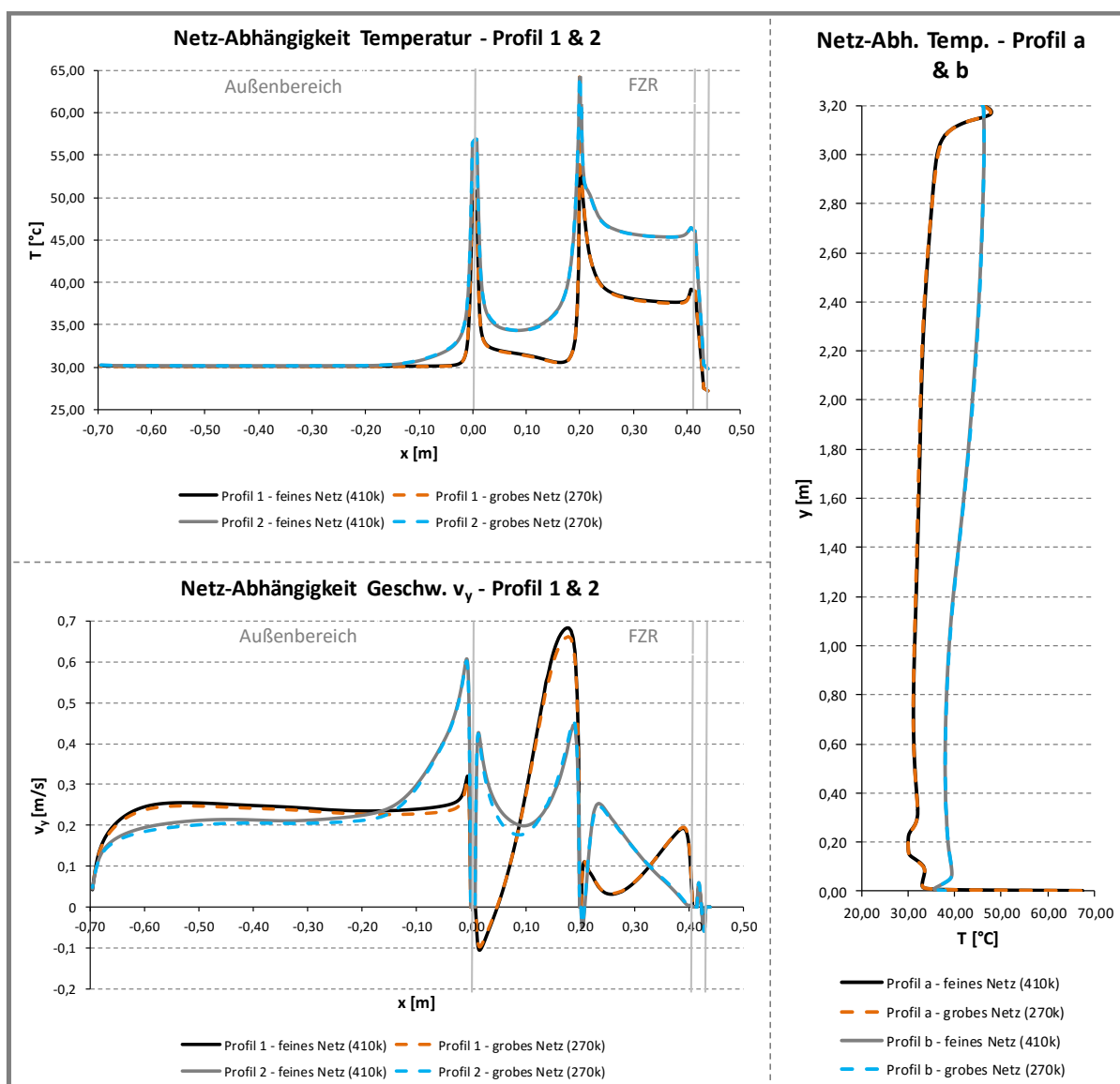


Abbildung 6.8: Netzabhängigkeitsstudie 2.-Haut-Fassade

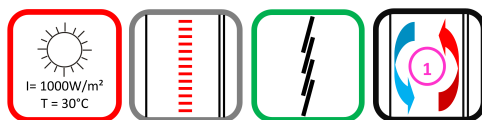
Die gegenübergestellten Temperaturverläufe weisen dabei sehr gute Übereinstimmung auf. Anhand des Geschwindigkeitsverlaufes ist zu erkennen, dass Geschwindigkeiten (y -Komponente des Geschwindigkeitsvektors) mit dem groben Netz zum Teil marginal unterschätzt werden.

Außerdem werden weitere Ergebnis-Parameter, welche zur Auswertung der Ergebnisse herangezogen werden für beide Netzfeinheiten gegenübergestellt: Tabelle 6.3 zeigt hinsichtlich Temperaturen und Wärmestromdichten sehr gute Übereinstimmung. Über die Fläche gemittelte Geschwindigkeiten und Massenströme weisen geringfügige Abweichungen ($< 4\%$) auf. Da die beschriebenen Abweichungen nur in sehr kleinem Maße auftreten und die Rechenzeit durch die Gitterverfeinerung stark ansteigt ist es zulässig die Berechnungen der Parameterstudien auf den größeren Netzen durchzuführen.

Rechengitter	$T_{1,air}$ °C	$T_{2,air}$ °C	T_{in} °C	T_{out} °C	v_{in} m/s	v_{out} m/s	\dot{m}_{out} kg/s	Q_{tot} W/m ²	Q_{rad} W/m ²
grobes Netz (270k)	35,80	42,27	30,72	41,73	0,53	0,48	0,088	-101,6	-34,8
feines Netz (410k)	35,80	42,31	30,74	41,55	0,55	0,49	0,090	-101,2	-34,7
Abweichung [%]	0,0	0,1	0,1	0,4	3,6	2,0	1,8	0,4	0,4

Tabelle 6.3: Netzabhängigkeitsstudie 2.-Haut-Fassade

Studie für Pufferfassade: Analog zur Studie für die Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade wird für ein Fassadenelement, welches als Pufferfassade fungiert eine Netz-Abhängigkeitsstudie durchgeführt. Es gelten mit Ausnahme der geschlossenen Lüftungsöffnungen dieselben dynamischen Parameter wie im Falle der 2.-Haut-Fassade (Fassadenkonfiguration 27).



Wiederum wird das grobe Netz mit etwa 200 000 Zellen verfeinert, wodurch ein Gitter mit etwa 310 000 Zellen entsteht. Die Ergebnisse der CFD-Simulation beider Rechengitter (durchgezogene Linie: feines Netz; strichlierte Linie: grobes Netz) sind wiederum grafisch in Abbildung 6.9 dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Temperaturverlaufs an den horizontalen Profilen 1 und 2 (links oben), an den vertikalen Profilen a und b (rechts) sowie des Geschwindigkeitsverlaufes an beiden horizontalen Profilen 1 und 2 (links unten). Wiederum erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnis-Parametern, welche zur Auswertung herangezogen werden. Die Anzahl der Einträge in Tabelle 6.4 verringert sich im Vergleich zu jenen in Tabelle 6.3, da einige Parameter (Ein- oder Austrittstemperaturen, Massenströme an Ein- und Austritt etc.) im Falle geschlossener Zu- und Abluftöffnungen nicht vorhanden sind. Aus den vorliegenden Ergebnissen kann geschlossen werden, dass durch die Anwendung der größeren Rechengitter bereits netzunabhängige Ergebnisse vorliegen und eine weitere Netzverfeinerung nicht notwendig ist.

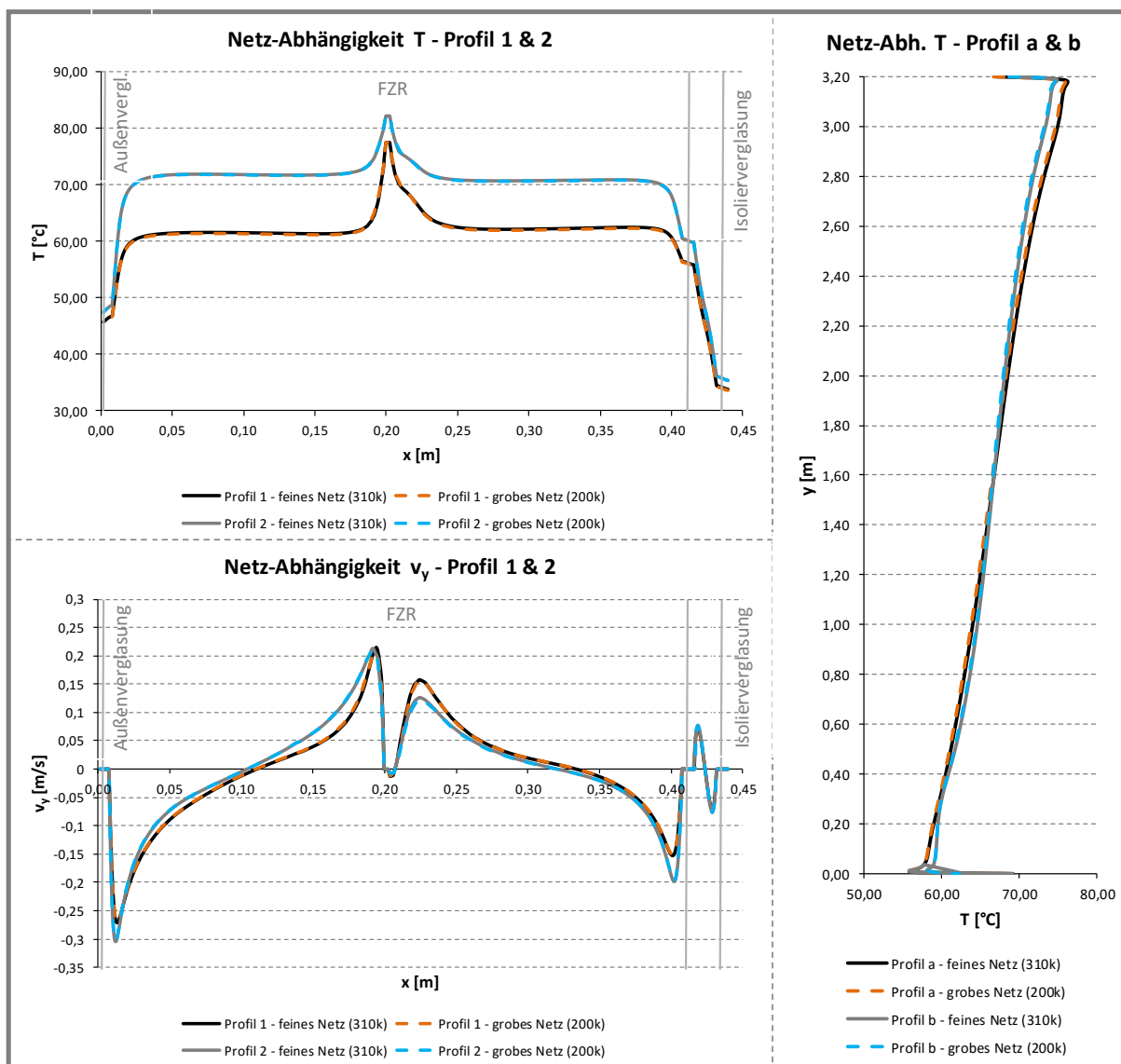


Abbildung 6.9: Netzabhängigkeitsstudie Pufferfassade

Rechengitter	$T_{1,air}$ °C	$T_{2,air}$ °C	Q_{tot} W/m ²	Q_{rad} W/m ²
grobes Netz (270k)	62,20	71,25	-178,5	-67,0
feines Netz (410k)	62,37	71,45	-179,4	-67,3
Abweichung [%]	0,3	0,3	0,5	0,5

Tabelle 6.4: Netzabhängigkeitsstudie Pufferfassade

6.3 Solver-Setup

Als Solver wird das Software-Paket Fluent 16.2 eingesetzt, welches ebenso in der studentischen Version der Ansys Workbench 16.2 eingebunden ist. Durch die Anwendung des Analysesystems

Fluiddynamik (im Vergleich zu Komponentensystemen) ist es möglich, das Gitter nach dessen Generierung direkt durch Öffnen des Solvers zu importieren.

Des Weiteren sind durch den Import des Netzes zugrundeliegende Gleichungen für die Berechnungen des Strömungsfeldes (Kontinuitätsgleichung und Impulsgleichungen siehe Beschreibung in Kapitel 4.1) bereits aktiviert. Da der Wärmetransport einen wichtigen Aspekt in der vorliegenden Arbeit darstellt, muss auch die Energiegleichung gelöst werden. Weitere Gleichungen, Definitionen der Randbedingungen und Materialeigenschaften sowie verwendete numerische Methoden werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

6.3.1 Turbulenzmodellierung

Durch die Absorption von Solar- und Wärmestrahlung bzw. auch durch die Wärmeleitung durch die Isolierverglasung, treten an den Festkörperändern der Außenverglasung, des Sonnenschutzes und der Isolierverglasung Temperaturdifferenzen zum strömenden Fluid auf. Diese Differenzen bewirken ebenso Unterschiede in der Luftdichte (Abhängigkeit der Luftdichte von der Temperatur wird mittels Boussinesq-Approximation modelliert: siehe Kapitel 6.3.3), welche Auftriebs- oder Abtriebsströmungen, je nachdem ob der Festkörperrand gekühlt oder geheizt wird, induzieren. In solchen Strömungen, welche als natürliche (freie) Konvektion bezeichnet werden, wird die Stärke, der durch thermischen Auftrieb hervorgerufenen Strömung mithilfe einer dimensionslosen Konstante, der sogenannten Rayleigh-Zahl Ra beschrieben. Bei einer längs umströmten Platte (wie bspw. die Außenverglasung eine darstellt) ist diese natürliche Konvektionsströmung zunächst laminar (laminare Grenzschicht), schlägt nach einer gewissen Plattenlänge in einen Übergangsbereich (Transition) um, bis sich schlussendlich eine turbulente Strömung (turbulente Grenzschicht) einstellt. Der Theory Guide von ANSYS [2] gibt vor, dass Rayleigh-Zahlen unter 10^8 auf laminare auftriebsgesteuerte Strömungen hindeuten und der Übergang zu turbulenten, natürlichen Konvektionsströmungen im Bereich $10^8 < Ra < 10^{10}$ stattfindet [43].

Nach obiger Definition für turbulente auftriebsgesteuerte Strömungen wird deutlich, dass anhand der CFD-Ergebnisse zunächst überprüft werden muss, ob die Annahme der Modellierung einer turbulenten Strömung eine gültige ist. Hierzu erfolgt eine tabellarische Auswertung der Rayleigh-Zahlen für Strömungen in Konfigurationen mit einem Fassadenelement je Außenklima und Wirkungsweise (2.-Haut- oder Pufferfassade). In Tabelle 6.5 sind dabei weitere dimensionslose Kennzahlen und Parameter, welche zur Berechnung benötigt werden, sowie die erhaltenen Rayleigh-Zahlen, abgebildet.

Zur Ermittlung der Rayleigh-Zahlen werden je Funktionsweise der Fassade und je Außenklima am oberen Profil 2 an der Innenseite der Außenverglasung ($T_{2,2}$) oder an der Außenseite der

Isolierverglasung ($T_{2,4}$) die geringsten Oberflächentemperaturen aus allen 15 Konfigurationen mit selber Wirkungsweise und selben Außenbedingungen herangezogen. Diese Temperaturen werden dann als Wandtemperatur T_w in Tabelle 6.5 definiert. Der Grund dieser Vorgehensweise liegt darin, dass das Vorliegen turbulenter Strömungsverhältnisse bei der geringsten Temperatur (und dadurch geringsten Temperaturdifferenz) folglich auch für höhere Temperaturdifferenzen gelten muss. Ähnliches gilt für Fassadenkonfiguration, bei welchen die auftriebsgetriebene Strömung über zwei Fassadenelemente wirkt: Liegen an einem Fassadenelement schon turbulente Strömungsverhältnisse vor, muss dies auch an zwei Fassadenelementen gelten.

	Tag A		Tag B		Tag C		Tag D	
	2.Haut	Puffer	2.Haut	Puffer	2.Haut	Puffer	2.Haut	Puffer
L m	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
T_w °C	28,8	26,2	57,2	62,2	6,6	10,9	20,6	33,8
T_b °C	25,3	25,3	34,4	73,6	-8,4	3,6	-1,4	33,4
T_m °C	27,1	25,8	45,8	67,9	-1,1	7,3	9,6	33,6
ν $\frac{m^2}{s}$	1,58E-5	1,56E-5	1,75E-5	1,97E-5	1,32E-5	1,40E-5	1,42E-5	1,64E-5
β $\frac{1}{K}$	0,0033	0,0033	0,0031	0,0029	0,0037	0,0036	0,0035	0,0033
Gr -	1,24E+10	3,55E+9	6,16E+10	2,27E+10	8,60E+10	3,53E+10	1,02E+11	1,16E+9
Pr -	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
Ra -	8,82E+9	2,52E+9	4,37E+10	1,61E+10	6,11E+10	2,51E+10	7,27E+10	8,23E+8

Tabelle 6.5: Ermittelte Rayleigh-zahlen durch die CFD-Ergebnisse

Um die dimensionslosen Kennzahlen ermitteln zu können, werden Gleichungen aus Kapitel 3.4 mit Stoffwerten (kinematische Viskosität, isobarer Ausdehnungskoeffizient) in Abhängigkeit der, aus der Wand- und Lufttemperatur in hinreichend großem Abstand zur Wand (T_b) gemittelten, Temperatur T_m herangezogen.

Wie den berechneten Rayleigh-Zahlen in Tabelle 6.5 entnommen werden kann, ist die Annahme, die Konvektionsströmungen als turbulente Strömungen zu modellieren, zutreffend. Alle Ra-Zahlen deuten an, dass die Strömungen zumindest im Übergangsbereich von laminaren in turbulente Konvektionsströmungen liegen.

Als Turbulenzmodell wird das **k- ϵ -RNG-Turbulenzmodell** angewandt, welches bereits in Kapitel 4.1.5 näher beschrieben wurde und laut Pasut et al. [48] für zweidimensionale Betrachtungen mit modelliertem Außenbereich die besten Ergebnisse hinsichtlich der Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder aller verfügbaren 2-Gleichungs-Turbulenzmodelle erzielt. Die Modellkonstanten werden unverändert auf ihren Defaultwerten belassen und die Prandtl-Zahl wird mit 0,71 für Luft [43] vorgegeben. Des Weiteren wird die Option „volle Effekte aus Auftrieb“ („full-buoyancy-effects“) aktiviert, welche dafür sorgt, dass diese Effekte nicht nur zur Erzeugung von kinetischer Energie in der k-Gleichung, sondern auch in der Transportgleichung

der Dissipation (ϵ -Gleichung) der Energie berücksichtigt werden [2]. Außerdem muss im Zuge des Setups des Turbulenzmodells definiert werden, wie wandnahe Bereiche modelliert werden. Hierzu wurden in Kapitel 4 bereits zwei Ansätze, die Standard-Wandfunktion (Standard wall-function) sowie die erweiterte Wandbehandlung (enhanced wall treatment) vorgestellt. Im Zuge der Parameterstudien wird, wie für das $k\text{-}\epsilon$ -RNG-Turbulenzmodell üblich, die erweiterte Wandbehandlung angewandt. Die Geschwindigkeitsgrenzschichten müssen daher vom Netz vollständig aufgelöst werden. Die Einhaltung von $y^+ \approx 1$, das heißt die Einhaltung der Forderung der erweiterten Wandbehandlung, dass die dimensionslose Koordinate des ersten Zellknotens ca. 1 beträgt wurde bereits in Kapitel 6.2 überprüft.

6.3.2 Strahlungsmodellierung

Thermische Strahlung wird mithilfe der **diskreten Ordinate-Methode** modelliert (siehe Kapitel 4.1.6). Der zweidimensionale Raum wird an jeder Stelle in 4×4 ($N_\Phi \times N_\Phi$) Raumwinkel unterteilt, was laut dem User's Guide von Ansys [3] gute Ergebnisse hervorbringt, jedoch die Rechenzeit gegenüber der Defaulteinstellung (2×2) deutlich steigert. Die Pixelation wird mit 3×3 festgelegt, welche im User's Guide von Ansys [3] bei einer Anwendung von semi-transparenten Rändern empfohlen wird. Wie aus Kapitel 3.4 hervorgeht, stehen strahlungsrelevante Eigenschaften (Emissionsgrad, Absorptionsgrad etc.) von Glaswerkstoffen in Abhängigkeit zur Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Daher ist es notwendig, diese nicht-graue Strahlung durch mehrere Wellenlängenbänder abzubilden. Hazem et al. [26] verglichen die erzielten Ergebnisse, welche durch die Modellierung der Glaseigenschaften mit zwei Bändern erzielt wurden, mit jenen, in welchen vier Wellenlängen-Bänder angewandt wurden. Sie sowie auch der User's Guide von Ansys [3] kommen zu dem Schluss, dass eine Modellierung der Glaseigenschaften mit zwei Wellenlängenbändern angemessen, gute Ergebnisse liefert. Infolgedessen werden auch in der vorliegenden Arbeit die Glaseigenschaften mit zwei Wellenlängenbändern modelliert, wobei die Start- und End-Wellenlänge in μm ohne Lücke angegeben werden. Die sogenannten Cut-off-Wellenlängen λ_c , an welcher sich Eigenschaften von Materialien ändern, müssen mit dem Brechungsindex des jeweiligen Materials normiert werden, da Fluent die Spezifikation von Wellenlängenbändern für äquivalente Medien mit einem Brechungsindex $RI=1$ (Vakuum) verlangt. Dementsprechend werden die beiden Wellenlängenbänder von 0 bis $RI \cdot \lambda_c$ und von $RI \cdot \lambda_c$ bis 100 limitiert. Das obere Limit wird, um das gesamte Strahlungsspektrum abzudecken, sehr hoch gewählt. Analog zu Studien von Hazem et al. [26] und jener von Iyi et al. [32] wird das Band, welches die Eigenschaften von Glas auf solare Belastung (UV-Strahlung) abbildet von 0 bis $2,7 \mu\text{m}$ gewählt. Für langwellige Wärmestrahlung, für welche Glas quasi undurchlässig ist, wird das Band von $2,7$ bis $100 \mu\text{m}$ angesetzt. Dieser Ansatz der cut-off-Wellenlänge stimmt mit den beschriebenen Materialeigenschaften von Glaswerkstoffen in Kapitel 3.4.2 überein [3].

Die Strahlungsgleichung (RTE - Radiative Transfer Equation) wird alle fünf Iterationen gelöst, wodurch die Rechenzeit gesenkt werden kann. Zusätzlich wird die Streuung der Strahlung an Luftpartikeln oder an Festkörperoberflächen vernachlässigt, was zur Folge hat, dass der Streukoeffizient $\sigma_s = 0$ gesetzt wird. Auf die Definition von strahlungsrelevanten Materialeigenschaften wird in den Kapiteln 6.3.3 und 6.3.4, also im Zuge der Beschreibung von Material- und Fluideigenschaften sowie im Zuge der Definition der Randbedingungen, eingegangen.

6.3.3 Material- und Fluideigenschaften

Zur Modellierung der Fassadenkonfigurationen ist es notwendig, Materialien durch einige Attribute zu beschreiben. Dazu zählen beispielsweise Wärmeleitfähigkeiten, spezifische Wärmekapazitäten oder Dichten von Festkörpern und Fluiden (Außenverglasung, Isolierverglasung, Lamelle/Aluminium, Luft) sowie zusätzliche Parameter für strömende Fluide, wie etwa die Viskosität. Außerdem ist es aufgrund der Strahlungsmodellierung notwendig, einige zusätzliche Materialeigenschaften, wie etwa Brechungsindizes, Streukoeffizienten oder Absorptionskoeffizienten (nicht zu verwechseln mit dem Absorptionsgrad) zu definieren.

Eine zentrale Aufgabe bei der Modellierung von Strömungen, welche durch thermischen Auftrieb hervorgerufen werden, ist die Definition der Luftdichte in Abhängigkeit der Lufttemperatur. Hierzu gibt es mehrere Modellierungsstrategien, wobei in vorliegender Arbeit das sogenannte Boussinesq-Modell (oder Boussinesq-Approximation) angewandt wird. Es erzielt für viele Problemstellungen schnelle, konvergente Lösungen und dadurch kann die Rechenzeit gesenkt werden. Die Approximation behandelt dabei die Luftdichte in allen Termen der zugrundeliegenden Gleichungen (also z.B. in den konvektiven und instationären Termen der Impulsgleichungen) als Konstante, ausgenommen im Auftriebsterm (Massenkraft- oder Body-Force-Term), in welchem die Dichte als dynamische Variable betrachtet wird. Die Boussinesq-Approximation beschreibt, wie in Gleichung 6.1 ersichtlich ist, einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Temperatur, mit welchem schlussendlich die Dichte ρ im Auftriebsterm durch die Approximation ersetzt werden kann [3]:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T) \qquad (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \qquad (6.1)$$

In Gleichung 6.1 beschreibt β [1/K] den thermischen Ausdehnungskoeffizienten, welcher bei der Anwendung der Boussinesq-Approximation eine Kenngröße darstellt, welche als Materialeigenschaft definiert werden muss. ρ_0 ist die Dichte, welche in den anderen Termen der zugrundeliegenden Gleichungen als Konstante betrachtet wird. Sie wird dabei als jene Dichte definiert, welche Luft bei Referenztemperatur T_0 aufweist. Die Referenztemperatur (englisch: operating Temperature) wird der jeweiligen Außentemperatur gleichgesetzt und beträgt demnach, je nach Außenklima 25, 30, -10 oder -5 °C. Des Weiteren ist aus der Approximation

ersichtlich, dass die Erdbeschleunigung g in passender Koordinatenrichtung im Solver aktiviert werden muss.

Die Boussinesq-Approximation führt im Falle von zu hohen Temperaturdifferenzen zu ungenauen oder gar falschen Ergebnissen. Der Gültigkeitsbereich für das Modell kann entsprechend der Gleichung 6.2 angegeben werden [3]:

$$\beta(T - T_0) \ll 1 \quad (6.2)$$

Beispielhaft kann die 2.-Haut-Fassade am Simulationstag D betrachtet werden. Die Temperatur der Wand beträgt $20,6^\circ\text{C}$ (siehe Tabelle 6.5) und die Betriebstemperatur entspricht -5°C . Mithilfe des thermischen Ausdehnungskoeffizienten kann Gleichung 6.2 ausgewertet werden. Man stellt fest, dass $0,09 \ll 1$ ist, wodurch die Anwendung des Modells zulässig ist.

In Tabelle 6.6 sind diverse Fluideigenschaften für das strömende semi-transparente Medium Luft je Außenklima (Tage A bis D) angegeben. Die Dichte, der thermische Ausdehnungskoeffizient sowie die Viskosität werden als Funktion der Betriebstemperatur angegeben, während andere Fluideigenschaften (spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) aufgrund geringfügiger Relevanz der Veränderung dieser Eigenschaften mit der Temperatur als konstant vorausgesetzt werden. Der Absorptionskoeffizient, welcher nachfolgend genauer erläutert wird, sowie der Brechungsindex sind konstante Größen.

Eigenschaft	Tag A	Tag B	Tag C	Tag D
T_0 [$^\circ\text{C}$]	25	30	-10	-5
ρ_0 [kg/m^3]	1,185	1,165	1,343	1,318
β [$1/\text{K}$]	0,00335	0,00330	0,00380	0,00373
ν [m^2/s]	1,56E-5	1,60E-5	1,24E-5	1,30E-5
c_p [J/kgK]	1006,43	1006,43	1006,43	1006,43
λ [W/mK]	0,024	0,024	0,024	0,024
A [$1/\text{m}$]	0,01	0,01	0,01	0,01
RI [-]	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabelle 6.6: Fluideigenschaften der semi-transparenten Luft je Außenklima

Die an der Simulation beteiligten Festkörper sind, wie bereits zuvor erwähnt, semi-transparente Festkörper (Außenverglasung, Isolierverglasung) sowie opake Festkörper (Lamelle, Elementrahmen). Ihre Materialeigenschaften werden ähnlichen Studien, wie zum Beispiel Studien von Iyi et al. [32] oder Ji et al. [33], entnommen und mit den Kennwerten aus der Materialdatenbank, welche Fluent zur Verfügung stellt, abgeglichen. Lediglich der Emissionsgrad der Verglasungselemente kann nicht übernommen werden, da Fluent Emission von inneren semi-transparenten Oberflächen in Form der Definition eines internen Emissionsgrades nicht inkludiert [2]. Die Materialeigenschaften der beteiligten Festkörper können Tabelle 6.7 entnommen werden.

Eigenschaft	Außenvergl.	Isoliervergl.	Lamelle	Rahmen
ρ [kg/m ³]	2500	2500	2719	2719
c_p [J/kgK]	840	840	871	871
λ [W/mK]	1,7	1,7	202,4	202,4
A [1/m]	30 ¹ ; 3000 ²	30 ¹ ; 1285,7 ²	-	-
RI [-]	1,5	1,5	1,44	1,44
ϵ [-]	-	-	0,7	0,5

¹ für solares Wellenlängenband 0 - 2,7 μm

² für infrarotes Wellenlängenband 2,7 - 100 μm

Tabelle 6.7: Thermo-physikalische Eigenschaften der an den Parameterstudien beteiligten Festkörper

Absorptionskoeffizient: Dieser Eigenschaft wird ein kurzer Absatz gewidmet, da darauf geachtet werden muss, dass dieser Kennwert nicht mit dem Absorptionsgrad (Verhältnis der absorbierten Strahlung zur auftreffenden Strahlung) verwechselt wird. Der stoffabhängige Absorptionskoeffizient A [1/m] oder auch Extinktions- oder Auslöschungskoeffizient gibt an, wie stark elektromagnetische Strahlung beim Durchgang durch (semi-) transparente Medien abgeschwächt wird. Dies kann durch das Abschwächungsgesetz von Bouguer (Gleichung 6.3) beschrieben werden, welches den Transmissionsgrad infolge von Absorption angibt [56]:

$$\tau_a = e^{\frac{-A \cdot s}{\cos(\Theta_2)}} \quad (6.3)$$

Die Schichtdicke des Materials, durch welche die Strahlung transmittiert wird, wird durch den Parameter s angegeben. Θ_2 ist der Ausfallwinkel der Strahlung nach dem Auftreffen auf dem Festkörpertrand. Dieser kann mithilfe des Brechungsgesetzes von Snellius mit bekannten Brechungsindizes beider beteiligter Medien (Luft, semi-transparenter Feststoff) und bekanntem Einfallwinkel der Strahlung bestimmt werden. Der Gesamttransmissionsgrad des semi-transparenten Mediums ergibt sich aus der Differenz des Grades aus Absorption (Gleichung 6.3) und jenem Anteil der beim Austritt an der zweiten Grenzfläche durch Reflexion (inkl. Mehrfachreflexion) im Medium verbleibt [56].

Mithilfe des Gesetzes in Gleichung 6.3 und den von Ji et al. [33] übernommenen Absorptionskoeffizienten (siehe Tabelle 6.7) ist ersichtlich, dass die Koeffizienten das Strahlungsverhalten von Glas gut abbilden. Der Transmissionsgrad für kurzwellige Solarstrahlung ist demnach recht hoch, während der Transmissionsgrad für thermische Infrarotstrahlung verschwindend klein wird. Diverse Materialeigenschaften und strahlungsrelevante Parameter werden dabei nicht nur im Rahmen der Materialerstellung definiert, sondern auch im Zuge der Definitionen der Randbedingungen des Rechengebietes, welche im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden.

6.3.4 Randbedingungen

Eine geeignete Wahl und Definition der Randbedingungen des Rechengebietes ist von großer Bedeutung, da diese die numerischen Ergebnisse maßgebend bestimmen. Die modellierten Randbedingungen sind in Abbildung 6.10 sowohl für die Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade (links), als auch für die Pufferfassade (rechts), dargestellt. Bevor jedoch die einzelnen Randbedingungen der numerischen Modelle genauer erläutert werden, wird kurz auf die Berücksichtigung von Wärmeleitung durch innere Wände (walls) eingegangen.

Hierfür bietet Fluent mehrere Möglichkeiten an [3]:

1. Wände haben als Defaultwert keine Stärke und weisen daher trotz Materialdefinition keinen thermischen Widerstand auf. Für einfache Wärmeleitungsprobleme, bei denen der Wärmefluss nur in Dickenrichtung von Interesse ist, kann der Wand eine Stärke zugewiesen werden. Mit den definierten Materialeigenschaften leistet sie dem Wärmestrom thermischen Widerstand. Solche Wände werden als dünne Wände bezeichnet (thin wall).
2. Besitzt eine Wand auf beiden Seiten Zellen (Fluid- oder Feststoffzellen), so wird diese als zweiseitige Wand (two-sided wall) bezeichnet. Wenn im Rechengitter solche Wände vorhanden sind, wird dies von Fluent automatisch erkannt und eine „shadow“-Zone der Wand erstellt. Dadurch können pro Wandseite eindeutige Zonen mit unterschiedlichen thermischen Bedingungen (Temperatur- oder Wärmestromvorgabe) definiert werden. Auch die Möglichkeit der Kopplung beider Zonen bietet sich an. Bei gekoppelten Wänden sind keine weiteren thermischen Randbedingungen zur Berechnung erforderlich, da Fluent den Wärmetransport direkt durch die Ergebnisse der benachbarten Zellen berechnet. Dieser Ansatz ist der präziseste, stellt jedoch auch den höchsten Aufwand dar, da die Wand-Dickenrichtung vernetzt werden muss. Im Zuge der Durchführung der Parameterstudien wird stets der Ansatz mit vernetzten Wänden angewandt.
3. Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung von Wärmeleitung wird als Shell Conduction bezeichnet. Dieser Ansatz ist dabei eine Erweiterung der dünnen Wand, durch welche auch Wärmeleitung in Wand-Längsrichtung berücksichtigt wird. Shell Conduction ist jedoch nur im dreidimensionalen Raum anwendbar.

In der nachfolgenden Aufzählung werden die Randbedingungen aus Abbildung 6.10 mit allen dazugehörigen Parametern beschrieben. In dieser Abbildung sind lediglich Konfigurationen mit einem Fassadenelement dargestellt. Wirkt der thermische Auftrieb über zwei Fassadenelemente ergibt sich eine kleine Erweiterung der Randbedingungen im Bereich des Elementstoßes. Dort weisen die Elementrahmen dieselben adiabaten Randbedingungen auf, wie sie für BC 5 in Abbildung 6.10 dargestellt sind.

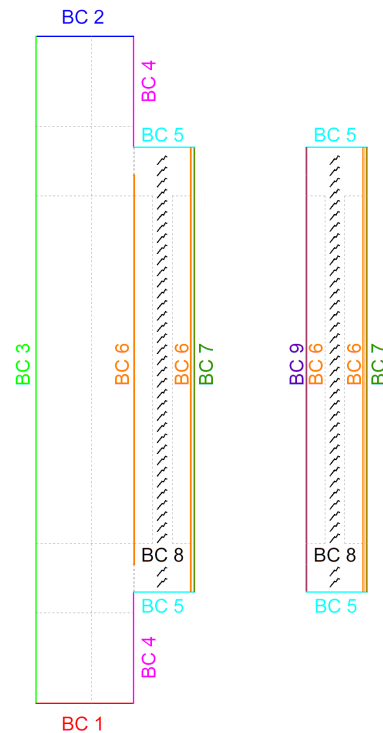


Abbildung 6.10: Randbedingungen der 2.-Haut-Fassaden links und der Pufferfassaden rechts

- **BC 1** stellt ein **pressure inlet** dar, welchem als Eintrittstemperatur die Außentemperatur des vorliegenden Außenklimas (siehe T_0 in Tabelle 6.6) vorgegeben wird. Bezüglich der Strahlungsmodellierung sind weitere Definitionen notwendig. Dazu zählt die Vorgabe eines externen Emissionsgrades $\epsilon_e = 1,0$, welcher emittierte Strahlung von außerhalb des Rechenbereichs auf die Randzone normiert. Auch für das Turbulenzmodell müssen an Lufteintritten Randbedingungen vorgegeben werden. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Vorgabe einer Turbulenzintensität und der Turbulenz-Längenskala, welche für wandgebundene Strömungen durch den User's Guide von Ansys [3] empfohlen wird. Die Längenskala richtet sich dabei nach der Dicke der Grenzschicht bzw. dem hydraulischen Durchmesser der Geometrie (Luftöffnungsspalt). Diese Werte werden sinngemäß einer Studie von Baldinelli [5] entnommen. Baldinelli definiert die Längenskala mit $l = 0,025 m$, was etwa dem hydraulischen Durchmesser der Zuluftöffnung entspricht und die Turbulenzintensität mit $I = 6\%$.
- **BC 2** wird als **outlet** definiert. Prinzipiell weist dieser Rand analoge Einstellungen hinsichtlich der Parameter zur Turbulenz- und Strahlungsmodellierung zu BC 1 (pressure inlet) auf. Die definierte Temperatur ist im Falle des outlet jedoch eine Rückstromtemperatur. Das heißt, falls an diesem Rand Rückströmungen in das Rechengbiet auftreten, strömt das Fluid mit dieser definierten Temperatur zurück.
- **BC 3** ist als **semi-transparente Wand** ohne Stärke deklariert. Es gilt, wie für Wände üblich, die Haftbedingung (no-slip Condition). Die Ursache dieser Festlegung beruht

darauf, dass aus Sicht des Verfassers für zweidimensionale Betrachtungen keine alternativen Möglichkeiten bestehen, vorhandene Wärmebelastungen (solare Einstrahlung als Wärmestromdichte) in den definierten Wellenlängenbändern (in diesem Fall dem solaren Band) vorzugeben. Eine akkuratere Lösung wurde beispielsweise durch Iyi et al. [32] erzielt. Sie definieren den linken begrenzenden Rand BC 3 als pressure inlet und simulieren die solare Belastung mittels Solar-Ray-Tracing. Dieser Ansatz ist allerdings nur für dreidimensionale Problemstellungen anwendbar und kann dadurch nicht für die vorliegende Arbeit eingesetzt werden.

Der Rand wird von außen mit einer Strahlungstemperatur, welche der Außentemperatur des jeweiligen Außenklimas (siehe T_0 in Tabelle 6.6) entspricht und einem Emissionsgrad $\epsilon_e = 1,0$ angestrahlt. Diese thermische Randbedingung kann beispielsweise die Wechselwirkung mit einer Fassade eines gegenüberliegenden Gebäudes abbilden. Darüber hinaus werden dem Rand je Außenklima verschiedene Wärmestromdichten entsprechend der in Kapitel 5.3 definierten solaren Belastung (50, 1000, 20, 500 W/m^2) vorgegeben. Die verschiedenen Zenitwinkel für die Sommertage (55°), an welchen die Strahlung steiler einfällt sowie für die Wintertage (70°), an welchen ein flacherer Einstrahlwinkel vorherrscht, werden durch die Vorgabe von Richtungsvektoren modelliert. Der diffuse Anteil f_d der Strahlung an dieser Wand wurde zu 0 gesetzt. Dies ist gleichbedeutend damit, dass die gesamte Strahlung spiegelnd (direkt) an dieser Wand reflektiert wird.

- **BC 4** begrenzen den Außenbereich des Rechengebietes auf der rechten Seite jeweils ober- und unterhalb des Fassadenelements. Für diesen Rand wird eine Bedingung gewählt, welche das Strömungsverhalten innerhalb der Fassade so geringfügig wie möglich beeinflusst. Dies wird durch die Definition einer **adiabaten, opaken Wand** erzielt. Der interne Emissionsgrad dieses Randes wird mit $\epsilon_i = 0,0$ und die diffuse Fraktion mit $f_d = 0,0$ festgelegt. In Worten bedeutet dies, dass die gesamte einfallende Strahlung am Rand direkt reflektiert wird, da eine Oberfläche, welche nicht emittiert, auch nicht absorbieren kann. Die am BC 4 reflektierte Strahlung wird zum größten Teil durch BC 3 hindurch transmittiert, was dazu führt, dass die definierte solare Belastung, welche vom Rand 3 emittiert wird, korrekterweise nicht erhöht wird. Die thermisch adiabate Randbedingung sorgt dafür, dass mit Gebieten außerhalb des Rechengebietes kein Energieaustausch erfolgt.
- **BC 5** werden ebenso als **adiabate, opake Wände** definiert. Der interne Emissionsgrad dieses Randes wird für beide Wellenlängenbänder mit $\epsilon_i = 0,5$ vorgegeben. Daraus kann geschlossen werden, dass die Hälfte der Strahlung (spiegelnd, $f_d = 0$) reflektiert und die andere Hälfte absorbiert und durch den Temperaturanstieg auch wieder emittiert wird. Absorption und Emission sind zwar Oberflächenphänomene, trotzdem ist es notwendig der Wand zumindest eine minimale Stärke (5 mm) zuzuordnen, damit die Effekte erfasst werden können.

- **BC 6** stellen **semi-transparente, gekoppelte Wände** dar. Gekoppelt ist die zweiseitige Wand, weil sie auf beiden Seiten Zellen (Fluid - Luft und Festkörper - Glas) aufweist. Da es sich um innere, gekoppelte, semi-transparente Wände handelt, ist die einzige weitere Eigenschaft, welche ihr vorgegeben wird, der diffuse Anteil der reflektierten Strahlung, welcher mit $f_d = 0$ angenommen wird. Der absorbierte und wieder emittierte Anteil der Strahlung ergibt sich aus internen Berechnungen mithilfe, des in den Materialeigenschaften definierten, Absorptionskoeffizienten, sowie der Dicke der vernetzten Wand.
- **BC 7** ist als **semi-transparente (äußere) Wand** definiert. Ihr wird eine thermische Randbedingung zugeordnet, welche das Innenklima abbildet. Dazu zählt ein konvektiver Wärmeübergang mit dem, in Kapitel 5.3 definierten, inneren Wärmeübergangskoeffizienten sowie die Vorgabe emittierter Strahlung von gegenüberliegenden Gegenständen (wie etwa Wänden) mit einem externen Emissionsgrad $\epsilon_e = 1, 0$. Als Referenztemperatur gilt für beide Wärmetransportmechanismen die Raumtemperatur, welche mit $T_i = 20^\circ\text{C}$ festgelegt ist.
- **BC 8** stellt die no-slip Randbedingung der Sonnenschutzlamelle dar, welche als **opake, gekoppelte Wand** charakterisiert ist. Als interner Emissionsgrad wird, wie in Tabelle 6.7 festgelegt, $\epsilon_i = 0,7$ definiert. Diese Festlegung gilt für beide Wellenlängenbänder. Diffuse Reflexionen werden durch $f_d = 0$ wiederum vermieden.
- **BC 9** begrenzt das Rechengebiet der Pufferfassade (Abbildung 6.10 rechts) an der Außenseite. Der Unterschied zur 2.-Haut-Fassade liegt darin, dass die Modellierung des Außenbereichs hier nicht notwendig ist und das Rechengebiet daher in anderer Form begrenzt ist. Da es sich bei diesem Rand um den äußeren Rand der Außenverglasung handelt wird dieser als **semi-transparente Wand** modelliert. Als thermische Randbedingung wird analog zu Randbedingung 7 (BC 7) eine Mischform angewandt. Sie wird sowohl durch emittierte Strahlung ($\epsilon_e = 1, 0$) mit der Außentemperatur (T_0 in Tabelle 6.6), als auch mit selbiger Temperatur und den in Kapitel 5.3 beschriebenen Wärmeübergangskoeffizienten, definiert. Die Parameter, welche zur Modellierung der solaren Belastung definiert werden müssen, weisen Analogie zu Randbedingung 3 (BC 3) auf.

6.3.5 Solvareinstellungen und numerische Methoden

Alle Simulationen der Parameterstudien werden mit dem entkoppelten **Druck-basierten Solver** (pressure-based Solver) unter **stationären (steady-state) Bedingungen** durchgeführt. Das heißt, die zugrundeliegenden Gleichungen werden entkoppelt voneinander nacheinander (sequentiell) gelöst. Wenn entkoppelte Solver eingesetzt werden, müssen mit einem Druckkorrekturverfahren (**SIMPLE Schema**) der Druck und die Geschwindigkeit gekoppelt werden, da der Druck nicht direkt aus den Grundgleichungen ermittelt werden kann. Der Standardwert

der Präzision des Solvers wird außerdem von einfacher auf **doppelte Präzision** geändert, da dies durch den Getting Started Guide von Ansys [1] empfohlen wird, wenn hohe Differenzen zwischen zwei Wärmeleitfähigkeiten auftreten (Lamelle - Luft). Die Diskretisierung der Gradienten von Strömungsgrößen im Zentralknoten erfolgt mit dem Green-Gauß-Theorem, wobei die Strömungsgrößen an den Mittelpunkten der Seitenflächen der Zellen mit der präziseren knotenbasierten Evaluierung (**Green-Gauß Node-based**) ermittelt werden. **Unterrelaxationsfaktoren** sowie **Diskretisierungsschemata**, welche für die einzelnen Strömungsgrößen angewandt werden, um Werte auf den Seitenflächen der Zellen durch Interpolation zu erhalten, sind in Tabelle 6.8 zusammengestellt.

Strömungsgröße	URF	Diskretisierung
Druck	0,5	Body-Force-Weighted
Dichte	1,0	-
Massenkraft	1,0	-
Impuls	0,5	Second order upwind
Turbulente kinetische Energie	0,5	Second order upwind
Turbulente Dissipationsrate	0,5	Second order upwind
Turbulente Viskosität	0,8	Second order upwind
Energie	0,98	Second order upwind
Diskrete Ordinate	1,0	Second order upwind ¹

¹ Der Großteil aller Simulationen wurde auf mehrere Rechenkerne ausgelagert (siehe Kapitel 6.4), um Rechenzeiten einzusparen. Hierbei traten allerdings bei manchen Strömungsberechnungen (28 aus 149 Simulationen) Kommunikationsprobleme zwischen den CPU-Kernen auf, welche durch die Strahlungsmodellierung verursacht wurden. Trotz aufwendiger Fehlersuche und Anpassung des Modells konnten diese Kommunikationsprobleme nicht immer vermieden werden. Da die Einsparung der Rechenzeit mittels Parallel-Processing ein unverzichtbares Instrument darstellte, wurde für manche Berechnungen das **Aufwindverfahren 1. Ordnung (first order upwind)** für das DO Modell eingesetzt, da unter dessen Anwendung keine Kommunikationsprobleme auftraten.

Es erfolgte die Notwendigkeit einer Validierung der unter Anwendung des Aufwindverfahrens 1. Ordnung erzielten Ergebnisse, mit Ergebnissen welche durch Anwendung des genaueren Aufwindverfahrens 2. Ordnung (ohne Auslagerung auf mehrere CPU-Kerne) erzielt wurden. Die Validierung zeigte, dass die Unterschiede in den Strömungsgrößen, welche zur Auswertung herangezogen werden, nur sehr gering waren. Daraus leitete der Verfasser der vorliegenden Arbeit ab, dass ein solches Vorgehen akzeptiert werden kann.

Tabelle 6.8: Unterrelaxationsfaktoren und Diskretisierung aller Strömungsgrößen

6.4 Strömungsberechnung

Die iterative Strömungsberechnung erfolgt auf vier unterschiedlich konfigurierten Rechnern, was eine genaue Anführung von Rechenzeiten wenig sinnvoll macht. Zusätzlich macht die variierende Gittergröße Rechenzeiten schwer vergleichbar. Die verschiedenen Attribute der Rechner sind im Folgenden dargestellt:

1. Core2 i3 3,1GHz CPU, 4GB RAM
2. Core2 i5 2,4GHz CPU, 4GB RAM
3. Core6 i7 3,3GHz CPU, 32GB RAM
4. Core2 i5 3,3GHz CPU, 16GB RAM

Am Simulationsrechner (3), an welchem über die Hälfte aller Berechnungen durchgeführt werden, wird die Simulation auf mehrere CPU-Kerne (Parallel Processing) ausgelagert, wodurch die Rechenzeit drastisch verkürzt wird. Dadurch können beispielsweise konvergente Lösungen in etwa 1,5 Stunden erzielt werden, während die Berechnung derselben Simulation auf nur einem CPU-Kern (Single Processing) etwa 15 Stunden benötigt.

Insgesamt werden 149 Simulationen (120 an einem Fassadenelement und 29 an zwei Fassadenelementen) durchgeführt. Die minimale Anzahl der Iterationsschritte liegt dabei bei etwa 3500 Iterationen. Maximal weist eine Berechnung 26000 Iterationen auf. Eine durchschnittliche Anzahl an Iterationsschritten kann mit etwa 9000 Iterationen angeführt werden.

6.4.1 Konvergenzkriterien und Kontrolle

Konvergenz kann durch viele Faktoren, wie beispielsweise durch eine hohe Elementanzahl oder durch komplexe Strömungseigenschaften, behindert werden. Eine konvergente Lösung zeichnet sich außerdem nicht nur dadurch aus, dass das Residuum einer Strömungsgröße (Differenz eines Skalars zwischen zwei aufeinander folgenden Iterationen) zu einem gewissen (kleinen) Grenzwert konvergiert, sondern auch dadurch, dass Konservativität, also die Erhaltung von Strömungsgrößen (Masse und Energie), erzielt wird. Zu guter Letzt ist es von großer Bedeutung, dass relevante Größen, wie etwa Wärmeübergangskoeffizienten, Oberflächentemperaturen usw., stabile Zustände erreichen und sich durch weitere Iterationsschritte nicht mehr verändern. Grundsätzlich sind drei wichtige Konvergenzkriterien zu betrachten [3]:

Residuum erreicht Konvergenzkriterium: Als Konvergenzkriterien für die Werte des Residuums der Strömungsgrößen werden die vom User's Guide von Ansys [3] vorgeschlagenen Kriterien, welche für die meisten Strömungsprobleme geeignet sind, herangezogen. Diese fordern, dass die global (innerhalb der ersten fünf Iterationen) skalierten Residuals aller Strömungsgrößen, außer jene der Energie- und der DO-Gleichung, einen Wert von 10^{-3} erreichen. Für die beiden Ausnahmen gelten kleinere Werte des Residuums, und zwar 10^{-6} . Diese Kriterien konnten, abgesehen von sechs Simulationen, immer eingehalten beziehungsweise in den meisten Fällen deutlich unterschritten werden. In den sechs Ausnahmefällen konnte das Residuum für die ϵ -Gleichung nicht das geforderte Kriterium erreichen. Jedoch zeigt sich in diesen Fällen ein stagnierendes Verhalten dieser Gleichung knapp oberhalb des Konvergenzkriteriums

(max. $2,2 \cdot 10^{-3}$). Für diejenigen Simulationen, welche das angestrebte Kriterium des Residuums nicht erzielen, wurden mehrere Anpassungen des Rechengitters sowie der numerischen Methodik vorgenommen. Keine Maßnahme konnte das Verhaltens des Residuums verbessern, wodurch aufgrund des stagnierenden (nicht divergenten) Verhaltens unter Berücksichtigung der weiteren Konvergenzkriterien gefolgert werden kann, dass hierbei bereits eine konvergente Lösung vorliegt.

Konservativität: Da die zugrundeliegenden Gleichungen Erhaltungsgleichungen darstellen, müssen Strömungsgrößen erhalten bleiben. Daher zählt zu jeder Post-Processing-Routine die Überprüfung der Einhaltung dieser Forderung. Hierzu erfolgt eine globale Bilanzbildung der Strömungsgrößen über alle Ränder des Rechengebietes. Dieses Ergebnis sollte nach unendlich vielen Iterationen zu Null streben. Nach einer endlichen Anzahl von Iterationen wird der bilanzierte Wert mit dem geringsten Strom (Massen- oder Wärmestrom) durch einen Rand des Rechengebietes normiert. Dieser Bezugswert sollte jedenfalls unter 5 %, besser noch unter 2 %, liegen.

Die Massenerhaltung kann in allen durchgeführten Simulationen mit einem weitaus geringeren Fehler als 2 % erreicht werden. Hinsichtlich der Energieerhaltung ist vor allem der Simulationstag C (bedeckter Wintertag) kritisch. Dies liegt daran, dass sich unter diesen Randbedingungen ein Wärmestrom mit sehr kleinen Zahlenwerten durch BC 3 in Abbildung 6.10 einstellt. Wird nun dieser kleine Wärmestrom zur Normierung herangezogen liegt es auf der Hand, dass auch die zu bilanzierende Strömungsgröße sehr kleine Zahlenwerte aufweisen muss, damit der Bezugswert unter 5 % liegt. Daher konnte diese Forderung am strahlungsarmen Wintertag nicht immer eingehalten werden. Bei Simulationen mit anderen außerklimatischen Bedingungen als an Tag C, liegt das Ungleichgewicht (Inbalance) stets unter 5 %.

Größen von Interesse: Während der iterativen Berechnung werden einige relevante Größen aufgezeichnet. Es wird beurteilt, ob diese einen stabilen Zustand erreichen. Dazu zählen beispielsweise Oberflächentemperaturen an der Außen- und Isolierverglasung sowie an der Lamelle, Lufttemperaturen an Luftein- und austritt sowie Massenströme und Geschwindigkeiten an dieser Stelle. Im Zuge der Beurteilung der Konvergenz ist dieses Kriterium oft das ausschlaggebende, da diese Größen häufig noch keinen stabilen Zustand erreicht haben, während die beiden zuvor definierten Kriterien jedoch schon erfüllt sind.

Zum Teil ist auch leichtes Oszillieren der aufgezeichneten Größen festzustellen. Da dieses jedoch nur in sehr geringem Maße (weniger als etwa 2 % der relevanten Größe) auftritt und die Ergebnisgröße immer um einen Mittelwert oszilliert, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

7 Parameterstudien - Ergebnisse und Diskussion

Im vorliegenden Kapitel wird auf die mit den Parameterstudien erzielten Ergebnisse eingegangen. Die Resultate werden basierend auf einer Einteilung nach aktiver und passiver Solarenergienutzung erörtert. Außerdem erfolgt eine separate Auswertung für beide Wirkungsweisen der Fassade, also als 2.-Haut- und Pufferfassade. Demnach ergeben sich vier Auswertungsaspekte, für welche Ergebnisse der Parameterstudien separat dargestellt werden. Die Darstellungsweise der Ergebnisse ist stets dieselbe: Für jeden Aspekt werden zuerst informationsreiche Diagramme zur Hauptauswertung erstellt. In einem nächsten Schritt werden Empfehlungen bzw. Bestkonfigurationen für die vier Außenbedingungen angegeben. Darauf folgen jeweils die Darstellungen und Vergleiche der Ergebnisse von Konfigurationen mit unterschiedlichen Auftriebshöhen (ein oder zwei Fassadenelemente). Liegen weitere Erkenntnisse vor, werden diese jeweils am Ende des vorliegenden Auswertungsaspekts angegeben. Am Ende des Kapitels folgt darüber hinaus eine Gegenüberstellung von Ergebnissen der passiven und aktiven Solarenergienutzung für beide Wirkungsweisen der Fassade.

Die Diagramme, welche zur Hauptauswertung herangezogen werden, wirken auf den Betrachter, aufgrund der großen Menge enthaltener Information, zunächst möglicherweise unübersichtlich. Wegen ihrer Bedeutung und Komplexität wird im Folgenden der prototypische Aufbau dieser Diagramme beschrieben. Grundsätzlich erscheint eine Unterteilung des Diagrammaufbaus in fünf Bereiche als sinnvoll. Leere Bereiche in Abbildung 7.1 deuten darauf hin, dass deren Inhalt vom jeweiligen Auswertungsaspekt abhängt. Fragmente, welche bereits Einträge enthalten, sind hingegen für alle Auswertungsaspekte allgemein gültig.

Ordinate: Auf der Ordinate werden entweder Kenngrößen für die passive (Q_{tot}) oder die aktive Solarenergienutzung (ΔT_{1-2} gilt für ein Fassadenelement bzw. ΔT_{1-4} gilt für zwei Fassadenelemente) aufgetragen.

Hinweis:

Der totale Energieeintrag Q_{tot} [W/m^2] weist negative Vorzeichen auf, wenn Energie in den Innenraum eintritt (Energieeintrag). Energieverluste hingegen weisen positive Zahlenwerte auf. Diese Vorzeichenkonvention wird direkt aus den Simulationsergebnissen übernommen.

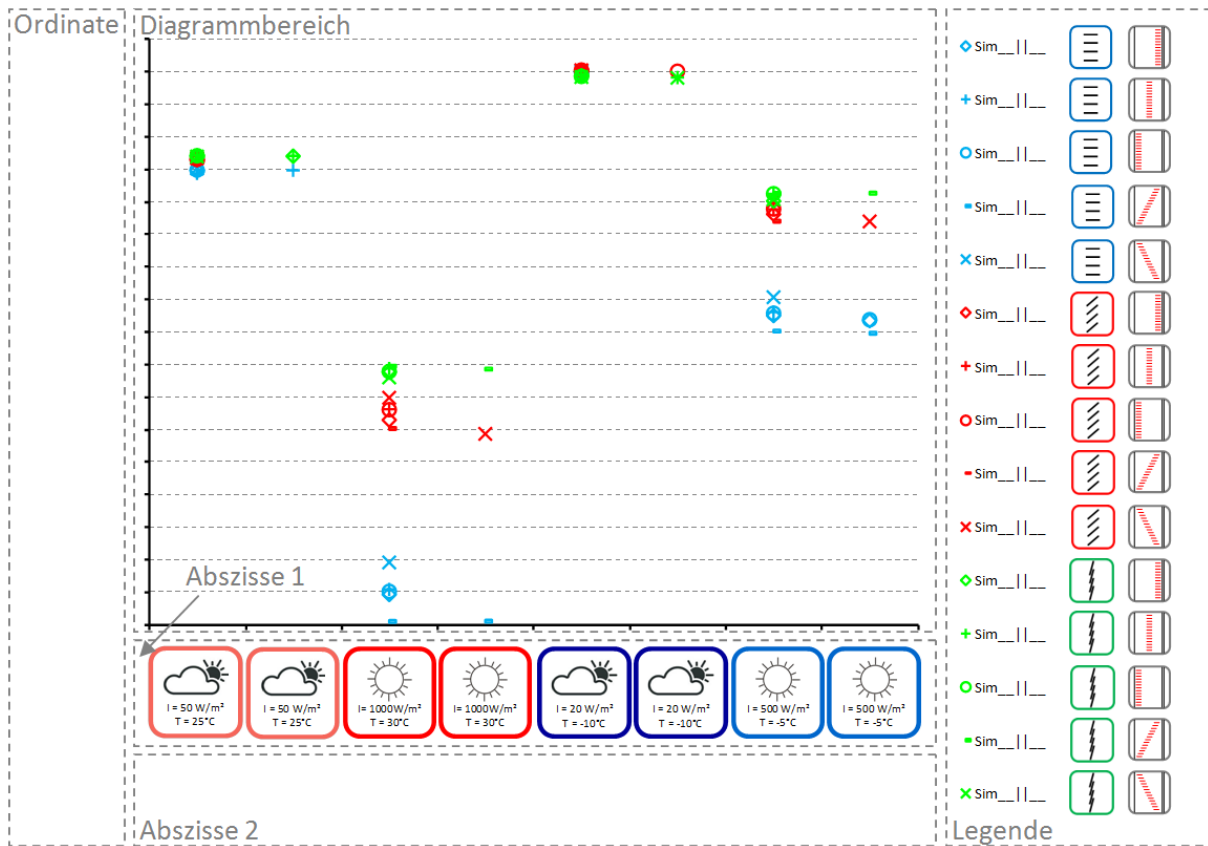


Abbildung 7.1: Prototypischer Aufbau des Diagramms zur Hauptauswertung

Abszisse 1: Die Abszisse ist in acht Spalten unterteilt, wobei die ersten beiden Spalten Ergebnisse am strahlungsarmen Sommertag repräsentieren. Darauf folgen in Spalte drei und vier Ergebnisse für sonnige Sommerbedingungen und in Spalte fünf und sechs Ergebnisse für strahlungsarme, winterliche Randbedingungen. Die letzten beiden Spalten repräsentieren Ergebnisse an einem strahlungsreichen Wintertag.

Abszisse 2: In diesem Bereich erfolgt die Festlegung der Wirkungsweise (2.-Haut- oder Pufferfassade) und der Auftriebshöhe (Konfiguration mit einem oder zwei Fassadenelementen). Die Wirkungsweise wird für alle acht Spalten der Abszisse einheitlich mit Symbolen vorgegeben. Die Auftriebshöhe wird durch Ziffern innerhalb dieser Symbole berücksichtigt. Eine rosa Eins repräsentiert Konfigurationen, welche ein Fassadenelement beinhalten und eine grüne Zwei Konfigurationen mit zwei Elementen. Alle Symbole, welche innerhalb des Bereichs „Abszisse 2“ zur Anwendung kommen, sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

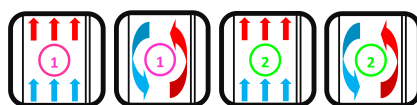


Abbildung 7.2: Symbolische Darstellungen für 2.-Haut- und Pufferfassaden mit einem Fassadenelement und zwei Elementen

Legende: Die 15 Datenreihen in der Legende repräsentieren Ergebnisse bei einem gewissen Öffnungswinkel der Einzellamelle (blau 0° , rot 40° , grün 80°). Weiters repräsentiert je ein Symbol pro Konfiguration mit demselben Öffnungswinkel die Lage des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum:

- Raute: Raffstore nahe an der Isolierverglasung
- Plus: Raffstore mittig im Fassadenzwischenraum
- Ring: Raffstore nahe an der Außenverglasung
- Minus: Raffstore schräg, unten nahe an der Außenverglasung oben nahe an der Isolierverglasung
- Kreuz: Raffstore schräg, unten nahe an der Isolierverglasung oben nahe an der Außenverglasung

Die im prototypischen Aufbau in Abbildung 7.1 durch Platzhalter angedeutete Nummerierung der Datenreihen entspricht jener der Variantenmatrix, welche in Kapitel 5.5 dargestellt ist. Um Ergebnisse der beiden Konfigurationen, welche sich nur durch ihre Auftriebshöhe unterscheiden, leicht vergleichen zu können, wird für sie dasselbe Datenreihensymbol gewählt. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit diese Ergebnisse in verschiedenen Spalten (siehe Bereich „Abszisse 2“) darzustellen.

Diagrammbereich: Im Diagrammbereich werden die Simulationsergebnisse an entsprechender Stelle dargestellt. Die in Abbildung 7.1 dargestellten Ergebnisse sind fiktiv und dienen nur der Veranschaulichung.

Hinweis:

Bevor die Ergebnisse anhand der vier Auswertungsaspekte dargestellt werden, wird auf die Nomenklatur und Kapitel 5.4 hingewiesen. In diesen Teilen der vorliegenden Arbeit sind alle Kenngrößen mit ihrer Indizierung sowie die Auswertungsmethodik angegeben. Des Weiteren wird für alle im Folgenden erstellten Beziehungen, welche an deren niedergeschriebenen Stelle nicht konkret durch Ergebniswerte oder graphisch belegt werden, auf die Ergebnisdarstellung im Anhang verwiesen.

7.1 Passive Solarenergienutzung: 2.-Haut-Fassaden

Mit dem Hauptauswertungsdiagramm in Abbildung 7.3 werden Ergebnisse für die passive Solarenergienutzung aller 2.-Haut-Fassaden ausgewertet. Der Ergebnisgrafik kann entnommen werden, dass innerhalb der Sommertage stets Energieeinträge in den Raum (Q_{tot} negativ) auftreten, während sich an den Wintertagen (Spalten 5 bis 8) auch Wärmeverluste (Q_{tot} positiv) einstellen. Festlegungen von Bestkonfigurationen sind an den strahlungsreichen Tagen (Tag B und D) qualitativ. Dies liegt vor allem daran, dass die Spreizungen zwischen maximalem und minimalem Energieeintrag (oder Energieverlust) an den strahlungsarmen Tagen (Tag A und C) sehr gering sind. An den strahlungsreichen Tagen liegen diese Spreizungen bei etwa 175 W/m^2 am Sommertag sowie bei etwa 150 W/m^2 am Wintertag. Betrachtet man die Einzelspreizungen der jeweiligen Parametersätze mit demselben Öffnungswinkel (blaue, rote, grüne Symbole) ist erkennbar, dass die Spreizung umso kleiner wird, je geschlossener (vertikaler) die Einzellamelle ist. Das heißt, bei geschlossener Einzellamelle (grüne Symbole) ist davon auszugehen, dass die passive Solarenergienutzung kaum Abhängigkeit von der Position der Verschattung im Fassadenzwischenraum aufweist.

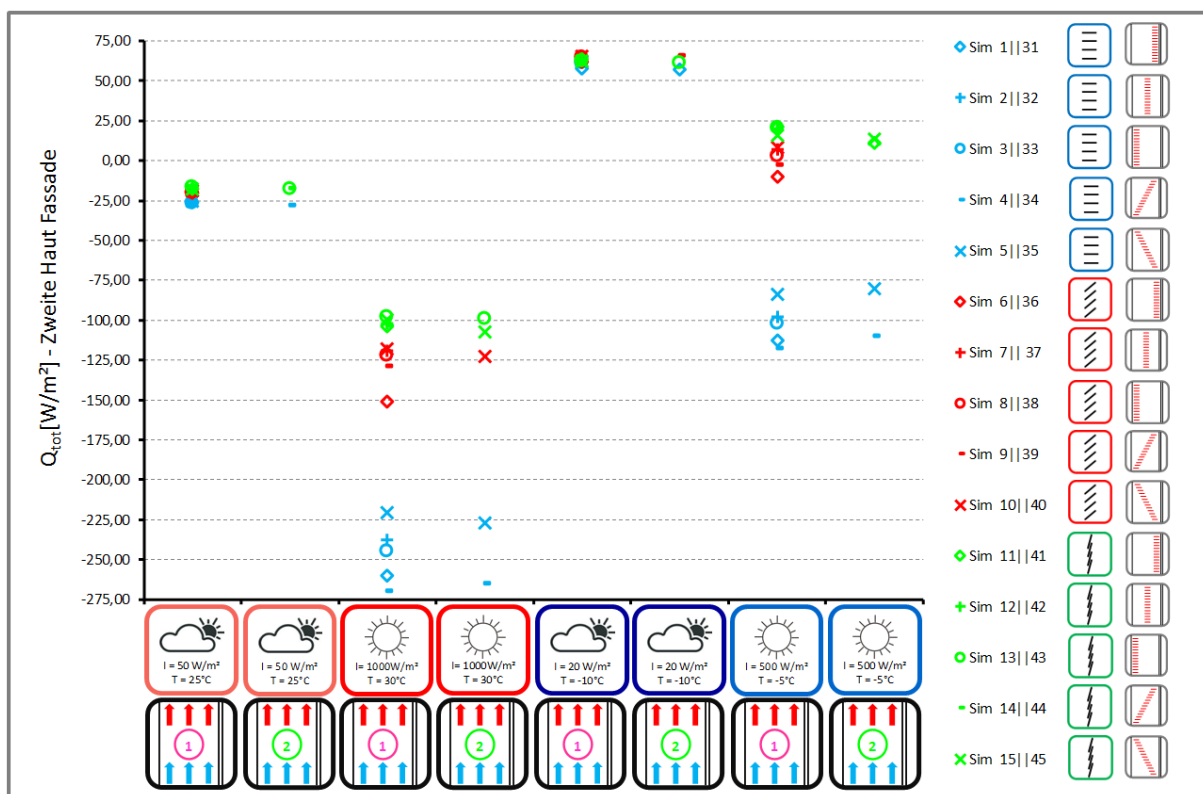


Abbildung 7.3: Passive Solarenergienutzung Q_{tot} aller Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade zu allen Außenklimata

Entsprechend der Beziehung in Gleichung 7.1 kann Abbildung 7.3 entnommen werden, dass der Energieeintrag in den Raum umso höher wird, je horizontaler die Neigung der Son-

nenschutzlamellen ist (d.h. je „offener“ die Verschattung ist). Diese Tatsache entspricht der Erwartungshaltung und erklärt sich vor allem dadurch, dass der Anteil an Solarstrahlung in den Raum bei horizontalen Lamellen deutlich höher ist. Ferner bewirkt dieser Strahlungsanteil durch Absorption auch eine Temperaturerhöhung der Isolierverglasung, also auch eine Erhöhung der Oberflächentemperaturen auf der Raumseite des Glases. Diese beeinflusst wiederum entscheidend den konvektiven Anteil des totalen Energieeintrages in den Innenraum. Die einzige Ausnahme, bei der die Beziehung in Gleichung 7.1 keine Gültigkeit hat, ist der bedeckte Wintertag (Tag C), da der größte Anteil von Q_{tot} nicht durch Solarstrahlung, welche durch die Öffnungswinkel der Lamelle stark beeinflusst wird, sondern durch den hohen Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außentemperatur bestimmt wird.

$$Q_{tot,0^\circ} < Q_{tot,40^\circ} < Q_{tot,80^\circ} \quad (7.1)$$

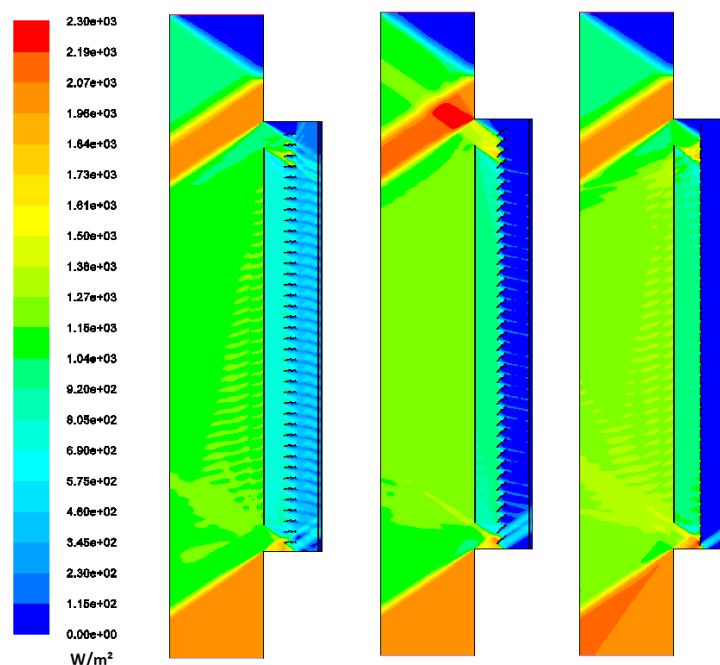


Abbildung 7.4: Einfallende Solarstrahlung der Konfigurationen 2, 7 und 12 am sonnigen Sommertag

In Abbildung 7.4 werden die zuvor beschriebenen Erkenntnisse nochmals veranschaulicht. Jeweils am sonnigen Sommertag (Tag B) ist die einfallende Solarstrahlung [W/m^2] für drei Fassadenkonfigurationen, welche sich lediglich durch den Öffnungswinkel der Lamelle unterscheiden, über das gesamte Rechengebiet dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch offene Lamellen (Sim. 2B ganz links) ein weitaus höherer Anteil der einfallenden Strahlung den Raffstore passieren kann. An der Isolierverglasung wird dann ein Teil der solaren Belastung in den Raum transmittiert oder durch das Material absorbiert, wodurch sich eine Erhöhung des Energieeintrages in den Raum ergibt. Bei schräger (mittige Darstellung) oder gar geschlossener Lamellenstellung (rechte Darstellung) ist erkennbar, dass die einfallende solare Strahlung im Bereich hinter der Verschattung auf sehr kleine Werte reduziert wird.

7.1.1 Bestkonfigurationen

Sommertage: An warmen Sommertagen sollte der Energieeintrag in den Raum so klein wie möglich gehalten werden, um einer Überhitzung entgegenzuwirken. In Abbildung 7.3 ist ersichtlich, dass an den Sommertagen jeweils die Konfiguration mit geschlossenen Lamellen nahe an der Außenverglasung (Konfiguration 13) die niedrigsten Energieeinträge in den Raum hervorbringen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Annahmen, welche in Kapitel 5.2.1 getroffen wurden. Es kann also an den Tagen mit sommerlichen Bedingungen eine klare Empfehlung zur Optimierung der passiven Solarenergienutzung gegeben werden, wie Abbildung 7.5 zeigt.

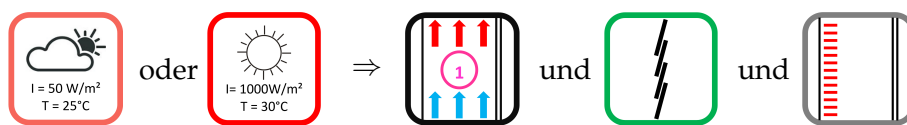


Abbildung 7.5: Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur passiven Solarenergienutzung an Sommertagen

Wintertage: An Wintertagen sind die Anforderungen genau entgegengesetzt. Wärmeeinträge sollen maximiert bzw. Wärmeverluste minimiert werden. Dies kann an den Wintertagen, wie in Abbildung 7.3 erkennbar ist, insbesondere mithilfe zweier Fassadenkonfigurationen, welche beide sinngemäß geöffnete Lamellen aufweisen, erreicht werden. Bei einer Konfiguration (Simulation 1) treten aufgrund der Lage des Sonnenschutzes knapp vor der Isolierverglasung hohe Temperaturen an dieser Stelle auf, wodurch Energieeinträge gesteigert bzw. Verluste gesenkt werden können. Die andere Konfiguration, in welcher der Sonnenschutz schräg im Fassadenzwischenraum unten nahe an der Außenverglasung und oben nahe an der Isolierverglasung angeordnet ist (Simulation 4) sorgt mithilfe der geometrischen Anordnung der Verschattung dafür, dass mehr Strahlung zur Isolierverglasung durchgelassen wird. Auch die Ergebnisse an Wintertagen decken sich mit den in Kapitel 5.2.1 vermuteten, optimalen Konfigurationen, wodurch wieder eindeutige Empfehlungen gegeben werden können, wie in Abbildung 7.6 angegeben ist.

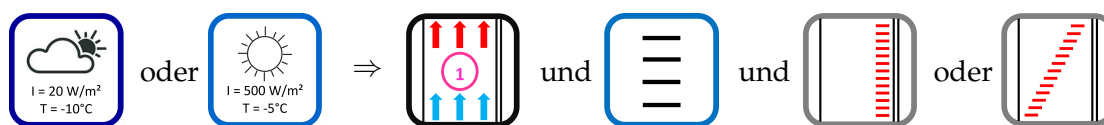


Abbildung 7.6: Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur passiven Solarenergienutzung an Wintertagen

Hinweis:

Eine weitere Optimierung der Energieeinträge im Winter lässt sich durch geschlossene Fassadenzwischenräume, also durch eine Wirkung als Pufferfassade, erzielen. Auf diese wird in nachfolgenden Kapiteln noch näher eingegangen.

Die Temperaturfelder in Abbildung 7.7 zeigen beispielhaft empfohlene Konfigurationen für die vier verschiedenen Außenklimata. An den beiden Sommertagen ist das Temperaturfeld der zuvor beschriebenen Konfiguration 13 dargestellt, während am bedeckten Wintertag jenes der Konfiguration 1 und am sonnigen Wintertag jenes der Konfiguration 4 illustriert ist. Es ist erkennbar, wie die hohen Temperaturen an Sommertagen von der Isolierverglasung effektiv fern gehalten werden können, während an den Wintertagen vor allem bei Konfiguration 1 genau das Gegenteil angestrebt wird.

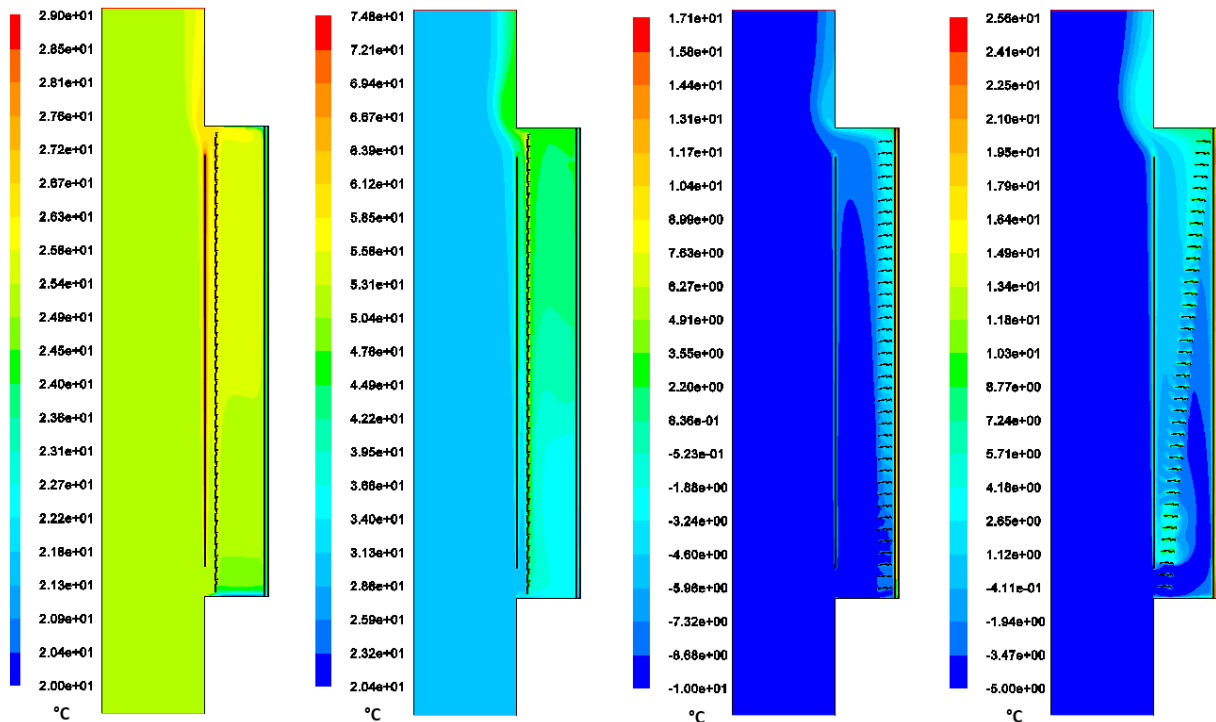


Abbildung 7.7: Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 13, sonniger Sommertag Sim. 13, bedeckter Wintertag Sim. 1, sonniger Wintertag Sim. 4

7.1.2 Beeinflussung durch zweites Fassadenelement

Bevor die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Konfigurationen, welche lediglich unterschiedliche Auftriebshöhen aufweisen, erläutert werden, wird darauf eingegangen, an welchen Konfigurationen überhaupt Simulationen mit zwei Fassadenelementen durchgeführt wurden. Hierfür muss zum Teil auf Ergebnisse der aktiven Solarenergienutzung vorgegriffen werden, um die Begründung konsistent halten zu können. Als Entscheidungsgrundlage dienen nämlich sowohl Ergebnisse für die passive (Abbildung 7.3), als auch für die aktive Solarenergienutzung (Abbildung 7.11) aller Konfigurationen mit einem Fassadenelement. So werden für alle Konfigurationen, mit welchen an einem Fassadenelemente Extremwerte für Q_{tot} oder ΔT_{1-2} erreicht werden, ebenso Simulationen mit zwei Fassadenelementen durchgeführt. Darüber hinaus erfüllen manche Fassadenkonfigurationen keines der beiden Hauptauswertekriterien

als Optimum, jedoch beide Kriterien zugleich überdurchschnittlich gut. Auch für solche Konfigurationen erfolgt die weitere Betrachtung mit zwei Fassadenelementen. Die Ergebnisse der Extremwertbetrachtung sind für 2.-Haut-Fassaden in Tabelle 7.1 dargestellt.

	$Q_{tot} \rightarrow MIN$ max. Energieeintrag min. Energieverlust	$Q_{tot} \rightarrow MAX$ min. Energieeintrag max. Energieverlust	$\Delta T_{1-2} \rightarrow MAX$	Sonstige
bedeckter Sommertag	4 → 34	13 → 43	14 → 44	-
sonniger Sommertag	4 → 34	13 → 43	5 → 35	10, 15 → 40, 45
bedeckter Wintertag	1 → 31	9 → 39	13 → 43	-
sonniger Wintertag	4 → 34	11 → 41	15 → 45	5 → 35

Tabelle 7.1: Extremwertbetrachtung der Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade an einem Element als Entscheidungsgrundlage für die Betrachtung an zwei Elementen

Der totale Energieeintrag in den Raum ergibt sich aus einem Konvektionsanteil und einem Strahlungsanteil. Da der Strahlungsanteil Q_{rad} sich zu einem großen Teil aus Strahlung im solaren Wellenlängenband ergibt, ist es folgerichtig, dass dieser Parameter kaum Unterschiede in Konfigurationen, welche sich nur durch die Auftriebshöhe (ein oder zwei Elemente) unterscheiden, aufweist. Dies liegt daran, dass die doppelte Strahlungsbelastung auf die doppelte Fläche (der Isolierverglasung) bezogen wird und sich somit quasi identische Werte ergeben sollten. Den Variantenmatrizen im Anhang kann entnommen werden, dass diese Annahme zutreffend ist. Lediglich Konfiguration 15 weist Unterschiede zu ihrem Pendant, Konfiguration 45, auf. In dieser Konfiguration befindet sich der Sonnenschutz schräg im Fassadenzwischenraum unten nahe an der Isolierverglasung oben nahe an der Außenverglasung. Der Unterschied kann, wie in Abbildung 7.8 ersichtlich jedoch erklärt werden, da der schräg einfallenden Sonnenstrahlung im Stoßbereich der beiden Elemente kein Verschattungselement entgegen wirkt. So ist beispielsweise $Q_{rad} \approx 34 \text{ W/m}^2$ im Falle der links dargestellten Konfiguration mit einem Element, während sich der Strahlungseintrag zu $Q_{rad} \approx 40 \text{ W/m}^2$ bei der rechts dargestellten Konfiguration mit zwei Fassadenelementen erhöht.

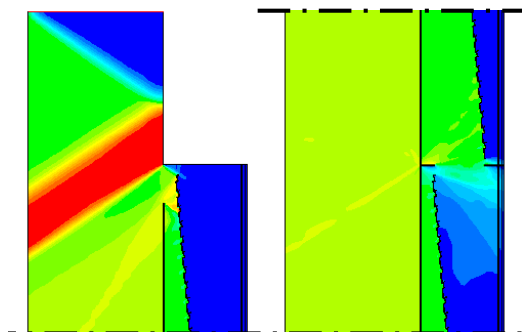


Abbildung 7.8: Einfallende Solarstrahlung: Vergleich zweier Konfigurationen mit schrägem Sonnenschutz und einem Element links (Konfig. 15) und mit Elementen rechts (Konfig. 45)

Wie den benachbarten Spalten in Abbildung 7.3 entnommen werden kann, ändert sich der totale Energieeintrag Q_{tot} zwischen Konfigurationen, die sich nur durch die Auftriebshöhe unterscheiden, nur sehr geringfügig. Dies bedeutet wiederum, dass bei nahezu stabilem, totalen Energieeintrag und stabilem Strahlungsenergieeintrag auch der konvektive Wärmeeintrag nahezu identisch bleiben muss. Der konvektive Eintrag wird bedeutend durch die Oberflächentemperatur der Isolierverglasung auf der Raumseite beeinflusst. Diese Oberflächentemperatur stellt sich aufgrund der absorbierten Strahlung sowie aufgrund der vorhandenen Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum in der Nähe der Isolierverglasung und der dort vorherrschenden Strömungsbedingungen ein. Treten nun bei Konfigurationen, welche aufgrund der höheren Auftriebshöhe weniger Bezug zum Außenklima aufweisen, höhere Lufttemperaturen im FZR auf, muss die Forderung gelten, dass die warme Luft im FZR durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten effizienter abgeführt wird. Nur so können die Oberflächentemperatur der Isolierverglasung und damit der konvektive Eintrag in den Raum konstant bleiben. Diese effiziente Wärmeübertragung wird durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der steigenden Auftriebshöhe erreicht. Abbildung 7.9 zeigt das Temperaturfeld der Konfiguration 43, welche zwei Fassadenelemente aufweist und jenes derselben Fassadenkonfiguration mit nur einem Element (Konfiguration 13) am strahlungsreichen Sommertag (Tag B).

Anhand der Temperaturfelder ist ersichtlich, dass die Temperatur zwischen Außenverglasung und der Verschattung im oberen Element stark ansteigt (siehe auch Temperaturverlauf Profil 4 im Diagramm rechts unten). Auch die Lufttemperatur im oberen Element nahe der Isolierverglasung ist an dieser Stelle stets höher als bei derselben Konfiguration innerhalb nur eines Fassadenelements. Da der totale Energieeintrag beider Konfigurationen jedoch quasi identisch bleibt ($Q_{tot} = -97,6$ bzw. $-99,0 \text{ W/m}^2$) muss die höhere Temperatur durch höhere Geschwindigkeiten abgeführt werden. Dies wird in Abbildung 7.9, im Diagramm rechts oben, veranschaulicht. Am Profil 4, welches einen Querschnitt knapp vor Luftaustritt des zweiten Elementes darstellt, treten sowohl knapp vor der Isolierverglasung als auch zwischen Außenverglasung und Sonnenschutz die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auf, wodurch die Wärme effizient abgeführt werden kann.

Stellt man den Temperaturverlauf von Profil 2 bei Konfigurationen mit einem Fassadenelement dem Temperaturverlauf desselben Profils bei Konfiguration mit zwei Elementen gegenüber, ist festzustellen, dass die Temperaturen bei der Konfiguration mit zwei Fassadenelementen sinken. Dies kann auch den Temperaturverläufen in Abbildung 7.9 rechts unten entnommen werden. Die abgebildeten, gegenübergestellten Konfigurationen stellen bezüglich dieses Aspekts keine Ausnahme dar. Wie dem Anhang entnommen werden kann, ist dies ein Zusammenhang, der zwischen allen Konfigurationen, welche sich lediglich durch die Auftriebshöhe unterscheiden, erkennbar ist. Es kann folgender Zusammenhang in Gleichung 7.2 mit Zahlenwerten für Konfiguration 13 bzw. 43 (siehe Abbildung 7.9) angegeben werden.

$$T_{4,air}^2 \geq T_{2,air}^1 \geq T_{2,air}^2 \quad (7.2)$$

$$T_{4,air}^2 = 46,71^\circ\text{C} \geq T_{2,air}^1 = 44,93^\circ\text{C} \geq T_{2,air}^2 = 42,41^\circ\text{C}$$

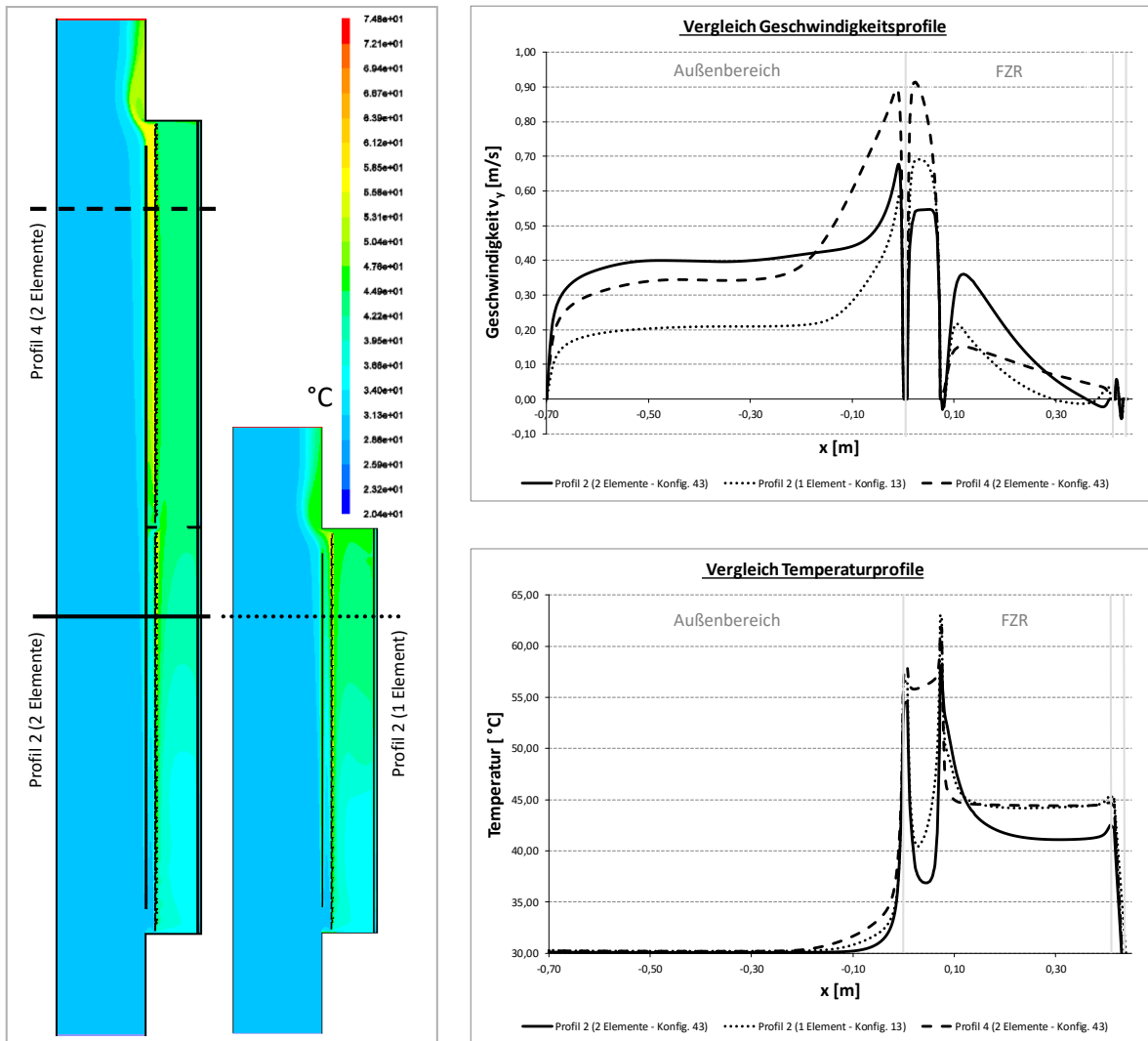


Abbildung 7.9: Temperaturfelder am sonnigen Sommertag der Konfigurationen 43 (zwei Elemente) und 13 (ein Element) links sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen

Aus Gleichung 7.2 ist also eine Beziehung zwischen der Lufttemperatur $T_{4,air}^2$, welche am zweiten Element am oberen Querschnitt gemittelt wird, der Lufttemperatur $T_{2,air}^2$, selbiger Fassadenkonfiguration am oberen Querschnitt des unteren Elementes und der Lufttemperatur $T_{2,air}^1$ am oberen Querschnitt des alleinig wirkenden Elementes erkennbar. Nun stellt sich die Frage, ob dieser Zusammenhang auch für diverse Oberflächentemperaturen innerhalb der Profile augenscheinlich ist. Es ergibt sich, dass diese Beziehung nur zum Teil übernommen werden kann (siehe Gleichung 7.3).

$$T_{4,j}^2 \times T_{2,j}^1 \geq T_{2,j}^2 \quad (7.3)$$

Während diverse Oberflächentemperaturen $T_{2,i}^1$ am Querschnitt 2 immer höher sind, wenn die Fassadenhöhe die Höhe eines Elementes (im Vergleich zur Höhe zweier Elemente $\rightarrow T_{2,i}^2$) aufweist, kann für die Oberflächentemperaturen am oberen Querschnitt 4 des zweiten Fassadenelementes nicht mehr zwingend festgestellt werden, dass diese Temperaturen $T_{4,i}^2$ Maximalwerte erreichen.

Die Tatsache, dass sowohl Luft- als auch Oberflächentemperaturen am Querschnitt 2 sinken, wenn ein zweites Fassadenelement über das untere gesetzt wird spricht dafür, dass die Wärmeübertragung durch Vergrößerung der Fassadenhöhe verbessert wird. Verbesserte Wärmeübertragung bedeutet erhöhte Wärmeübergangskoeffizienten α_K , erhöhte Nusselt-Zahlen und dadurch auch höhere Rayleigh-Zahlen. Dass Rayleigh-Zahlen durch Erhöhung der Auftriebshöhen stark ansteigen, ist offensichtlich, da die Auftriebshöhe in dritter Potenz in deren Berechnungsformel eingeht. Verbesserte Wärmeübertragung hat zur Folge, dass auch Geschwindigkeiten, Massenströme und die Temperaturen an den Luftaustrittsöffnungen mit erhöhter Auftriebshöhe ansteigen müssen (siehe Gleichung 7.4). Eine große Erhöhung der Auftriebshöhe kann, ohne Erweiterung der Öffnungen innerhalb der Außenfassade, jedoch sehr kritisch werden, da der Bezug zum kühleren Außenklima verloren geht.

$$T_{out}^2 \geq T_{out}^1 \quad v_{out}^2 \geq v_{out}^1 \quad \dot{m}_{out}^2 \geq \dot{m}_{out}^1 \quad (7.4)$$

7.1.3 Weitere Erkenntnisse

Im vorliegenden Kapitel werden weitere Erkenntnisse, welche unter anderem die Plausibilität der Berechnungsergebnisse überprüfen, dargestellt. Darüber hinaus wird darauf eingegangen, wie sich andere Auswerteparameter verhalten, wenn der totale Energieeintrag (oder -verlust) Q_{tot} Extremwerte annimmt.

Zunächst wird jedoch auf die Beziehung zwischen der Übertemperatur am Querschnitt 2 und dem Massen- bzw. Volumenstrom eingegangen. Die Übertemperatur am Profil 2 ist dabei auf der Ordinate des oberen Diagramms in Abbildung 7.10 aufgetragen und ermittelt sich aus der Differenz der vorherrschenden Lufttemperatur an dieser Stelle und der in Kapitel 5.3 definierten Außentemperatur. Auf der Ordinate des unteren Diagramms ist der Volumenstrom am Luftaustritt aufgetragen, welcher sich durch Division des Massenstroms mit der in Kapitel 6.3.3 definierten Referenzdichte ρ_0 der jeweiligen Außenbedingung, ergibt. Auf beiden Abszissen sind die jeweiligen Fassadenkonfigurationen (1 bis 15), mit ihren eingenommenen, dynamischen Parametern symbolisch aufgetragen. In beiden Diagrammen repräsentieren die vier Datenreihen erzielte Ergebnisse für die verschiedenen Außenklimata.

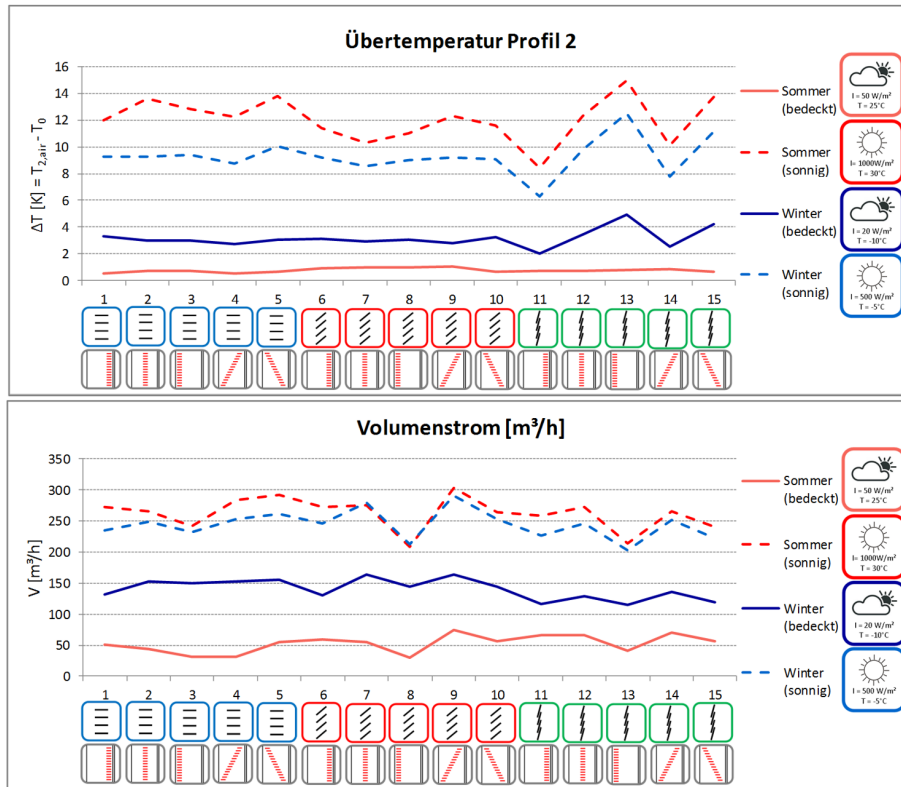


Abbildung 7.10: Übertemperaturen am Querschnitt 2 aller Konfigurationen an allen Außenbedingungen oben sowie die dazugehörigen Volumenströme unten

Es ist erkennbar, dass die Temperaturdifferenz zwischen Profil 2 und der Außentemperatur am sonnigen Sommertag (B) am höchsten ist, gefolgt vom sonnigen Wintertag (D), dem bedeckten Wintertag (C) und schließlich dem bedeckten Sommertag (A), an welchem die geringsten Differenzen auftreten. Selbiges gilt auch für den Volumenstrom, welcher am sonnigen Sommertag die höchsten und am bedeckten Sommertag die geringsten Werte vorweist. Es kann also folgende Beziehung in Gleichung 7.5 angegeben werden, welche aussagt, dass der Volumenstrom mit der Höhe der Übertemperatur im Fassadenzwischenraum ansteigt.

$$\begin{aligned} \Delta T_2^B &\geq \Delta T_2^D \geq \Delta T_2^C \geq \Delta T_2^A \\ &\Downarrow \\ V_{out}^B &\geq V_{out}^D \geq V_{out}^C \geq V_{out}^A \end{aligned} \quad (7.5)$$

Diese Beziehung bestätigt die Plausibilität der Ergebnisse, da die Druckdifferenz, welche den thermischen Auftrieb bestimmt, näherungsweise mit der bereits in Kapitel 6.3.3 eingeführten Boussinesq-Approximation bestimmt werden kann. Aus diesem Modell (siehe Gleichung 7.6) geht hervor, dass die Druckdifferenz ansteigt, wenn die Übertemperatur eine Erhöhung erfährt. Diese erhöhte Druckdifferenz führt ferner zu höheren Volumenströmen.

$$\Delta p = (\rho - \rho_0)gh \approx \rho_0\beta(T - T_0)gh \quad (7.6)$$

Wenn-Dann-Beziehungen für Q_{tot} : Vorerst muss erwähnt werden, dass die Wenn-Dann-Beziehungen der Oberflächentemperaturen anhand aller Auswertungsprofile abgeleitet werden können. Jedoch muss angemerkt werden, dass die folgenden Beziehungen nicht für jede Konfiguration und jedes Außenklima ohne Einschränkung immer gültig sind. Selbstverständlich gibt es Ausnahmen, welche Gegensätzliches zu genannten Zusammenhängen aussagen, jedoch sind diese stark in der Unterzahl und es ist ein eindeutiger Trend erkennbar, welcher in diesen Beziehungen widerspiegelt wird.

- $T_{out} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die Lufttemperatur an der Austrittsöffnung, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,1} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die äußere Oberflächentemperatur der Außenverglasung, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,2} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die innere Oberflächentemperatur der Außenverglasung, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,3} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die Temperatur der Lamelle, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,4} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \downarrow$: Steigt die äußere Oberflächentemperatur der Isolierverglasung, steigt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,5} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \downarrow$: Steigt die innere Oberflächentemperatur der Isolierverglasung, steigt der Energieeintrag in den Raum.

Vor allem die erstgenannte Beziehung deutet daraufhin, dass die konvektive Wärmeabfuhr im Sommerfall fokussiert werden muss, um Überhitzung der Innenräume zu vermeiden. Das heißt, höhere Temperaturen (bzw. Temperaturdifferenzen) im Fassadenzwischenraum werden akzeptiert, da dadurch eine effektivere Wärmeabfuhr erreicht werden kann. Transmissionswärmegewinne erfahren dabei aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten keine zusätzliche Steigerung.

7.2 Aktive Solarenergienutzung: 2.-Haut-Fassaden

In Abbildung 7.11 ist das Hauptauswertungsdiagramm für die aktive Solarenergienutzung aller 2.-Haut-Fassaden dargestellt. Auf den ersten Blick lässt sich diesen Ergebnissen entnehmen, dass erhebliche Temperaturerhöhungen für Konfigurationen mit einem Fassadenelement nur an strahlungsreichen Tagen erzielbar sind. Am bedeckten Sommertag, dessen Ergebnisse in der ersten Spalte dargestellt sind, beträgt der maximale Temperaturanstieg weniger als 1 K, weshalb Aussagen über Bestkonfigurationen kaum möglich sind. Ebenso ist stark zu bezweifeln, dass eine aktive Nutzung bei solch geringen Übertemperaturen überhaupt sinnvoll ist. Liegen strahlungsarme Winterbedingungen vor, so kann die maximale Temperaturdifferenz bereits auf 4 K angehoben werden. Dies liegt jedoch nicht daran, dass eine Aufheizung der Luft im Fassadenzwischenraum durch einwirkende Solarstrahlung erfolgt. Vielmehr ergeben sich erhebliche Transmissionswärmeverluste, welche sich aufgrund des großen Temperaturgradienten zwischen Außenklima (-10°C) und dem Klima im Innenraum (20°C) einstellen. Natürlich ist dies kein Ausschlussgrund dafür, die entstehende (verlorene) Wärme nutzbar zu machen, jedoch ist die Bezeichnung als „aktive Solarenergienutzung“ möglicherweise nicht mehr passend.

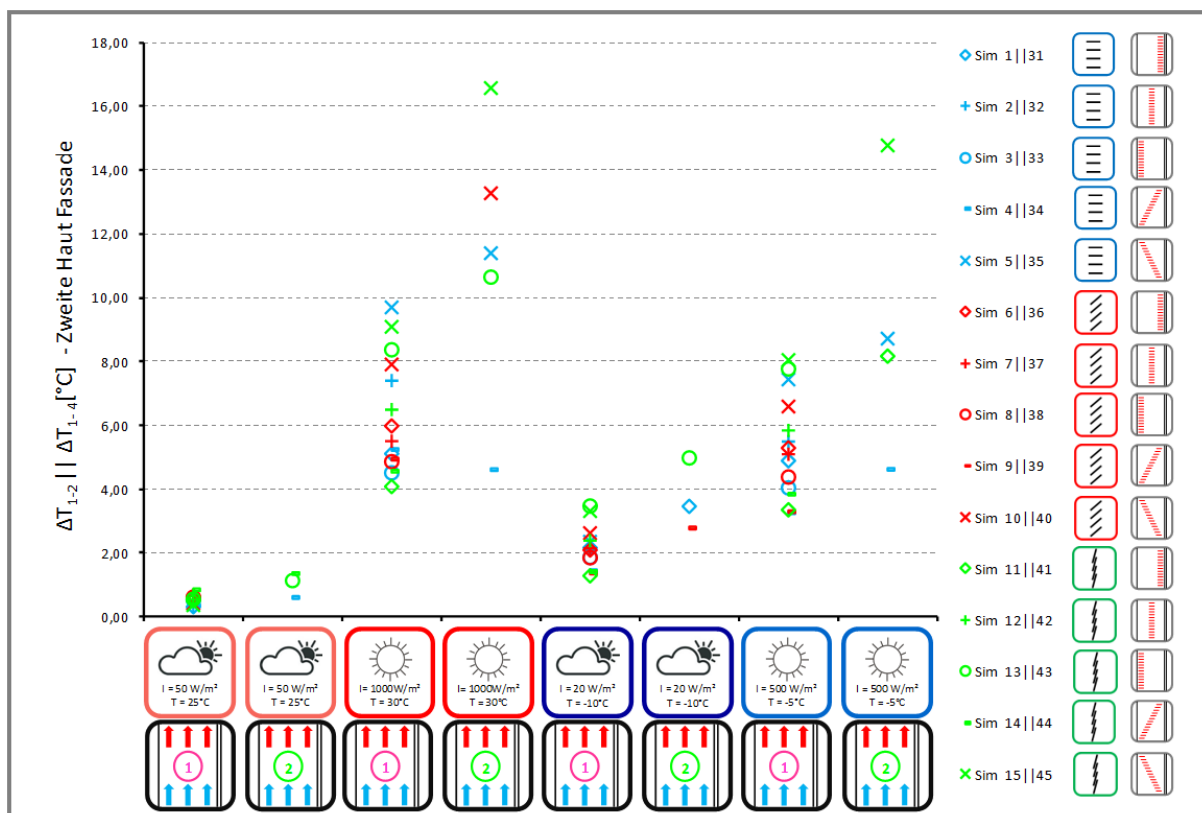


Abbildung 7.11: Aktive Solarenergienutzung ΔT_{1-2} bzw. ΔT_{1-4} aller Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade zu allen Außenklimata

Eine Gruppenbildung von Konfigurationen, welche dieselben Parameter aufweisen, kann auch bei Ergebnissen der aktiven Solarenergienutzung erkannt werden. Allerdings sind es diesmal nicht, wie bei der passiven Solarenergienutzung, Konfigurationen mit demselben Lamellen-Öffnungswinkel sondern Konfigurationen, die dieselben Positionen im Fassadenzwischenraum aufweisen. Dies ist jedoch auch nur für eine bestimmte Position und zwar die schräge Anordnung, bei welcher die Verschattung unten nahe an der Isolierverglasung und oben nahe an der Außenverglasung liegt (Kreuz als Datenreihensymbol: Sim. 5, 10 und 15), erkennbar. Diese Konfigurationen weisen zusammen mit Konfiguration 13 (geschlossener Raffstore nahe an der Außenverglasung) an allen Tagen, außer dem kaum aussagekräftigen, bedeckten Sommertag, die höchsten Temperaturdifferenzen auf.

7.2.1 Bestkonfigurationen

Eine separate Betrachtung der aktiven Solarenergienutzung an Winter- und Sommertagen, wie es für die passive Solarenergienutzung aufgrund des saisonalen Wärmeschutzes, erfolgt, ist hier nicht erforderlich. Demnach wird unter jeder klimatischen Außenbedingung eine maximale Temperaturerhöhung innerhalb des Fassadenzwischenraums positiv bewertet. Prinzipiell kann keine Fassadenkonfiguration unter mehr als einer außenklimatischen Randbedingung die höchsten Werte für ΔT_{1-2} erzielen. Allerdings ist in Abbildung 7.11 erkennbar, dass an beiden sonnigen Tagen sowie am bedeckten Wintertag dieselben vier Fassadenkonfigurationen, die besten Ergebnisse für die aktive Nutzung erzielen. Hierbei handelt es sich um die drei Konfigurationen, bei welchen der Sonnenschutz schräg im Fassadenzwischenraum unten nahe an der Isolierverglasung und oben nahe an der Außenverglasung angeordnet ist (unabhängig vom Öffnungswinkel der Lamelle). Die vierte, positiv zu bewertende Konfiguration weist geschlossene Lamellen nahe an der Außenverglasung auf. Symbolisch dargestellt können entsprechend Abbildung 7.12 folgende Konfigurationen empfohlen werden:

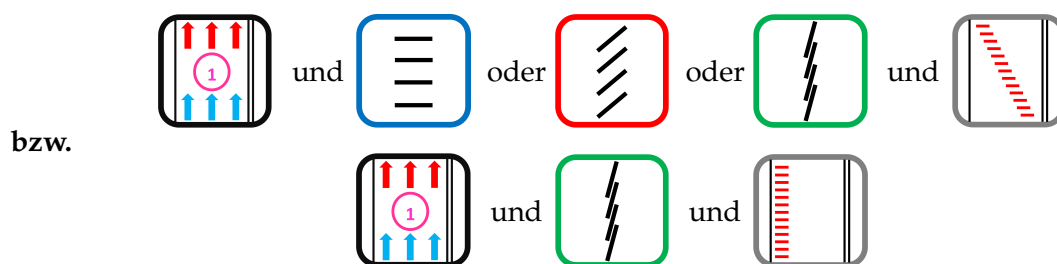


Abbildung 7.12: Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur aktiven Solarenergienutzung an allen Simulationstagen

Auf die symbolische Darstellung des Außenklimas wurde bewusst verzichtet, da die empfohlenen Konfigurationen für alle Außenklimata allgemein gültig sind (lediglich der strahlungsarme Sommertag stellt eine Ausnahme dar – mit dessen Ergebnissen jedoch eine sinnvolle, aktive Nutzung ohnehin angezweifelt werden muss).

In Abbildung 7.13 sind für alle Außenklimata exemplarisch Temperaturfelder der jeweiligen Bestkonfiguration dargestellt. Bei den Konfigurationen 5 am sonnigen Sommertag und 15 am sonnigen Wintertag ist dabei gut erkennbar, dass die kühle Außenluft in den Bereich vor der Verschattung ungehindert eindringen kann und dadurch die Lufttemperatur an dieser Stelle im FZR auf kleinen Werten gehalten werden kann. Der schräge Sonnenschutz wirkt dabei als Art Hindernis, wodurch sich die Lufttemperatur im Bereich hinter dem Raffstore stark erhöht. Die empfohlene Konfiguration am bedeckten Sommertag (Konfig. 14) ist der Vollständigkeit halber ebenfalls dargestellt.

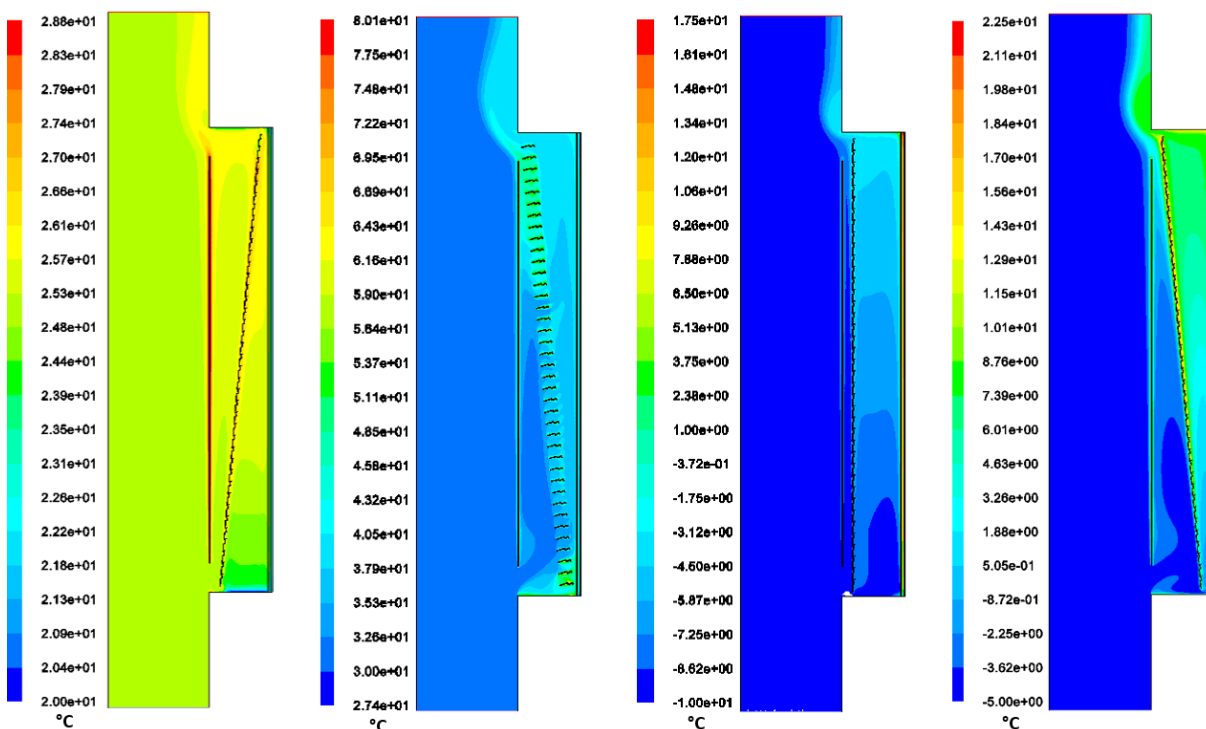


Abbildung 7.13: Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 14, sonniger Sommertag Sim. 5, bedeckter Wintertag Sim. 13, sonniger Wintertag Sim. 15

7.2.2 Beeinflussung durch zweites Fassadenelement

Der Hauptauswertungsparameter, welcher die aktive Solarenergienutzung beschreibt wird, als Temperaturdifferenz zwischen den Profilen 1 und 2 ΔT_{1-2} , sofern die Konfiguration ein Fassadenelement beinhaltet oder zwischen den Profilen 1 und 4 ΔT_{1-4} , sofern sie zwei Fassadenelemente beinhaltet, angegeben. Im Falle der Auswertung von Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen wird somit der Abstand zwischen den Querschnitten, welche zur Differenzbildung herangezogen werden, mehr als verdoppelt. Da die Öffnungen für Luft ein- und austritt immer am unteren beziehungsweise oberen Ende des Fassadenzwischenraums angeordnet sind und die Fassadenfläche bei gleicher Öffnungsfläche (Zu- und Abluftöffnung) verdoppelt wird, weist die strömende, warme Luft im FZR weniger Bezug zum kühleren

Außenklima auf. Infolgedessen entzieht die strömende Luft über eine längere Strecke den wärmeren Oberflächen (Lamelle, Außenverglasung, Isolierverglasung) durch Konvektion ihre Wärme. Außerdem wird die Konvektionsströmung in ihrer Effizienz durch die Erhöhung der wirksamen Auftriebshöhe gesteigert. Es liegt auf der Hand, dass die Lufttemperatur über die Höhe ansteigen muss, wenn die Wärmeübertragung verbessert wird und noch dazu über längere Strecken wirkt. Dieser Effekt wird durch aktive Solarenergienutzung ausgeschöpft und kann Abbildung 7.11 entnommen werden. Dort ist die Verbesserung der aktiven Nutzung durch die Erweiterung der Konfigurationen mit einem zweiten Fassadenelement immer in benachbarten Diagrammspalten dargestellt.

Abbildung 7.11 kann demnach entnommen werden, dass alle Konfigurationen durch Erhöhung der Fassadenhöhe eine Verbesserung der aktiven Solarenergienutzung erfahren. Selbst am bedeckten Sommertag, an welchem die aktive Nutzung bei Konfigurationen mit einem Fassadenelement noch immens in Frage gestellt werden muss, kann durch die Verbesserung eine Temperaturdifferenz von knapp unter 2 K erzielt werden. Dies mag auch noch nicht ausreichend sein, um einen Wärmeübertrager effizient betreiben zu können, würde sich dieser Trend des Temperaturanstiegs allerdings auch mit einer sehr großen Erhöhung der Auftriebshöhe (z.B. fünf Fassadenelemente) fortsetzen, könnte auch am bedeckten Sommertag aktive Solarenergienutzung von Interesse sein. Anhand der Verbesserung der aktiven Solarenergienutzung der Konfigurationen, bei denen der Sonnenschutz schräg im FZR unten nahe an der Isolierverglasung und oben nahe an der Außenverglasung (farbige Kreuze in Abbildung 7.11) angeordnet ist, kann durch Betrachtung von Simulationstag B und D ein Trend erkannt werden. Dieser gibt an, dass der Temperaturanstieg umso ausgeprägter ist, je höher der Öffnungswinkel der Lamelle ist (d.h. je geschlossener oder vertikaler die Lamelle ist). Während die Temperatur bei geöffneter Lamelle am sonnigen Sommertag nur um knapp 2 K ansteigt, kann durch halbgeöffnete Lamellen bereits ein Anstieg von etwa 5 K und mittels geschlossener Lamellen sogar eine Erhöhung von ca. 7 K erzielt werden. Analog gilt dies am strahlungsreichen Wintertag, an welchem durch geschlossene Lamellen ein Temperaturanstieg von über 6 K erzielt wird, während der Anstieg mit horizontalen Lamellen knapp unter 2 K liegt.

In Abbildung 7.14 erfolgt die Gegenüberstellung zweier Konfigurationen (Konfiguration 15 und 45), welche sich nur durch die Fassadenhöhe unterscheiden. Die Position des Sonnenschutzes (schräg im FZR), deren Öffnungswinkel (vertikal) und das vorliegende Außenklima (sommerlicher Sommertag) sind für beide Konfigurationen gleich. Bereits den Temperaturfeldern ist zu entnehmen, dass am oberen Profil der Konfiguration mit zwei Elementen deutlich höhere Temperaturen als am oberen Querschnitt der Konfiguration mit nur einem Element vorherrschen. Dies kann durch Betrachtung der Temperaturverläufe im Diagramm rechts unten detailliert veranschaulicht werden. Es ist erkennbar, dass die mittlere Lufttemperatur (also jene in hinreichendem Abstand zu Festkörperwänden) am Querschnitt 4 des zweiten Elementes

(strichlierte Linie) um etwa 7K höher als die mittlere Lufttemperatur am Querschnitt 2 des Einzelelementes (punktirierte Linie) ist.

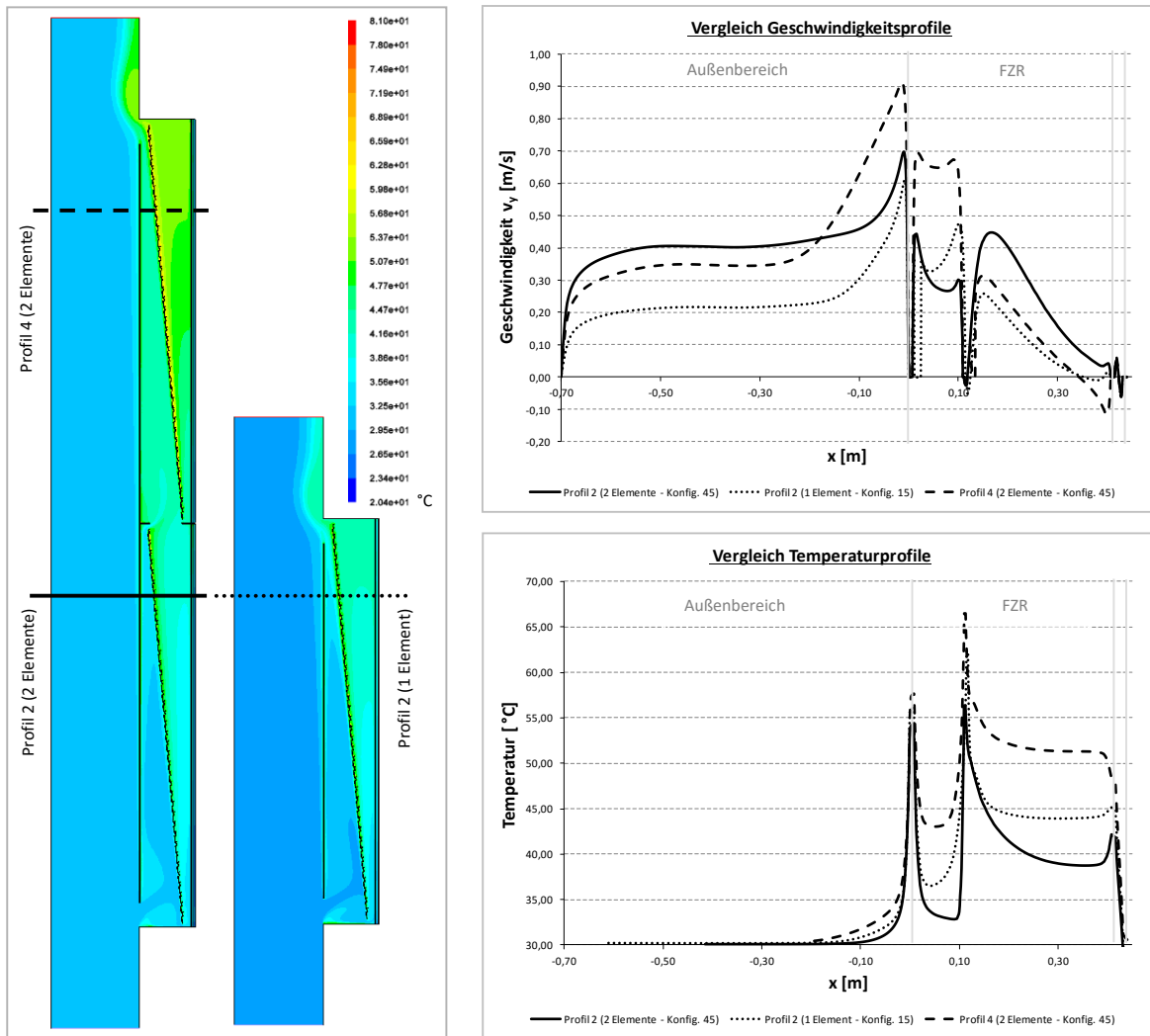


Abbildung 7.14: Temperaturfelder am sonnigen Sommertag der Konfigurationen 45 (zwei Elemente - links) und 15 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen

Des Weiteren werden Beziehungen und Zusammenhänge, die durch die Anordnung eines zweiten Fassadenelementes entstehen und welche bereits in Kapitel 7.1.2 erläutert wurden, auch in Abbildung 7.14 erkannt. Konkret nehmen Lufttemperaturen (und auch die Oberflächentemperaturen) am Querschnitt 2 des unteren Elementes von Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen im Vergleich zu Lufttemperaturen am Profil 2 von Konfigurationen mit nur einem Fassadenelement ab. Dies zeigen beispielsweise die durchgezogenen, punktierten und strichlierten Linie der Temperaturverläufe. Die Ursachen dieser effizienteren Wärmeübertragung sind höhere Strömungsgeschwindigkeiten.

7.3 Passive Solarenergienutzung: Pufferfassaden

Nachdem die Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse für die Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade in den ersten beiden Abschnitten des vorliegenden Kapitels erfolgte, wird nun auf die Wirkungsweise als Pufferfassade eingegangen. Abbildung 7.15 stellt hierfür das dritte von vier Hauptauswertungsdiagrammen dar. Der Ergebnisgrafik kann entnommen werden, dass nur unter der Außenbedingung des bedeckten Wintertags Wärmeverluste auftreten. An allen anderen Simulationstagen treten stets Energie- bzw. Wärmeeinträge auf. Analog zur Auswertung der passiven Solarenergienutzung von 2.-Haut-Fassaden muss festgestellt werden, dass Empfehlungen von Bestkonfigurationen zu strahlungsarmen Bedingungen weniger qualitativ sind, da die Spreizung zwischen den Extremwerten aller Konfigurationen für diese Außenbedingungen sehr gering sind. An den strahlungsreichen Tagen im Sommer beträgt die Spreizung zwischen maximalem und minimalem Energieeintrag etwa 200 W/m^2 und im Winter etwas über 100 W/m^2 . Die Einzelspreizungen werden zwischen den Parametergruppen des Öffnungswinkels (blaue, rote, grüne Datenreihen) umso kleiner, je geschlossener die Lamellen ausgerichtet sind. Das bedeutet, dass bei geschlossenem Raffstore die Position des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum den Energieeintrag in den Raum nur sehr geringfügig beeinflusst.

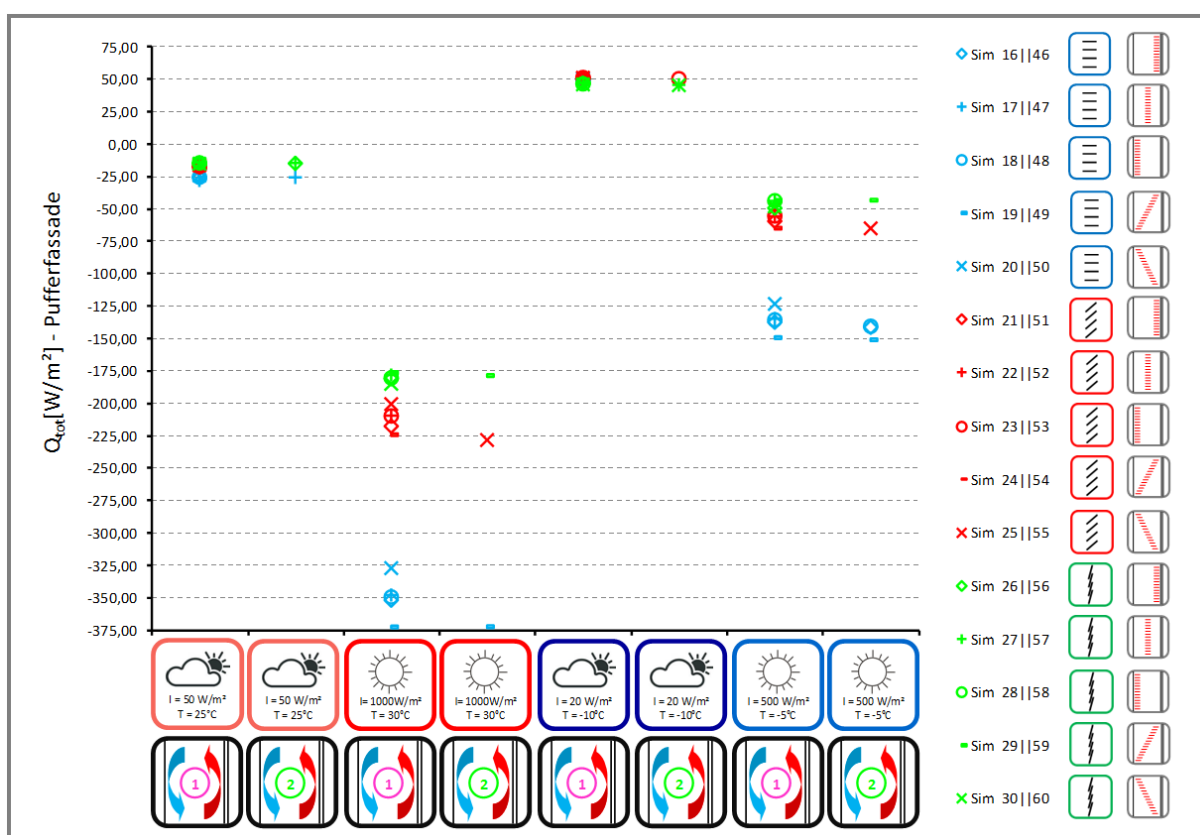


Abbildung 7.15: Passive Solarenergienutzung Q_{tot} aller Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade zu allen Außenklimata

Eine weitere Beziehung, die auch schon bei der 2.-Haut-Fassade Gültigkeit hatte, ist ein erhöhter Energieeintrag in den Raum bei kleineren Öffnungswinkel der Lamelle (siehe Gleichung 7.7). Dieser Zusammenhang entspricht der Erwartungshaltung, da mit geöffneten Lamellen mehr Solarstrahlung direkt in den Innenraum gelangt. Lediglich für den bedeckten Wintertag kann dieser Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Öffnungswinkel nicht als gültig angesehen werden, da durch die klimatische Situation sehr hohe Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen sowie kaum solare Belastung als Randbedingung auftreten. Daraus folgend dominieren andere Wärmetransportmechanismen als der solare Strahlungseintrag den Energieeintrag in den Raum.

$$Q_{tot,0^\circ} < Q_{tot,40^\circ} < Q_{tot,80^\circ} \quad (7.7)$$

Vergleicht man die Größenordnung der Energieeinträge (bzw. Energieverluste) an den einzelnen Simulationstagen der Konfigurationen, welche als Pufferfassade (Abbildung 7.15) wirken, mit den Wärmeinträgen der Konfigurationen, welche als 2.-Haut-Fassade (Abbildung 7.3) wirken, stellt man zunächst fest, dass am bedeckten Sommertag quasi keine Unterschiede vorliegen. Am sonnigen Sommertag wird der minimale Energieeintrag um etwa 80 W/m^2 (ca. 44 %) und der maximale Energieeintrag um etwa 100 W/m^2 durch die Wirkung des thermischen Puffers gesteigert. Die Wärmeverluste am bedeckten Wintertag können durch die Pufferschicht um etwa 13 W/m^2 gesenkt werden. Diese Reduktion stellt zunächst zwar keinen hohen absoluten Wert dar, jedoch kann dieser Wert bei einem maximalen Wärmeverlust von ca. 65 W/m^2 im Falle der Konfiguration als 2.-Haut-Fassade doch als sehr positiv bewertet werden. Am sonnigen Wintertag (Tag D) wird der maximale Energieverlust in einen Energieeintrag (ca. 65 W/m^2 Differenz) umgewandelt, sowie der maximale Energieeintrag um etwa 35 W/m^2 (ca. 22 %) gesteigert. Unter welchen Voraussetzungen diese Steigerungen der Energieeinträge erwünscht sind, wird im nachfolgenden Kapitel definiert.

7.3.1 Bestkonfigurationen

Sommertage: Wie schon im Falle der 2.-Haut-Fassade erfolgt die Empfehlung der Konfigurationen gesondert für Sommer- und Wintertage. An Sommertagen wird dem Verlangen nachgegangen den Kühlenergieverbrauch zu senken, was durch Vermeidung von Überhitzung erzielt werden kann. Demnach soll an den Sommertagen der Energieeintrag in den Raum Minima, das heißt unter Beachtung der Vorzeichenkonvention die kleinsten Absolutwerte, annehmen (negative Werte für Q_{tot} entsprechen einem Energieeintrag). So werden an bedeckten Sommertagen mit geschlossenem Raffstore nahe an der Außenverglasung (Konfiguration 28) sowie an sonnigen Sommertagen ebenso mit einem geschlossenem Raffstore, welcher schräg im Fassadenzwischenraum (unten nahe an der Außenverglasung oben nahe an der Isolierverglasung - Konfiguration 29) angeordnet ist, minimale Energieeinträge erreicht. Wie anfangs in

Kapitel 7.3 bereits festgestellt, ist die Spreizung des Energieeintrags aller Konfigurationen mit vertikalen Lamellen sehr klein und die Lage des Sonnenschutzes daher nahezu irrelevant. Aus diesem Grund wird auch keine klare Empfehlung für diesen Parameter angegeben. Dies ist in Abbildung 7.16 ersichtlich.

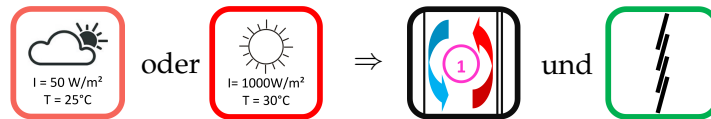


Abbildung 7.16: Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur passiven Solarenergienutzung an Sommertagen

Zuvor wurden bereits unterschiedliche Ergebnisse, welche mit Puffer- und 2.-Haut-Fassaden erzielt werden, diskutiert. Es konnte festgestellt werden, dass der Energieeintrag durch den thermischen Puffer um etwa 44 % erhöht wird. Da dies mit den Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes konkurriert, sind unter sommerlichen Außenbedingungen in jedem Fall Konfigurationen, welche als 2.-Haut-Fassade wirken, vorzuziehen.

Wintertage: Zu den Anforderungen des winterlichen Wärmeschutzes zählt es unter anderem passive Solareinträge nutzbar zu machen, um damit den Heizenergieverbrauch zu senken. Demnach ist es an den Wintertagen erstrebenswert maximale Energieeinträge zu erhalten. Dies kann an sonnigen Wintertagen durch Pufferfassaden mit analoger Konfiguration zu jener für 2.-Haut-Fassaden empfohlenen erreicht werden. Dabei handelt es sich um eine schräge Anordnung der Verschattung unten nahe an der Außenverglasung und oben nahe an der Isolierverglasung, wobei die Lamellen horizontal eingestellt sind. Während sich diese empfohlene Konfiguration mit der Erwartungshaltung deckt, wurden für den bedeckten Wintertag zunächst überraschende Ergebnisse erzielt. An diesen Simulationstagen wird die beste passive Nutzung, also der geringste Wärmeverlust, durch geschlossene (vertikale) Lamellen, welche sich schräg im FZR (unten nahe an der Isolierverglasung oben nahe an der Außenverglasung) befinden, erzielt. Vor allem der Öffnungswinkel der Lamelle (80°) sorgt für Verwunderung, da auch alle weiteren Konfigurationen mit geschlossenen Lamellen unter diesen Außenbedingungen die besten Ergebnisse aufweisen. Dies kann nur dadurch erklärt werden, dass die vorhandene Solarstrahlung zu gering ist, um sie passiv zu nutzen und durch den geschlossenen Raffstore die warme Luft besser im zur Isolierverglasung zugewandten Bereich des Fassadenzwischenraums gehalten werden kann. Weil am bedeckten Wintertag alle Konfigurationen mit geschlossenem Raffstore ähnlich gute Ergebnisse hervorbringen, wird von einer Empfehlung der genauen Position des Raffstores im FZR abgesehen. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die Empfehlungen entsprechend Abbildung 7.17.

Im Vergleich zu den Ergebnissen von 2.-Haut-Fassaden, weisen Pufferfassaden im Winter um etwa 22 % höhere Energieeinträge auf, weshalb die Anwendung von Pufferfassaden einer Anwendung von 2.-Haut-Fassaden an Wintertagen vorzuziehen ist.

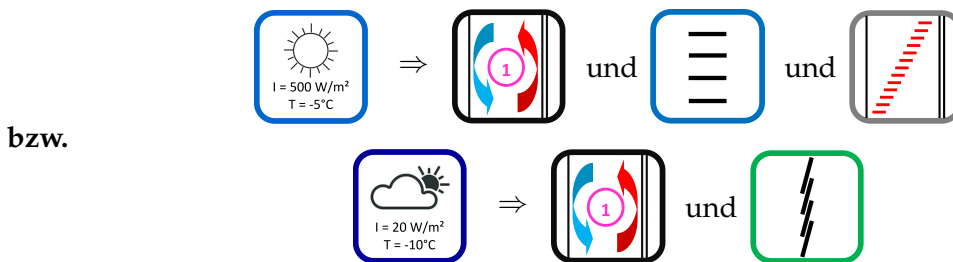


Abbildung 7.17: Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur passiven Solarenergienutzung an Wintertagen

Die Temperaturfelder in Abbildung 7.18 zeigen beispielhaft empfohlene Konfigurationen für die vier verschiedenen Außenklimata. An den beiden Sommertagen sind die Temperaturfelder von Konfigurationen mit geschlossenem Raffstore nahe an der Außenverglasung (Konfiguration 28) oder mit einem schrägen Raffstore (Konfiguration 29) dargestellt. An den Wintertagen sind darüber hinaus die Temperaturfelder der Konfiguration mit geschlossenem Raffstore (Konfiguration 30), welche den geringsten Wärmeverlust an strahlungsarmen Wintertagen aufweist sowie der Konfiguration mit offenem Raffstore, welcher schräg im FZR angeordnet ist (Konfig. 19) und am sonnigen Wintertag die meisten Energieeinträge generiert, dargestellt.

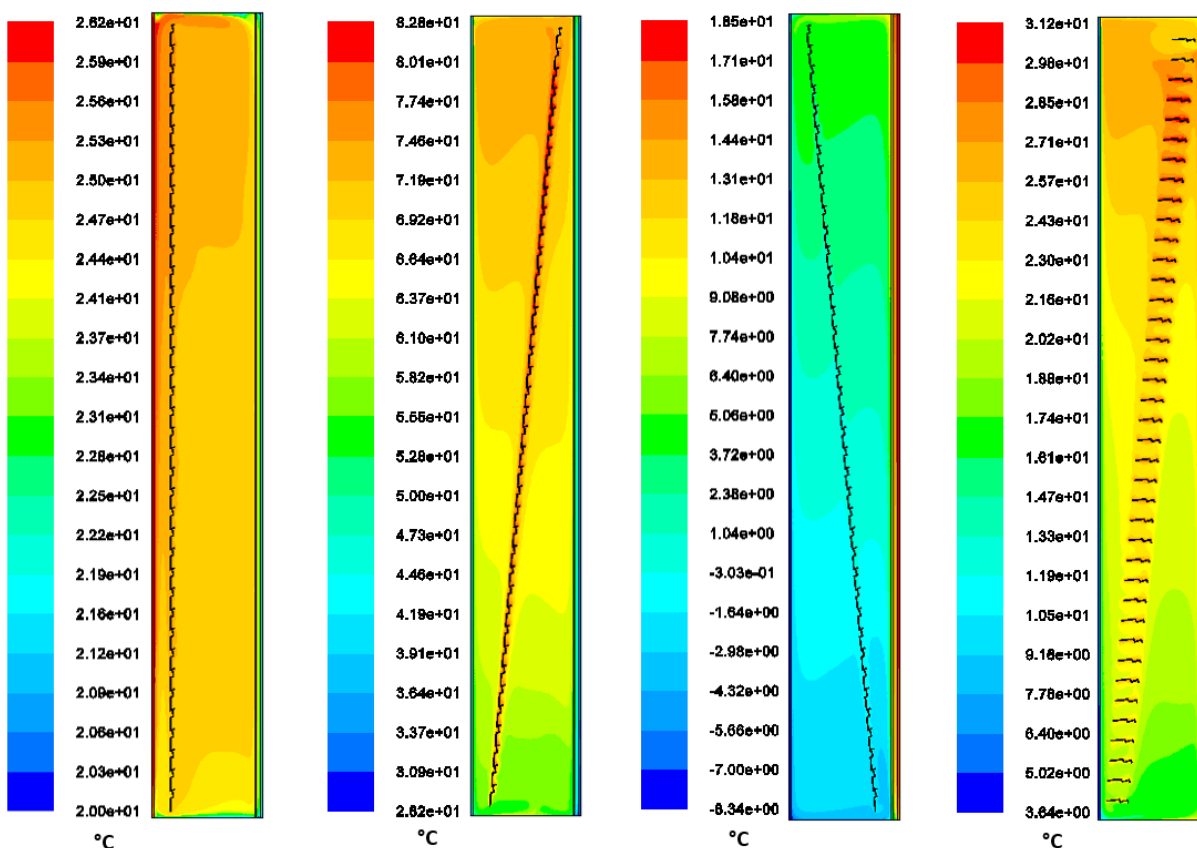


Abbildung 7.18: Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 28, sonniger Sommertag Sim. 29, bedeckter Wintertag Sim. 30, sonniger Wintertag Sim. 19

7.3.2 Beeinflussung durch zweites Fassadenelement

Auch für Konfigurationen, welche als Pufferfassade fungieren, wurden nicht alle Konfigurationen, welche an einem Fassadenelement betrachtet werden, auch an einem zweiten betrachtet. Erneut wird für eine konsistente Begründung der Auswahl zum Teil auf Ergebnisse der aktiven Solarenergienutzung vorgegriffen. Als Entscheidungsgrundlage dienen nämlich sowohl Ergebnisse für die passive (Abbildung 7.15) als auch für die aktive Solarenergienutzung (Abbildung 7.24) aller Konfigurationen mit einem Fassadenelement. So werden für alle Konfigurationen, mit welchen an einem Fassadenelemente Extremwerte für Q_{tot} oder ΔT_{1-2} erreicht werden ebenso Berechnungen mit zwei Fassadenelementen durchgeführt. Darüber hinaus erfüllen manche Fassadenkonfigurationen keines der beiden Hauptauswertekriterien als Optimum, jedoch beide Kriterien zugleich überdurchschnittlich gut. Auch für solche Konfigurationen erfolgt die weitere Betrachtung mit zwei Fassadenelementen. Die Ergebnisse der Extremwertbetrachtung sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

	$Q_{tot} \rightarrow MIN$ max. Energieeintrag min. Energieverlust	$Q_{tot} \rightarrow MAX$ min. Energieeintrag max. Energieverlust	$\Delta T_{1-2} \rightarrow MAX$	Sonstige
bedeckter Sommertag	17 → 47	27 → 57	26 → 56	-
sonniger Sommertag	19 → 49	29 → 59	24 → 54	-
bedeckter Wintertag	30 → 60	23 → 53	27 → 57	-
sonniger Wintertag	19 → 49	29 → 59	18 → 48	16,24 → 46,54

Tabelle 7.2: Extremwertbetrachtung der Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade an einem Element als Entscheidungsgrundlage zur Betrachtung an zwei Elementen

Wie Abbildung 7.15 entnommen werden kann, ändert sich der totale Energieeintrag Q_{tot} , welcher in Form einer Wärmestromdichte angegeben wird, auch im Falle der Pufferfassade durch Erhöhung der Fassadenhöhe nahezu gar nicht.

Dies liegt zum einen daran, dass der Energieeintrag durch Strahlung Q_{rad} konstant bleibt, was den Variantenmatrizen im Anhang entnommen werden kann. Die einzigen Konfigurationen, die diesbezüglich Ausnahmen darstellen, sind jene, in welchen der Sonnenschutz schräg im Fassadenzwischenraum unten nahe an der Isolierverglasung und oben nahe an der Außenverglasung angeordnet ist. Der Grund hierfür ist die geometrische Anordnung der Verschattung, wodurch die Anordnung des zweiten Fassadenelementes Bereiche an der Isolierverglasung des unteren Fassadenelements entstehen, welche keinen Sonnenschutz aufweisen und die Sonnenstrahlung somit ungeschützt einwirken kann. Diese Problematik wurde bereits in Kapitel 7.1.2 erläutert und in Abbildung 7.8 grafisch dargestellt. Die Auswirkungen dieses Effektes sind beispielsweise am sonnigen Sommertag anhand der rot eingefärbten Kreuze in Abbildung 7.15 gut erkennbar. Für diese Konfigurationen erhöht sich der totale Energieeintrag durch die

Anordnung eines zweiten Fassadenelementes von $Q_{tot} \approx -200W/m^2$ (bei Konfig. 25) auf etwa $Q_{tot} \approx -225W/m^2$ (bei Konfiguration 55).

Ein weiterer Grund, weshalb der totale Energieeintrag keine gravierenden Änderungen erfährt, muss zwangsläufig darin liegen, dass auch der konvektive Wärmeeintrag in den Raum durch die Anordnung eines zweiten Fassadenelementes keine großen Änderungen erfährt. Damit dies gewährleistet wird, muss die Oberflächentemperatur der Isolierverglasung auf der Raumseite im Mittel nahezu unverändert bleiben. Dies wird dadurch erreicht, dass die im oberen Bereich des zweiten Fassadenelementes entstehenden, höheren Lufttemperaturen effizienter durch Konvektion an die kalten Flächen übertragen werden. Diese Effekte können Abbildung 7.19, welche Ergebnisse zweier Fassadenkonfigurationen, die sich lediglich durch die Auftriebshöhe unterscheiden, enthält, entnommen werden.

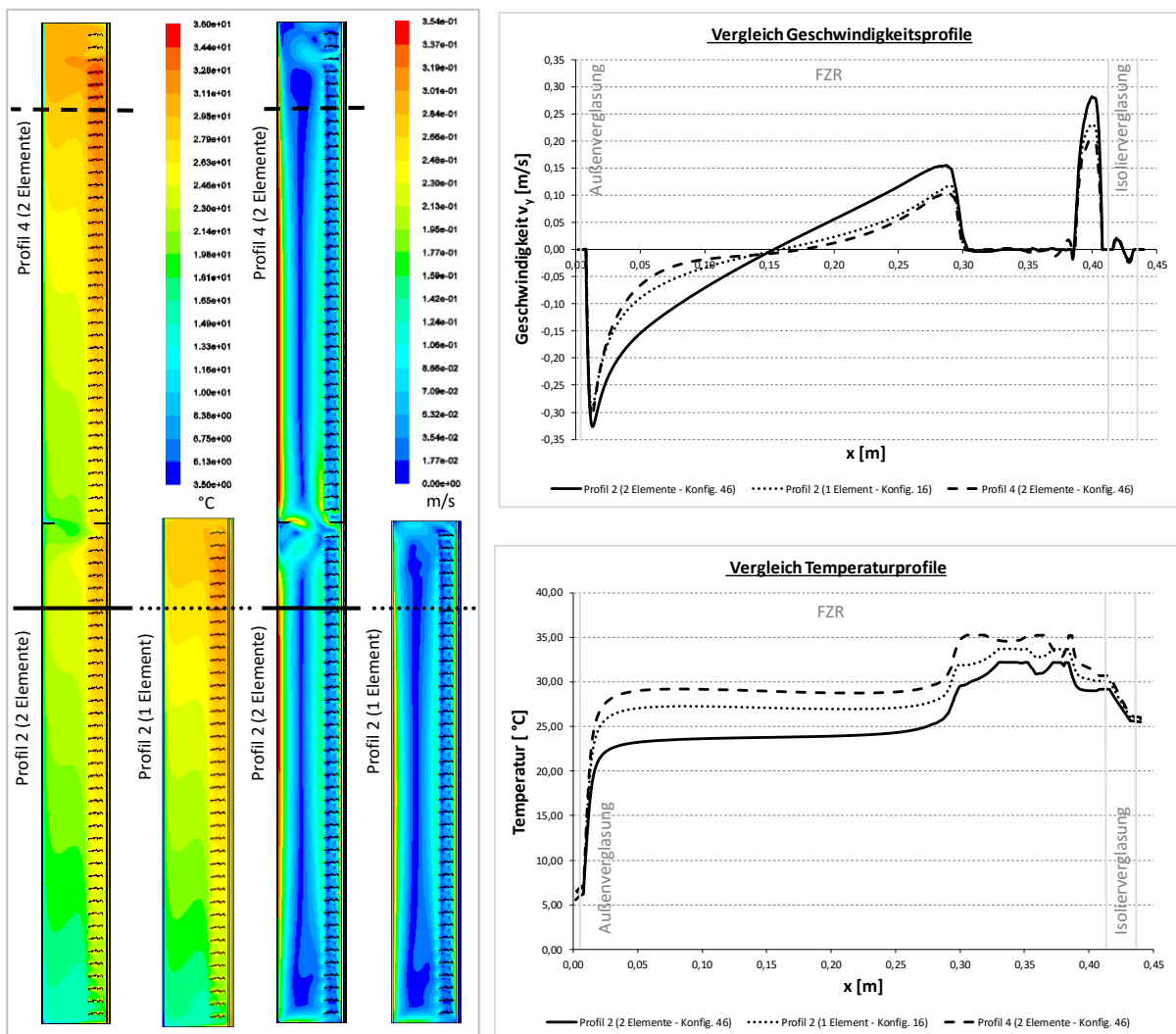


Abbildung 7.19: Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (links) am sonnigen Wintertag der Konfigurationen 46 (zwei Elemente) und 16 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen

In Abbildung 7.19 sind diverse Grafiken und Diagramme für Konfiguration 16 (ein Fassadenelement) sowie Konfiguration 46 (zwei Fassadenelemente) dargestellt. Die beiden linken Colour-Plots spiegeln dabei die Temperaturfelder wider, während die Colour-Plots rechts davon die Geschwindigkeitsfelder innerhalb der Pufferfassaden abbilden. Den Temperaturfeldern und -verläufen ist zu entnehmen, dass die Temperaturen im FZR bei der Konfiguration mit zwei Fassadenelementen im oberen Bereich eine leichte Erhöhung verglichen mit der Temperatur im oberen Bereich der Konfiguration mit einem Element erfährt. Da der Energieeintrag in den Raum beider Konfigurationen quasi identisch ($Q_{tot} \approx 138W/m^2$ bzw. $141W/m^2$) ist, jedoch im Falle der Konfiguration mit zwei Fassadenelementen die Temperaturen im oberen Bereich höher sind, muss folglich die Wärmeübertragung vom warmen Sonnenschutz und der warmen Isolierverglasung zu der kalten Außenverglasung effektiver erfolgen. Dass dies im abgebildeten Beispiel der Fall ist, kann anhand der Geschwindigkeitsfelder und der an der Außenverglasung und Abschattung vorherrschenden höheren Geschwindigkeiten erkannt werden. Die höhere Geschwindigkeit am Querschnitt 2 des unteren Fassadenelements bei der Konfiguration mit zwei Fassadenelementen (durchgezogene Linie in den Geschwindigkeitsverläufen rechts oben) im Vergleich zur Geschwindigkeit an derselben Stelle bei der Konfiguration mit einem Element (punktierte Linie) ist ein weiteres Indiz dafür, dass Wärmeübertragung durch größere Fassadenhöhen verbessert wird.

Wie bereits für 2.-Haut-Fassaden definiert, können gewisse Zusammenhänge zwischen Lufttemperaturen (aber auch zwischen Oberflächentemperaturen) von Konfigurationen, welche sich nur durch ihre Auftriebshöhe unterscheiden, bestehen. In Abbildung 7.19 ist beispielsweise die Temperatur am oberen Profil des oberen Elementes (Querschnitt 4) höher als jene Temperatur des oberen Profils (Profil 2), wenn die Strömung nur über ein Element wirkt. Diese Temperatur ist wiederum höher als die Temperatur am Querschnitt 2 des unteren Fassadenelements bei einer Wirkungsweise mit zwei Fassadenelementen (siehe Temperaturverläufe in Abbildung 7.19). Dieser Zusammenhang stellt für alle Konfigurationen, welche als Pufferfassade agieren eine allgemein gültige Beziehung dar. Diese ist in Gleichung 7.8 mit eingesetzten Zahlenwerten für die Konfigurationen 16 und 46 aus Abbildung 7.19 dargestellt:

$$T_{4,air}^2 \geq T_{2,air}^1 \geq T_{2,air}^2 \quad (7.8)$$

$$T_{4,air}^2 = 30,19^\circ\text{C} \geq T_{2,air}^1 = 28,42^\circ\text{C} \geq T_{2,air}^2 = 25,65^\circ\text{C}$$

Im Falle von 2.-Haut-Fassaden konnte diese Beziehung nur zum Teil auf diverse Oberflächentemperaturen innerhalb der Temperaturprofile angewandt werden. Auch im Falle einer Wirkung als Pufferfassade werden durch die Anordnung eines zweiten Elements über dem unteren Element die Oberflächentemperaturen am oberen Querschnitt des unteren Elementes (Profil 2) im Vergleich zu den Temperaturen an derselben Stelle bei Konfigurationen mit nur aus einem Fassadenelement, gesenkt. Es gilt also auch für Pufferfassaden dieselbe Beziehung (Gleichung 7.9) wie sie in Kapitel 7.1.2 für Zweite-Haut-Fassaden definiert wurde. Die Ursache

dieser Temperaturreduktion liegt darin, dass sich die hohe Lufttemperatur erst wesentlich später (bzw. höher) „staut“ und die Wärmeübertragung durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten, welche aus der höheren Auftriebshöhe resultieren, effizienter erfolgt. Ein weiterer Zusammenhang zu den Oberflächentemperaturen am Querschnitt 4 (oberes Profil des zweiten Fassadenelementes) kann nicht erkannt werden.

$$T_{4,j}^2 \not\propto T_{2,j}^1 \geq T_{2,j}^2 \quad (7.9)$$

7.3.3 Weitere Erkenntnisse

Es konnte festgestellt werden, dass die höchsten Energieeinträge in den Raum Q_{tot} nicht zwingend die höchsten Temperaturen im Fassadenzwischenraum zur Folge haben. Um diese Aussage zu bestätigen, werden für alle Außenklimata Diagramme erstellt, welche sowohl den totalen Energieeintrag als auch den konvektiven Eintrag in den Innenraum (auf der Ordinate) darstellen. Auf der Abszisse sind alle Fassadenkonfigurationen, welche als Pufferfassade wirken, aufgetragen. Die Reihenfolge der aufgetragenen Konfigurationen richtet sich dabei nach dem totalen Energieeintrag, beginnend bei dem minimalen ansteigend bis zum maximalen Energieeintrag. In nachfolgender Abbildung 7.20 sind für den sonnigen Sommertag (Tag B) sowie den sonnigen Wintertag (Tag D) die Energieeinträge in den Raum dargestellt.

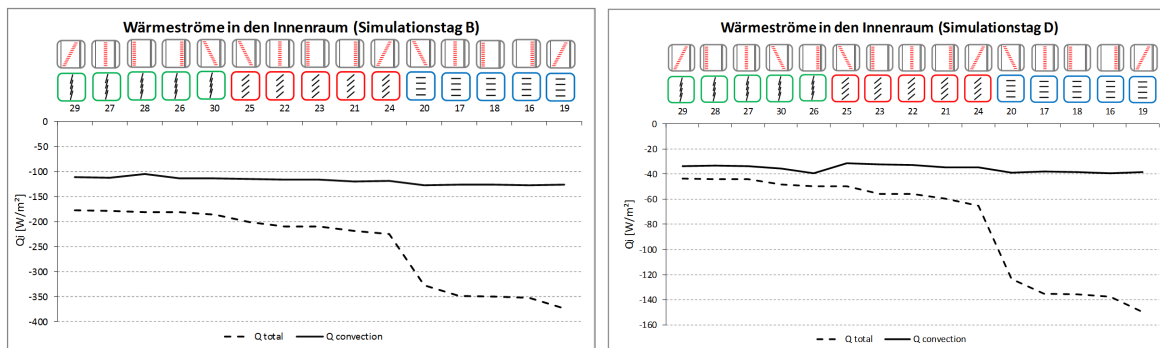


Abbildung 7.20: Energieeinträge in den Innenraum aller Pufferfassaden mit einem Fassadenelement am sonnigen Sommertag links und am sonnigen Wintertag rechts

Abbildung 7.20 können unter anderem auch die zu Beginn der Kapitel 7.1 und 7.3 aufgestellten Beziehungen zwischen den Energieeinträgen in Abhängigkeit des Öffnungswinkels der Lamelle entnommen werden. Diese sagen aus, dass der Energieeintrag umso höher ist, je „offener“ der Raffstore ist. Auch der konvektive Energieeintrag zeigt einen ähnlich ansteigenden (ansteigend, weil der Energieeintrag höher wird) Trend.

In einem nächsten Schritt werden diverse Temperaturen (gemittelte Temperaturen am Profil 1 und 2 sowie die Differenz zwischen ihnen) für alle Konfigurationen in derselben Reihenfolge in weiteren Diagrammen (Abbildung 7.21) den Energieeinträgen gegenübergestellt.

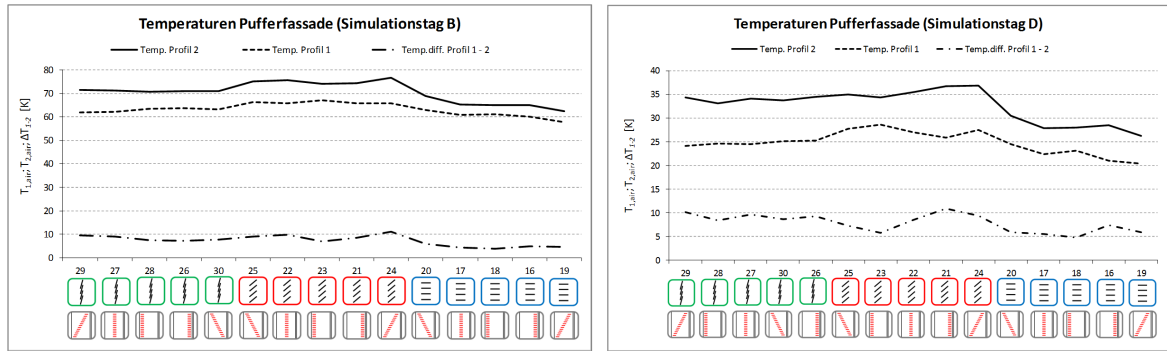


Abbildung 7.21: Lufttemperaturen an den Querschnitten 1 und 2 aller Pufferfassaden mit einem Fassadenelement am sonnigen Sommertag links und am sonnigen Wintertag rechts

Wie Abbildung 7.21 entnommen werden kann, treten bei horizontaler Lamellenstellung (Konfigurationen 16 bis 20) an beiden Simulationstagen die geringsten Lufttemperaturen auf. Geringere Lufttemperaturen haben sinngemäß auch geringere Temperaturdifferenzen zur Folge, wodurch die Strömungsgeschwindigkeiten (bzw. Ra-Zahlen) sinken. Als weitere Folge sinkender Strömungsgeschwindigkeiten kann eine weniger effektive Wärmeübertragung genannt werden. In diesen Zusammenhängen kann der Grund für den maximalen Energieeintrag in den Raum bei den Konfigurationen, welche die geringsten Lufttemperaturen aufweisen festgestellt werden. Um diese Zusammenhänge zu bestätigen, müssten bei Konfigurationen mit horizontalen Lamellen die Geschwindigkeiten an den kalten Flächen (Außenverglasung), an welchen die Wärme nach außen übertragen wird, kleiner sein als beispielsweise bei Konfigurationen mit schräger oder vertikaler Lamellenstellung. Dass diese Hypothese zutrifft, wird für beide vorliegenden Außenklimata mit je drei Konfigurationen nachgewiesen. Am sonnigen Sommertag (Tag B) werden Geschwindigkeitsverläufe am oberen Querschnitt 2 für die Konfigurationen 17, 22 und 27 validiert. Diese unterscheiden sich nur durch den Öffnungswinkel der Einzellamelle. Außerdem werden am sonnigen Wintertag (Tag D) Geschwindigkeitsverläufe der Konfigurationen 19, 24 und 29 überprüft. Auch diese weisen als einziges Unterscheidungsmerkmal verschiedene Öffnungswinkel der Lamelle auf. Die Geschwindigkeitsverläufe sind für beide Simulationstage in Abbildung 7.22 dargestellt.

Abbildung 7.22 kann entnommen werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten der Konfigurationen mit horizontalen Lamellen (17 bzw. 19 - durchgezogene Linien) an den Außenverglasungen in der Tat gegenüber den anderen beiden Strömungsgeschwindigkeiten geringere Werte aufweisen. Das heißt, die im Fassadenzwischenraum, vor allem durch Absorption am Sonnenschutz, entstehende Wärme wird weniger effektiv an die kühle Außenverglasung übertragen, wodurch sich ein höherer Energieeintrag in den Raum einstellt. Weiters deutet die am sonnigen Wintertag (rechtes Diagramm in Abbildung 7.22) nach oben gerichtete Geschwindigkeit bei der Konfiguration mit geöffneter Lamelle (durchgezogene Linie) knapp vor der Isolierverglasung darauf hin, dass die Isolierverglasung dort höhere Temperaturen als das strömende Fluid aufweist, was wiederum einen höheren Energieeintrag andeutet.

7 Parameterstudien - Ergebnisse und Diskussion

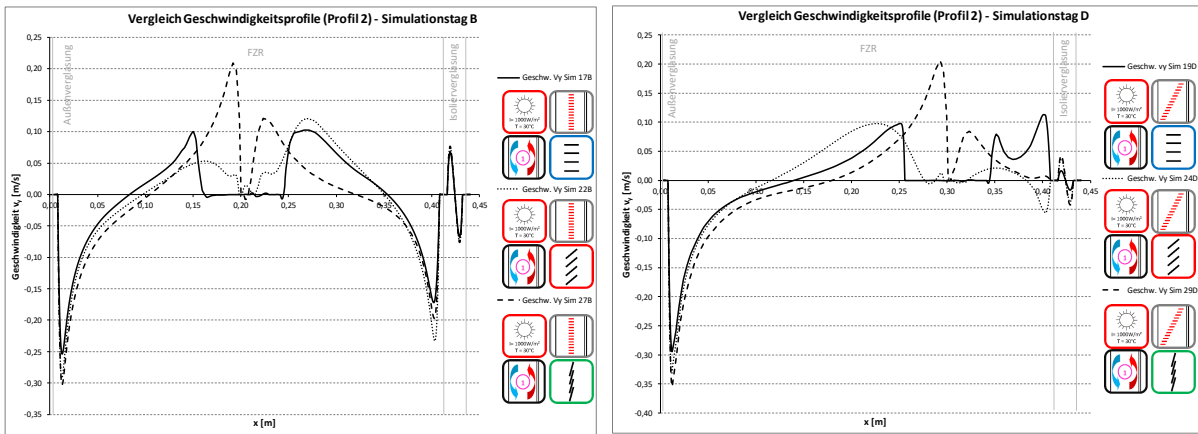


Abbildung 7.22: Geschwindigkeitsverläufe v_y (Profil 2) am sonnigen Sommertag für die Konfigurationen 17, 22 und 27 sowie am sonnigen Wintertag für die Konfigurationen 19, 24, 29

Die Strömungssituation der Konfigurationen am sonnigen Sommertag (17, 22 und 27) können den in Abbildung 7.23 dargestellten Geschwindigkeitsfeldern entnommen werden. Auch diese indizieren dass im Falle geöffneter Lamellen die Wärmeübertragung nach außen „schlechter“ funktioniert, was in den geringeren Temperaturen im FZR begründet liegt und einen höheren Energieeintrag in den Raum zur Folge hat.

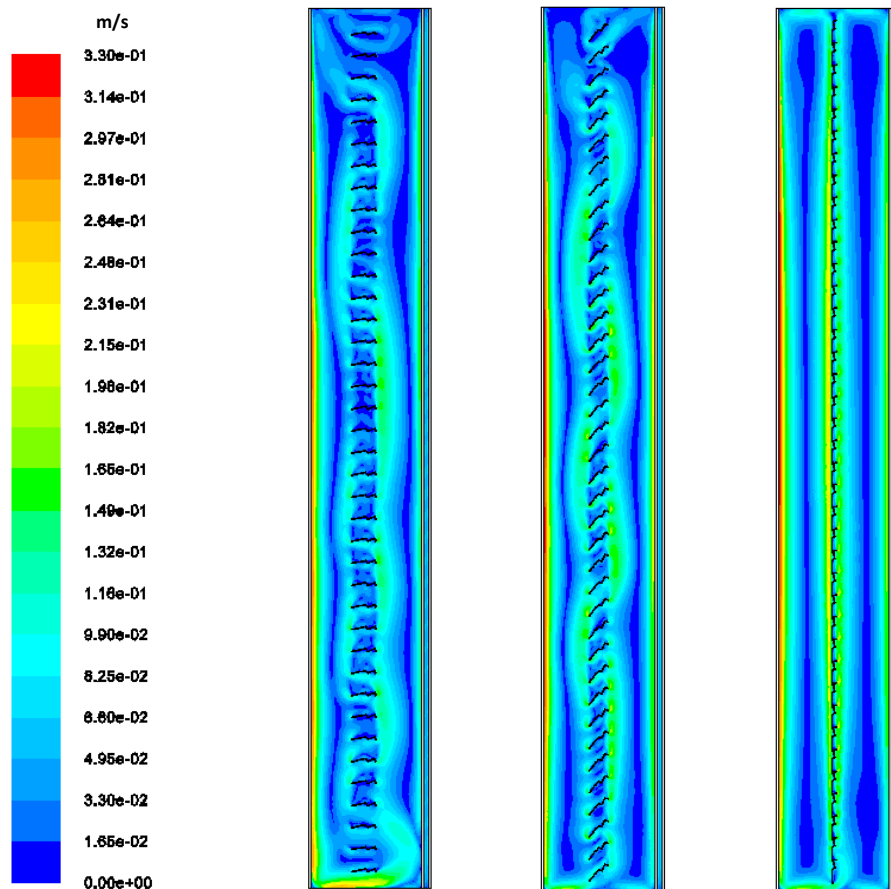


Abbildung 7.23: Geschwindigkeitsfelder am sonnigen Sommertag für die Konfigurationen 17, 22 und 27

Wenn-Dann-Beziehungen für Q_{tot} : Vorerst muss erwähnt werden, dass die Wenn-Dann-Beziehungen der Oberflächentemperaturen anhand aller Auswertungsprofile abgeleitet werden können. Jedoch muss angemerkt werden, dass die folgenden Beziehungen nicht für jede Konfiguration und jedes Außenklima ohne Einschränkung immer gültig sind. Selbstverständlich gibt es Ausnahmen, welche Gegensätzliches zu genannten Zusammenhängen aussagen, jedoch sind diese stark in der Unterzahl und es ist ein eindeutiger Trend erkennbar, welcher in diesen Beziehungen wiedergespiegelt wird.

- $T_{i,1} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die äußere Oberflächentemperatur der Außenverglasung, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,2} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die innere Oberflächentemperatur der Außenverglasung, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,3} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \uparrow$: Steigt die Temperatur der Lamelle, sinkt der Energieeintrag in den Raum.
- $T_{i,5} \uparrow \Rightarrow Q_{tot} \downarrow$: Steigt die innere Oberflächentemperatur der Isolierverglasung, steigt der Energieeintrag in den Raum.

Ein Zusammenhang zwischen der äußeren Oberflächentemperatur der Isolierverglasung und des totalen Energieeintrages ist im Falle der Pufferfassaden nicht zu erkennen.

7.4 Aktive Solarenergienutzung: Pufferfassaden

Zum letzten Auswertaspekt zählen die Ergebnisse der aktiven Solarenergienutzung bei Pufferfassaden, welche in Abbildung 7.24 dargestellt sind. Am bedeckten Sommertag werden, analog zur Funktionsweise als 2.-Haut-Fassade, kaum Temperaturerhöhungen erzielt, wodurch eine aktive Nutzung angezweifelt werden muss. Nennenswerte Temperaturanstiege ergeben sich an den strahlungsreichen Tagen, jedoch auch am bedeckten Wintertag, an welchem sich die Temperaturerhöhung im Fassadenzwischenraum jedoch zum größten Teil durch Transmissionswärmeverluste aus dem Innenraum heraus, ergibt. Zusammenhänge gewisser Parametersätze sind nicht zu erkennen und auch Konfigurationen, welche eine optimale, aktive Solarenergienutzung an mehr als einem Simulationstag gewährleisten, nicht anführbar. Unter sonnigen Außenbedingungen sind jedoch gewisse Analogien feststellbar. Zum einen sind die Unterschiede zwischen minimalem und maximalem Temperaturanstieg nahezu identisch (etwa 7 K). Zum anderen ist erkennbar, dass Konfigurationen mit horizontaler Lamellenstellung an beiden sonnigen Simulationstagen für geringere Temperaturerhöhungen im FZR sorgen. Somit sollten für eine optimale, aktive Nutzung, bei einer Wirkung als Pufferfassade, an den strahlungsreichen Tagen Konfigurationen mit halb oder ganz geschlossenen Lamellen angewandt werden. Ähnliches gilt für den Öffnungswinkel an bedeckten Wintertagen, an welchen allerdings eine weitere Einschränkung bezüglich der Anwendung lediglich geschlossener Lamellen erfolgt.

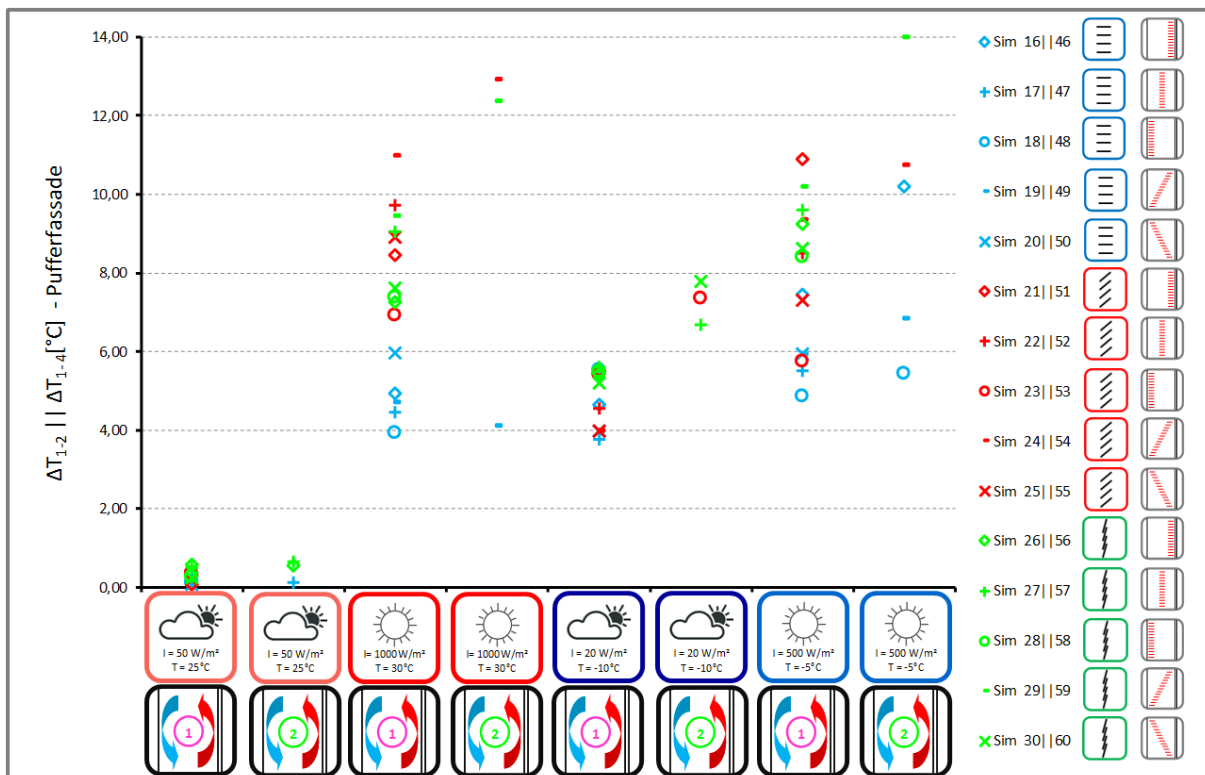


Abbildung 7.24: Aktive Solarenergienutzung ΔT_{1-2} bzw. ΔT_{1-4} aller Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade zu allen Außenklimata

Vergleicht man die Ergebnisse der aktiven Solarenergienutzung von Konfigurationen, welche als Pufferfassaden wirken, mit jenen, welche als 2.-Haut-Fassaden wirken, stellt man fest, dass vor allem an den Wintertagen im Falle der Pufferfassaden ein deutlich höherer Temperaturanstieg erzielbar ist. Jedoch muss kritisch beurteilt werden, ob eine aktive Solarenergienutzung bei Pufferfassaden überhaupt sinnvoll ist, da die hohen Massenströme nicht gezielt an fixen Stellen (wie vergleichsweise am Luftaustritt der 2.-Haut-Fassade) auftreten, sondern abhängig von der geometrischen Form und Lage der warmen Oberflächen sind. Des Weiteren muss festgehalten werden, dass im Falle von 2.-Haut-Fassade viel höhere Massenströme erzielbar sind. Aus Sicht des Verfassers ist aus diesen Gründen zum jetzigen Zeitpunkt die aktive Solarenergienutzung mittels 2.-Haut-Fassaden deutlich über jene von Pufferfassaden zu stellen.

7.4.1 Bestkonfigurationen

Für die aktive Solarenergienutzung erfolgt keine separate Bewertung zu verschiedenen Außenbedingungen. Es wird immer ein maximaler Temperaturanstieg angestrebt, um die aktive Nutzung zu optimieren. Wie unter anderem in Abbildung 7.24 erkenntlich und auch schon im vorangegangenen Absatz festgestellt wurde, kann keine Fassadenkonfiguration an mehr als einer Außenbedingung die positiven Extremwerte, also den maximalen Temperaturanstieg, erzielen. Es kann jedoch festgestellt werden, dass zur Optimierung der aktiven Solarenergienutzung mit Pufferfassaden in jedem Fall eine halb- oder vollkommen geschlossene Lamellenstellung angestrebt werden sollte. Des Weiteren kann erkannt werden, dass zu sonnigen Außenbedingungen doch gewisse Positionen des Sonnenschutzes gegenüber anderen zu bevorzugen sind. Daraus folgend können für strahlungsreiche (ersten beiden Zeilen) und bedeckte, winterliche Außenbedingungen (letzte Zeile) folgende Empfehlungen (mit Bedacht) angegeben werden (siehe Abbildung 7.25):

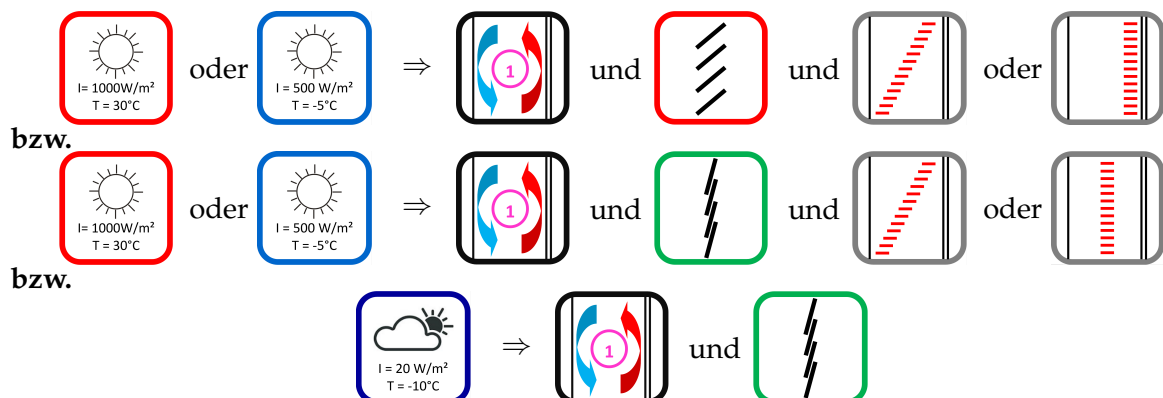


Abbildung 7.25: Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur aktiven Solarenergienutzung an Sommertagen bzw. am bedeckten Wintertag

In Abbildung 7.26 sind für alle vier Außenklimata die Temperaturfelder der jeweiligen Bestkonfiguration dargestellt. Dabei ist das Temperaturfeld der Bestkonfiguration an Simulationstag A nur der Vollständigkeit halber angegeben. Dem Colour-Plot kann unter Beachtung der Temperaturskalierung nämlich entnommen werden, dass der Temperaturanstieg in der Tat nur sehr gering ist. Anhand der Konfigurationen der sonnigen Simulationstage ist die Erwärmung der Lufttemperatur in unmittelbarer Umgebung der Lamelle gut erkennbar, während am bedeckten Wintertag die Lufttemperatur von der Lamelle unbeeinflusst bleibt und lediglich durch Transmission von Wärme aus dem Raum erwärmt wird. Außerdem können anhand der „welligen“ Temperaturschichtungen beispielsweise bei Konfiguration 21 (in Abbildung 7.26 ganz rechts dargestellt) die auftretenden Konvektionsströmungen und damit das Geschwindigkeitsfeld erahnt werden.

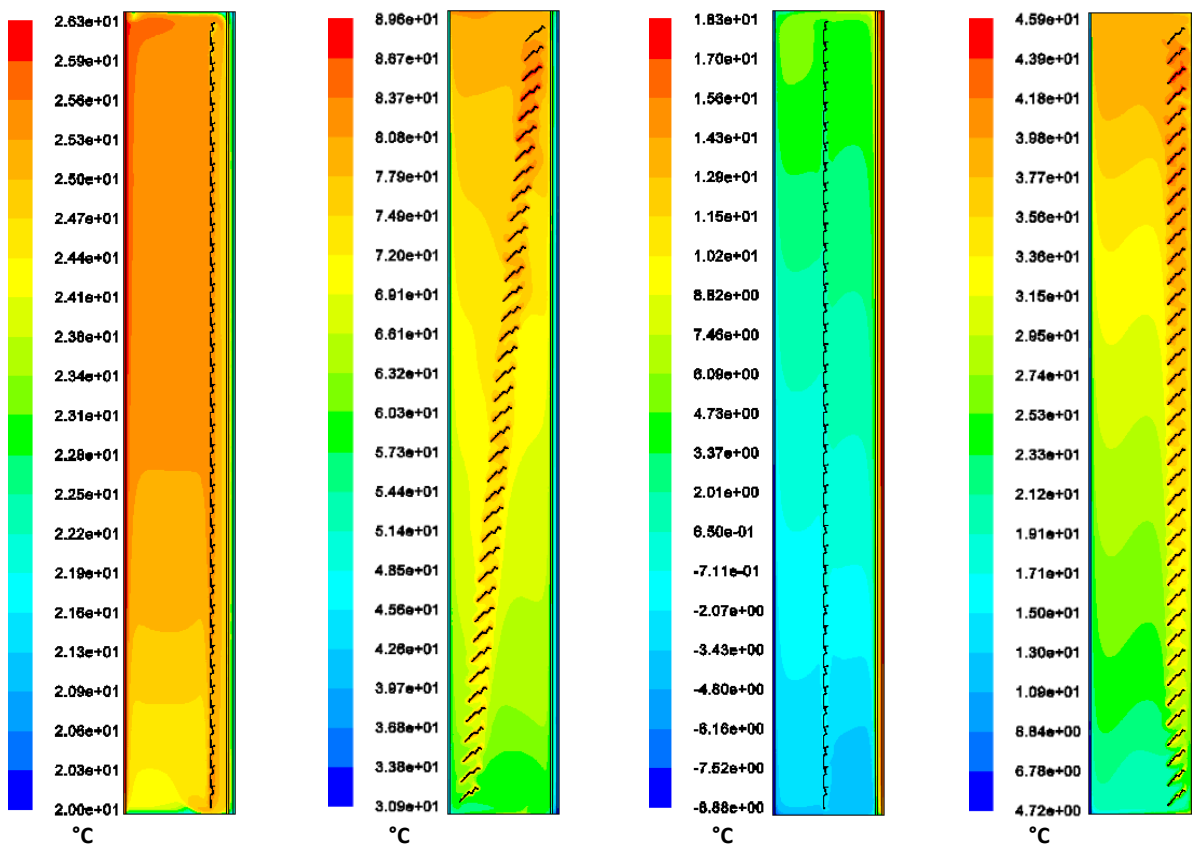


Abbildung 7.26: Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Konfig. 26, sonniger Sommertag Konfig. 24, bedeckter Wintertag Konfig. 27, sonniger Wintertag Konfig. 21

7.4.2 Beeinflussung durch zweites Fassadenelement

In Abbildung 7.24 sind pro Außenklima die Temperaturdifferenzen ΔT_{1-2} zwischen den Profilen 1 und 2 für Konfigurationen, welche lediglich aus einem Fassadenelement bestehen sowie ΔT_{1-4} zwischen den Profilen 1 und 4 für alle Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen, dargestellt. Im vorliegenden Kapitel wird darauf eingegangen, welcher Zusammenhang infolge der Vergrößerung der Fassadenhöhe zwischen diesen beiden Parametern besteht.

Mit Ausnahme des bedeckten Sommertages ergibt sich stets eine Erhöhung der Temperaturdifferenz und damit eine Verbesserung der aktiven Solarenergienutzung, wenn die Fassadenhöhen vergrößert werden. Das heißt, am strahlungsarmen Sommertag (Tag A) kann durch die Erweiterung der Fassade um ein weiteres Element keine Verbesserung der aktiven Solarenergienutzung erzielt werden, wodurch eine effiziente aktive Nutzung zu solchen außenklimatischen Bedingungen ausgeschlossen werden kann. Eine weitere Ausnahme stellt außerdem am sonnigen Sommertag die Konfiguration 49 dar, welche im Vergleich zur selbigen Konfiguration bei einem Element (Konfiguration 19) eine Reduktion der Temperaturdifferenz und dadurch eine Verschlechterung der aktiven Solarenergienutzung aufweist. Die größte Erhöhung der Temperaturdifferenz kann im Falle der Konfiguration mit geschlossenen Lamellen, welche sich schräg im FZR unten nahe an der Außenverglasung und oben nahe an der Isolierverglasung (Konfiguration 29 \rightarrow 59) befinden, erzielt werden (siehe auch Abbildung 7.27). Diese maximale Erhöhung der Temperaturdifferenz beträgt sowohl am sonnigen Sommertag als auch am sonnigen Wintertag etwa 4 K und liegt somit unter dem Potenzial zur Temperatursteigerung von 2.-Haut-Fassaden, bei denen eine maximale Veränderung der Temperaturdifferenz von etwa 7 K erzielt werden kann. Auch dieser Aspekt spricht wiederum dafür, dass die aktive Solarenergienutzung wohl eher auf die Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade beschränkt ist.

In Abbildung 7.27 sind diverse Grafiken für die beiden Konfigurationen 29 und 59, welche am sonnigen Wintertag den maximalen Anstieg der Temperaturdifferenz von ΔT_{1-2} auf ΔT_{1-4} offenbaren, dargestellt. Hier ist anhand der Temperaturfelder erkennbar, dass die Temperaturdifferenz zwischen den Querschnitten 1 und 4 im Falle der Konfiguration zweier Elemente höher ist als jene Differenz zwischen den Profilen 1 und 2 im Falle der Konfiguration mit einem Fassadenelement. Dass diese Erhöhung der Temperaturdifferenz vor allem an der hohen Temperatur am oberen Profil 4 des oberen Elementes (strichlierte Linie) liegt, kann auch den Temperaturverläufen im Diagramm rechts unten entnommen werden. An dieser Stelle ist die Lufttemperatur etwa 3 K höher als jene am Profil 2 des alleine wirkenden Fassadenelementes (punktierte Linie). Darüber hinaus können der Abbildung 7.27 Geschwindigkeitsfelder und -verläufe beider Fassadenkonfigurationen entnommen werden, welche gewiss einen starken Einfluss auf das Temperaturfeld aufweisen.

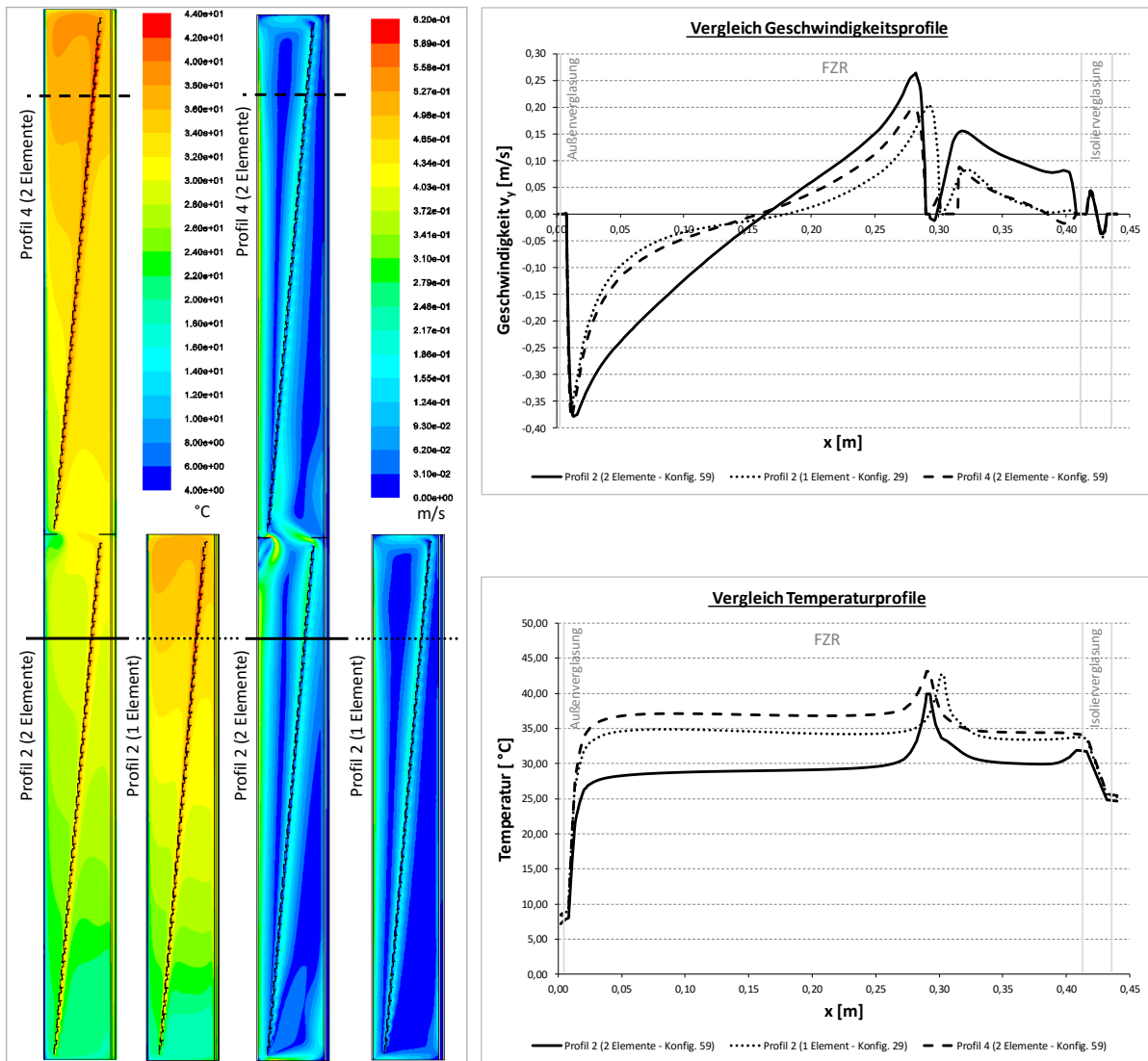


Abbildung 7.27: Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (links) am sonnigen Wintertag der Konfigurationen 59 (zwei Elemente) und 29 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen

7.5 Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung

Um einen schnellen Überblick darüber zu erhalten, wie effizient solare Energie sowohl passiv als auch aktiv mit derselben Fassadenkonfiguration genutzt werden kann, werden im Folgenden Diagramme erstellt, welche diese Zusammenhänge übersichtlich darstellen. Die Diagramme weisen dabei einen formal ähnlichen Aufbau zu den zuvor dargestellten Diagramme zur Hauptauswertung der Simulationsergebnisse auf. Auf der primären Ordinate (links) können Ergebnisse der passiven Solarenergienutzung Q_{tot} abgelesen werden. Die sekundäre Ordinate (rechts) gibt hingegen das Potenzial der jeweiligen Fassadenkonfiguration zur aktiven Solarenergienutzung ΔT_{1-2} an. Die Ergebnisse hinsichtlich passiver und aktiver Nutzung werden dabei pro Außenklima in benachbarten Spalten dargestellt. Die obere (sekundäre) Abszisse gibt dabei an, ob es sich bei Ergebnissen in der jeweiligen Spalte um Ergebnisse hinsichtlich der passiven oder aktiven Solarenergienutzung handelt. Die dargestellten Pfeile zeigen, welche Ordinate zur Auswertung der Ergebnisse herangezogen werden muss. Die untere (primäre) Abszisse muss für jedes vorliegende Außenklima zwei Spalten (eine mit Ergebnissen der passiven die andere mit Ergebnissen der aktiven Nutzung) aufweisen. Die Gegenüberstellung in den Abbildungen 7.28 und 7.29 werden dabei nur für Fassadenkonfigurationen mit der Höhe eines Fassadenelementes durchgeführt. Dies kann auch den dargestellten Legenden entnommen werden, in welchen die Nummerierung der in Kapitel 5.5 vorgestellten Variantenmatrix angewandt wird. In dieser stellen die Simulationen 1 bis 15 Konfigurationen mit einem Fassadenelement als 2.-Haut-Fassade und die Simulationen 16 bis 30 Konfigurationen als wirkende Pufferfassade dar.

7.5.1 2.-Haut-Fassade

Von einer Gegenüberstellung an den bedeckten Simulationstagen wird bewusst abgesehen, da die Ergebnisse vor allem hinsichtlich der passiven Solarenergienutzung sehr geringe Spreizungen zwischen den beiden Extremwerten aufweisen. Am bedeckten Sommertag weisen darüber hinaus auch die Ergebnisse der aktiven Solarenergienutzung eine sehr geringe Abweichung zwischen minimalem und maximalem Temperaturanstieg auf. Aussagekräftige Gegenüberstellungen sind aus diesen Gründen und der Unsicherheit der Ergebnisse an diesen beiden Simulationstagen nicht sinnvoll. Dieser Ansatz wird auch für Pufferfassaden verfolgt.

Liegen sonnige Außenbedingungen vor, können jedoch aufschlussreiche Gegenüberstellungen vollzogen werden. Es werden dabei immer die positiven Extrema eines Auswertungsparameters aller Konfigurationen (Q_{tot} oder ΔT_{1-2}) dem mit derselben Konfiguration erzielten Ergebnis des anderen Auswertungsparameters gegenübergestellt. Durchgezogene Pfeile deuten

darauf hin, dass beide Aspekte mit vorliegender Konfiguration positive Ergebnisse aufweisen. Strichlierte Pfeile hingegen bedeuten, dass einer der beiden Aspekte mit vorliegender Fassadenkonfiguration keine erstrebenswerten Ergebnisse liefert.

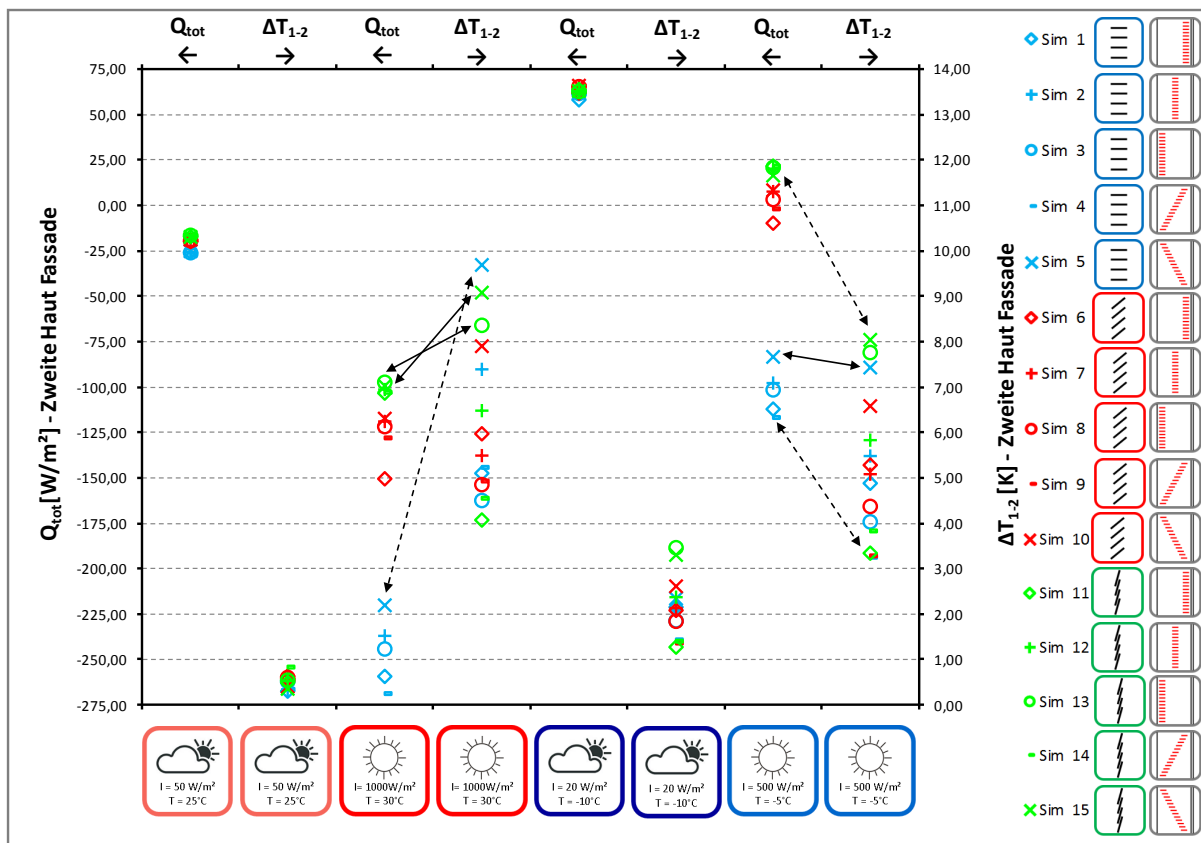


Abbildung 7.28: Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung aller 2.-Haut-Fassaden zu allen Außenklimata

Am sonnigen Sommertag, an welchem der Energieeintrag in den Raum möglichst gering sein sollte (d.h. die Absolutwerte von Q_{tot} möglichst klein), kann hinsichtlich der passiven Nutzung mit Konfiguration 13 das beste Ergebnis erzielt werden. Auch die aktive Nutzung ist mit jener Konfiguration sehr positiv zu bewerten, weshalb die Gegenüberstellung positiv bewertet wird (durchgezogener Pfeil). Gegenteiliges gilt für die Konfiguration, welche an diesem Simulationstag den höchsten Temperaturanstieg, also die beste aktive Nutzung, erzielt (Konfiguration 5). Da diese einen sehr hohen Energieeintrag zur Folge hat, welcher im Sommer unerwünscht ist, muss die gleichzeitige aktive und passive Nutzung mit dieser Konfiguration negativ bewertet werden (strichlierte Linie). Eine weitere, relevante Konfiguration ist Konfiguration 15, welche sowohl aktive als auch passive Solarenergienutzung sehr gut erfüllen kann.

Betrachtet man den strahlungsreichen Wintertag, an welchem ein hoher Grad an passiver Solarenergienutzung erstrebenswert ist, kann festgestellt werden, dass Konfiguration 4, welche die höchsten Einträge hervorbringt, hinsichtlich der aktiven Solarenergienutzung negative

Ergebnisse aufweist. Ähnliches gilt für Konfiguration 15, welche optimale aktive Nutzung voraussetzt, jedoch sogar Wärmeverluste (Q_{tot} weist positives Vorzeichen auf) erzielt. Daher müssen beide Gegenüberstellungen negativ beurteilt werden (strichlierte Pfeile). Die einzige Konfiguration, welche eine positive Gegenüberstellung durch passable Ergebnisse beider Parameter erzielt, stellt Konfiguration 5 dar.

7.5.2 Pufferfassade

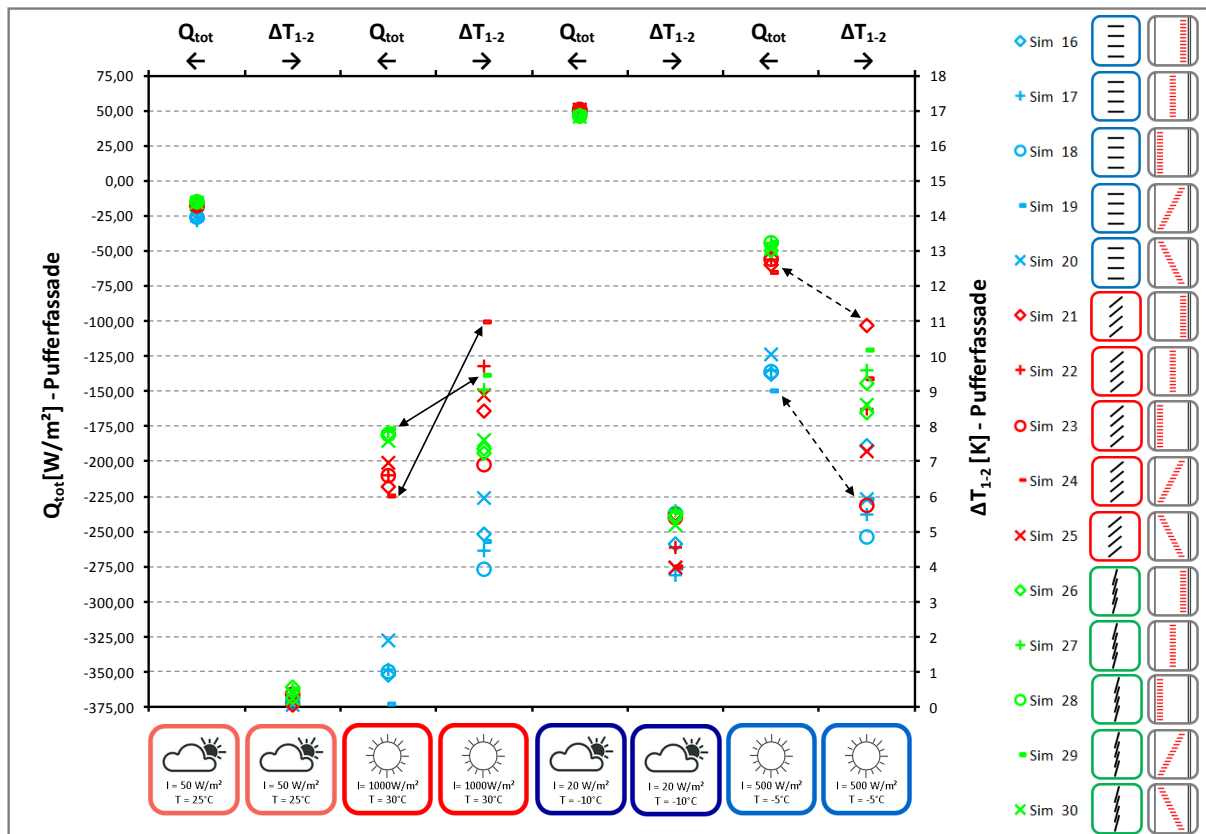


Abbildung 7.29: Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung aller Pufferfassaden zu allen Außenklimata

Am sonnigen Sommertag kann durch die Extremwertbetrachtung beider Parameter erkannt werden, dass stets positiv zu bewertende Gegenüberstellungen vorliegen. Nimmt der Energieeintrag Q_{tot} minimale Absolutwerte an, ist auch die aktive Nutzung sehr gut bewertbar (Konfiguration 29). Der höchste Temperaturanstieg ist mittels Konfiguration 24 erzielbar, welche auch passable Ergebnisse hinsichtlich des nicht erwünschten Energieeintrages liefert.

Positive Gegenüberstellungen von Pufferfassaden am strahlungsreichen Wintertag sind keine zu erkennen. Konfigurationen, welche hohe Energieeinträge erzielen, die passive Nutzung also gut erfüllen, liefern schlechte Ergebnisse für die aktive Solarenergienutzung (z.B. Konfiguration 19). Liegt hoher Temperaturanstieg, also die Voraussetzung für eine gute aktive Nutzung vor, so können kaum Energieeinträge erzielt werden (z.B. Konfiguration 21).

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren stark entwickelten adaptiven Fassadensysteme, welche ihre Eigenschaften dynamisch an variierende Außenbedingungen und Nutzeranforderungen anpassen können, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Simulation von Luftströmungen und Wärmeübertragung innerhalb eines adaptiven Fassadenelements. Konkret wurden Parameterstudien mit dem Ziel der Verifizierung von Bestkonfigurationen für alle dynamischen Parameter der Fassade pro unterschiedlich definierten Außenklima durchgeführt. Eine Beurteilung zur Bestimmung der Bestkonfigurationen erfolgte anhand zweierlei Parameter, welche zum einen eine aktive und zum anderen eine passive Solarenergienutzung repräsentieren.

Einführend wurden in der Arbeit theoretische Grundlagen zu klimaadaptiven Fassaden aufbereitet. Außerdem war es notwendig theoretische Grundlagen im Bereich der Doppelfassade zu beleuchten und analysieren. Bedeutung kommt in der vorliegenden Arbeit den Grundlagen der numerischen Strömungssimulation zu, da ein fundiertes Grundlagenwissen erforderlich ist, um CFD-Simulationen durchführen zu können. Besonderer Fokus wird hierbei auf zugrundeliegende Gleichungen, welche die physikalischen Effekte abbilden sowie auf die Finite-Volume-Methode gelegt.

Die Parameterstudien, welche den Hauptteil dieser Arbeit darstellen werden nach der Aufbereitung der theoretischen Grundlagen durchgeführt. Das adaptive Fassadenelement wird als idealisiert bezeichnet, weil für einige ihrer adaptiven Parameter noch keine bautechnischen Umsetzungen existent sind. Dazu zählen zum Beispiel schließbare Öffnungen im vertikalen Elementrahmen, welche es ermöglichen die Höhe, über welche thermische Konvektionsströmungen erfolgen (ein Fassadenelement, zwei Fassadenelemente, etc.) dynamisch einzustellen. Ein weiterer adaptiver Parameter, dessen zunächst nicht existierende bautechnische Umsetzung dazu führt das Element als idealisiert zu bezeichnen, war die Anpassung der Position des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum. Für die Anpassung der fünf betrachteten Positionen (nahe an Isolierverglasung, mittig im Fassadenzwischenraum, nahe an Außenverglasung, schräg im FZR unten nahe an der Außenverglasung - oben nahe an der Isolierverglasung, schräg im FZR - unten nahe an der Isolierverglasung oben nahe an der Außenverglasung)

kann eine bautechnische Lösung durchaus als umsetzbar bewertet werden. Weitere veränderbare Parameter der Parameterstudien sind der Öffnungswinkel der Einzellamelle sowie die Wirkungsweise der Fassade als 2.-Haut- oder Pufferfassade. Um den Einfluss variierender Außenbedingungen zwischen Sommer- und Wintermonaten abzubilden, basieren die Parameterstudien auf vier verschiedenen Außenklimata: Je ein strahlungsreicher- (sonniger) und ein strahlungsarmer (bedeckter) Winter- sowie Sommertag sind als Außenklima für alle Fassadenkonfigurationen modelliert.

Die Auswertung zeigt, dass an Wintertagen, an welchen eine passive Solarenergienutzung erstrebenswert (das heißt die Energieeinträge in den Raum hoch bzw. die Energieverluste niedrig sein sollen) ist, Konfigurationen, in welchen sich der Sonnenschutz nahe an der Isolierverglasung oder schräg im FZR (unten nahe an der Außenverglasung - oben nahe an der Isolierverglasung) befindet und geöffnete, horizontale Lamellen aufweist, die besten Ergebnisse liefern. Diese Erkenntnisse, sowie die Tatsache, dass eine weitere Optimierung (Steigerung) des totalen Energieeintrags durch einen abgeschlossenen Fassadenzwischenraum (Pufferfassade) erreicht werden kann, entspricht der Erwartungshaltung. An Sommertagen hingegen, an welchen passive Solareinträge so gut wie möglich reduziert werden sollten, erzielen Konfigurationen, in welchen der Sonnenschutz nahe an der Außenverglasung oder schräg im FZR (unten nahe an der Isolierverglasung - oben nahe an der Außenverglasung) angeordnet ist und deren Lamellen vertikal, geschlossen sind, die geeignetsten Ergebnisse. Auch diese - im Vergleich zu den Wintertagen entgegengesetzten Konfigurationen entsprechen der Erwartungshaltung. Die Gegenüberstellung von Ergebnissen des totalen Energieeintrages, welche in Form von Wärmestromdichten vorliegen, von Konfigurationen mit einem Fassadenelement mit jenen von zwei Fassadenelementen zeigt keine nennenswerte Unterscheidung. Daher kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass im Falle jener Konfigurationen, welche zwei Fassadenelemente beinhalten, die höheren Lufttemperaturen im Fassadenzwischenraum durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten effektiver abgeführt werden.

Bezüglich der aktiven Solarenergienutzung, das heißt der maximal erzielbaren Temperaturerhöhung im Fassadenzwischenraum sind eindeutige Zusammenhänge zum Öffnungswinkel der Einzellamelle nicht mehr erkennbar. Jedoch können im Falle der 2.-Haut-Fassade eindeutige Empfehlungen für die Fassadenkonfigurationen, welche die besten Ergebnisse für die aktive Solarenergienutzung erzielen, ausgesprochen werden. Hierbei handelt es sich stets um jene Konfigurationen, in welchen der Sonnenschutz schräg im FZR (unten nahe an der Isolierverglasung - oben nahe an der Außenverglasung), unabhängig vom Öffnungswinkel der Lamelle, angeordnet ist. Ebenfalls erzielen geschlossene, vertikale Lamellen nahe an der Außenverglasung an drei von vier Simulationstagen sehr gute Ergebnisse für die aktive Solarenergienutzung. Fungiert die Fassade als Pufferfassade, war vor allem an den Klimata mit hoher solarer Belastung erkennbar, dass Konfigurationen mit halb- oder vollkommen geschlos-

senen Lamellen, welche sich schräg im FZR (unten nahe an der Außenverglasung - oben nahe an der Isolierverglasung) befinden, gute Ergebnisse erzielen. Aktive Solarenergienutzung muss im Falle von Pufferfassaden jedoch stets kritisch bewertet werden, da Massenströme in ihrer Amplitude ständig geringer sind als im Falle der 2.-Haut-Fassade und in ihrer Lage innerhalb des Fassadenzwischenraums stark variieren. Die aktive Solarenergienutzung kann durch die Anordnung eines zweiten Fassadenelements stets verbessert werden.

Optimale passive und aktive Solarenergienutzung mithilfe derselben Fassadenkonfiguration kann nur am strahlungsreichen Sommertag erzielt werden.

8.2 Ausblick

Die numerische Modellierung des Fassadenelements ist mit einigen Unsicherheitsfaktoren behaftet. Außerdem stellen numerische Lösungen ohnedies Näherungslösungen dar. Daraus folgend müssen die Simulationsergebnisse validiert werden. Da aufgrund der komplexen Strömungscharakteristiken die Ergebnisse nicht mittels analytischen Handrechnungen kontrolliert werden können, muss eine experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse unwiderruflich als weiterer Forschungsbedarf angestrebt werden. Ob diese experimentelle Ermittlung an maßstäblichen Fassadenprüfständen oder an verkleinerten Versuchen durchführbar ist, sollte aus Ergebnissen weiterer Forschungsarbeit hervorgehen.

Als weiterer Forschungsbedarf muss außerdem die Implementierung der CFD-Ergebnisse in Gebäudesimulationssoftware angesehen werden. Der Grund hierfür liegt vor allem darin, dass bisherige Betrachtungen nur auf Komponenten-Ebene erfolgten und Effekte wie Nutzerverhalten, interne Wärmequellen, Gebäudebauweise (speicherwirksame Masse) uvm. nicht berücksichtigt wurden. Diese Effekte werden mithilfe von Simulationen auf Gebäude-Ebene sehr wohl berücksichtigt. Erst dann kann beurteilt werden, ob tatsächlich Potenziale zur Einsparung von Heiz- aber auch Kühlenergie vorhanden sind.

Die aktive Solarenergienutzung in jener Form, dass die im Fassadenzwischenraum entstehende Wärme durch eine geeignete Komponente übertragen und anderweitig genutzt werden kann, stellt in vorliegender Arbeit lediglich eine Hypothese dar. Auch hierfür kann weiterer Forschungsbedarf ausgemacht werden, indem Analysen erfolgen, welche erörtern, inwiefern eine solche Nutzung tatsächlich realisierbar beziehungsweise auch sinnvoll ist.

Zu guter Letzt jedoch auch nur dann, wenn vielversprechende Ergebnisse durch Gebäudesimulationen und auch durch die Auslegung der Wärme übertragenden Komponenten zur aktiven Solarenergienutzung erzielt werden können, müssen detaillierte, bautechnische Umsetzungsmöglichkeiten des Fassadenelementes erarbeitet werden.

Literatur

Bücher, Konferenzpaper, Zeitschriften, Hochschulschriften

- [1] Ansys Inc. *ANSYS Fluent Getting Started Guide: Release 16.2.0.* 2015.
- [2] Ansys Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide: Release 16.2.0.* 2015.
- [3] Ansys Inc. *ANSYS Fluent User's Guide: Release 16.2.0.* 2015.
- [5] Baldinelli G. »Double skin facades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading device«. In: *Building and Environment* (2009), S. 1107–1118. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308001935>.
- [6] Barbosa S., Ip K., Southall R. »Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin facade under tropical climate conditions: The influence of key design parameters«. In: *Energy and Buildings* 2015.109 (2015), S. 397–406. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778815303418/1-s2.0-S0378778815303418-main.pdf?_tid=84d02376-58f8-11e6-9fa0-0000aacb35e&acdnat=1470173688_eec6acf5ddc6636e0405dce7453036b5.
- [7] Ip K. Barbosa S. »Perspectives of double skin facades for naturally ventilated buildings: A review«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014.40 (2014), S. 1019–1029. URL: http://ac.els-cdn.com/S1364032114006443/1-s2.0-S1364032114006443-main.pdf?_tid=9964d180-58e2-11e6-95aa-0000aab0f27&acdnat=1470164274_c545c14fc7a06d00043ae49396865069.
- [8] Brandl T., Spinnler M., Sattelmayer T. »Numerische Simulation der Luftströmungen und des thermischen Verhaltens von Glasdoppelfassaden«. In: S. 7–9. URL: http://www.ibpsa.org/?page_id=141.
- [9] Braun D. H. *Bionisch inspirierte Gebäudehüllen: Konzeption einer Bionisch inspirierter Gebäudehülle nach dem Vorbild natürlicher Hüllen und Häute: zugl. Dissertation an der Universität Stuttgart.* 2008.
- [10] Bremer P. Brüggemann H. *Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM.* 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, 2015.

- [11] Ding W., Hasemi Y., Yamada T. »Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney«. In: *Energy and Buildings* 2005.37 (2005), S. 411–418. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778804002452/1-s2.0-S0378778804002452-main.pdf?_tid=e9e06464-58f9-11e6-a186-0000aacb35f&acdnat=1470174287_693520c73ce9bd64bd0e17a30eeeb079.
- [15] Ferziger J. H., Peric M. *Numerische Strömungsmechanik*. Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [16] Fischer H.-M., Freymuth H., Häupl P., Homann M., Jenisch R., Richter E., Stohrer M. *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [17] Fouad N. A., Richter T. *Leitfaden Thermografie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 2006.
- [18] Gosztonyi S., Gruber P., Judex F., Brychta M., Richter S. *BioSkin - Forschungspotenziale für bionisch inspirierte energieeffiziente Fassadentechnologien*. Wien, 2013. URL: <https://n.achhaltigwirtschaften.at/de/hdz/projekte/bioskin-forschungspotenziale-fuer-bionisch-inspirierte-energieeffiziente-fassadentechnologien.php>.
- [19] Gratia E., de Herde A. »Greenhouse effects in double-skin facade«. In: *Energy and Buildings* 2007.39 (2007), S. 199–211. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778806001836/1-s2.0-S0378778806001836-main.pdf?_tid=fc6b4308-592e-11e6-bf1a-0000aacb362&acdnat=1470197082_51c505f82950051bbf07acaff4e16872.
- [20] Gratia E., de Herde A. »Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade?«. In: *Building and Environment* 2004.39 (2004), S. 399–409. URL: http://ac.els-cdn.com/S0360132303002592/1-s2.0-S0360132303002592-main.pdf?_tid=e7902aa2-5933-11e6-b5c0-0000aacb361&acdnat=1470199194_64ab096a6df0833ed111a61e98ad0484.
- [21] Gratia E., de Herde A. »The most effective position of shading devices in a double-skin facade«. In: *Energy and Buildings* 2007.39 (2007), S. 364–373. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778806002106/1-s2.0-S0378778806002106-main.pdf?_tid=02af0b2a-58f6-11e6-a211-0000aab0f01&acdnat=1470172611_3f04fded892f5ea49bac6061a466819a.
- [22] Haase M., Marques da Silva F., Amato A. »Simulation of ventilated facades in hot and humid climates«. In: *Energy and Buildings* 2009.41 (2009), S. 361–373. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778808002363/1-s2.0-S0378778808002363-main.pdf?_tid=06168910-56fc-11e6-8e89-0000aab0f01&acdnat=1469955291_38f45243689d831faec3767ba247335d.
- [24] Hausladen G., Liedl P., Saldanha M. *Klimagerecht bauen: ein Handbuch*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2012.

- [25] Hausladen G., Saldanha M., Nowak W., Liedl P. *Einführung in die Bauklimatik: Klima- und Energiekonzepte für Gebäude*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2003.
- [26] Hazem A., Ameghchouche M., Bougriou C. »A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades«. In: *Energy and Buildings* 102 (2015), S. 225–236. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778815004247/1-s2.0-S0378778815004247-main.pdf?_tid=5ddb41c6-2bbf-11e6-ba59-00000aab0f02&acdnat=1465201339_f800fef0518a27f8a83f7d602e58a573.
- [28] Hermann E. M., Krammer M., Sturm J., Wartzeck S. *Umhüllen und Konstruieren: Wände, Fassade, Dach*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2015.
- [29] Herzog T., Krippner R., Lang W. *Fassaden-Atlas*. Birkhäuser Verlag, 2004.
- [31] Hoseggen R., Wachenfeldt B.J., Hanssen S.O. »Building simulations as an assisting tool in decision making: Case study: With or without a double-skin facade?« In: *Energy and Buildings* 2008.40 (2008), S. 821–827. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778807001740/1-s2.0-S0378778807001740-main.pdf?_tid=c022c4b8-580f-11e6-8fba-00000aab0f6c&acdnat=1470073715_e416b9bd4da30a2381c6a24466ad73ea.
- [32] Iyi D., Hasan R., Penlington R., Underwood C. »Double skin facade: Modelling technique and influence of venetian blinds on the airflow and heat transfer«. In: *Applied Thermal Engineering* 71 (2014), S. 219–229. URL: http://ac.els-cdn.com/S1359431114005043/1-s2.0-S1359431114005043-main.pdf?_tid=6db30400-2bbd-11e6-a8fb-00000aab0f01&acdnat=1465200507_f74c3adc981d4d75b182235c7bd4f10e.
- [33] Ji Y., Cook M. J., Hanby V. I., Infield D. G., Loveday D. L., Mei L., Hrsg. *CFD modelling of Double-skin facades with venetian blind*. 2007. URL: http://usir.salford.ac.uk/15842/1/BS2007_Beijing.pdf.
- [35] Keonho L. *Untersuchungen zur Einsatzmöglichkeit von Doppelfassaden bei hohen Verwaltungsbauten mit Glasfassaden in extremgemäßigten Klimagebiet: Zugl. Dissertation an der TU Berlin*. 2002.
- [37] Knaack U., Klein T., Bilow M., Auer T. *Fassaden: Prinzipien der Konstruktion*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2007.
- [38] Laurien E., Oertel H. jr. *Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [39] Lecheler S. *Numerische Strömungsberechnung: Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, 2014.
- [40] Loonen R. *Climate Adaptive Building Shells: What can we simulate? Zugl. Master Thesis an der Technischen Universität Eindhoven*. 2010.

- [41] Loonen R., Trcka M., Hensen J. »Climate adaptive building shells: State-of-the art and future challenges«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013.25 (), S. 483–493. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002670>.
- [43] Nitsche K. Marek R. *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben*. 4. Auflage. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [44] Pohl G. Nachtigall W. *Bau-Bionik: Natur, Analogien, Technik*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [45] Oertel H. jr., Böhle M., Reviol T. *Strömungsmechanik: für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 7. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag, 2015.
- [46] Oesterle E. *Doppelschalige Fassaden: ganzheitliche Planung; Konstruktion, Bauphysik, Auerophysik, Raumkonditionierung, Wirtschaftlichkeit*. München: Callwey Verlag, 1999.
- [48] Pasut W., De Carli M. »Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin facade«. In: *Applied Thermal Engineering* 37 (2012), S. 267–274. URL: http://ac.els-cdn.com/S1359431111006569/1-s2.0-S1359431111006569-main.pdf?_tid=dbb4f20a-2bbe-11e6-b6f1-00000aacb35d&acdnat=1465201121_b569ced65cce21f0a9a3b1d35f121612.
- [49] Perez-Grande I., Meseguer J., Alonso G. »Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades«. In: *Applied Thermal Engineering* 2005.25 (2005), S. 3163–3175. URL: http://ac.els-cdn.com/S1359431105001134/1-s2.0-S1359431105001134-main.pdf?_tid=a7944c88-58ef-11e6-896b-00000aab0f27&acdnat=1470169881_beb689480b7d1909363914e4608617bf.
- [50] Pomoponi F., Piroozfar P.A.E., Southall R., Ashton P., Farr E.R.P. »Energy performance of Double-Skin Facades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016.54 (2016), S. 1525–1536. URL: http://ac.els-cdn.com/S1364032115011545/1-s2.0-S1364032115011545-main.pdf?_tid=f1e997e8-56fb-11e6-a5e5-00000aacb35e&acdnat=1469955257_851ea1d1cb5a199dcc65c9584c37813e.
- [51] Radhi H., Sharples S., Fikiry F. »Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings«. In: *Energy and Buildings* 2013.56 (2013), S. 179–188. URL: http://ac.els-cdn.com/S0378778812004343/1-s2.0-S0378778812004343-main.pdf?_tid=4261bdfc-58e8-11e6-b3ca-00000aab0f6b&acdnat=1470166705_85c2fde73a4f9b15c4c7f217162fdaae.
- [54] Schwarze R. *CFD - Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2013.

- [55] Torres M., Alavedra P., Guzman A., Cuerva E., Planas C., Clemente R., Escalona V. »Double skin facades - Cavity and exterior opening dimensions for saving energy on mediterranean climate«. In: *Building Simulation*. Bd. 2007, S. 198–205. URL: https://www.researchgate.net/publication/237517058_DOUBLE_SKIN_FACADES_-_CAVITY_AND_EXTERIOR_OPENINGS_DIMENSIONS_FOR_SAVING_ENERGY_ON_MEDITERRANEAN_CLIMATE.
- [56] Schabbach T. Wesselak V. *Regenerative Energietechnik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [57] Willems W. M., Schild K., Dinter S. *Handbuch Bauphysik: Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2006.

Normen und Standards

- [47] ÖNORM 8110-2. *Wärmeschutz im Hochbau Teil 2: Wasserdampfdifusion und Kondensationschutz*. 1.07.2003.

Internetquellen

- [4] Asthalter T. *Erdumlaufbahn, Keplersche Gesetze, Exzentrizität: Erdbahn und Jahreszeiten*. URL: http://www.goruma.de/Wissen/Naturwissenschaft/Astronomie/Erdumlaufbahn_Keplersche_Gesetze_Exzentrizitaet.html.
- [12] Duckek M. *Frankfurter Allgemeine: Bilderstrecke zu: Intelligente Häuserfassaden*. 2014. URL: http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/intelligente-haeuserfassaden-alles-nur-fassade-12803951/frische-luft-kommt-durch-ein-12805950.html#fotobox_1_2803951.
- [13] Europäische Kommission. *Klima- und Energiepaket 2020*. 8.07.2016. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_de.htm.
- [14] Fa. Valetta Sonnenschutztechnik GmbH. *Verbund-Raffstore*. URL: <http://www.valetta.at/produkte/raffstore/verbund-raffstore>.
- [23] Hahn R. *Private Wetterstation: Live-Wetter und Wettervorhersage für Graz und Umgebung*. 2013. URL: www.graz-wetter.at.
- [27] Hengstberger B. *ABV Architektur und Bauverlag*. URL: <http://www.architekten24.de/projekt/burj-al-taq-energy-tower-vae/uebersicht/burj-al-taq-energy-tower-vae/index.html>.

- [30] Horst Frank, Jailbird and Phrood. *Elektromagnetisches Spektrum*. 2005. URL: www.sengpielaudio.com/SpektrumLicht01.gif.
- [34] Josef Gartner GmbH. 2013. URL: <http://josef-gartner.permasteelisagroup.com/de/project-gallery/search/?ah=&bu=null&br=null&ft=23&state=&city=&tall=&bt=&kw=&site=GARTNER>.
- [36] Kleinhapl H. *Karmeliterhof Graz*. 2011. URL: <http://www.nextroom.at/building.php?id=34574>.
- [42] Mader R. *Victoria-Ensemble*. Köln, 1996. URL: http://bauwatch.koelnarchitektur.de/pages/de/architekturfuehrer/52.victoria_ensemble.htm.
- [52] RKW Rhode Kellermann Wawrowsky GmbH & Co. KG. *ARAG Tower Düsseldorf*. 2001. URL: <http://www.rkw-as.de/de/projekte/arag-tower-duesseldorf?form=no>.
- [53] Schuller J. Love Architecture and Urbanism. *Karmeliterhof: Fotocredits: Jasmin Schuller*. Graz, 2011. URL: <http://www.love-home.com/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=180&cntnt01returnid=15>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Externe und interne Beanspruchungen auf Fassaden sowie deren Anforderungen bzw. Funktionen	7
2.2	Analyse klimaadaptiver Fassaden: Attribute innerhalb des Deming-Zyklus . . .	10
3.1	Schematische Darstellung einer Kastenfensterfassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Karmeliterhof Graz/Österreich) rechts [53]	16
3.2	Schematische Darstellung einer Schacht-Kasten-Fassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (ARAG Tower Düsseldorf/Deutschland) rechts [52]	17
3.3	Schematische Darstellung einer Korridorfassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Stadtter Düsseldorf/Deutschland) rechts [46]	18
3.4	Schematische Darstellung einer Zweite-Haut-Fassade links [37] sowie ein Ausführungsbeispiel (Victoria Ensemble Köln/Deutschland) mittig [42] mit dazugehörigem Fassadenschnitt rechts [46]	19
3.5	Einteilung von Doppelfassaden nach dem Lüftungskonzept [50]	20
3.6	Closed-Cavity-Fassade des LEO-Gebäudes in Frankfurt links [12], Zweite-Haut-Fassade des Wacker-Hauses in München mittig [29] und die Abluftfassade des Burj-al-Taqa in Dubai rechts [27]	21
3.7	Erdumlaufbahn mit Extremwerten der Sonnenabstände sowie Tage der Sommer- und Wintersonnenwende [4]	23
3.8	Beispielhafte Darstellung eines typischen Jahresganges der Außenlufttemperatur links und eines typischen Tagesganges rechts [16]	24
3.9	Querschnitt durch eine Doppelfassade und den angrenzenden Innenraum inklusive aller Wärmetransportmechanismen und einem Luftströmungspfad [31] . .	26
3.10	Elektromagnetisches Spektrum [30]	29
3.11	Spezifische Ausstrahlung (Emission) in Abhängigkeit zur Temperatur und Wellenlänge [43]	30
3.12	Emissionsgrade diverser Stoffe bei Raumtemperatur [17]	31
3.13	Emissions-, Reflexion- und Transmissionsgrad von Glas [17]	32
3.14	Auftriebsströmung an einer beheizten Wand links und Abtriebsströmung an einer gekühlten Wand rechts [43]	35
3.15	fig: Druckverteilung innerhalb einer Kastenfensterfassade [46]	37

3.16	Natürliche Lüftung von Räumen unter dem Einfluss verschiedener Windrichtungen [20]	42
4.1	Vereinfachungsmöglichkeiten von Navier-Stokes-Gleichungen [39]	49
4.2	Universelles Wandgesetz [54]	53
4.3	Strategien zur Behandlung der wandnahen Zone [2]	54
4.4	Gute Verknüpfung der räumlichen Diskretisierung mit der globalen Vernetzung am strukturierten Gitter links und Kontrollwinkel-Überhang am unstrukturierten Gitter rechts [2]	55
4.5	Vergleich Diskretisierungsmöglichkeiten [39]	57
4.6	FVM Strategie	58
4.7	Nachbarschaftsbeziehungen in strukturierten Gittern links und unstrukturierten Gittern rechts [54]	58
4.8	Methodik der Diskretisierung durch numerische Approximation anhand eines stationären, eindimensionalen Problems [54]	59
4.9	Kartesisches Rechenetz ohne Randanpassung links und mit konturangepassten Zellen rechts [39]	65
4.10	Topologien für schiefwinklige, strukturierte Rechengitter [38]	65
4.11	Unstrukturiertes Netz um einen Tragflügel [38]	66
4.12	Geschwindigkeitsverlauf und Netzverdichtung innerhalb der Grenzschicht in der Nähe eines Festkörperandes bei reibungsbehafteten Strömungen [39]	67
5.1	Fassadenelement mit einer Wirkungsweise als 2.-Haut-Fassade	69
5.2	Durch Anpassung des Elements erzeugte Schachtfassade	70
5.3	Geometrie Fassadenelement	71
5.4	Verbund-Raffstore mit Z-Lamelle [14]	72
5.5	Kenngrößen zur Auswertung	77
6.1	Ablauf einer numerischen Strömungsberechnung	80
6.2	Ablauf der Geometrieerstellung	81
6.3	Grasshopper Script zur Parametrisierung der Geometrie	82
6.4	Grasshopper Script - Detail Bereich 10	84
6.5	Ergebnis Parametrisierung der Geometrie in Rhinocerus	84
6.6	Meshing-Strategie	86
6.7	Beispielhafte Darstellung des Rechengitters etwa auf halber Höhe des Fassadenelements oben sowie im Übergangsbereich zwischen zwei Fassadenelementen unten	87
6.8	Netzabhängigkeitsstudie 2.-Haut-Fassade	91
6.9	Netzabhängigkeitsstudie Pufferfassade	93

6.10	Randbedingungen der 2.-Haut-Fassaden links und der Pufferfassaden rechts . . .	101
7.1	Prototypischer Aufbau des Diagramms zur Hauptauswertung	108
7.2	Symbolische Darstellungen für 2.-Haut- und Pufferfassaden mit einem Fassadenelement und zwei Elementen	108
7.3	Passive Solarenergienutzung Q_{tot} aller Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade zu allen Außenklimata	110
7.4	Einfallende Solarstrahlung der Konfigurationen 2, 7 und 12 am sonnigen Sommertag	111
7.5	Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur passiven Solarenergienutzung an Sommertagen	112
7.6	Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur passiven Solarenergienutzung an Wintertagen	112
7.7	Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 13, sonniger Sommertag Sim. 13, bedeckter Wintertag Sim. 1, sonniger Wintertag Sim. 4	113
7.8	Einfallende Solarstrahlung: Vergleich zweier Konfigurationen mit schrägem Sonnenschutz und einem Element links (Konfig. 15) und mit Elementen rechts (Konfig. 45)	114
7.9	Temperaturfelder am sonnigen Sommertag der Konfigurationen 43 (zwei Elemente) und 13 (ein Element) links sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen	116
7.10	Übertemperaturen am Querschnitt 2 aller Konfigurationen an allen Außenbedingungen oben sowie die dazugehörigen Volumenströme unten	118
7.11	Aktive Solarenergienutzung ΔT_{1-2} bzw. ΔT_{1-4} aller Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade zu allen Außenklimata	120
7.12	Bestkonfigurationen von 2.-Haut-Fassaden zur aktiven Solarenergienutzung an allen Simulationstagen	121
7.13	Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 14, sonniger Sommertag Sim. 5, bedeckter Wintertag Sim. 13, sonniger Wintertag Sim. 15	122
7.14	Temperaturfelder am sonnigen Sommertag der Konfigurationen 45 (zwei Elemente - links) und 15 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen	124
7.15	Passive Solarenergienutzung Q_{tot} aller Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade zu allen Außenklimata	125
7.16	Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur passiven Solarenergienutzung an Sommertagen	127

7.17	Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur passiven Solarenergienutzung an Wintertagen	128
7.18	Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Sim. 28, sonniger Sommertag Sim. 29, bedeckter Wintertag Sim. 30, sonniger Wintertag Sim. 19	128
7.19	Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (links) am sonnigen Wintertag der Konfigurationen 46 (zwei Elemente) und 16 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen	130
7.20	Energieeinträge in den Innenraum aller Pufferfassaden mit einem Fassadenelement am sonnigen Sommertag links und am sonnigen Wintertag rechts	132
7.21	Lufttemperaturen an den Querschnitten 1 und 2 aller Pufferfassaden mit einem Fassadenelement am sonnigen Sommertag links und am sonnigen Wintertag rechts	133
7.22	Geschwindigkeitsverläufe v_y (Profil 2) am sonnigen Sommertag für die Konfigurationen 17, 22 und 27 sowie am sonnigen Wintertag für die Konfigurationen 19, 24, 29	134
7.23	Geschwindigkeitsfelder am sonnigen Sommertag für die Konfigurationen 17, 22 und 27	134
7.24	Aktive Solarenergienutzung ΔT_{1-2} bzw. ΔT_{1-4} aller Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade zu allen Außenklimata	136
7.25	Bestkonfigurationen von Pufferfassaden zur aktiven Solarenergienutzung an Sommertagen bzw. am bedeckten Wintertag	137
7.26	Temperaturfelder empfohlener Konfigurationen von links nach rechts: bedeckter Sommertag Konfig. 26, sonniger Sommertag Konfig. 24, bedeckter Wintertag Konfig. 27, sonniger Wintertag Konfig. 21	138
7.27	Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (links) am sonnigen Wintertag der Konfigurationen 59 (zwei Elemente) und 29 (ein Element), sowie Geschwindigkeits- (rechts oben) und Temperaturverläufe (rechts unten) an drei Profilen	140
7.28	Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung aller 2.-Haut-Fassaden zu allen Außenklimata	142
7.29	Gegenüberstellung passiver und aktiver Solarenergienutzung aller Pufferfassaden zu allen Außenklimata	143

Tabellenverzeichnis

5.1	Kenngrößen zur Beschreibung des Innen- und Außenklimas	75
5.2	Variantenmatrix der Parameterstudie	79
6.1	Netzattribute der Konfigurationen mit einem Fassadenelement	89
6.2	Netzattribute der Konfigurationen mit zwei Fassadenelementen	90
6.3	Netzabhängigkeitsstudie 2.-Haut-Fassade	92
6.4	Netzabhängigkeitsstudie Pufferfassade	93
6.5	Ermittelte Rayleigh-zahlen durch die CFD-Ergebnisse	95
6.6	Fluideigenschaften der semi-transparenten Luft je Außenklima	98
6.7	Thermo-physikalische Eigenschaften der an den Parameterstudien beteiligten Festkörper	99
6.8	Unterrelaxationsfaktoren und Diskretisierung aller Strömungsgrößen	104
7.1	Extremwertbetrachtung der Fassadenkonfigurationen als 2.-Haut-Fassade an einem Element als Entscheidungsgrundlage für die Betrachtung an zwei Elementen	114
7.2	Extremwertbetrachtung der Fassadenkonfigurationen als Pufferfassade an einem Element als Entscheidungsgrundlage zur Betrachtung an zwei Elementen	129

Appendix

Der Anhang enthält die **ausgewerteten Variantenmatrizen** für:

- Äußere Oberflächentemperatur der Außenverglasung an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,1}$
- Innere Oberflächentemperatur der Außenverglasung an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,2}$
- Oberflächentemperatur der Sonnenschutz-Lamelle an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,3}$
- Äußere Oberflächentemperatur der Isolierverglasung an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,4}$
- Innere Oberflächentemperatur der Isolierverglasung an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,5}$
- Gemittelte Lufttemperatur an 4 Auswerte-Querschnitten $T_{i,air}$
- Temperaturanstieg an 4 Auswerte-Querschnitten ΔT_i
- Gemittelte Lufttemperatur an Zu- und Abluftöffnung T_{in}, T_{out}
- Gemittelte Geschwindigkeit an Zu- und Abluftöffnung v_{in}, v_{out}
- Massenströme durch Zu- und Abluftöffnung $\dot{m}_{in}, \dot{m}_{out}$
- Volumenströme durch Zu- und Abluftöffnung $\dot{V}_{in}, \dot{V}_{out}$
- Temperaturanstieg innerhalb des Fassadenzwischenraums $\Delta T_{1-2}, \Delta T_{1-4}$
- Energieeinträge in den Innenraum $Q_{tot}, Q_{rad}, Q_{conv}$

		T _{1.1} [°C]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
		thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	27,84	51,22	-5,86	9,24
27,85	46,98				-6,61	6,45	2	
27,80	51,51				-5,77	10,02	3	
27,82	51,35			-5,69	9,57	4		
27,75	49,09			-6,33	8,00	5		
27,72	52,06			-6,17	10,53	6		
27,89	50,52			-6,68	9,10	7		
27,94	53,03			-6,07	11,53	8		
28,06	53,77			-6,09	11,40	9		
27,91	50,75			-6,81	9,77	10		
28,18	52,54			-7,13	9,35	11		
28,02	50,79			-7,46	8,19	12		
28,08	48,94			-7,63	6,69	13		
28,01	50,19			-7,50	7,65	14		
28,04	52,17			-7,26	9,18	15		
Pufferfassade	Raffstore offen		25,94	42,95	-7,82	4,55	16	
			25,89	43,03	-7,68	4,78	17	
			25,84	42,77	-7,85	4,75	18	
	25,87		42,18	-7,76	4,29	19		
	25,93		43,43	-7,68	5,31	20		
	26,07		45,42	-7,85	6,31	21		
	26,09		45,31	-7,60	6,42	22		
	26,06		45,76	-7,80	6,77	23		
	26,06		45,34	-7,72	6,50	24		
	26,08		45,56	-7,70	6,56	25		
	26,05		45,80	-8,04	6,19	26		
	26,04		45,22	-8,06	5,89	27		
	26,06		44,95	-8,02	5,88	28		
	26,07		45,14	-8,05	5,90	29		
	26,08		45,55	-7,96	6,16	30		
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-6,44		31	
			27,73	50,10		8,57	34	
				46,46		5,63	35	
						36		
						37		
				-6,37		39		
			48,12			40		
					5,79	41		
						42		
		Pufferfassade	Raffstore geschlossen	27,90	46,26	-8,02		43
	27,82						44	
				50,07		7,15	45	
					4,31	46		
	Raffstore offen		25,93				47	
				42,13		4,64	48	
						4,06	49	
						50		
	Raffstore halb-offen				-7,91		52	
				45,34		6,32	54	
		26,01				55		
Raffstore geschlossen	26,03		-8,14		57			
		44,88		5,54	58			
			-8,19		59			
					60			
	A	B	C	D				

		T _{2.1} [°C]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
		thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	28,06	53,27	-4,47	11,69
28,19	52,70				-4,88	11,15	2	
28,32	55,55				-4,43	13,45	3	
28,13	52,73			-4,97	10,83	4		
28,17	53,01			-4,92	11,85	5		
28,40	55,69			-4,74	13,69	6		
28,50	54,10			-5,01	12,54	7		
28,34	56,00			-4,92	14,24	8		
28,35	54,32			-5,27	12,51	9		
28,42	56,08			-4,96	14,19	10		
28,70	56,47			-5,78	12,35	11		
28,77	56,51			-5,75	13,13	12		
28,87	56,26			-5,67	13,18	13		
28,70	56,77			-5,75	12,93	14		
28,57	55,73			-5,81	12,90	15		
Pufferfassade	Raffstore offen		25,88	43,33	-7,05	5,87	16	
			25,85	43,83	-7,05	5,82	17	
			25,90	43,60	-6,91	5,76	18	
	25,97		42,70	-7,09	5,27	19		
	25,97		44,64	-7,04	6,50	20		
	26,09		47,02	-6,92	8,47	21		
	26,09		47,33	-6,94	8,21	22		
	26,09		47,12	-7,05	7,89	23		
	26,09		47,33	-7,04	8,39	24		
	26,12		47,69	-7,12	8,23	25		
	26,14		46,58	-7,11	7,65	26		
	26,17		46,95	-7,13	7,94	27		
	26,14		46,44	-7,20	7,71	28		
	26,11		46,65	-7,15	7,77	29		
	26,02		46,79	-7,21	7,83	30		
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				-4,80		31
			27,86	49,35		9,11	34	
				49,29		8,68	35	
						36		
						37		
						38		
						39		
				-5,94		40		
			54,45			41		
					11,00	42		
	Pufferfassade	Raffstore geschlossen	28,62	54,22	-6,54		43	
			28,47				44	
				53,94		10,91	45	
					5,25	46		
		Raffstore offen	25,92				47	
				42,52		5,10	48	
						4,63	49	
						50		
		Raffstore halb-offen			-7,58		53	
				46,42		7,43	54	
26,08					55			
Raffstore geschlossen	26,10		-7,75		57			
		45,89		6,82	58			
			-7,86		59			
					60			
	A	B	C	D				

		T _{3.1} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore offen				2	
		Raffstore offen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore offen				5	
		Raffstore offen				6	
		Raffstore halb-offen				7	
		Raffstore halb-offen				8	
		Raffstore halb-offen				9	
		Raffstore halb-offen				10	
		Raffstore geschlossen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore geschlossen				13	
		Raffstore geschlossen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore offen				17	
		Raffstore offen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore offen				20	
		Raffstore halb-offen				21	
		Raffstore halb-offen				22	
		Raffstore halb-offen				23	
		Raffstore halb-offen				24	
		Raffstore halb-offen				25	
		Raffstore geschlossen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore geschlossen				28	
		Raffstore geschlossen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore offen				32	
		Raffstore offen	28,29	52,38		11,30	33
		Raffstore offen		51,90		10,80	34
		Raffstore offen					35
		Raffstore offen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore offen					38
		Raffstore halb-offen			-5,19		39
		Raffstore halb-offen		53,95			40
		Raffstore halb-offen				10,62	41
		Raffstore halb-offen					42
		Raffstore geschlossen	28,65	55,75		-5,89	43
		Raffstore geschlossen	28,66				44
		Raffstore geschlossen		54,95		11,86	45
	Raffstore geschlossen				5,08	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,89				47
		Raffstore offen		42,37		4,99	48
		Raffstore offen				4,68	49
		Raffstore offen					50
		Raffstore offen					51
		Raffstore halb-offen		46,76	-7,45	7,40	52
		Raffstore halb-offen					53
		Raffstore halb-offen					54
		Raffstore halb-offen					55
		Raffstore geschlossen	26,07				56
		Raffstore geschlossen	26,08		-7,57		57
		Raffstore geschlossen		45,80		6,91	58
		Raffstore geschlossen					59
		Raffstore geschlossen			-7,57		60
		A	B	C	D		

		T _{4.1} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore offen				2	
		Raffstore offen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore offen				5	
		Raffstore offen				6	
		Raffstore halb-offen				7	
		Raffstore halb-offen				8	
		Raffstore halb-offen				9	
		Raffstore halb-offen				10	
		Raffstore geschlossen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore geschlossen				13	
		Raffstore geschlossen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore offen				17	
		Raffstore offen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore offen				20	
		Raffstore halb-offen				21	
		Raffstore halb-offen				22	
		Raffstore halb-offen				23	
		Raffstore halb-offen				24	
		Raffstore halb-offen				25	
		Raffstore geschlossen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore geschlossen				28	
		Raffstore geschlossen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore offen				32	
		Raffstore offen	28,16	52,07		10,75	33
		Raffstore offen		51,36		10,43	34
		Raffstore offen					35
		Raffstore offen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore offen					38
		Raffstore halb-offen			-4,95		39
		Raffstore halb-offen		55,34			40
		Raffstore halb-offen				13,32	41
		Raffstore halb-offen					42
		Raffstore geschlossen	28,87	57,49		-4,85	43
		Raffstore geschlossen	28,79				44
		Raffstore geschlossen		57,11		14,02	45
	Raffstore geschlossen				6,14	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,92				47
		Raffstore offen		42,85		5,76	48
		Raffstore offen				5,44	49
		Raffstore offen					50
		Raffstore offen					51
		Raffstore halb-offen		47,82	-6,86	8,54	52
		Raffstore halb-offen					53
		Raffstore halb-offen					54
		Raffstore halb-offen					55
		Raffstore geschlossen	26,12				56
		Raffstore geschlossen	26,18		-6,94		57
		Raffstore geschlossen		46,81		8,05	58
		Raffstore geschlossen					59
		Raffstore geschlossen			-7,02		60
		A	B	C	D		

		T _{1,2} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element				
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	27,85	51,51	-5,81	9,39	1	
		Raffstore offen	27,85	47,08	-6,56	6,51	2	
		Raffstore offen	27,79	51,81	-5,71	10,21	3	
		Raffstore offen	27,83	51,66	-5,63	9,76	4	
		Raffstore offen	27,76	49,26	-6,29	8,11	5	
		Raffstore offen	27,72	52,38	-6,13	10,71	6	
		Raffstore offen	27,89	50,73	-6,64	9,22	7	
		Raffstore offen	27,95	53,33	-6,01	11,74	8	
		Raffstore offen	28,07	54,17	-6,04	11,60	9	
		Raffstore offen	27,91	50,94	-6,78	9,91	10	
		Raffstore offen	28,19	52,79	-7,11	9,47	11	
		Raffstore offen	28,02	50,99	-7,45	8,27	12	
		Raffstore offen	28,09	49,07	-7,62	6,73	13	
		Raffstore offen	28,02	50,37	-7,49	7,72	14	
		Raffstore offen	28,05	52,43	-7,23	9,30	15	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,97	44,21	-7,61	5,47	16	
		Raffstore offen	25,92	43,88	-7,44	5,73	17	
		Raffstore offen	25,86	43,98	-7,63	5,70	18	
		Raffstore offen	25,91	43,32	-7,53	5,19	19	
		Raffstore offen	25,98	44,74	-7,44	6,33	20	
		Raffstore offen	26,13	46,87	-7,64	7,44	21	
		Raffstore offen	26,15	46,79	-7,41	7,55	22	
		Raffstore offen	26,11	47,33	-7,58	7,94	23	
		Raffstore offen	26,12	46,87	-7,50	7,65	24	
		Raffstore offen	26,13	47,03	-7,47	7,67	25	
		Raffstore offen	26,10	47,35	-7,84	7,29	26	
		Raffstore offen	26,09	46,71	-7,86	6,95	27	
		Raffstore offen	26,12	46,45	-7,84	6,94	28	
		Raffstore offen	26,13	46,55	-7,86	6,93	29	
		Raffstore offen	26,14	47,08	-7,75	7,26	30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-6,41		31	
		Raffstore offen					32	
		Raffstore offen	27,74	50,41		8,73	34	
		Raffstore offen		46,53		5,66	35	
		Raffstore offen					36	
		Raffstore offen					37	
		Raffstore offen					38	
		Raffstore offen			-6,32		39	
		Raffstore offen		48,25			40	
		Raffstore offen				5,84	41	
		Raffstore offen					42	
		Raffstore offen	27,91	46,31	-8,01		43	
		Raffstore offen	27,83				44	
		Raffstore offen		50,30		7,24	45	
		Raffstore offen				5,16	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,96				47	
		Raffstore offen		43,26		5,45	48	
		Raffstore offen				4,88	49	
		Raffstore offen					50	
		Raffstore offen					51	
		Raffstore offen			-7,72		52	
		Raffstore offen		46,87		7,46	54	
		Raffstore offen					55	
		Raffstore offen	26,04				56	
		Raffstore offen	26,08		-7,96		57	
		Raffstore offen		46,23		6,56	59	
		Raffstore offen			-8,03		60	
				A	B	C	D	

		T _{2,2} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element				
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	28,06	53,60	-4,40	11,88	1	
		Raffstore offen	28,20	52,99	-4,81	11,34	2	
		Raffstore offen	28,33	55,97	-4,35	13,71	3	
		Raffstore offen	28,14	53,04	-4,90	11,00	4	
		Raffstore offen	28,18	53,33	-4,85	12,08	5	
		Raffstore offen	28,41	56,10	-4,68	13,93	6	
		Raffstore offen	28,51	54,39	-5,03	12,74	7	
		Raffstore offen	28,40	56,37	-4,86	14,51	8	
		Raffstore offen	28,36	54,65	-5,21	12,72	9	
		Raffstore offen	28,43	56,50	-4,90	14,45	10	
		Raffstore offen	28,72	56,80	-5,74	12,52	11	
		Raffstore offen	28,79	56,91	-5,71	13,34	12	
		Raffstore offen	28,81	56,65	-5,62	13,40	13	
		Raffstore offen	28,72	57,16	-5,71	13,14	14	
		Raffstore offen	28,58	56,06	-5,78	13,09	15	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,89	44,64	-6,73	6,97	16	
		Raffstore offen	25,88	44,77	-6,73	6,91	17	
		Raffstore offen	25,93	44,92	-6,58	6,84	18	
		Raffstore offen	25,94	43,92	-6,77	6,29	19	
		Raffstore offen	26,02	46,12	-6,72	7,68	20	
		Raffstore offen	26,15	48,67	-6,59	9,87	21	
		Raffstore offen	26,15	49,08	-6,69	9,57	22	
		Raffstore offen	26,15	48,87	-6,73	9,21	23	
		Raffstore offen	26,15	49,12	-6,74	9,78	24	
		Raffstore offen	26,19	49,45	-6,82	9,55	25	
		Raffstore offen	26,21	48,25	-6,80	8,95	26	
		Raffstore offen	26,24	48,67	-6,81	9,26	27	
		Raffstore offen	26,20	48,14	-6,91	9,02	28	
		Raffstore offen	26,17	48,26	-6,85	9,03	29	
		Raffstore offen	26,12	48,49	-6,91	9,15	30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-4,74		31	
		Raffstore offen					32	
		Raffstore offen	27,86	49,53		9,22	34	
		Raffstore offen		49,45		8,79	35	
		Raffstore offen					36	
		Raffstore offen					37	
		Raffstore offen					38	
		Raffstore offen			-5,90		39	
		Raffstore offen		54,80			40	
		Raffstore offen				11,18	41	
		Raffstore offen					42	
		Raffstore offen	28,64	54,52	-6,51		43	
		Raffstore offen	28,48				44	
		Raffstore offen		54,26		11,05	45	
		Raffstore offen				6,22	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	25,94				47	
		Raffstore offen		43,71		5,96	48	
		Raffstore offen				5,52	49	
		Raffstore offen					50	
		Raffstore offen					51	
		Raffstore offen			-7,35		52	
		Raffstore offen		48,10		8,71	54	
		Raffstore offen					55	
		Raffstore offen	26,12				56	
		Raffstore offen	26,16		-7,51		57	
		Raffstore offen		47,37		8,00	59	
		Raffstore offen			-7,66		60	
				A	B	C	D	

		T _{3,2} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore half-offen				32	
		Raffstore geschlossen				33	
		Raffstore offen	28,30	52,71	-4,89	11,50	34
		Raffstore half-offen		52,17		10,97	35
		Raffstore geschlossen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore half-offen					38
		Raffstore geschlossen					39
		Raffstore offen		52,29	-5,12		40
		Raffstore half-offen				10,79	41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore offen	28,67	56,16	-5,84		43
		Raffstore half-offen	28,68				44
		Raffstore geschlossen		55,34		12,05	45
	Raffstore offen				6,02	46	
	Raffstore half-offen	25,92				47	
	Raffstore geschlossen				5,85	48	
	Raffstore offen		43,54		5,58	49	
	Raffstore half-offen					50	
	Raffstore geschlossen					51	
	Raffstore offen					52	
	Raffstore half-offen		48,49	-7,21		53	
	Raffstore geschlossen				8,66	54	
	Raffstore offen	26,11				55	
	Raffstore half-offen	26,14				56	
	Raffstore geschlossen					57	
	Raffstore offen		47,27	-7,32		58	
	Raffstore half-offen				8,10	59	
	Raffstore geschlossen					60	
		A	B	C	D		

		T _{4,2} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore half-offen					32
		Raffstore geschlossen					33
		Raffstore offen	28,17	52,41	-4,08	10,94	34
		Raffstore half-offen		51,62		10,61	35
		Raffstore geschlossen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore half-offen					38
		Raffstore geschlossen					39
		Raffstore offen		55,77	-4,88		40
		Raffstore half-offen				13,63	41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore offen	28,90	57,99	-4,78		43
		Raffstore half-offen	28,81				44
		Raffstore geschlossen		57,62		14,30	45
	Raffstore offen				7,22	46	
	Raffstore half-offen	25,94				47	
	Raffstore geschlossen				6,70	48	
	Raffstore offen		44,09		6,43	49	
	Raffstore half-offen					50	
	Raffstore geschlossen					51	
	Raffstore offen					52	
	Raffstore half-offen		49,68	-6,55		53	
	Raffstore geschlossen				9,95	54	
	Raffstore offen	26,17				55	
	Raffstore half-offen	26,25				56	
	Raffstore geschlossen					57	
	Raffstore offen					58	
	Raffstore half-offen		48,42	-6,60		59	
	Raffstore geschlossen				9,39	60	
		A	B	C	D		

		T _{1,3} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element				
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,19	52,22	-7,21	8,72	1	
		Raffstore offen	25,68	50,89	-7,74	7,70	2	
		Raffstore offen	25,29	57,51	-6,99	12,91	3	
		Raffstore offen	25,39	56,56	-6,82	11,69	4	
		Raffstore offen	25,31	46,85	-8,35	5,21	5	
		Raffstore offen	25,96	55,74	-6,62	13,47	6	
		Raffstore offen	26,19	55,68	-6,94	14,46	7	
		Raffstore offen	26,19	60,79	-6,00	18,62	8	
		Raffstore offen	26,75	63,34	-5,47	19,76	9	
		Raffstore offen	25,87	49,45	-7,95	8,24	10	
		Raffstore offen	25,80	53,20	-6,87	11,06	11	
		Raffstore offen	26,12	53,32	-6,90	10,96	12	
		Raffstore offen	26,06	52,37	-7,00	10,59	13	
		Raffstore offen	26,25	55,44	-6,57	12,63	14	
		Raffstore offen	25,94	52,79	-7,04	10,87	15	
	Raffstore offen	24,30	69,64	-2,95	28,46	16		
	Pufferfassade	Raffstore offen	23,89	68,80	-2,82	29,15	17	
		Raffstore offen	23,91	68,97	-3,73	27,84	18	
		Raffstore offen	23,67	65,29	-3,18	25,93	19	
		Raffstore offen	24,54	71,54	-2,55	32,12	20	
		Raffstore offen	25,74	81,12	-1,75	37,78	21	
		Raffstore offen	25,96	80,97	-1,26	38,42	22	
		Raffstore offen	25,67	81,51	-2,03	38,65	23	
		Raffstore offen	26,22	81,28	-1,00	39,14	24	
		Raffstore offen	25,72	79,45	-1,39	38,30	25	
		Raffstore offen	25,29	79,05	-1,26	36,58	26	
		Raffstore offen	25,42	77,48	-1,16	36,08	27	
		Raffstore offen	25,13	78,85	-1,07	35,80	28	
		Raffstore offen	25,55	77,34	-1,13	36,15	29	
		Raffstore offen	25,38	78,28	-0,75	37,33	30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-7,97		31
	Raffstore offen						32	
	Raffstore offen		25,18	56,33		11,18	34	
	Raffstore offen			43,14		2,77	35	
	Raffstore offen						36	
	Raffstore offen						37	
	Raffstore offen						38	
	Raffstore offen				-5,71		39	
	Raffstore offen			43,11			40	
	Raffstore offen					7,02	41	
	Raffstore offen						42	
	Raffstore offen		25,85	47,61	-7,76		43	
	Raffstore offen		26,11				44	
	Raffstore offen			46,29		5,94	45	
	Raffstore offen					27,98	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	24,32				47	
		Raffstore offen		65,05		27,97	48	
		Raffstore offen				24,70	49	
		Raffstore offen					50	
		Raffstore offen					51	
		Raffstore offen			-2,61		52	
		Raffstore offen		81,28		38,17	54	
		Raffstore offen					55	
		Raffstore offen	25,11				56	
		Raffstore offen	25,39		-1,47		57	
		Raffstore offen		76,61		34,73	59	
		Raffstore offen			-1,69		60	
				A	B	C	D	

		T _{2,3} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element				
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	24,96	57,18	-3,14	17,19	1	
		Raffstore offen	25,82	57,43	-5,56	12,90	2	
		Raffstore offen	25,97	62,26	-4,67	17,39	3	
		Raffstore offen	24,98	55,94	-6,35	11,62	4	
		Raffstore offen	25,81	60,37	-5,17	16,94	5	
		Raffstore offen	26,16	63,72	-2,02	24,07	6	
		Raffstore offen	26,69	59,93	-4,36	17,87	7	
		Raffstore offen	26,62	63,06	-4,16	21,21	8	
		Raffstore offen	26,74	60,67	-5,29	20,27	9	
		Raffstore offen	26,45	62,77	-4,31	20,99	10	
		Raffstore offen	25,97	61,70	-3,08	21,72	11	
		Raffstore offen	26,76	64,21	-2,71	22,33	12	
		Raffstore offen	26,59	63,00	-2,76	21,41	13	
		Raffstore offen	26,44	61,72	-3,18	21,27	14	
		Raffstore offen	26,60	62,35	-2,89	21,08	15	
	Raffstore offen	24,03	71,64	0,99	33,70	16		
	Pufferfassade	Raffstore offen	23,89	71,56	-0,12	33,17	17	
		Raffstore offen	24,12	71,71	0,52	32,13	18	
		Raffstore offen	23,90	68,46	-0,37	30,64	19	
		Raffstore offen	24,52	76,60	0,51	36,59	20	
		Raffstore offen	25,67	86,09	2,50	44,98	21	
		Raffstore offen	25,94	85,78	1,55	43,46	22	
		Raffstore offen	25,94	85,34	1,69	42,78	23	
		Raffstore offen	26,22	87,65	1,47	44,80	24	
		Raffstore offen	25,76	85,98	1,47	43,51	25	
		Raffstore offen	25,40	81,72	2,35	41,65	26	
		Raffstore offen	25,71	82,17	2,58	42,16	27	
		Raffstore offen	25,41	82,59	2,39	41,40	28	
		Raffstore offen	25,74	82,33	2,37	42,65	29	
		Raffstore offen	25,43	81,80	2,56	41,88	30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-3,98		31
	Raffstore offen						32	
	Raffstore offen		25,88	47,57		6,99	34	
	Raffstore offen			50,91		8,53	35	
	Raffstore offen						36	
	Raffstore offen						37	
	Raffstore offen						38	
	Raffstore offen				-6,52		39	
	Raffstore offen			59,81			40	
	Raffstore offen					21,99	41	
	Raffstore offen						42	
	Raffstore offen		26,20	58,09	-5,38		43	
	Raffstore offen		27,10				44	
	Raffstore offen			56,38		14,49	45	
	Raffstore offen					32,32	46	
	Pufferfassade	Raffstore offen	24,18				47	
		Raffstore offen		68,13		30,75	48	
		Raffstore offen				28,90	49	
		Raffstore offen					50	
		Raffstore offen					51	
		Raffstore offen			-0,65		52	
		Raffstore offen		84,63		42,41	54	
		Raffstore offen					55	
		Raffstore offen	25,00				56	
		Raffstore offen	25,38		0,39		57	
		Raffstore offen		81,09		39,91	59	
		Raffstore offen			0,54		60	
				A	B	C	D	

		T _{3.3} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-4,16	31	
		Raffstore half-offen	26,02	55,06		12,09	32
		Raffstore geschlossen		57,27		13,81	33
		Raffstore offen					34
		Raffstore half-offen					35
		Raffstore geschlossen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore half-offen					38
		Raffstore geschlossen					39
		Raffstore offen					40
		Raffstore half-offen					41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore offen					43
		Raffstore half-offen					44
		Raffstore geschlossen					45
	Pufferfassade	Raffstore offen	24,22				46
		Raffstore half-offen					47
		Raffstore geschlossen					48
		Raffstore offen					49
		Raffstore half-offen					50
		Raffstore geschlossen					51
		Raffstore offen					52
		Raffstore half-offen					53
		Raffstore geschlossen					54
		Raffstore offen					55
		Raffstore half-offen					56
		Raffstore geschlossen					57
		Raffstore offen					58
		Raffstore half-offen					59
		Raffstore geschlossen					60
		A	B	C	D		

		T _{4.3} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-2,71	31	
		Raffstore half-offen	25,17	53,25		11,54	32
		Raffstore geschlossen		55,60		13,36	33
		Raffstore offen					34
		Raffstore half-offen					35
		Raffstore geschlossen					36
		Raffstore offen					37
		Raffstore half-offen					38
		Raffstore geschlossen					39
		Raffstore offen					40
		Raffstore half-offen					41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore offen					43
		Raffstore half-offen					44
		Raffstore geschlossen					45
	Pufferfassade	Raffstore offen	24,26				46
		Raffstore half-offen					47
		Raffstore geschlossen					48
		Raffstore offen					49
		Raffstore half-offen					50
		Raffstore geschlossen					51
		Raffstore offen					52
		Raffstore half-offen					53
		Raffstore geschlossen					54
		Raffstore offen					55
		Raffstore half-offen					56
		Raffstore geschlossen					57
		Raffstore offen					58
		Raffstore half-offen					59
		Raffstore geschlossen					60
		A	B	C	D		

			T _{1,4} [°C]									
			Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)						
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,80	51,01	3,50	15,55	1					
		Raffstore offen	25,95	42,58	2,78	12,93	2					
		Raffstore offen	25,81	44,06	2,91	14,01	3					
		Raffstore offen	25,85	44,71	3,19	14,27	4					
		Raffstore offen	25,63	42,78	2,88	13,14	5					
		Raffstore offen	25,18	43,55	3,63	13,84	6					
		Raffstore offen	25,27	39,51	2,38	10,31	7					
		Raffstore offen	25,22	40,90	2,95	12,01	8					
		Raffstore offen	25,36	40,71	2,62	11,46	9					
		Raffstore offen	25,09	40,85	3,34	11,80	10					
		Raffstore offen	24,87	39,49	3,71	11,49	11					
		Raffstore offen	25,07	39,25	3,56	11,35	12					
		Raffstore offen	25,04	38,60	3,73	10,98	13					
		Raffstore offen	24,95	39,30	3,65	11,17	14					
		Raffstore offen	25,06	38,79	3,52	10,93	15					
	Raffstore offen	25,02	56,33	6,13	30,10	16						
	Raffstore offen	25,27	55,18	6,27	26,62	17						
	Raffstore offen	24,99	54,99	5,98	26,42	18						
	Raffstore offen	24,95	54,75	6,12	26,05	19						
	Raffstore offen	25,19	55,69	6,51	27,45	20						
	Raffstore offen	24,95	57,28	6,69	27,79	21						
	Raffstore offen	25,05	56,08	6,97	27,73	22						
	Raffstore offen	24,85	56,96	6,59	28,50	23						
	Raffstore offen	25,13	56,52	6,92	28,17	24						
	Raffstore offen	24,89	55,79	7,08	27,74	25						
	Raffstore offen	24,68	58,01	7,79	29,23	26						
	Raffstore offen	24,72	56,33	7,70	28,65	27						
	Raffstore offen	24,68	55,54	7,81	28,25	28						
	Raffstore offen	24,72	55,65	7,66	28,02	29						
	Raffstore offen	24,78	57,19	8,15	29,70	30						
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			1,86		31					
		Raffstore offen					32					
		Raffstore offen	25,72	42,62		11,80		34				
		Raffstore offen		40,00		9,68		35				
		Raffstore offen						36				
		Raffstore offen						37				
		Raffstore offen						38				
		Raffstore offen			1,23			39				
		Raffstore offen		36,85				40				
		Raffstore offen				9,28		41				
		Raffstore offen						42				
		Raffstore offen	24,82	36,52	3,06			43				
		Raffstore offen	24,93					44				
		Raffstore offen		35,68		7,93		45				
		Raffstore offen				25,97		46				
	Raffstore offen	25,06					47					
	Raffstore offen		54,49		26,14		48					
	Raffstore offen				25,26		49					
	Raffstore offen						50					
	Raffstore offen						51					
	Raffstore offen			6,25			52					
	Raffstore offen		56,52		27,73		53					
	Raffstore offen						54					
	Raffstore offen	24,50					55					
	Raffstore offen	24,69			7,44		56					
	Raffstore offen						57					
	Raffstore offen		54,85		26,99		58					
	Raffstore offen						59					
	Raffstore offen			7,47			60					
				A	B	C	D					

			T _{2,4} [°C]									
			Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)						
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,80	51,01		5,96	21,30	1				
		Raffstore offen	26,09	48,19		4,74	18,11	2				
		Raffstore offen	26,16	48,73		4,81	18,37	3				
		Raffstore offen	25,90	48,53		4,74	18,38	4				
		Raffstore offen	25,93	46,87		4,76	17,70	5				
		Raffstore offen	25,56	49,78		6,10	20,58	6				
		Raffstore offen	25,70	43,80		2,38	15,18	7				
		Raffstore offen	25,62	44,45		4,73	15,82	8				
		Raffstore offen	25,74	44,92		4,59	16,06	9				
		Raffstore offen	25,37	44,19		4,90	16,07	10				
		Raffstore offen	25,10	46,97		6,15	18,20	11				
		Raffstore offen	25,37	46,47		6,62	18,87	12				
		Raffstore offen	25,29	45,44		6,53	18,23	13				
		Raffstore offen	25,41	45,77		6,57	18,45	14				
		Raffstore offen	25,23	45,12		6,48	18,05	15				
	Raffstore offen	24,85	57,01		8,52	30,10	16					
	Raffstore offen	25,34	57,12		8,15	29,16	17					
	Raffstore offen	25,15	56,83		8,78	29,02	18					
	Raffstore offen	25,17	56,63		8,22	29,01	19					
	Raffstore offen	25,23	58,20		8,40	30,03	20					
	Raffstore offen	24,89	60,76		9,36	33,05	21					
	Raffstore offen	25,08	60,80		8,95	31,90	22					
	Raffstore offen	25,10	60,12		9,22	31,24	23					
	Raffstore offen	25,17	62,24		8,91	32,93	24					
	Raffstore offen	24,91	60,33		8,95	31,36	25					
	Raffstore offen	24,72	60,26		10,81	33,40	26					
	Raffstore offen	24,81	60,39		10,83	33,53	27					
	Raffstore offen	24,73	59,06		10,70	32,77	28					
	Raffstore offen	24,87	60,36		10,74	33,80	29					
	Raffstore offen	24,81	60,21		10,92	33,41	30					
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				5,49		31				
		Raffstore offen						32				
		Raffstore offen	26,05	43,54			15,32		34			
		Raffstore offen		43,28			14,85		35			
		Raffstore offen							36			
		Raffstore offen							37			
		Raffstore offen							38			
		Raffstore offen							39			
		Raffstore offen		42,71		3,79			40			
		Raffstore offen						17,29		41		
		Raffstore offen								42		
		Raffstore offen	25,14	42,51		5,46				43		
		Raffstore offen	25,58							44		
		Raffstore offen		42,17			14,65			45		
		Raffstore offen					29,19			46		
	Raffstore offen	25,06							47			
	Raffstore offen					27,76			48			
	Raffstore offen		56,34			27,77			49			
	Raffstore offen								50			
	Raffstore offen								51			
	Raffstore offen								52			
	Raffstore offen		60,17		7,94				53			
	Raffstore offen						31,08		54			
	Raffstore offen								55			
	Raffstore offen	24,44							56			
	Raffstore offen	24,67			9,42				57			
	Raffstore offen								58			
	Raffstore offen		59,15				31,87		59			
	Raffstore offen				9,20				60			
				A	B	C	D					

thermischer Auftrieb über 1 Element		T _{3,4} [°C]				1
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
Pufferfassade	Raffstore geschlossen					2
						3
						4
						5
						6
	Raffstore halb-offen					7
						8
						9
						10
						11
Raffstore offen					12	
					13	
					14	
					15	
					16	
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore geschlossen					17
						18
						19
						20
						21
	Raffstore halb-offen					22
						23
						24
						25
						26
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore geschlossen					27
						28
						29
						30
						31
	Raffstore offen			5,62		32
						33
		26,01	46,75		16,86	34
			48,89		18,98	35
						36
Pufferfassade	Raffstore geschlossen					37
						38
						39
				3,91		40
			45,97			41
	Raffstore halb-offen				18,75	42
						43
				5,58		44
		25,30	43,79			45
		25,17	44,69		16,47	46
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore geschlossen					47
					28,37	48
					27,43	49
		25,03	54,67		26,93	50
						51
	Raffstore halb-offen					52
				8,16		53
			59,70		30,30	54
						55
			24,51			56
Pufferfassade	Raffstore geschlossen					57
				9,99		58
						59
			57,23		31,35	60
						61
	Raffstore offen					62
						63
						64
						65
						66
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen					67
						68
						69
						70
						71
Pufferfassade	Raffstore offen					72
						73
						74
						75
						76

thermischer Auftrieb über 2 Elemente		T _{4,4} [°C]				31
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
Pufferfassade	Raffstore geschlossen					32
						33
						34
						35
						36
	Raffstore halb-offen					37
						38
						39
						40
						41
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore geschlossen				6,41	42
						43
		26,05	48,18		18,78	44
			46,92		17,44	45
						46
	Raffstore halb-offen					47
						48
						49
						50
						51
Pufferfassade	Raffstore geschlossen					52
						53
						54
				45,33		55
						56
	Raffstore offen					57
						58
						59
						60
						61
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore geschlossen					62
						63
						64
						65
						66
	Raffstore offen					67
						68
						69
						70
						71

		T _{1.5} [°C]		Sommertag (bedeckt)		Sommertag (sonnig)		Wintertag (bedeckt)		Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				22,69	32,03	15,77	21,24	1			
						22,74	30,50	15,52	20,30	2			
						22,70	30,83	15,56	20,49	3			
		Raffstore half-offen			22,76	31,70	15,66	20,96	4				
					22,69	30,85	15,56	20,15	5				
					22,43	29,12	15,73	19,10	6				
		Raffstore geschlossen			22,44	27,59	15,36	18,03	7				
					22,48	28,15	15,55	18,50	8				
					22,49	28,16	15,44	18,52	9				
		Pufferfassade	Raffstore offen				22,43	27,94	15,55	18,35	10		
							22,35	27,36	15,75	18,15	11		
							22,36	27,19	15,69	18,08	12		
			Raffstore half-offen			22,35	26,95	15,73	17,97	13			
						22,33	27,21	15,72	18,03	14			
						22,41	27,12	15,69	17,99	15			
	Raffstore geschlossen				22,57	36,60	16,56	24,65	16				
					21,94	36,01	16,59	24,61	17				
					22,47	35,64	16,49	24,34	18				
					22,50	36,23	16,55	24,67	19				
					22,53	35,77	16,65	24,60	20				
					22,36	34,62	16,66	23,51	21				
					22,37	34,09	16,76	23,55	22				
					22,32	34,25	16,63	23,69	23				
					22,42	34,37	16,74	23,76	24				
			22,32	33,63	16,78	23,34	25						
			22,24	34,34	16,98	23,73	26						
			22,25	33,88	16,96	23,54	27						
			22,23	32,87	17,02	23,41	28						
			22,25	33,42	16,94	23,35	29						
			22,27	34,03	17,09	23,90	30						
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen						15,27		31			
											32		
												33	
		Raffstore half-offen			22,71	30,88		20,14				34	
						29,36		19,11				35	
												36	
		Raffstore geschlossen								15,00		37	
												38	
												39	
		Pufferfassade	Raffstore offen									40	
							26,55						41
										16,86			42
			Raffstore half-offen										43
						22,33	26,31		15,53				44
						22,33							45
	Raffstore geschlossen					25,93			17,06			46	
					25,55				24,47			47	
							36,10			24,43		48	
									24,43		49		
											50		
											51		
										52			
	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen							16,55		53		
										23,60		54	
												55	
		Raffstore half-offen										56	
					22,23							57	
					22,24				16,88			58	
		Raffstore geschlossen										59	
						33,25				23,01		60	
								16,89			60		
			A	B	C	D							

		T _{2.5} [°C]		Sommertag (bedeckt)		Sommertag (sonnig)		Wintertag (bedeckt)		Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				22,73	33,84	16,51	22,98	1			
						22,79	32,67	16,13	21,89	2			
						22,83	32,82	16,15	21,85	3			
		Raffstore half-offen			22,77	33,26	16,13	22,27	4				
					22,79	31,82	16,11	21,41	5				
					22,56	31,53	16,47	21,21	6				
		Raffstore geschlossen			22,57	29,19	15,36	19,54	7				
					22,61	29,50	16,08	19,68	8				
					22,31	29,85	16,04	19,94	9				
		Pufferfassade	Raffstore offen				22,52	29,16	16,13	19,67	10		
							22,42	30,18	16,51	20,22	11		
							22,46	29,84	16,63	20,39	12		
			Raffstore half-offen			22,43	29,44	16,60	20,19	13			
						22,48	29,63	16,62	20,25	14			
						22,47	29,43	16,61	20,18	15			
	Raffstore geschlossen				22,51	36,86	17,29	25,83	16				
					21,96	36,81	17,18	25,48	17				
					22,53	36,48	17,36	25,27	18				
					22,57	37,04	17,20	25,69	19				
					22,54	36,66	17,23	25,39	20				
					22,35	36,07	17,48	25,29	21				
					22,38	36,01	17,37	24,97	22				
					22,40	35,53	17,43	24,61	23				
					22,43	36,70	17,35	25,37	24				
			22,33	35,55	17,36	24,61	25						
			22,25	35,25	17,91	25,14	26						
			22,18	35,31	17,91	25,19	27						
			22,25	34,25	17,90	24,98	28						
			22,30	35,32	17,88	25,29	29						
			22,28	35,24	17,95	25,15	30						
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen						16,37		31			
											32		
												33	
		Raffstore half-offen			22,86	31,41		21,29				34	
						30,64		20,54				35	
												36	
		Raffstore geschlossen								15,77		37	
												38	
												39	
		Pufferfassade	Raffstore offen									40	
									28,87				41
											19,32		42
			Raffstore half-offen										43
						22,44	28,54		16,27				44
						22,53							45
	Raffstore geschlossen					28,59			19,15			46	
					25,55				25,52			47	
							36,94			25,01		48	
								25,28			49		
											50		
											51		
	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen							17,06		52		
										24,75		53	
												54	
		Raffstore half-offen										55	
					22,21							56	
					22,23				17,49			57	
		Raffstore geschlossen										58	
						34,98				24,62		59	
									17,43			60	
			A	B	C	D							

		T _{3.5} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore half-offen				32	
		Raffstore geschlossen				33	
		Raffstore offen	22,81	32,32		21,72	34
		Raffstore half-offen		32,34		21,90	35
		Raffstore geschlossen			15,82		36
		Raffstore offen				19,75	37
		Raffstore half-offen		29,88			38
		Raffstore geschlossen			16,30		39
		Raffstore offen	22,49	29,01			40
		Raffstore half-offen	22,40				41
		Raffstore geschlossen		29,19		19,69	42
		Raffstore offen	22,54			25,24	43
		Raffstore half-offen		36,15		24,90	44
		Raffstore geschlossen			17,15	24,93	45
	Raffstore offen					46	
	Raffstore half-offen		35,69		24,51	47	
	Raffstore geschlossen	22,22				48	
	Raffstore offen	22,25		17,66		49	
	Raffstore half-offen					50	
	Raffstore geschlossen		34,18		24,44	51	
	Raffstore offen			17,87		52	
	Raffstore half-offen					53	
	Raffstore geschlossen					54	
	Raffstore offen					55	
	Raffstore half-offen					56	
	Raffstore geschlossen					57	
	Raffstore offen					58	
	Raffstore half-offen					59	
	Raffstore geschlossen					60	
		A	B	C	D		

		T _{4.5} [°C]					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				1	
		Raffstore half-offen				2	
		Raffstore geschlossen				3	
		Raffstore offen				4	
		Raffstore half-offen				5	
		Raffstore geschlossen				6	
		Raffstore offen				7	
		Raffstore half-offen				8	
		Raffstore geschlossen				9	
		Raffstore offen				10	
		Raffstore half-offen				11	
		Raffstore geschlossen				12	
		Raffstore offen				13	
		Raffstore half-offen				14	
		Raffstore geschlossen				15	
	Pufferfassade	Raffstore offen				16	
		Raffstore half-offen				17	
		Raffstore geschlossen				18	
		Raffstore offen				19	
		Raffstore half-offen				20	
		Raffstore geschlossen				21	
		Raffstore offen				22	
		Raffstore half-offen				23	
		Raffstore geschlossen				24	
		Raffstore offen				25	
		Raffstore half-offen				26	
		Raffstore geschlossen				27	
		Raffstore offen				28	
		Raffstore half-offen				29	
		Raffstore geschlossen				30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen				31	
		Raffstore half-offen				32	
		Raffstore geschlossen				33	
		Raffstore offen	22,82	33,15		22,41	34
		Raffstore half-offen		31,90		21,39	35
		Raffstore geschlossen			16,21		36
		Raffstore offen				20,70	37
		Raffstore half-offen		29,54			38
		Raffstore geschlossen			16,75		39
		Raffstore offen	22,46	29,28			40
		Raffstore half-offen	22,44				41
		Raffstore geschlossen		30,54		21,32	42
		Raffstore offen	22,56			26,00	43
		Raffstore half-offen		37,15		25,49	44
		Raffstore geschlossen			17,66	25,79	45
	Raffstore offen					46	
	Raffstore half-offen		37,13		25,58	47	
	Raffstore geschlossen	22,26				48	
	Raffstore offen	22,30		18,10		49	
	Raffstore half-offen					50	
	Raffstore geschlossen		35,61		25,43	51	
	Raffstore offen			18,18		52	
	Raffstore half-offen					53	
	Raffstore geschlossen					54	
	Raffstore offen					55	
	Raffstore half-offen					56	
	Raffstore geschlossen					57	
	Raffstore offen					58	
	Raffstore half-offen					59	
	Raffstore geschlossen					60	
		A	B	C	D		

		T _{1,air} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element					
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,24	36,88	-8,84	-0,63	1		
			25,42	36,21	-9,09	-1,20	2		
			25,22	38,34	-8,84	0,35	3		
		Raffstore halb-offen	25,22	37,03	-8,70	0,48	4		
			25,24	34,12	-9,30	-2,40	5		
			25,32	35,46	-8,98	-1,10	6		
		Raffstore geschlossen	25,34	34,84	-9,16	-1,51	7		
			25,41	36,15	-8,77	-0,34	8		
			25,51	37,41	-8,52	0,91	9		
		Pufferfassade	Raffstore offen	25,30	33,69	-9,32	-2,51	10	
				25,27	34,37	-9,25	-2,04	11	
				25,25	35,80	-8,91	-1,03	12	
			Raffstore halb-offen	25,25	36,58	-8,55	-0,26	13	
				25,03	35,54	-8,87	-1,04	14	
				25,33	34,66	-9,10	-1,89	15	
	Raffstore geschlossen		24,62	60,08	-3,49	20,97	16		
			24,01	60,79	-2,80	22,42	17		
			24,26	61,10	-3,26	23,11	18		
	thermischer Auftrieb über 2 Elemente		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	24,03	57,72	-3,15	20,32	19
					25,61	62,80	-2,61	24,54	20
					25,61	65,87	-2,91	25,81	21
			Raffstore halb-offen	25,71	65,77	-1,83	26,92	22	
				25,26	67,01	-2,71	28,63	23	
				25,83	65,73	-1,87	27,48	24	
		Raffstore geschlossen	25,37	66,21	-1,92	27,68	25		
			24,90	63,74	-2,11	25,27	26		
			24,82	62,20	-2,17	24,43	27		
		Pufferfassade	Raffstore offen	24,86	63,41	-2,15	24,66	28	
				25,00	61,94	-2,32	24,13	29	
				24,96	63,21	-1,76	25,06	30	
Zweite-Haut-Fassade			Raffstore offen			-9,11		31	
				25,16	39,95		1,19	34	
					33,95		-2,58	35	
Raffstore halb-offen						36			
						37			
				-8,49		38			
Raffstore geschlossen			32,78			39			
					-2,67	40			
	24,81		36,08	-8,70		41			
Pufferfassade	Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen	25,13				42	
					34,11		-2,37	43	
							19,99	44	
	Raffstore halb-offen	24,39				45			
			58,27		23,10	46			
					19,90	47			
	Raffstore geschlossen					48			
				-3,34		49			
		24,95	65,58		27,17	50			
	thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen					51	
								52	
								53	
		Raffstore halb-offen					54		
							55		
			24,72		-2,55		56		
Raffstore geschlossen			60,55		22,31	57			
						58			
				-2,98		59			
		A	B	C	D	60			

		T _{2,air} [°C]		thermischer Auftrieb über 1 Element					
				Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,53	41,97	-6,70	4,24	1		
			25,75	43,59	-7,01	4,27	2		
			25,72	42,83	-7,00	4,37	3		
		Raffstore halb-offen	25,55	42,25	-7,28	3,72	4		
			25,66	43,80	-6,97	5,02	5		
			25,94	41,42	-6,91	4,17	6		
		Raffstore geschlossen	25,97	40,32	-7,04	3,56	7		
			26,00	40,99	-6,94	4,02	8		
			26,05	42,33	-7,17	4,18	9		
		Pufferfassade	Raffstore offen	25,69	41,58	-6,72	4,06	10	
				25,75	38,43	-7,99	1,29	11	
				25,76	42,27	-6,55	4,79	12	
			Raffstore halb-offen	25,78	44,93	-5,10	7,49	13	
				25,85	40,08	-7,48	2,78	14	
				25,67	43,73	-5,81	6,14	15	
	Raffstore geschlossen		24,44	65,01	1,16	28,42	16		
			24,30	65,25	0,96	27,91	17		
			24,39	65,03	2,26	27,96	18		
	thermischer Auftrieb über 2 Elemente		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	24,31	62,44	0,81	26,25	19
					25,67	68,76	1,36	30,47	20
					25,67	74,31	2,59	36,69	21
			Raffstore halb-offen	25,45	75,49	2,72	35,42	22	
				25,63	73,92	2,69	34,38	23	
				25,74	76,71	2,13	36,84	24	
		Raffstore geschlossen	25,55	75,10	2,06	34,97	25		
			25,47	70,98	3,33	34,50	26		
			25,31	71,25	3,43	34,03	27		
		Pufferfassade	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,13	70,77	3,32	33,05	28
					25,51	71,40	3,23	34,31	29
					25,20	70,82	3,43	33,68	30
Raffstore halb-offen						-7,36	31		
			25,61	38,63		0,72	32		
				38,30		0,49	33		
Raffstore geschlossen						34			
						35			
						36			
Pufferfassade	Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen					37	
								38	
								39	
	Raffstore halb-offen						40		
							41		
					-7,94		42		
	Raffstore geschlossen		39,21			43			
					0,38	44			
		25,61	42,41	-6,50		45			
	Pufferfassade	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,80				46	
					39,82		2,69	47	
							25,65	48	
		Raffstore halb-offen	24,51				49		
				61,08		25,71	50		
						23,22	51		
Raffstore geschlossen						52			
						53			
		25,23				54			
Pufferfassade		Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,11				55	
								56	
								57	
		Raffstore halb-offen					58		
							59		
							60		
	Raffstore geschlossen					61			
						62			
						63			
		A	B	C	D	64			

		$T_{3,air}$ [°C]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen					1	
		Raffstore	offen					2	
		Raffstore	offen					3	
		Raffstore	offen					4	
		Raffstore	offen					5	
		Raffstore	offen					6	
		Raffstore	offen					7	
		Raffstore	offen					8	
		Raffstore	offen					9	
		Raffstore	offen					10	
		Raffstore	offen					11	
		Raffstore	offen					12	
		Raffstore	offen					13	
		Raffstore	offen					14	
		Raffstore	offen					15	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					16	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					17	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					18	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					19	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					20	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					21	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					22	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					23	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					24	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					25	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					26	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					27	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					28	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					29	
	Pufferfassade	Raffstore	offen					30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen			-6,85		31	
		Raffstore	offen					32	
		Raffstore	offen	25,84	42,49		4,24		33
		Raffstore	offen		44,20		5,10		34
		Raffstore	offen						35
		Raffstore	offen						36
		Raffstore	offen						37
		Raffstore	offen						38
		Raffstore	offen			-6,75			39
		Raffstore	offen		42,49				40
		Raffstore	offen				2,69		41
		Raffstore	offen						42
		Raffstore	offen	26,09	45,24	-6,04			43
		Raffstore	offen	25,94					44
		Raffstore	offen		43,95		5,76		45
	Raffstore	offen				24,29		46	
	Raffstore	offen	24,34				25,43	47	
	Raffstore	offen		60,26		23,67		48	
	Raffstore	offen						49	
	Raffstore	offen						50	
	Raffstore	offen						51	
	Raffstore	offen						52	
	Raffstore	offen		72,52	0,49	32,38		53	
	Raffstore	offen						54	
	Raffstore	offen	25,29					55	
	Raffstore	offen	25,18					56	
	Raffstore	offen			1,51			57	
	Raffstore	offen		67,10		31,53		58	
	Raffstore	offen						59	
	Raffstore	offen			1,36			60	
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					A		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					B		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					C		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					D		

		$T_{4,air}$ [°C]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen					1	
		Raffstore	offen					2	
		Raffstore	offen					3	
		Raffstore	offen					4	
		Raffstore	offen					5	
		Raffstore	offen					6	
		Raffstore	offen					7	
		Raffstore	offen					8	
		Raffstore	offen					9	
		Raffstore	offen					10	
		Raffstore	offen					11	
		Raffstore	offen					12	
		Raffstore	offen					13	
		Raffstore	offen					14	
		Raffstore	offen					15	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					16	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					17	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					18	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					19	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					20	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					21	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					22	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					23	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					24	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					25	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					26	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					27	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					28	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					29	
	Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen			-5,67		31	
		Raffstore	offen					32	
		Raffstore	offen	25,74	44,54		5,79		33
		Raffstore	offen		45,33		6,12		34
		Raffstore	offen						35
		Raffstore	offen						36
		Raffstore	offen						37
		Raffstore	offen						38
		Raffstore	offen			-5,73			39
		Raffstore	offen		46,04				40
		Raffstore	offen				5,48		41
		Raffstore	offen						42
		Raffstore	offen	25,92	46,71	-3,74			43
		Raffstore	offen	26,46					44
		Raffstore	offen		50,67		12,39		45
	Raffstore	offen				30,19		46	
	Raffstore	offen	24,51				28,52	47	
	Raffstore	offen		62,38		26,74		48	
	Raffstore	offen						49	
	Raffstore	offen						50	
	Raffstore	offen						51	
	Raffstore	offen						52	
	Raffstore	offen		78,50	4,01	37,92		53	
	Raffstore	offen						54	
	Raffstore	offen	25,50					55	
	Raffstore	offen	25,36					56	
	Raffstore	offen			4,12			57	
	Raffstore	offen		72,91		36,31		58	
	Raffstore	offen						59	
	Raffstore	offen			4,79			60	
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					A		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					B		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					C		
Pufferfassade	Raffstore	geschlossen					D		

		$\Delta T_1 = T_{1,air} - T_0 [K]$					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	0,24	6,88	1,16	4,37	1
		Raffstore offen	0,42	6,21	0,91	3,80	2
		Raffstore offen	0,22	8,34	1,16	5,35	3
		Raffstore offen	0,22	7,03	1,30	5,48	4
		Raffstore offen	0,24	4,12	0,70	2,60	5
		Raffstore halb-offen	0,32	5,46	1,02	3,90	6
		Raffstore halb-offen	0,34	4,84	0,84	3,49	7
		Raffstore halb-offen	0,41	6,15	1,23	4,66	8
		Raffstore halb-offen	0,51	7,41	1,48	5,91	9
		Raffstore halb-offen	0,30	3,69	0,68	2,49	10
		Raffstore geschlossen	0,27	4,37	0,75	2,96	11
		Raffstore geschlossen	0,25	5,80	1,09	3,97	12
		Raffstore geschlossen	0,25	6,58	1,45	4,74	13
		Raffstore geschlossen	0,03	5,54	1,13	3,96	14
		Raffstore geschlossen	0,33	4,66	0,90	3,11	15
	Pufferfassade	Raffstore offen	-0,38	30,08	6,51	25,97	16
		Raffstore offen	-0,99	30,79	7,20	27,42	17
		Raffstore offen	-0,74	31,10	6,74	28,11	18
		Raffstore offen	-0,97	27,72	6,85	25,32	19
		Raffstore offen	0,61	32,80	7,39	29,54	20
		Raffstore halb-offen	0,61	35,87	7,09	30,81	21
		Raffstore halb-offen	0,71	35,77	8,17	31,92	22
		Raffstore halb-offen	0,26	37,01	7,29	33,63	23
		Raffstore halb-offen	0,83	35,73	8,13	32,48	24
		Raffstore halb-offen	0,37	36,21	8,08	32,68	25
		Raffstore geschlossen	-0,10	33,74	7,89	30,27	26
		Raffstore geschlossen	-0,18	32,20	7,83	29,43	27
		Raffstore geschlossen	-0,14	33,41	7,85	29,66	28
		Raffstore geschlossen	0,00	31,94	7,68	29,13	29
				-0,04	33,21	8,24	30,06
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			3,15	31	
		Raffstore offen					32
		Raffstore offen	0,84	12,49		9,24	34
		Raffstore offen		14,20		10,10	35
		Raffstore halb-offen					36
		Raffstore halb-offen					37
		Raffstore halb-offen			3,25		38
		Raffstore halb-offen		12,49			39
		Raffstore geschlossen				7,69	41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore geschlossen	1,09	15,24	3,96		43
		Raffstore geschlossen	0,94				44
		Raffstore geschlossen		13,95		10,76	45
		Raffstore geschlossen				29,29	46
		Pufferfassade	Raffstore offen	-0,66			
	Raffstore offen			30,26		30,43	48
	Raffstore offen					28,67	49
	Raffstore offen						50
	Raffstore halb-offen				10,49		52
	Raffstore halb-offen			42,52		37,38	54
	Raffstore halb-offen						55
	Raffstore geschlossen		0,29				56
	Raffstore geschlossen		0,18		11,51		57
	Raffstore geschlossen			37,10		36,53	59
					11,36		60
			A	B	C	D	

		$\Delta T_2 = T_{2,air} - T_0 [K]$					
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	0,53	11,97	3,30	9,24	1
		Raffstore offen	0,75	13,59	2,99	9,27	2
		Raffstore offen	0,72	12,83	3,00	9,37	3
		Raffstore offen	0,55	12,25	2,72	8,72	4
		Raffstore offen	0,66	13,80	3,03	10,02	5
		Raffstore halb-offen	0,94	11,42	3,09	9,17	6
		Raffstore halb-offen	0,97	10,32	2,96	8,56	7
		Raffstore halb-offen	1,00	10,99	3,06	9,02	8
		Raffstore halb-offen	1,05	12,33	2,83	9,18	9
		Raffstore halb-offen	0,69	11,58	3,28	9,06	10
		Raffstore geschlossen	0,75	8,43	2,01	6,29	11
		Raffstore geschlossen	0,76	12,27	3,45	9,79	12
		Raffstore geschlossen	0,78	14,93	4,90	12,49	13
		Raffstore geschlossen	0,85	10,08	2,52	7,78	14
		Raffstore geschlossen	0,67	13,73	4,19	11,14	15
	Pufferfassade	Raffstore offen	-0,56	35,01	11,16	33,42	16
		Raffstore offen	-0,70	35,25	10,96	32,91	17
		Raffstore offen	-0,61	35,03	12,26	32,96	18
		Raffstore offen	-0,69	32,44	10,81	31,25	19
		Raffstore offen	0,67	38,76	11,36	35,47	20
		Raffstore halb-offen	0,67	44,31	12,59	41,69	21
		Raffstore halb-offen	0,45	45,49	12,72	40,42	22
		Raffstore halb-offen	0,63	43,92	12,69	39,38	23
		Raffstore halb-offen	0,74	46,71	12,13	41,84	24
		Raffstore halb-offen	0,55	45,10	12,06	39,97	25
		Raffstore geschlossen	0,47	40,98	13,33	39,50	26
		Raffstore geschlossen	0,31	41,25	13,43	39,03	27
		Raffstore geschlossen	0,13	40,77	13,32	38,05	28
		Raffstore geschlossen	0,51	41,40	13,23	39,31	29
				0,20	40,82	13,43	38,68
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			4,33	31	
		Raffstore offen					32
		Raffstore offen	0,74	14,54		10,79	34
		Raffstore offen		15,33		11,12	35
		Raffstore halb-offen					36
		Raffstore halb-offen					37
		Raffstore halb-offen			4,27		38
		Raffstore halb-offen		16,04			39
		Raffstore geschlossen				10,48	41
		Raffstore geschlossen					42
		Raffstore geschlossen	0,92	16,71	6,26		43
		Raffstore geschlossen	1,46				44
		Raffstore geschlossen		20,67		17,39	45
		Raffstore geschlossen				35,19	46
		Pufferfassade	Raffstore offen	-0,49			
	Raffstore offen			32,38		33,52	48
	Raffstore offen					31,74	49
	Raffstore offen						50
	Raffstore halb-offen				14,01		52
	Raffstore halb-offen			48,50		42,92	54
	Raffstore halb-offen						55
	Raffstore geschlossen		0,50				56
	Raffstore geschlossen		0,36		14,12		57
	Raffstore geschlossen			42,91		41,31	59
					14,79		60
			A	B	C	D	

		$\Delta T_3 = T_{3,air} - T_0$ [K]						
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen					1	
		Raffstore half-offen					2	
		Raffstore geschlossen					3	
		Raffstore offen					4	
		Raffstore half-offen					5	
		Raffstore geschlossen					6	
		Raffstore offen					7	
		Raffstore half-offen					8	
		Raffstore geschlossen					9	
		Raffstore offen					10	
		Raffstore half-offen					11	
		Raffstore geschlossen					12	
		Raffstore offen					13	
		Raffstore half-offen					14	
		Raffstore geschlossen					15	
	Pufferfassade	Raffstore offen					16	
		Raffstore half-offen					17	
		Raffstore geschlossen					18	
		Raffstore offen					19	
		Raffstore half-offen					20	
		Raffstore geschlossen					21	
		Raffstore offen					22	
		Raffstore half-offen					23	
		Raffstore geschlossen					24	
		Raffstore offen					25	
		Raffstore half-offen					26	
		Raffstore geschlossen					27	
		Raffstore offen					28	
		Raffstore half-offen					29	
		Raffstore geschlossen					30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			3,15		31	
		Raffstore half-offen					32	
		Raffstore geschlossen	0,84	12,49		9,24		33
		Raffstore offen		14,20		10,10		34
		Raffstore half-offen						35
		Raffstore geschlossen			3,25			36
		Raffstore offen		12,49				37
		Raffstore half-offen						38
		Raffstore geschlossen	1,09	15,24	3,96			39
		Raffstore offen	0,94					40
		Raffstore half-offen				7,69		41
		Raffstore geschlossen					10,76	42
		Raffstore offen		13,95			29,29	43
		Raffstore half-offen	-0,66					44
		Raffstore geschlossen		30,26			30,43	45
	Raffstore offen					28,67	46	
	Raffstore half-offen			10,49			47	
	Raffstore geschlossen		42,52		37,38		48	
	Raffstore offen	0,29					49	
	Raffstore half-offen	0,18					50	
	Raffstore geschlossen			11,51			51	
	Raffstore offen		37,10			36,53	52	
	Raffstore half-offen						53	
	Raffstore geschlossen			11,36			54	
			A	B	C	D	55	
							56	
							57	
							58	
							59	
							60	

		$\Delta T_4 = T_{4,air} - T_0$ [K]						
		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen					1	
		Raffstore half-offen					2	
		Raffstore geschlossen					3	
		Raffstore offen					4	
		Raffstore half-offen					5	
		Raffstore geschlossen					6	
		Raffstore offen					7	
		Raffstore half-offen					8	
		Raffstore geschlossen					9	
		Raffstore offen					10	
		Raffstore half-offen					11	
		Raffstore geschlossen					12	
		Raffstore offen					13	
		Raffstore half-offen					14	
		Raffstore geschlossen					15	
	Pufferfassade	Raffstore offen					16	
		Raffstore half-offen					17	
		Raffstore geschlossen					18	
		Raffstore offen					19	
		Raffstore half-offen					20	
		Raffstore geschlossen					21	
		Raffstore offen					22	
		Raffstore half-offen					23	
		Raffstore geschlossen					24	
		Raffstore offen					25	
		Raffstore half-offen					26	
		Raffstore geschlossen					27	
		Raffstore offen					28	
		Raffstore half-offen					29	
		Raffstore geschlossen					30	
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			4,33		31	
		Raffstore half-offen					32	
		Raffstore geschlossen	0,74	14,54		10,79		33
		Raffstore offen		15,33		11,12		34
		Raffstore half-offen						35
		Raffstore geschlossen			3,25			36
		Raffstore offen		12,49				37
		Raffstore half-offen						38
		Raffstore geschlossen	1,09	15,24	3,96			39
		Raffstore offen	0,94					40
		Raffstore half-offen				7,69		41
		Raffstore geschlossen					10,48	42
		Raffstore offen		13,95			20,67	43
		Raffstore half-offen	-0,49					44
		Raffstore geschlossen		30,26			35,19	45
	Raffstore offen					33,52	46	
	Raffstore half-offen			10,49		31,74	47	
	Raffstore geschlossen		42,52		42,92		48	
	Raffstore offen	0,29					49	
	Raffstore half-offen	0,18					50	
	Raffstore geschlossen			11,51			51	
	Raffstore offen		37,10			41,31	52	
	Raffstore half-offen						53	
	Raffstore geschlossen			11,36			54	
			A	B	C	D	55	
							56	
							57	
							58	
							59	
							60	

		T _{in} [°C]		Sommertag (bedeckt)				Sommertag (sonnig)				Wintertag (bedeckt)				Wintertag (sonnig)																																																													
				A		B		C		D		A		B		C		D																																																											
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	25,11	30,83	-9,96	-4,70	1	25,12	31,35	-9,96	-4,68	2	25,14	30,76	-9,97	-4,78	3	25,22	30,66	-9,97	-4,79	4	25,09	30,78	-9,96	-4,72	5	25,08	30,81	-9,96	-4,71	6	25,08	30,87	-9,95	-4,47	7	25,08	30,77	-9,97	-4,80	8	25,07	30,51	-9,97	-4,84	9	25,07	30,78	-9,96	-4,73	10	25,06	30,79	-9,98	-4,71	11	25,05	30,72	-9,99	-4,75	12	25,08	30,44	-9,99	-4,90	13	25,05	30,40	-9,99	-4,89	14	25,12	30,87	-9,98	-4,67	15
			Raffstore halb-offen	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																											
				Raffstore geschlossen	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																										
		Pufferfassade			Raffstore offen	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60																																																									
			Raffstore halb-offen			31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									
				Raffstore geschlossen		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									
					thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																								
			Pufferfassade				31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																								
				31			32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									

		T _{out} [°C]		Sommertag (bedeckt)				Sommertag (sonnig)				Wintertag (bedeckt)				Wintertag (sonnig)																																																													
				A		B		C		D		A		B		C		D																																																											
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	26,29	40,22	-6,92	2,65	1	26,46	42,88	-6,71	3,74	2	26,58	44,62	-6,62	4,92	3	26,51	40,69	-6,92	2,73	4	26,43	42,83	-6,73	4,15	5	24,45	41,37	-6,85	3,97	6	26,68	43,46	-6,77	4,83	7	27,06	48,47	-6,34	8,08	8	26,45	42,56	-6,84	4,33	9	26,60	44,90	-6,36	6,21	10	26,36	41,68	-6,64	4,03	11	26,45	41,73	-6,98	3,88	12	26,94	45,69	-6,63	6,43	13	26,37	41,89	-6,93	4,05	14	26,63	43,74	-6,72	5,22	15
			Raffstore halb-offen	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																											
				Raffstore geschlossen	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																										
		Pufferfassade			Raffstore offen	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60																																																									
			Raffstore halb-offen			31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									
				Raffstore geschlossen		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									
					thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																								
			Pufferfassade				31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																								
				31			32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45																																																									

		v_{in} [m/s]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen		0,15	0,53	0,27	0,46	1		
				0,15	0,55	0,29	0,48	2		
				0,12	0,49	0,28	0,45	3		
		Raffstore halb-offen		0,14	0,55	0,27	0,49	4		
				0,15	0,56	0,30	0,50	5		
				0,17	0,54	0,25	0,48	6		
		Raffstore geschlossen		0,17	0,56	0,32	0,52	7		
				0,14	0,44	0,27	0,41	8		
				0,16	0,56	0,31	0,52	9		
		Pufferfassade	Raffstore offen		0,13	0,52	0,32	0,48	10	
					0,15	0,50	0,22	0,44	11	
					0,16	0,53	0,24	0,47	12	
			Raffstore halb-offen		0,13	0,42	0,21	0,39	13	
					0,16	0,51	0,23	0,46	14	
					0,15	0,49	0,27	0,44	15	
	Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen						16	
									17	
									18	
			Raffstore halb-offen						19	
									20	
									21	
			Raffstore geschlossen						22	
									23	
									24	
		Pufferfassade	Raffstore offen				0,44		25	
									26	
									27	
			Raffstore halb-offen		0,21	0,81		0,73		28
						0,84		0,77		29
										30
Raffstore geschlossen					0,46			31		
				0,83				32		
						0,78		33		
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen							34		
								35		
								36		
	Raffstore halb-offen								37	
									38	
									39	
	Raffstore geschlossen							40		
			0,18	0,62	0,32			41		
			0,22			0,70		42		
	Pufferfassade	Raffstore offen			0,75			43		
								44		
								45		
		Raffstore halb-offen							46	
									47	
									48	
Raffstore geschlossen								49		
								50		
								51		
Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen						52		
								53		
								54		
		Raffstore halb-offen							55	
									56	
									57	
	Raffstore geschlossen							58		
								59		
								60		
			A	B	C	D				

		v_{out} [m/s]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen		0,15	0,48	0,24	0,41	1		
				0,17	0,61	0,25	0,47	2		
				0,12	0,43	0,24	0,40	3		
		Raffstore halb-offen		0,15	0,58	0,28	0,49	4		
				0,14	0,49	0,24	0,43	5		
				0,15	0,48	0,25	0,43	6		
		Raffstore geschlossen		0,17	0,69	0,30	0,58	7		
				0,16	0,52	0,26	0,48	8		
				0,17	0,63	0,30	0,57	9		
		Pufferfassade	Raffstore offen		0,19	0,55	0,27	0,51	10	
					0,16	0,45	0,20	0,40	11	
					0,17	0,48	0,21	0,42	12	
			Raffstore halb-offen		0,20	0,59	0,24	0,52	13	
					0,16	0,46	0,22	0,41	14	
					0,20	0,57	0,27	0,50	15	
	Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen						16	
									17	
									18	
			Raffstore halb-offen							19
										20
										21
			Raffstore geschlossen							22
										23
										24
		Pufferfassade	Raffstore offen					0,41		25
										26
										27
			Raffstore halb-offen		0,18	0,84		0,73		28
						0,70		0,62		29
										30
Raffstore geschlossen								31		
								32		
								33		
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen								34	
									35	
									36	
	Raffstore halb-offen								37	
									38	
									39	
	Raffstore geschlossen							40		
				0,80				41		
						0,64		42		
	Pufferfassade	Raffstore offen							43	
				0,20	0,79	0,39			44	
				0,19			0,78		45	
		Raffstore halb-offen							46	
									47	
									48	
Raffstore geschlossen								49		
								50		
								51		
Zweite-Haut-Fassade		Raffstore offen							52	
									53	
									54	
		Raffstore halb-offen							55	
									56	
									57	
	Raffstore geschlossen							58		
								59		
								60		
			A	B	C	D				

			$\dot{m}_{in} [kg/s]$				
			Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	-0,0170	-0,0884	-0,0494	-0,0861	1
		Raffstore offen	-0,0147	-0,0860	-0,0570	-0,0912	2
		Raffstore offen	-0,0103	-0,0787	-0,0560	-0,0854	3
		Raffstore offen	-0,0102	-0,0919	-0,0572	-0,0928	4
		Raffstore offen	-0,0182	-0,0948	-0,0579	-0,0959	5
		Raffstore offen	-0,0195	-0,0883	-0,0488	-0,0904	6
		Raffstore half-offen	-0,0179	-0,0890	-0,0614	-0,1025	7
		Raffstore half-offen	-0,0097	-0,0678	-0,0539	-0,0783	8
		Raffstore half-offen	-0,0247	-0,0982	-0,0613	-0,1068	9
		Raffstore half-offen	-0,0188	-0,0859	-0,0540	-0,0928	10
		Raffstore geschlosse	-0,0219	-0,0839	-0,0436	-0,0834	11
		Raffstore geschlosse	-0,0220	-0,0882	-0,0482	-0,0903	12
		Raffstore geschlosse	-0,0135	-0,0695	-0,0428	-0,0743	13
		Raffstore geschlosse	-0,0234	-0,0890	-0,0509	-0,0924	14
		Raffstore geschlosse	-0,0184	-0,0782	-0,0447	-0,0818	15
	Pufferfassade	Raffstore offen					16
		Raffstore offen					17
		Raffstore offen					18
		Raffstore offen					19
		Raffstore offen					20
		Raffstore half-offen					21
		Raffstore half-offen					22
		Raffstore half-offen					23
		Raffstore half-offen					24
		Raffstore half-offen					25
		Raffstore half-offen					26
		Raffstore half-offen					27
		Raffstore half-offen					28
		Raffstore half-offen					29
		Raffstore half-offen					30
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			-0,0897	31	
		Raffstore offen				32	
		Raffstore offen				33	
		Raffstore offen	-0,0184	-0,1270	-0,1328	34	
		Raffstore offen		-0,1404	-0,1469	35	
		Raffstore half-offen				36	
		Raffstore half-offen				37	
		Raffstore half-offen				38	
		Raffstore half-offen			-0,0895	39	
		Raffstore half-offen		-0,1371		40	
	Raffstore geschlosse				-0,1434	41	
	Raffstore geschlosse					42	
	Raffstore geschlosse	-0,0173	-0,0919	-0,0600	43		
	Raffstore geschlosse	-0,0254			44		
	Raffstore geschlosse		-0,1134		-0,1187	45	
	Pufferfassade	Raffstore offen				46	
		Raffstore offen				47	
		Raffstore offen				48	
		Raffstore offen				49	
		Raffstore half-offen				50	
Raffstore half-offen					51		
Raffstore half-offen					52		
Raffstore half-offen					53		
Raffstore half-offen					54		
Raffstore half-offen					55		
Raffstore geschlosse				56			
Raffstore geschlosse				57			
Raffstore geschlosse				58			
Raffstore geschlosse				59			
Raffstore geschlosse				60			
		A	B	C	D		

			$\dot{m}_{out} [kg/s]$				
			Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	0,0169	0,0882	0,0493	0,0859	1
		Raffstore offen	0,0146	0,0860	0,0568	0,0910	2
		Raffstore offen	0,0103	0,0785	0,0559	0,0852	3
		Raffstore offen	0,0102	0,0917	0,0570	0,0925	4
		Raffstore offen	0,0182	0,0945	0,0581	0,0956	5
		Raffstore offen	0,0196	0,0881	0,0487	0,0902	6
		Raffstore half-offen	0,0179	0,0890	0,0613	0,1022	7
		Raffstore half-offen	0,0097	0,0676	0,0537	0,0780	8
		Raffstore half-offen	0,0247	0,0980	0,0612	0,1066	9
		Raffstore half-offen	0,0188	0,0857	0,0539	0,0926	10
		Raffstore geschlosse	0,0220	0,0837	0,0435	0,0832	11
		Raffstore geschlosse	0,0220	0,0880	0,0480	0,0901	12
		Raffstore geschlosse	0,0135	0,0693	0,0427	0,0741	13
		Raffstore geschlosse	0,0233	0,0860	0,0507	0,0919	14
		Raffstore geschlosse	0,0184	0,0780	0,0446	0,0816	15
	Pufferfassade	Raffstore offen					16
		Raffstore offen					17
		Raffstore offen					18
		Raffstore offen					19
		Raffstore offen					20
		Raffstore half-offen					21
		Raffstore half-offen					22
		Raffstore half-offen					23
		Raffstore half-offen					24
		Raffstore half-offen					25
		Raffstore half-offen					26
		Raffstore half-offen					27
		Raffstore half-offen					28
		Raffstore half-offen					29
		Raffstore half-offen					30
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			0,0895	31	
		Raffstore offen				32	
		Raffstore offen				33	
		Raffstore offen	0,0184	0,1270	0,1325	34	
		Raffstore offen		0,1398	0,1463	35	
		Raffstore half-offen				36	
		Raffstore half-offen				37	
		Raffstore half-offen				38	
		Raffstore half-offen			0,0893	39	
		Raffstore half-offen		0,1366		40	
	Raffstore geschlosse				0,1431	41	
	Raffstore geschlosse					42	
	Raffstore geschlosse	0,0173	0,0919	0,0597	43		
	Raffstore geschlosse	0,0254			44		
	Raffstore geschlosse		0,1131		0,1184	45	
	Pufferfassade	Raffstore offen				46	
		Raffstore offen				47	
		Raffstore offen				48	
		Raffstore offen				49	
		Raffstore half-offen				50	
Raffstore half-offen					51		
Raffstore half-offen					52		
Raffstore half-offen					53		
Raffstore half-offen					54		
Raffstore half-offen					55		
Raffstore geschlosse				56			
Raffstore geschlosse				57			
Raffstore geschlosse				58			
Raffstore geschlosse				59			
Raffstore geschlosse				60			
		A	B	C	D		

		V_{in} [m³/h]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen	-51,65	-273,17	-132,42	-235,17	1	
		Raffstore	offen	-44,66	-265,75	-152,79	-249,10	2	
		Raffstore	offen	-31,29	-243,19	-150,11	-233,26	3	
		Raffstore	offen	-30,99	-283,98	-153,33	-253,47	4	
		Raffstore	offen	-55,29	-292,94	-155,20	-261,94	5	
		Raffstore	offen	-59,24	-272,86	-130,81	-246,92	6	
		Raffstore	offen	-54,38	-275,02	-164,59	-279,97	7	
		Raffstore	offen	-29,47	-209,51	-144,48	-213,87	8	
		Raffstore	offen	-75,04	-303,45	-164,32	-291,71	9	
		Raffstore	offen	-57,11	-265,44	-144,75	-253,47	10	
		Raffstore	offen	-66,53	-259,26	-116,87	-227,80	11	
		Raffstore	offen	-66,84	-272,55	-129,20	-246,65	12	
		Raffstore	offen	-41,01	-214,76	-114,73	-202,94	13	
		Raffstore	offen	-71,09	-275,02	-136,44	-252,38	14	
		Raffstore	offen	-55,90	-241,65	-119,82	-223,43	15	
	Pufferfassade	Raffstore	offen						16
		Raffstore	offen						17
		Raffstore	offen						18
		Raffstore	offen						19
		Raffstore	offen						20
		Raffstore	offen						21
		Raffstore	offen						22
		Raffstore	offen						23
		Raffstore	offen						24
		Raffstore	offen						25
		Raffstore	offen						26
		Raffstore	offen						27
		Raffstore	offen						28
		Raffstore	offen						29
		Raffstore	offen						30
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen				-240,45		31	
	Raffstore	offen						32	
	Raffstore	offen						33	
	Raffstore	offen	-55,90	-392,45		-362,73		34	
	Raffstore	offen		-433,85		-401,24		35	
	Raffstore	offen						36	
	Raffstore	offen						37	
	Raffstore	offen						38	
	Raffstore	offen						39	
	Raffstore	offen			-239,91			40	
	Raffstore	offen						41	
	Raffstore	offen						42	
	Raffstore	offen						43	
	Raffstore	offen	-52,56	-283,98		-160,83		44	
	Raffstore	offen	-77,16					45	
Pufferfassade	Raffstore	offen						46	
	Raffstore	offen						47	
	Raffstore	offen						48	
	Raffstore	offen						49	
	Raffstore	offen						50	
	Raffstore	offen						51	
	Raffstore	offen						52	
	Raffstore	offen						53	
	Raffstore	offen						54	
	Raffstore	offen						55	
	Raffstore	offen						56	
	Raffstore	offen						57	
	Raffstore	offen						58	
	Raffstore	offen						59	
	Raffstore	offen						60	

		V_{out} [m³/h]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)		
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen	51,34	272,55	132,15	234,63	1	
		Raffstore	offen	44,35	265,75	152,26	248,56	2	
		Raffstore	offen	31,29	242,58	149,84	232,72	3	
		Raffstore	offen	30,99	283,36	152,79	252,66	4	
		Raffstore	offen	55,29	292,02	155,74	261,12	5	
		Raffstore	offen	59,24	272,24	130,54	246,37	6	
		Raffstore	offen	54,38	275,02	164,32	279,15	7	
		Raffstore	offen	29,47	208,89	143,95	213,05	8	
		Raffstore	offen	75,04	302,83	164,05	291,17	9	
		Raffstore	offen	57,11	264,82	144,48	252,93	10	
		Raffstore	offen	66,84	258,64	116,60	227,25	11	
		Raffstore	offen	66,84	271,93	128,67	246,10	12	
		Raffstore	offen	41,01	214,15	114,46	202,40	13	
		Raffstore	offen	70,78	265,75	135,90	251,02	14	
		Raffstore	offen	55,90	241,03	119,55	222,88	15	
	Pufferfassade	Raffstore	offen						16
		Raffstore	offen						17
		Raffstore	offen						18
		Raffstore	offen						19
		Raffstore	offen						20
		Raffstore	offen						21
		Raffstore	offen						22
		Raffstore	offen						23
		Raffstore	offen						24
		Raffstore	offen						25
		Raffstore	offen						26
		Raffstore	offen						27
		Raffstore	offen						28
		Raffstore	offen						29
		Raffstore	offen						30
Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen				239,91		31	
	Raffstore	offen						32	
	Raffstore	offen						33	
	Raffstore	offen	55,90	392,45		361,91		34	
	Raffstore	offen		432,00		399,61		35	
	Raffstore	offen						36	
	Raffstore	offen						37	
	Raffstore	offen						38	
	Raffstore	offen						39	
	Raffstore	offen				239,37		40	
	Raffstore	offen						41	
	Raffstore	offen						42	
	Raffstore	offen						43	
	Raffstore	offen	52,56	283,36		160,03		44	
	Raffstore	offen	77,16					45	
Pufferfassade	Raffstore	offen						46	
	Raffstore	offen						47	
	Raffstore	offen						48	
	Raffstore	offen						49	
	Raffstore	offen						50	
	Raffstore	offen						51	
	Raffstore	offen						52	
	Raffstore	offen						53	
	Raffstore	offen						54	
	Raffstore	offen						55	
	Raffstore	offen						56	
	Raffstore	offen						57	
	Raffstore	offen						58	
	Raffstore	offen						59	
	Raffstore	offen						60	

Q_{tot} [W/m ²]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	-26,03	-259,64	57,97	-112,40	1	
		Raffstore offen	-25,91	-237,31	62,02	-98,05	2	
		Raffstore offen	-26,25	-244,53	61,46	-101,80	3	
		Raffstore offen	-27,18	-269,10	61,14	-117,02	4	
		Raffstore offen	-25,40	-220,48	62,05	-83,63	5	
		Raffstore offen	-20,11	-150,79	61,72	-9,99	6	
		Raffstore offen	-19,10	-119,21	65,72	7,41	7	
		Raffstore offen	-19,67	-122,05	65,19	3,03	8	
		Raffstore offen	-19,47	-128,26	65,74	-2,10	9	
		Raffstore offen	-19,02	-117,65	65,74	8,14	10	
		Raffstore offen	-17,37	-103,59	63,61	21,44	11	
		Raffstore offen	-16,84	-101,62	62,75	20,04	12	
		Raffstore offen	-16,68	-97,62	62,51	20,65	13	
		Raffstore offen	-17,06	-103,13	62,64	21,42	14	
		Raffstore offen	-17,57	-99,62	62,84	16,26	15	
	Raffstore offen	-26,08	-352,16	49,54	-137,69	16		
	Raffstore offen	-28,35	-348,21	50,17	-135,06	17		
	Raffstore offen	-25,80	-349,73	49,37	-135,91	18		
	Raffstore offen	-26,55	-372,86	49,69	-149,66	19		
	Raffstore offen	-24,58	-327,49	49,91	-123,61	20		
	Raffstore offen	-17,81	-217,95	50,41	-59,76	21		
	Raffstore offen	-17,56	-209,79	50,81	-56,02	22		
	Raffstore offen	-17,56	-210,03	51,05	-55,78	23		
	Raffstore offen	-18,72	-224,53	50,78	-65,18	24		
	Raffstore offen	-16,75	-200,90	50,89	-49,93	25		
	Raffstore offen	-15,04	-181,34	46,63	-49,66	26		
	Raffstore offen	-14,81	-178,51	46,61	-44,19	27		
	Raffstore offen	-14,81	-180,66	46,20	-44,03	28		
	Raffstore offen	-15,14	-176,67	46,83	-43,83	29		
	Raffstore offen	-15,45	-185,26	45,69	-48,40	30		
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			57,22		31	
		Raffstore offen					32	
		Raffstore offen	-27,33	-264,79		-109,47		34
		Raffstore offen		-226,98		-79,99		35
		Raffstore offen						36
		Raffstore offen						37
		Raffstore offen			65,85			38
		Raffstore offen						39
		Raffstore offen		-122,76				40
		Raffstore offen				11,32		41
		Raffstore offen						42
		Raffstore offen	-17,41	-99,00	61,15			43
		Raffstore offen	-16,88					44
		Raffstore offen		-107,45		13,53		45
		Raffstore offen				-141,61		46
	Raffstore offen	-26,05					47	
	Raffstore offen		-372,67		-140,83		48	
	Raffstore offen				-151,30		49	
	Raffstore offen						50	
	Raffstore offen						51	
	Raffstore offen			50,14			52	
	Raffstore offen						53	
	Raffstore offen		-228,64		-65,34		54	
	Raffstore offen						55	
	Raffstore offen	-15,19					56	
	Raffstore offen	-14,95			45,30		57	
	Raffstore offen						58	
	Raffstore offen		-178,90		-43,63		59	
	Raffstore offen						60	
			A	B	C	D		

Q_{rad} [W/m ²]		Sommertag (bedeckt)	Sommertag (sonnig)	Wintertag (bedeckt)	Wintertag (sonnig)			
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen	-5,19	-159,38	28,62	-93,00	1	
		Raffstore offen	-5,16	-150,27	30,18	-87,02	2	
		Raffstore offen	-5,31	-153,62	29,96	-88,68	3	
		Raffstore offen	-6,33	-176,44	29,51	-102,54	4	
		Raffstore offen	-4,59	-134,95	30,51	-73,40	5	
		Raffstore offen	-0,41	-67,06	31,96	-5,94	6	
		Raffstore offen	0,04	-52,94	33,48	0,72	7	
		Raffstore offen	-0,21	-53,32	33,45	-1,50	8	
		Raffstore offen	-0,26	-59,53	33,55	-6,50	9	
		Raffstore offen	0,11	-49,36	33,76	2,91	10	
		Raffstore offen	1,26	-34,96	33,24	15,18	11	
		Raffstore offen	1,50	-34,82	32,71	14,69	12	
		Raffstore offen	1,56	-33,13	32,59	14,25	13	
		Raffstore offen	1,37	-36,14	32,67	15,47	14	
		Raffstore offen	1,16	-33,71	32,86	11,16	15	
	Raffstore offen	-6,71	-224,88	25,59	-98,25	16		
	Raffstore offen	-13,80	-222,97	25,83	-97,07	17		
	Raffstore offen	-6,38	-223,93	25,51	-97,59	18		
	Raffstore offen	-7,45	-247,01	25,32	-111,06	19		
	Raffstore offen	-5,27	-201,06	26,06	-84,60	20		
	Raffstore offen	0,40	-98,81	27,65	-24,92	21		
	Raffstore offen	0,50	-94,02	27,80	-23,33	22		
	Raffstore offen	0,50	-94,25	27,89	-23,31	23		
	Raffstore offen	-0,24	-105,70	27,77	-30,28	24		
	Raffstore offen	1,04	-86,11	27,95	-18,37	25		
	Raffstore offen	2,23	-68,11	26,53	-10,49	26		
	Raffstore offen	2,32	-66,98	26,52	-10,36	27		
	Raffstore offen	2,29	-75,97	26,48	-10,62	28		
	Raffstore offen	2,18	-66,20	26,61	-10,21	29		
	Raffstore offen	1,98	-71,43	26,12	-13,00	30		
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore offen			28,43		31	
		Raffstore offen					32	
		Raffstore offen	-6,39	-174,52		-97,33		34
		Raffstore offen		-140,86		-71,01		35
		Raffstore offen						36
		Raffstore offen						37
		Raffstore offen						38
		Raffstore offen			33,40			39
		Raffstore offen						40
		Raffstore offen		-52,81				41
		Raffstore offen				5,15		42
		Raffstore offen	1,17	-34,58	32,08			43
		Raffstore offen	1,48					44
		Raffstore offen		-39,69		9,86		45
		Raffstore offen				-101,30		46
	Raffstore offen	-6,74					47	
	Raffstore offen		-247,01		-102,06		48	
	Raffstore offen				-112,92		49	
	Raffstore offen						50	
	Raffstore offen						51	
	Raffstore offen			27,67			52	
	Raffstore offen						53	
	Raffstore offen		-107,90		-30,34		54	
	Raffstore offen						55	
	Raffstore offen	2,06					56	
	Raffstore offen	2,22			25,99		57	
	Raffstore offen						58	
	Raffstore offen		-67,66		-10,01		59	
	Raffstore offen						60	
			A	B	C	D		

		Q _{conv} [W/m ²]		Sommertag (bedeckt)		Sommertag (sonnig)		Wintertag (bedeckt)		Wintertag (sonnig)	
thermischer Auftrieb über 1 Element	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen	-20,84	-100,26	29,35	-19,40	1			
		Raffstore	offen	-20,75	-87,04	31,84	-11,03	2			
		Raffstore	offen	-20,94	-90,91	31,50	-13,12	3			
		Raffstore	offen	-20,85	-92,66	31,63	-14,48	4			
		Raffstore	offen	-20,81	-85,53	31,54	-10,23	5			
		Raffstore	offen	-19,70	-83,73	29,76	-4,05	6			
		Raffstore	offen	-19,14	-66,27	32,24	6,69	7			
		Raffstore	offen	-19,46	-68,73	31,74	4,53	8			
		Raffstore	offen	-19,21	-68,73	32,19	4,40	9			
		Raffstore	offen	-19,13	-68,29	31,98	5,23	10			
		Raffstore	offen	-18,63	-68,63	30,37	6,26	11			
		Raffstore	offen	-18,34	-66,80	30,04	5,35	12			
		Raffstore	offen	-18,24	-64,49	29,92	6,40	13			
		Raffstore	offen	-18,43	-66,99	29,97	5,95	14			
		Raffstore	offen	-18,73	-65,91	29,98	5,10	15			
	Raffstore	offen	-19,37	-127,28	23,95	-39,44	16				
	Raffstore	offen	-14,55	-125,24	24,34	-37,99	17				
	Raffstore	offen	-19,42	-125,80	23,86	-38,32	18				
	Raffstore	offen	-19,10	-125,85	24,37	-38,60	19				
	Raffstore	offen	-19,31	-126,43	23,85	-39,01	20				
	Raffstore	offen	-18,21	-119,14	22,76	-34,84	21				
	Raffstore	offen	-18,06	-115,77	23,01	-32,69	22				
	Raffstore	offen	-18,06	-115,78	23,16	-32,47	23				
	Raffstore	offen	-18,48	-118,83	23,01	-34,90	24				
	Raffstore	offen	-17,79	-114,79	22,94	-31,56	25				
	Raffstore	offen	-17,27	-113,23	20,10	-39,17	26				
	Raffstore	offen	-17,13	-111,53	20,09	-33,83	27				
	Raffstore	offen	-17,10	-104,69	19,72	-33,41	28				
	Raffstore	offen	-17,32	-110,47	20,22	-33,62	29				
	Raffstore	offen	-17,43	-113,83	19,57	-35,40	30				
thermischer Auftrieb über 2 Elemente	Zweite-Haut-Fassade	Raffstore	offen			28,79		31			
		Raffstore	offen					32			
		Raffstore	offen					33			
		Raffstore	offen	-20,94	-90,27		-12,14	34			
		Raffstore	offen		-86,12		-8,98	35			
		Raffstore	offen					36			
		Raffstore	offen					37			
		Raffstore	offen					38			
		Raffstore	offen			32,45		39			
		Raffstore	offen		-69,95			40			
		Raffstore	offen				6,17	41			
		Raffstore	offen					42			
		Raffstore	offen	-18,58	-64,42	29,07		43			
		Raffstore	offen	-18,36				44			
		Raffstore	offen		-67,76		3,67	45			
	Raffstore	offen				-40,31	46				
	Raffstore	offen	-19,31				47				
	Raffstore	offen		-125,66		-38,77	48				
	Raffstore	offen				-38,38	49				
	Raffstore	offen					50				
	Raffstore	offen					51				
	Raffstore	offen			22,47		52				
	Raffstore	offen					53				
	Raffstore	offen		-120,74		-35,00	54				
	Raffstore	offen	-17,25				55				
	Raffstore	offen	-17,17		19,31		56				
	Raffstore	offen					57				
	Raffstore	offen		-111,24		-33,62	58				
	Raffstore	offen			19,13		59				
	Raffstore	offen					60				
				A	B	C	D				