

Mani Zargari

Optimierung von Atrien und Verbesserung der Anwendung von Planungswerkzeugen (ATRIEN II)

F 2879

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-9111-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Optimierung von Atrien und Verbesserung der Anwendung von Planungswerkzeugen (ATRIEN II)

Abschlussbericht

Gesamtleitung

Institut für Gebäude- und Solartechnik - IGS
Univ. Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch (Institutsleiter)
Dipl.-Ing. Mani Zargari (Projektleiter und Projektbearbeiter)

Kooperation

IRMB – TU Braunschweig (Dipl.-Phys. Sonja Uphoff, Prof.
Dr.-Ing M. Krafcyk)

Förderung



Förderkennzeichen

SF – 10.08.18.7 – 09.18 / II 3 – F20-09-1-108

Stand

30. Juli 2012

Projektlaufzeit

27. September 2009 – 30. Juli 2012



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7 – 09.18 / II 3 – F20-09-1-108 Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Dank gilt der LBS Nord für Ihre Unterstützung bei der Durchführung der Messungen und der Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen und Frau Dipl. - Phys. Sonja Uphoff für die Durchführung der Large Eddy Simulationsuntersuchungen am Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauwesen, Prof. Dr.-Ing. M. Krafcyk TU - Braunschweig.



INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	5
1 ZUSAMMENFASSUNG.....	6
2 ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER LBS.....	10
2.1 VERWALTUNGSGEBÄUDE DER LBS NORD IN HANNOVER KRONBERG	10
2.2 UNTERSUCHUNG DES GEGENWÄRTIGEN LÜFTUNGS-UND ENERGIEKONZEPTES	15
2.2.1 Vorüberlegungen zur Optimierung des Energiekonzeptes	15
2.2.2 Experimentelle Voruntersuchungen	16
2.2.3 Kurzzeitversuch Abschaltung der Lüftungsanlage Ende Februar 2010.....	18
2.2.4 Simulationsuntersuchung	19
2.2.5 Kurzzeitversuch 27.04 - 29.04.2010 Untersuchung alternativer Belüftungskonzepte.....	25
2.2.6 Kurzzeitversuch Februar 2011.....	29
2.2.7 Untersuchung der mechanischen Belüftung.....	34
2.2.8 Prüfung des Außentempersensors der GLT.....	37
2.2.9 CFD-Untersuchung zur Optimierung des Raumklimas der Grünhöfe	38
2.3 ÄNDERUNG DES REGELSCHEMAS UND NEUPROGRAMMIERUNG DER GLT	45
2.3.1 Ursprüngliches Regelschema.....	45
2.3.2 Optimierte Regelschema.....	46
2.3.3 Überprüfung und Anpassungen des neuen Regelschemas im Betrieb.....	52
2.4 SOMMERLICHES RAUMKLIMA IN DEN GRÜNHÖFEN VOR UND NACH DER OPTIMIERUNG.....	60
2.5 ENERGETISCHE ANALYSE.....	65
2.5.1 Zielsetzung	65
2.5.2 Ausgangsbasis.....	65
2.5.3 Analyse der Verbrauchswerte	65
2.5.4 Schlussfolgerung	71
3 ANWENDUNG VON CFD – METHODEN FÜR DIE BERECHNUNG DES RAUMKLIMAS VON	
ATRIEN.....	73
3.1 BERECHNUNG DES TEMPERATURNIVEAUS MIT CFD - METHODEN	73
3.2 BESTIMMUNG DES HYDRAULISCH WIRKSAMEN QUERSCHNITTES	84
3.3 EINSATZ VON CFD IN DER ATRIEPLANUNG.....	89
3.4 DARSTELLUNG TURBULENTER LUFTSTRÖMUNGEN	90
3.5 WINDEINFLUSS.....	91



3.6	UNTERSUCHUNG DER TURBULENTEN EINSTRÖMBEDINGUNGEN MIT NUMERISCHEN METHODEN (DIPL. - PHYS. SONJA UPHOFF)	93
4	RESULTIERENDE LEITLINIEN FÜR DIE PLANUNG VON ATRIEN	102
4.1	EINBINDUNG EINES ATRIUMS IN DAS ENERGIEKONZEPT DES GEBÄUDES	102
4.2	BERÜCKSICHTIGUNG DER VEGETATION	107
4.3	REGELUNG DER ATRIEN	108
4.4	KONSTRUKTIVE EMPFEHLUNGEN	109
4.5	HINWEISE FÜR DIE BERECHNUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS DER ATRIEN	110
4.6	BERECHNUNG DES ENERGIEBEDARF EINES ATRIUMGEBÄUDES	113
5	ANHANG A1: DEFINITION DER LÜFTUNGSSTUFEN	115
6	ANHANG A2: OPTIMIERTES REGELSCHEMA DER LBS HANNOVER.....	120
7	ANHANG A3: DEFINITION DER KLAPPENGRUPPEN DER LBS HANNOVER	126
	LITERATURVERZEICHNIS	130
	NORMEN UND RICHTLINIEN.....	134



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A_g	m^2	Geometrische Öffnungsfläche
A_w	m^2	Wirksame Öffnungsfläche
C_{CO_2}	ppm	Kohlendioxidkonzentration
CFD		Computational Fluid Dynamics
c_z	-	Korrekturfaktor für die Berechnung der wirksamen Öffnungsfläche
EnEV		Energieeinsparverordnung
g	-	Gesamtenergiedurchlassgrad
LES		Large Eddy Simulation
Q	Wh	Wärmemenge
q	W/m^2	Wärmestrom
RANS		Reynold Averaged Navier Stokes
S	W/m^2	Solarstrahlungsdichte
TDS		Thermodynamische Simulation
τ	-	Tageslichtdurchlässigkeit
U	W/m^2K	Wärmedurchgangskoeffizient



1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt ATRIEN II ist Teil des Gesamtvorhabens aus ATRIEN I und ATRIEN II. Es hat zum Ziel, die Wirkung von Atrien auf das Energiekonzept und die Energieeffizienz von Gebäuden sowie Möglichkeiten einer verbesserten Integration der Atrien zu untersuchen. Die Erkenntnisse werden in einem Planungsleitfaden Architekten, Fachplanern und Gebäudebetreibern zugänglich gemacht.

In ATRIEN I wurden 14 Atriengebäude hinsichtlich ihrer Ausführung, Energieeffizienz und dem thermischen Verhalten der Atrien grob untersucht. Aus diesem Untersuchungsfeld heraus erfuhren drei Gebäude eine vertiefte messtechnische Untersuchung mit dem Ziel, das thermische Verhalten der Atrien zu analysieren, Optimierungspotentiale aufzudecken und Planungswerkzeuge anhand der gewonnenen Messwerte zu überprüfen.

In ATRIEN II wurde das Gebäude der Hauptverwaltung der LBS Nord in Hannover Kronsberg noch eingehender untersucht, mit dem Ziel, die Integration des Atriums in das Gesamtenergiekonzept zu verbessern und Optimierungspotentiale auszuschöpfen um letztendlich die Energieeffizienz zu verbessern. Thermisch - dynamische und numerische Simulationsprogramme begleiten den Optimierungsprozess und es werden abschließend Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen dieser Planungswerkzeuge aufgezeigt. Das fortgeführte Monitoring dient der Erfolgskontrolle der umgesetzten Maßnahmen.

Bei der vertieften Untersuchung des Gebäudes der LBS konnte aufgezeigt werden, dass Möglichkeiten der Nutzung solarer Wärmegewinne während der Heizperiode ungenutzt bleiben, wenn die Atriumtemperatur zugunsten der Vegetationsruhe der innenliegenden Bepflanzung begrenzt wird und Außenluft für die Belüftung des Kerngebäudes mechanisch gefördert und thermisch konditioniert wird, anstatt die solar vorgewärmte Luft der Grünhöfe durch natürliche Fensterlüftung für das Kerngebäude nutzbar zu machen. In der Kühlperiode überhitzte das Atrium stark und die Raumtemperaturen im Kerngebäude waren trotz hohen Kühlenergieverbrauchs unbehaglich. Währenddessen blieben Belüftungsöffnungen des Atriums ungenutzt, weil die Gebäuderegulierung nur eine verzögerte Öffnung der Lüftungsklappen veranlasste und die RWA - Klappen in der Horizontalverglasung im Regelbetrieb gar nicht geöffnet wurden.

Es wird messtechnisch nachgewiesen, dass eine natürliche Lüftung des Kerngebäudes während der Heizperiode zu keinerlei Beeinträchtigungen der Luftqualität führt und es



wurden die für die Optimierung geplanten Regelkonzepte im Vorfeld in Ihrer Wirkung getestet. Weiterhin wurde durch Messungen und numerischen Untersuchungen nachgewiesen, dass die mechanische, konditionierte Belüftung einen unwesentlichen Teil zur Gebäudebeheizung beiträgt und diesbezüglich verzichtbar ist.

Die LBS hat das optimierte Konzept zur Neuprogrammierung der Gebäuderegulung umgesetzt und sämtliche Lüftungsklappen inkl. der RWA – Klappen in den Regelbetrieb integriert sowie neue Sensoren für die Gebäuderegulung installiert und bestehende neu positioniert. In der optimierten Regelung wird die Belüftung und damit die Temperatursteuerung des Atriums auf den Heiz- oder Kühlbedarf des Kerngebäudes abgestimmt anstatt wie zuvor autark vom Kerngebäude zu reagieren. Während der Kühlperiode wird die Belüftung maximiert und durch gezielte Klappensteuerung Auftriebseffekte für eine verbesserte Nachtauskühlung genutzt. Die für die innenliegende Bepflanzung erforderliche Vegetationsruhe, die die zulässige Maximaltemperatur im Atrium während der Heizperiode vorschreibt und somit zu einer unerwünschten Abkühlung des gesamten Luftraumes führte, wurde zeitlich minimiert und durch eine optimierte Klappensteuerung räumlich auf die Bepflanzung begrenzt, mit dem Ziel die Wärmeverluste des Kerngebäudes zu minimieren. Die Laufzeiten der Belüftungsanlage sind während der Heizperiode reduziert und die Nutzer angehalten, bei Bedarf die Fenster zum Atrium zu öffnen, um solar vorgewärmte Frischluft zu beziehen. Die nun CO₂ – geführte Belüftung garantiert, dass die Raumluftqualität trotzdem erhalten bleibt.

Im Ergebnis wird durch die verbesserte Integration des Atriums in das Gesamtenergiekonzept des Gebäudes eine Einsparung an Heizenergie in 2011 von 21 % und eine Einsparung von Kühlenergie von 2 % bei verbessertem sommerlichen Raumklima erzielt.

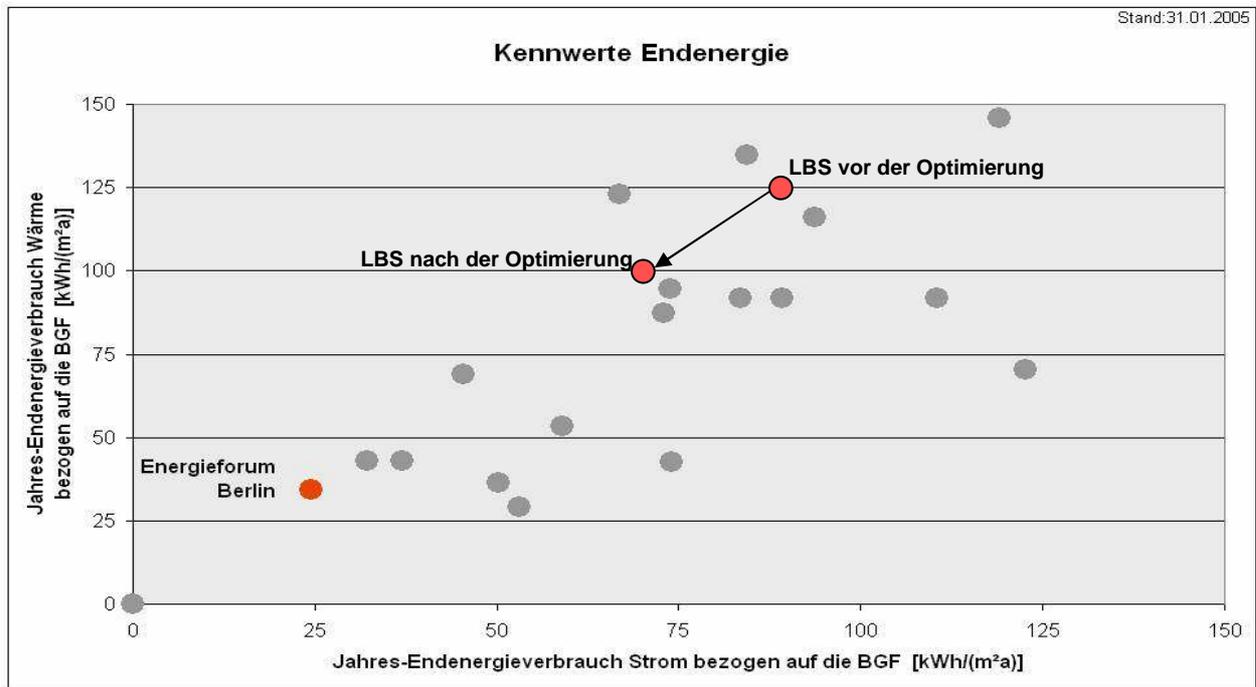


Abbildung 1 Energiekennwerte verschiedener Bürogebäude aus EVA. Darin die der LBS vor der Optimierung (Mittel aus den Jahren 2007 – 2010) und nach der Optimierung (2011)

Es wird weiterhin aufgezeigt, in welcher Form CFD – Simulationsprogramme (CFD) und Thermisch - Dynamische Simulationsprogramme (TDS) für die Prognose des Temperaturniveaus in Atrien geeignet und welche Anwendungsweisen nicht zulässig sind. So sind TDS hilfreich, um Randbedingungen für die stationäre CFD zu liefern, wenn es darum geht Wärmespeichereffekte der sonnenbeschienenen atriumseitigen Flächen zu berücksichtigen. Es wird nachgewiesen, dass diese nicht vernachlässigbar sind, wenn das kritische sommerliche Raumklima in einem Atrium prognostiziert werden soll. Adiabate Randbedingungen sind hierfür ungeeignet. Die Problematik der Berücksichtigung von Wind bei der Berechnung des Luftwechsels in einem Atrium wird beschrieben. Während in der gängigen Betrachtung Windaufkommen mit einer Erhöhung des Luftwechsels einhergeht, wird gezeigt, dass diese Aussage nur bedingt gültig ist, wenn zusätzlich ein thermischer Auftrieb bei der Belüftung zum Tragen kommt. Dazu führte das Institut für Rechnergestützte Modellierung im Bauwesen LES - Berechnungen durch, die hinsichtlich der Darstellung fluktuierender Strömungen geeigneter sind als RANS - Methoden. Die Turbulenz sowohl im Inneren des Atriums als auch außerhalb des Gebäudes hat einen erheblichen Einfluss auf den Luftaustausch im Atrium. Durch die äußere Turbulenz fluktuieren die Drücke an den

Lüftungsöffnungen und im Inneren des Atriums wird die Durchmischung der Raumluft durch die Turbulenz erheblich beeinflusst. Es bleibt offen, inwieweit RANS - Methoden die windbeeinflussten Effekte darzustellen vermögen.

Das Gesamtprojekt aus ATRIEN I und ATRIEN II schließt mit einem Leitfaden, der wesentliche Erkenntnisse des Projektes zusammenfasst, siehe Tabelle 1. Er soll eine kurz gefasste Hilfestellung für Architekten und Fachplaner bieten, die Fehlannahmen bei der Planung von Atrien vermeidet und die richtige Nutzung von Planungswerkzeugen ermöglicht, um das Atrium energetisch sinnvoll in das Gesamtgebäude zu integrieren. Nur so ist es möglich, das Potential eines Atriums zur Erhöhung der Energieeffizienz des Gebäudes zu nutzen, anstatt den Energieverbrauch zu erhöhen. Denn auch wenn ein Atrium unweigerlich mit einer Erhöhung des Kühlenergieverbrauchs einhergeht, sind die Einsparungen an Wärmeverbrauch in der Lage diese zu überkompensieren, sofern das Atrium sorgfältig geplant und in das Energiekonzept integriert ist.

Tabelle 1 Einzelaspekte des Leitfadens

Integration des Atriums in das Energiekonzept	Berücksichtigung und Nutzbarmachung des Thermischen Verhaltens des Atriums
Thermisches Verhalten der Atrien	Temperaturgradienten Temperaturverteilung in der ganzjährigen Betrachtung für repräsentative Atrien
Vegetationsruhe	Anforderungen der Vegetationsruhe innenliegender Bepflanzung an das Raumklima
Regelung der Atrien	Nutzbarmachung solarer Wärmegewinne und Vermeidung sommerlicher Überhitzung
Konstruktive Empfehlungen	Verglasung, Lüftungsöffnungen, Bauteilmassen
Berechnung des thermischen Verhaltens	Hinweise für die Anwendung von CFD- und Gebäudesimulationsprogrammen
Berechnung des Energiebedarfs von Atriengebäuden	Eignung der DIN EN 18599 oder Gebäudesimulationsprogramme



2 Analyse und Optimierung der LBS

Die Optimierung des LBS – Gebäudes in Hannover bildet einen der Schwerpunkte im Forschungsprojekt. Das aufgedeckte Optimierungspotential bzgl. einer verbesserten Einbindung der Grünhöfe in das Energiekonzept des Gebäudes wird durch vertiefende Untersuchungen spezifiziert und findet Eingang in ein überarbeitetes Regelkonzept der Gebäudeleittechnik. Nach der Umsetzung bzw. Neuprogrammierung der Gebäudeleittechnik wird das Monitoring des Raumklimas und des Energieverbrauchs fortgesetzt mit dem Ziel, die Wirkung der Maßnahmen zu studieren und zu bewerten.

2.1 Verwaltungsgebäude der LBS Nord in Hannover Kronsberg

Das untersuchte Gebäude war bereits im ersten Teilprojekt ATRIEN I Gegenstand einer vertieften Untersuchung. Dabei wurden Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. In diesem Forschungsprojekt sollen die Optimierungsmaßnahmen, die auf eine bessere Integration der Atrien in das gesamte Energiekonzept hinauslaufen, umgesetzt und evaluiert werden.

Das Gebäude verfügt über eine Brutto-Grundfläche von 26.736 m² und besteht aus 5 Einzelgebäuden, die weitestgehend von einer Glasfassade überdeckt sind. Lediglich die Westfassaden grenzen an die Außenluft an, bei den außenliegenden Gebäuden zusätzlich die Nord- und die Südfassade. Auf der Ostseite befinden sich Erschließungsflächen der Gebäude, siehe Abbildung 2 bis Abbildung 3. Zwischen den Gebäuden befinden sich die sogenannten Grünhöfe. Diese sind über die Gebäude C und E miteinander verbunden. Der erste Grünhof zwischen den Gebäuden A und B wird konditioniert und ist nicht Bestandteil der Untersuchungen. Die anderen Grünhöfe sind nicht konditioniert und werden lediglich über die Luftklappensteuerung klimatisch geregelt. Die einzelnen Gebäude verfügen im Gebäudekern über eine Kombizone mit einem zentralen Atrium. Zur Differenzierung werden im Folgenden die Bezeichnungen „Grünhof“ für die Bereiche zwischen den Gebäuden und „Atrium“ für die innenliegenden Bereiche in den Gebäuden verwendet, siehe Abbildung 4.

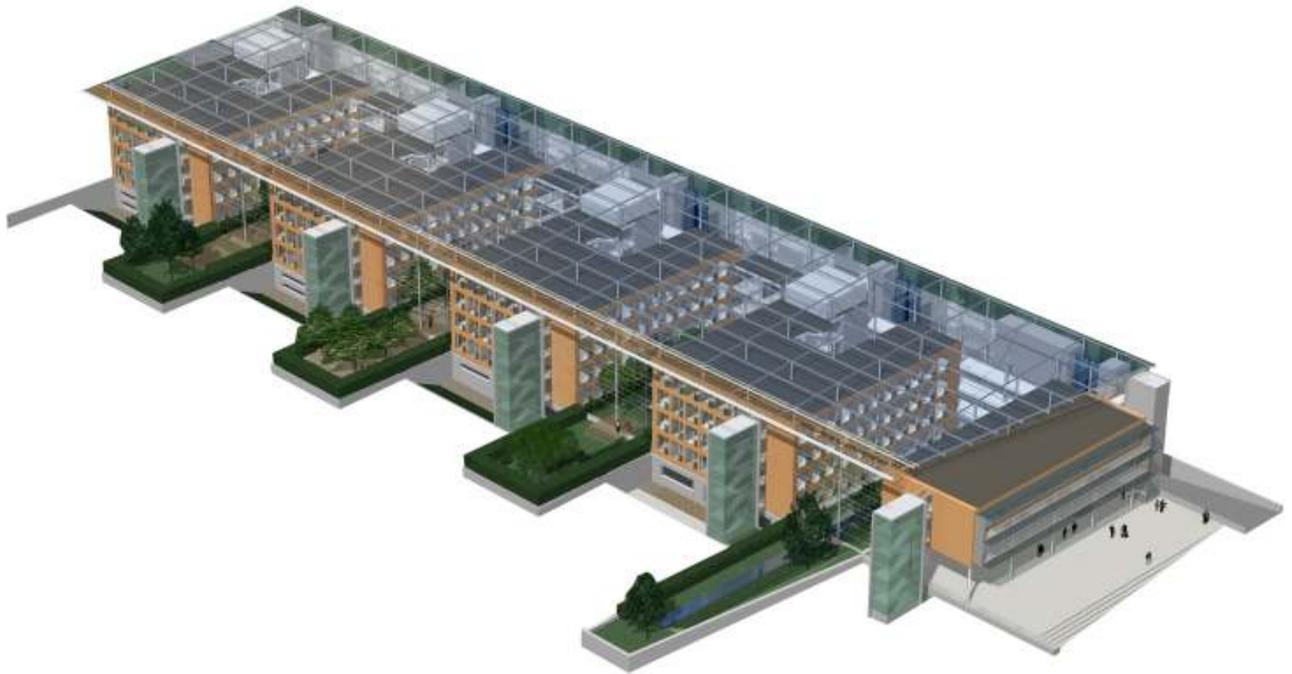


Abbildung 2 Außenansicht des Gebäudes, Architekt: Pysall Stahrenberg, Braunschweig

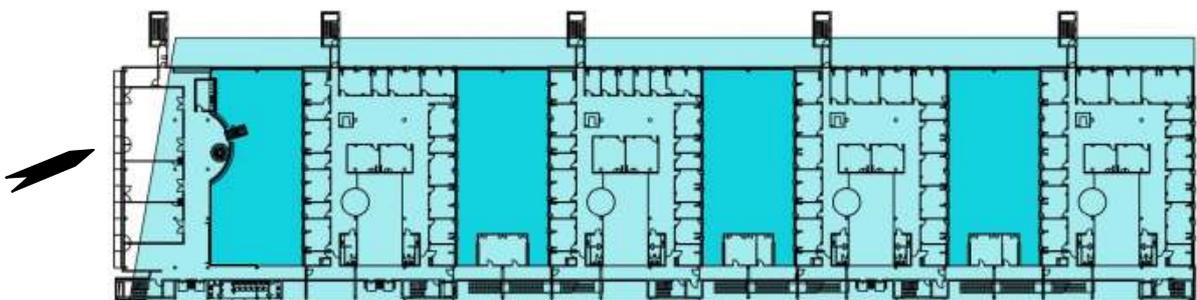


Abbildung 3 Grundriss, Lage der Grünhöfe zwischen den Einzelgebäuden

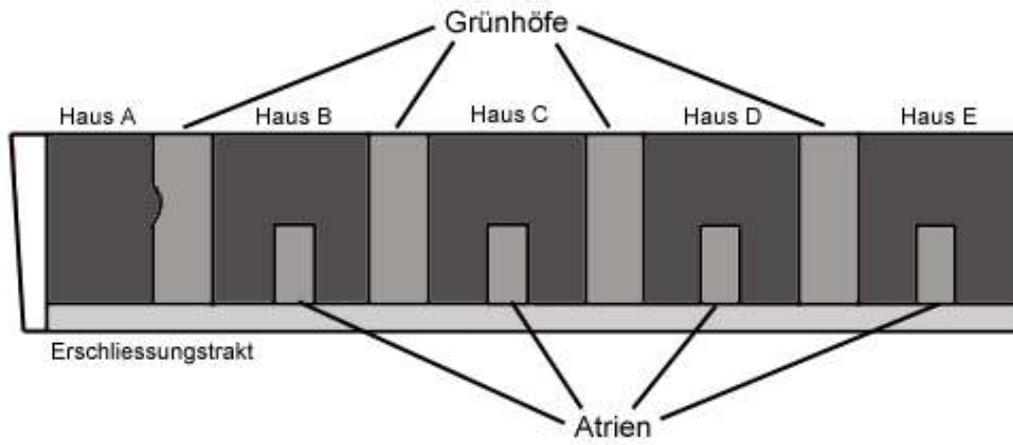


Abbildung 4 Abgrenzung Grünhöfe / Atrien



Abbildung 5 Gebäudeschnitt und schematische Darstellung des Belüftungskonzeptes



Abbildung 6 Erschließungsgang im Grünhof; Blick in den Grünhof

Die Büroräume verfügen über eine mechanische Belüftung, die Entlüftung erfolgt in den Kombizonen, siehe Abbildung 7. Die Raumtemperatur lässt sich in Grenzen von +/- 2 K über eine Heiz- und Kühldecke steuern. Die Fenster zu den Grünhöfen sind öffnenbar.

Die Netto - Grundfläche beträgt 25.229 m², die Hauptnutzfläche 11.989 m². Die beheizte Nettogrundfläche, die als Bezugswert für die Energiekennwertbildung dient, beträgt 17.217 m².

Tabelle 2 Flächengrößen LBS

BGF	26.736m ²	Bruttogesamtfläche
NGF	25.229m ²	Inkl. unbeheizte Flächen
Grünhöfe (GH)	3.737m ²	Unbeheizt, aus Plänen
Tiefgarage (TG)	4.275m ²	Unbeheizt
NGF ohne GH undTG	17.217m²	Beheizte Nettogrundfläche

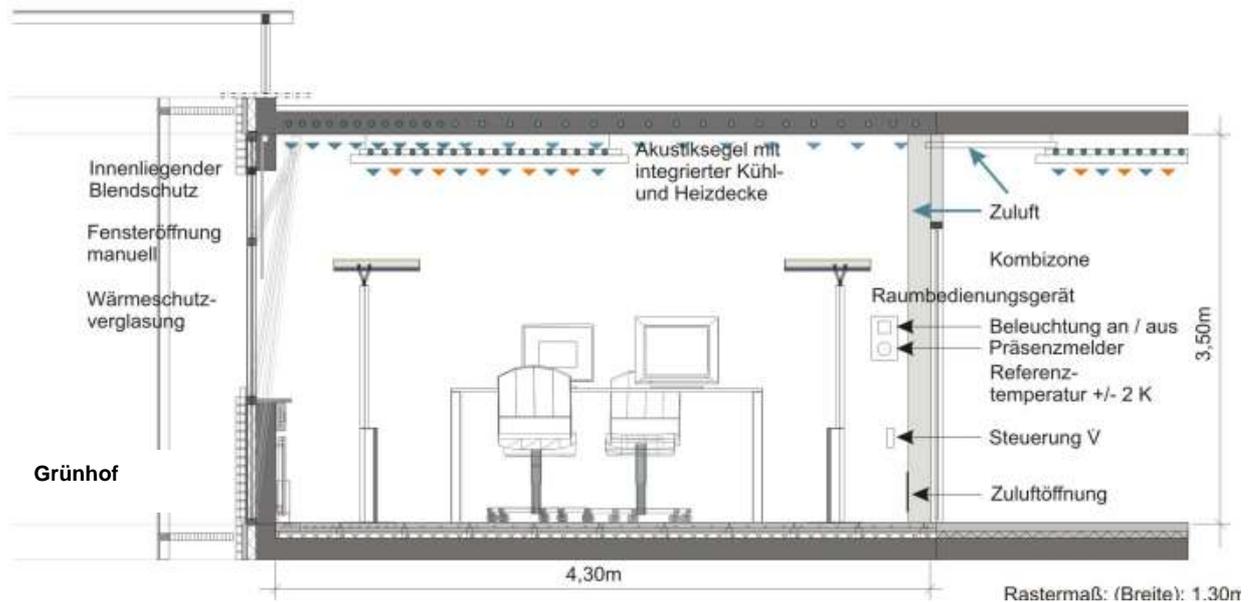


Abbildung 7 Konfiguration eines Standardbüros

Die Fassade der Grünhöfe ist mit einer Sonnenschutzverglasung des Types **Ipsol Natura 34/67** ausgestattet (g -Wert = 0,34). Je Grünhof sind jeweils auf der Ost- und Westseite 24 Lüftungsklappen angeordnet. (Für die Berechnung des hydraulisch wirksamen Querschnittes siehe Abschnitt 3.2 und [Quenzel], [DIN 18232-2].) Je Seite sind die Klappen auf drei horizontalen Reihen unterschiedlicher Höhe angeordnet. Die 13 Dachhauben je Grünhof werden im Ausgangszustand nur für den Entrauchungsfall herangezogen. Die Klappen werden in 10 verschiedenen Kombinationen, sogenannten Lüftungsstufen geöffnet. Die Lüftungsstufen und die schematische Darstellungen der Klappengruppen und Ihre Bezeichnungen finden sich im Anhang A3. Das Monitoring des Gebäudes erfolgt durch die Messung von Lufttemperaturen in einem Grünhof und zeitweise in den angrenzenden Gebäudezonen. Die Daten der Gebäudeleittechnik werden aufgezeichnet und zusammen mit den Messdaten mit der Software ENNOVATIS aufbereitet und ausgewertet.

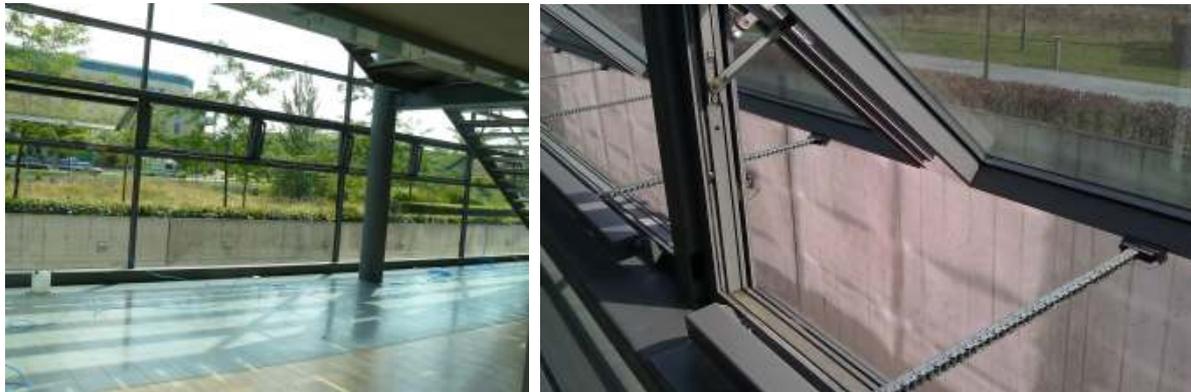


Abbildung 8 Unterste Klappenreihe auf der Ostseite

Tabelle 3 Lage und Höhe der Klappenreihen

	Westseite	Ostseite
Reihe 1	3 m	2 m
Reihe 2	6 m	13 m
Reihe 3	14 m	15 m
RWA	17 -19 m	

2.2 Untersuchung des gegenwärtigen Lüftungs-und Energiekonzeptes

2.2.1 Vorüberlegungen zur Optimierung des Energiekonzeptes

Während der Heizperiode stellt sich in den Grünhöfen aufgrund der Wärmeschutzverglasung eine Temperatur ein, die ca. 15 °C über der Außentemperatur liegt. Diese vorgewärmte Luft wird derzeit nicht für die Belüftung des Gebäudes nutzbar gemacht. Stattdessen werden die Büroräume mit erwärmter Außenluft mechanisch belüftet. Die einfachste Methode, die vorgewärmte Luft aus den Grünhöfen für die Belüftung der Kerngebäude nutzbar zu machen, besteht darin, die mechanische Belüftung auszustellen und die zum Grünhof ausgerichteten Büroräume über die Fenster natürlich zu belüften. Da die Zulufttemperatur bei natürlicher Fensterlüftung zu den Grünhöfen geringer ist als bei mechanischer Belüftung wird im Weiteren untersucht, ob die Heizleistung in den Büroräumen bei Fensterlüftung ausreichend ist. Darüber hinaus ist sicher zu stellen, dass der Mindestluftwechsel gewährleistet wird und zulässige CO₂ – Konzentrationen nicht überschritten werden. Ggf. wäre zu erwägen, Teilanlagen der mechanischen Belüftungsanlage in Betrieb zu nehmen. Die Lüftungsanlage teilt sich auf in einen Teil für die zu den Grünhöfen ausgerichteten Nord – Süd – Büros und den nach außen gerichteten West – Büros / Kombizone.



Für die Kühlperiode ist die Belüftung der Büroräume über die Grünhöfe ausgeschlossen, da die Luft dort überhitzt ist. Stattdessen muss weiterhin mechanisch mit Außenluft belüftet werden. Die Grünhöfe werden trotz starker Überhitzungen nicht mit den zur Verfügung stehenden Lüftungsöffnungen belüftet, da diese entweder aufgrund der Steuerung noch keine Öffnungsanforderung erhalten haben oder nicht in die Regelung der Grünhöfe eingebunden sind. Hier sollte es das Ziel sein, während der Kühlperiode die Belüftungsquerschnittsflächen zu maximieren.

2.2.2 Experimentelle Voruntersuchungen

Folgende Versuche sind zur Untersuchung der geplanten Reduzierung der Laufzeiten der mechanischen Lüftungsanlage geplant:

- Da in einigen Büros bereits im Ausgangszustand das Raumklima als zu kalt empfunden wird, erfolgt dort zunächst eine Untersuchung mit einer Wärmebildkamera zur Auffindung der Ursachen.
- Ein unbenutzter Büroraum wird mit den erforderlichen internen Wärmelasten ausgerüstet und in einem mehrtägigen Versuch das Raumklima bei an- und abgeschalteter Lüftung untersucht.
- In einem 2-tägigen Versuch wird die Lüftung in einem Gebäudeteil während der Nutzung abgestellt. Die Nutzer werden angewiesen im Bedarfsfall die Fenster zu den Grünhöfen zu öffnen. Währenddessen erfolgt das Monitoring des CO₂-Gehaltes der Raumluft und der Luft in den Grünhöfen, sowie des Raumklimas in ausgewählten Räumen.

2.2.2.1 Wärmebilduntersuchung einzelner Räume

Es lagen Nutzerbeschwerden bzgl. zu geringer Raumtemperaturen vor. Dies betraf ausschließlich Räume, die nach außen angrenzen (Westseite). Die Befragung der Nutzer und Wärmebildaufnahmen haben ergeben, dass Zugserscheinungen vor den Fensterflächen auftreten, siehe Abbildung 9. Zwar handelt es sich um eine Wärmeschutzverglasung aber das Bürokonzept sieht keine Konvektionsheizkörper vor der Außenfassade vor. So treten infolge des Kaltluftabfalls an der Außenfassade Zugserscheinungen insbesondere im Fußbereich der Nutzer auf. Die Lufttemperatur in den betroffenen Büros lag in allen untersuchten Fällen über 23°C in einem Fall sogar 26°C. Insofern kann festgestellt werden, dass die Ursache für Kälteerscheinungen nicht in einer mangelnden Heizleistung begründet sind, sondern im Kaltluftabfall vor der Außenfassade. Die Zugserscheinungen im Fußbereich werden durch die Nutzer mit einer zu geringen

Raumtemperatur assoziiert, obwohl dies nicht der Fall ist. Betroffene Mitarbeiter erhielten bereits zusätzliche elektrische Heizkörper zur Verfügung gestellt, die richtig angeordnet eine Lösung für extreme Kältephasen darstellen können. In zwei Räumen konnte keine funktionsgerechte Leistung der Heizdecke festgestellt werden, siehe Abbildung 10.

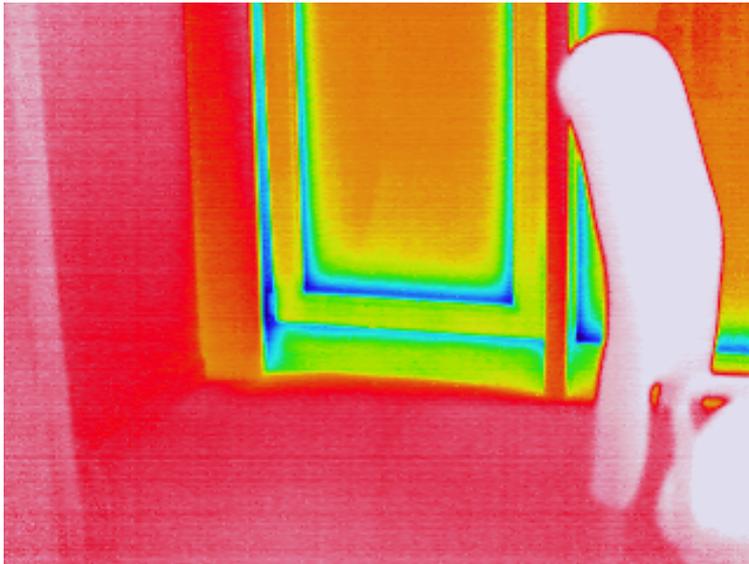


Abbildung 9 Kaltluftabfall an der Außenfassade

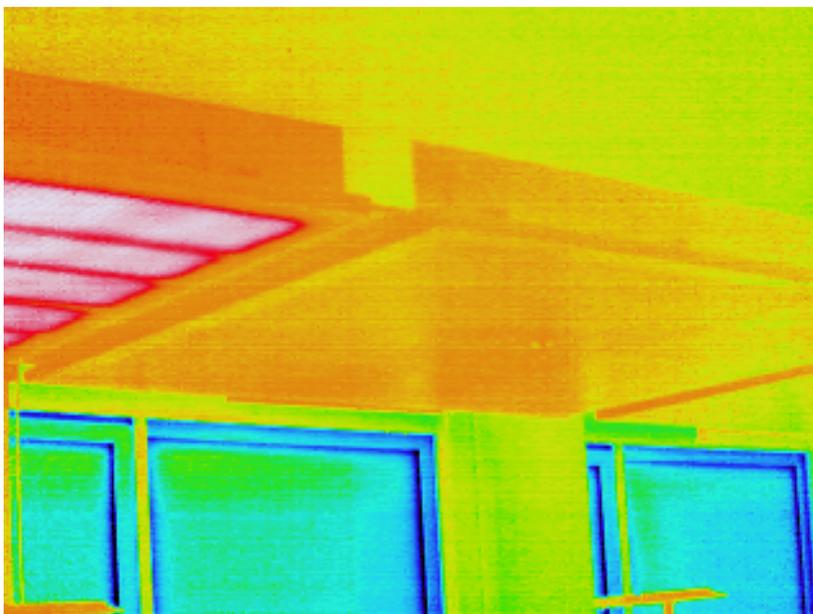


Abbildung 10 Aktive (links) und inaktive (rechts) Heizdecke

2.2.3 Kurzzeitversuch Abschaltung der Lüftungsanlage Ende Februar 2010

Da wiederholt Bedenken bestanden, ob bei abgeschalteter Lüftungsanlage die Luftversorgung insbesondere der innenliegenden Büroräume gewährleistet ist, erfolgte ein weiterer Kurzzeitversuch mit Schwerpunkt der Messung des CO₂-Gehaltes in der Raumluft in verschiedenen Büroräumen. Ein Büroraum ist zum innenliegenden Bereich, Atrium/Kombi ausgerichtet, die beiden anderen Räume zu den Grünhöfen. Alle Räume waren vollständig belegt. Die Messungen erfolgten über den Zeitraum von einer Woche. Die Lüftungsanlagen waren während der Versuchsdurchführung ausgestellt. Lediglich Toiletten und Raucherräume werden weiter mechanisch belüftet. Im Vorfeld erfolgte eine Kalibrierung der CO₂ Sensoren auf Basis der CO₂ Konzentration der Außenluft (380 ppm) als Abgleich der Sensoren untereinander, so dass die Abweichung der Sensoren untereinander maximal 20 ppm beträgt.

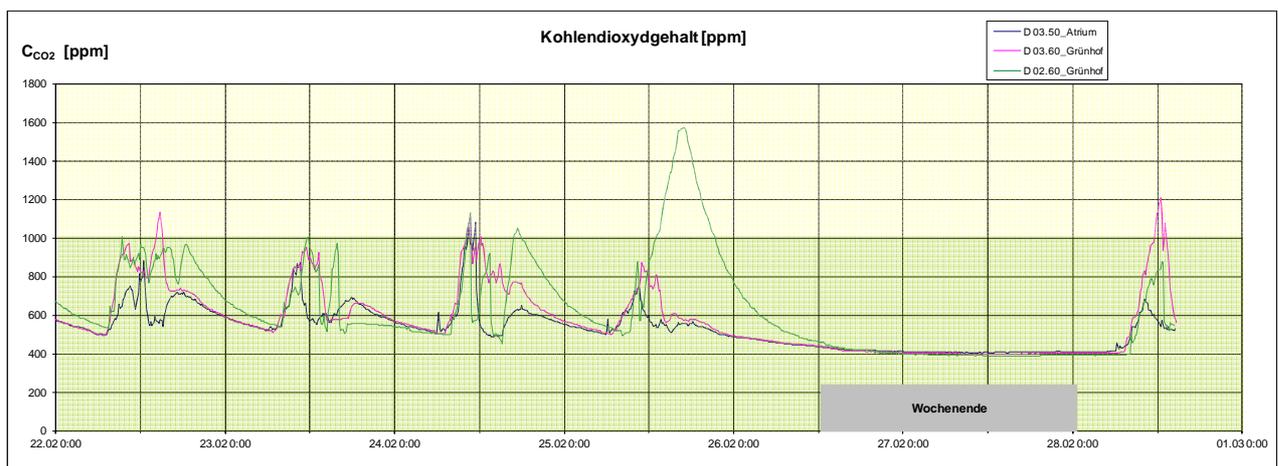


Abbildung 11 CO₂-Konzentration in den untersuchten Räumen (farbliche Abstufung markiert die Pettenkofer-Grenze)

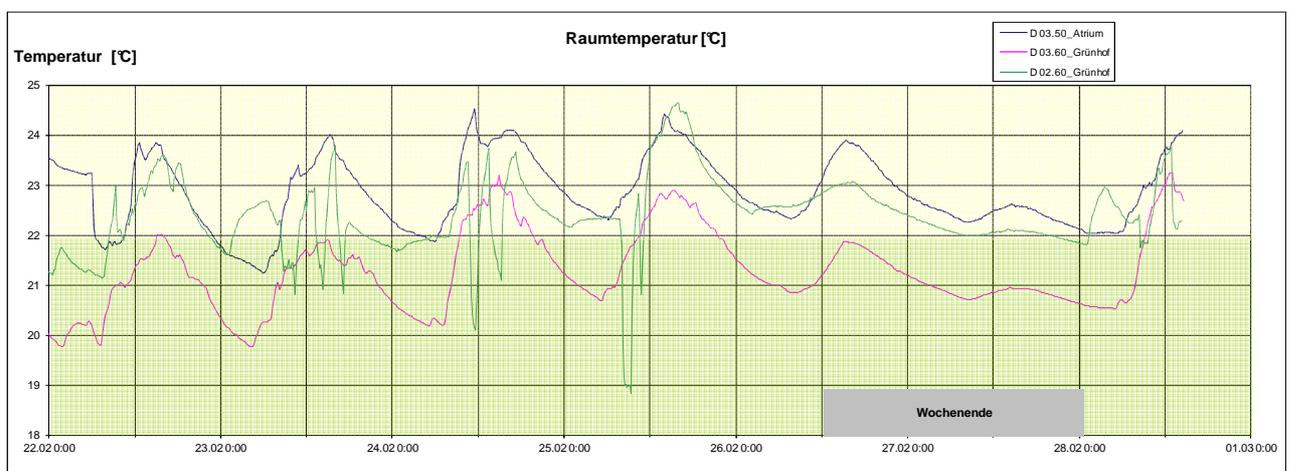


Abbildung 12 Lufttemperaturen in den untersuchten Räumen

Die CO₂-Konzentrationen überschreiten die Pettenkofergrenze während des Versuchszeitraumes nur geringfügig. Sowohl am Verlauf der CO₂-Konzentration als auch der Raumlufttemperatur ist deutlich zu sehen, dass im Tagesverlauf mehrfach die Fenster geöffnet werden und die CO₂-Konzentration dadurch wirksam begrenzt werden kann. In einem Fall (Abbildung 11; Raum D 02.60 am 25.02.2010) erreicht die CO₂-Konzentration knapp 1600 ppm. Dort wurde von der Möglichkeit der Fensteröffnung kein Gebrauch gemacht, obwohl dies bei Raumtemperaturen oberhalb 23°C durchaus möglich gewesen wäre.

Am Wochenende sinkt die CO₂-Konzentration durch Infiltration auf Außenluftniveau ab. Die daraus berechnete Infiltrationsrate beträgt ca. 0,3 h⁻¹.

Neben der Pettenkofergrenze existiert die Klasseneinteilung für CO₂-Konzentrationen IDA 1 bis IDA 4 nach [DIN EN 13779:2007], siehe Tabelle 4. Nach dieser Einteilung bewegen sich die gemessenen CO₂ - Konzentrationen überwiegend im Bereich der Klasse IDA 2 (mittlere Raumluftqualität).

Tabelle 4 IDA Klassen nach DIN EN 13779:2007

Kategorie	CO ₂ -Gehalt der Raumluft (bei einer Außenluftkonzentration von 380 ppm), in ppm
IDA 1 (hohe Raumluftqualität)	≤ 780
IDA 2 (mittlere Raumluftqualität)	780 - 980
IDA 3 (mäßige Raumluftqualität)	980 - 1380
IDA 4 (niedrige Raumluftqualität)	> 1380

2.2.4 Simulationsuntersuchung

Ein Einzelbüro wird mit einem thermischen Simulationsprogramm nachgestellt, um zu prüfen wie sich die Abschaltung der mechanischen Lüftung auf das Raumklima auswirkt. Folgende Randbedingungen werden angesetzt:

Tabelle 5 Randbedingungen der thermischen Simulation

Interne Lasten	235 Watt + tageslichtabhängige Leuchte während der Nutzungszeiten 7:00 bis 16:00 (inkl. Personenabwärme)
Heizleistung Heizdecke	625 W
Verglasung (95% der Außenfassade)	g-Wert 0,63; Lichttransmission 0,79; U-Wert 1,6 W/Km ²
Außenklima	Entspricht Klima im Grünhof, während der Heizphase: ca. 12°C
Ausgangsvariante mechanische Lüftung	2-fach
Prüfvariante natürliche Lüftung zu den Grünhöfen	Natürliche Lüftung nach Bedarf, wenn die CO ₂ Konzentration 1000 ppm übersteigt

In der Ausgangsvariante (mechanische Lüftung) beträgt der CO₂-Gehalt tagsüber ca. 550 ppm. Da die mechanische Lüftung während der Abwesenheit weiterarbeitet, sinkt die Konzentration wieder auf das im Simulationsprogramm definierte Außenluftniveau von 350 ppm, siehe Abbildung 13.

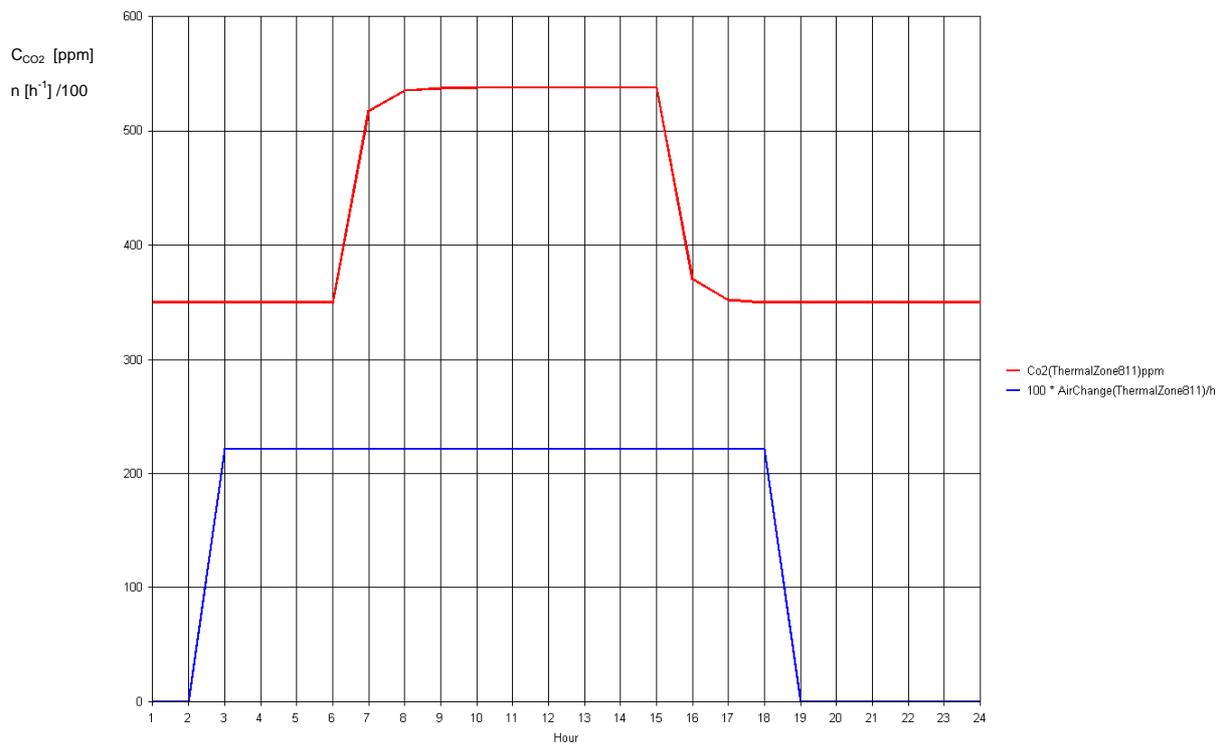


Abbildung 13 Variante mechanische Lüftung: Kohlendioxydkonzentration und Luftwechsel

Die gewünschte Raumtemperatur von 24°C wird ca. 3h nach Einschaltung der Heizdecke erreicht und gehalten solange die Heizdecke in Betrieb ist. Nachts fällt die Temperatur auf ca. 20°C ab, siehe Abbildung 14.

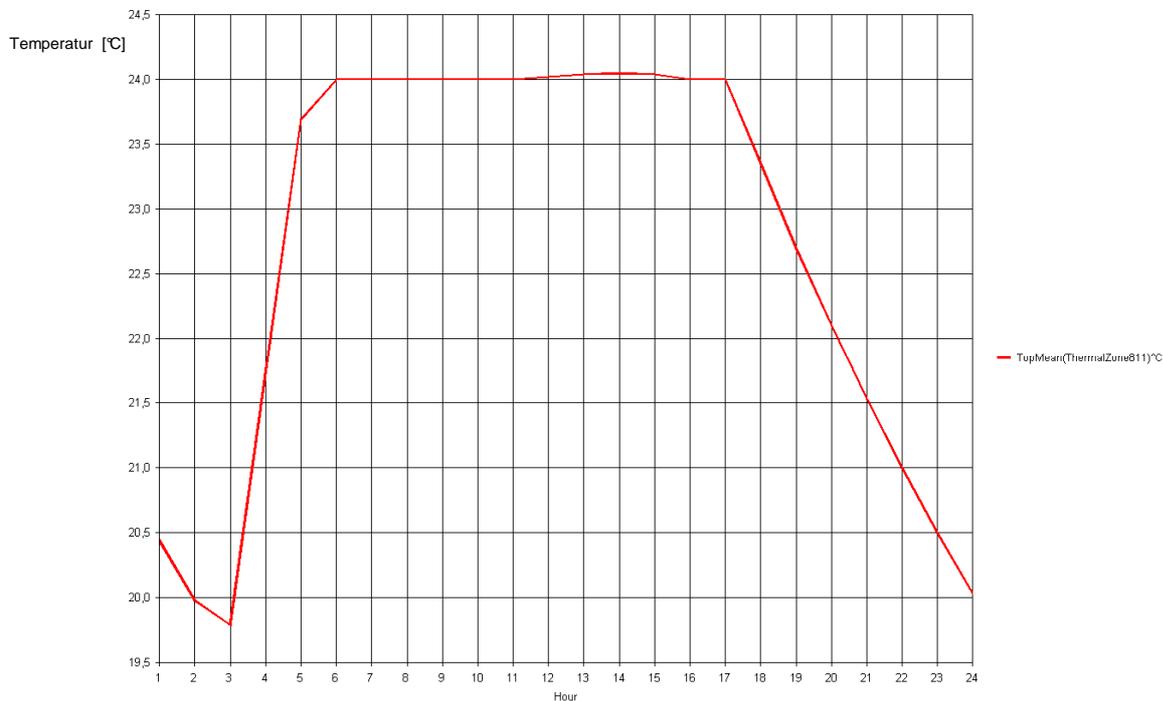


Abbildung 14 Variante mechanische Lüftung: Raumtemperatur

Die Energiebilanz in Abbildung 15 zeigt auf, dass nur in den ersten Stunden, während das Büro früh morgens ausgekühlt ist, die mechanische Zuluft einen Wärmeeintrag bewirkt (grüne Kurve), in der übrigen Zeit trägt sie zu einem Wärmeverlust bei. Dies ist der Fall, wenn die Zulufttemperatur (22°C) die Raumlufthtemperatur unterschreitet. Die Heizdecke ist nur früh morgens mit ihrer Maximalleistung von 625 W aktiv (blaue Kurve). Während der Nutzeranwesenheit und der Inbetriebnahme der elektrischen Geräte im Büro (rote und orange Kurve) fällt die Leistung stark ab und geht gegen Mittag auf Null zurück. Erst nachdem der Nutzer das Büro verlässt und die internen Wärmelasten wegfallen, steigt die Leistung der Heizdecke wieder auf 200 W an.

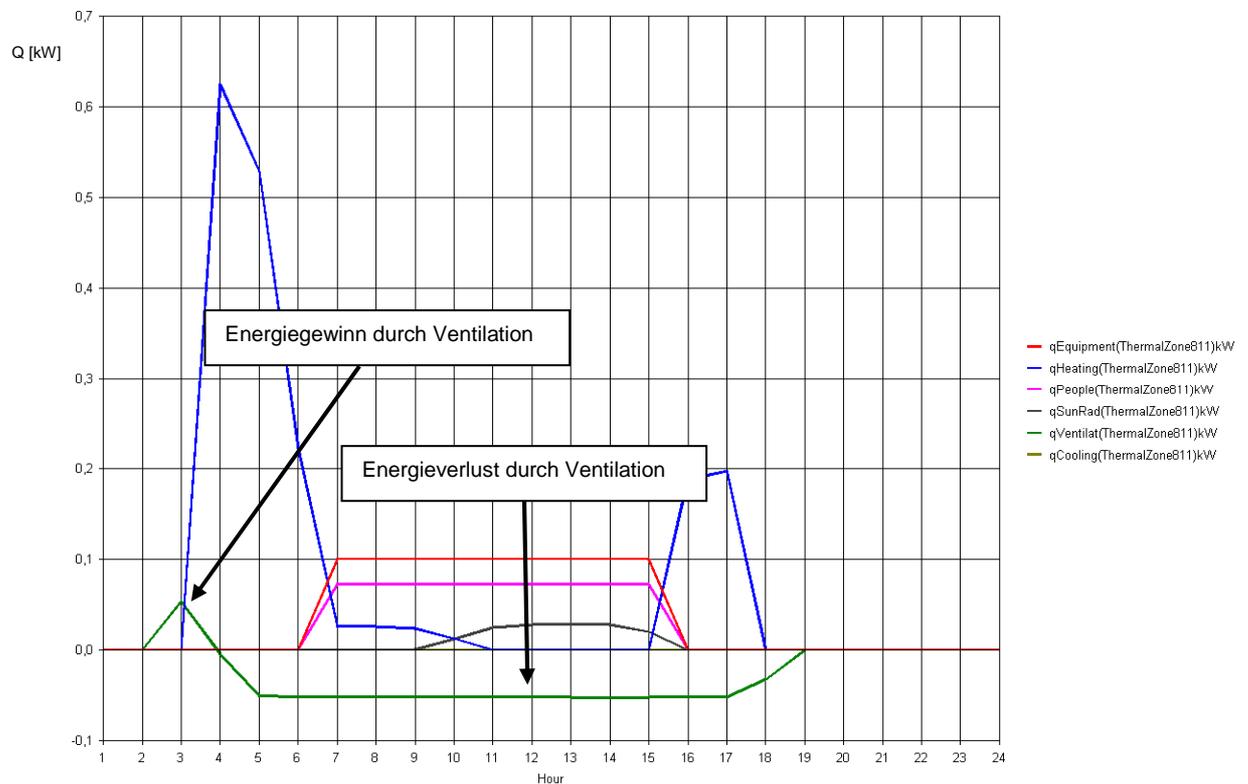


Abbildung 15 Variante mechanische Lüftung: Energiebilanz

Die Variante mit natürlicher Lüftung zum Grünhof weist eine CO₂-Konzentration von 1000 ppm auf, siehe Abbildung 16. Dieser Wert wurde als Kriterium zum Öffnen des Fensters gesetzt. Der erforderliche Luftwechsel beträgt ca. 1 h⁻¹. Während der Personenabwesenheit fällt die Konzentration nicht weiter ab, da in dem Simulationsmodell keine Infiltration berücksichtigt wurde.

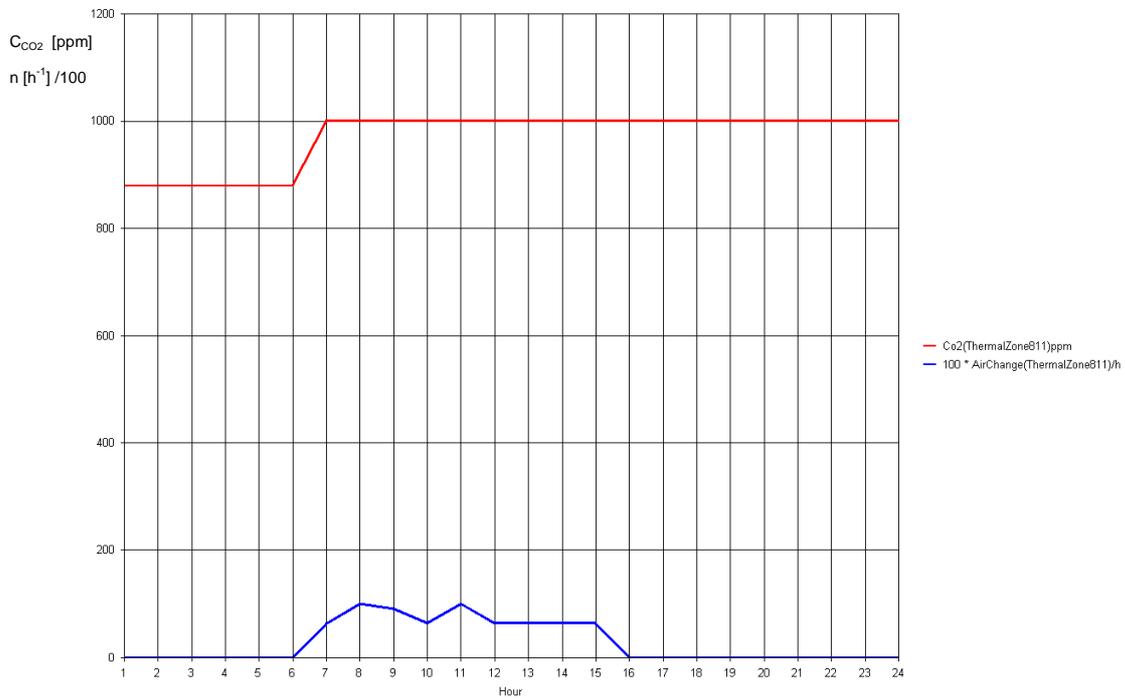


Abbildung 16 Variante natürliche Lüftung: Luftwechsel und Kohlendioxydkonzentration

Auch bei der natürlichen Lüftung wird die Soll – Raumtemperatur von 24°C gegen 6:00 Uhr erreicht und fällt nachts auf ca. 20°C ab, siehe Abbildung 17.

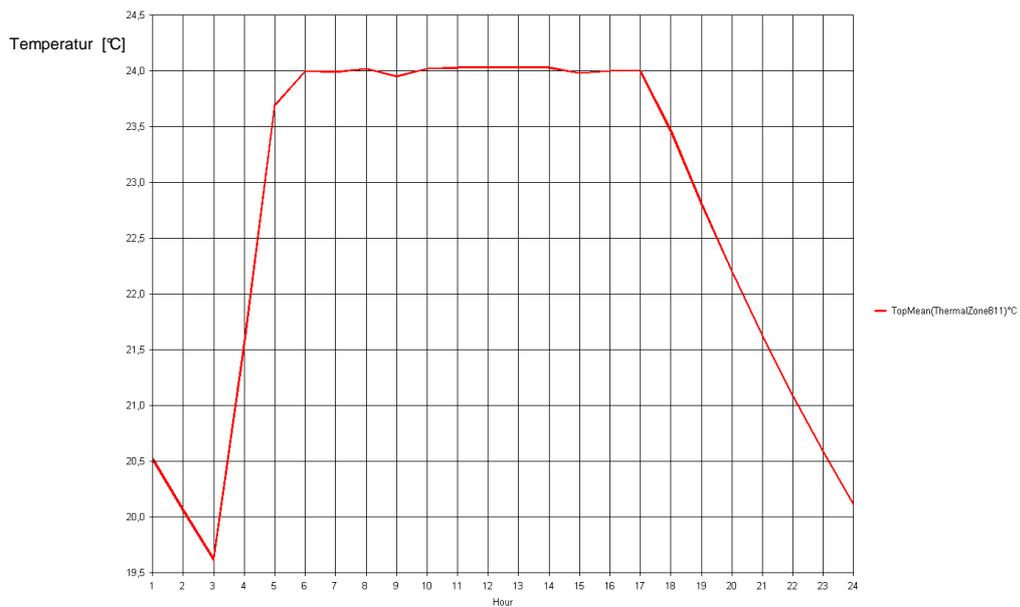


Abbildung 17 Variante natürliche Lüftung: Raumtemperatur

Die maximale Heizleistung wird wie bei der Variante mit mechanischer Lüftung nur morgens abgerufen und fällt bei Personenanwesenheit stark ab. Im Gegensatz zur mechanischen Lüftung fällt sie jedoch nicht ganz auf Null ab, zusätzlich sind zu den inneren Wärmelasten ca. 50 Watt Heizleistung erforderlich um die Soll - Temperatur zu halten. Der maximale Lüftungswärmeverlust beträgt ca. 80 W, bei der mechanischen Lüftung ca. 50 W.

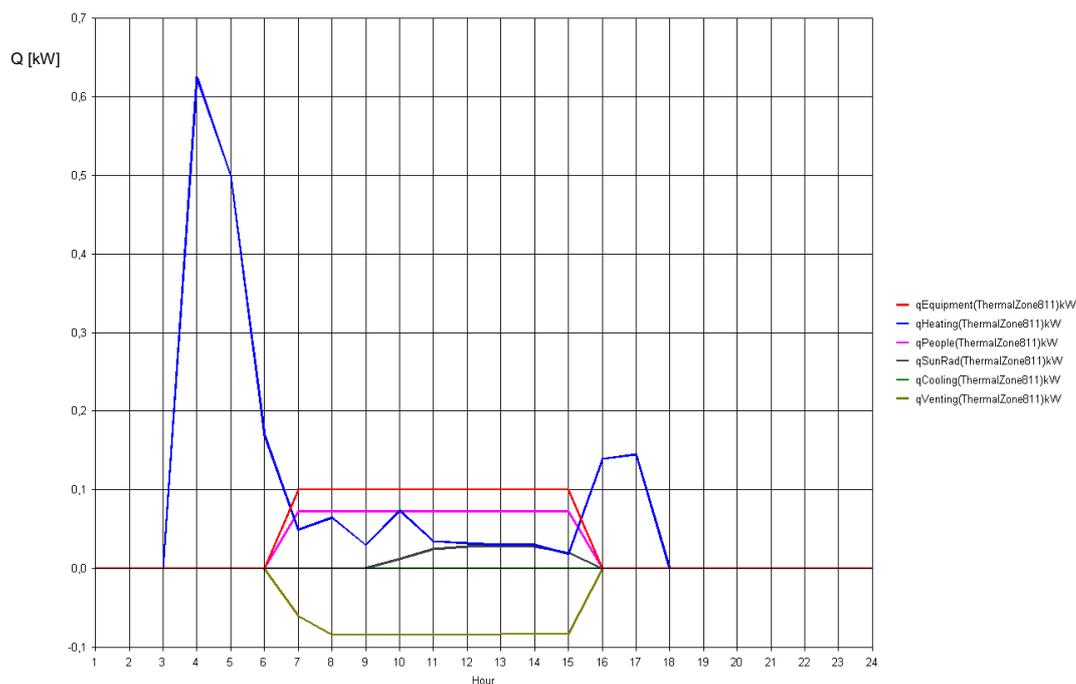


Abbildung 18 Variante natürliche Lüftung: Energiebilanz

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mechanische Belüftung nur einen geringfügigen Beitrag zur Beheizung der Büroräume leistet, während in der überwiegenden Zeit durch die mechanische Belüftung eine Wärmeabfuhr erfolgt. Durch natürliche Lüftung ist der Wärmeverlust (bezogen auf die Wärmebilanz im Raum) zwar höher, aber durch die Heizdecke weiterhin kompensierbar. Insofern ist nicht durch eine Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit durch die Umstellung auf natürliche Lüftung während der Heizperiode zu rechnen.



2.2.5 Kurzzeitversuch 27.04 - 29.04.2010 Untersuchung alternativer Belüftungskonzepte

Der Kurzzeitversuch umfasst Tage, an denen sowohl sommerliche als auch winterliche Außenklimabedingungen herrschen. Das ursprüngliche Messkonzept sah vor, im abgestuften Verfahren mechanische und natürliche Lüftung zu kombinieren. Tatsächlich ist es nicht möglich, nur die Zu- oder Abluftanlage abzuschalten, da die Druckdifferenzen zwischen den Gebäudeteilen zu groß werden und Zugscheinungen auftreten bzw. die Türöffnung behindert wird. Weiterhin entspricht die Witterung am ersten Tag den Bedingungen der Heizperiode, am zweiten Tag ist aufgrund steigender Außentemperaturen Kühlung erforderlich. So ergibt es sich, dass zwei grundsätzliche Konfigurationen, wie sie später im Regelkonzept umgesetzt werden, vorab getestet werden können, siehe Tabelle 6. Die Lüftungsstufe 4 bezeichnet eine Öffnungskombination der Klappen, bei der nur die oberen Klappenreihen in den vertikalen Ost- und Westfassaden geöffnet sind, siehe auch Anhang A3. Die Vegetationsruhe der Bepflanzung bezeichnet die winterliche Phase eingeschränkten Wachstums, die Grünhoftemperaturen unterhalb 12°C erfordert. Außerhalb der Vegetationsruhe besteht praktisch keine obere Beschränkung der Grünhoftemperatur.

Tabelle 6 Durchgeführte Messungen. Bzgl der Klassifizierung der Lüftungsstufen siehe Anhang A3.

Belüftungsschema	Mechanische Lüftung	Grünhofklappen geöffnet	Atriumklappen geöffnet
Regulär Lüftungsstufe 4 (LS 4)	I	tlw. seitlich. gem. LS 4	0
Heizfall ohne Vegetationsruhe	0	0	0
Kühlfall	0	I	I

Zur Prüfung der Luftqualität im Falle einer Abschaltung der Lüftungsanlage erfolgt in einem Büroraum westseitig im EG des Gebäudes C die Messung des CO₂-Gehaltes der Raumluft während die Lüftungsanlage abgeschaltet ist. Der Versuch erstreckt sich über zwei Tage während am ersten Tag die Lüftungsanlage regulär in Betrieb und am zweiten Tag ausgeschaltet ist. Während des Versuchszeitraums unterschreitet die CO₂-Konzentration mit 500 ppm bei Weitem die Pettenkofergrenze (1000 ppm). Werden die Dachhauben der innenliegenden Atrien zur Forcierung der natürlichen Lüftung bei offenen Fenstern geöffnet, sinkt der CO₂-Gehalt nahezu auf Außenluftniveau.

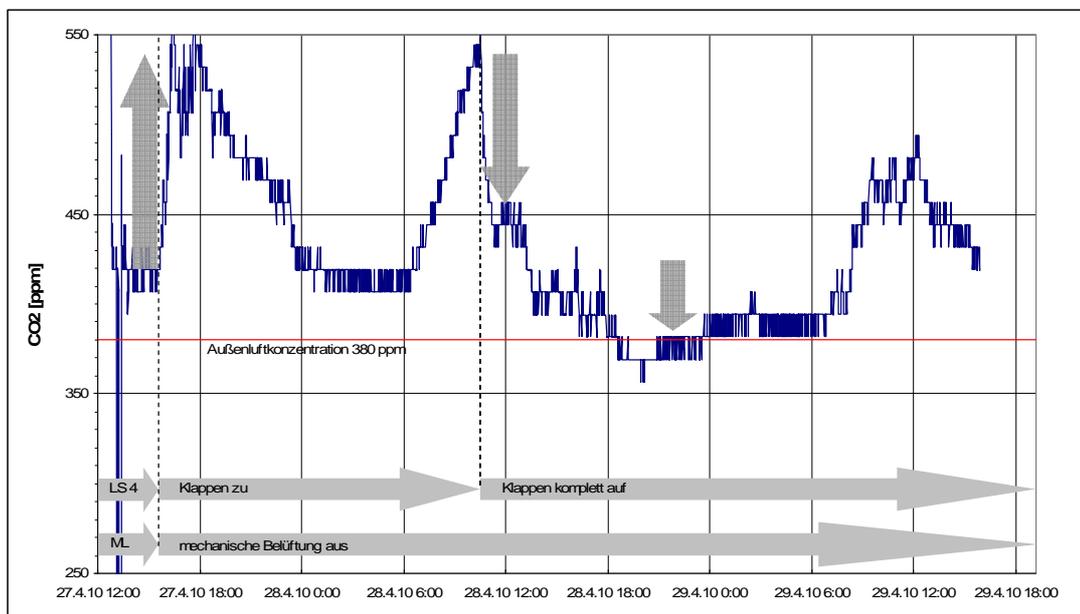


Abbildung 19 Verlauf der CO₂ Konzentration während des Kurzzeitversuches

Weiterhin erfolgte die Messung der Raumlufttemperaturen in drei Büroräumen in dem untersuchten Gebäude C, sowie in den Kombizonen der Gebäude C und D. Im Gebäude D ist zum Versuchszeitpunkt die Lüftungsanlage im regulären Betrieb und die Temperaturmessung in der Kombizone dient der Referenz zum untersuchten Haus C, siehe Abbildung 21 bis Abbildung 22. In den Büroräumen bewegen sich die Raumlufttemperaturen während des Versuchszeitraumes zwischen 22 und 28°C. Die Spitzentemperatur von 28°C wird in einem westseitigen Raum erreicht, während die Sonne am späten Nachmittag direkt in den Raum scheint. Von der Möglichkeit der Fensterlüftung zur Abkühlung wurde vom Nutzer kein Gebrauch gemacht. Die beiden anderen Räume auf der Nordseite weisen Lufttemperaturen zwischen 22°C und 25°C auf. Wenn das Fenster ganztägig geöffnet ist, unterschreitet die Lufttemperatur nur geringfügig 22°C.

Die Lufttemperaturen in den Kombizonen unterscheiden sich bei beiden Gebäuden um weniger als 0,5 K obwohl im Gebäude C keine Kühlung durch gekühlte Zuluft erfolgte.

Es kann festgestellt werden, dass die Abschaltung der Belüftungsanlage bei gemäßigten Außentemperaturen (9 - 23°C) zu keiner Einschränkung der thermischen Behaglichkeit führt, wenn man eine Raumlufttemperatur von 20 - 26°C als Behaglichkeitsbereich festlegt. Die gemessene Überschreitung von 26°C in einem Raum hätte durch Fensteröffnung vermieden werden können. Auch die Lufttemperaturen innerhalb der Kombizonen sind in beiden Gebäuden, mit und ohne mechanische Belüftung, nahezu identisch. Weiterhin kann der hygienisch notwendige Mindestluftwechsel mit natürlicher Lüftung aufrechterhalten werden. Die CO₂ – Konzentration liegt sogar unterhalb der CO₂ – Konzentration bei mechanischer Belüftung. Jedoch ist davon auszugehen, dass bei steigenden Grünhoftemperaturen insbesondere in den oberen Ebenen der Gebäude keine natürliche Lüftung zu den Grünhöfen möglich ist, da die Grünhoftemperatur i.d.R. über der Außentemperatur liegt. Dies würde die Kühllasten erhöhen, was im Widerspruch zu der Zielsetzung stünde. Daher wird während der Kühlperiode weiterhin mechanische Belüftung empfohlen.

Untersuchte Belüftungskonzepte

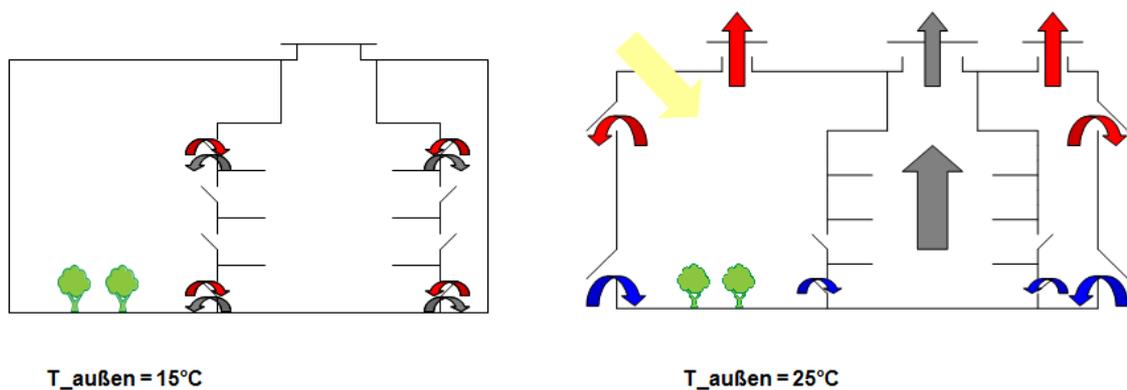


Abbildung 20 Schematische Darstellung der untersuchten Belüftungskonzepte

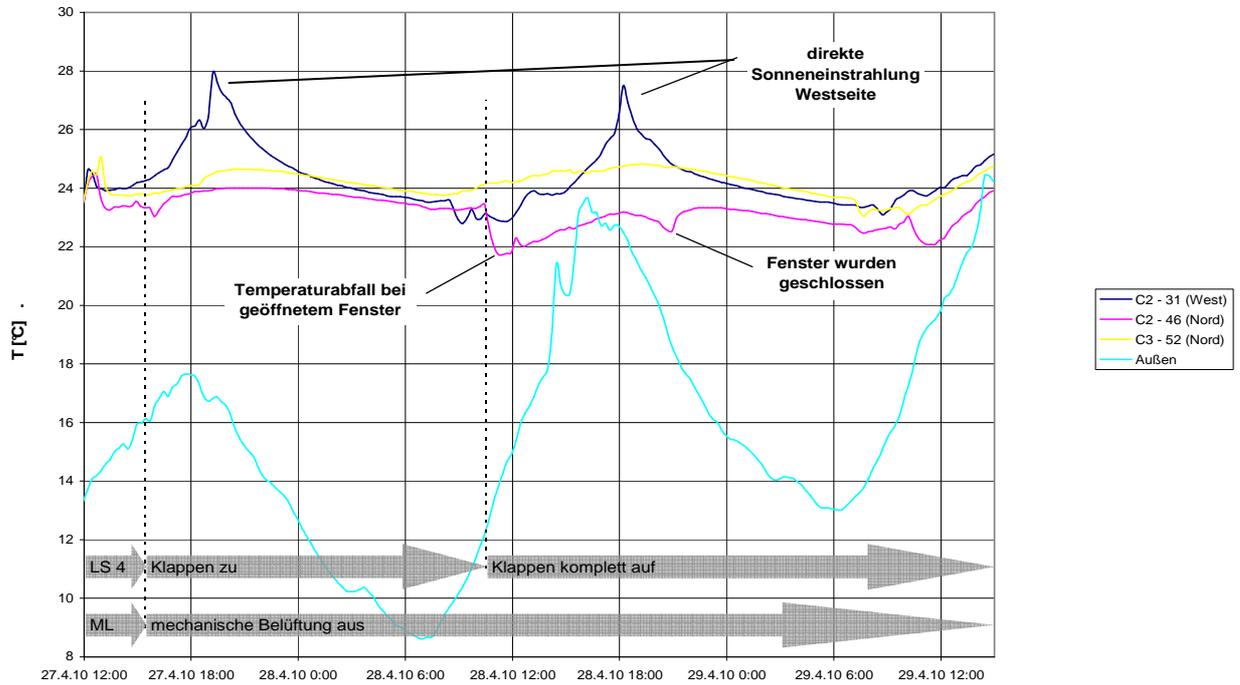


Abbildung 21 Verlauf der Raumlufttemperaturen in drei Referenzräumen während des Kurzzeitversuches

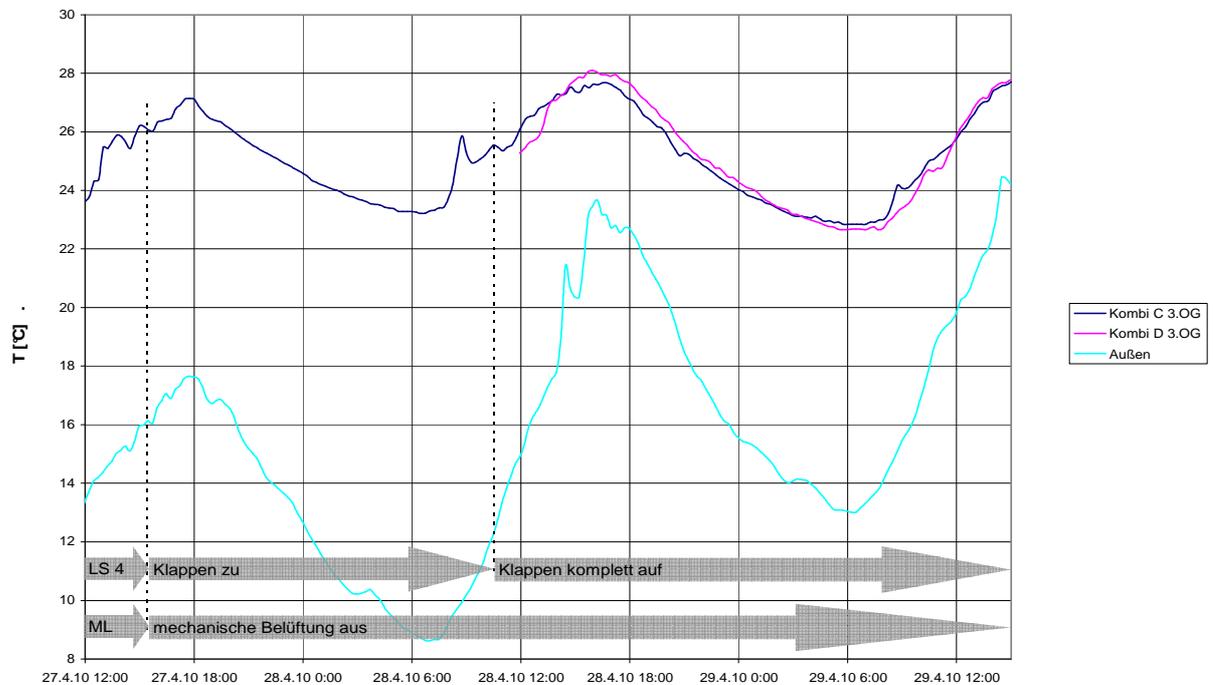


Abbildung 22 Verlauf der Lufttemperaturen in den Kombizonen während des Kurzzeitversuches

2.2.6 Kurzzeitversuch Februar 2011

Für ein innenliegendes Büro mit Ausrichtung zum Atrium erfolgt die Untersuchung der Auswirkung der Abschaltung der mechanischen Belüftung auf die Kohlendioxydkonzentration im Büroraum. Es wurden die Teil- und Vollabschaltung der Lüftungsanlagen untersucht. Die beiden Hauptlüftungsanlagen des Gebäudes versorgen unterschiedliche Bereiche. Ein Anlagenteil versorgt die zu den Grünhöfen ausgerichteten Nord-Süd Büros, der andere Teil, die Kombizone, die innenliegenden Räume und die an die Außenluft angrenzenden westlich gelegenen Räume.

Der untersuchte innenliegende Raum ist mit 2 Personen besetzt. Zum Vergleich erfolgt zunächst für einen Zeitraum von 4 Tagen die Aufnahme des Ausgangszustandes mit eingeschalteter Lüftungsanlage. Danach wird die Belüftungsanlage für zwei Tage komplett abgeschaltet. Anschließend wird die Teilanlage Kombi-West in Betrieb genommen, die die westseitigen an die Außenluft angrenzenden Büros und die zentral gelegenen Kombizonen versorgt. Die an die Grünhöfe grenzenden Büroräume werden weiterhin nicht mechanisch belüftet. Die erfassten Größen des Raumklimas sind:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Kohlendioxydgehalt



Abbildung 23 CO₂-Sensor mit Aufzeichnungsgerät in der Kombizone/Atrium



Abbildung 24 Sensoren für CO₂ und Lufttemperatur und relative Luftfeuchte



Abbildung 25 Im Vordergrund Messsensor in der Kombizone und im Hintergrund der untersuchte Büroraum (Pfeil)



Abbildung 26 Untersucher Raum D 03.50, 2 Arbeitsplätze, Messensoren (Pfeil)

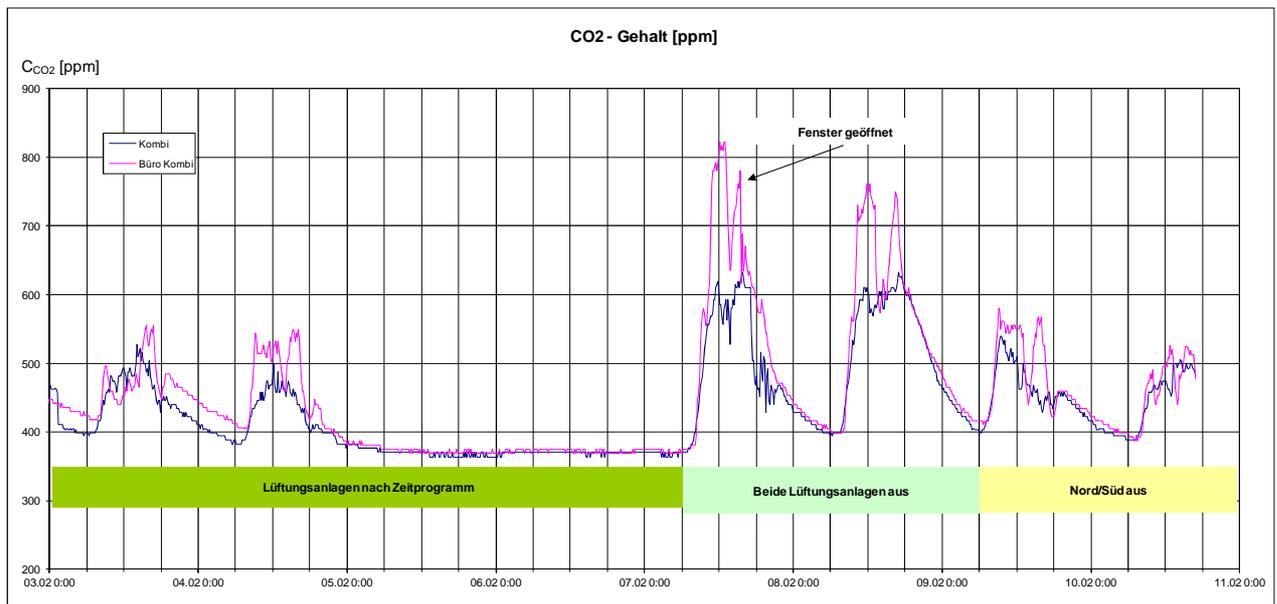


Abbildung 27 CO₂ Gehalt in der Kombizone und im angrenzenden Büroraum D 03.50

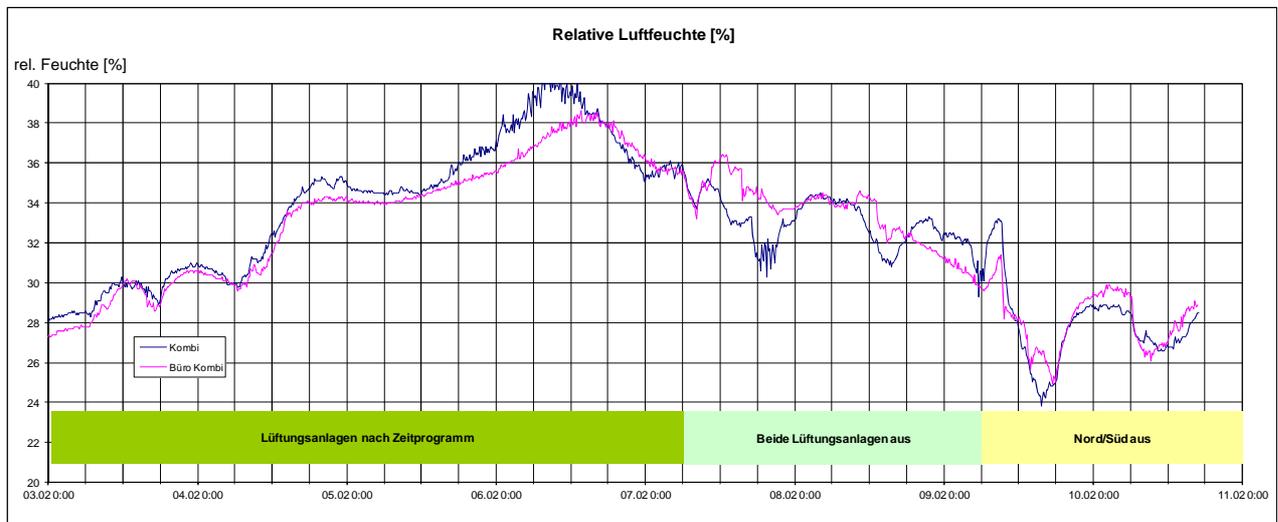


Abbildung 28 Relative Luftfeuchte in der Kombizone und im angrenzenden Büroraum D 03.50

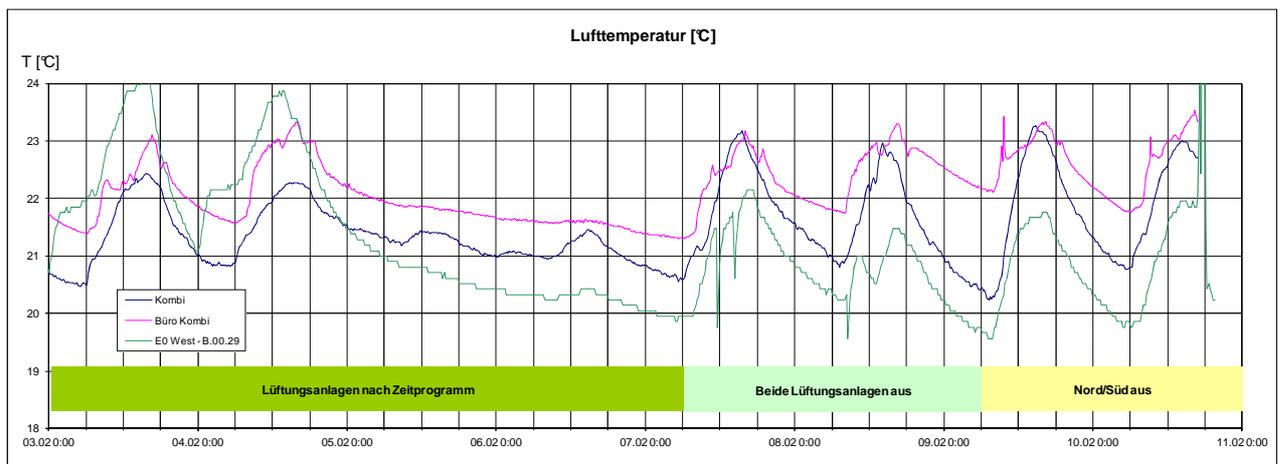


Abbildung 29 Lufttemperaturen im Kombi Bereich und in den Büroräumen D 03.50 und zum Vergleich eines Büroraumes im Gebäude B

Während der ersten beiden Tage im Ausgangszustand ist die Lüftungsanlage ganztägig in Betrieb und nur nachts während 6 h ausgestellt. Die Kohlendioxidkonzentration der Raumluft erreicht in der Kombizone einen Maximalwert von 520 ppm und im Büroraum 550 ppm. Während der Nacht klingt die CO₂-Konzentration nahezu auf den Wert der Außenluft ab. Werden beide Lüftungsanlagen abgestellt erreichen die CO₂-Konzentrationen 820 ppm im Büroraum und 620 ppm in der Kombizone. Die Nutzer des Büroraumes haben am 07.02. gegen 15:00 Uhr die Fenster zur Kombizone geöffnet und bis zum Ende der Versuchsdurchführung offen gelassen. Infolgedessen erreicht die CO₂-Konzentration am Folgetag nur noch 750 ppm statt 820 ppm am Vortag. Trotz abgeschalteter Lüftungsanlage sinkt während der Nacht die CO₂ - Konzentration



nahezu auf Außenluftniveau ab. Ursächlich hierfür dürften Infiltration, nach außen geöffnete Fenster und der Einfluss der restlichen in Betrieb befindlichen Lüftungsanlagen sein (Toiletten, Raucherräume). Eine überschlägige Abschätzung der Luftwechselzahl während der Nacht auf Basis der Gesetzmäßigkeiten der logarithmischen Abnahme der CO₂ - Konzentration (Kehrwert der Halbwertszeit der CO₂-Konzentration entspricht der Luftwechselzahl) ergibt einen Wert zwischen 0,15 bis 0,30 h⁻¹ . [ISO 16000-8] [Recknagel]

Während der letzten zwei Tage wird die Lüftungsanlage Kombi-Westbüros wieder eingeschaltet. Für das untersuchte Büro und die Kombizone ergeben sich ähnliche Werte wie im Ausgangszustand beim Betrieb beider Lüftungsanlagen.

Die Abschaltung der Lüftungsanlagen hat einen positiven Effekt auf die relative Luftfeuchte. Da die Zuluft nicht befeuchtet wird, sinkt die relative Feuchte der Raumluft während der Heizperiode auf 24% ab. Während beide Lüftungsanlagen abgeschaltet sind, steigt die relative Raumluftfeuchte auf über 30% an. Bei alleinigen Betrieb der Nord-Süd Anlage werden im Kombi-Bereich wieder die ursprünglichen Werte erreicht. Die Lufttemperatur wird zum Versuchszeitpunkt ebenfalls in einem an die Außenluft angrenzenden Westraum im EG erfasst, da festgestellt werden soll, ob infolge der Abschaltung der Belüftungsanlage eine Absenkung der Temperatur festgestellt werden kann, siehe Abbildung 29. Erwartungsgemäß ist dies nicht der Fall, da die Zulufttemperatur unterhalb der Raumtemperatur liegt. Jedoch ist zu verzeichnen, dass während der Abschaltung beider Lüftungsanlagen die Fenster zur Stoßlüftung drei Mal geöffnet wurden. Infolgedessen sinkt die Raumtemperatur um ca. 1 K, erreicht aber nach einer halben Stunde wieder den Ausgangswert.

Es kann somit zusammenfassend festgestellt werden, dass bei vollständiger Abschaltung der Belüftungsanlagen die CO₂ - Konzentration in einem innenliegenden vollbesetzten Büro zwar ansteigen, aber die zulässige CO₂ - Konzentration unterhalb der Pettenkofer-Grenze von 1000 ppm eingehalten wird. Die relative Luftfeuchte steigt bei abgeschalteter Lüftungsanlage im Heizfall etwas an, so dass ausgehend vom Ausgangszustand mit zu niedriger Luftfeuchte diesbezügliche eine leichte Verbesserung verzeichnet werden kann. Eine Einschränkung der thermischen Behaglichkeit ist auch durch die Fensterlüftung nach außen nicht gegeben. Die Raumtemperatur fällt bei einer Stoßlüftung nur kurzfristig ab.

2.2.7 Untersuchung der mechanischen Belüftung

Während der Heizperiode trägt die mechanische Lüftung nicht zur Beheizung der Räume bei, so dass natürliche Belüftung möglich wäre. Während der Kühlperiode stellt die mechanische Belüftung einen unverzichtbaren Anteil an Kühlleistung dar, da die Zuluft gekühlt wird. Die Kühldecken sind alleine nicht in der Lage den Kühlbedarf zu decken. Jedoch ist der Kühlbedarf in den oberen Ebenen höher, so dass erwogen wird, die Volumenströme entsprechend anzupassen.

Zunächst erfolgt mit Hilfe einer Volumenstromhaube und einem Anemometer des Herstellers Airflow (Modell TA5) die Prüfung des Volumenstromes in einzelnen Büroräumen in allen Ebenen des Gebäudes, siehe Abbildung 30. Der Soll- Volumenstrom in der Ausgangsvariante beträgt 60 m³/h pro Lüftungsstele, die in der Regel einen Arbeitsplatz versorgt. Anschließend wird der Volumenstrom sukzessive in den unteren Ebenen verringert und in den oberen Ebenen erhöht (bis zu 80 m³/h). Die Reduktion erfolgt indem an jeder Lüftungsstele der Volumenstromregler auf den entsprechenden Wert eingestellt wird. Es ergibt sich ein äußerst inkonsistentes Bild der tatsächlich gemessenen Volumenströme. Weder wurde in allen Räumen der Sollwert von 60 m³/h eingehalten, noch ließen sich die gewünschten Werte erzielen.

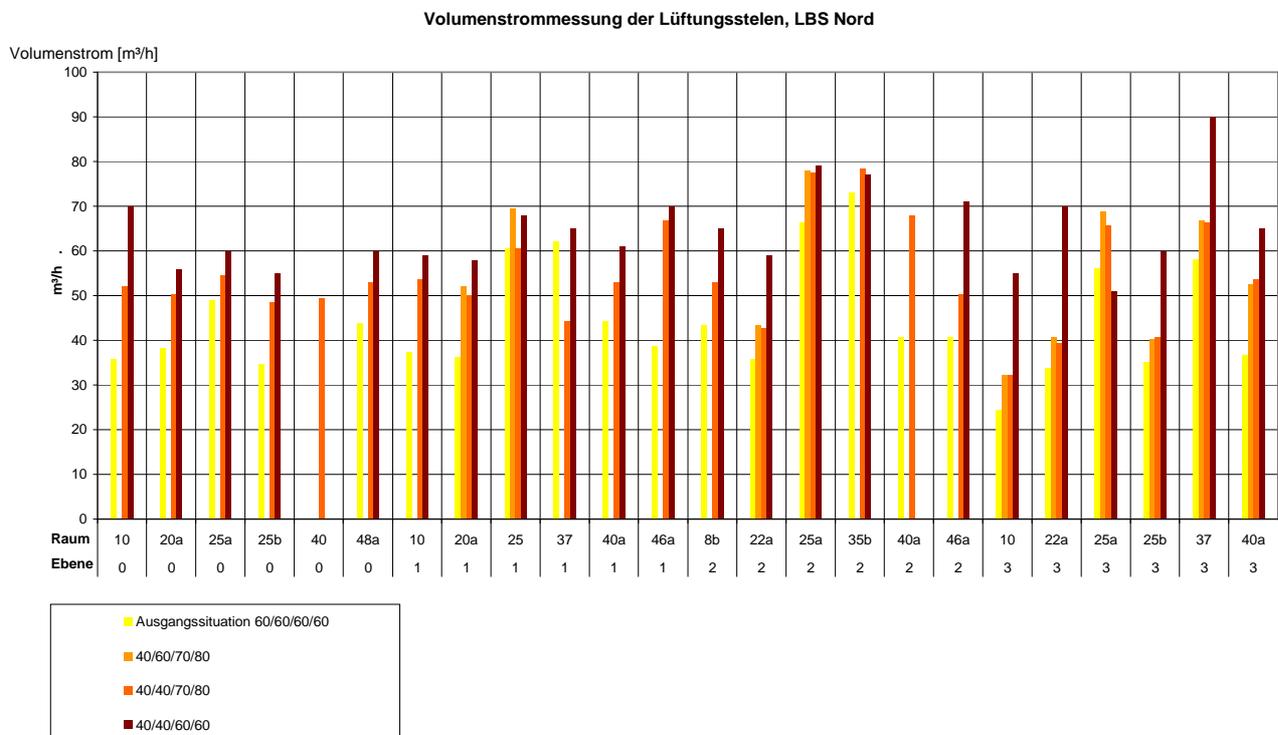


Abbildung 30 Gemessene Volumenströme an einzelnen Lüftungsstellen bei verschiedenen Einstellungen (die Bezeichnung 40/40/60/60 bedeutet, dass in den Ebenen E0 und E1 40 m³/h und Stele eingestellt war und in den Ebenen E2 und E3 60 m³/h)

Aufgrund dessen ist eine Überprüfung der Volumenstromregler und des Verteilernetzes erforderlich geworden. Jede Lüftungsstele verfügt über Volumenstromregler, der den Volumenstrom auf 60 m³/h reguliert. Es besteht der Verdacht, dass diese Regler nicht funktionsgerecht arbeiten. Daher erfolgt die Überprüfung eines ausgebauten Volumenstromreglers im Labor des IGS. Zur Volumenstrombestimmung wird das Tracergasverfahren angewendet [DIN ISO EN 12569].



Abbildung 31 Volumenstromregler der Firma TROX (Quelle: TROX)



Abbildung 32 Messeinrichtung der Volumenstromregler, im Vordergrund das Gebläse, durch den blauen Schlauch erfolgt die Tracergasinjektion



Abbildung 33 Volumenstromregler im Laborversuch

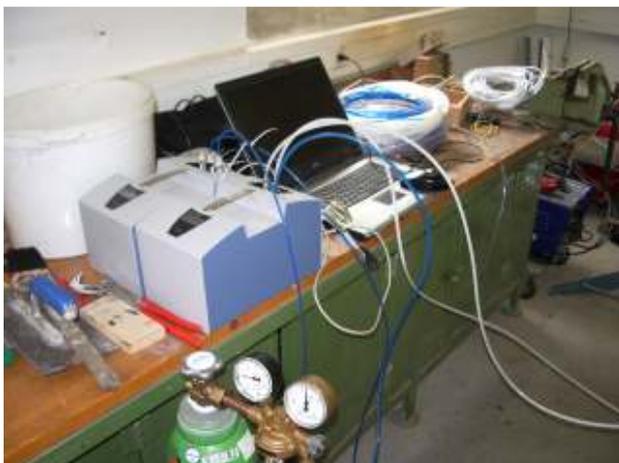


Abbildung 34 Messeinrichtung für die Tracergasinjektion und -messung

Die Prüfung eines Volumenstromreglers im Labor bestätigt jedoch seine Funktionsfähigkeit, allerdings hat sich gezeigt, dass ein Mindestdruck anliegen muss, damit der Volumenstromregler einwandfrei arbeitet.

Daher wird das Verteilersystem erneut untersucht, wobei sich herausstellt, dass der Mindestdruck in allen Bereichen nur dann anliegt, wenn die Lüftungsgeräte die maximale Leistung erbringen und der Auslegungsvolumenstrom von 60 m³/h pro Lüftungsstele nicht überschritten wird. Weiterhin fehlte für die Versorgung der Kombizonen im untersuchten Gebäude ein Volumenstromregler, so dass der Druck im gesamten Netz abfällt. Der fehlende Volumenstromregler wurde daraufhin ersetzt.

Daraus folgt, dass weder eine Reduzierung der Gesamtleistung der Lüftungsgeräte möglich ist, noch das Verteilernetz und der Regelbereich der Volumenstromregler für eine von der Auslegung abweichenden Luftverteilung geeignet sind. Die einzige Möglichkeit zur Reduzierung der Volumenströme besteht darin, die Lüftungsanlagen intermittierend zu betreiben, also z.B. in stündlichen Intervallen an- und auszuschalten.

2.2.8 Prüfung des Außentemperatursensors der GLT

Zur Prüfung des Außenlufttemperatursensors der GLT wird die Außenlufttemperatur parallel im vom Gebäude unbeeinflussten Bereich (ca. 50 m Entfernung) durch einen eigenen Sensor erfasst und aufgezeichnet. Der Temperatursensor befindet sich in einem Witterungs- und Strahlenschutz, siehe Abbildung 35. Der Sensor befindet sich 2,0 m über dem Boden und wird durch den Baum verschattet.



Abbildung 35 Außentemperatursensor des IGS

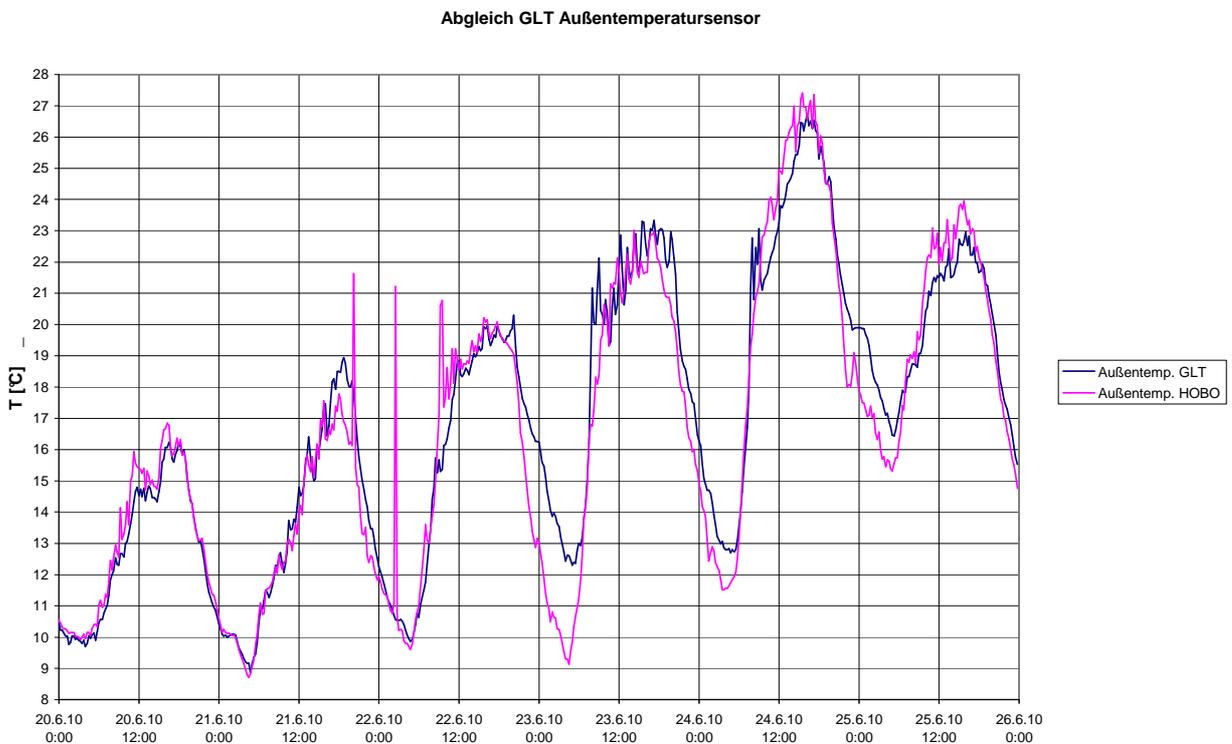


Abbildung 36 Abgleich GLT-Sensor und IGS-Sensor („Hobo“)

Eine direkte Gegenüberstellung der gemessenen Werte ergibt tagsüber eine weitestgehende Übereinstimmung zwischen beiden Sensoren. Die Abweichung beträgt i.d.R. maximal 1 K. Nachts ist zuweilen durch den IGS-Sensor eine deutlich geringere Temperatur mit einer Differenz bis zu 3 K zu verzeichnen. Es ist anzunehmen, dass in windstillen Nächten die Abwärme des Gebäudes und der umschließenden befestigten Flächen den Fassadennahen GLT-Temperatursensor beeinflusst.

Insgesamt liegt die Abweichung im Toleranzbereich, da weitere ungewollte Einflussfaktoren, wie z.B. Witterungsumschwünge, auf die Regelung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Möglichkeit einer Fehlregelung haben.

2.2.9 CFD-Untersuchung zur Optimierung des Raumklimas der Grünhöfe

Es wird erwogen die Belüftung und Verschattung der Grünhöfe hinsichtlich folgender Aspekte zu optimieren:

1. Durch hinzuziehen der RWA in der horizontalen Verglasung und bisher ungenutzter Klappen in der vertikalen Fassade sollen die Lüftungsquerschnitte für die Kühlperiode maximiert werden um die Überhitzung der Grünhöfe zu reduzieren.



2. Über den Dächern der Kerngebäude wird eine innenliegende Verschattung erwogen mit dem Ziel, die in die Grünhöfe einfallende solare Strahlung zu reduzieren, ohne die Tageslichtversorgung der Büroräume einzuschränken.
3. Die in 2. erwähnte Verschattung wird auf die gesamte Dachfläche ausgeweitet.

Die Grünhöfe werden im CFD – Programm FLUENT modelliert. Das CFD-Modell stellt einen Grünhof zwischen zwei Gebäuden dar. Die angrenzenden Grünhöfe sind durch Symmetrieebenen an den Modellgrenzen dargestellt, da unterstellt wird, dass sich die angrenzenden Grünhöfe thermisch gleich verhalten. Verwendet wird das Standard $k-\epsilon$ Turbulenzmodell und Standard Wandfunktionen. Für die Berücksichtigung des Auftriebes wird das Boussinesq - Modell verwendet. Der Wind wird nicht berücksichtigt. Für den Strahlungsaustausch zwischen den Innenflächen kommt das Discret Order - Strahlungsmodell (DO-Strahlungsmodell) zum Einsatz mit einer Diskretisierung von 5 Elementen je Winkalebene. Das DO-Strahlungsmodell führt zu einer Verdopplung des RAM-Bedarfs während der Berechnung. Allerdings ist das Strahlenmodell unverzichtbar, wenn die Verteilung der Wärmeenergie im Raum beurteilt werden soll. Andernfalls würde der Wärmetransport im Raum ausschließlich konvektiv erfolgen. Die Simulation erfolgt zeitunabhängig stationär.

Der Grünhof wird durch 2,5 Mio. Zellen dargestellt und die gröber aufgelöste Außenumgebung mit 1,2 Mio. Zellen. Insgesamt entspricht dies knapp 700.000 Knoten. Der Bedarf an Arbeitsspeicher beträgt rund 8 GB. Es müssen 700 Iterationsschritte bis zur ausreichenden Konvergenz berechnet werden. Maßgeblich sind hierbei sekundär die Residuen, primär markante Temperaturwerte, wie z.B. die durchschnittliche Raumtemperatur im Grünhof, die sich im Berechnungsverlauf einem Endwert annähern und bei weiteren Berechnungsschritten verharren. Mit einem Prozessor Intel I7 (ein genutzter Kern) entspricht dies einer Berechnungsdauer von rund 80h.

Die untersuchten Varianten der Sommerperiode sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 CFD-Varianten Sommerperiode, die rechte Spalte zeigt in den verschiedenen Gebäudeansichten die geöffneten Klappengruppen und Verschattungsflächen

00 Basisvariante Ist-Zustand: Lüftungsstufe 10 (maximale Klappenöffnung am Tag nach gegenwärtigem Regelkonzept)	Alle Klappen geöffnet bis auf: WK 6, WK 7, WK 11, WK 12, OK 6, OK 7, OK 11, OK 12, RWAs	Ost 	West 	Dach 	Verschattung 
01 Maximale Belüftung Alle zur Verfügung stehenden Klappen geöffnet	Alle Klappen der Ost und Westfassade sowie alle RWAs geöffnet				
02 Teil-Verschattung Lüftungsstufe 10; Horizontale Verschattung des Grünhofdaches über den Gebäuden	Alle Klappen geöffnet bis auf: WK 6, WK 7, WK 11, WK 12, OK 6, OK 7, OK 11, OK 12, RWAs Verschattung: z = 0,5				
03 Voll-Verschattung Lüftungsstufe 10; Horizontale Verschattung des Grünhofdaches über die gesamte Fläche	Alle Klappen geöffnet bis auf: WK 6, WK 7, WK 11, WK 12, OK 6, OK 7, OK 11, OK 12, RWAs Verschattung z = 0,5				

■ Geöffnete Klappen
 □ Geschlossene Klappen
 ■ Sonnenschutz

Tabelle 8 Randbedingungen der CFD-Untersuchung

Außenklima	Lufttemperatur 25°C Kein Wind Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes 21. Juni 12:00 (wahre Ortszeit): 61° Süd: 950 W/m ²
Übergangsbedingungen zu den Gebäuden	Kein Energie- und Luftaustausch zwischen Grünhof und Gebäuden (adiabater Zustand) (Dies entspricht der üblichen Vorgehensweise bei stationären Berechnungen, da der Einfluss aus Wärmespeicherung und unkontrolliertem Nutzerverhalten nicht abgeschätzt werden kann)
Fassaden	Verglasung: Ipasol Natura Gesamtenergiedurchlassgrad 0,36 ; Querschnitt der Lüftungsöffnungen im Modell entsprechend tatsächlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche skaliert (Hauben der RWA werden nicht dargestellt, dafür wird die Querschnittsfläche verringert)
Sonnenschutz	Sonnenschutzfaktor 0,5 (z.B. Soltis 86)

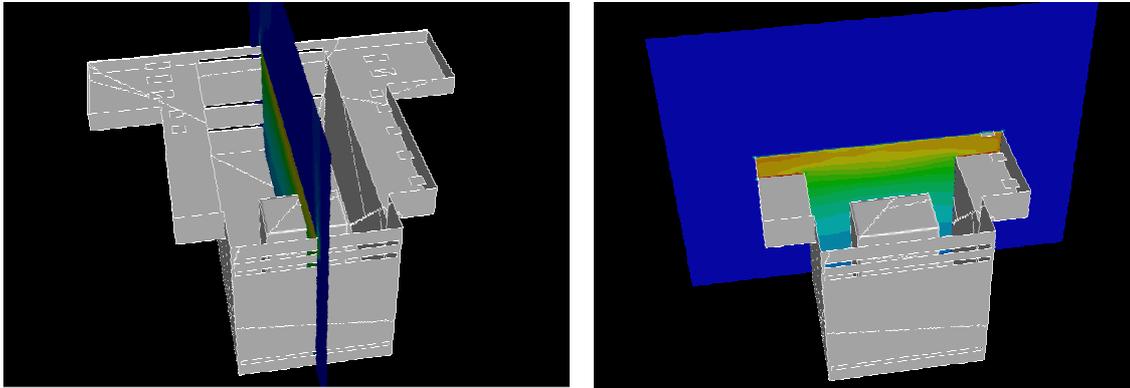


Abbildung 37 Schnittebenen

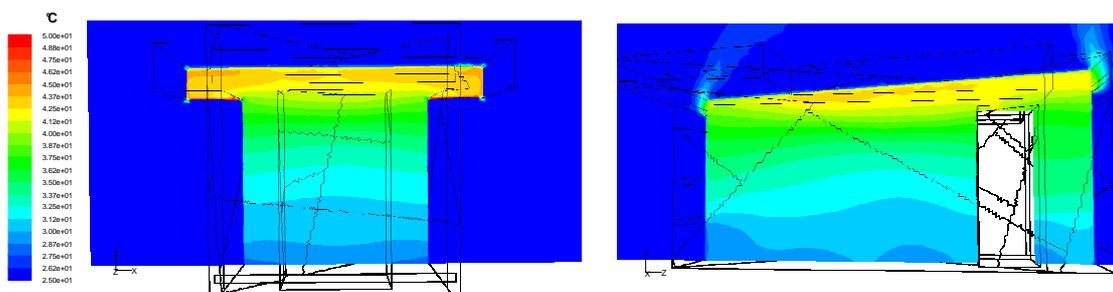


Abbildung 38 Temperaturfelder der Basisvariante 00

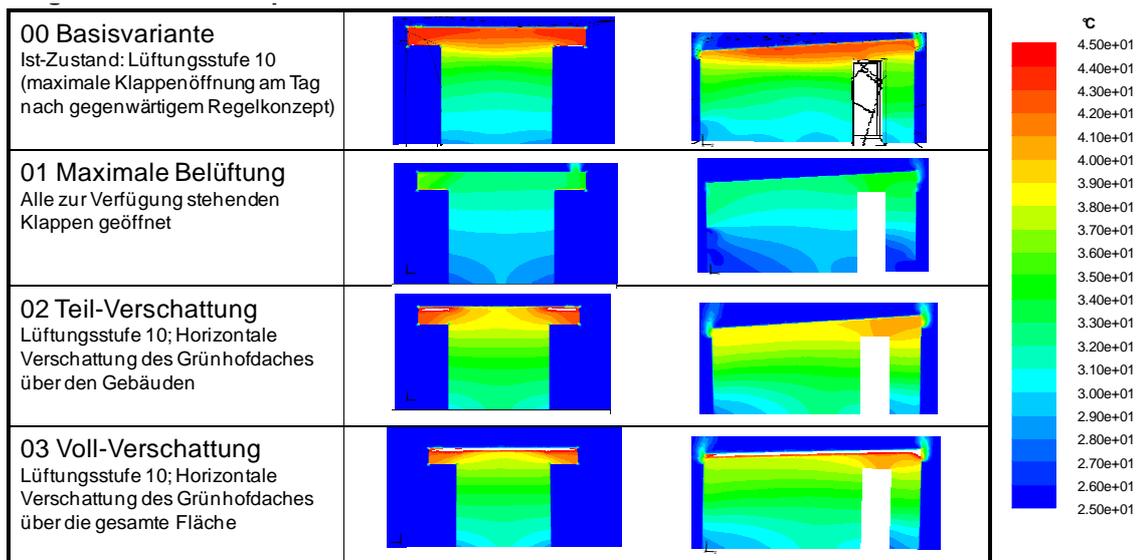


Abbildung 39 Ergebnisse der CFD-Berechnung – Temperaturfelder

Tabelle 9 Ergebnisse der CFD – Lufttemperatur im Durchschnitt und im Referenzbereich

	Durchschnittstemperatur Luftraum Grünhof	Lufttemperatur im Referenzbereich 3.OG	Differenz der Lufttemperatur im Referenzbereich zur Basisvariante
00 Basisvariante Ist-Zustand: Lüftungsstufe 10 (maximale Klappenöffnung am Tag nach gegenwärtigem Regelkonzept)	35,5 °C	36,7 °C	0 °C
01 Maximale Belüftung Alle zur Verfügung stehenden Klappen geöffnet	30,7 °C	31,5 °C	-5,2 °C
02 Teil-Verschattung Lüftungsstufe 10; Horizontale Verschattung des Grünhofdaches über den Gebäuden	35,9 °C	37,7 °C	+1,0 °C
03 Voll-Verschattung Lüftungsstufe 10; Horizontale Verschattung des Grünhofdaches über die gesamte Fläche	35,4 °C	38,2 °C	+1,5 °C

Die Nutzung der maximal zur Verfügung stehenden Lüftungsquerschnitte (alle Klappen und RWAs) bewirkt die beste Absenkung der Grünhoftemperaturen, sowohl im Durchschnitt als auch im Referenzbereich der Höhe des 3.OG.

Sowohl die teilweise als auch vollständige Verschattung des Grünhofdaches bewirkt eine Erhöhung der Grünhoftemperatur im Durchschnitt als auch im Referenzbereich.

Erhöhte Temperaturen infolge der Verschattung resultieren aus der ineffektiven Belüftung des Grünhofes bei Nicht-Einbeziehung der RWAs. Die meiste Solarstrahlung wird oberhalb der seitlichen Belüftungsöffnungen im Sonnenschutz absorbiert und kann daher nicht effektiv abgeführt werden. Bei alleiniger Nutzung der seitlichen Belüftungsöffnungen wird die in tieferen Ebenen absorbierte Wärmeenergie effektiver abgeführt.

Es ist anzumerken, dass die Berechnung mit adiabaten Randbedingungen der Umfassungsflächen der Grünhöfe ausgeführt wurden. Es erfolgte eine pauschale Absenkung der eingebrachten Solarstrahlung um 20% zur Berücksichtigung der Wärmeabsorption. Während die ermittelten absoluten Temperaturen im Grünhof nicht als verbindlich angesehen werden können, soll die Differenz zwischen den Varianten als Orientierung für die Bewertung der einzelnen Varianten verstanden werden. Wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, konnte eine gemessene durchschnittliche Reduzierung der Grünhoftemperatur in der Ebene 3 von 9,1 K gegenüber den berechneten 5,2 K aufgezeigt werden.

Ergänzende Thermisch-Dynamische-Simulation

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen CFD Untersuchung erfolgt eine thermisch dynamische Simulation (BSim) zur Bewertung des resultierenden Kühlenergieverbrauchs. Die Simulation erfolgt für einen nach Süden ausgerichteten Büroraum im 3. OG. Der Referenzwetterdatensatz (DWD TRY 03) wird derart modifiziert, dass er das Grünhofklima widerspiegelt, sowohl für die Variante vor der Optimierung, als für die Variante nach der Optimierung. Für die Ausgangsvariante mit eingeschränkten Lüftungsquerschnitten erfolgt die Modifikation gemäß der Ausführungen im Abschlussbericht des ersten Teilprojektes ATRIEN Abschnitt 4.6. Die Abhängigkeit der Grünhoftemperaturen von der Außentemperatur wird approximiert und die Funktion auf die Außentemperatur des Wetterdatensatzes angewendet, so dass dieser nun die Grünhoftemperatur angenähert darstellt. Für die Optimierungsvariante erfolgt eine weitere Reduktion der Lufttemperatur um 5,2 K gem. der Ergebnisse der CFD. Die weiteren Klimadaten des Wetterdatensatzes werden wie folgt angepasst:

- Reduktion der Windgeschwindigkeiten auf 0 m/s
- Reduktion der Solarstrahlung auf 36% (gem. g-Wert der Verglasung)

Da nur der Kühlenergiebedarf betrachtet wird, bleibt das Winterklima bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

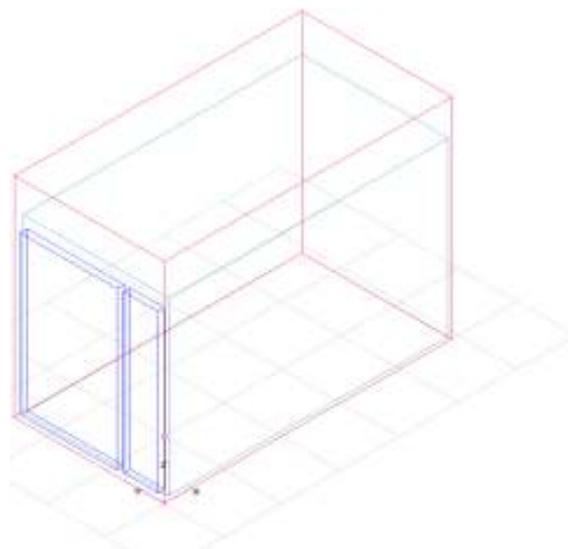


Abbildung 40 Geometrisches Simulationsmodell für BSim



Tabelle 10 Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation

Variante	Überhitzungsstunden (7:00 – 17:00)	Nutzenergie Kühlung	Reduktion Kühlenergiebedarf
VAR1 Ausgangszustand	420 h/a	673 kWh/a	-
VAR2 Optimierte Belüftung (Grünhoftemperatur im Schnitt 5,2 K niedriger)	330 h/a	478 kWh/a	29%

Die Thermisch - Dynamische Berechnung ergibt demnach für die Ebene 3 eine Reduzierung des Kälteenergieverbrauchs von 29 %. Bei der überschlägigen Annahme, dass in den restlichen 3 Ebenen keine signifikante Änderung eintritt, ergibt sich bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch eine Reduzierung von 7 %.



2.3 Änderung des Regelschemas und Neuprogrammierung der GLT

2.3.1 Ursprüngliches Regelschema

In der Ausgangssituation wird bei der Regelung der Grünhofklappen nicht zwischen Heizfall und Kühlfall unterschieden. Die Klappen öffnen bei steigender Grünhoftemperatur zeitabhängig sukzessive, wobei der volle Öffnungsquerschnitt erst bei einer durchschnittlichen Grünhoftemperatur von 32°C vorliegt. Die Temperatursensoren für die Ermittlung der Durchschnittstemperatur in den Grünhöfen befinden sich jeweils an der Nordwand der Grünhöfe (in Bodennähe und an der Gebäudeoberkante). Nachts werden alle Klappen zur Nachtauskühlung geöffnet und morgens wieder vollständig geschlossen bevor das Tagprogramm zur sukzessiven Öffnung der Klappen aktiv wird, siehe Abschnitt 2.4. Während die Lüftungsstufen mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 1h von LS 1 ausgehend öffnen, steigt die Grünhoftemperatur stark an. Die in der Horizontalverglasung integrierten Dachhauben der Grünhöfe werden in die normale Regelung der GLT nicht eingebunden. Diese stehen nur für den Entrauchungsfall zur Verfügung. Weiterhin stehen Öffnungsklappen im Bereich über den Dächern zur Verfügung, die bisher nicht an der GLT angebunden sind.

Für die Vegetationsruhe der Grünhofbepflanzung wird während der Heizperiode durch die Öffnung von einzelnen Klappengruppen im obersten Bereich der Fassade die Grünhoftemperatur auf 12°C begrenzt. Eine zeitliche Einschränkung, die der tatsächlichen Dauer der Vegetationsruhe entspricht, besteht für diese Regelstrategie nicht. So wird im Heizfall auch dann eine möglichst niedrige Grünhoftemperatur angestrebt, wenn die Bepflanzung keine Vegetationsruhe erfordert. Durch die Öffnung der oberen Klappen durchströmt die kalte Luft den Luftraum über die gesamte Höhe, so dass der gesamte Luftraum auskühlt.

Die mechanische Belüftung der Kerngebäude erfolgt dauerhaft während der Nutzungszeiten und teilweise nachts zur Nachtauskühlung, siehe Abbildung 41. Die Zuluft wird beheizt und gekühlt jedoch nicht be- oder entfeuchtet. Die Luftansaugung erfolgt von außen und nicht aus den Grünhöfen. Es besteht keine Wärmerückgewinnung. Die Nutzer können die Fenster zu den Grünhöfen nach Bedarf öffnen und schließen, so dass während der Kühlperiode das Eindringen überhitzter Grünhoftemperatur erfolgt und die Möglichkeit der Nutzung vorgewärmter Grünhofluft während der Heizperiode ausbleibt.

Die Dachhauben der in den Gebäuden integrierten Atrien unterliegen einer autarken Steuerung, die ab einer Temperatur von ca. 35°C die Dachhauben öffnen. Die dafür eingesetzten Temperatursensoren sind am Tragwerk der Überkopfverglasung befestigt und zum Teil direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt, so dass ein inkonsistentes Öffnungsverhalten bewirkt wird.

Gegenwärtiges Belüftungskonzept

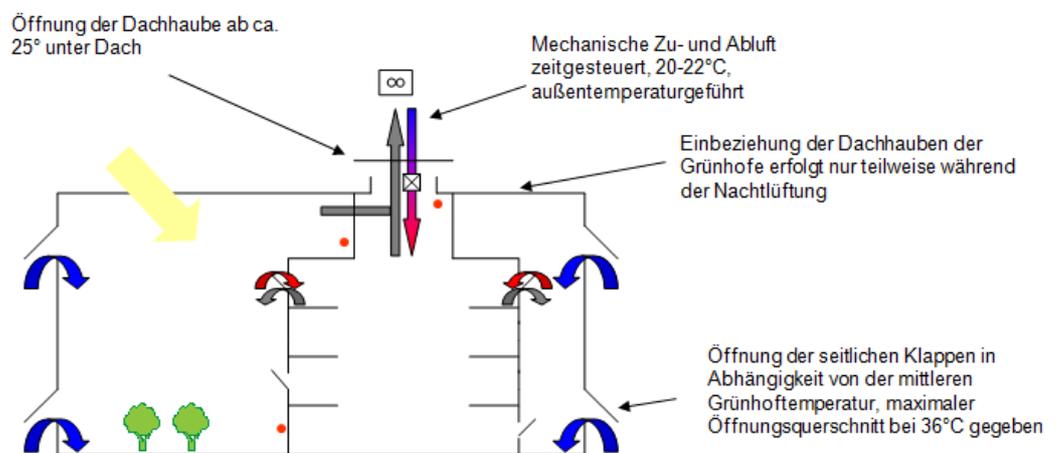


Abbildung 41 Gegenwärtiges Belüftungskonzept während des Heizfalles

2.3.2 Optimiertes Regelschema

Die übergeordnete Zielsetzung des Regelschemas lässt sich wie folgt definieren:

Während der Heizperiode ist eine möglichst hohe und während der Kühlperiode eine möglichst niedrige Grünhoftemperatur anzustreben. Solare Wärmegevinne sind durch eine geeignete Luftführung zwischen den Grünhöfen und den Kerngebäuden nutzbar zu machen und überhitzte Luft aus den Grünhöfen während der Kühlperiode von den Kerngebäuden fernzuhalten.

Heizfall

Aus diesen Forderungen folgt als erstes, dass die Steuerung der Lüftungsklappen in Abhängigkeit vom Vorliegen des Kühl- oder Heizfalls zu erfolgen hat. Welcher der beiden Fälle vorliegt, darüber entscheidet das 3-Tages-Mittel der Außentemperatur. Die Umschalttemperatur (Heizgrenztemperatur = Kühlgrenztemperatur, kein Totband) liegt bei 15°C. Zusätzlich ist die



tatsächliche Dauer der Vegetationsruhe zu berücksichtigen. Während dieser Zeit darf die Grünhoftemperatur im Bereich der Bepflanzung 12°C nicht überschreiten. Laut Forderung des Grünpflegers ist die Vegetationsruhe vom 15. November bis zum 28. Februar einzuhalten. Außerhalb der Vegetationsruhe, jedoch während der Heizperiode, steht einer Erhöhung der Grünhoftemperatur nichts entgegen, soweit sie die gewünschte Raumtemperatur im Kerngebäude nicht überschreitet. Dadurch sollen konvektive und transmissive Wärmeverluste der Kerngebäude vermieden werden. Während der Vegetationsruhe werden einzelne Klappengruppen in der untersten Ebene bzw. bis zur maximalen Höhe der Bepflanzung geöffnet. Dadurch bildet sich ein Kaltluftsee im Bereich der Bepflanzung aus, ohne dass der darüber liegende Luftraum unnötig auskühlt, siehe Abbildung 43. Diese Regelung hat separat für alle Grünhöfe zu erfolgen, da die Art der Bepflanzung unterschiedliche Höhen aufweist. Führungstemperatur ist für diesen Fall nicht mehr die durchschnittliche Grünhoftemperatur sondern die Temperatur des unteren Sensors (für niedrige Bepflanzungen) bzw. des oberen Sensors (für hohe Bepflanzungen) an den Nordseiten der Kerngebäude. Die vorgewärmte Luft der Grünhöfe wird über die Fensterlüftung den Kerngebäuden zugeführt. Dies setzt voraus, dass die Nutzer entsprechend unterwiesen werden, bei Bedarf die Fenster zu den Grünhöfen zu öffnen, siehe Abbildung 42. Um eine Reduzierung des Lüftungswärmebedarfs zu erzielen ist es erforderlich, die mechanische Lüftung während der Heizperiode abzuschalten. Da sichergestellt werden muss, dass der hygienisch notwendige Mindestluftwechsel in den Kerngebäuden eingehalten und der zulässige CO_2 -Gehalt nicht überschritten wird, werden in allen Kerngebäuden im zentralen Kombibereich in der obersten Ebene CO_2 -Sensoren installiert und in die Gebäudesteuerung integriert. Der Aufstellungsort folgt der Erfahrung, dass in einem geheizten Gebäude, die verbrauchte Luft nach oben strebt und dort die höchsten CO_2 -Konzentrationen zu erwarten sind. Stichprobenartige Messungen haben dies bestätigt. Wird die Pettenkofergrenze von 1000 ppm überschritten schaltet sich während der Vegetationsruhe (niedrige Grünhoftemperatur) die mechanische Belüftung ein, außerhalb der Vegetationsruhe (hohe Grünhoftemperatur) öffnen die Dachhauben der zentralen Atrien, so dass vermehrt Luft aus den Grünhöfen durch die geöffneten Fenster nachströmen kann und der Luftaustausch forciert wird. Die Zuschaltung der mechanischen Belüftung während der Vegetationsruhe statt einer Öffnung der Dachhauben ist erforderlich, um ausreichend hohe Raumtemperaturen zu gewährleisten. Falls außerhalb der Vegetationsruhe durch die natürliche Lüftung der Kerngebäude zu den Grünhöfen der CO_2 -Gehalt in den Grünhöfen 800 ppm überschreitet, werden sukzessive in 15- Minuten-Schritten die Klappen der Grünhöfe geöffnet bis der CO_2 -

Gehalt 600 ppm unterschreitet. Hierzu erfolgte die Installation eines CO₂-Sensors in den Grünhöfen oberhalb der Oberkante der Kerngebäude, der in die Gebäuderegulung integriert wurde.



Abbildung 42 Nutzerinformation zur Fensteröffnung während der Heizperiode

Kühlfall

Während des Kühlfalles ist eine möglichst niedrige Grünhoftemperatur anzustreben. Dies ist nur mit einer maximalen Öffnung aller zur Verfügung stehenden Lüftungsquerschnitte zu erreichen. Da die Kühlleistung in den Gebäuden schnell an Ihre Grenzen stößt und schon in der Ausgangssituation Behaglichkeitseinschränkungen vorliegen, kann auf den Kühlanteil durch die Lüftung nicht verzichtet werden. Die TAD alleine würden für eine ausreichende Kühlung nicht sorgen. Weiterhin muss vermieden werden, dass überhitzte Luft aus den Grünhöfen in die Kerngebäude gelangt. Daher bleibt während der Kühlperiode in der Nutzungszeit die mechanische Belüftung in Betrieb. Sofern erforderlich, wird der Betrieb in den Nachtstunden fortgeführt. Die Nutzer sind während der Kühlperiode aufgefordert am Ende eines Arbeitstages die Fenster zu den Grünhöfen zu öffnen, so dass die Nachtauskühlung ermöglicht wird. Solange die Zuströmtemperatur in der untersten Ebene der Grünhöfe unterhalb der Abströmtemperatur in der obersten Ebene der Kerngebäude liegt, ist die Bedingung für eine konvektive Wärmeabfuhr erfüllt. Dann öffnen die Dachhauben der in den Gebäuden zentral liegenden Atrien, so dass durch die Auftriebswirkung die natürliche Lüftung forciert wird und eine intensivere Nachtausküh-



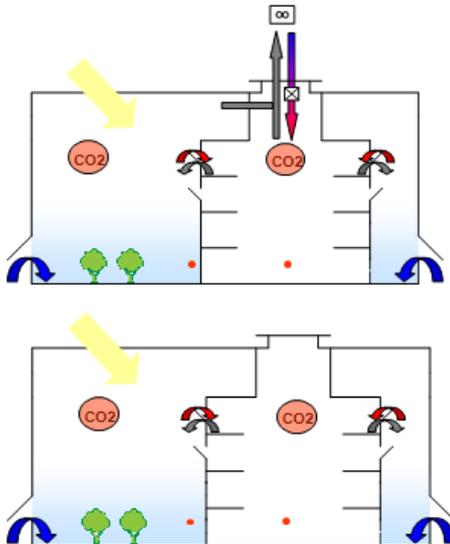
lung erfolgen kann. Um Behaglichkeitseinschränkungen zu vermeiden, erfolgt die Nachtlüftung solange bis die Grünhoftemperatur in der untersten Ebene 10°C unterschreitet. Tagsüber sind die Nutzer angewiesen, die Fenster zu den Grünhöfen geschlossen zu halten.

Die einzelnen Maßnahmen/ Szenarien sind in Tabelle 11 festgehalten. Schematische Übersichten der drei Betriebssituationen sind in Abbildung 43 bis Abbildung 45 dargestellt. Im Anhang findet sich das Ablaufschema des überarbeiteten Konzeptes. Die Umsetzung erfolgte in der Zeit von August 2010 bis November 2010.

Die Einzelpositionen der neuen Regelstrategie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beendigung der **Vegetationsruhe** während der Heizphase **berücksichtigen** (keine weitere Auskühlung erforderlich)
- **Neue Regelstrategien** für a) Heizperiode während der Vegetationsruhe, b) Heizperiode außerhalb der Vegetationsruhe, c) Kühlperiode
- **Natürliche Belüftung der Kerngebäude** statt mechanischer Belüftung während der Heizphase, Klappensteuerung CO₂ – geführt
- **Während der Vegetationsruhe Maximierung der Grünhoftemperatur** bei Einhaltung des erforderlichen Temperaturbereichs ausschließlich im Bereich der Bepflanzung
- **Mechanische Belüftung nur während der Kühlphase**, wenn Grünhoftemperatur oberhalb der Raumtemperatur. Nur Zuluft, so dass bei Öffnung der Fenster keine Warmluft aus den Grünhöfen einströmt. Ansonsten Abströmung durch die geöffneten Dachhauben
- **Dachhauben der Kerngebäude** zur Abführung der Warmluft im oberen Bereich der Kerngebäude **heranziehen**
- **Forcierung der Nachtlüftung** und –auskühlung des Gebäudes (Nutzeranweisungen zur Öffnung der Fenster, nächtliches Öffnen der Fenster durch Schließdienst)
- **Einbindung vorhandener aber nicht genutzter Belüftungsklappen** in die Gebäuderegulung
- **Kalibrierung, Neupositionierung und Neudefinition der Sensoren** für die Führungsgrößen Grünhof- und Außentemperatur

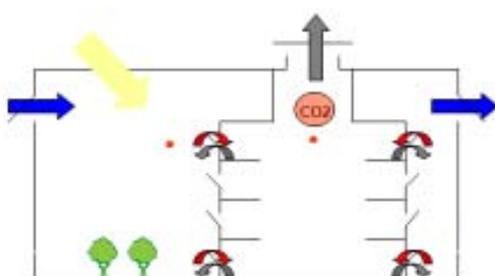
a) Vegetationsruhe und Heizphase



- Nur Öffnung der unteren Klappen im Bereich der Bepflanzung, Führungsgröße auf Höhe der Bepflanzung
- Nur Zuluftversorgung für die Gebäude Abströmung durch geöffnete Fenster oder Überströmung im Dachbereich in die Grünhöfe: Zusätzliche Erwärmung der Grünhöfe im oberen Bereich, Minimierung der Wärmeverluste der Kerngebäude
- Nach Möglichkeit nur freie Lüftung zu den Grünhöfen, vorzugsweise oben. Zuschaltung mechanischer Belüftung nur bei zu niedrigen Raumtemperaturen im EG

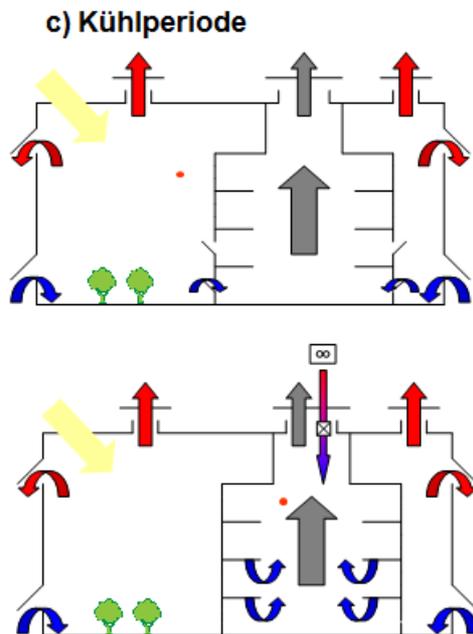
Abbildung 43 Belüftungskonzept während der Heizperiode mit Vegetationsruhe (oben: mechanische Lüftung angeschaltet, wenn der CO₂-Grenzwert überschritten wird)

b) Heizphase ohne Vegetationsruhe



- Schließen aller Klappen bis zur CO₂-Grenze im Atrium
- Falls erforderlich Abführung überwärmter Luft im oberen Bereich der Grünhöfe (Führungsgröße 3. OG)
- Bedarfsweise Öffnung der Dachhauben in den innenliegenden Kernbereichen, wenn Übertemperaturen in den oberen Räumen auftreten oder CO₂-Grenze in den Räumen erreicht wird.

Abbildung 44 Belüftungskonzept während der Heizperiode ohne Vegetationsruhe



- 24 – stündige Öffnung sämtlicher Dachhauben und Belüftungsklappender Grünhöfe
- Nachtauskühlung der Kerngebäude durch Öffnung der Fenster und Dachhauben der Kerngebäude durch freie Lüftung
- Umstellung auf mechanische Lüftung (nur Zuluft), wenn Grünhoftemperaturen die Raumtemperaturen überschreiten
- Nutzeranweisung: Vormittags nur Öffnung der Fenster in den unteren Ebenen (kühle Zuluft, Eindringen von Warmluft in den oberen Ebenen wird vermieden)
- Schließdienst: Öffnung der Fenster am Abend

Abbildung 45 Belüftungskonzept während der Kühlperiode (oben Nachtlüftung)

Tabelle 11 Einzelmaßnahmen zur Neugestaltung des Regelkonzeptes

Maßnahme	Anlass und Ziel	Aufwand
Neupositionierung der Temperatursensoren in den Grünhöfen	Die obersten Temperatursensoren in den Grünhöfen sind jeweils über den Gebäuden angeordnet. Maßgeblich für die Klappensteuerung der Grünhöfe ist jedoch die Temperatur auf Höhe des 3.OG, bzw. im EG.	Umpositionierung von 5 Sensoren um ca. 10 m
Zuordnung der Außentemperatursensoren	Die für die Steuerung maßgebliche Außentemperatur kann keinem Sensor zugeordnet werden. Mehrere Außentemperatursensoren befinden sich im Bereich des Mikroklimas der Gebäude oder sind direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt.	Klärung des Zustandekommens des Wertes für die Außentemperatur (Mittelwertbildung aus allen Sensoren?)
Evt. Neupositionierung eines Außentemperatursensors i	Für die Außentemperatur sollte der Wert eines Sensors maßgebend sein, der zuverlässig die unbeeinflusste Außenlufttemperatur ermittelt.	Außentemperatursensor mit Ausleger auf der Nordseite des Gebäudes oder in 50m Entfernung vom Gebäude in der westlichen Parkanlage Einbindung in die GLT
Kalibrierung der Sensoren	Es besteht der Verdacht, dass einige Temperatursensoren sehr unpräzise sind (bis zu 10K Abweichung).	Überprüfung und evt. Korrektur aller maßgeblichen Temperatursensoren (Grünhof und Außen)

CO ₂ – Sensoren als Führungsgrößen einbinden	Während der Übergangszeit und evt. im Winter soll die Lüftungsanlage abgestellt werden und die Belüftung über die Fenster zu den Grünhöfen und nach außen erfolgen. Bei erhöhten CO ₂ Werten ist die Belüftung zu forcieren (RWA Atrium oder Belüftungsanlage für die Gebäude, Klappen über den Dächern in den Grünhöfen)	6 CO ₂ -Sensoren: 4 CO ₂ -Sensoren in den Gebäuden 2 in den Grünhöfen (einer in A-B, einer in den anderen Grünhöfen) Einbindung in die GLT
Änderung der Führungsgröße für die Klappensteuerung	Derzeitig Sensoren auf drei Höhen: Führungsgröße ist der Mittelwert dieser drei Sensoren. Für den Kühlfall soll der obere Sensor maßgeblich sein, für den Heizfall der untere Sensor.	Umprogrammierung des Regelschemas
Komplette Neuprogrammierung der Klappensteuerung	Derzeitig Konzept der sukzessiven Öffnung von Klappen bei steigender Grünhoftemperatur. Zur Vermeidung von Übertemperaturen sollte jedoch schnell der maximale Öffnungsquerschnitt vorhanden sein. Während der Heizphase sollten die Klappen komplett geschlossen bleiben (außer Bedingung: Vegetationsruhe, Temperatur 3.OG, CO ₂ - Anstieg).	Umprogrammierung des Regelschemas
Änderung der Steuerung der Zu- und Abluftanlagen	Zu- und Abluft werden ganzjährig im Wochen-Zeitprogramm gesteuert. Zur Nutzung solarer Warmegewinne während der Heizphase und Forcierung der Nachtlüftung in der Kühlphase werden Zeiträume mit natürlicher Belüftung ausgeweitet. Separater Betrieb der Zuluftanlage in der Kühlphase, Abströmen über RWA_Atrium.	Umprogrammierung des Regelschemas Neben geändertem Zeitprogramm, Einbindung von Temperatur- und CO ₂ - Werten als Führungsgröße, Trennung der Ansteuerung von Zu- und Abluftanlage
Einbindung aller Dachhauben in die GLT	Nur ein Teil der Dachhauben ist in dem Regelkonzept der Grünhöfe eingebunden. Es sollen auch die Dachhauben, auch der RWA eingebunden werden.	Überprüfung welche Dachhauben eingebunden sind, evt. weitere Dachhauben einbinden
Einbindung der Klappenreihen über den Dächern der Gebäude	Die Klappen über den Dächern der Gebäude sind lediglich über die Schaltschränke ansteuerbar und sollten ebenfalls zur Belüftung der Grünhöfe herangezogen werden.	Einbindung von 4 Klappengruppen
Einbindung der Dachhauben über den Atrien in die GLT - Steuerung	Die Dachhauben in den Atrien werden autark in Abhängigkeit von der Temperatur unter dem Dach gesteuert. Nicht von der GLT ansteuerbar.	Einbindung sämtlicher Hauben der Atrien in die GLT (28 Hauben)
Feintuning	Im Laufe des Beobachtungszeitraumes sollen die neuen Regelschemata in Ihrer Wirkung beobachtet werden und evt. Korrekturen vorgenommen werden.	Anpassung bzw. Umprogrammierung der GLT

2.3.3 Überprüfung und Anpassungen des neuen Regelschemas im Betrieb

Im Jahr 2011 erfolgte die Prüfung und Anpassung der neuprogrammierten GLT-Steuerung.

Die Überprüfung der Regelung der Klappensteuerung ergab im Wesentlichen eine Übereinstimmung mit dem vorgeschlagenen Konzept. Einzelne Elemente des umgesetzten Regelkonzeptes



sind unklar bzw. falsch und in der Tabelle 12 aufgeführt. Auszüge aus den Trendaufzeichnungen, Abbildung 46 bis Abbildung 51, belegen die Auffälligkeiten.

Es ist zu beobachten, dass die Regen- und Windwarnung während der Kühlperiode, wenn eine intensive Belüftung der Grünhöfe erforderlich ist, häufig auslöst und somit eine Überhitzung der Grünhöfe bewirkt. Häufig wird die Nachtlüftung durch die Regen- und Windwarnung unterbunden. Es wird empfohlen die Grenzwerte hinsichtlich einer möglichen Heraufsetzung für die Auslösung der Regen- und Windwarnung zu überprüfen.

Der Außentempersensord der GLT liegt offensichtlich im Einflussbereich der Außenfassade des Gebäudes, denn insbesondere bei Sonneneinstrahlung ist eine deutliche Abweichung (bis zu 5 K) von unserem Temperatursensord auf freiem Feld in ca. 50 m Abstand vom Gebäude zu beobachten.

Es ist aufgefallen, dass die Atriumhauben im Kühlfall parallel zu den Grünhofhauben fahren. Die Atriumhauben sollten jedoch unabhängig von den Grünhofhauben angesteuert werden.

Leider konnte der Gebäudebetreiber nicht davon überzeugt werden, auf den Betrieb der mechanischen Lüftungsanlage während der Heizperiode ganz zu verzichten, obwohl mit mehreren Versuchen nachgewiesen wurde, dass die Raumluftqualität bei Fensterlüftung im Rahmen der Pettenkofergrenze und der IDA – Klasse 2 (normale Raumluftqualität) bleibt. Daher ist die Lüftungsanlage während der Heizperiode nach wie vor in Betrieb – wenn auch mit eingeschränkten Laufzeiten. Alternativ wurde vorgeschlagen die Lüftungsanlagen intermittierend zu betreiben oder nur die Teilanlage West - Kombi für die Versorgung der zentralen Kombizone und der an die Außenluft angrenzende Westseite zu betreiben. Hierdurch wäre eine spürbare Absenkung des Wärmeverbrauchs zu erwarten.

Tabelle 12 Ergebnis der Überprüfung des Regelkonzeptes

Position	Periode	Konzeptvorgabe	GLT-Ist	Handlung
1	Kühlfall	Sämtliche Grünhofklappen sollen geöffnet sein, solange die Außentemperatur die Grünhoftemperatur auf Höhe E3 unterschreitet.	Grünhofklappen sind auch offen, wenn die Außentemperatur oberhalb der Grünhoftemperatur liegt, siehe Abbildung 46 bis Abbildung 47.	Vernachlässigbar, da nur kurze Zeiträume betroffen sind
2	Heizfall mit Vegetationsruhe	Grünhofklappengruppe West_unten soll öffnen, wenn Temp_Grünhof_E0 > 12°C	Im Grünhof CD überschreitet Temp_Grünhof_E0 regelmäßig im Tagesverlauf 12°C ohne dass eine Klappe öffnet. (Regen/Windalarm sind nicht ausgelöst), siehe Abbildung 48.	Sollte hinsichtlich der Vegetationsruhe der Bepflanzung überprüft werden. In anderen Grünhöfen i.O.
3	Heizfall mit Vegetationsruhe	s.o.	In einem anderen Zeitraum öffnen im Hof CD statt West_unten die Klappen über den Gebäuden mit dem Effekt einer Taktung der Klappenöffnung, siehe Abbildung 49.	Klappengruppe ist richtig zuzuordnen
4	generell	Getrennte Erfassung Temp_Grünhof_E0 und E3	Im Hof DE werden für E0 und E3 die gleichen Temperaturen ausgegeben, siehe Abbildung 50.	Für eine Regelung gem. Konzept ist die getrennte Erfassung der Temperaturen erforderlich. Sofern es sich nur um einen Fehler bei der Datenaufzeichnung handelt besteht kein Handlungsbedarf
5	Kühlfall	Atriumhauben werden getrennt von den Grünhofhauben geregelt	Atriumhauben fahren zusammen mit den Grünhofhauben Abbildung 51	Die geplante Regelung der Atriumhauben sollte in Abhängigkeit von der Temperatur Kombi_E3 und zur Nachtlüftung umgesetzt werden. Sofern es sich nur um einen Fehler bei der Datenaufzeichnung handelt besteht kein Handlungsbedarf
6	Generell	Führungstemperatur der GLT sollte im vom Gebäude unbeeinflussten Bereich liegen	Außentemperatursensor befindet sich vermutlich an der Ostfassade Abbildung 52	Es wird empfohlen, den Sensor in einem vom Gebäude unbeeinflussten Bereich zu versetzen
7	Heizfall mit/ohne Vegetationsruhe	Klappen- und Lüftungssteuerung soll u.a. in	Aufgrund von Bedenken bzgl. des Mindestluftwechsels in	Es wird empfohlen, in einem Kurzzeitversuch die



		Abhängigkeit von der CO ₂ -Belastung der Raumluft erfolgen mit dem Ziel, die Räume möglichst über die Grünhöfe mit Frischluft zu versorgen	den innenliegenden Räumen sind die Raumluftanlagen teilweise in Betrieb.	energetische Wirkung der Lüftungsabschaltung zu untersuchen und die Auslösegrenze für den CO ₂ - Gehalt Raumluftqualität in allen Räumen garantiert ist.
--	--	---	--	---

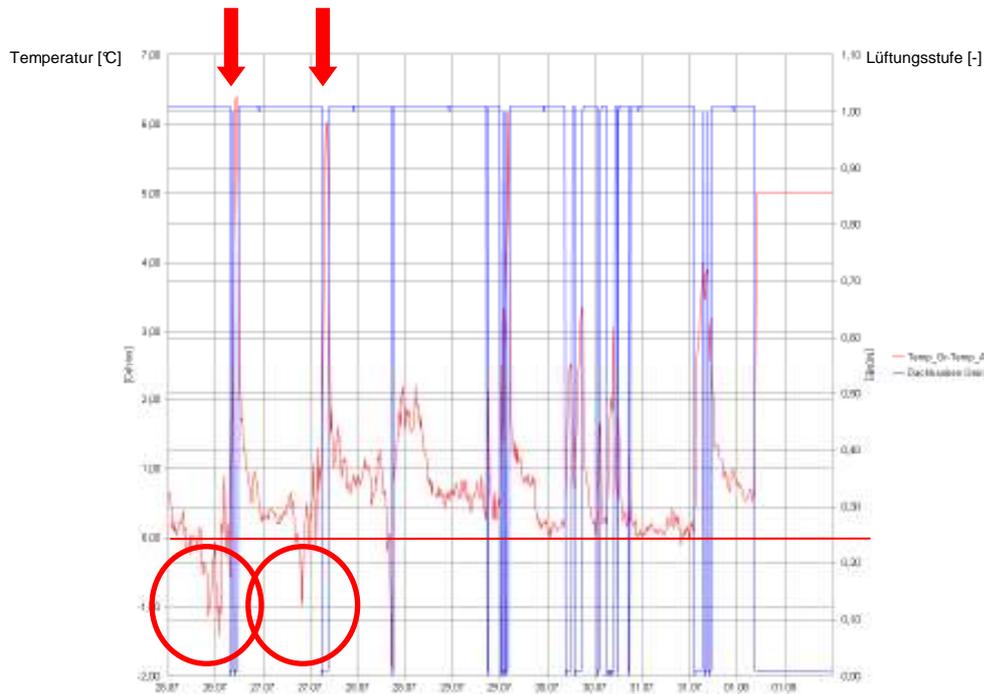


Abbildung 46 Zu Pos.1: Temperaturdifferenz zwischen Temp_Grühof_E3 und Außentemperatur im Juli 2011, Dachhauben offen bei Unterschreitung der Außentemperatur (Schließung erfolgt aufgrund Regenmeldung, „0“ = zu, „1“ = offen)

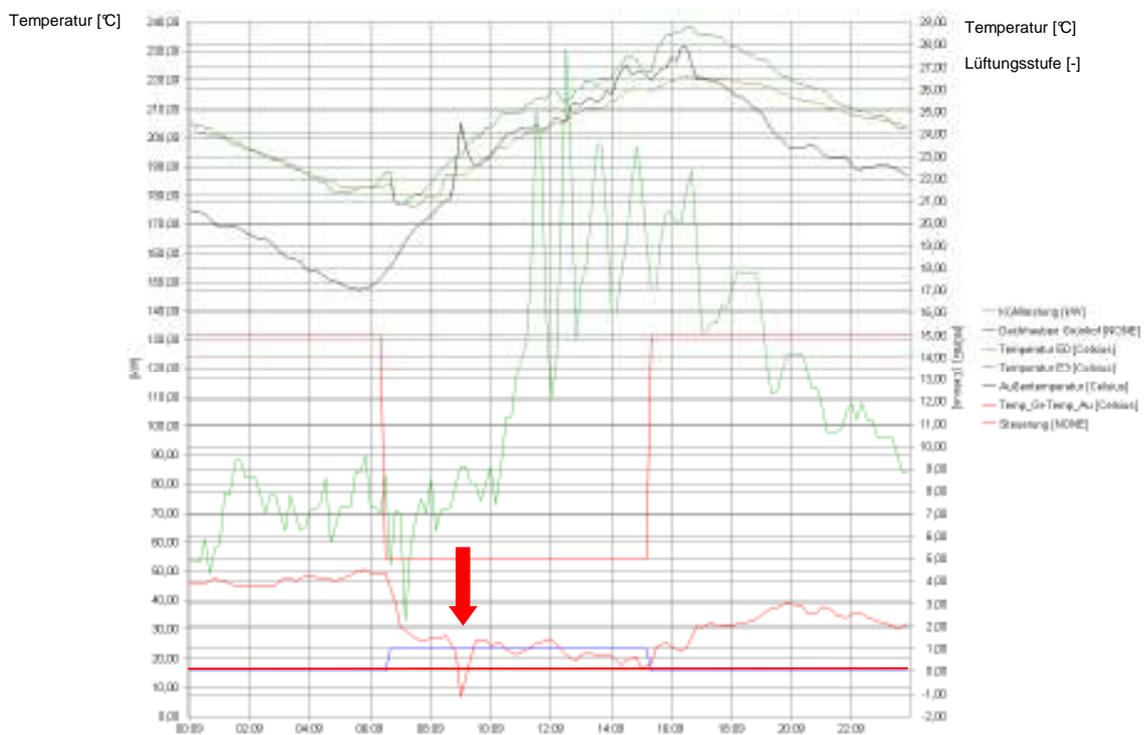


Abbildung 47 Zu Pos.1: Ebenfalls bei kurzfristiger Unterschreitung der Außentemperatur keine Schließung der Klappen (25.08.2011)

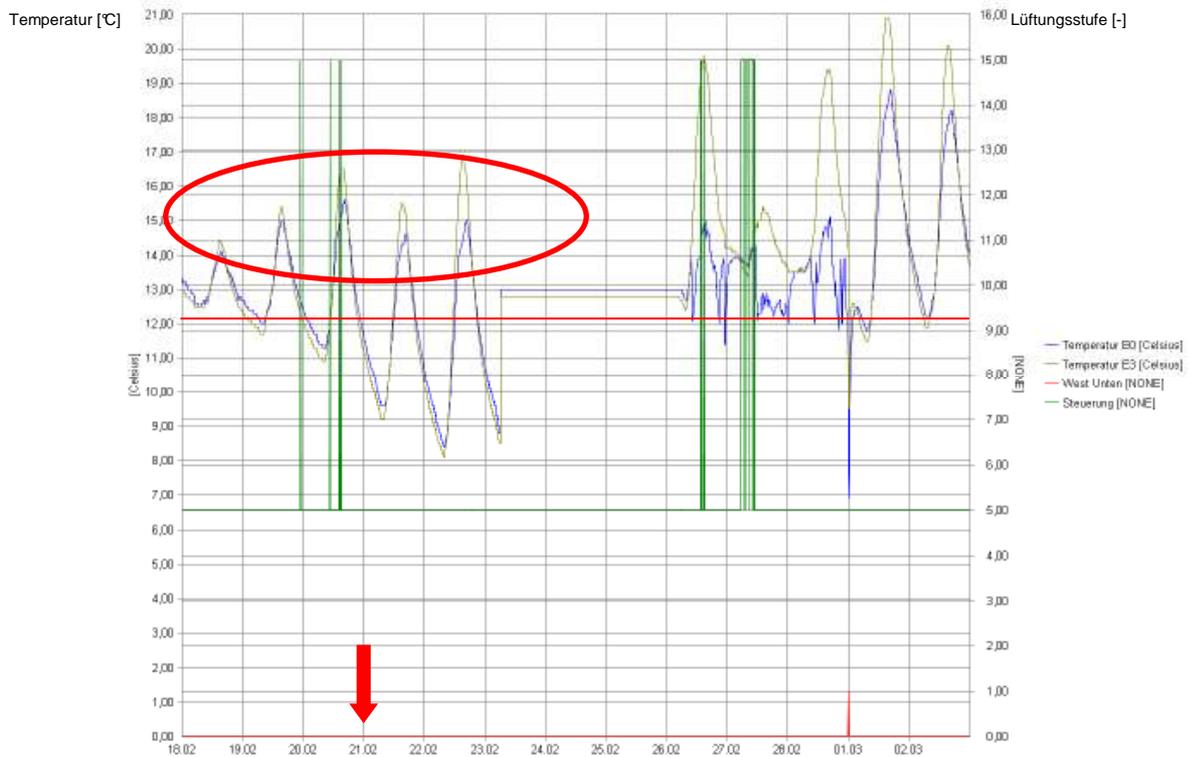


Abbildung 48 Zu Pos.2: Obwohl die Grenztemperatur von 12°C während der Vegetationsruhe überschritten (rote Markierung) wird, bleibt die Klappengruppe West_unten geschlossen (roter Pfeil, Wert „0“)



Abbildung 49 Zu Pos.3: Statt West_unten öffnet ab 12°C die Gruppe „Klappen über Gebäude“. Die Kaltluft fällt offensichtlich im Bereich des Temperatursensor ab, so dass die Regelung schwingt

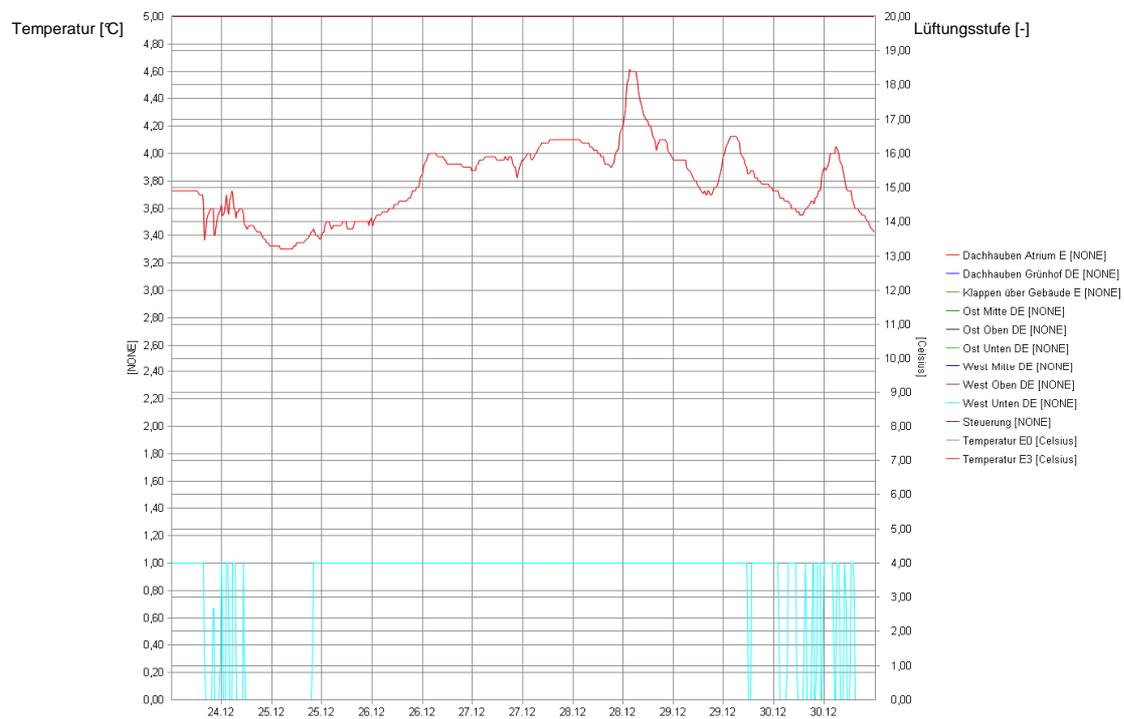


Abbildung 50 Zu Pos.4: Die Temperaturen E0 und E3 sind identisch

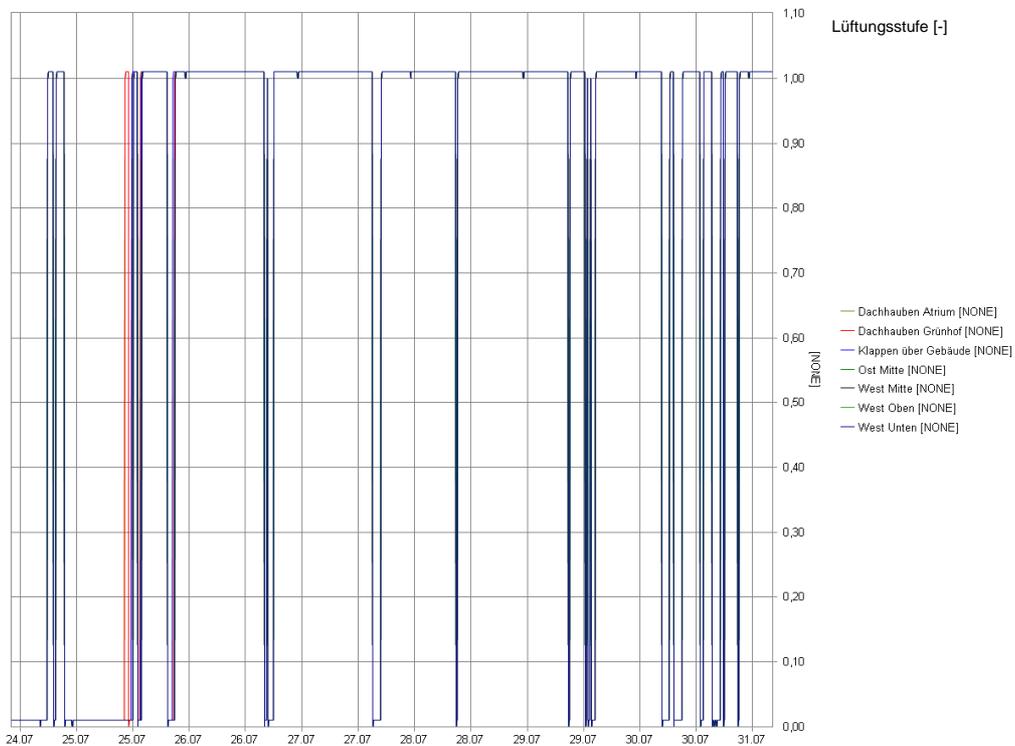


Abbildung 51 Zu Pos.5: Bis auf wenige Ausnahmen fahren die Atriumhauben parallel zu den Klappen der Grünhöfe. Die Atriumhauben sollten aber einem separatem Regelkonzept unterliegen (alle Kurven liegen aufeinander)

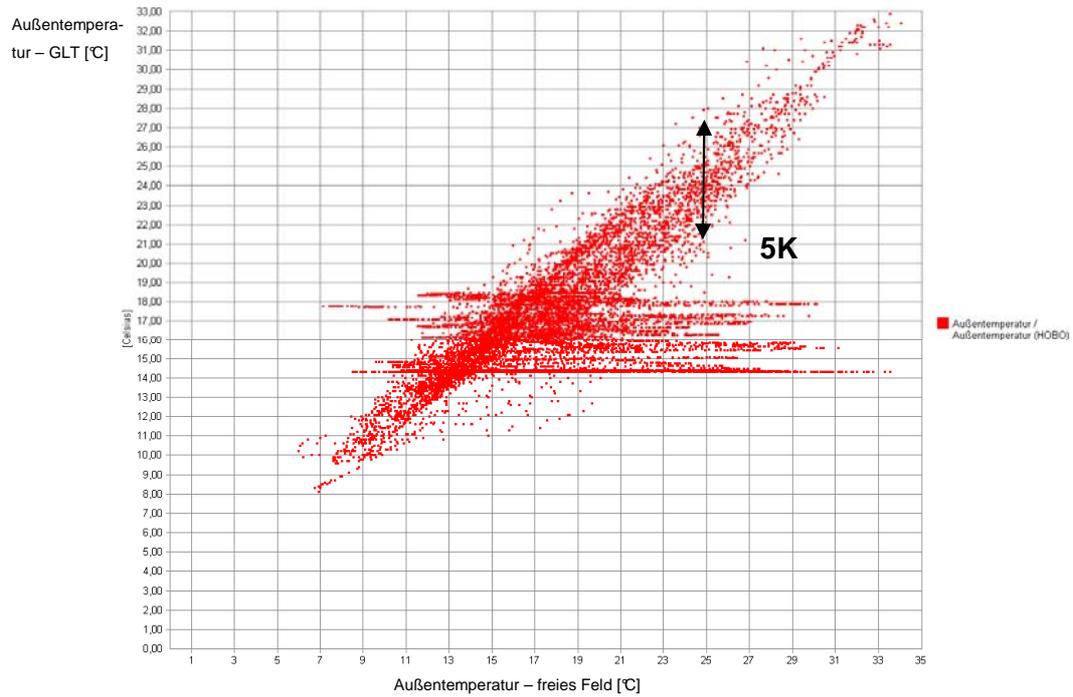


Abbildung 52 Zu Pos.6: Bei Sonneneinstrahlung nehmen die Abweichungen im Vergleich zum eigenen Sensor auf freiem Feld deutlich zu

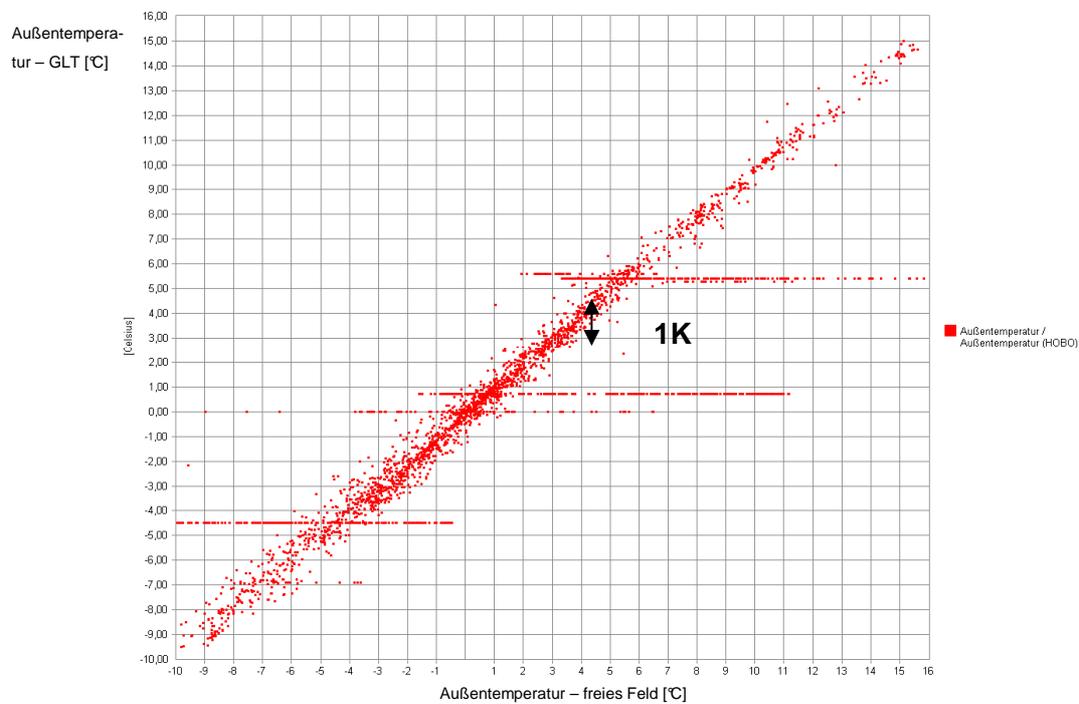


Abbildung 53 Zu Pos.6: In der Winterzeit sind die Abweichungen vernachlässigbar



2.4 Sommerliches Raumklima in den Grünhöfen vor und nach der Optimierung

Grundlage für die Bewertung des Raumklimas in den Grünhöfen ist die durch das IGS installierte Messekette im Grünhof D-E. Herangezogen werden die Temperatursensoren 2-4, die sich auf folgenden Höhen befinden:

- Sensor 2: 3,5 m
- Sensor 3: 5,8 m
- Sensor 4: 12,0 m

Weiterhin wird für die Erfassung der Außentemperatur ein strahlungsgeschützter Außentemperatursensor verwendet, der sich in 2 m Höhe auf freiem Feld ca. 50 m entfernt vom Gebäude befindet. Zur Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse werden vergleichend Messwerte der Gebäudeleittechnik verwendet und die Außentemperatur mit historischen, standortspezifischen Klimadaten des DWD (Flughafen Langenhagen)¹ abgeglichen. Durch letztere Maßnahme wird ausgeschlossen, dass der Strahlungseinfluss oder lokale Wärmeinseln die Außentemperaturmessung verfälschen. Globalstrahlungsdaten und Winddaten werden ausschließlich durch DWD-Aufzeichnungen ermittelt. Für die Betrachtung der Abhängigkeit der Grünhoftemperatur von der Außentemperatur werden die Zeiträume 01.06.2010 bis 04.10.2010 (vor der Optimierung) bzw. 01.06.2011 bis 04.10.2011 (nach der Optimierung) betrachtet. Aufgrund eines 3-monatigen Ausfalls der Temperaturmesskette in 2011 (Juni, Juli, August) wurde der Beobachtungszeitraum auf den 4.10. ausgedehnt, weil zu dieser Zeit noch sommerliche Wetterperioden eintraten. Zur Vergleichbarkeit beider Beobachtungszeiträume wurde der gleiche Messzeitraum für 2010 angesetzt, so dass gleiche Sonnenstände zugrundegelegt werden können.

Die eintägige Zeitreihendarstellungen beziehen sich jeweils auf einen Tag in 2010 und 2011. Bei der Auswahl der Tage wurde zur Vergleichbarkeit dafür Sorge getragen, dass

¹ Der Standort Flughafen Langenhagen ist zwar 17 km von der LBS entfernt, jedoch befindet er sich ebenfalls in relativ unbebauter Umgebung. In Bezug auf die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit werden für beide Orte gleiche mesoklimatische Bedingungen angenommen.



- die Tage wolkenfrei sind
- sie jahreszeitlich nah beieinanderliegen (verschiedene Sonnenstände würden unterschiedliche Energieeinträge bewirken)
- die Regelung der Lüftungsklappen gemäß der Vorgaben erfolgt (kein manueller Eingriff oder Schließung der Klappen aufgrund zu hohem Windaufkommen ab 8 m/s) und
- ein möglichst geringes Windaufkommen besteht (Abhängigkeit des Luftwechsels vom Windaufkommen).

Auf Basis dieser Kriterien wurden der 21.05.2010 und der 08.05.2011 ausgewählt. Die Außenklimabedingungen an beiden Tagen stellen sich wie folgt dar:

- 21.05.2010: Maximale Außenlufttemperatur 21 °C, tagesdurchschnittliche Windgeschwindigkeit 3,6 m/s
- 08.05.2011: Maximale Außenlufttemperatur 22,2 °C, tagesdurchschnittliche Windgeschwindigkeit 5,4 m/s

In den Zeitreihendarstellungen sind die Klappenöffnungen angegeben, die sich im alten Regelschema durch 11 Belüftungsstufen darstellen (Abbildung 54). Diese werden bei steigender Grünhoftemperatur sukzessive durchgeschaltet. Es wird mit dem geringsten Öffnungsanteil begonnen, wobei mit jeder Belüftungsstufe weitere Klappengruppen geöffnet werden. Stufe 11 bezeichnet die Nachtlüftung, bei der sämtliche Klappengruppen geöffnet werden. Siehe auch Anhang A3. In diesem Belüftungskonzept werden die Klappenreihen über den Gebäudedächern und die RWA-Klappen in der horizontalen Verglasung nicht herangezogen.

Im optimierten Belüftungskonzept (Abbildung 55) werden im Sommerfall sämtliche Klappen inkl. der RWA-Klappen in der horizontalen Verglasung und der Klappen über den Gebäudedächern geöffnet.

Im Ausgangszustand überhitzten die Grünhöfe während der Kühlperiode deutlich. Die Lufttemperaturen im Grünhof DE überschritten die Außentemperatur um bis zu 10 K, siehe Abbildung 56. Die Außentemperatur wurde äußerst selten unterschritten. Vor allen Dingen war eine starke Temperaturschichtung zu beobachten: Die Temperaturdifferenz zwischen den Sensoren T_02 und T_04 betrug bis zu 3 K, wohingegen die Differenz zur Außentemperatur bis



zu 6 K betrug. Die Belüftungsstufen in Abbildung 54 zeigen an, dass gegen 6:00 Uhr die (durch eine Windwarnung unterbrochenen) Nachtlüftung beendet wurde und alle Klappen geschlossen werden (Belüftungsstufe 0). Anschließend werden die Klappengruppen sukzessive wieder geöffnet, bis gegen 15:00 die Belüftungsstufe 6 erreicht wird. Erst um 19:00 Uhr wurde wieder die Nachtlüftung aktiviert.

Im optimierten Fall wird schon in der x-y Darstellung, Abbildung 57, deutlich, dass die Grünhoftemperaturen im deutlichen geringeren Maße die Außenlufttemperatur überschreiten, als es im Ausgangszustand der Fall ist. Die Überschreitung beträgt abgesehen von Ausreißern weniger als 2 K und es sind sogar Unterschreitungen der Außentemperatur zu beobachten. Die Zeitreihendarstellung, Abbildung 55 bestätigt diese Beobachtung. Die Außentemperatur wird um maximal 2,5 K überschritten und es ist innerhalb der betrachteten Höhendifferenz keine Temperaturschichtung zu verzeichnen.

Es kann festgestellt werden, dass die Optimierung der Klappensteuerung zu einer deutlichen Verbesserung des sommerlichen Raumklimas in den Grünhöfen beigetragen hat.

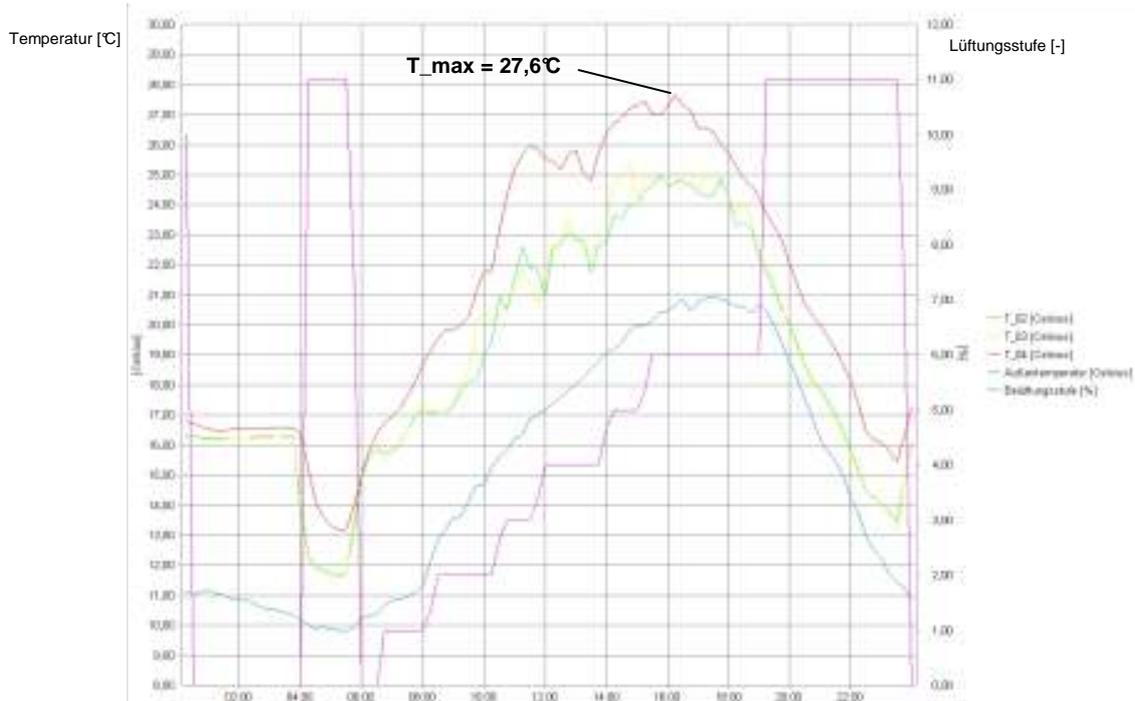


Abbildung 54 Stufenweise Öffnung der Klappen vor der Optimierung, Tagesverlauf der Temperaturen im Grünhof D-E (21.05.2010)

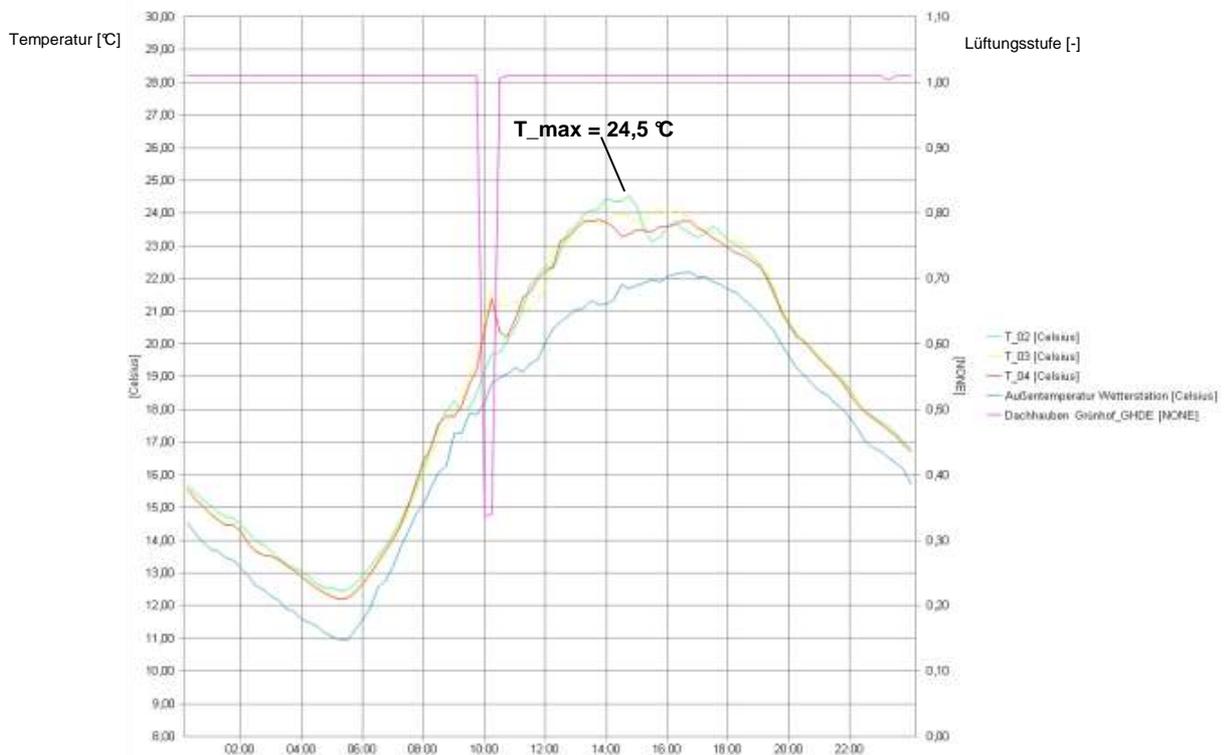


Abbildung 55 Vollständige, ganztägige Öffnung der Klappen nach der Optimierung, Tagesverlauf der Temperaturen im Grünhof D-E (08.05.2011) (1 = offen, 0 = zu)

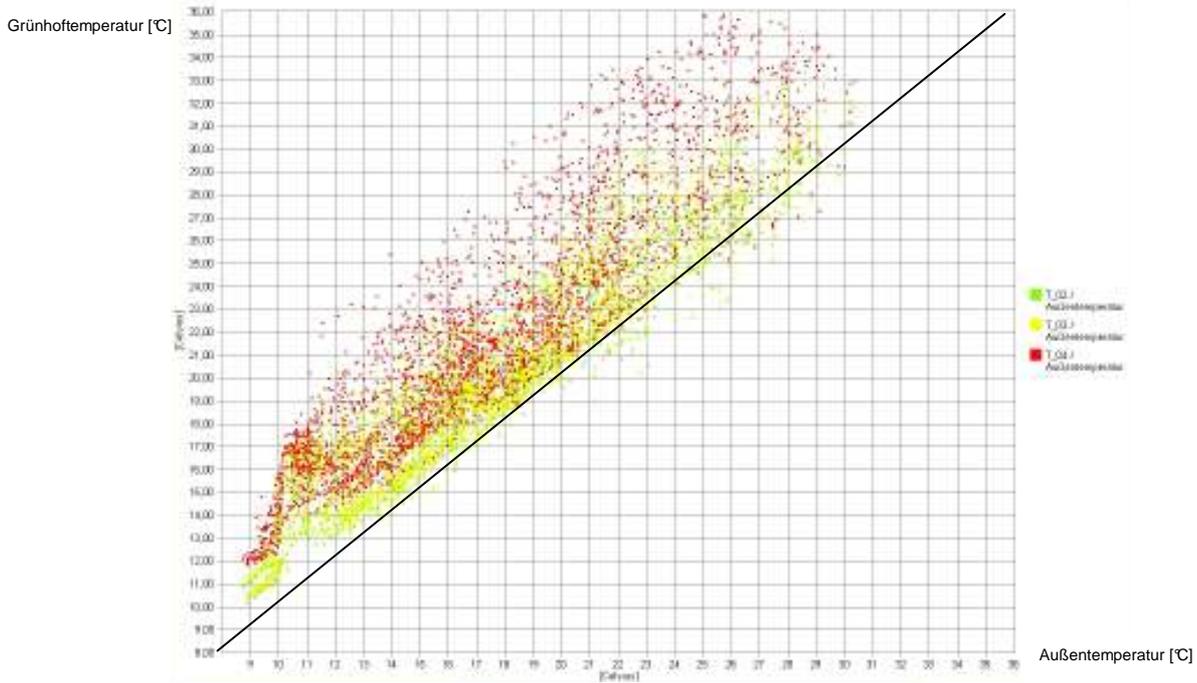


Abbildung 56 Temperaturen des Grünhofes D-E vor der Optimierung (2010). Die Temperaturen unterschreiten äußerst selten die Außentemperatur

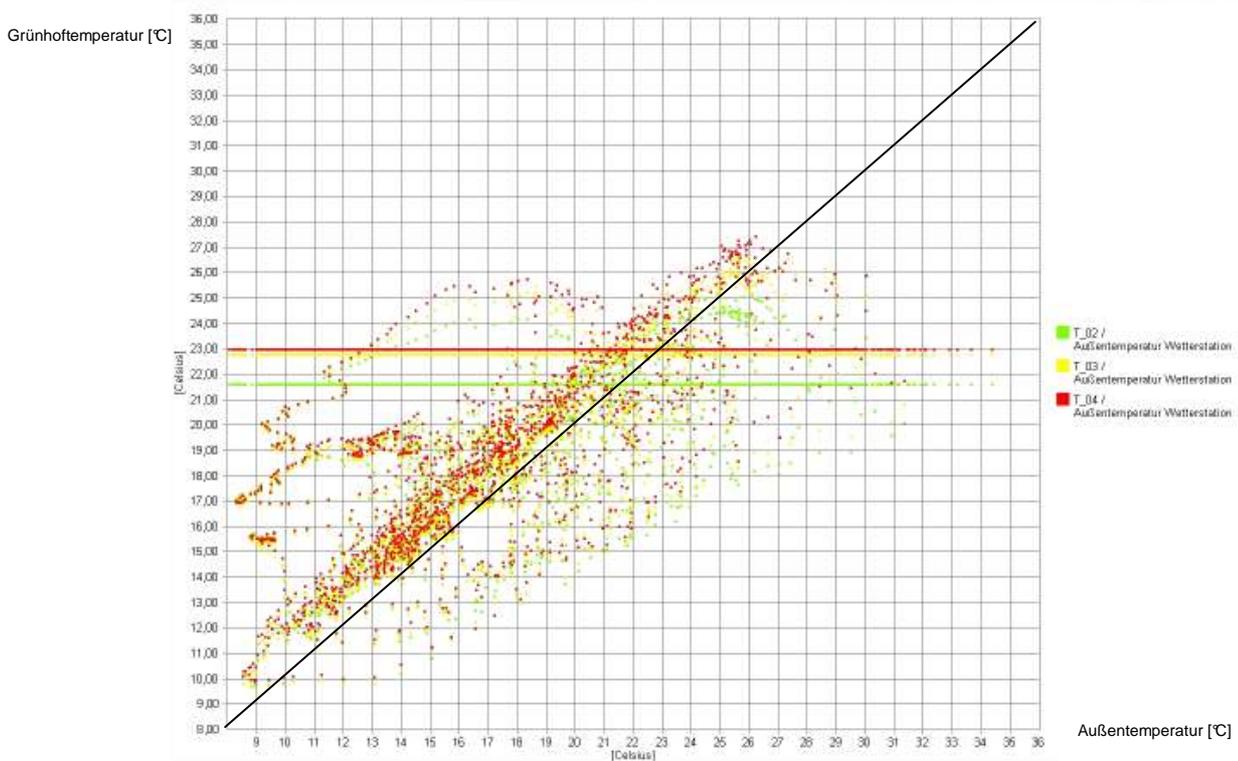


Abbildung 57 Temperaturen im Grünhof D-E nach der Optimierung (2011). Die Außentemperaturen werden auf allen Höhen teilweise unterschritten.



2.5 Energetische Analyse

2.5.1 Zielsetzung

Durch die Analyse der Energieverbrauchswerte, soll überprüft werden, ob die verbesserte Einbindung der Grünhöfe in das Energie- und Belüftungskonzept des Gebäudes zu einer nachweisbaren Verringerung des Energieverbrauchs führt. Hierzu werden die Verbrauchswerte vor und nach der Optimierung herangezogen.

Durch die Anhebung der Grünhoftemperatur während der Heizperiode und Reduzierung der Grünhoftemperatur während der Kühlperiode sind infolge reduzierter Transmissionswärmeströme sowohl für den Wärme- und den Kühlenergieverbrauch Reduzierungen zu erwarten. Die gezielte Luftführung dürfte zu einem geringeren Lüftungswärmeverlust führen. Die thermisch dynamische Gebäudesimulation prognostiziert eine Reduzierung des gesamten Kühlenergiebedarfs von 7 % für die Ebene 3 auf der Basis einer simulierten Reduzierung der Spitztemperatur im Grünhof auf Höhe der Ebene 3 von 5,2 K. Bzgl. der Reduzierung des Wärmenergieverbrauchs können keine Prognosen abgegeben werden, da die genauen Laufzeiten der Lüftungsanlagen nach der Optimierung unbekannt sind. Es erfolgten vielfach manuelle Eingriffe, die nicht erfasst werden konnten.

2.5.2 Ausgangsbasis

Grundlage für die Bewertung des Gesamtenergieverbrauchs sind die Abrechnungswerte des Energieversorgers an der Übergabestelle. Folglich bezieht sich der Gesamtenergieverbrauch auf die Endenergie, die sich aus der Nutzenergie und den Systemverlusten zusammensetzt. Unterzähler wurden erst im Jahr 2011 integriert, so dass diese nicht für eine vergleichende Bewertung herangezogen werden können. Der Wärmemengenzähler an der Übergabestelle ist der einzige Zähler, der über den gesamten Zeitraum der Gebäudenutzungsdauer (seit 2001) zur Verfügung steht. Daher erfolgt die Energiebilanzierung auf Basis der Wärmemengenzähler an der Übergabestelle für den Gesamtverbrauch.

Die Optimierung der Gebäuderegulung wurde gegen Ende des Jahres 2010 umgesetzt, so dass im Jahr 2011 die Auswirkungen der neuen Gebäuderegulung betrachtet werden können. Zum Vergleich und zur Verdeutlichung der Streubreite der Energieverbräuche in den einzelnen Jahren erfolgt die Betrachtung über den gesamten Nutzungszeitraum des Gebäudes.

2.5.3 Analyse der Verbrauchswerte

Die Witterungsbereinigung erfolgt nach VDI 4710-2 für die Wärmemengen und analog für die Kältemengen. Die Heizgrenztemperatur beträgt für die LBS 15°C. Die Gebäuderegulung schaltet auf Heizen oder Kühlen um, wenn der Mittelwert der Außentemperatur an drei Tagen 15°C über-



oder unterschreitet. Die Erhebung der Einzelwerte zur Mittelwertbildung erfolgt zu 6:00; 12:00 und 18:00 Uhr. Es wird übergangslos von Heizen auf Kühlen umgeschaltet.

Die Bildung der Heizgradtage erfolgt nach [DIN EN ISO 15927-6] und [Recknagel] auf Basis der Tagesdurchschnittstemperaturen für den Standort Hannover des DWD [dwd.de]. Die Kühlgradtage werden nach [Recknagel] berechnet. Die Wärme- und Kälteenergieverbrauchswerte werden auf die mittlere Heiz- und Kühlgradzahl des Betrachtungszeitraumes für den Standort Hannover (2001-2011) normiert.

Sowohl der Heiz- als auch der Kühlenergieverbrauch sind, wenn man vom Jahr der Inbetriebnahme absieht, im Jahr 2011 die niedrigsten, die während der Betriebszeit des Gebäudes auftraten, Abbildung 58 und Abbildung 59. Allerdings ist anzumerken, dass die niedrigen Verbrauchswerte des Jahres 2011 im Trend der vorausgegangenen Jahre liegen. Dies gilt besonders für den Kälteverbrauch. Der Kälteverbrauch des Jahres 2011 liegt im Bereich der Streuungen der Kälteverbrauchswerte seit 2007. Jedoch hat sich das Raumklima verbessert, das heißt die Überhitzungsstunden haben sich reduziert, siehe Abbildung 60. Beim Wärmeverbrauch 2011 ist eine deutliche Reduzierung von rund 21 % (witterungsbereinigt) im Vergleich zum Mittelwert der vier vorausgegangenen Jahre zu verzeichnen. Der Stromverbrauch hat sich ebenfalls reduziert. Dies ist auf reduzierte Laufzeiten der Belüftungsanlagen zurückzuführen, siehe Abbildung 62. Der Stromverbrauch hat sich in den beiden Vergleichsjahren ebenfalls reduziert und zwar um 12 %, siehe Abbildung 62 und Tabelle 15. Da teilweise in einzelnen Strängen der Lüftungsanlage elektrisch nachgeheizt wird, ist anzunehmen, dass diese Reduzierung nicht nur aus dem reduzierten Aufwand für Luftförderung resultiert sondern auch aus den verkürzten Betriebszeiten der elektrischen Nachheizung.

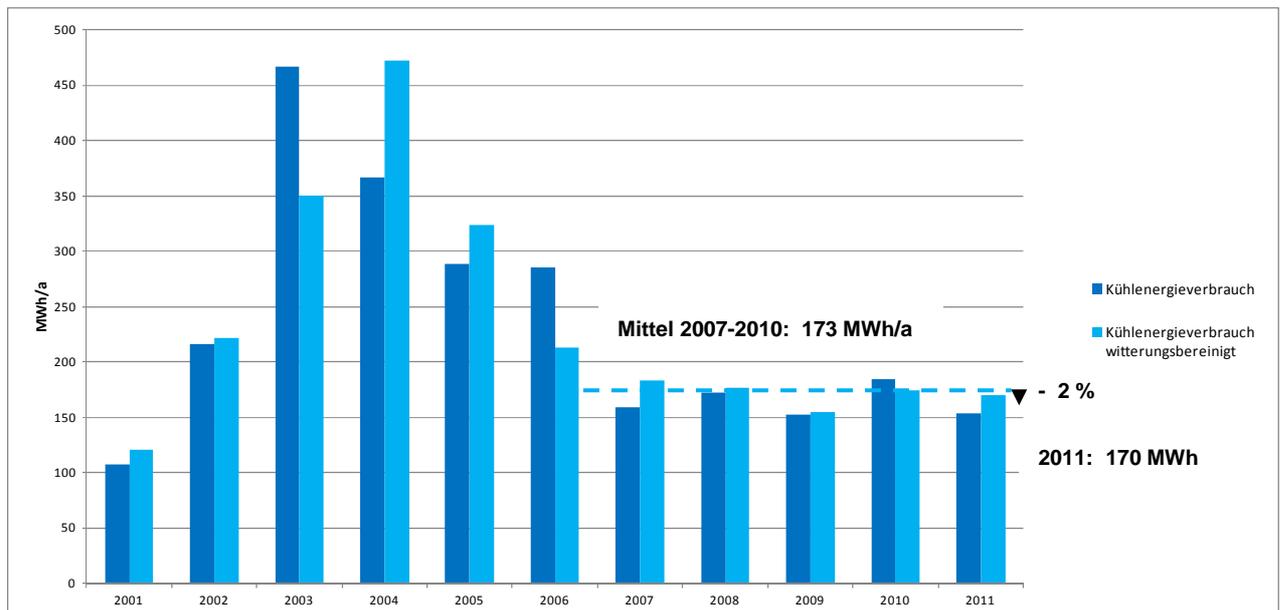


Abbildung 58 Jährlicher Kühlenergieverbrauch 2001 – 2011. Der Durchschnittswert von 2007 bis 2010 beträgt 173 kWh. Demgegenüber erfolgte im Jahr 2011 eine Reduzierung um 2 %

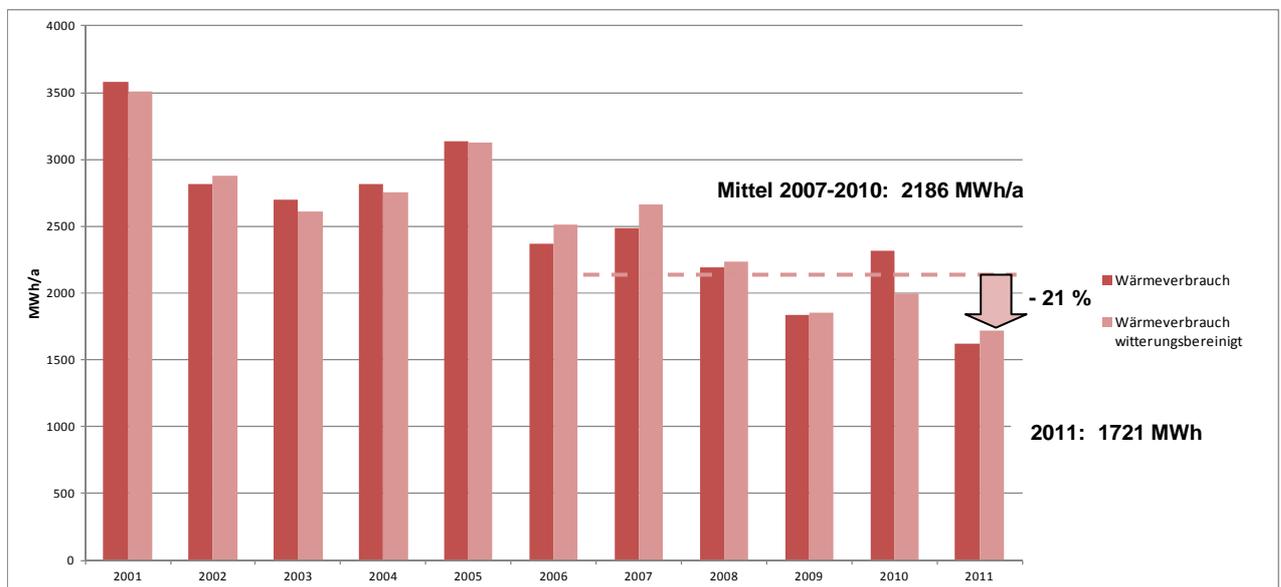


Abbildung 59 Jährlicher Wärmeenergieverbrauch 2001 – 2011, rote Linie: Durchschnitt der Jahre 2007 - 2010

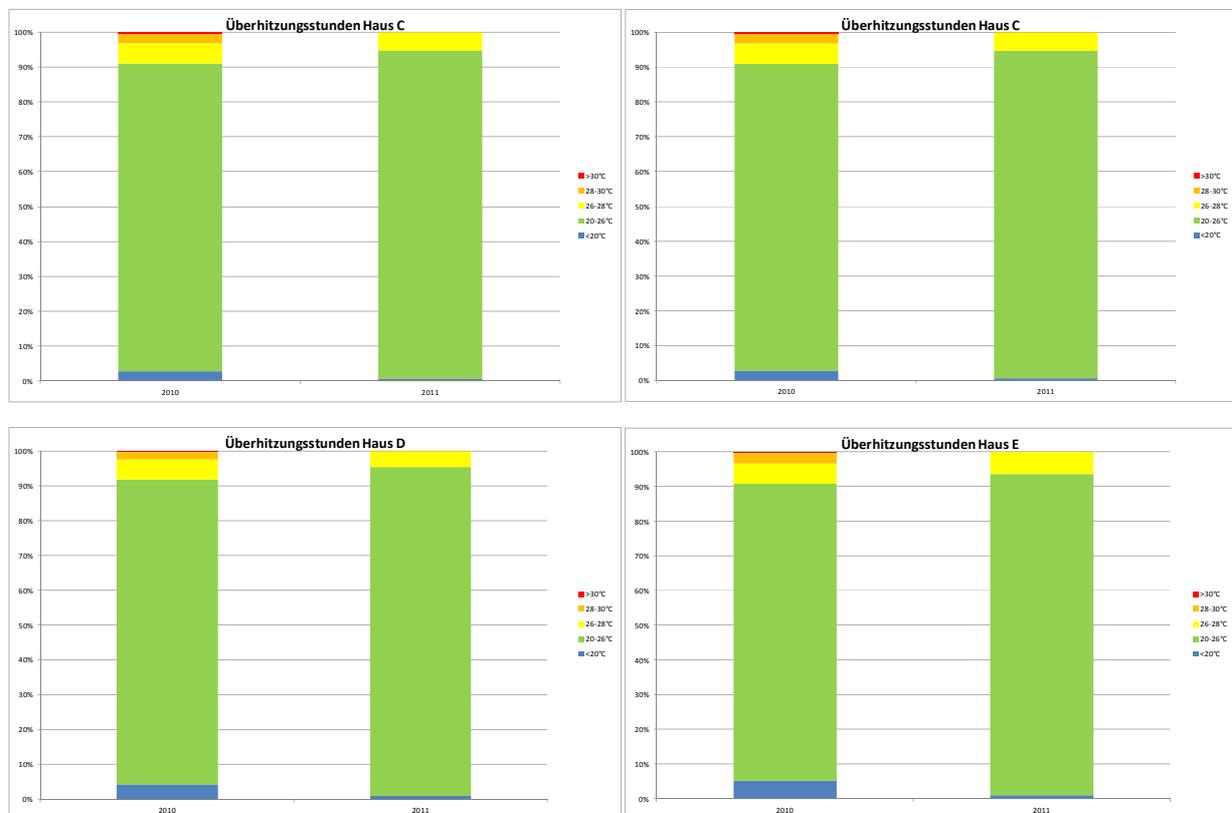


Abbildung 60 Anteil der Überhitzungsstunden der Kombizonen für 2010 und 2011

Die allgemeine Reduzierung des Energieverbrauchs im gesamten Betriebszeitraum ist auf eine fortschreitende Erkennung und Beseitigung von Fehlfunktionen im Gebäudebetrieb zurückzuführen [EVA]. Zu den ersten Betriebsoptimierungen hat womöglich die Teilnahme im Forschungsprojekt EVA seit 2004 und ATRIEN I seit 2007 beigetragen. So wurden z.B. interne Wärmelasten (Beleuchtung) reduziert oder seit Beginn der Teilnahme in ATRIEN vermehrt von der Möglichkeit der manuellen Übersteuerung der Lüftungsklappen der Grünhöfe durch das Betriebspersonal Gebrauch gemacht. Außerdem hat die LBS im Jahr 2010 das hydraulische System der Wärme- und Kälteversorgung neu abgeglichen und den Nutzern die Funktionsweise der Raumtemperaturregler erneut nahegebracht. Die Wirkung dieser Maßnahmen kann nicht abgeschätzt werden. Allerdings wird ausgeschlossen, dass die 21%ige Reduzierung des Wärmeverbrauchs auf sie zurückzuführen sind. Schließlich betreffen beide Maßnahmen lediglich die TAD und nicht die Konditionierung der mechanischen Zuluft, die einen Großteil des Energieverbrauchs ausmacht. Der Anteil der TAD macht am Wärmeverbrauch ca. 10 % aus, der der RLT ca. 70%, siehe Abbildung 61. Die empfohlene Abschaltung der RLT während der Heizperiode wurde nicht umgesetzt, allerdings erfolgte eine Reduzierung der Laufzeiten durch

manuelle Eingriffe des Betriebspersonals. Resultierende Laufzeiten der Belüftungsanlage im Betrachtungszeitraum konnten rückwirkend vom Gebäudebetreiber nicht genannt werden.

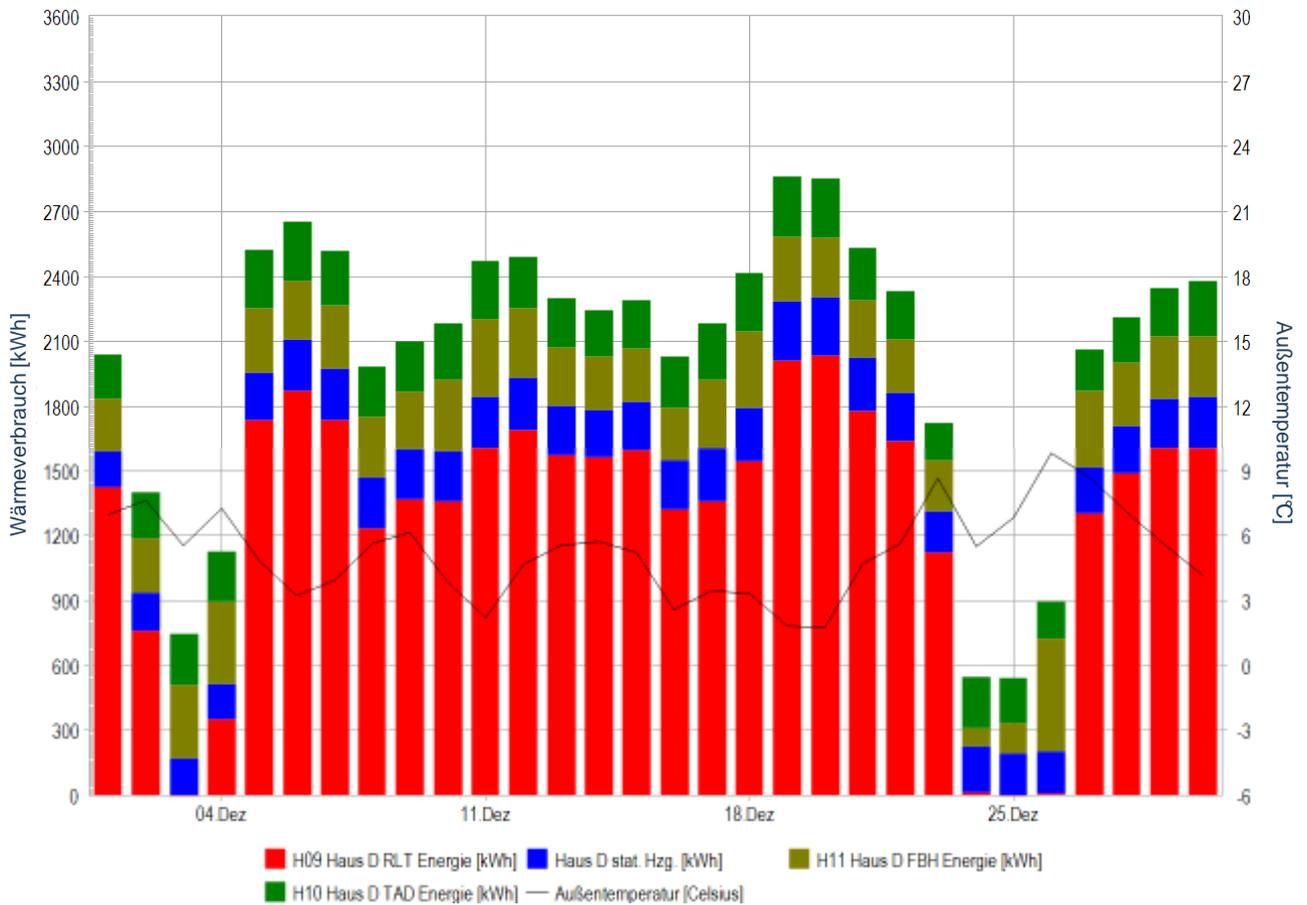


Abbildung 61 Aufteilung des Wärmeverbrauchs im Gebäude (Tageswerte Dezember 2011): Der Großteil entfällt auf die Erwärmung der Zuluft.

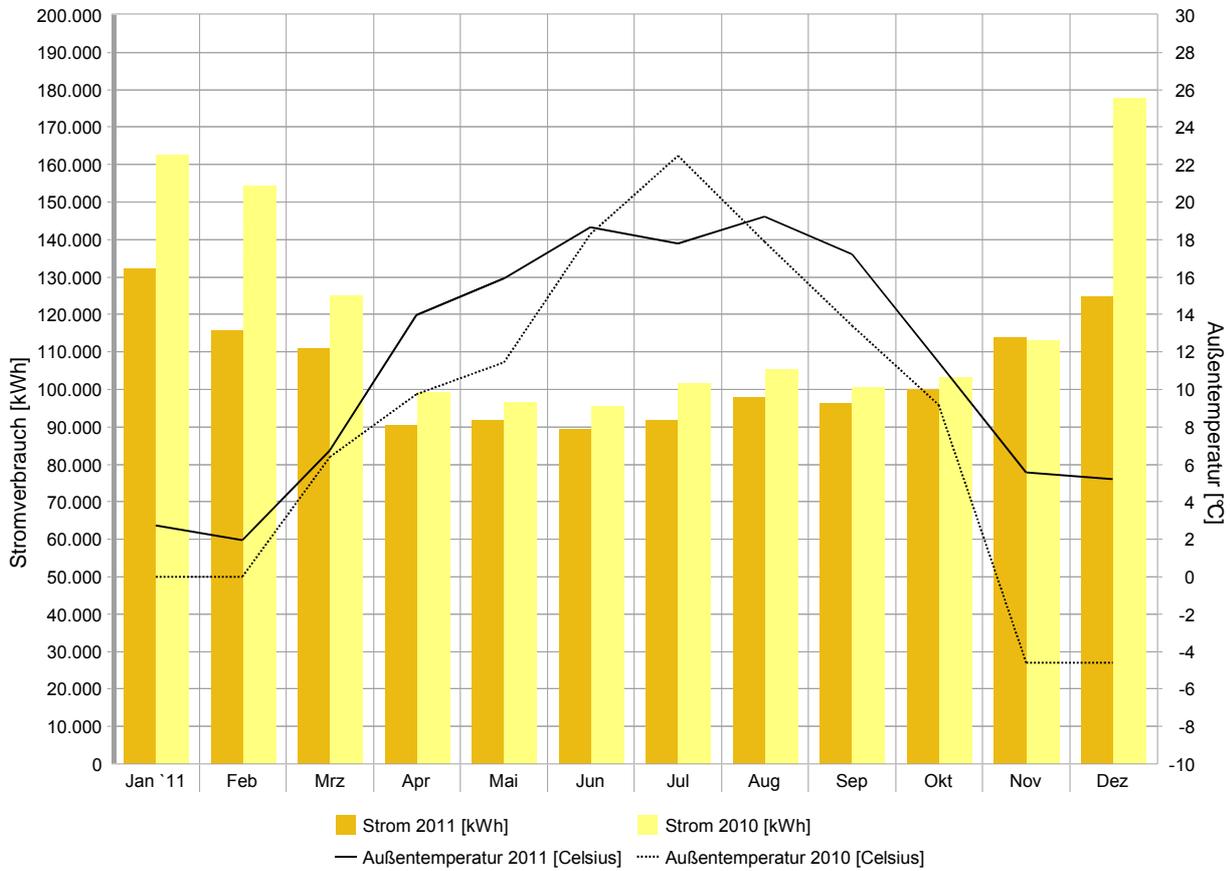


Abbildung 62 Stromverbrauch in den Jahren 2010 und 2011

Tabelle 14 Mittelwertberechnung der Grünhoftemperaturen

2010	[°C]	T_02	T_03	T_04	T_05
Januar		10,22	10,14	10,29	10,47
Februar		13,89	13,90	14,18	14,28
März		15,41	15,56	16,33	16,59
Mittelung Zeit		13,17	13,20	13,60	13,78
Mittelung Zeit und Höhe		13,53			

2011	[°C]	T_02	T_03	T_04	T_05
Januar		11,83	12,18	12,36	12,60
Februar		12,13	12,64	12,92	13,17
März		16,30	16,64	16,96	17,62
Mittelung Zeit		13,42	13,82	14,08	14,46
Mittelung Zeit und Höhe		14,12			

Bezogen auf die konditionierte Nettogrundfläche von 17.217 m² ergeben sich flächenspezifische Verbrauchswerte von 10 kWh/m²a Kälte und 125 kWh/m²a Wärme vor der Optimierung und 9 kWh/m²a Kälte und 55 kWh/m²a Wärme nach der Optimierung, siehe Tabelle 16 .

Tabelle 15 Jährliche Gesamtenergieverbräuche vor und nach der Optimierung

[MWh/a]	2010 (witterungsbereinigt)	2011 (witterungsbereinigt)
Endenergie Wärme	2314 (1998)	1620 (1722)
Endenergie Kälte	185 (174)	154 (170)
Endenergie Strom	1430	1254

Tabelle 16 Flächenspezifische Energiekennwerte (witterungsbereinigt) bezogen auf die konditionierte Nutzfläche von 17.214 m²

[kWh/m ² _{beh. NGF} a]	Mittel 2007 – 2010 Strom: 2010	2011	Reduktion
Endenergie Wärme	127	100	21 %
Endenergie Kälte	10,1	9,9	2 %
Endenergie Strom	83	73	12 %

2.5.4 Schlussfolgerung

Die 21%ige Reduzierung des Wärmeverbrauchs kann folgende Ursachen haben:

- Reduzierung der Laufzeiten der Lüftungsanlagen
- Verringerung der Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle zu den Grünhöfen
- Ungenaue Normierung der Wärmeverbrauchswerte durch die Witterungsbereinigung

Eine einzelne Ursache kann nicht für eine Reduzierung dieses Ausmaßes verantwortlich sein.

Die mittlere Grünhoftemperatur beträgt im Jahr 2010 13,53°C und im Jahr 2011 14,12°C², siehe Tabelle 14 . Da dieser geringe Unterschied allein nicht die Reduzierung des Wärmeverbrauchs

² Mittelwert über alle Höhen von Januar bis März



infolge verringerter Transmissionswärmeverluste bewirkt haben kann, ist anzunehmen, dass die Laufzeiten der Lüftungsanlagen entsprechend der Empfehlung deutlich reduziert wurden.

Die geringe Reduzierung des Kühlenergieverbrauchs ist darauf zurückzuführen, dass die Nachtauskühlung der Kerngebäude nicht umgesetzt wurde. Dem wird ein hohes Einsparpotential an Kälteenergie zugewiesen. Weiterhin bleiben die solaren Wärmelasten des Kerngebäudes durch die Optimierung des Belüftungskonzeptes unberührt.

3 Anwendung von CFD – Methoden für die Berechnung des Raumklimas von Atrien

Anhand der Optimierungsmaßnahmen der LBS kommen CFD – Methoden zur Anwendung. An diesen Fallbeispielen soll dokumentiert werden, welche Möglichkeiten und Grenzen die Anwendung von CFD in der Planung von Atrien haben.

3.1 Berechnung des Temperaturniveaus mit CFD - Methoden

Wie im Abschnitt 2.2.9 dargestellt wäre für Spitzentemperaturen in den Grünhöfen eine Absenkung um 5,2 K durch eine Maximierung der Lüftungsquerschnitte möglich. Geeignete Wettersituationen, die exakt die Randbedingungen der CFD - Simulation wiedergeben, standen nicht zur Verfügung. Stattdessen wird auf Basis der Abhängigkeit der Grünhoftemperaturen von der Außentemperatur für die Jahre 2010 (vor der Optimierung) und 2011 (nach der Optimierung) ein Vergleich angestellt, siehe Abbildung 63. Für das Jahr 2011 standen aufgrund eines Messausfalls von Juni bis August weniger Wertepaare zur Verfügung. Der dargestellte Zeitraum erstreckt sich vom 16.05. bis zum 10.10. beider Jahre. Durch die Ausdehnung der Zeiträume in den Mai und den Oktober hinein, konnten für 2011 trotz des Messausfalls sommerliche Tage ohne Bewölkung erfasst werden.

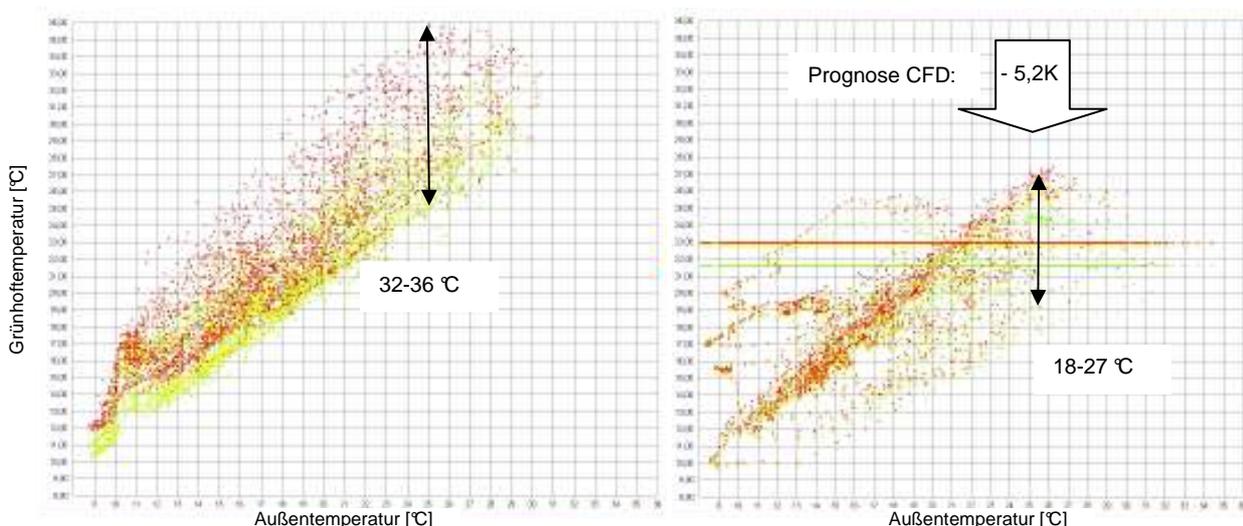


Abbildung 63 Temperaturabsenkung im Grünhof bei $T_{\text{außen}} = 25^{\circ}\text{C}$ durch Vergrößerung der Lüftungsquerschnitte; Messergebnisse und CFD-Prognose

Die CFD-Berechnung kann aufgrund adiabater Randbedingungen höchstens für einen Variantenvergleich herangezogen werden. Demzufolge ist für die Temperatur auf der Höhe der 3.



Ebene ($H=12$ m, rote Punkte im Diagramm) bei 25°C Außentemperatur eine Absenkung der Lufttemperatur in den Grünhöfen um $5,2$ K zu erwarten. Tatsächlich sind bei einer Außentemperatur von 25°C Grünhoftemperaturen zwischen 32°C und 36°C , im Mittel 34°C vor der Optimierung und nach der Optimierung zwischen 18°C und 27°C , im Mittel 25°C zu verzeichnen. Demzufolge steht der berechneten Differenz von $5,2$ K eine gemessene von $9,0$ K gegenüber. Allerdings können die zugrunde liegenden Randbedingungen insbesondere in Bezug auf die Solareinstrahlung und das Windaufkommen rückwirkend nicht genau genug ermittelt werden.

Daher werden im Folgenden die Randbedingungen für zwei Belüftungssituationen möglichst genau ermittelt und auf entsprechende CFD - Berechnungen angewendet.

Es werden zwei Tage aus den Jahren 2010 und 2011 ausgewählt, für welche Messwerte vorliegen, an denen sommerliche Wetterbedingungen vorlagen und ganztägig die Gebäudeleittechnik ordnungsgerecht lief ohne dass z.B. die Regen-/ Windwarnung eine Schließung der Klappen veranlasste. Weiterhin sollte die Solarstrahlung ähnlich stark sein, das heißt, die Tage sollen jahreszeitlich nah beieinander liegen. Somit bieten sich weiterhin die Tage 21.05.2011 und der 08.05.2010 an, die bereits in Abschnitt 2.4 für die Bewertung des thermischen Verhaltens der Grünhöfe herangezogen wurden. Da die Globalstrahlung an diesen Tagen nicht messtechnisch erfasst wurde, wird auf tabellierte Werte der DIN 4710:2003-01 für wolkenfreie Tage zurückgegriffen. Frei verfügbare archivierte Tageswerte [dwd.de] bestätigen, dass es sich bei diesen Tagen um weitestgehend wolkenfreie Tagen handelt (12 -13 Sonnenstunden). Die Globalstrahlungswerte sind für 54° Breite und 50° Breite tabelliert. Da Hannover auf 52° Breite liegt, werden die Werte interpoliert. Weiterhin werden die Werte für den 08.05. aus den tabellierten Werten des 21.05 und 24.04 interpoliert, siehe Tabelle 17. Gegen 16:00 Uhr scheint die Sonne nahezu senkrecht auf die Westfassade, so dass zu diesem Zeitpunkt mit den höchsten solaren Lasten im Tagesverlauf zu rechnen ist. Die Temperaturmaxima gegen 16:00 Uhr in den Grünhöfen bestätigen dies. Daher wurde 16:00 Uhr als Simulationszeitpunkt ausgewählt. Weiterhin erlaubt die senkrecht zu den Gebäudeachsen stehende Einstrahlung eine leichtere Bestimmung der Flächen, die direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt sind.



Tabelle 17 Atmosphärische Strahlungswerte für die CFD-Berechnung nach DIN 4710:2003-01

21.05.2010 16:00	Strahlungsart	S [W/m ²]
Horizontal	gesamt	458
	diffus	141
Westfassade	gesamt	669
	diffus	208
Ostfassade	gesamt	102
	diffus	102

08.05.2011 16:00	Strahlungsart	S [W/m ²]
Horizontal	gesamt	406
	diffus	133
Westfassade	gesamt	644
	diffus	198
Ostfassade	gesamt	94
	diffus	94

Zwar bietet FLUENT ein Solarstrahlungsmodell an, jedoch läuft dieses lediglich darauf hinaus, dass die direkt beschienenen Flächen mit einer entsprechenden flächenbezogenen Wärmeleistung beaufschlagt werden. Da die Strahlungsleistung nun ohnehin extern auf Basis der tabellierten Strahlungswerte berechnet wird, bietet es sich an, zur besseren Kontrolle die bestrahlten Flächen als Randbedingung mit einer flächenbezogenen Wärmeleistung zu versehen. Hierzu wird zunächst die in der Summe durch die transparenten Fassadenanteile eintreffende Strahlungsleistung berechnet, siehe Tabelle 18 .

Tabelle 18 Solareintrag bezogen auf transparente Fassadenfläche

21.05.2010 16:00	Fläche [m ²]	Diffus [W]	Direkt [W]	Gesamt [W]
dach_grho	964	135 882	305 493	441 375
fass_o	255	25 969	0	25 969
fass_w	255	52 957	117 371	170 327
Summe		214 808	422 864	637 671

08.05.2011 16:00	Fläche [m ²]	Diffus [W]	Direkt [W]	Gesamt [W]
dach_grho	964	128 172	263 090	391 262
fass_o	255	23 932	0	23 932
fass_w	255	33 862	69 506	103 368
Summe		185 966	332 596	518 562

Die Berechnung erfolgt für die Ost-, West- und Horizontalfassade für den diffusen und den direkten Strahlungsanteil. Der resultierende gesamte Solareintrag wird getrennt für die diffuse und direkte Strahlung auf die entsprechend beschienenen Flächen verteilt, siehe Tabelle 19 . Die diffuse Strahlung wird gleichermaßen auf alle Innenflächen verteilt, die direkte Strahlung nur auf die entsprechend beschienenen Flächen. Zuletzt erfolgt die Reduzierung der Strahlungsleistung auf 34% der Ausgangswerte entsprechend des g-Wertes der Verglasung.

Tabelle 19 Aufteilung der solaren Lasten auf die Innenflächen

21.05.2010			
Flächenaufteilung	Fläche [m ²]	S [W/m ²]	x 0.34 (g-Wert)
Direkt+Diffus bestrahlte Flächen	1 297	420	143
Diffus bestrahlte Flächen	979	94	32
Summe	2 276		

08.05.2011			
Flächenaufteilung	Fläche [m ²]	S [W/m ²]	x 0.34 (g-Wert)
Direkt+Diffus bestrahlte Flächen	1 297	338	115
Diffus bestrahlte Flächen	979	82	28
Summe	2 276		

In Summe ergibt sich ein Wärmeeintrag von 217 kW am 21.05.2010 und 176 kW am 08.05.2011 (Bezugsvolumen: ein Grünhof zwischen zwei Gebäuden). Der Wärmestrom beträgt dann für direkt und diffus beschienene Flächen 143 W/m² (21.05.2010) bzw. 115 W/m² (08.05.2011) und für die nur diffus beschienenen Flächen 32 W/m² bzw. 28 W/m².

Die CFD-Berechnung erfolgt stationär zunächst mit adiabaten Randbedingungen. Das heißt, dass die durch instationäre Wärmeleitung bedingte Wärmeabsorption³ nicht zum Tragen kommt. Daher ist davon auszugehen, dass die angesetzten flächenbezogenen Wärmeströme zu einer Überinterpretation der Wärmebelastung der Grünhöfe führen werden.

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 64 bis Abbildung 65 dargestellt. Die Variantenübersicht der Klappenöffnungen ist in Tabelle 20 dargestellt. Dabei wird zwischen zwei Varianten unterschieden, eine mit eingeschränktem Lüftungsquerschnitt gemäß Lüftungsstufe 6 vor der Optimierung und einer mit maximalen Lüftungsquerschnitten nach der Optimierung.

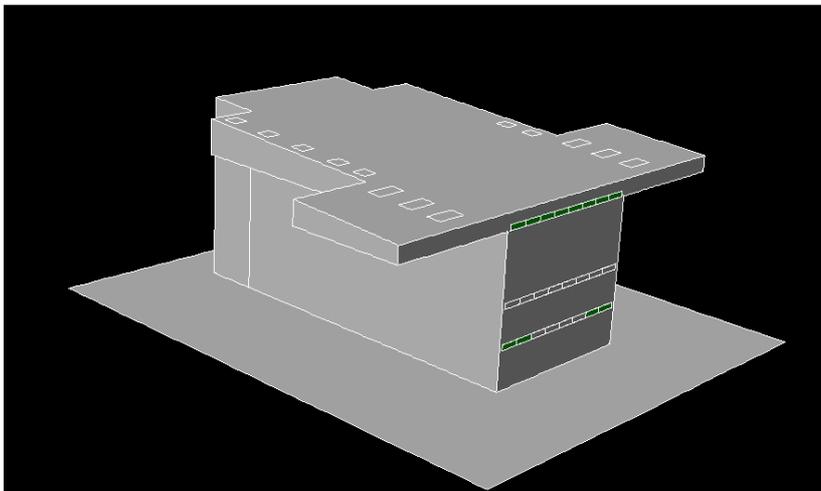


Abbildung 64 Nordwesten-Ansicht des Luftraumes des Grünhofes. Die angrenzenden Gebäude sind nicht dargestellt. Die seitlichen Auskragungen stellen den Luftraum über den Dächern des Gebäudes dar. Die in der Lüftungsstufe 6 offenen Klappen sind grün dargestellt. (vor Optimierung)

³ Der Begriff Wärmeabsorption wird im Folgenden gebraucht, um die Reduzierung der absorbierten Solarstrahlung durch die zeitabhängige Pufferung im Bauteil zu beschreiben. Der restliche Anteil wird durch Konvektion und langwelliger Abstrahlung in den Raum abgegeben. Siehe auch [Hell].

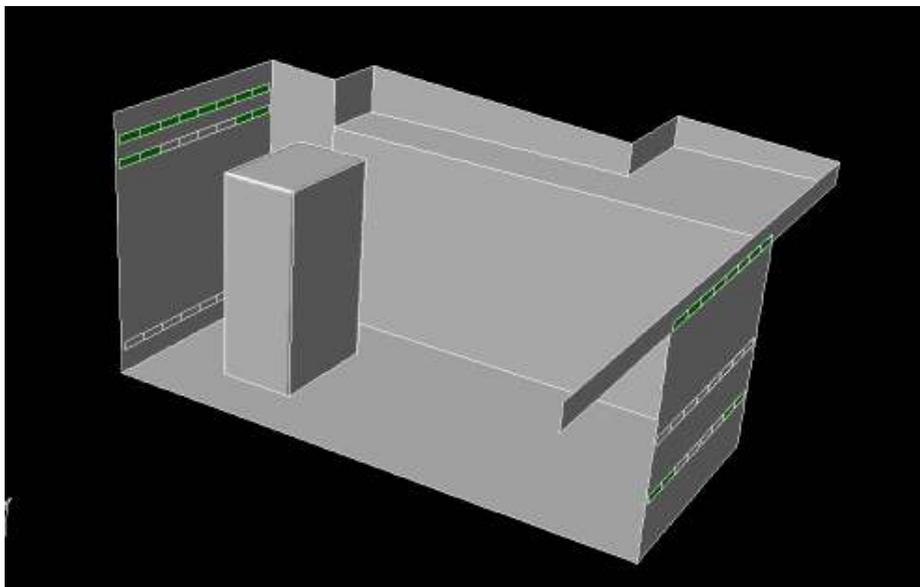
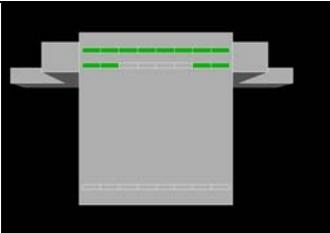
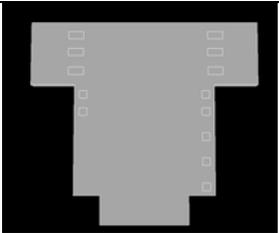
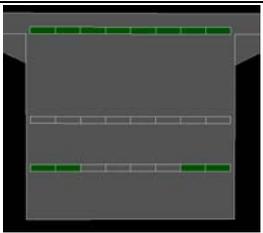
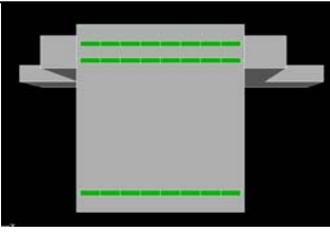
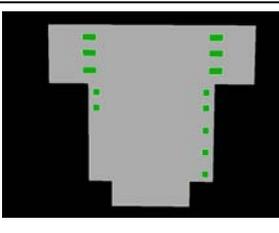
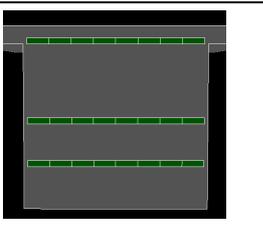


Abbildung 65 Innenansicht des Grünhofes mit dem in der Mitte befindlichen freistehenden Bau

Tabelle 20 Darstellung der Lüftungsszenarien, offene Klappen sind grün dargestellt

Variante	Ostansicht	Dachansicht	Westansicht
VAR1 Lüftungsstufe 06 (vor der Optimierung)			
VAR2 Maximale Lüftungsquer- schnitte (nach der Optimierung)			



Ergebnisse

Wie erwartet, wird durch die fehlende Wärmeabsorption der strahlungsabsorbierenden Flächen der Wärmeeintrag in den Luftraum zu hoch berechnet. Die Oberflächentemperaturen belaufen sich im Fall der Lüftungsstufe 6 auf bis zu 60°C, siehe Tabelle 21. Derartige Oberflächentemperaturen wurden im gesamten Erfassungszeitraum nicht gemessen. Die Lufttemperaturen erreichen in dieser Variante über 40°C. Die 30°C isotherme Kontur befindet sich nur knapp über dem Boden, siehe Abbildung 66. Stehen sämtliche Lüftungsquerschnitte zur Verfügung, reduzieren sich die Oberflächentemperaturen auf maximal 48°C und die Lufttemperaturen auf ca. 34°C. Allerdings sind diese Werte zu hoch, wie ein Vergleich mit den gemessenen Lufttemperaturen wie Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen.

Um die fehlende Wärmeabsorption der Umfassungsflächen darzustellen, ist eine Reduktion der auf der Oberfläche absorbierten Solarstrahlung erforderlich. Dieser Wert ist vom Bauteilaufbau und der Lage im Grünhof abhängig, sowie von der vorangegangenen Historie der aus Witterung und Gebäuderegulierung resultierenden Wärmeströme. Eine genaue Berechnung wäre aufwendig und in Ermangelung der Kenntnis notwendiger Randparameter im vorliegenden Fall ohnehin erschwert. Daher wird im Rahmen dieses Projektes von einer vertiefenden Betrachtung dieser Problematik abgesehen und im Folgenden die fehlende Wärmeabsorption durch eine überschlägige Reduzierung der einfallenden Strahlungsleistung um 20% berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 dargestellt. Die Oberflächentemperaturen erreichen in Variante 1a Werte bis maximal 52°C bzw. in der Variante 2a 38°C.

Tabelle 21 Temperaturfelder der VAR1 und VAR2 bei unreduzierter Strahlungsleistung (ohne Berücksichtigung der Wärmeabsorption), von oben nach unten: Querschnitt, Längsschnitt, Oberflächentemperatur

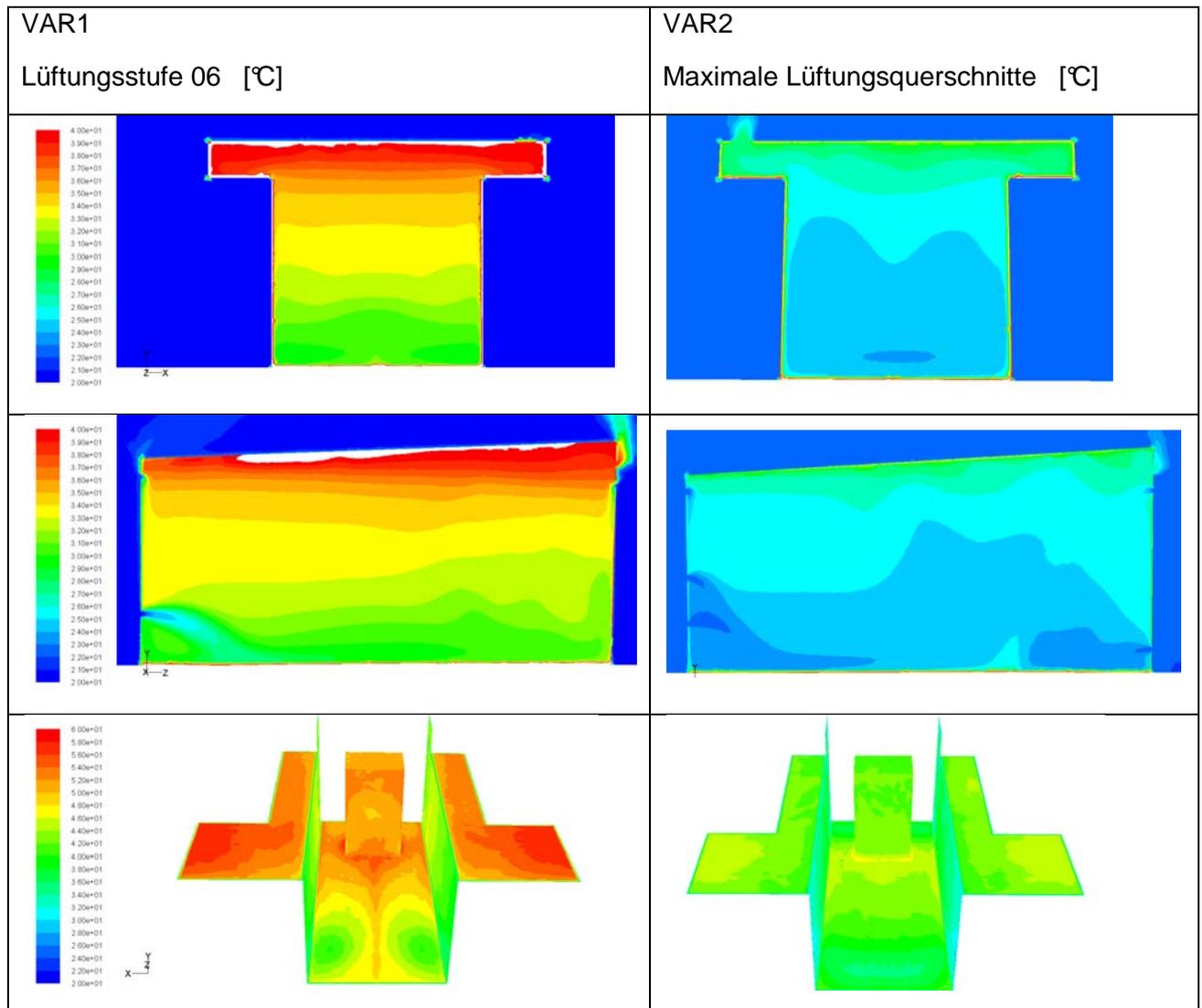
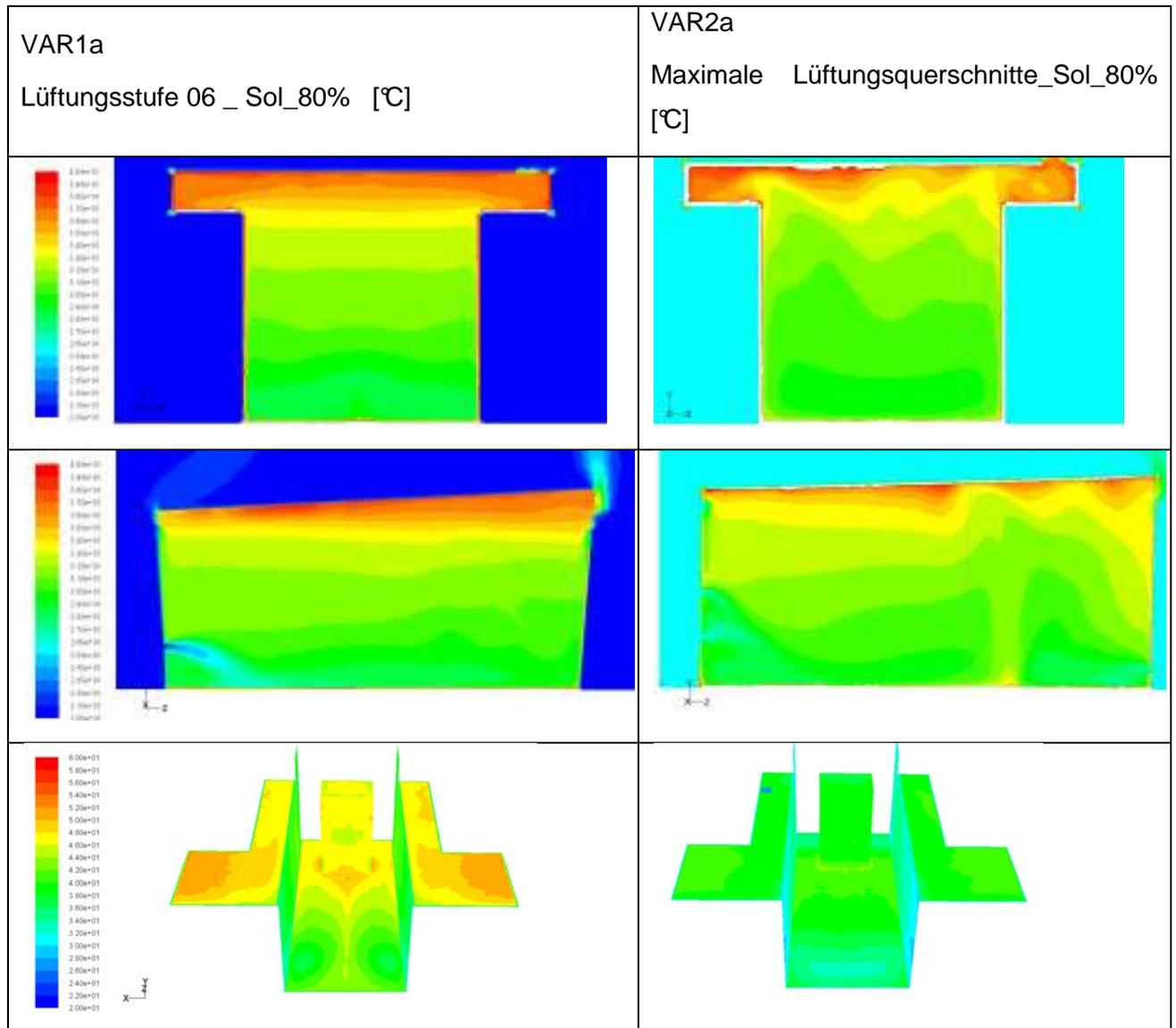


Tabelle 22 Temperaturfelder der VAR1 und VAR2 bei 80% der Strahlungsleistung



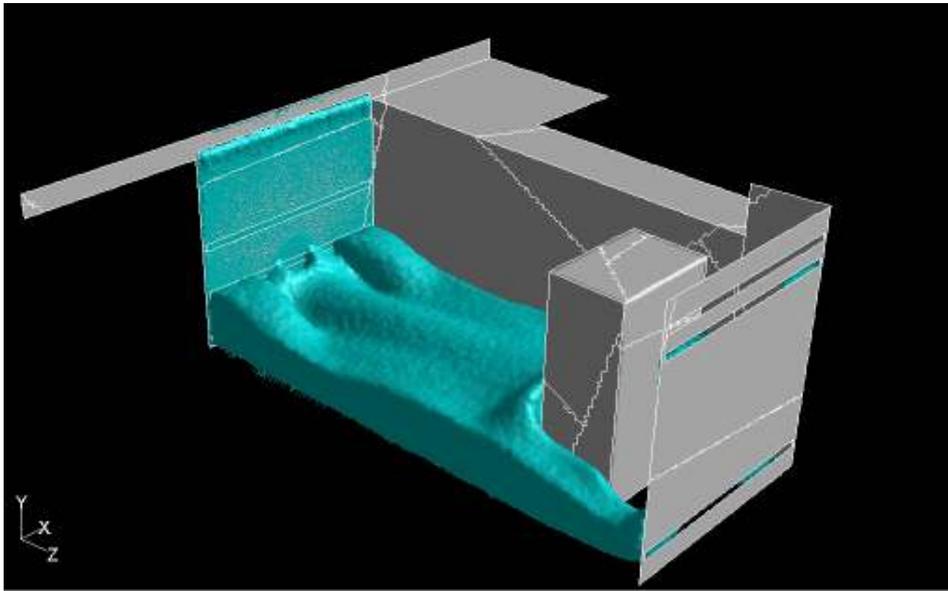


Abbildung 66 30°C-Isotherme, 08.05.2010 Lüftungsstufe 6

Für einen Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen der CFD-Rechnung wird im CFD-Modell eine virtuelle Messkette erzeugt, siehe Abbildung 67, und für alle Varianten der Temperaturverlauf entlang ihrer Höhe ausgegeben. Diese erzeugten vertikalen Temperaturverläufe werden den Messergebnissen der Messkette gegenübergestellt, siehe Abbildung 68 und Abbildung 69.

Es zeigt sich, dass bei beiden Varianten der Temperaturgradient qualitativ richtig dargestellt wird. Lediglich in Bodennähe zeigt die CFD - Berechnung entgegen den Messergebnissen eine Temperaturerhöhung. Das Temperaturniveau wird bei allen CFD - Varianten zu hoch berechnet. Durch die pauschale Annahme einer Wärmeabsorption von 20 % der auftreffenden Solarstrahlung ist eine Annäherung des Temperaturniveaus an die Messergebnisse zu verzeichnen. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass im Bereich der Messkette nach den CFD - Ergebnissen ein äußerst inhomogenes Temperaturfeld besteht, so dass eine geringfügige Verschiebung der berechneten Temperaturfelder oder der Position der Messkette zu anderen Temperaturwerten führen würde. Dieser Erkenntnis folgend hätte man die Messkette zur präziseren Ermittlung der Lufttemperaturen in einen ungestörteren Bereich des Luftraumes in Richtung der Raummitte anbringen müssen.

Der durch die CFD - Berechnungen falsch prognostizierte Anstieg der Lufttemperatur in Bodennähe zeigt, dass der angenommene Wert der Wärmeabsorption zu niedrig ist.

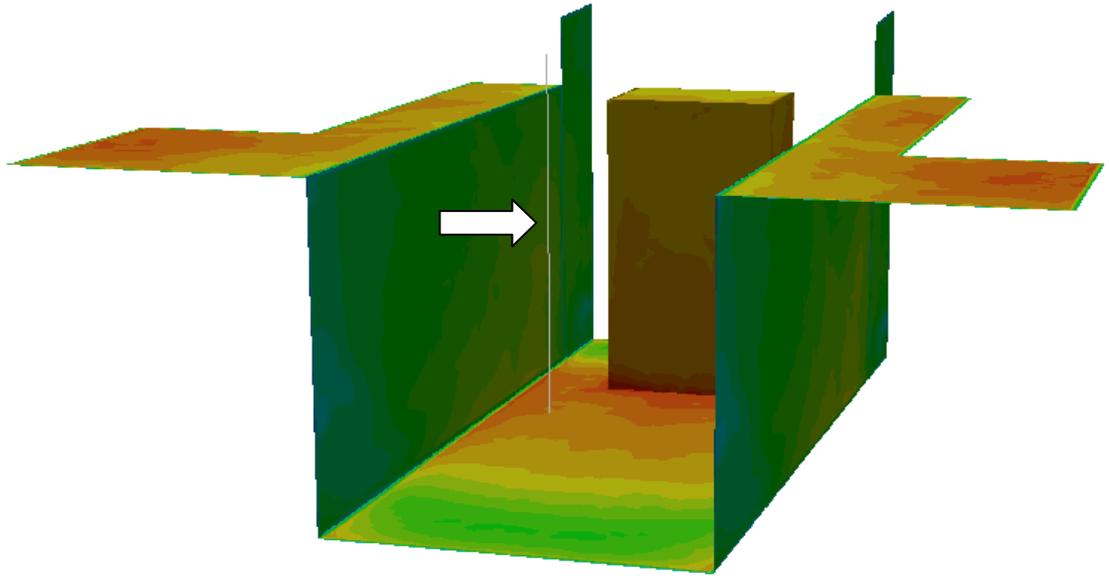


Abbildung 67 Lage der virtuellen Messkette im CFD-Modell

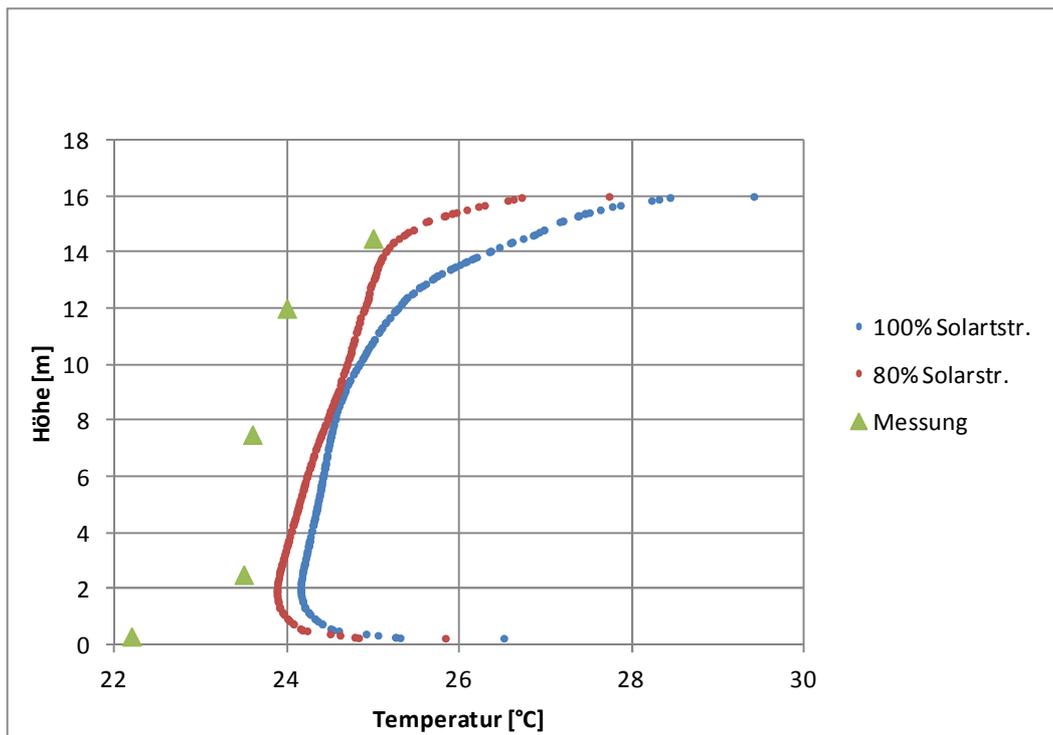


Abbildung 68 Gegenüberstellung der vertikalen Temperaturverläufe entlang der Messkette nach Ergebnissen der CFD-Berechnung und den Messergebnissen für die Variante 2 (voller Lüftungsquerschnitt)

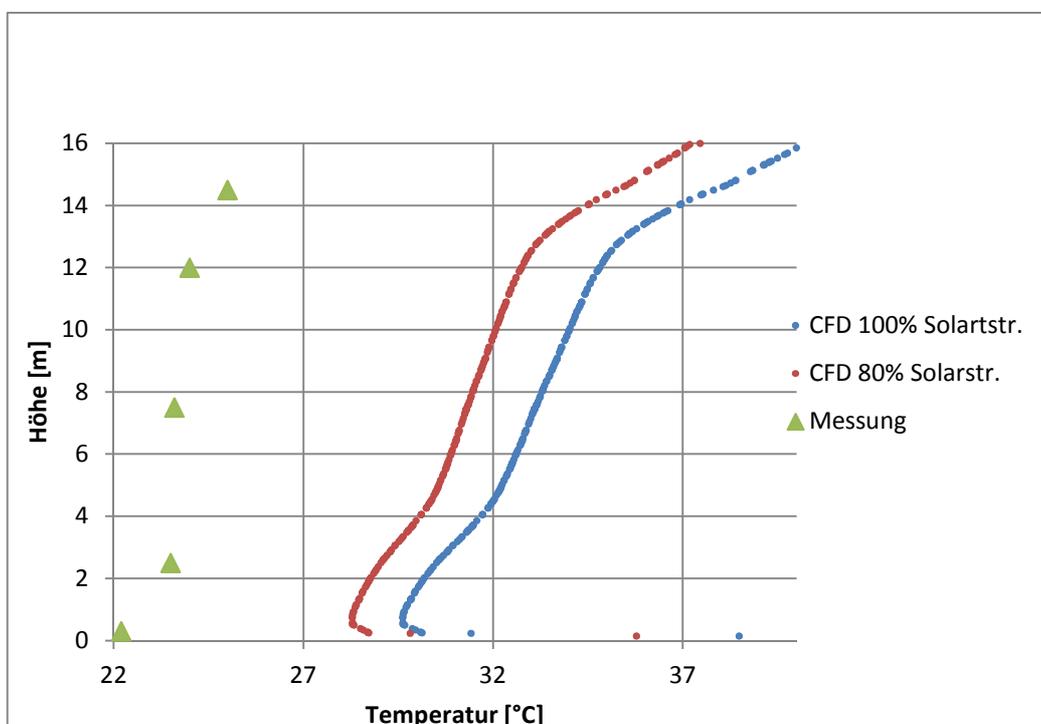


Abbildung 69 Gegenüberstellung der vertikalen Temperaturverläufe entlang der Messkette nach den Ergebnissen der CFD-Berechnung und den Messergebnissen für die Variante 1 (eingeschränkter Lüftungsquerschnitt)



Obwohl die Problematik der Wärmeabsorption nur aufgezeigt wird, können zwei wesentliche Erkenntnisse festgehalten werden:

1. In der Realität ist es für das Raumklima in einem Atrium entscheidend, ob die besonnten Flächen in schwerer oder leichter Bauweise ausgeführt sind. Massive Bauteile vermögen es, einen beträchtlichen Teil der Solarstrahlung zu absorbieren und über Nacht wieder abzugeben. Somit werden die Temperaturspitzen im Tagesverlauf reduziert.
2. Für die zeitunabhängige CFD-Simulation reicht es zur Bewertung des thermischen Verhaltens nicht aus, die Begrenzungsflächen adiabat anzunehmen. Dies führt zu einer Überbewertung der in den Luftraum eingetragenen Wärme. Es sind geeignete Annahmen zu treffen, die durch die instationäre Wärmeleitung bedingte Wärmeabsorption für den Simulationszeitpunkt zu bestimmen.

Für die Berechnung der Wärmeabsorption ist es denkbar, den Luftraum mit einem dynamisch thermischen Simulationsprogramm abzubilden. Je nach Diskretisierungsgrad des Luftraumes in einen oder mehrere Luftknoten kann mehr oder weniger die Temperaturschichtung im Luftraum berücksichtigt werden. Allerdings ist zu bedenken, dass die Diskretisierung des Luftraumes in einer thermisch dynamischen Simulation wiederum Annahmen für den Luftaustausch zwischen den Knoten voraussetzt. Idealerweise würde man in einem iterativen Verfahren zwischen beiden Berechnungsmethoden wechseln und jeweils die Randbedingungen anpassen. Zur Theorie der Wärmeabsorption und der instationären Wärmeleitung siehe auch [Hell]; [Lutz]; [VDI].

3.2 Bestimmung des hydraulisch wirksamen Querschnittes

Bei der Auslegung der Lüftungsquerschnitte ist es zur besseren Vergleichbarkeit unterschiedlicher Öffnungsarten hilfreich, die wirksame Fläche A_w einer Lüftungsöffnung zu betrachten, wie sie die [DIN 18232–2: 2007-11] im Rahmen der Auslegung der Zuluftöffnungen von Rauchabzugsanlagen beschreibt. Er berechnet sich zu

$$A_w = A_g \cdot c_z$$

mit A_g als geometrische Öffnungsfläche und dem Korrekturfaktor c_z , siehe Tabelle 23.

Tabelle 23 Korrekturfaktoren c_z für unterschiedliche Öffnungsarten für Zuluftöffnungen [DIN 18232- 2: 2007-11]

Öffnungsart	Öffnungswinkel	Korrekturfaktor c_z
Tür- oder Toröffnungen, Maschengitter		0,7
öffenbare Jalousien	90°	0,65
Dreh- oder Kippflügel	90°	0,65
	≥ 60°	0,5
	≥ 45°	0,4
	≥ 30°	0,3

Diese Werte beziehen sich zwar auf die Lüftungsöffnungen, für Abluftöffnungen wird analog der c_v - Wert genannt, der nur durch Versuche unter Seitenwindeinfluss oder ausnahmsweise auch durch tabellierte Werte ermittelt werden kann. Die tabellierten Werte stimmen außer für einen mit den c_z - Werten überein (erste Zeile in Tabelle 23 : 0,70 statt 0,65).

Es ist zu beachten, dass sich die gesamte Querschnittsfläche im Falle des thermischen Auftriebes in Zu- und Abluftöffnungen aufteilt. Idealerweise sollten die beiden Anteile in etwa gleich groß sein. Bei unterschiedlich großen Anteilen ist der kleinere als maßgeblicher für die Lüftungswirksamkeit anzusetzen. Zur Unterscheidung, ob eine Öffnung als Zu- oder Abluftöffnung fungiert, ist die Kenntnis der Lage der Druck - Nulllinie (neutrale Zone) im Raum erforderlich. Infolge der Auftriebswirkung bildet sich ein Druckgradient im Raum aus, der im unteren Teil einen Unterdruck und im oberen Teil einen Überdruck bewirkt. Bei über die Höhe gleichmäßig verteilten Zu- und Abluftöffnungen und homogener Temperaturverteilung liegt die neutrale Druckebene auf halber Höhe des Raumes. Am Beispiel der CFD - Simulation des LBS - Gebäudes gem. Abschnitt 3.1 wird deutlich, dass die Funktion der Lüftungsöffnung konträr zu überschlägigen Annahmen ausfallen kann. In der Lüftungsstufe 6 sind die Lüftungsöffnungen sehr ungleichmäßig verteilt. Von den drei Reihen auf der Ostseite ist die oberste Reihe vollständig und die mittlere teilweise geöffnet, während auf der Westseite die oberste Reihe vollständig und die unterste teilweise geöffnet ist, siehe Abbildung 70.

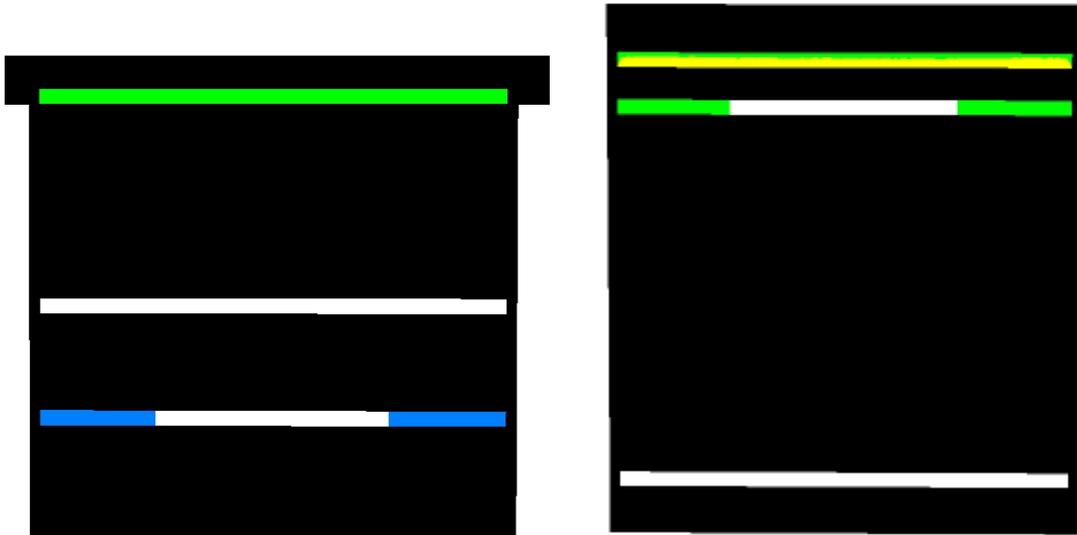


Abbildung 70 Geöffnete Klappen (farbig) und geschlossene Klappen (weiß) der Lüftungsstufe 6 auf der West- und auf der Ostseite des Grünhofes C-D

Bezüglich der obersten Klappenreihen auf der Ostseite und den beiden hoch angelegten oberen Klappenreihen auf der Westseite würde man annehmen, dass sie eher als Abluftöffnung fungieren, tatsächlich strömt dort aber Luft ein, siehe Abbildung 71.

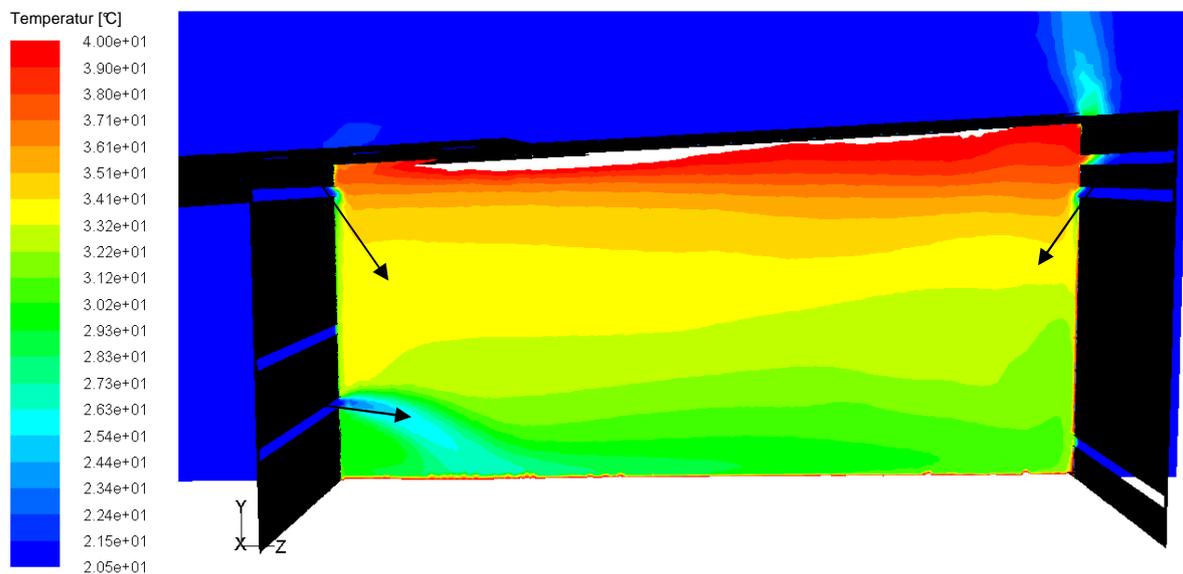


Abbildung 71 VAR 1; LS 6: Temperaturfeld im Schnitt. Man erkennt aufgrund der eindringenden Kaltluft die Zuluftöffnungen. In der obersten Reihe links(Ostseite) und der mittleren Reihe rechts (Westseite) tritt entgegen der Erwartung Luft ein. Nur die oberste Klappenreihe auf der rechten Seite fungiert als Abluftöffnung.

Ein Blick auf die Druckverteilung im Raum verdeutlicht die auslösenden Antriebskräfte. Die Nulllinie des Druckgradienten liegt weit über der Mittellinie, siehe Abbildung 72.

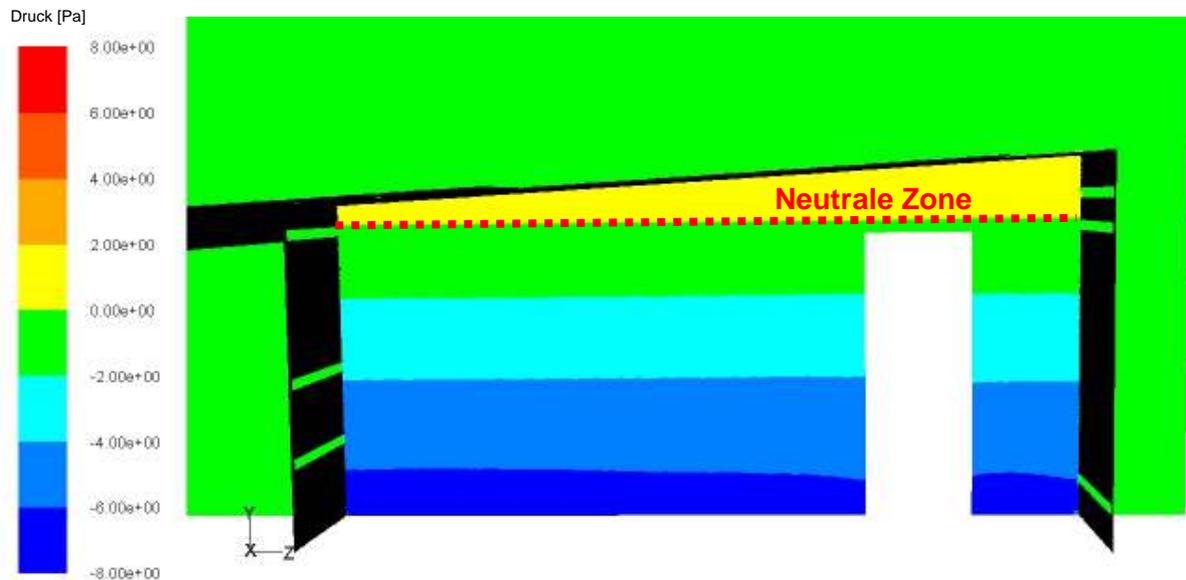


Abbildung 72 VAR 1; LS 6: Druckverteilung im Grünhof C-D, Lüftungsstufe 6

Für die Beurteilung der wirksamen Lüftungsquerschnitte bedeutet diese Erkenntnis, dass lediglich der Öffnungsquerschnitt der obersten Klappenreihe auf der Ostseite als für die Lüftung wirksame Abluftöffnung angesehen werden kann. Bei der optimierten Variante sind alle Lüftungsklappen inklusive der RWA - Öffnungen in der horizontalen Verglasung geöffnet. Erwartungsgemäß dienen alle RWA - Klappen in der Dachfläche als Abluftöffnungen. Die seitlichen Öffnungsklappen sind bis auf die oberste Reihe auf der Ostseite (links im Bild, Abbildung 73) Zuluftöffnungen. Jedoch erkennt man bei näherer Betrachtung, dass die beiden oberen Klappenreihen auf der Ostseite in eine Kurzschlussströmung verwickelt sind und daher nur indirekt an der Belüftung des Raumes teilnehmen, siehe Abbildung 73.

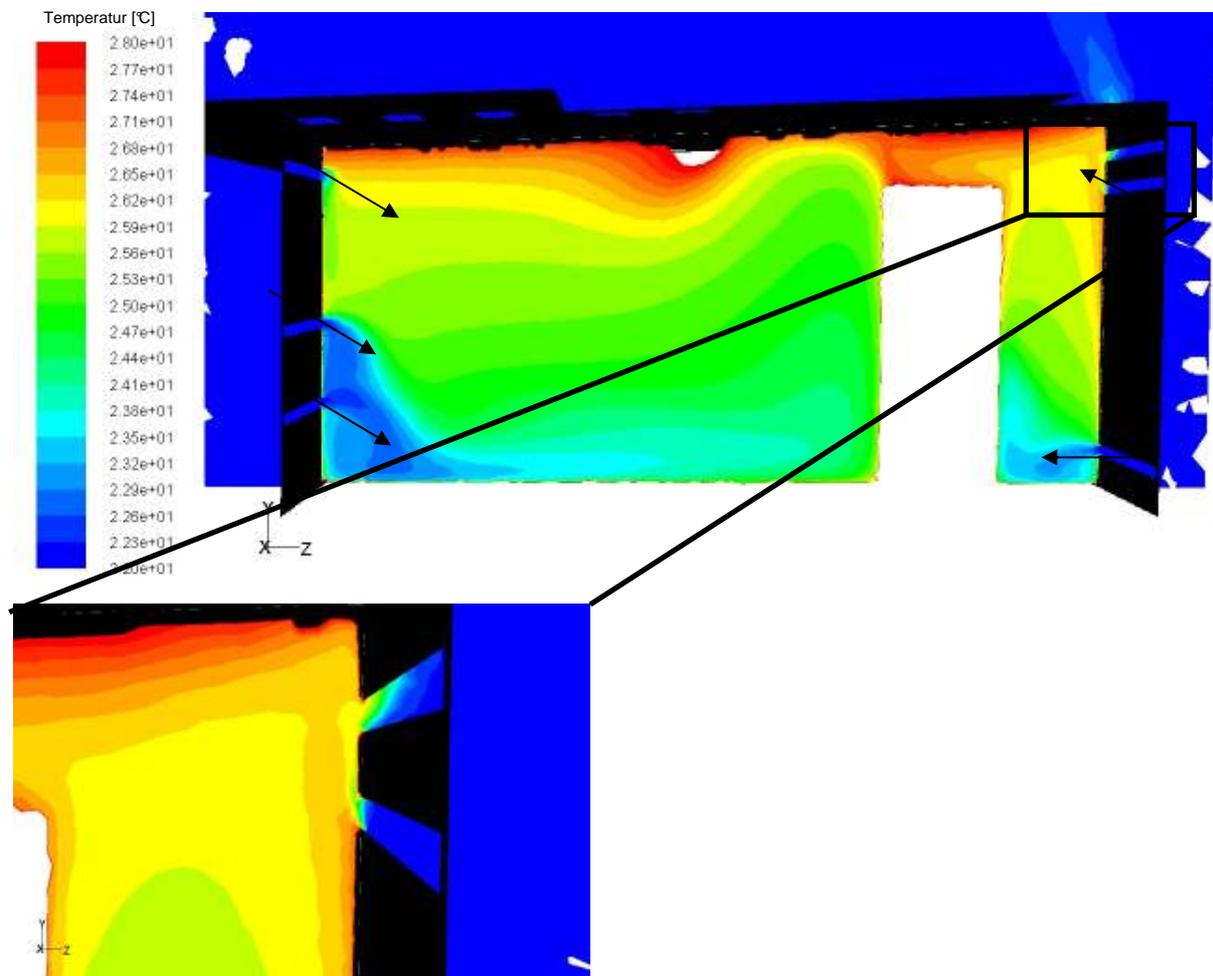


Abbildung 73 VAR 2; Maximale Lüftungsquerschnitte: Temperaturverteilung im Grünhof, alle Klappen geöffnet. Die Vergrößerung zeigt, dass die in der unteren Reihe eintretende Luft von der wandnahen Auftriebsströmung mitgenommen wird und durch die darüberliegende Reihe wieder ausströmt.

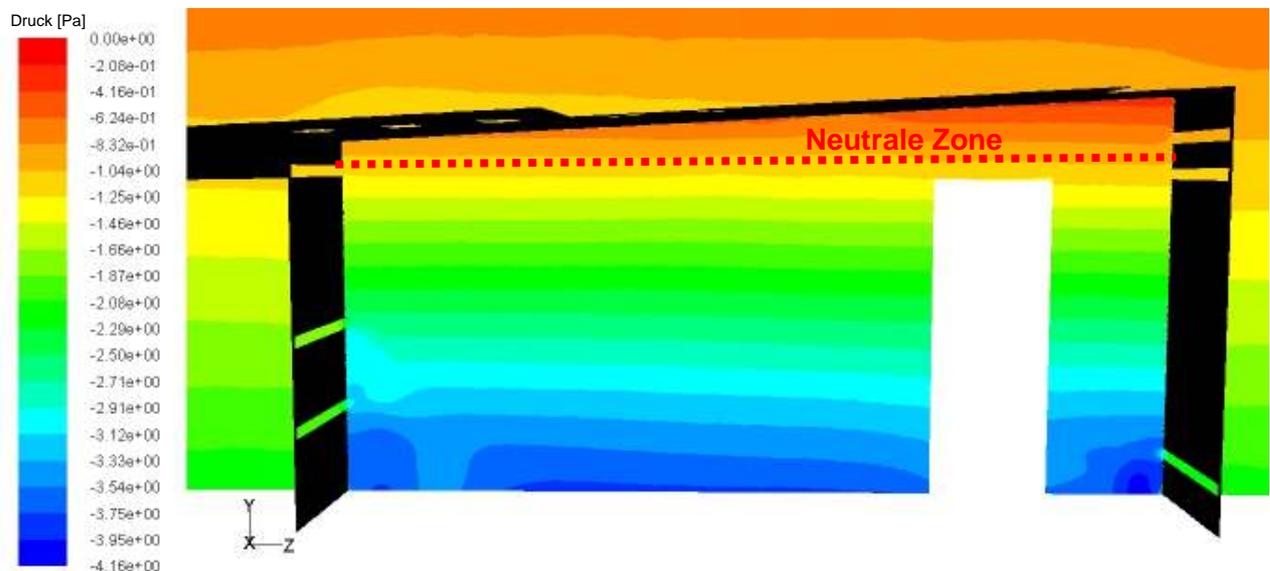


Abbildung 74 VAR 2; Maximale Lüftungsquerschnitte: Druckverteilung im Grünhof, alle Klappen geöffnet

Für die Bemessung der hydraulisch wirksamen Querschnitte bedeutet dies, dass lediglich die RWA Öffnungen als Abluftöffnungen angesetzt werden können, siehe Tabelle 24 .

Tabelle 24 Wirksame Flächen für unterschiedliche Klappenöffnungen

	A_w Zuluft	A_w Abluft	A_w Gesamt
Lüftungsstufe 6 (Anteil an transparenter Fassadenfläche) VAR 1 / 08.05.2010	7,41 m² (0,49 %)	7,78 m² (0,58 %)	15,18 m² (1,01 %)
Alle Lüftungsklappen geöffnet VAR 2 / 23.05.2011	38,14 m² (2,54 %) (19,10 m ² ohne Kurzschlussströmung)	24,89 m² (1,7 %)	63,00 m² (4,2 %)

Diese Betrachtungen zeigen, dass die in den Leitlinien erwähnten wirksamen Flächen nur als Orientierung dienen können, wenn die Lüftungsöffnungen ungleichmäßig verteilt sind. Eine Optimierung mittels CFD Methoden bleibt unumgänglich, wenn nicht überschlägige Methoden zur Anwendung kommen sollen.

3.3 Einsatz von CFD in der Atrienplanung

Immer häufiger wird aufgrund der verbesserten Handhabbarkeit der Programme und der gestiegenen Rechnerleistungen auf dieses Planungswerkzeug zur Auslegung des Raumklimas



zurückgegriffen. Allerdings bestehen hohe Unsicherheiten der Anwender bzgl. der Prognosegüte der erzielten Ergebnisse, so dass Untersuchungen oft auf einen Variantenvergleich hinauslaufen, ohne dass verbindliche Aussagen zum Temperaturniveau in den Atrien getroffen werden können. Zum einen besteht Unkenntnis, welche Parameter im Setup entscheidend sind, zum anderen sind Randbedingungen schwer zu spezifizieren. Die Problematik der Berücksichtigung der Wärmeabsorption auf den Innenflächen eines Atriums wurde bereits beleuchtet. Dem liegt die Einschränkung zugrunde, dass die üblicherweise verfügbaren Rechenkapazitäten ausschließlich stationäre (zeitunabhängige) Simulationen erlauben. Dadurch kann die Historie der Wärmeströme in den Umfassungsflächen eines Atriums nicht berücksichtigt werden. Randbedingungen und Rechenergebnisse berücksichtigen nur einen Zeitpunkt im Tagesverlauf ohne dass die Pufferwirkung der Umfassungsflächen Berücksichtigung findet. Eine verzögerte Wärmeabgabe durch Auskühlung der massiven Bauteile über Nacht kann nicht ohne weiteres berücksichtigt werden. Ein aufgezeigter Lösungsweg besteht darin, die Wärmeabsorption der auftretenden Solarstrahlung im Bauteil durch einen negativen Wärmestrom zu berücksichtigen. Hierzu sind Annahmen zu treffen oder thermisch dynamische Simulationsprogramme zur Hilfe zu nehmen. Weiterhin stehen Rechenmodelle zur Verfügung [Hell], die eine Abschätzung erlauben. Verallgemeinerbare Aussagen, die eine tatsächliche Stütze bei der Anwendung von CFD darstellen bestehen derzeit nicht, obwohl die Größe der Wärmeabsorption für das Temperaturniveau im Tagesverlauf eines Sommertages eine entscheidende Rolle spielt.

3.4 Darstellung turbulenter Luftströmungen

In der Raumluft sowie im Gebäudeumfeld ist die Luftströmung turbulent. Strömungsrichtung und -geschwindigkeit variieren mit Zeit und Ort. Dies hat Folgen für die resultierenden Druckdifferenzen an den Lüftungsöffnungen und für den Luftaustausch im Rauminneren. Durch die wechselnden Druckverhältnisse konnte durch Nebelversuche (ATRIEN I) an den Zustromöffnungen der LBS ein Pumpen beobachtet werden, also ein Ein- und Ausströmen der Luft, obwohl Hauptwindrichtung und thermischer Auftrieb nur ein Einströmen bewirken sollte. In den CFD - Berechnungen wird üblicherweise mit dem Standard $k-\epsilon$ Turbulenzmodell gearbeitet. Dieses Turbulenzmodell ist eigentlich für Rohströmungen mit einer voll ausgebildeten Turbulenz entwickelt worden und dafür ausreichend validiert. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses Turbulenzmodell auch für Raumströmungen unter den verfügbaren Turbulenzmodellen am geeignetsten ist. [IEA]. Es seien darüber hinaus RNG - $k-\epsilon$ Turbulenzmodelle genannt, die geeigneter seien als das Standard-Modell. Das $k-\epsilon$ Turbulenzmodell ist besonders aufgrund



seiner Robustheit beliebt, so dass wirtschaftliche Berechnungen erst möglich werden. Turbulente Wirbel werden nicht explizit aufgelöst, zumal es aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit turbulenter Strömungsformen in einer stationären CFD – Simulation keine eindeutige Lösung geben würde. Stattdessen werden Geschwindigkeitsvektoren ausgegeben, die als Mittelung der auftretenden turbulenten Schwankungen verstanden werden können. Das zeitabhängige Pumpen an den Öffnungen wird nicht dargestellt, stattdessen eine singuläre Strömungsrichtung ausgegeben.

Im Rauminnern kann die fehlende Auflösung der Turbulenz zu einer Änderung der Durchmischung der Raumluft und somit zu einer Änderung der Lüftungseffizienz führen, die letztendlich auch den Luftaustausch beeinflusst.

Eine präzisere Methode zur Darstellung der Turbulenz ist die zeitabhängige Berechnung mit einem LES-Turbulenzmodell. Das LES-Turbulenzmodell zeichnet sich im Gegensatz zum $k-\epsilon$ Turbulenzmodell dadurch aus, dass große Wirbel direkt numerisch berechnet werden und nur kleine Wirbel weiterhin eine Mittelung erfahren. Das LES Modell kommt auch bei großen Grasshofzahlen zum Einsatz (z.B. zur Berechnung der Rauchgasverteilung bei Bränden), da das $k-\epsilon$ Turbulenzmodell hierbei an seine Grenzen stößt.

In Kooperation mit dem Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig erfolgt die Betrachtung des Atriums des Energieforums Berlin (siehe Forschungsprojekt ATRIEN I) mittels eines LES-Modells unter Berücksichtigung der Gebäudeumströmung, die im Bereich der Lüftungsöffnungen für wechselnde Druckverhältnisse sorgt, siehe Abschnitt 3.6.

3.5 Windeinfluss

Der Windeinfluss auf den Luftwechsel wurde bereits in ATRIEN I angeführt. Gemäß [GERDER] und [BS 5925] überlagern sich die Antriebseffekte aus Wind und thermischen Auftrieb bzgl. ihrer Wirkung auf den Luftwechsel nicht. Vielmehr ist abzugrenzen in welchen Fällen der Wind die dominierende Kraft ist und in welchen Fällen der thermische Auftrieb. Selbst in den Fällen in denen durch den Wind und seine vorherrschende Richtung eine Unterstützung des thermischen Auftriebes zu erwarten wäre, ist dies nicht unbedingt gegeben, wie Abbildung 77 zeigt. Dort ist die Luftgeschwindigkeit an der Einströmöffnung des Atriums des Energieforums Berlin während des Tracergasversuches am 8.11.2008 aufgezeigt. Zwischen Innen- und Außenlufttemperatur herrscht eine Temperaturdifferenz von ca. 3 K (räumlich und zeitlich während des Betrachtungszeitraumes gemittelt). Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, gemessen auf dem Dach des Gebäudes, beträgt 2 m/s und der Wind trifft senkrecht auf die Zuluftöffnung, so dass eine

Volumenstromzunahme und eine gerichtete Strömung zu erwarten ist. Die Messung (Auflösung 10 s) zeigt jedoch eine starke Varianz des Volumenstromes. Teilweise fällt der Volumenstrom auf Null herab. Dass heißt, dass die wechselnden Druckverhältnisse an den Öffnungen zeitweise der durch den Auftrieb bedingten Strömungsrichtung entgegenstehen und sogar aufheben. Aus qualitativer Sicht bestätigt diese Messung, dass eine Überlagerung der beiden Antriebseffekte nicht zulässig ist. Tabelle 25 zeigt die Randbedingungen während der Messung.

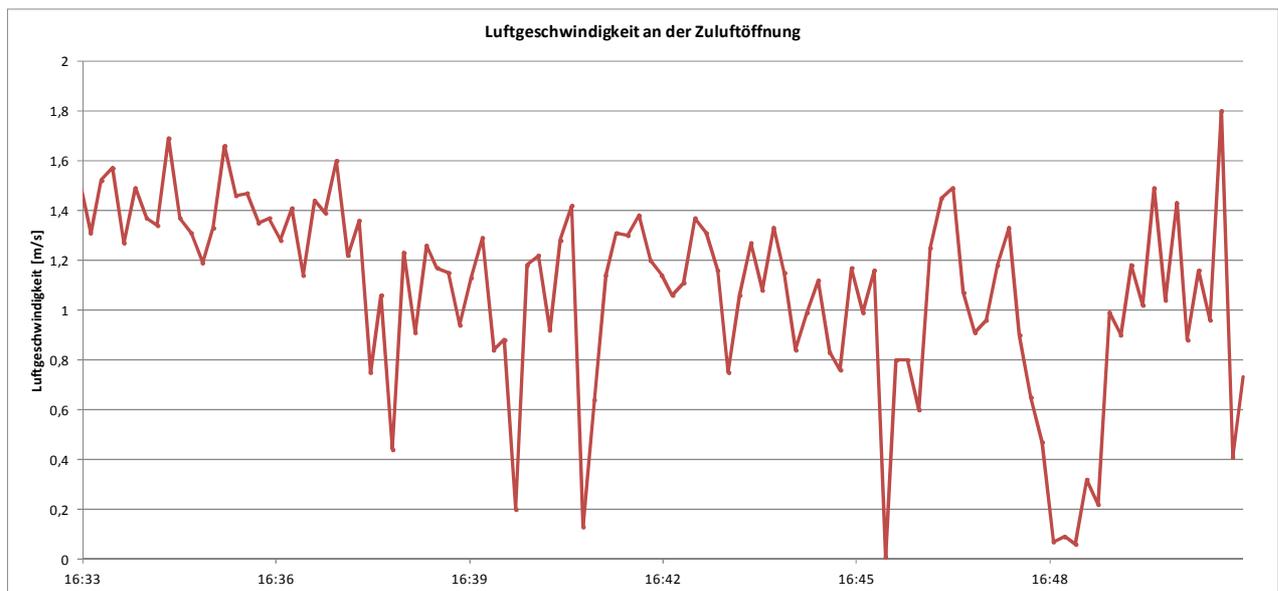


Abbildung 75 Luftgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung des Atriums des Energieforums Berlin, siehe folgende Tabelle für die Randbedingungen (Auflösung 10 s; Momentanwerte)

Tabelle 25 Randbedingungen während der Messung

Datum		08.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Öffnungsflächen		Zuluft+Abluft
Außenlufttemperatur	[°C]	12
Atriumlufttemperatur	[°C]	15
Windgeschwindigkeit (10 Min - Mittel)	[m/s]	2
Windrichtung	[°]	180
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m ²]	56,7
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m ²]	70,3
Durchflusskoeffizient der Klappen (90°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,65
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen Aeff 1	[m ²]	36,855
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen Aeff 2	[m ²]	45,695
Δh	[m]	20
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	-
Druckdifferenz bei 2 m/s Südwest Wind [Gerder]	[Pa]	5,21

Die wechselnden Druckverhältnisse an den Lüftungsöffnungen resultieren aus der turbulenten Strömung im Gebäudeumfeld. Inwiefern die Berücksichtigung der Turbulenz einen Einfluss auf den Luftwechsel hat, soll in folgender Untersuchung geklärt werden.

3.6 Untersuchung der turbulenten Einströmbedingungen mit numerischen Methoden (Dipl. - Phys. Sonja Uphoff)

Am Beispiel des Energieforums Berlin untersucht das Institut für Rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig den Einfluss fluktuierender Windfelder auf die Belüftung. Das Atriumgebäude wird zeitaufgelöst und räumlich mit einem Large Eddy Simulation (LES) Modell nach Smagorinsky untersucht. Dazu wird das Lattice Boltzmann (LB) Verfahren angewendet. Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur parallelisierten Berechnung auf Grafikkarten, so dass im Vergleich zu einem konventionellen RANS - Modell eine Steigerung der Berechnungseffizienz erzielt werden kann. Die Verwendung von LES Modellen für die Berechnung des Raumklimas ist gegenüber RANS Modellen vorteilhafter, da LES Modelle zu verlässlicheren Ergebnissen führen [CHEN]. [Haupt] verglich Messungen einer freien Auftriebsströmung mit den Berechnungsergebnissen verschiedener RANS Modelle und einem LES Modell. Auch er kommt zu dem Ergebnis, dass das LES Modell die höchste Übereinstimmung mit den Messergebnissen aufweist. Daher wird das LES Modell als Referenzmodell für die Beurteilung der turbulenten Einflüsse auf den Luftwechsel herangezogen. Für die Berücksichtigung des Auftriebes wird der Boussinesq – Ansatz gewählt.



Abbildung 76 Luftbild der EnergieForums (GoogleMaps)

In Abbildung 76 ist das Studienobjekt Energieforum Berlin in der Aufsicht gezeigt. Die für die Simulation relevanten Details sind Tabelle 26 eingezeichnet. 0 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen und die jeweils gewählten Parameter. Es wurden zwei verschiedene Temperaturdifferenzen zwischen Gebäude und Umgebung betrachtet. Die Außengrenzen des Simulationsgebiets wurden als NoSlip Ränder modelliert, so wie es auch in einem Windkanal der Fall wäre. Am Einfluss wurde eine konstante Geschwindigkeit parallel zur unteren Gebäudeöffnung vorgegeben. Dies soll dazu führen, dass die Außenströmung hauptsächlich über Fluktuationen auf die Innenströmung wirkt, und nur eine geringe mittlere Geschwindigkeit induziert. Es kann auch angenommen werden, dass es sich um eine häufig auftretende Windrichtung handelt, da dies einem Wind in nord-westlicher Richtung entlang der Spree entspricht. Der Ausflussrand wurde über einen konstanten Druck definiert. Für das Temperaturfeld und das Tracergas wurde angenommen, dass die Werte an allen Außengrenzen ihrem Fernfeldwert entsprechen. Zunächst wurde nur das Strömungsfeld und Temperaturfeld berechnet, um einen gültigen Anfangszustand zu erreichen. Nach 24 Sekunden simulierter Zeit wurde dann begonnen die Verteilung des Tracergases über 12 Sekunden aufzuzeichnen. Es wurden fünf verschiedene Situationen untersucht, wobei Temperatur und Umgebungsgeschwindigkeit variiert wurden. Eine Auflistung der Parameter für diese fünf Fälle findet sich in 0. Da LES Simulationen immer nur eine von vielen möglichen Realisierungen der turbulenten Strömungen darstellen, wurden zu jedem Setup zwei verschiedene Rechnungen mit leicht variierten Anfangswerten durchgeführt.

Tabelle 26 Für die Simulation gewählte Parameter

	Wert
Temperaturdifferenz	3°C/30°C
Temperatur Außenluft	20°C
Reynoldszahl	15000
Rayleighzahl	$1.7 \cdot 10^{10}/1.7 \cdot 10^{11}$
Prandtlzahl	0.75
Gebäudehöhe (Modell)	3m
Gebietslänge/höhe/breite	10.2m/4.8m/9.6m
Simulationszeit gesamt	36s
Zeitschritte gesamt	300000
Gitterauflösung	0.375m

Tabelle 27 Bezeichnung und Parameter der verschiedenen Simulationen

Bezeichnung	Geschwindigkeit [m/s]	Temperaturdifferenz [K]
C1	6	30
C2	0	30
C3	6	3
C4	0	3
C5	6	0

In einem zweiten, vereinfachten Setup wurde nur noch das Innere des Atriums simuliert. An der oberen Öffnung wurde ein konstanter Druck angesetzt, an der unteren Öffnung wurde ein konstanter Fluss vorgegeben. Es wurden die Flüsse $I_1=0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ und $I_2=0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. Die Tracergaskonzentration und Temperatur werden an der Einflussöffnung auf den Fernfeldwert gesetzt und an der Ausflussöffnung extrapoliert. Die erste Simulation mit Fluss I_1 sollte in etwa den beiden Simulationen mit hohem Temperaturunterschied entsprechen, die zweite dem Fall C4 (vgl.0). Anhand dieser Tests sollte untersucht werden, inwieweit ein solches Modell den Verlauf der Tracergaskonzentration reproduzieren kann.

Als dritter Schritt wurde eine noch drastischere Vereinfachung durchgeführt: Es wurden die Abnahmen des Tracergases über die Zeit mit exponentiell abklingenden Funktionen verglichen. Es wurde untersucht, ob ein linearer Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit des Luftaustausches und dem mittleren Fluss durch das Gebäude angenommen werden kann. Als Referenz wird die Halbwertszeit von C2. ermittelt. Die übrigen Halbwertszeiten werden dann über $\tau_i = \tau_2 \cdot I/2$ prognostiziert, wie dies aus dem Ansatz von (Perera and Walker, 1985) mit

$$V \frac{dk}{dt} = I k \text{ folgt, wobei } V \text{ das Volumen eines Raumes, } k \text{ die Konzentration und } I \text{ der Fluss ist.}$$

Verschiedene Räume, sowie die Umgebung können über Flüsse gekoppelt werden. Solche Zonen-basierten Ansätze sind in den Anwendungen sehr verbreitet, wie dies zum Beispiel in den ASHRAE-Normen beschreiben ist.

Plot 2.1 zeigt den Abfall des Tracergases über die Zeit. Der schnellste Abfall ergibt sich für hohe Temperaturdifferenzen und verschwindenden äußeren Wind (Fall C1). Am schlechtesten funktioniert der Luftaustausch für geringe Temperaturdifferenzen und geringem äußeren Wind (Fall C3). Gleichzeitig wurden die mittleren Flüsse an der Eintrittsöffnung bestimmt. Tabelle 2.1 gibt die Flüsse an, die aus einer Mittelung zwischen den beiden Simulationen bestimmt wurden, wobei die Werte aus den beiden Simulationen um etwa ± 0.01 schwanken. Aus Tabelle 2.1 ist zu



entnehmen, dass die Flüsse, die durch Temperaturdifferenz und äußeren Wind generiert werden, einander entgegengesetzt sind. Im Fall C3 liegt passend zum langsameren Abfall der Tracergases demnach auch ein geringerer mittlerer Fluss vor. Für den Fall c1 scheint die Strömung durch den höheren Temperaturunterschied dominiert zu sein, so dass der relative Unterschied zu C2 geringer ausfällt. Andererseits unterscheidet sich der Verlauf der Tracergaskonzentration zwischen C1 und C2 deutlich. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Flüsse sehr viel geringer sind, als dies bei einer laminaren, zeitlich konstanten Verdrängungsströmung aus den Tracergaskonzentrationen rückzuschließen wäre. Zeitabhängige turbulente Effekte scheinen eine wichtige Rolle zu spielen. Für die beiden Realisierungen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen wird ein fast identischer Abfall der Tracergaskonzentration gemessen. Die mittleren Flüsse unterscheiden sich stark. Die instantanen Geschwindigkeiten weichen stark von den gemittelten ab. So liegt beispielsweise für den Fall C3 die turbulente Intensität gemittelt über den Atriuminnenraum bei etwa 100%. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die nur zweidimensional und zeitlich gemittelten Daten stärker fehlerbehaftet sind und dass ein sehr langes Mittelungsintervall notwendig wäre.

Tabelle 28 Zeitgemittelte Flüsse durch das Atrium

Bezeichnung	Fluss[m ³ /s]
C ₁	0.18
C ₂	0.21
C ₃	-0.01
C ₄	0.04
C ₅	-0.07

Mit den in den vorangegangenen Simulationen ermittelten und in 0dargestellten Parametern wurden zwei weitere Simulationen mit dem reduzierten Setup durchgeführt. Für den ausschließlich durch eine Temperaturdifferenz getriebenen Fall C2 ist die Übereinstimmung recht gut, wie Abbildung 77 zu entnehmen ist. Für den zweiten untersuchten Fall sollte der Abfall etwas schneller als für C4 erfolgen. Stattdessen findet der Abfall langsamer statt. Die Vermutung liegt nahe, dass die fehlenden turbulenten Fluktuationen zu diesem schwächeren Luftaustausch führen. Es wurde nun weiterhin untersucht, inwiefern ein exponentieller Abfall (wie im Abschnitt Simulationsaufbau beschrieben) die Geschwindigkeit des Luftaustausches reproduzieren kann. Dies ist in Abbildung 78 dargestellt. In Anbetracht der erheblichen Messunsicherheiten für die Flüsse kann man von einer weitgehend quantitativen Übereinstimmung sprechen. Eine Ausnahme bildet der Fall C3. Offensichtlich kann ein auf dem zeitgemittelten Fluss basierender Ansatz nicht zielführend sein, wenn dieser nahezu verschwindet.

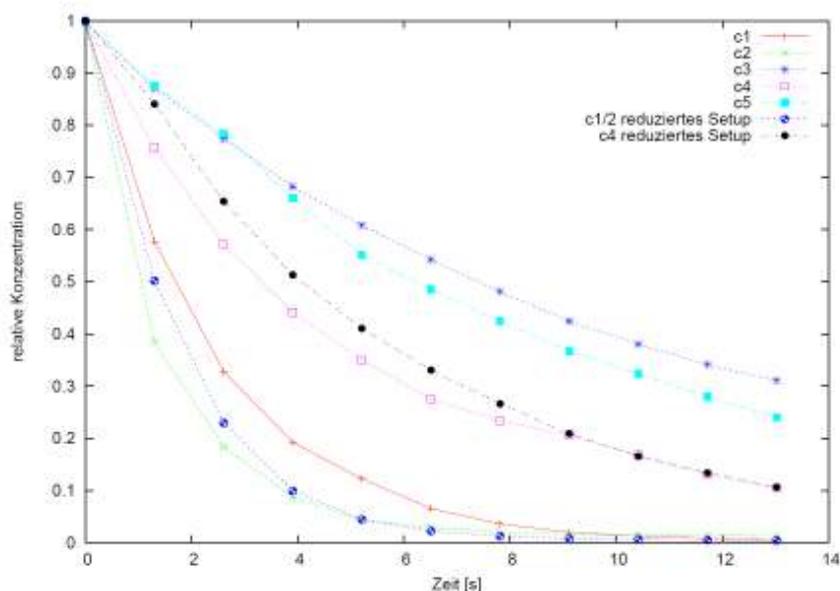


Abbildung 77 Tracergaskonzentration im Atrium über die Zeit für die fünf untersuchten Fälle und die zwei reduzierten Setups

Im Folgenden sollen nun noch einige qualitative Merkmale der unterschiedlichen Fälle herausgestellt werden. Alle Bilder wurden aus Daten zum Zeitpunkt 4.8 Sekunden nach Beginn der Tracergasberechnungen erstellt. Abbildung 79 gibt einen Eindruck von der instantanen Temperaturverteilung im Atrium. In Abbildung 2.4. sind die instantanen Geschwindigkeiten für die Gebäudeaufsicht auf der Höhe der unteren Gebäudeöffnung für die Fälle C2 (oben) und C1 (unten) dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit im Gebäude ist für beide Fälle vergleichbar, obwohl in oberen Fall keine Außenströmung vorhanden ist. Abbildung 80 zeigt die Tracergaskonzentration nach 4.8s sowie die zeitgemittelten Stromlinien für die fünf untersuchten Fälle. Man sieht, dass für die Fälle C1 und C2 die Tracergaskonzentration niedriger ist. Für den Fall C5, bei dem keine Temperaturdifferenz vorgegeben ist, fließt die Strömung in umgekehrter Richtung. Die niedrigste Konzentration liegt an der oberen Öffnung vor. Das dies für C3 nicht der Fall ist, liegt daran, dass es sich um eine Momentaufnahme handelt und die Strömung stark fluktuiert.

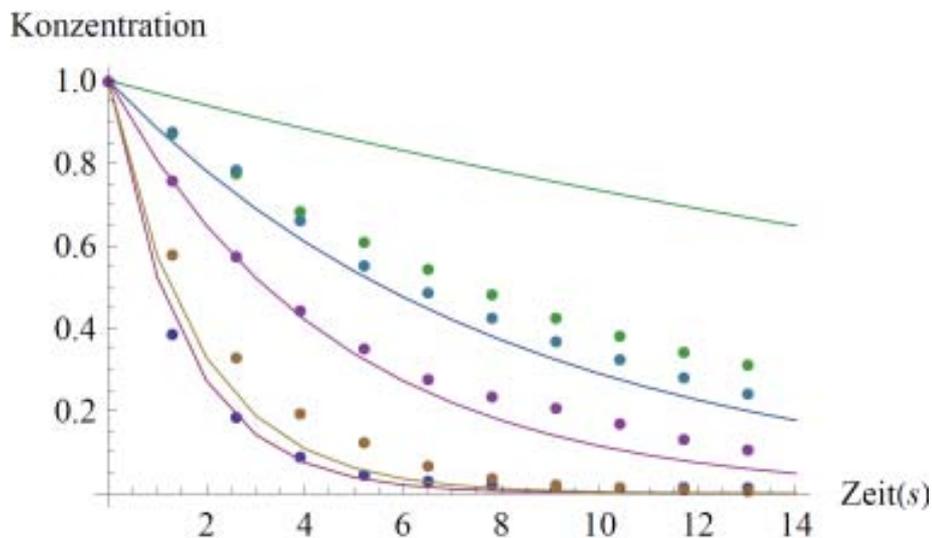


Abbildung 78 Vergleich zwischen Simulationsergebnissen (Punkte) und exponentiellem Abfall auf Basis der gemittelten Volumenströme und Annahme einer vollständigen Durchmischung in Abhängigkeit von Luftfluss, C1 beige, C2 violett, C3: lila, C4:grün, C5: türkis

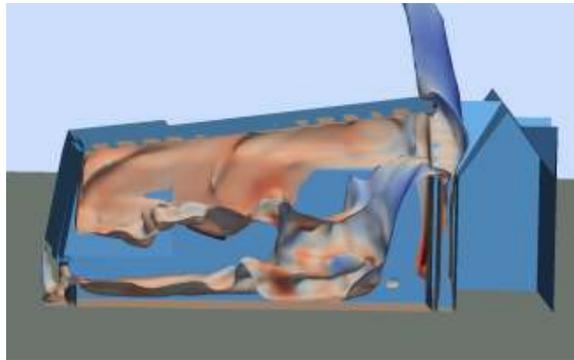


Abbildung 79 Isokontur auf die Temperatur 6.4°C, eingefärbt nach der Tracergaskonzentration, für den Fall C2

Für die Simulation von 36 s Gebäudeumströmung wurden 4h Rechenzeit benötigt. Bezogen auf die 8,1 Mio. Fluidknoten des Rechengebietes entspricht dies 170 Mio. Knotenupdates pro Sekunde für die gekoppelte Strömungssimulation inklusive Temperaturlöser und Tracergas-Transport.

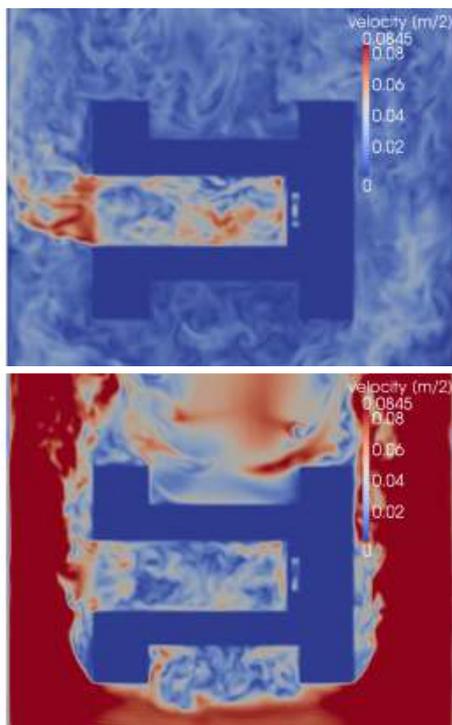


Abbildung 80 Instantante Geschwindigkeiten für die Fälle C2 und C1 (Draufsicht, innere des Atriums und Außenumgebung)

Fazit

Die temperaturgetriebene Luftströmung in einem Atrium mit schwachem äußerem Wind wurde simuliert. Die Umströmung des Atriengebäudes wurde dazu mitbetrachtet. Fünf verschiedene



Fälle wurden betrachtet, um den Einfluss von Wind und Temperaturunterschied auf das Lüftungsverhalten abschätzen zu können. Dazu wurde der Abfall eines Tracergases über die Zeit bestimmt. **Da der durch den äußeren Wind induzierte mittlere Fluss dem Fluss durch die Temperaturströmung entgegengesetzt war, stellte sich die effektivste Durchlüftung bei verschwindendem äußeren Wind und der höchsten Temperaturdifferenz ein. Dieser Fall konnte auch reproduziert werden, indem nur die Atrieninnenströmung mit dem vorher bestimmten Fluss simuliert wurde. Insgesamt spielt aber die Durchmischung der Luft durch Turbulenz eine wichtige Rolle bei dem Belüftungsprozess.** Für die niedrigere Temperaturdifferenz von 3°C bricht der Fluss dramatisch ein. Das Tracergas fällt ebenfalls am langsamsten von den untersuchten Fällen ab, jedoch nicht so langsam, wie dies ohne turbulente Durchmischung anhand der ermittelten Flüsse zu erwarten wäre. In diesem Fall können einfache Modelle, die nur entweder den äußeren Wind oder die Temperatur als dominanten Faktor in Betracht ziehen, keine verlässlichen Aussagen liefern. Es konnte gezeigt werden, dass GPGPU-basierte LES-Simulationen in akzeptabler Rechenzeit Trends zum Verhalten in diesen komplexen dreidimensionalen Situationen liefern können und damit existierende Modelle ergänzen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen auch, dass in Berechnungsfällen in denen der Wind für den Luftaustausch berücksichtigt wird mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen ist, wenn RANS Methoden oder sogar empirische Methoden verwendet werden. Daraus folgt die Forderung, bei Berücksichtigung des Windeinflusses mit höherwertigen Simulationsmethoden wie LES zu berechnen. Bei der Berechnung des rein thermisch induzierten Luftwechsels ist es ausreichend den gemittelten Fluss an den Öffnungen anzusetzen. Hohe Windgeschwindigkeiten können unter Umständen den thermisch bedingten Luftwechsel stören und reduzieren. Dies widerspricht der bisherigen Annahme, dass Wind sich begünstigend auf den Luftwechsel auswirkt. Für ein 'Worst-Case-Szenario' (heißer Sommertag) ist demzufolge ein ungünstiger Wind anzusetzen, der dem thermischen Auftrieb entgegenwirkt.

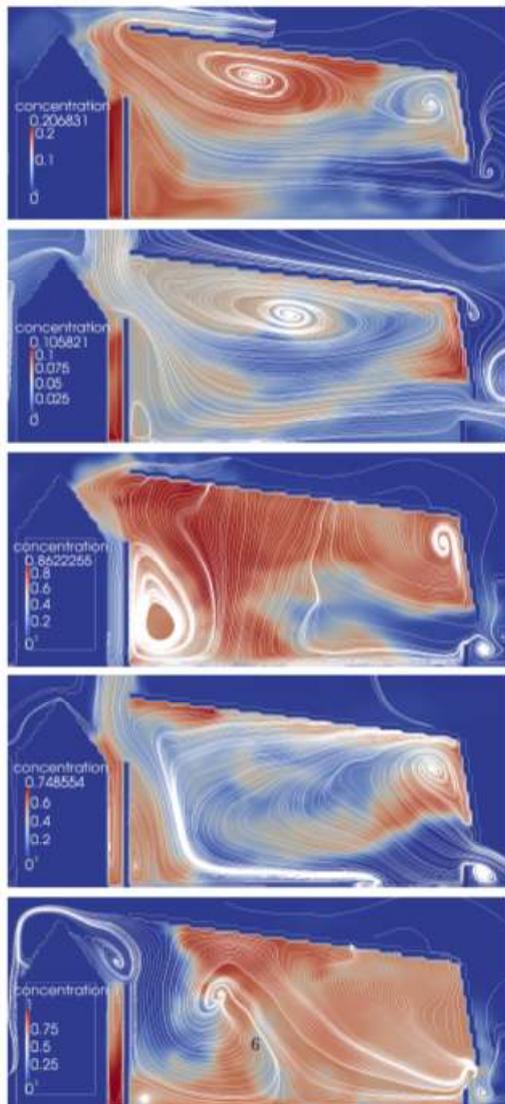


Abbildung 81 zeitgemittelte Stromlinien und Tracergaskonzentrationen für die Fälle C1 oben bis C5 unten

Für eine genauere Untersuchung sollte zunächst Validierungsrechnungen zu den Windkanalversuchen durchgeführt werden. Ein feineres Gitter sollte an den Gebäudeoberflächen verwendet werden, wie dies etwa in den CPU-basierten LB-Simulationen von (Uphoff et al., 2011) der Fall ist. Für GPU-basierte Simulationen sind solche Ansätze noch in Arbeit.

4 Resultierende Leitlinien für die Planung von Atrien

Auf Grundlage der Erkenntnisse im Forschungsprojekt werden Leitlinien aufgestellt, die helfen sollen, Fehlannahmen bei dem energetischen Entwurf eines Atriumgebäudes zu vermeiden und bei der Auslegung des Atriums wesentliche Grundsätze zu beachten. Der Leitfaden ist schwerpunktmäßig auf Atrien ausgerichtet, die aufgrund ihres großen Anteils an transparenter Fassadenfläche besonders anfällig für sommerliche Überhitzungen sind. Hierzu zählen vor allen Dingen Atrien, die neben einer Horizontalverglasung über mindestens eine vertikale verglaste Seite, die nicht nach Norden ausgerichtet ist, verfügen. Die sommerliche Überhitzung eines Atriums geht mit der Erhöhung des Kühlenergieverbrauchs der Kerngebäude einher und ist daher dringend zu minimieren, da ansonsten die Einsparungen an Wärmeenergie während der Heizperiode zunichte gemacht werden können. Daher entscheidet das sommerliche Verhalten der Atrien darüber, ob sie einen positive oder negative Auswirkung auf die Energieeffizienz des Gebäudes hat.

4.1 Einbindung eines Atriums in das Energiekonzept des Gebäudes

Bei dem Entwurf des Energiekonzeptes für ein Gebäude mit integriertem Atrium ist davon auszugehen, dass die Temperatur im Atrium ganzjährig oberhalb der Außentemperatur liegt. Ausnahmen bilden im Sommerfall tiefe, vierseitig umschlossene Atrien mit einem Verhältnis der transparenten Fassadenfläche zum Volumen von $0,03 \text{ m}^2/\text{m}^3$ oder kleiner. Um ohne Berechnungen während der Entwurfsphase einen Eindruck von dem thermischen Verhalten eines Atriums zu bekommen, sind im Folgenden die Ergebnisse von Temperaturmessungen von ca. acht Atrien unterschiedlicher Ausführungsart dargestellt. Der vertikale Temperaturgradient (Temperaturschichtung) ist im Sommer ausgeprägter als im Winter. Im Winter ist die Lufttemperatur über die Höhe nahezu konstant. **Vermessene Atrien mit einer horizontalen und mindestens einer vertikalen transparenten Fläche und Anteilen wirksamer Öffnungsflächen an der transparenten Fassadenfläche von 1,3 % bis 7,0 % weisen an einem unbewölkten Sommertrag einen mittleren Temperaturgradienten von 0,4 – 0,8 K/m für den Bereich von 0 – 10 m Höhe auf.** In unmittelbarer Bodennähe herrscht i.d.R. eine Temperatur auf Außentemperaturniveau, siehe Abbildung 82. Die dazugehörigen Außenklimabedingungen sind in Tabelle 20 dargestellt. Die geometrischen und bauphysikalischen Randbedingungen der dargestellten Referenzatrien sind in Tabelle 30 dargestellt. Da die Darstellung der Temperaturverteilung an einem einzelnen Tag mit Unsicherheiten verbunden ist, erfolgt zusätzlich die

Darstellung der Luftraumtemperaturen für verschiedene Höhen in Abhängigkeit von der Außentemperatur für ein Jahr. Mögliche Streuungen werden in dieser Darstellung, Abbildung 84, deutlich. Parallel dazu werden die Anteile der wirksamen Lüftungsöffnung an der transparenten Fassadenfläche und die U-Werte der Verglasung dargestellt. Abbildung 83 zeigt Beispiele für beheizte und unbeheizte Atrien, die entweder für mediterrane oder tropische Pflanzen geeignet sind.

Tabelle 29 Außenklimabedingungen an den Referenztagen (Abbildung 82)

Sommertag	
Außentemperatur	24 bis 26 °C
Globalstrahlung	750 bis 890 W/m ²
Wind	< 5m/s

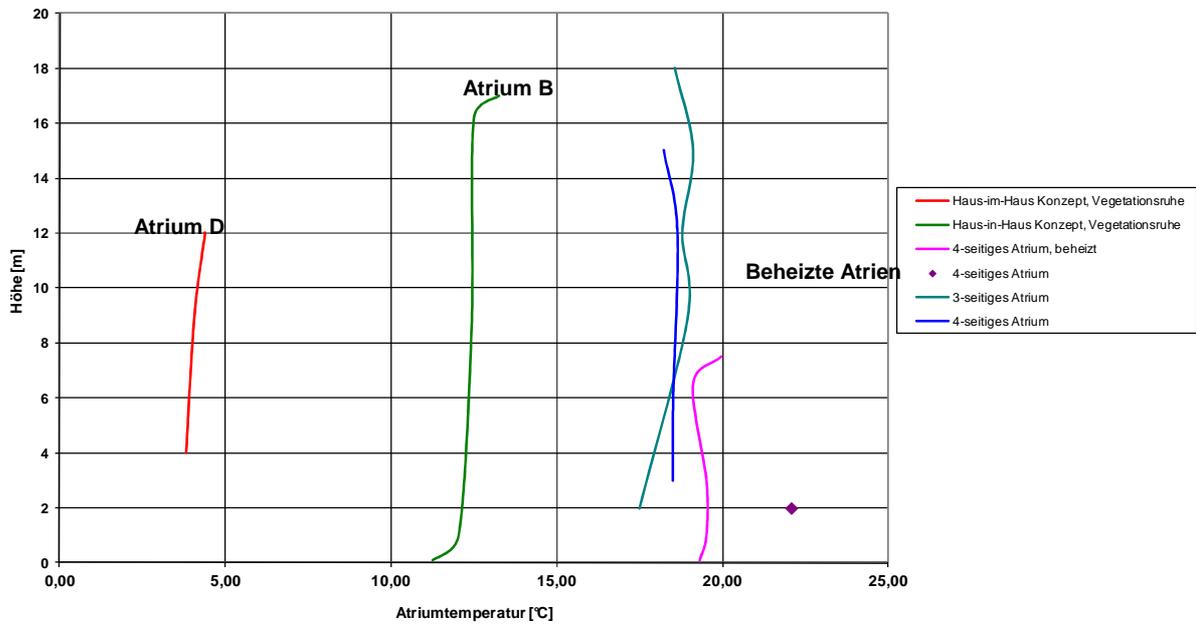
Wintertag	
Außentemperatur	-1 bis 1 °C
Globalstrahlung	< 100 W/m ²
Wind	< 5m/s

Tabelle 30 Kennwerte der Referenzatrien

	Atrium A	Atrium B	Atrium C	Atrium D
Volumen	9.200 m ³	8.800 m ³	37.586 m ³	47.000 m ³
Höhe	25 m	17 m	28 m	20 m
Transparente Fassadenfläche (Ausrichtung)	300 m ² (Horizontal)	1500 m ² (Horizontal, West, Ost)	1.975 m ² (Horizontal, Süd)	4.900 m ² (Horizontal, Süd)
Anteil der wirksamer Öffnungsfläche A _w an der transparenten Fassadenfläche	11 %	(LS 9) 1,3 %	3,7 %	7 %
U-Wert der Verglasung	1,1 W/m ² K	1,1 W/m ² K	1,1 W/m ² K	5,8 W/m ² K
g-Wert der Verglasung	0,34	0,34	0,34	0,30

Winter

Temperaturgradient über die Atriumhöhe für das Referenzklima-Winter zum Zeitpunkt der maximalen Atriumtemperatur zw. 14:00 und 17:00 Außenklimabedingungen: $T_{max}=0-1^{\circ}\text{C}$; $G_{lob_max}=50-100\text{W/m}^2$; $V_{wind}<5\text{m/s}$



Sommer

Temperaturgradient über die Atriumhöhe für das Referenzklima-Sommer zum Zeitpunkt der maximalen Atriumtemperatur zw. 14:00 und 18:00; Außenklimabedingungen: $T_{max}=24-26^{\circ}\text{C}$; $G_{lob_max}=750-900\text{W/m}^2$; $V_{wind}<5\text{m/s}$

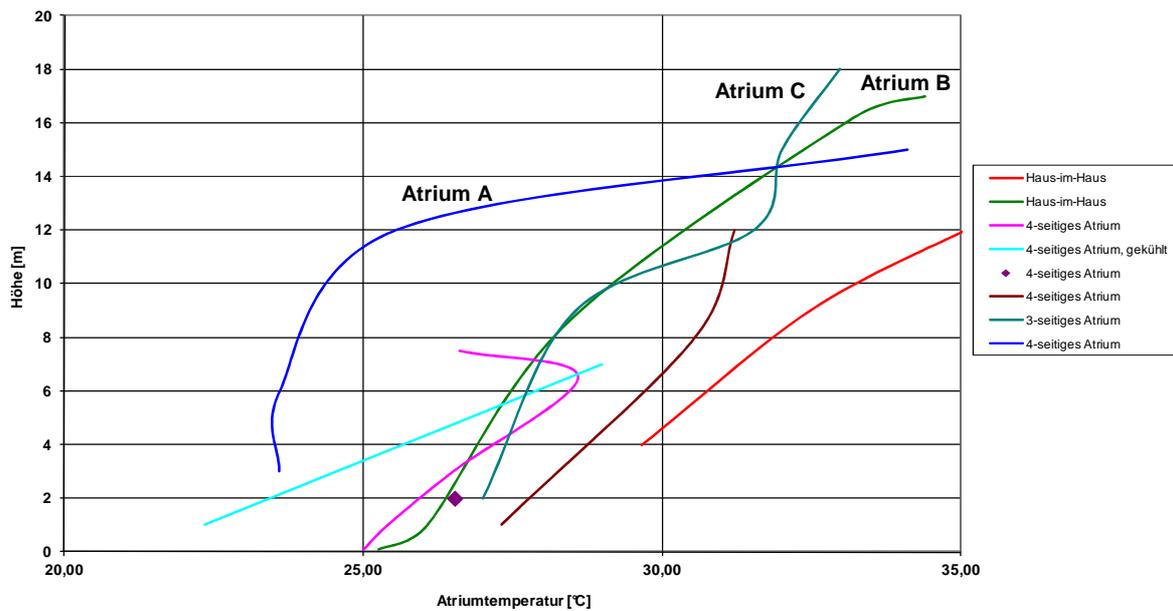


Abbildung 82 Lufttemperaturen und Temperaturschichtung in verschiedenen ausgeführten Atrien

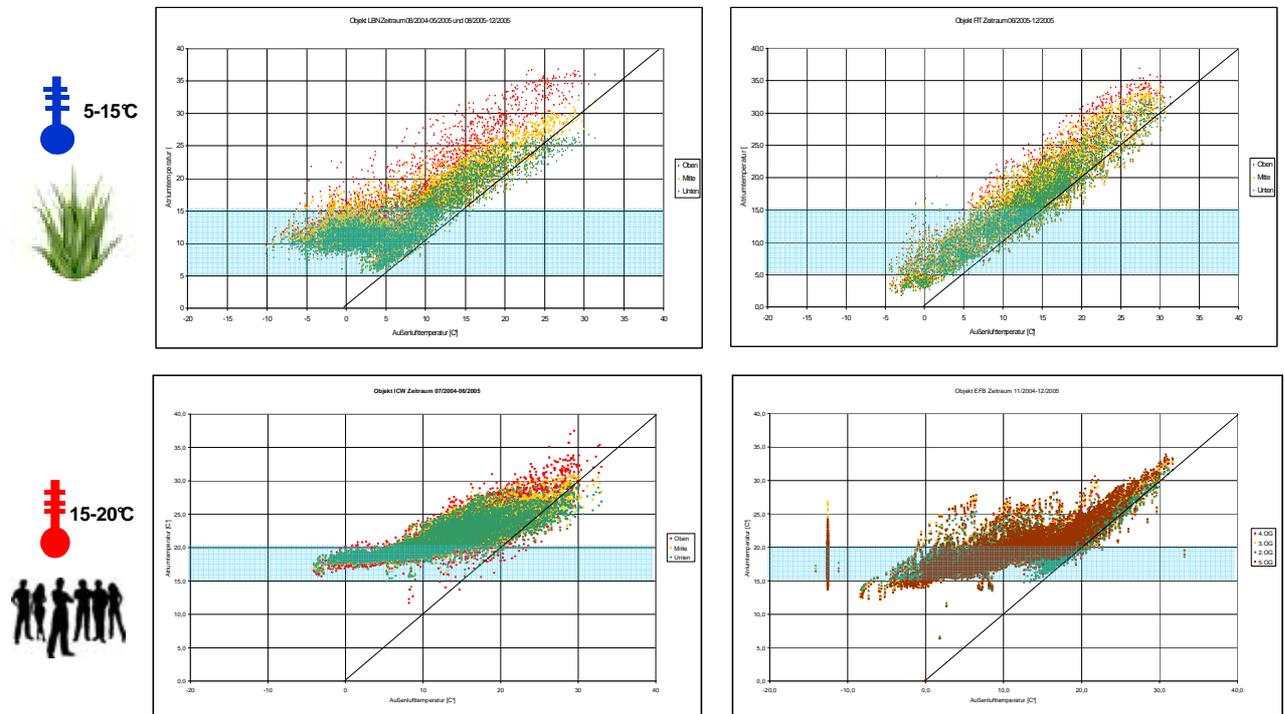
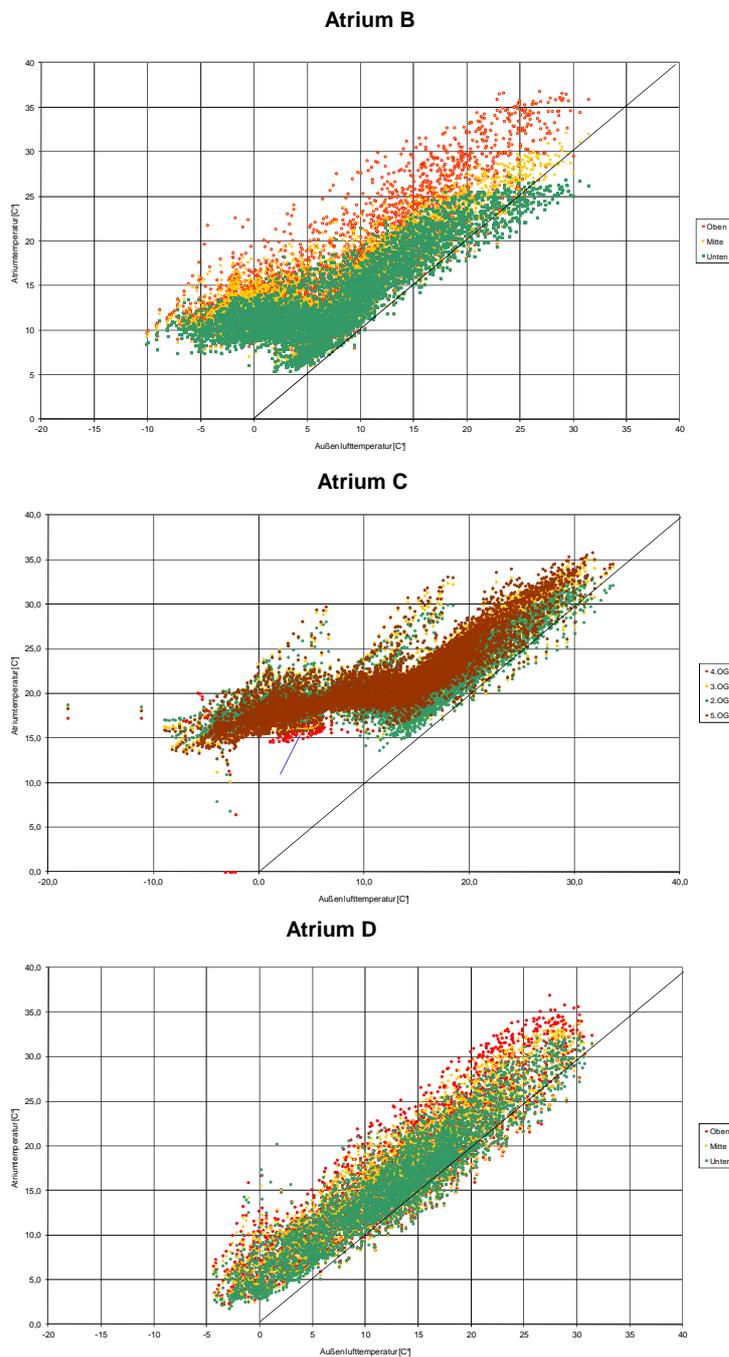


Abbildung 83 Lufttemperaturen und Temperaturschichtung in beheizten (oben) und unbeheizten Atrien (unten) in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Die blauen Flächen markieren den für die jeweiligen Bepflanzungsarten zulässigen Temperaturbereich im Winter.



Anteil der wirksamen Öffnungsfläche A_w an der transparenten Fassadenfläche	Wärmedurchgangskoeffizient U_g der Verglasung
1,3 %	1,1 W/m ² K
3,7 %	1,1 W/m ² K
7,0 %	5,8 W/m ² K

Abbildung 84 Lufttemperaturen und Temperaturschichtung in Abhängigkeit von der Außentemperatur von drei unbeheizten Referenzatrien mit von oben nach unten aufsteigendem Anteil der wirksamen Öffnungsfläche A_w an der transparenten Fassadenfläche (1,3 – 7,0 %). Der g- Wert der Verglasung beträgt bei allen Atrien 0,30 – 0,34.



Wenn man von der Reduzierung der im Kerngebäude eintreffenden Solarstrahlung durch die Atriumverglasung absieht, ist durch die Erhöhung der Lufttemperatur im Atrium gegenüber der Außentemperatur, mit einer Erhöhung des Kühlenergiebedarfs durch erhöhte Transmissionswärmeströme zu rechnen. Wenn zusätzlich erwärmte Luft aus den Atrien zur Belüftung des Kerngebäudes genutzt wird, ist mit einer weiteren Erhöhung des Kühlenergiebedarfs zu rechnen. Daher ist während der Kühlperiode in jedem Fall Außenluft für die Belüftung des Gebäudes zu beziehen. Die Erhöhung des Kühlenergiebedarfs durch die Integration eines Atriums kann durch die exzessive Nutzung aller Möglichkeiten zur Nachtauskühlung gedeckelt werden. Thermische Auftriebseffekte sind hierzu nutzbar zu machen. Der erhöhte Energieverbrauch für die Kühlung wird durch einen geringeren Wärmeverbrauch kompensiert, sofern die Atriumtemperaturen während der Heizperiode maximiert werden und nach Möglichkeit erwärmte Luft aus dem Atrium zur Belüftung des Kerngebäudes genutzt wird. Es empfiehlt sich eine CO₂ - geführte Regelung der Belüftung der Kerngebäude und des Atriums, um die Lüftungswärmeverluste zu begrenzen. Die Anforderungen an das Temperaturniveau im Atrium während der Heizperiode sind u.a. an die Nutzungsgart gekoppelt. Diese ist frühzeitig im Planungsverlauf fest zu legen. Nachträgliche Änderungen der Nutzungsart gehen mit einer Neugestaltung des Energiekonzeptes einher.

4.2 Berücksichtigung der Vegetation

Sofern Bepflanzungen in einem Atrium geplant sind, ist zu beachten, dass die Art der Bepflanzung jahreszeitlich abhängige Anforderungen an das Raumklima und die Beleuchtung stellen. Mediterrane Pflanzenarten erfordern eine Vegetationsruhe während der Winterzeit. Diese wird durch die Unterschreitung einer Grenztemperatur ausgelöst, die im Allgemeinen zwischen 5 und 12 °C liegt. Bei Überschreitung dieser Temperatur beginnt das Pflanzenwachstum, obwohl das Tageslichtangebot hierfür nicht ausreicht. In der Folge ist mit einer Schädigung der Pflanzen zu rechnen. Daher erfordert eine derartige Bepflanzung eine gezielte Abkühlung des Atriums durch Belüftung. Durch diese unerwünschten Wärmeverluste während der Heizperiode, kann der energetische Nutzen eines Atriums zunichte gemacht werden.

Tropische und subtropische Pflanzen erfordern ein höheres Temperaturniveau. Allerdings darf die Temperatur von ca. 18°C nicht unterschritten werden. Dies kann eine entsprechende Auslegung des Atriums für den Winterfall erforderlich machen, z.B. durch eine entsprechende Wärmeschutzverglasung. Eine zusätzliche aktive Beheizung des Atriums zugunsten der Bepflanzung ist aus energetischen Gründen zu vermeiden.

Sollen Pflanzenarten mit dem Erfordernis einer Vegetationsruhe verwendet werden, so ist ausreichend, die bodennahe Luft im Bereich der Bepflanzung auszukühlen, damit die Wärmeverluste des Kerngebäudes minimiert werden. Dies kann durch eine gezielte Belüftung zur Ausbildung eines Kaltluftsees erreicht werden. Auch sollte die Dauer der Vegetationsruhe auf das notwendige Minimum beschränkt und auf die spezifische Bepflanzung abgestimmt werden. Tabelle 31 verschafft einen Überblick über die Raumklimaanforderungen verschiedener Pflanzengruppen. Einzelne Pflanzenarten können hiervon abweichen, z.B. vertragen einige tropische Pflanzen niedrigere Temperaturen als die in der Tabelle 31 angegebenen [Veth].

Tabelle 31 Raumklimabedingungen für verschiedene Pflanzenarten

Pflanzenart	Temperaturbereich Sommer	Temperaturbereich Winter
Mediterrane Pflanzen	20 – 35 °C	5 – 12 °C
Tropische Pflanzen	18 – 24 °C	

Die Lichtenanforderungen der Pflanzen können sehr unterschiedlich ausfallen und sind in der Planung zu berücksichtigen. Eine Wärmeschutzverglasung kann den Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) erheblich reduzieren, was sich im Winter nachteilhaft auf die Bepflanzung auswirken kann. Jedoch gibt es Pflanzen, die ganzjährig oder zeitweise mit relativ wenig Licht auskommen (diese Pflanzen sind in allen Klimaregionen vertreten, so dass nur ein bedingter Zusammenhang mit den Raumklimaanforderungen besteht).

Die vorgestellten Maßgaben dienen nur zur Orientierung. Ist Bepflanzung vorgesehen, so ist unbedingt der Grünflächenplaner frühzeitig im Planungsprozess hinzuzuziehen, um die Wahl der Pflanzenarten und das Raumklima aufeinander abzustimmen.

4.3 Regelung der Atrien

Neben der aktiven Beheizung und Kühlung eines Atriums bleibt nur die Steuerung der Lüftungsklappen zur Regelung seines Temperaturniveaus. Diese ist zwingend nach dem Vorliegen des Heiz- oder Kühlfalls im Kerngebäude auszurichten. Während der Heizperiode ist die Belüftung des Atriums zu minimieren und während der Kühlperiode zu maximieren, sofern die CO₂ - Belastung der Luft oder die Temperaturanforderung eventueller Bepflanzung dem nicht widersprechen. Die Regelung der Lüftungsklappen im Atrium muss mit dem Belüftungskonzept des Kerngebäudes korrespondieren. Z.B. sind Belüftungskonzepte zur Nachtauskühlung während der Kühlperiode und Nutzung vorgewärmter Luft aus dem Atrium während der Heizperiode vorzusehen um den Energieverbrauch zu begrenzen. Eine Nachtlüftung des Atriums



während der Heizperiode ist sinnvoll um die angrenzenden Bauteilflächen auszukühlen. Werden diese tagsüber von der Sonne beschienen, trägt ihre Wärmeabsorption erheblich zur Minimierung der täglichen Temperaturspitzen bei. Die Grenzwerte für Windgeschwindigkeiten, die die Schließung der Lüftungsklappen veranlassen, sind auszuschöpfen und ggf. bei der Auswahl der Lüftungsklappen zu berücksichtigen. Im untersuchten Fall hat sich gezeigt, dass Auslösegeschwindigkeit für die Schließung der Klappen mit 8 m/s zu niedrig angesetzt ist. An sonnigen aber leicht windigen Tagen kommt es zu einer Schließung der Klappen und in der Folge zu einer Überhitzung der Atrien. Das ausgeführte Regelkonzept ist hinsichtlich seiner Planungsvorgaben zu überprüfen.

4.4 Konstruktive Empfehlungen

Verglasungsqualität

Die hohen solaren Wärmegevinne während der Kühlperiode stellen für die Regulierung des Wärmehaushalts eines Atriums und des Gesamtgebäudes die größte Herausforderung dar. Daher ist der Gesamtenergiedurchlassgrad zu minimieren. Andererseits ist der Transmissionswert zu maximieren, wenn Räume über das Atrium mit Tageslicht versorgt werden sollen. Daraus resultiert die Forderung nach maximaler Selektivität der Verglasung. Bzgl. des zulässigen Gesamtenergiedurchlassgrades ist keine allgemeine Festlegung möglich. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass der überwiegende Teil der untersuchten Atrien einen Gesamtenergiedurchlassgrad von maximal 0,34 [-] aufwiesen. Es ist davon abzusehen den Gesamtenergiedurchlassgrad zugunsten solarer Wärmegevinne während der Heizperiode über diesen Wert hinausgehen zu lassen. Die unwahrscheinliche Option einer Reduzierung des Wärmebedarfs würde mit der sicheren Erhöhung der Kühlenergieverbräuche einhergehen. Sollen Wärmeverluste im Atrium während der Heizperiode minimiert werden, so ist stattdessen der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung zu verringern.

Lüftungsöffnungen

Die Belüftung des Atriums ist für die Reduzierung sommerlicher Überhitzungen essentiell. Der Anteil der Belüftungsöffnungen an der Gesamtfläche der transparenten Fassade soll 4 % nicht unterschreiten, wenn hochwertige Berechnungsmethoden (CFD-Simulationen) im spezifischen Fall nicht zu einem anderen Ergebnis kommen. Der Höhenabstand zwischen Zu- und Abluftöffnungen ist zu maximieren. Die Zuluftöffnungen sind hinsichtlich des möglichen Eindringens von Schmutz und Tieren auszulegen. Diese trivial erscheinende Forderung ist unbedingt in den Planungsprozess zu integrieren, damit es später während der Betriebsphase nicht zu einer Einschränkung der Nutzung der ausgeführten Lüftungsöffnungen kommt. Weiterhin



muss die Möglichkeit zur Nachtlüftung gegeben sein ohne dass es zu Sicherheitseinschränkungen kommt. Die Möglichkeit zur ständigen Öffnung der Lüftungskappen muss während der Kühlperiode zwingend gegeben sein und ist im Planungsprozess sicher zu stellen.

Angrenzende Bauteile

Simulationsuntersuchungen haben gezeigt, dass der Wärmeabsorptionsfähigkeit der angrenzenden Bauteile eines Atriums eine erhebliche Bedeutung zur Verringerung täglicher Temperaturspitzen während der Kühlperiode zukommt. Insbesondere Bauteile, die der direkten Solarstrahlung ausgesetzt sind, sollten einen hohen Wärmeeindringkoeffizienten aufweisen (massive mineralische Baustoffe). Nachtauskühlung vorausgesetzt sind diese Bauteile in der Lage die solaren Wärmegewinne am Entstehungsort (der Bauteiloberfläche) teilweise zu puffern und über Nacht wieder abzugeben. Wasserflächen sind hierzu ebenfalls in der Lage. Es sind helle Flächen anzustreben, um die kurzwellige Solarstrahlung zu reflektieren. Dies trägt ebenfalls zur Verringerung der solaren Wärmelasten bei. Allerdings ist die Möglichkeit der Blendung der Nutzer an den Arbeitsplätzen zu beachten. Wo diese oder architektonische Einschränkungen nicht bestehen sind hochreflektive Oberflächen anzudenken, z.B. Dachflächen unter einer Atriumverglasung, die nicht dem Sichtfeld der Nutzer ausgesetzt sind. Fassaden zum Kerngebäude sollten gedämmt ausgeführt werden, auch wenn dies nicht aus den winterlichen Wärmeschutzanforderungen resultiert. Es ist die Möglichkeit der Fehlinterpretation des Raumklimas des Atriums während der Kühlperiode in Betracht zu ziehen, die dazu führen kann, dass insbesondere in den oberen Ebenen extreme Übertemperaturen bestehen, die durch Transmission in die Aufenthaltsbereiche gelangen können. Eine ausreichende Dämmung des Kerngebäudes gegenüber dem Atrium folgt der Forderung einer Abschottung des Kerngebäudes vom Atrium während der Kühlperiode – nicht nur gegenüber konvektiven sondern auch transmissiven Wärmeströmen.

4.5 Hinweise für die Berechnung des thermischen Verhaltens der Atrien

Berücksichtigung der Wärmespeicherung / TDS und CFD

Bei der Anwendung von Simulationsprogrammen besteht die Herausforderung darin, sowohl die für den Sommerfall wichtige erforderliche topografische Auflösung als auch das thermisch dynamische Verhalten darzustellen. Während thermische Simulationsprogramme eine dynamische Berechnung erlauben, fehlt Ihnen die topografische Auflösung. Die Temperaturschichtung im Luftraum und die dadurch beeinflussten Wärmeströme können ebenso wenig sicher berechnet werden wie Luftwechselzahlen durch natürliche Lüftung bei spezifischen Verhältnissen (Ausführung und Lage der Belüftungsöffnungen). Die alleinige Anwendung von



Mehrknottenmodellen zur differenzierten Darstellung des Luftraums wird kritisch gesehen, da hierfür Annahmen getroffen werden müssen, die das Ergebnis weitestgehend vorwegnehmen.

CFD-Simulationsprogramme erlauben zwar eine topografisch detailgetreue Darstellung des Luftraums, aber eine dynamische CFD Berechnung, die die Berücksichtigung der Wärmeabsorption erlaubt, ist aufgrund fehlender Rechenkapazitäten nach derzeitigem Stand nicht möglich. Allerdings ist die Wärmeabsorption für die Beurteilung der sommerlichen Spitzentemperaturen im Atrium unumgänglich. Die Annahme adiabater Randbedingungen ist unzulässig, wenn die solaren Wärmelasten im vollen Umfang im Raum wirksam werden. Es können aber Annahmen für die Reduzierung der solaren Wärmelasten getroffen werden, um die Wärmeabsorption darzustellen. Auch können für die Verfeinerung der Annahmen der Wärmeabsorption der Randzonen thermisch-dynamische Simulationsprogramme herangezogen werden. In einem iterativen Austauschprozess der Parameter zwischen den beiden Simulationsprogrammen können nach [Heiselberg], [IEA] gute Ergebnisse erzielt werden, wenn als Übergabeparameter von der TDS an die CFD die Wärmeströme (statt der Oberflächentemperaturen) der begrenzenden Flächen gewählt werden. Dies hat in der CFD den Vorteil, dass die Berechnungsergebnisse bzgl. des Temperaturniveaus sicherer sind, also unabhängiger von dem Setup der CFD Simulation: Unabhängig von den gewählten Berechnungsmodellen oder der wandnahen Gitterauflösung wird die in der TDS berechnete Wärmemenge in der CFD in den Luftraum eingetragen. Das CFD - Modell wird dadurch bzgl. der Ermittlung des Temperaturniveaus als Folge der Energiebilanz im Atrium genauer. Abbildung 85 zeigt beispielhaft die Interaktionsmöglichkeit zwischen einer thermisch dynamischen Simulation und einer CFD – Simulation.

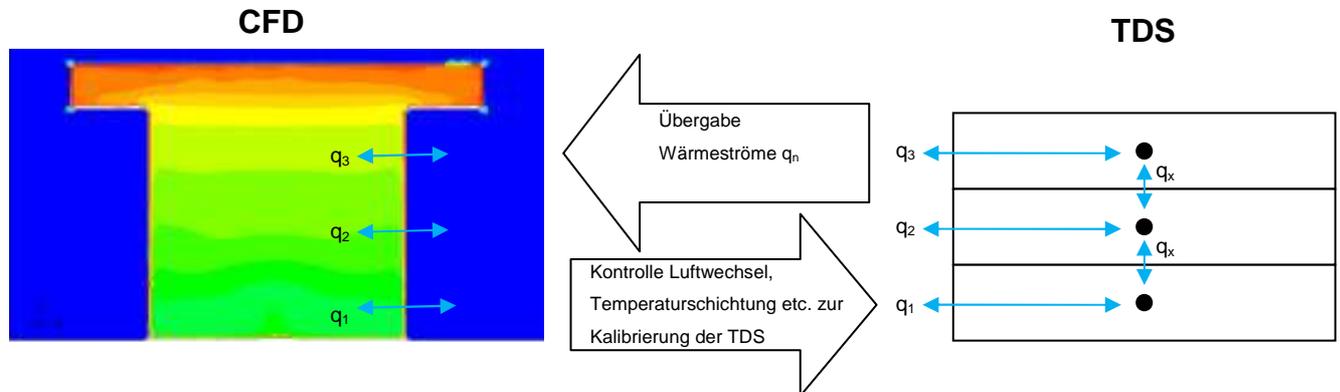


Abbildung 85 Beispielhaftes Verfahren zur Parameterübergabe zwischen einer CFD und einer TDS. In der TDS sind 3 Luftknoten dargestellt, die untereinander (q_x) und mit den Randzonen (q_{1-3}) im Energieaustausch stehen. q_x wird z.B. durch den Luftaustausch zwischen den Knoten definiert und liegt meist als Annahme vor. Nach Übergabe der Wärmeströme der Begrenzungsflächen erfolgt in der CFD die Kontrolle des Temperaturniveaus und der Temperaturschichtung aufgrund dessen eine Kalibrierung von q_x der TDS. Anschließend erfolgt die erneute Übergabe von q_{1-3} . Ebenso z.B. können die berechneten Luftwechselzahlen der CFD zur Kalibrierung der allgemein gehalten empirischen Rechenformeln der TFD verwendet werden.

Da im Winterfall die Temperaturverteilung in einem Atrium nahezu homogen ist und die hohen Energieeinträge durch die Solarstrahlung entfallen, sind die Temperaturschwankungen im Tagesverlauf und damit die Einflüsse der instationären Wärmeleitung nahezu vernachlässigbar⁴. Dieser Umstand erlaubt sowohl die singuläre Berechnung mit einer TDS als auch mit einer CFD. Die Darstellung des Luftraums durch einen Luftknoten in einer TDS ist aufgrund der gleichmäßigen Temperaturverteilung möglich. Durch die geringen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf sind annähernd stationäre Wärmeströme gegeben, die leicht zu berechnen sind und in eine stationäre CFD als Randbedingung eingehen können.

Berücksichtigung der solaren Wärmeeinträge

Für die Berechnung solarer Wärmelasten mit CFD bietet z.B. das Programm FLUENT ein Solarmodell an. Dieses Modell erlaubt unter Angabe des Sonnenstandes die Ermittlung der Teilflächen, auf welche die Sonnenstrahlung auftrifft. Auf diesen Flächen wird eine flächenspezifische Wärmeleistung erzeugt. Der Vorteil besteht darin, dass die beschienenen Flächen zu einem bestimmten Zeitpunkt ohne zusätzliche Hilfsmittel bestimmt werden können. Es ist nicht

⁴ Bestimmte Aufgabenstellungen können auch für den Winterfall detailliertere Berechnungen erforderlich machen.



nötig im Setup Teilflächen zu definieren, die der direkten Bestrahlung unterliegen. Alternativ ist es auch möglich, die gesamte Wärmeleistung durch die Solarstrahlung in den direkten und diffusen Anteil zu trennen, den Transmissionsverlust durch die transparente Fassade zu bestimmen und den resultierenden solaren Gesamtwärmestrom in den diffusen und direkten Anteil aufzuteilen und auf die entsprechenden Flächen als flächenspezifische Wärmeleistung zu verteilen. Dieses Verfahren stellt eine Vereinfachung des Solarmodells in FLUENT dar. Davon unberücksichtigt bleibt die Annahme einer weiteren Reduktion der Solarstrahlung durch die Wärmeabsorption der beschienenen Fläche. Es bietet sich an, für die Ermittlung der orts- und zeitspezifischen Solarstrahlung tabellierte Werte der DIN 4710 zu verwenden, bzw. mit Ihnen die in den CFD – Programmen integrierten Solarmodelle zu überprüfen.

Windeinfluss

Die Windanströmung des Gebäudes hat vor allem einen Einfluss auf den Luftwechsel in einem Atrium. Jedoch ist für die Betrachtung der Spitzentemperaturen im Jahresverlauf die Annahme einer auf den Luftwechsel günstig wirkenden Windanströmung unzweckmäßig, da sie zu einem höheren Luftwechsel und zu niedrigeren Temperaturen führen und als Konsequenz unterdimensionierter Lüftungsöffnungen nach sich ziehen würde. Weiterhin kann das turbulente Verhalten des Windes in Boden- und Gebäudenähe nur dargestellt werden, wenn ein wesentlicher Teil des Gebäudeumfeldes mit dargestellt wird. Darüber hinaus bestehen Zweifel, inwieweit stationäre CFD mit einer gerichteten Windanströmung geeignet sind, die infolge der Windturbulenz entstehenden zeitabhängigen Druckschwankungen an den Lüftungsöffnungen abzubilden. Davon ausgenommen sind ortsspezifische besondere Windverhältnisse, die eine überwiegend gerichtete Anströmung bewirken. Schließlich sind nur instationäre LES – Simulationen in der Lage, den Einfluss des Windes zuverlässig zu bilanzieren.

4.6 Berechnung des Energiebedarf eines Atriumgebäudes

Wie in ATRIEN I ausgeführt, ist die DIN EN 18599 (Berücksichtigung von Glasvorbauten) ungeeignet, den Energiebedarf eines Atriumgebäudes darzustellen, da während der Kühlperiode eine Atriumtemperatur unterhalb der Außentemperatur angenommen wird. Dies ist für die meisten Atrien unzutreffend, da fast immer Übertemperaturen vorherrschen. Dadurch wird ein zu geringer Kühlbedarf berechnet. Für die Berechnung von Jahresenergieverbrauchswerten auf der Basis von Referenzwetterdatensätzen zur Abwägung verschiedener Ausführungsvarianten bieten sich TDS an. Jedoch muss das Temperaturniveau im Jahresverlauf mit anderen Methoden abgeschätzt oder mittels CFD für repräsentative Witterungszustände ermittelt werden. In

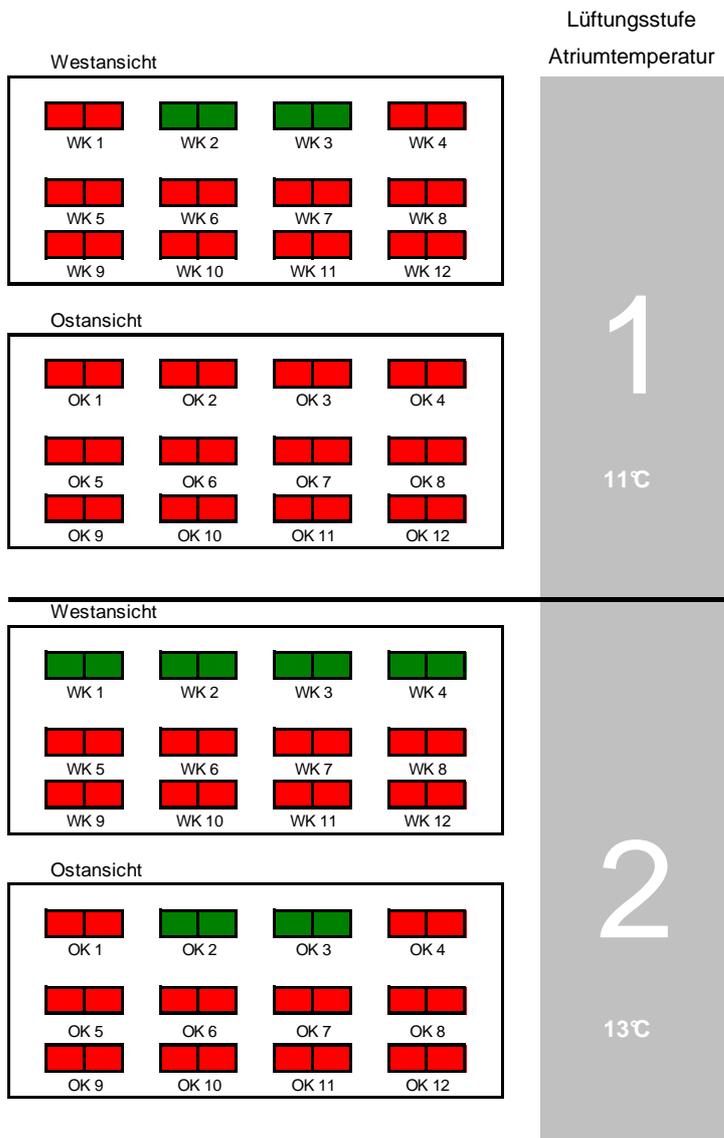


Abbildung 82 und Abbildung 83 in Abschnitt 4.1 sind Atriumtemperaturen im Jahresverlauf und die Temperaturschichtung an einem Sommertag für verschiedene Ausführungsarten von Atrien dargestellt. Liegen keine gesicherten Prognosen bzgl. des Temperaturniveaus in den Atrien vor, können diese Angaben genutzt werden, um z.B. eine von der Außentemperatur abhängige Funktion zu entwickeln, die die Atriumtemperatur wiedergibt und in eine TDS integriert wird. Zwar hat diese Methode auch Schwächen, aber sie dürfte präziser sein, als die Berechnungsweise nach ENEC. Selbstverständlich müssen alle weiteren Aspekte, die die Energieströme zwischen Atrium und Kerngebäude betreffen und im Energie- und Belüftungskonzept verankert sind adäquat umgesetzt werden.

5 Anhang A1: Definition der Lüftungsstufen

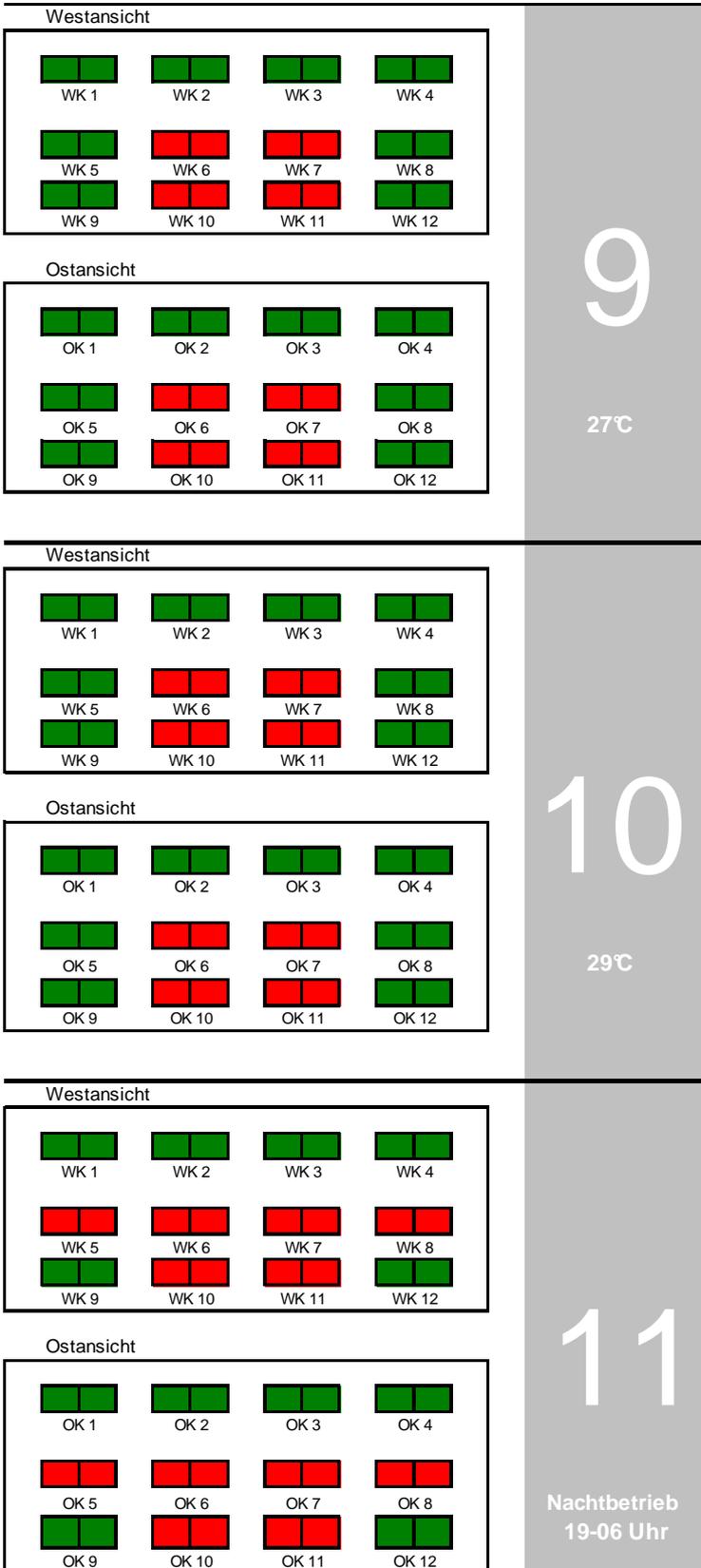
Westseite:	Ostseite:
Stufe 1: WK 2/3	Stufe 2: OK 2/3
Stufe 2: WK 1/4	Stufe 3: OK 1/4
Stufe 4: WK 5/8	Stufe 5: OK 5/8
Stufe 6: WK 9/12 schließen WK 5/8	Stufe 6: schließen OK 5/8
Stufe 8: WK 5/8	Stufe 7: OK 9/12
	Stufe 8: OK 5/8
Stufe 11: WK 1-4 WK 9/12 (Nachtbetrieb)	Stufe 11: OK 1-4 OK 9/12 (Nachtbetrieb)

 Klappe geschlossen
 Klappe auf











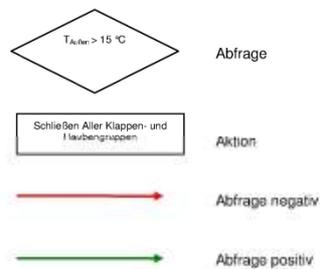
6 Anhang A2: Optimiertes Regelschema der LBS Hannover

Stand: 23.06.2010

Inhalt

- a) Erläuterung
- b) Neugruppierung der Belüftungsklappen
- c) Flussdiagramm

a) Erläuterung



Die hier nicht dargestellten Bereiche der Gebäuderegulation bleiben von der Neuprogrammierung unberührt. Gleiches gilt für die übergeordnete Regelung, Seite 2, bis zur Unterscheidung Vegetationsruhe/keine Vegetationsruhe. Die Dauer der Vegetationsruhe ist mit dem Grünhofpfleger Kremkau abgestimmt und sollte bei Bedarf veränderbar sein. Sämtliche Temperaturgrößen sollen auf der Bedienoberfläche erscheinen und ebenfalls veränderbar sein. Die Regelung des Grünhofes AB (Grünhof 1) bleibt für die Heizfälle unverändert. Im Kühlfall wird der Grünhof AB analog zu den restlichen Grünhöfen geregelt.

b) Neugruppierung der Belüftungsklappen und Dachhauben

Tabelle 1 Beschreibung der neuen Klappengruppen

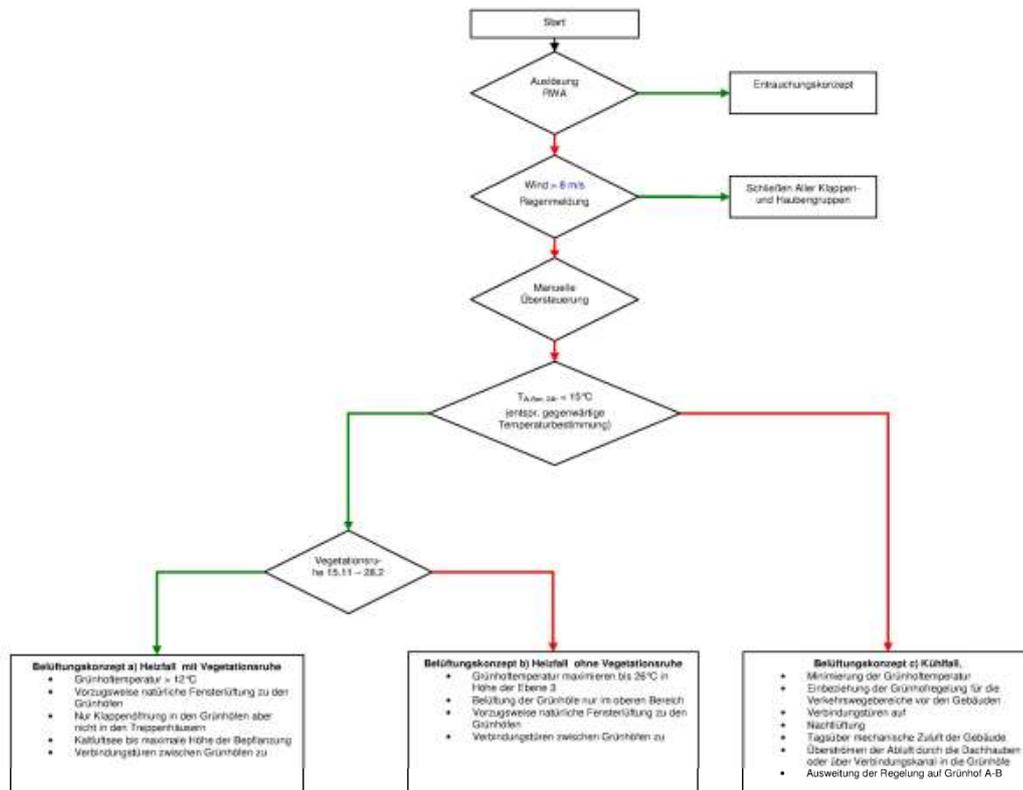
Dachhauben der innenliegenden Atrien (DHA) gebäudeweise zusammengefasst (B bis E)	DHA_B DHA_C DHA_D DHA_E
Alle Dachhauben des Grünhofes AB	DHG_AB
Alle Dachhauben der Grünhöfe BC bis DE	DHG_BE
Klappenreihen oberhalb der Gebäude (bisher nicht in die GLT eingebunden), Ausnahme: Klappen über Gebäude B	KG
Klappenreihen unten (KU), je Grünhof gruppiert (BC bis DE) Ausnahme: KU_BC beinhaltet auch oben liegende Klappen, da Bepflanzung bis E3 reicht	KU_BC KU_CD KU_DE
Klappen der Verkehrswegebereiche vor den Gebäuden	KT
Klappen der Grünhöfe Mitte und Oben Grünhöfe B-E	KMO_BE
Klappen der Grünhöfe Mitte und Oben Grünhöfe A-B	KMO_AB

Tabelle 2 Zuordnung der Klappen zu den Klappengruppen

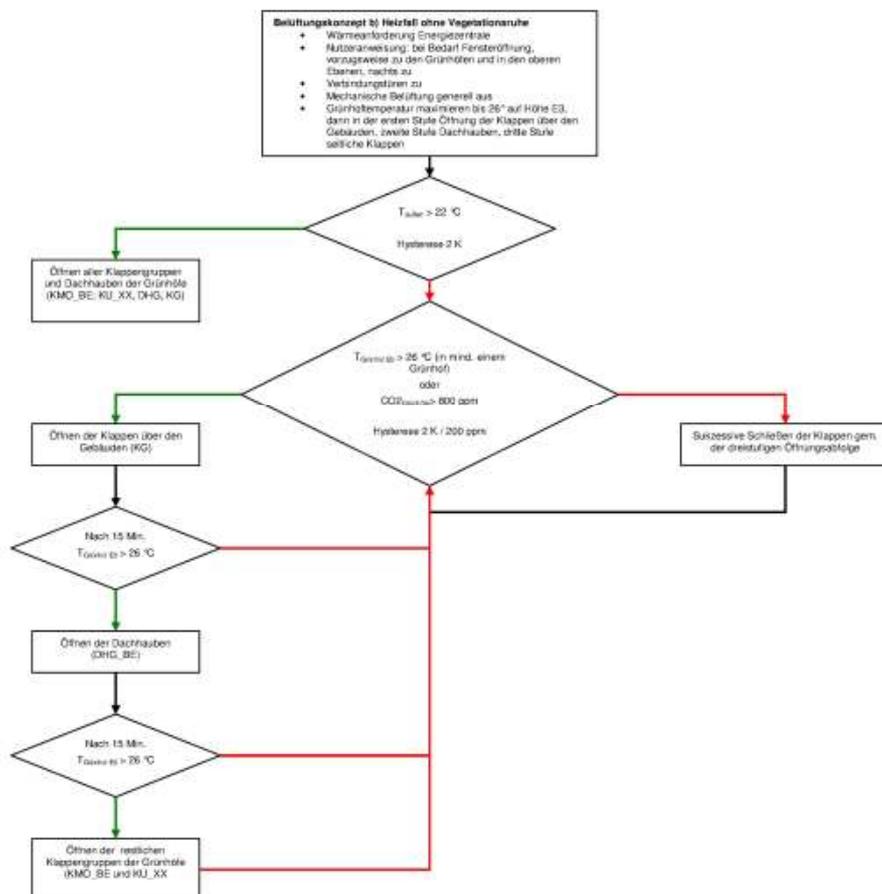
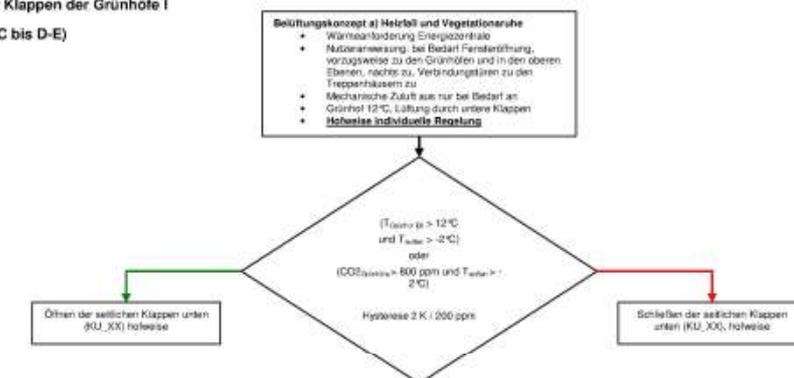
DHA_B	.2.1 – .2.7
DHA_C	.4.1 – .4.7
DHA_D	.6.1 – .6.7
DHA_E	.8.1 – .8.7
DHG_BE	.3.1 – .3.19 (GH 2 bzw GH BC) .5.1 – .5.19 (GH 3 bzw. GH CD) .7.1 – .7.19 ; .25.1 – .25.8 (GH 4 bzw. GF DE) Aufzugentwärmung: 10.1 – 10.2; 11.1 – 11.2
DHG_AB	.1.1 – .1.1 Aufzugentwärmung: 9; 9.1; 9.2
KT	.13.1 – .13.4; 13.6 – 13.9 (B) .14.1 – .14.4 ; 14.6 – 14.9 (C) .15.1 – .15.4 ; 15.6 – 15.9 (D) .16.1 – .16.4 ; 16.6 – 16.9 (E)
KMO_BE	.3.22 ; .3.23 ; 3.20 ; 3.25 ; .22.1 – .22.5 ; 22.8 ; 22.11 ; 22.14 ; .18.4 ; .18.1 (GH 2 bzw. GH BC) .23.1 – .23.8 ; 23.11 ; 23.14 ; .5.22 ; .5.23 ; .5.20 ; .5.25 ; .19.4 – .19.1 (GH 3 bzw. GH CD) .20.4 – .20.1 ; .7.20 ; .7.25 ; .7.22 ; .7.23 ; .24.1 – .24.8 ; 24.11 ; 24.14 (GH 4 bzw. GH DE)
KMO_AB	.21.1 – .21.6 ; 21.8 – 21.19 ; .17.1 – .17.4 ; 1.20 – .1.25 (GH 1 bzw. GF AB)
KU_DE	.7.21 ; .7.24 .24.12 – .24.13
KU_CD	.5.21 ; .5.24 .23.12 – .23.13
KU_BC	.3.21 ; .3.24 .22.12 – .22.13 22.6 – 22.7
KG	18.5 – 18.10 19.5 – 19.10 20.5 - 20.10

c) Flussdiagramm

Übergeordnete Regelung

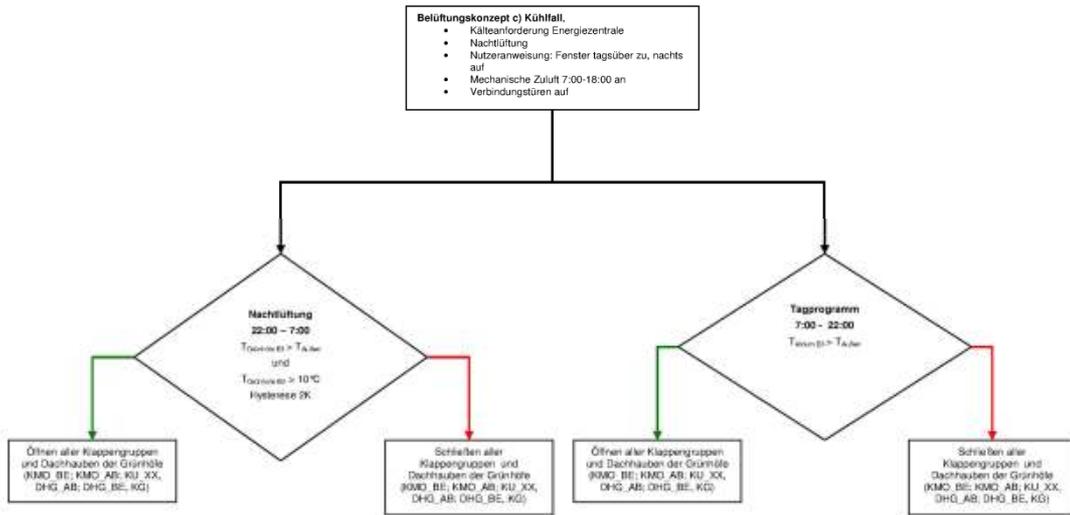


Regelung der Klappen der Grünhöfe I
(Grünhöfe B-C bis D-E)

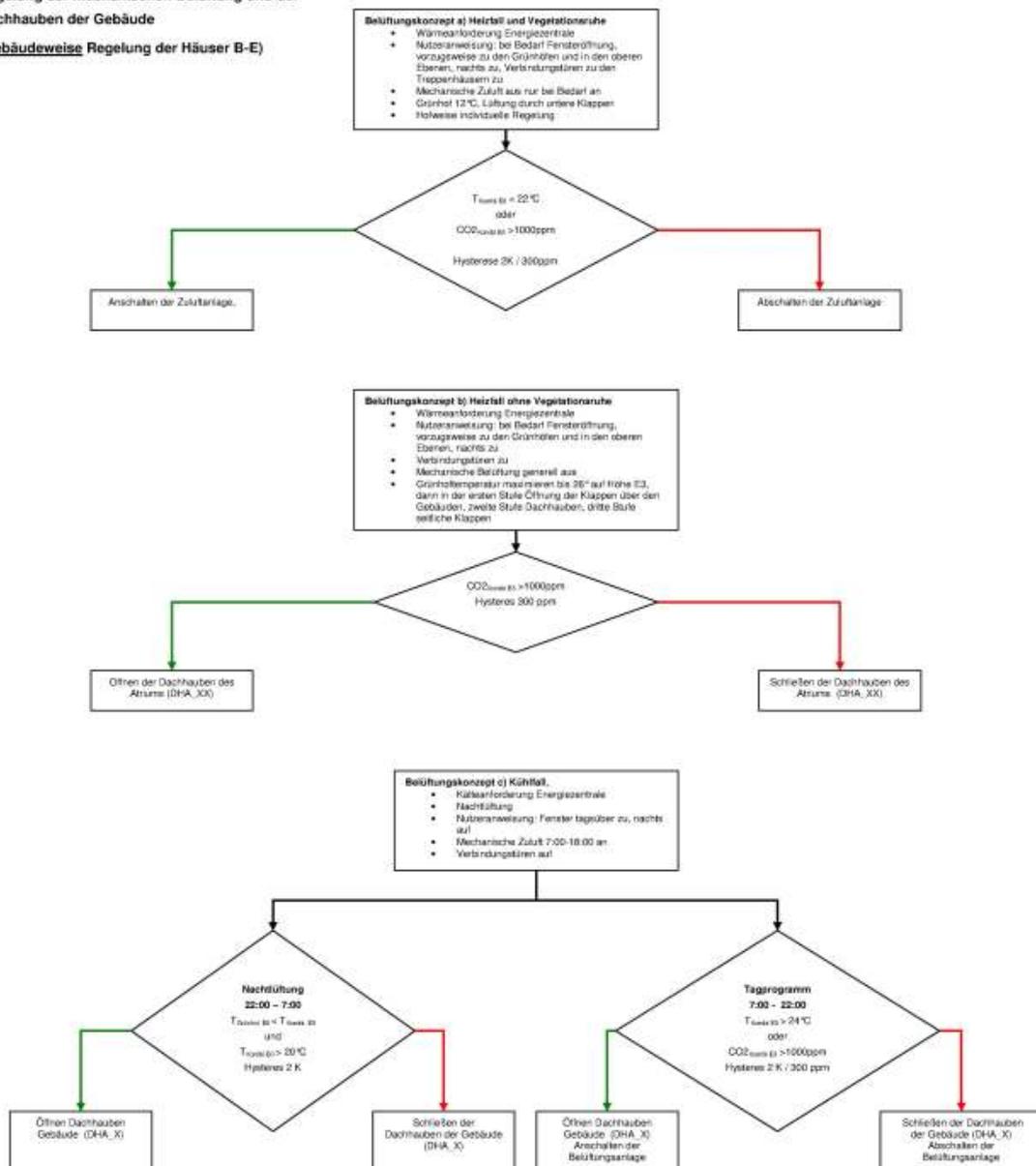


Regelung der Klappen der Grünhöfe

(Grünhöfe A-B bis D-E)



Regelung der mechanischen Belüftung und der Dachhauben der Gebäude
(Gebäudeweise Regelung der Häuser B-E)

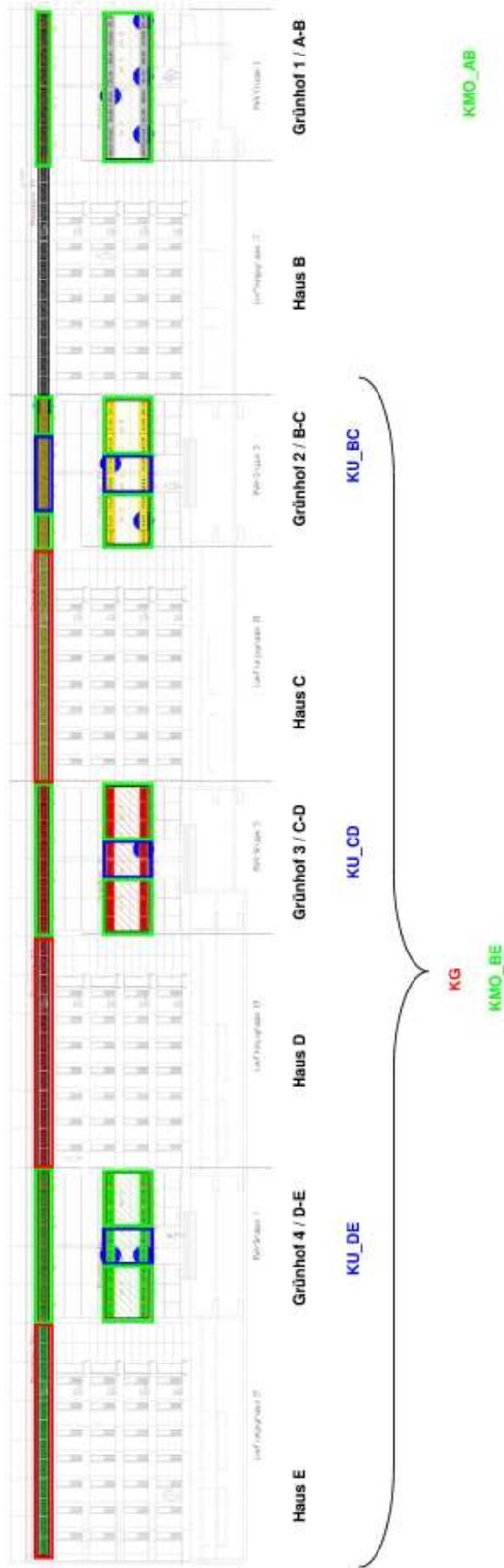




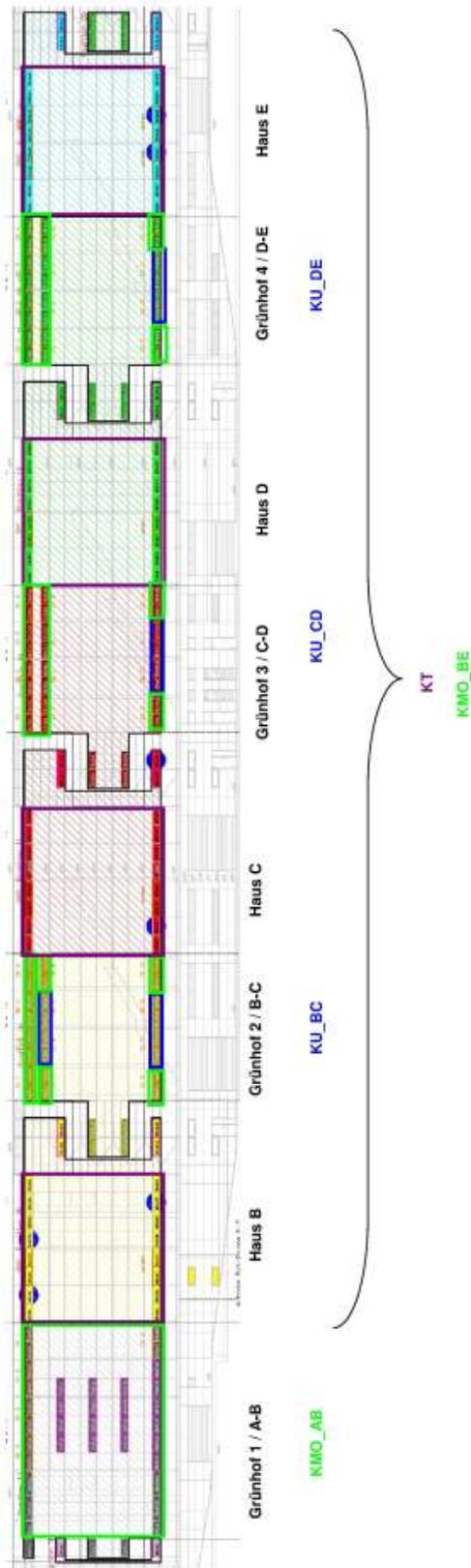
7 Anhang A3: Definition der Klappengruppen der LBS Hannover

Die Klappengruppen sind farbig eingerahmt, die Rahmenfarben korrespondieren mit der Schriftfarbe der Gruppenbezeichnung. Die Farben der Klappen selber sind unerheblich.

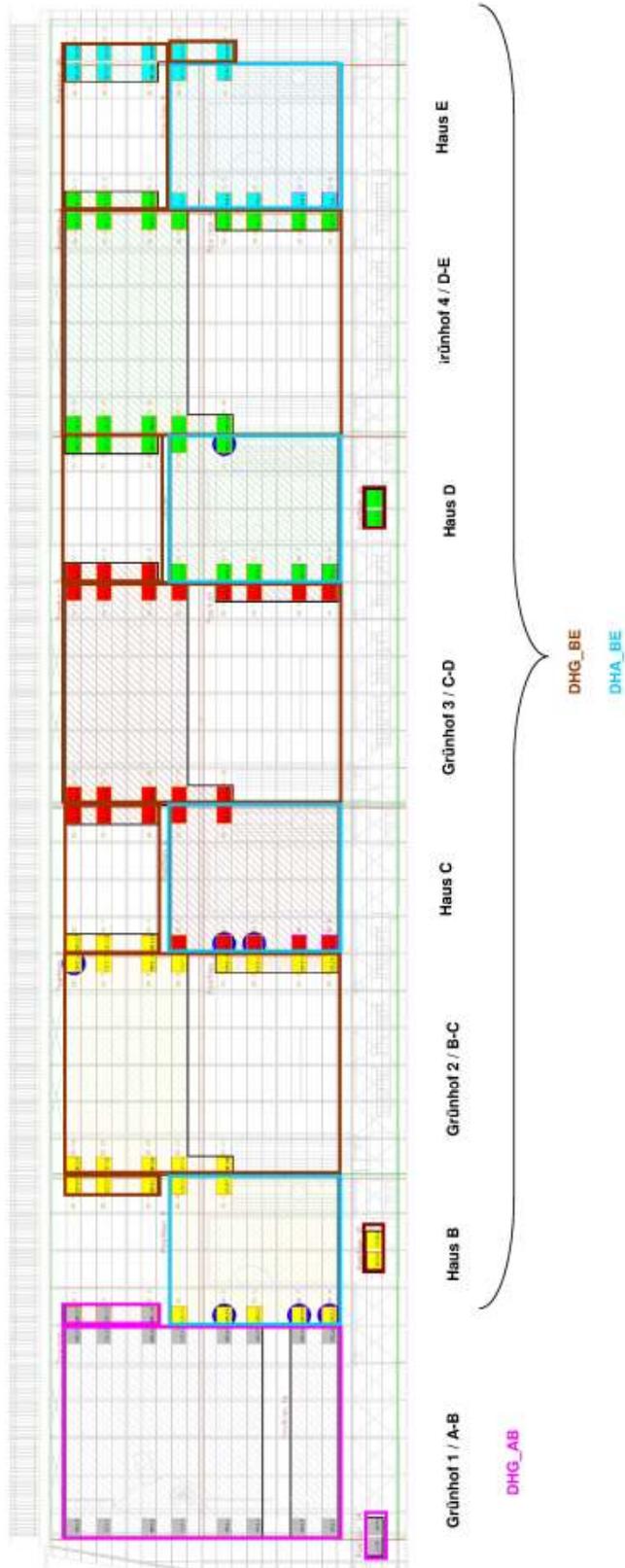
Klappengruppen Westiansicht



Klappengruppen Ostansicht



Klappengruppen Aufsicht





Literaturverzeichnis

[BBR] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Leitfaden Nachhaltiges Bauen; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2001

[Binz] Binz, A: Nachhaltiges Bauen mit Vollverglasung?; FHBB, Institut für Energie, 2005

[Bundesamt (CH)] Bundesamt für Energie (CH): Rationelle Energienutzung in Gebäuden, 2006

[CHEN] Jinang, Y. und Chen, Q. Buoyancy driven single sided natural ventilation in buildings with large openings. International Journal for Heat Mass Transfer, 2003

[Ehm] Ehm, H: Wärmeschutzverordnung 95, Der Weg zu Niedrigenergiehäusern; Bauverlag, 1996

[Etheridge] Etheridge, D; Sandberg, Mats; Building Ventilation, Theory und Measurement; Wiley Verlag, 1996

[EVA] Fisch, M. N.: Plesser, S; Bremer, C: EVA – Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude; TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2007

[Fisch] Fisch, M. N.; Gerder, F; Rozynski, M: Neubau Informatikzentrum der TU Braunschweig; TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2004

[Fischer] Fischer, V: Gekoppelte numerische Simulation von Raumluftrömung, Raumumschließungskonstruktion und Heizungsanlage; Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 1997

[Fassadenbautage] Vorträge Fassadenbautage in Ingolstadt, 09.03.2006



[Gerder] Gerder, F: Bestimmung des durchschnittlichen, windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium am Beispiel des EnergieForums Berlin; Dissertation; TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2006

[Gritzki] Gritzki, R: Bestimmung der Effektivität nutzerbedingter Fensterlüftung mit Hilfe numerischer Simulationsverfahren; Dissertation; TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 2001

[Gritzki] Gritzki, R; Rösler, M; Richter, W: Vorhersage und Analyse natürlicher Lüftungsvorgänge; Beitrag in Bauphysik 1/2007

[Göcer] Göcer, Ö; Tavit, A; Özkan, E: Thermal performance simulation of an atrium building; Beykent University, Istanbul, Turkey, 2006

[Heiselberg] Heiselberg, P; Murakami, S; Roulet, C-A: Ventilation of Large Spaces in Buildings; IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems, 1998

[Hell] Hell, F.; Grundlagen der Wärmeübertragung; VDI-Verlag, 1973

[Herke] Herke, S; Pfafferott, J; Zeuschner, A: Thermischer Komfort im Sommer in Bürogebäuden mit passiver Kühlung; Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2005

[IEA] IEA Solar Heating and Cooling Programme; Atrium Model Development; Task 12; SINTEF Energy, Indoor Environmental Technology; Trondheim March 1996

[Kälin] Kälin, W; Wyer, R; Herrmann, T: Glasbauten, 10 wichtige Aspekte für die Planung von Gebäuden mit hohem Glasanteil; Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2005

[Klinge] Klinge, M: Architektur und Energie, Planungsgrundlage für Büro- und Verwaltungsbauten, 1994



[Kraft] Kraft, A; Meyer, M: Simulationsgestützte Planung von Atrien; Beitrag in HLH 11/2004

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

[Laouadi] Laouadi, A; Atif, M.R; Galasiu, A.: Methodology towards developing skylight design tools for thermal and energy performance of atrium in cold climates; Montreal Road Campus, Institute for Research in Construction, Canada, 2003

[Lutz] Peter Lutz / Richard Jenisch / Heinz Klopfer / Hanns Freymuth / Karl Petzold / Martin Stohrer / Heinz-Martin Fischer (Rev.) / Ekkehard Richter (Rev.) Lehrbuch der Bauphysik; B.G. Teubner; Stuttgart; 2002

[Maas] Maas, A: BauSIM 2008 "Nachhaltiges Bauen", Tagungsband; Universität Kassel, 2008

[Mehta] Mehta, M: Natural ventilation analyses of an office building with open atrium; Montréal, Canada, 2005

[Moser] Moser, A; Ofi, F; Suter, P: Transient Numerical Modelling of Heat Transfer by Radiation and Convection in Atrium with Thermal Inertia; ETH-Zürich, Schweiz, 1997

[Neumann] Neumann, C: Langzeitmonitoring der Demonstrationsgebäude im Rahmen des Forschungsprogramms EnBau:Monitor, Zwischenbericht; Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2005

[Nowotny] Nowotny, S; Feustel, H.E.: Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung; Bauverlag GmbH, 1996



[Quenzel] Quenzel, Karl-Heinz: Einrichtungen zur Rauch- und Wärmefreihaltung; Feuertrutz Verlag; 2009

[Recknagel] Recknagel, H; Schramek R; Sprenger E: Taschenbuch für Heizung + Klima Technik; Oldenbourg Industrieverlag, 2008

[Reick] Reick, M; Palecki, S: Auszug aus den Tabellen und Formeln der DIN EN ISO 6946; Universität GH Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, 1999

[Richter] Richter, W: Handbuch der thermischen Behaglichkeit, Sommerlicher Kühlbetrieb; TU Dresden, Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung, im Auftrag von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007

[Römmling] Römmling, U: Vortrag, Entwicklung und Umsetzung von Messkonzepten zur Energieverbrauchserfassung in Bundesbauten – was ist sinnvoll?; TU Berlin, Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken, 2006

[Schneider] Schneider, K-J: Bautabellen für Ingenieure; Werner Verlag, 17. Auflage, 2006

[Schwehr] Schwehr, P; Hartmann, P: Atrium, Glasüberdeckte Hallen und Höfe; Hochschule Technik und Architektur Luzern, 2005

[Seifert] Seifert, J; Zum Einfluss von Luftströmungen auf die thermischen und aerodynamischen Verhältnisse in und an Gebäuden; Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 2005

[Solararchitektur] Forschungsstelle Solararchitektur: Atrium: Warmluftpolster für Büroheizung; Bundesamt für Energie, 1998

[VDI] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft; VDI- Wärmeatlas, 9.überarbeitete Auflage; 2002



[Veth] Veth, R.; Handbuch Innenraumbegrünung; Thalaker Verlag, Braunschweig 2002

[Voß] Voß, T: CFD-Studien zur Ermittlung der Effizienz einer Nachtlüftung zur sommerlichen Entwärmung von Büroräumen; Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung

[Voss] Voss, K; Hoffmann, C; Herkel, S; Wagner, A; Löhnert, G: Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsbauten; Beitrag in HLH 7/2007

[Voss] Voss, K; Herkel, S: Verwaltungsgebäude DB Netz AG in Hamm; Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, 2002

[Zürich] Stadt Zürich: Merkblatt Glasbauten, Arbeitshilfe für Planende; Amt für Hochbauten Stadt Zürich, 2005

Normen und Richtlinien

[DIN EN ISO 13792] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Vereinfachtes Berechnungsverfahren (ISO 13792:2005), Juni 2005

[DIN ISO 16000-8] (Entwurf), Innenraumluftverunreinigungen – Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen (ISO/DIS 16000-8:2005), Juni 2005

[DIN 18232-2] Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau, November 2007

[DIN EN 12101-2] (Entwurf), Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Festlegung für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte; Deutsche Fassung prEN 12101-2:2006, Dezember 2006



[BS 5925] Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation. British Standards Institution, London, 1980

[DIN EN ISO 7730] Ergonomie der thermischen Umgebung . Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, 2006

[prEN 15251] Kriterien für das Innenraumklima einschließlich Temperatur, Raumluftqualität, Licht und Lärm

[DIN 1946-2] Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), 1994

[DIN EN 13779:2007] Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage, 2005

[DIN EN IOS 15927-6] Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 6: Akkumulierte Temperaturdifferenzen (Gradtage) (ISO 15927-6:2007); Deutsche Fassung EN ISO 15927-6:2007

[DIN EN ISO 7726] Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen, 2002

[DIN ISO 16000-8] Innenraumluftverunreinigungen - Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen (ISO 16000-8:2007)