

M. N. Fisch, Mani Zargari

Analyse und Bewertung von Atrien in Bürogebäuden

F 2774

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8515-6

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/bauforschung

Analyse und Bewertung von Atrien in Bürogebäuden

Abschlussbericht

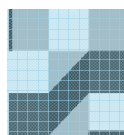
Gesamtleitung

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

Förderung



Bundesamt
für Bauwesen und
Raumordnung



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Förderkennzeichen

Z6 – 10.8,18.7 -07.14/ II 2 – F20-07-31

Stand

30. November 2009

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: Z6 – 10.8,18.7 - 07.14/ II 2 – F20-07-31) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG.....	6
2	LEITLINIEN FÜR PLANUNG UND BETRIEB VON ATRIENGEBÄUDEN	9
3	GROBANALYSE	11
3.1	AUSGANGSBASIS	11
3.2	TEMPERATUR-LANGZEITMESSUNGEN	12
3.3	METHODIK UND VORGEHEN BEI DER AUSWERTUNG DER TEMPERATURMESSDATEN	14
3.4	ERGEBNISSE	16
3.4.1	<i>Sommerliche Überhitzung.....</i>	<i>16</i>
3.4.2	<i>Winterliches Temperaturniveau</i>	<i>18</i>
3.4.3	<i>Temperaturschichtung.....</i>	<i>21</i>
3.4.4	<i>Energieeffizienz</i>	<i>23</i>
3.4.5	<i>Bewertung der Atrienkonzepte</i>	<i>26</i>
3.4.6	<i>Unbeheizte Glasvorbauten (Atrien) in der Normung</i>	<i>27</i>
3.4.7	<i>Wärmeschutzverordnung 1994.....</i>	<i>28</i>
3.4.8	<i>ENEV 2002 mit Verweis auf EN 18599-2.....</i>	<i>32</i>
3.5	METHODIK UND VORGEHEN IN DER PHASE II.....	36
3.6	MESSUNG UND SIMULATION	37
3.7	AUSGEWÄHLTE GEBÄUDE	37
4	FEINANALYSE	41
4.1	GRUNDLAGEN UND METHODIK IN PHASE II	41
4.1.1	<i>Luftwechsellmessungen und Konzept des Luftalters.....</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Indikatorengasmessungen.....</i>	<i>46</i>
4.1.3	<i>Anwendung von Ingenieurmethoden und Simulationsprogrammen</i>	<i>49</i>
4.1.4	<i>Behaglichkeitsmessungen.....</i>	<i>59</i>
4.2	ENERGIEFORUM BERLIN.....	62
4.2.1	<i>Beschreibung des Gebäudes.....</i>	<i>63</i>
4.2.2	<i>Langzeitmonitoring</i>	<i>66</i>
4.2.3	<i>Kurzzeitversuche</i>	<i>69</i>
4.2.4	<i>Behaglichkeit.....</i>	<i>71</i>
4.2.5	<i>Auswertung.....</i>	<i>71</i>
4.2.6	<i>CFD-Simulation</i>	<i>73</i>
4.2.7	<i>Steuerung der Lüftungskappen und ihre Führungsgrößen.....</i>	<i>77</i>

4.2.8	Optimierungspotentiale.....	81
4.3	NEUBAU INFORMATIKZENTRUM.....	82
4.3.1	Beschreibung des Gebäudes.....	82
4.3.2	Langzeitmonitoring.....	89
4.3.3	Kurzzeitversuche.....	92
4.3.4	Behaglichkeit.....	95
4.3.5	Auswertung.....	97
4.3.6	CFD-Simulation.....	100
4.3.7	Analyse des Gebäudebetriebes.....	103
4.3.8	Optimierungspotentiale.....	104
4.4	LBS NORD.....	104
4.4.1	Gebäudebeschreibung.....	105
4.4.2	Langzeitmonitoring.....	105
4.4.3	Kurzzeitversuche.....	108
4.4.4	Analyse des Gebäudebetriebes.....	110
4.4.5	Optimierungspotential.....	125
4.5	THERMISCHES VERHALTEN DER ATRIEN.....	128
4.5.1	Temperaturniveau Sommer - Winter.....	128
4.5.2	Temperaturschichtung.....	128
4.5.3	Luftwechselzahlen bei freier Lüftung.....	129
4.5.4	Strömungspfade und Durchströmungsformen.....	129
4.5.5	Identifizierung der Einflussgrößen auf das thermische Verhalten.....	130
4.5.6	Randbedingungen für die Simulation.....	131
4.6	ENERGETISCHE BEWERTUNG MIT EINER THERMISCH-DYNAMISCHEN SIMULATION.....	136
4.6.1	Thermisch-dynamische Simulation.....	136
4.7	BEWERTUNG DER PLANUNGSWERKZEUGE.....	142
4.7.1	Anwendung von CFD.....	142
4.7.2	Dynamische Gebäudesimulation.....	143
4.7.3	Weitere Methoden.....	143
ANHANG A ABLAUF UND AUSWERTUNG DER LUFTWECHSELMESSUNGEN EFB.....		147
ANHANG B VERSUCHSABLAUF UND AUSWERTUNG DER LUFTWECHSELMESSUNGEN NIZ.....		148
ANHANG C VERSUCHSABLAUF UND AUSWERTUNG DER LUFTWECHSELMESSUNGEN LBS.....		152
ANHANG D BERECHNUNG DER LUFTWECHSELRATEN.....		158
LITERATURVERZEICHNIS.....		172



NORMEN UND RICHTLINIEN.....	177
------------------------------------	------------

1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt Atrien untersucht die Funktionalität von Atrien im Gebäudebetrieb anhand einer Querschnittsstudie auf einer breiten Basis von Gebäuden mit Atrien und einer detaillierten Analyse von drei Gebäuden. Dabei wird insbesondere der Frage nachgegangen, in welcher Form sich Atrien auf den Energieverbrauch der Gebäude auswirken und wo die Ursachen einer möglicherweise suboptimalen Performance liegen.

Arbeitsschwerpunkt des Projekts ist die qualitative Analyse des thermischen Verhaltens der Atrien. Die Untersuchungen berücksichtigen dabei insbesondere die konstruktiven Randbedingungen wie die Anordnung der Belüftungsöffnungen und die Verglasung der Atrien sowie die die Atrien betreffenden Regelungsstrategien.

Eine präzise Quantifizierung der Wirkung des thermischen Verhaltens der Atrien auf den Energieverbrauch wäre messtechnisch nur unter Laborbedingungen oder -innerhalb eines Gebäudes- nur mit unverhältnismäßigem Aufwand umzusetzen. Stattdessen wird eine Untersuchung mit einem dynamisch-thermischen Gebäudesimulationsprogramm auf Basis gemessener Atriumtemperaturen durchgeführt. Dazu wird das Raumklima im Atrium mit empirisch ermittelten Daten als Funktion des Außenklimas beschrieben und mit den meteorologischen Daten des Testreferenzjahres berechnet. Das Testreferenzjahr und das berechnete Atriumklima werden in einem zweiten Berechnungsschritt auf typische Büroräume des untersuchten Gebäudes angewendet. Untersucht werden 4 Varianten: ein natürlich und ein mechanisch belüftetes Gebäude, das jeweils mit bzw. ohne Atrium simuliert wird. Für beide Belüftungsarten ergibt sich jeweils bei den Varianten mit Atrium eine deutliche Senkung des Wärmeenergiebedarfs. In der Variante mit natürlicher Lüftung führt das Atrium zu einer Erhöhung des Kühlenergiebedarfs, die bei wirtschaftlicher Betrachtung, die Einsparungen an Heizenergie übertrifft.

Der Einfluss des Belüftungskonzepts auf die Wirkungsweise der Atrien und auf den Energiebedarf der Gebäude kann mit Hilfe dieser Methodik quantitativ bewertet werden. Bezüglich des thermischen Verhaltens der Atrien wird festgestellt, dass fast alle untersuchten Atrien ganzjährig Übertemperaturen aufweisen. Ausnahmen bilden nur 4-seitig umschlossene, tiefe Atrien und von außen verschatteten Atrien. Die Übertemperatur der

Atrien in Relation zur Außentemperatur wirkt sich im Winter positiv und im Sommer negativ auf die Behaglichkeit und den Energieverbrauch aus.

In der Feinanalyse erfolgen neben einem Langzeit-Monitoring relevanter Raumklimagrößen und Parameter der Gebäuderegulierung eintägige Kurzzeitversuche, die eine Indikatorgasmesung zur Bestimmung des Außenluftvolumenstromes beinhalteten. Die Randbedingungen während der Versuchsdurchführung werden auf analytische und numerische Werkzeuge zur Prognose des Außenluftvolumenstroms angewendet und die Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen. Die Kenntnis des Außenluftvolumenstroms bei freier Lüftung ist eine entscheidende Größe zur Prognose des thermischen Verhaltens eines Atriums und der Planung geeigneter Lüftungsöffnungen. Während dynamische Gebäudesimulationsprogramme bedingt geeignet sind, das Atriumklima zuverlässig und umfänglich zu beschreiben, sind Strömungssimulationsprogramme grundsätzlich in der Lage, den Außenluftvolumenstrom zu berechnen. Eine analytische Methode zur Auslegung der erforderlichen Öffnungsflächen ist die British Standard Method [BS 5925], die sich vor allen Dingen eignet, die fehleranfälligen CFD-Berechnungen zu überprüfen. Thermisch-dynamische Simulationsprogramme sollten gemäß ihrer ursprünglichen Bestimmung auf einzelne Räume oder das gesamte Kerngebäude angewendet werden, wobei man Referenz-Klimadaten, die das Atriumklima repräsentieren, verwenden sollte. Hierbei sind für das Atriumklima in der Heizperiode Randbedingungen in Bezug auf die Nutzung (z.B. durch ein festgelegtes Temperaturniveau für die Bepflanzung oder zur Nutzung als Aufenthaltsfläche) zu berücksichtigen. Während der Kühlperiode, können die dargestellten Abhängigkeiten der Atriumklimate vom Außenklima für eine Reihe unterschiedlicher Gebäude in der Querschnittsanalyse, Phase I, für eine hinreichend genaue Bewertung genutzt werden. Diese und weitere Hinweise werden in Leitlinien für die Planung von Atrien zusammengefasst.

Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass die DIN 18599 Atrien in der Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden nur unzureichend berücksichtigt und in vereinfachten Verfahren nicht realitätsnah abbildet. Im Sommerfall wird eine Atriumtemperatur angenommen, die unterhalb der Außentemperatur liegt. Diese Annahme entspricht nicht den in der Praxis festgestellten Bedingungen, da generell Übertemperaturen in den Atrien gemessen werden. Im Monatsbilanzverfahren werden außerdem jahreszeitabhängige Luftwechselzahlen zur Berechnung des Atriumklimas herangezogen, die sich jedoch nicht

verallgemeinern lassen. Die Ergebnisse der Untersuchungen legen für eine realistische Bewertung von Atrien nahe, für den Winterfall das geplante Temperaturniveau, welches durch die Belüftung und einer eventuellen Beheizung erreicht wird, anzusetzen und für den Sommerfall generell eine vorgegebene Übertemperatur anzunehmen, sofern nicht niedrigere Übertemperaturen nachgewiesen werden können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, ob die an die Atrien angrenzenden Räume über das Atrium oder aus anderen Räumen oder Anlagen belüftet werden.

Es werden in der Feinanalyse Regelstrategien im Gebäudebetrieb identifiziert, die die Funktionalität hinsichtlich der Energieeffizienz einschränken. So ist oftmals die Belüftung in Zeiträumen mit hoher Lufttemperatur im Atrium eingeschränkt. In Zeiten potentiell nutzbarer solarer Wärmegewinne wird in übermäßigem Maße gelüftet. Die Ursache liegt in falschen Annahmen während der Planung und der im Gebäudebetrieb fehlenden Anpassung der Regelstrategie der GLT an die realen Bedingungen. Die heute einwandfreie Regelung im Energieforum Berlin ist unter anderem auf eine jahrelange wissenschaftlich Begleitung des Gebäudes und eine intensive Kooperation mit den Gebäudemanagern zurückzuführen. Daraus folgt die dringende Empfehlung zur Anpassung an die realen Gegebenheiten der Nutzung bei der Inbetriebnahme eines Gebäudes in Zusammenarbeit mit den entsprechenden Fachplanern sowie zu einem langfristigen Monitoring des Gebäudebetriebs.

2 Leitlinien für Planung und Betrieb von Atriengebäuden

Auf Basis der im Forschungsprojekt erarbeiteten Erkenntnisse, werden die folgenden Hinweise für den Entwurf und die Planung von Atrien in Nichtwohngebäuden gegeben.

Die Art der Nutzung eines Atriums ist frühzeitig zu definieren, da sie den Planungsverlauf maßgeblich mitbestimmt.

Die Vegetation in Atrien kann eine energie- und komfortoptimierte Regelung einschränken. Dies gilt insbesondere für eine mediterrane Bepflanzung, die in der Heizphase einen Temperaturbereich von 5-15°C erfordert. Dadurch sind solare Wärmegewinne nur bedingt nutzbar.

Berücksichtigung realistischer Lufttemperaturen in Atrien

Atrien weisen selbst bei sorgfältiger Planung ganzjährig und insbesondere im Sommer in den obersten Schichten des Luftraums erhebliche Übertemperaturen auf. Infolge dieser Übertemperaturen ist für die angrenzenden Gebäudeteile mit einer Erhöhung des Kühlbedarfs, aber auch mit einer Reduzierung des Heizbedarfs zu rechnen. Je nach Auslegung des Gebäudes, können die Einsparungen durch geringeren Heizwärmeverbrauch die Mehrausgaben durch einen erhöhten Kälteverbrauch überwiegen.

Die Wirkung der Atriumtemperatur auf die angrenzenden Räume ist höher, wenn zum Atrium hin gelüftet wird. Daraus resultiert, dass zur Reduzierung des Kühlbedarfs die an die Atrien angrenzenden Räume alternativ, statt über das Atrium, mechanisch belüftet werden sollten. In der Heizphase kann eine Lüftung zu einem Atrium hin sinnvoll sein, um solare Wärmegewinne in der Zuluft nutzbar zu machen

Eine Überhöhung des Atriums bietet einen Pufferraum für aufsteigende erwärmte Luft und kann somit die negativen Folgen einer sommerlichen Überhitzung und Temperaturschichtung abmildern.

Wahl der Verglasung

Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Atriumverglasung sollte kleiner als 0,4 sein, wobei die Lichttransmission entsprechend der technischen Möglichkeiten in etwa doppelt so hoch sein sollte wie der Gesamtenergiedurchlassgrad.

Anordnung von Lüftungsöffnungen

Lüftungsöffnungen sollten so beschaffen sein, dass sie eine möglichst große Höhendifferenz aufweisen. Die Lage der Zuluftöffnungen ist möglichst nach Norden, alternativ nach Osten auszurichten, da morgens die Überhitzung noch gering ist und zu dieser Zeit einer direkten Strahlung ausgesetzter Zuluftbereich nur geringfügig zur Aufheizung beiträgt.

Zur Abminderung einer Temperaturschichtung sind in der obersten Ebene gegenüberliegenden Lüftungsöffnungen vorzusehen und eine Querlüftung einer einseitigen, windrichtungsabhängigen Öffnung der Klappen vorzuziehen.

Für die Bestimmung der erforderlichen effektiven Öffnungsflächen ist die British Standard Method [BS 5925] ein wichtiges Hilfsmittel. Für den Auslegungsfall wird der auftriebsinduzierte Luftwechsel angesetzt, der mindestens $n=3h^{-1}$ betragen sollte. Für detailliertere Untersuchungen, die auch den Windeinfluss und Raumluchtströmungen betrachten, sind CFD-Untersuchungen geeignet. Die Wirkung von Lamellen und Kippflügeln an den Lüftungsöffnungen sind hinsichtlich der Reduzierung der effektiven Öffnungsfläche zu berücksichtigen.

Regelung der Lüftung

Die Regelung der Atriumbelüftung sollte schnell reagieren können und verlässliche Führungsgrößen aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Lage und Genauigkeit (Strahlungsschutz) der Raum- und Außentemperatursensoren. Das Regelungskonzept ist zugunsten seiner Nachvollziehbarkeit und Überprüfbarkeit durch Planer, Errichter und Betreiber so einfach wie möglich zu gestalten. Ein mindestens einjähriges Monitoring der Regelung, beginnend mit der Inbetriebnahme, ist einzuplanen, um Abweichungen zwischen Planung und Betrieb zu identifizieren und den Betrieb optimal auf die tatsächliche Nutzung des Gebäudes und das thermische Verhalten des Atriums abzustimmen.

3 Grobanalyse

3.1 Ausgangsbasis

Untersucht werden 15 Atriengebäude, die einen unterschiedlichen Stand bezüglich der verfügbaren Daten zum Gebäude, dem Energieverbrauch oder messtechnischer Untersuchungen aufweisen.

Acht der insgesamt 15 untersuchten Gebäude waren Bestandteil im F+E Projekt EVA, drei stammen aus anderen Projekten und vier entstammen dem Bestand der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BIA). Im Rahmen der am IGS bearbeiteten Projekte erfolgten teilweise Temperaturmessungen in den Atrien mit unterschiedlicher Güte, weiterhin sind Informationen zu den Betriebserfahrungen, konstruktiven sowie betrieblichen Merkmalen verfügbar. Die Gebäude der BIA wurden an einem Vor-Ort Termin begangen und die Betreiber hinsichtlich der Funktionalität der Atrien befragt. Mit Unterstützung des Institutes für den Erhalt und der Modernisierung von Bauwerken, Berlin (IEMB) konnten Energieverbrauchs- und Bedarfswerte sowie Angaben zum Energiekonzept der Gebäude einbezogen werden.

Objekt BIMA	Bestandteil EVA	Energiekennwerte (nur Bedarf 18599)	Langzeitmessungen
FIT	X	X	X
LBN	X	X	X
ATR	X	X	
ICW	X	X	X
BRA	X	X	
DZB	X	X	X
EFB	X	X	X
NIZ	X	X	X
SPH	X	(X)	X
DHM		(X)	(X)
UBA		(X)	
AAM		(X)	
BMAS		(X)	
BMVBS		(X)	

Abbildung 1 Untersuchungsstand der Atriengebäude in Phase I

Für die aus EVA hervorgegangenen Gebäude ist die ausführlichste Datenbasis vorhanden. Die Gebäude wurden mehrjährig hinsichtlich ihres Energieverbrauches untersucht. Dazu erfolgte

bereits die Erhebung relevanter Daten zum Gebäude und in den Atrien wurden teilweise Temperaturmessungen durchgeführt. Insbesondere liegen Erfahrungen zur Funktionalität der Atrien und dem Betriebsverhalten des Gesamtgebäudes vor

3.2 Temperatur-Langzeitmessungen

In einem Teil der in der Phase I untersuchten Atrien wurden im Rahmen des F+E Projektes EVA und anderer Projekte Temperatur-Langzeitmessungen in den Atrien durchgeführt. Die Messweise erfolgte nicht einheitlich, weil bei der Platzierung der Messsensoren auf die Bedürfnisse der Betreiber (visuelle Beeinträchtigung) Rücksicht genommen werden musste. Weiterhin erfolgten die Messungen im Zeitraum von 2003 bis 2007 mit einer Zeitdauer von 6 - 36 Monaten und mit Messintervallen von 5 - 60 Minuten. Die Gebäude befinden sich in den Städten Berlin, Braunschweig, Hameln und Hannover.

Die Erfassung der Lufttemperaturen erfolgte im Wesentlichen durch folgende verschiedene Messsysteme, wobei nach Möglichkeit (Verwendung von Temperaturmessketten) auf eine Beeinflussung der Lufttemperaturmessungen durch angrenzende Fassadenflächen durch einen möglichst großen Abstand geachtet wurde:

- autarken Kleinstgeräten der Firma Synotech („Hobos“), die in der Regel in Nähe (z.B. Geländer) oder auf der Fassade des Kerngebäudes angebracht werden. Diese Geräte erfüllen am ehesten die Forderung nach einer diskreten Messtechnik
- Temperaturmessketten, die einen möglichst großen Abstand von den Fassaden aufweisen
- Messpunkte der Gebäudeleittechnik, die sich in der Regel in Fassadennähe befinden.



Abbildung 2 Lage der Temperatursensoren am Beispiel des Objektes SPH mit Hobos (links) und ICW mit Temperaturmesskette (rechts)

Die Wetterdaten wurden durch Wetterstationen in der Nähe der Messobjekte erfasst und von entsprechenden Dienstleistern erworben. Üblicherweise befindet sich in jeder Stadt eine Wetterstation, die bis zu 15km Abstand vom jeweiligen Objekt haben. Abweichungen vom Mikroklima in Gebäudenähe sind nicht ausgeschlossen. Ein Vergleich von Messdaten, die in Gebäudenähe erfasst wurden mit Messdaten die sich in ca.10km Abstand befinden (Berlin Mitte – Berlin Tempelhof) ergibt, dass die Differenzen der Temperaturmesswerte im Winter 1,5K nicht überschreiten, im Sommer jedoch auch 3K betragen können.

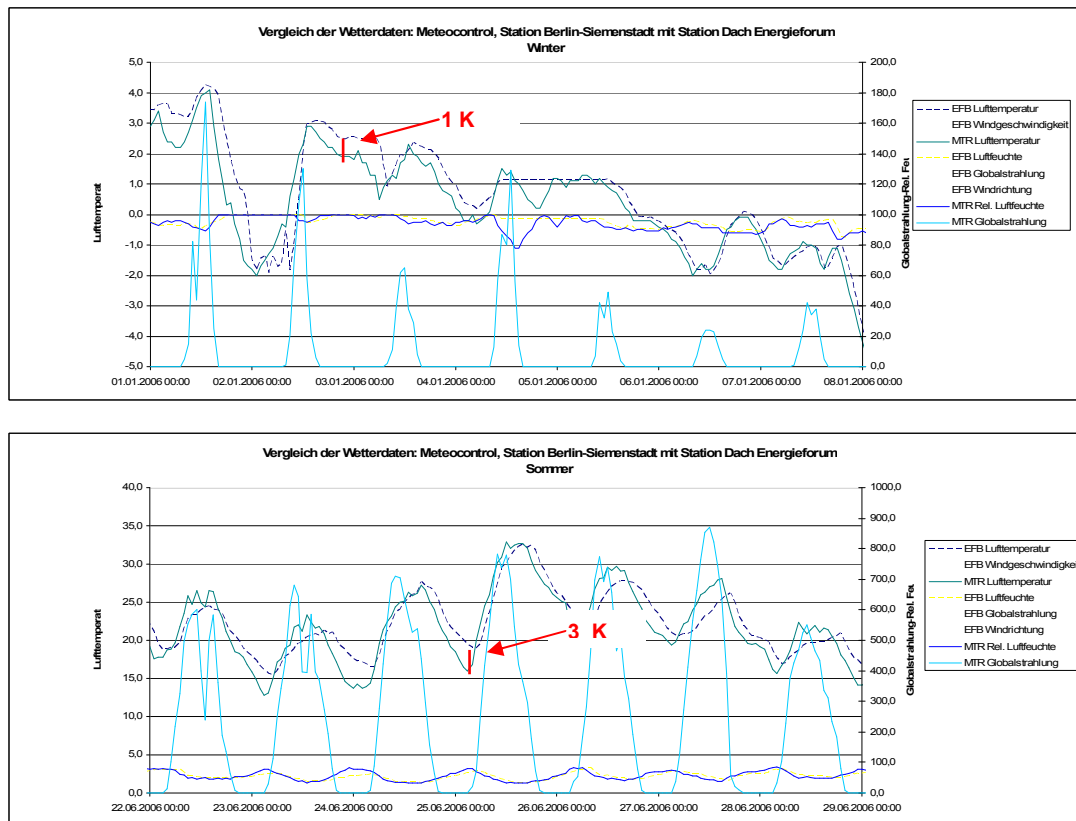


Abbildung 3 Vergleich der Wetterdaten zwischen zwei Wetterstationen einer Stadt

3.3 Methodik und Vorgehen bei der Auswertung der Temperaturmessdaten

Die uneinheitliche Erfassung der Temperaturmesswerte stellt besondere Anforderungen an eine vergleichende Auswertung der einzelnen Messreihen. Zum einen ist den unterschiedlichen Höhen der Messpunkte und der Temperaturschichtung in den Atrien Rechnung zu tragen. Zum anderen führen die unterschiedliche Erfassungszeiträume und -orte zu verschiedenen Außenklimabedingungen, die eine vergleichende Kennwertbetrachtung nicht ermöglicht. Zum Beispiel wäre die Gegenüberstellung durchschnittlicher Übertemperaturen der Atrien bei unterschiedlichen Außenklimabedingungen nicht zulässig, weil der Einfluss einer unterschiedlichen Globalstrahlung nicht bekannt ist und nicht berücksichtigt werden kann.

Daher werden die Betrachtungen zur Übertemperatur im Winter und im Sommer und zur Temperaturschichtung für Referenz-Außenklimabedingungen für den Sommer und den Winter durchgeführt. Dazu werden Klimabedingungen ausgewählt, die häufig in der jeweiligen Jahreszeit

zu erwarten sind. Das Windaufkommen soll in allen Fällen möglichst gering sein, da der Windeinfluss nicht in notwendiger Genauigkeit berücksichtigt werden kann.

Für die gewählten Außenklimabedingungen lassen sich für alle messtechnisch untersuchten Objekte Tage im Messzeitraum finden, die die definierten Bedingungen erfüllen. Die Referenz-Außenklimabedingungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

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

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

Abbildung 4 Referenz-Außenklimabedingungen für die Analyse der Übertemperatur und der Schichtung

Weiterhin erfolgt die Darstellung der Atriumtemperaturen für drei verschiedene Höhen über die Außentemperatur für maximal ein Jahr. Diese Darstellung erlaubt einen qualitativen Blick auf das thermische Verhalten der Atrien, z.B. hinsichtlich einer unteren Grenztemperatur im Winter oder große Streuungen (Ausbrecher), die auf Probleme in der Betriebsführung hindeuten können, siehe auch Abbildung 5. Diese Darstellungen sind im Einzelnen Bestandteil der Steckbriefe im Anhang.

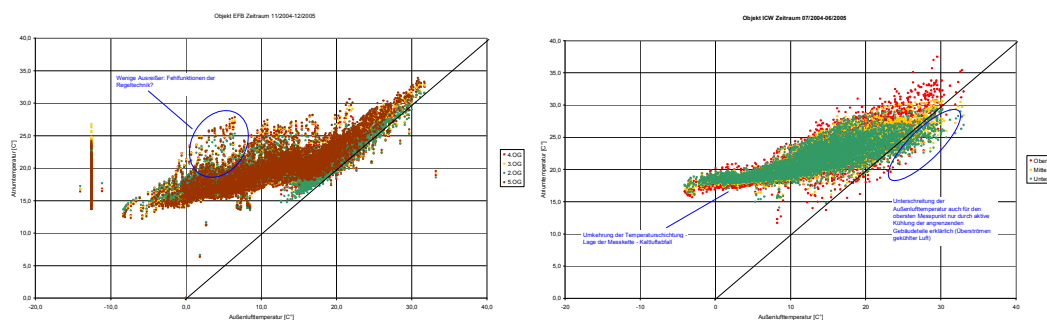


Abbildung 5 Beispiele für die Temperaturdarstellung über die Außentemperatur

Für die Betrachtung der Energieeffizienz der Gebäude werden Bedarfskennwerte nach DIN V 18599 und -sofern vorhanden- Verbrauchswerte herangezogen. Nach Möglichkeit erfolgt eine Ausdifferenzierung nach den Verbrauchsgruppen Strom, Kälte und Lüftung. Es erfolgt ein Benchmark mit den anderen untersuchten Objekten und der Gesamtheit der in EVA untersuchten Objekte. Der Vergleich und die Bewertung erfolgt innerhalb der Steckbriefe.

Die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude, die geometrischen Größen der Atrienräume und Ihrer Luftöffnungen finden Eingang in die Steckbriefe. Als Kernpunkt ist die schematische Darstellung des Energie- und Belüftungskonzept des Atriums und angrenzender Gebäudebereiche zu bezeichnen. Die äußerst individuellen Konzepte lassen sich nicht typologisieren oder gruppieren.

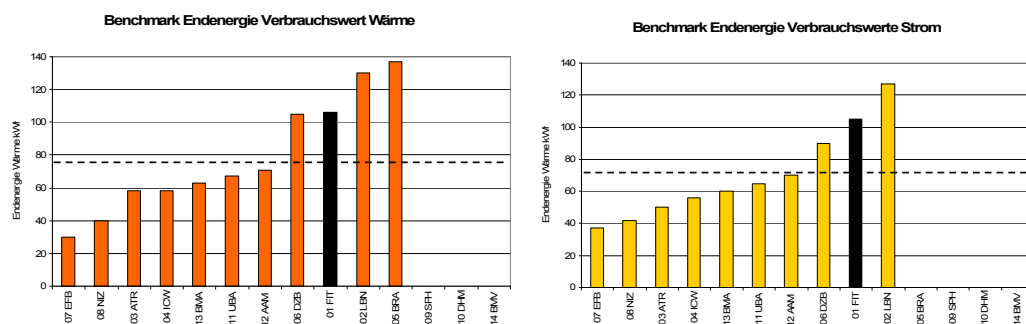


Abbildung 6 Beispiel für die Darstellung der Energieverbräuche in den Steckbriefen

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Sommerliche Überhitzung

Die Atrien weisen an den Referenztagen im Sommer eine durchschnittliche Überhitzung (gemittelt über die Höhe des Kerngebäudes) von 3K auf. Bei einer Außentemperatur von ca. 25°C und einer Bestrahlungsstärke von ca. 800W/m² (Maximalwerte im Tagesverlauf) beträgt die durchschnittliche Atrientemperatur demnach 28°C. Die Maximaltemperatur im Atrium wird zwischen 15:00 und 18:00 Uhr erreicht.

Ein Zusammenhang zwischen dem g-Wert der Verglasung der äußeren Fassade oder ihrem Öffnungsanteil lässt sich nicht herstellen. Auch, wenn man die Öffnungsfläche auf andere Größen bezieht als die gesamte Außenfassadefläche, z.B. auf die Grundfläche oder dem

Luftvolumen, ergeben sich keine konsistenten Zusammenhänge mit der Höhe der Übertemperatur in den Atrien.

Die Abbildung 8 und die Abbildung 9 zeigen die g-Werte der Verglasung und die Öffnungsanteile für die in Abbildung 7 in aufsteigender Reihenfolge dargestellten Objekte. Es ist keine Tendenz in Richtung der erwarteten Verteilung erkennbar.

Die Ursache liegt in weiteren Einflussfaktoren, die in der Querschnittsbetrachtung nicht erfasst werden können. Dazu gehören z.B.

- Größe und Ausrichtung der transparenten Fassadenfläche
- Der Luftaustausch mit dem Kerngebäude
- Betriebsweise der Lüftungsklappen
- Luftaustausch der Atrien mit der Außenumgebung infolge Thermik und Wind

Aussagen zum Wirkzusammenhang der Überhitzung von Atrien ist auf Basis der vorliegenden Messungen aufgrund der vielen Einflussgrößen bisher nicht möglich. Daher in der Phase II soll eine Parameterstudie mit Gebäudesimulationsprogrammen durchgeführt werden, um maßgebliche Energieströme und ihre Einflüsse zu identifizieren.

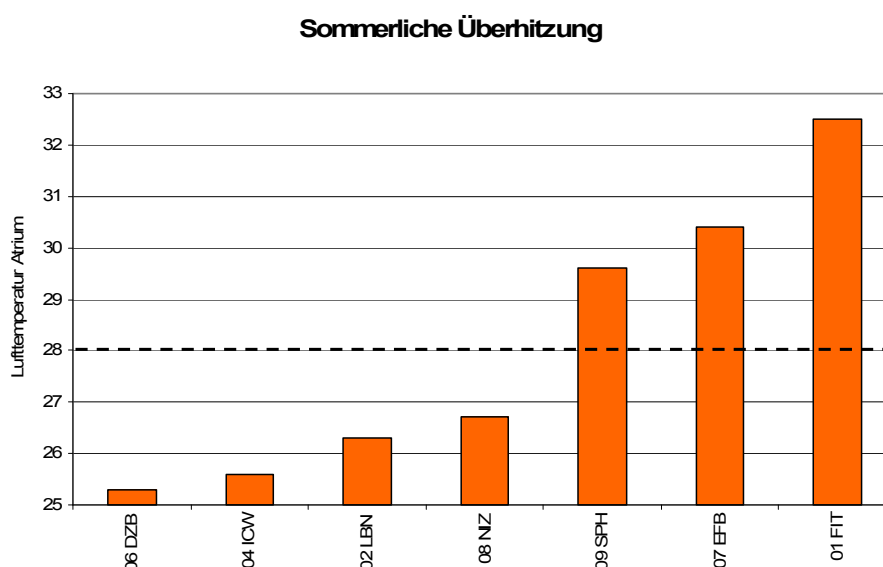


Abbildung 7 Atriumtemperaturen im Sommer bei einer Außentemperatur von 25°C

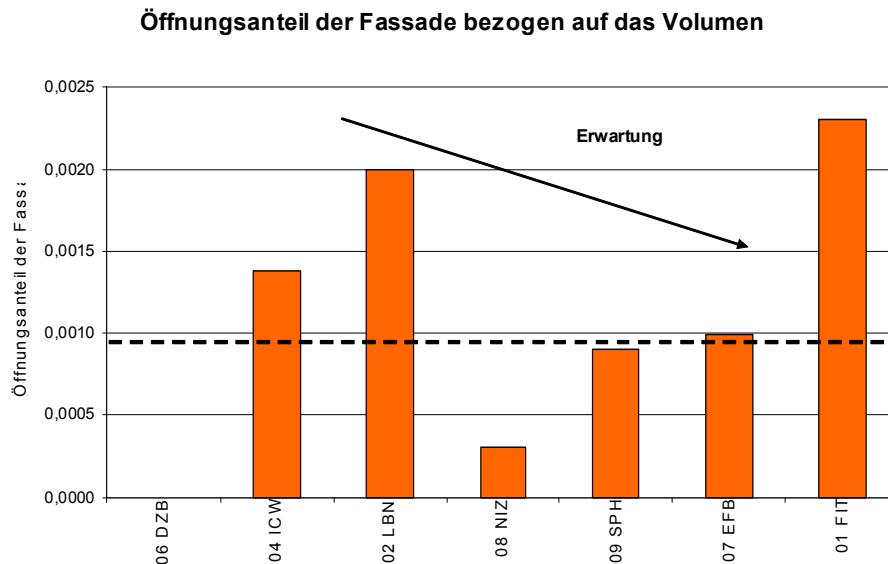


Abbildung 8 Öffnungsanteil der Außenfassaden in der Rangfolge der Überhitzung der Atrien

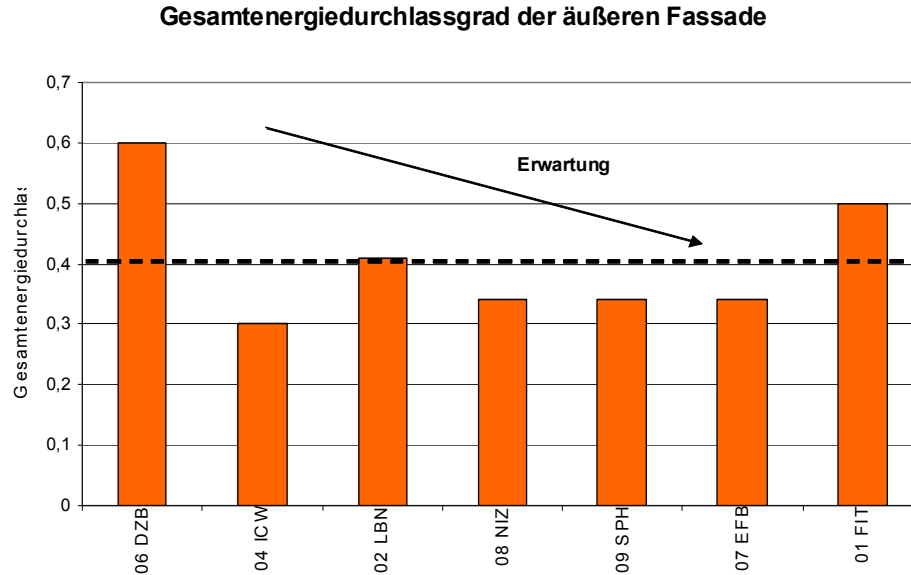


Abbildung 9 Gesamtenergiedurchlassgrad der Außenfassaden in der Rangfolge der Überhitzung der Atrien

3.4.2 Winterliches Temperaturniveau

Das winterliche Temperaturniveau wird analog zum sommerlichen Temperaturniveau auf Basis von repräsentativen Tagen ermittelt, an denen definierte Außenklimabedingungen herrschen. Die maximale Temperatur, die sich im Tagesverlauf im Atrium bei einer Außentemperatur von ca.

0°C und einer Sonneneinstrahlung von weniger 100W/m² einstellt wird hier als die maßgebliche Temperatur für die Beurteilung des winterlichen Temperaturniveaus herangezogen.

Grundsätzlich können zwei Gruppen von Atrien unterschieden werden: Atrien mit einer Zweischeibenverglasung mit einem U-Wert kleiner als 2,0 W/m²K und Atrien mit einer Einscheibenverglasung mit einem U-Wert größer als 5,0 W/m²K. Erstere Gruppe weist eine Temperatur von 4-12°C auf, die zweite von ca. 18 -19°C, siehe Abbildung 11. Das niedrige Temperaturniveau der beiden Objekte mit einer Einscheibenverglasung ist gewollt und wird auch durch Öffnen der Lüftungsklappen herbeigeführt. Ursächlich ist die in den Atrien befindliche Vegetation, die im Winter der Vegetationsruhe auszusetzen ist. Diese macht eine Begrenzung der Atriumtemperatur erforderlich. Beim Objekt FIT geben die Gärtner 8°C vor, bei der LBN ist unbekannt, welche Vorgaben vorliegen. In beiden Atrien ist eine mediterrane Vegetation vorhanden. Während bei der FIT die Temperatur im Beobachtungszeitraum auf bis zu 2°C fällt, wird bei der LBN eine Temperatur von bis zu 12°C beobachtet. Bei beiden Objekten deuten die Temperaturtagesverläufe auf ein gezieltes Absenken der Temperatur durch Öffnen der Klappen hin, siehe Abbildung 10.

Allgemeine Angaben zur Vegetationsruhe sind uneinheitlich, zumal die Voraussetzungen bei den verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich sind. Angaben belaufen sich auf 5-10°C Tagesmitteltemperatur, die mehrere Tage in Folge gehalten werden muss, bevor die Pflanzen die Vegetationsruhe beenden. Bei mediterranen Pflanzen wird dieser Werte höher sein.

Die um rund 10°C höhere Temperatur beim Objekt LBN bei ähnlicher Bepflanzung weist darauf hin, die Temperatur im Objekt FIT niedriger als erforderlich ist. Im Projektverlauf wird dieses Thema noch vertieft werden. Es wird eruiert, welche Vorgaben von Seiten der Vegetationsbeauftragten bestehen, worauf diese beruhen und ob sie unter Umständen in Richtung einer höheren Temperatur zugunsten eines geringeren Heizwärmebedarf verschoben werden kann.

Objekt LBN Referenzwettertag Sommer 04.09.2004

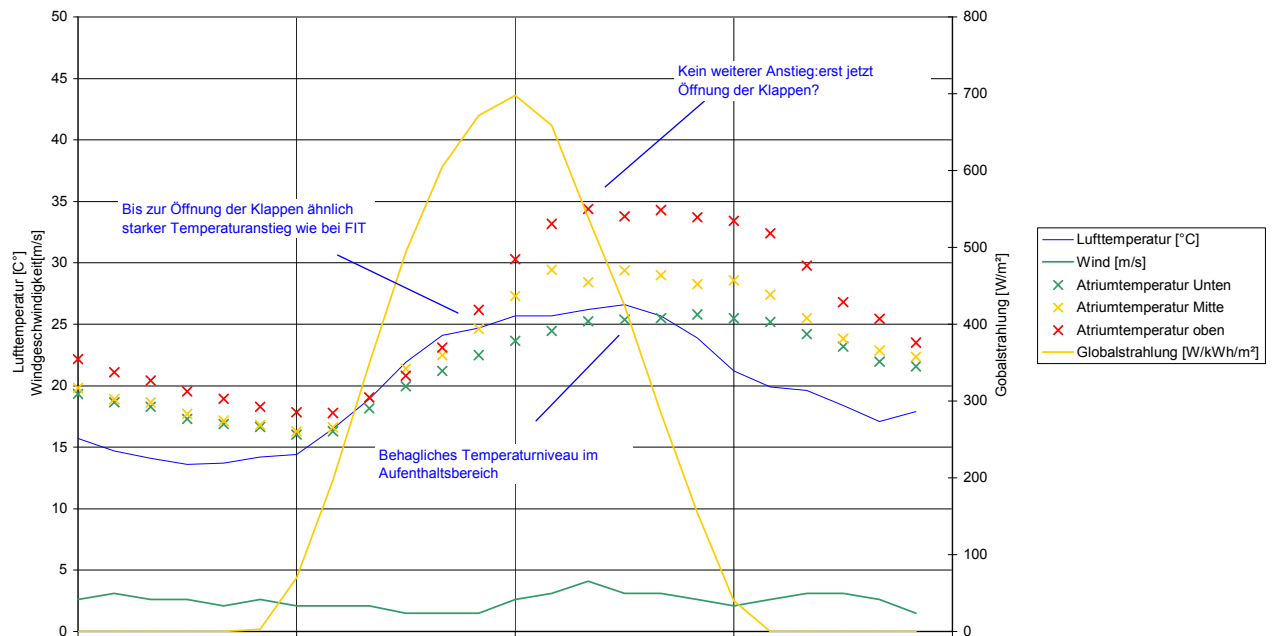


Abbildung 10 Tagesverlauf der Atrientemperaturen im Objekt und Außenklimabedingungen

Temperaturniveau Winter

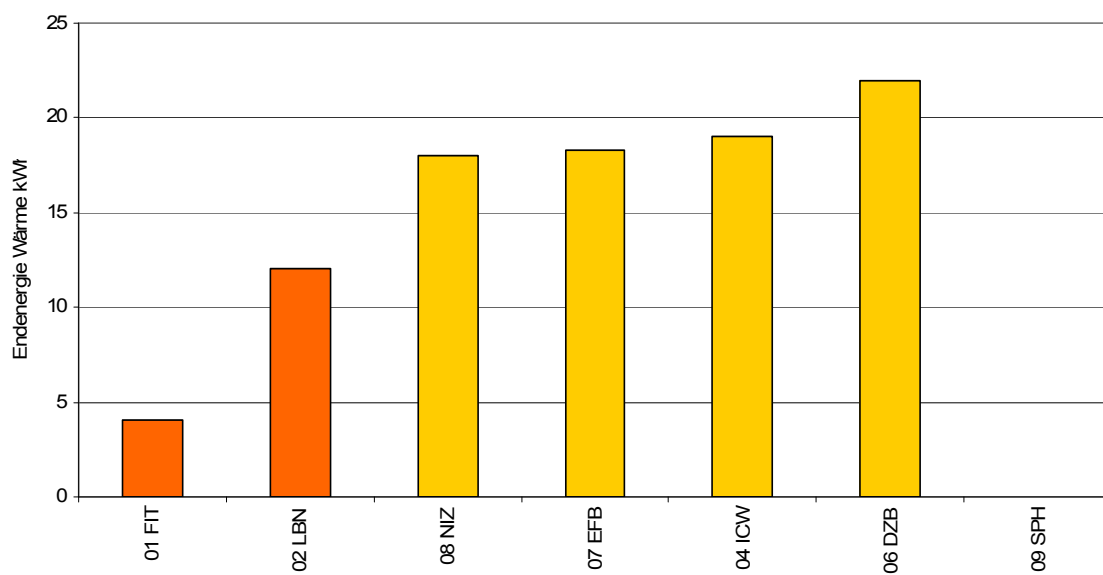


Abbildung 11 Temperaturniveau der Atrien im Winter. Die roten Balken weisen Atrien mit einer Einscheibenverglasung aus.

3.4.3 Temperaturschichtung

Für die Referenzwettertage im Winter und im Sommer wird die Temperaturverteilung über die Höhe dargestellt, siehe Abbildung 12 und Abbildung 13.

Die Kurven weisen unterschiedliche Steigungen auf verschiedenen Niveaus auf.

Eine weitestgehende Übereinstimmung weisen die Temperaturgradienten für die Objekte EFB und LBN auf. EFB verfügt über ein dreiseitiges Atrium mit Sonnenschutzglas, LBN hat ein Haus-in-Haus-Konzept ebenfalls mit Sonnenschutzverglasung und ähnlicher Höhe. Übereinstimmungen weisen die Atrien bei ihrer Höhe und der diagonalen Durchlüftung auf.

Das Objekt FIT wäre vergleichbar mit dem Objekt LBN, mit Ausnahme des Gesamtenergiedurchlassgrades der äußeren Verglasung der hier 0,5 statt 0,3 bei der LBN beträgt. Die Steigung ist ähnlich, jedoch das Temperaturniveau um ca. 5K erhöht.

Bei den Objekten ICW und EFB knickt die Temperaturkurve auf Höhe der Lüftungsklappen ein. Insbesondere bei ICW wird im überhöhten Bereich quergelüftet mit dem Effekt einer Absenkung der Temperatur um ca. 2K im oberen Bereich bei einem Gesamtanstieg über die gesamte Höhe von ca. 4K. Das NIZ weist ab dem 4.OG bis zum überhöhten Bereich einen deutlichen Temperaturanstieg auf. Die Lüftungsklappen im Dach öffneten zum Zeitpunkt der Messung nur im Lee-Bereich. Diese Überhitzung wurde später im Betrieb ebenfalls durch eine Querlüftung im oberen Bereich behoben, das heißt die Klappen im Luv wurden ebenfalls geöffnet.

Alle 4-seitigen Atrien ICW, NIZ, DZB und DHM weisen im Aufenthaltsbereich ($h < 2,0\text{m}$) ausnahmslos Temperaturen auf, die unterhalb oder nur leicht über der Außentemperatur liegen. Nur das DZB hat keine Ablüftung im Dachbereich und infolgedessen weisen die Temperaturmessungen schon bis zur Hälfte der Gesamthöhe auf eine erhebliche Temperaturschichtung hin.

Im Winterfall ist praktisch keine Schichtung zu beobachten. Lediglich im Nahbereich ($< 1,0\text{m}$) zum Boden und zur Dachfläche befinden sich Luftschichten mit einer Temperaturdifferenz von ca. 1K

im Vergleich zur durchschnittlichen Lufttemperatur.

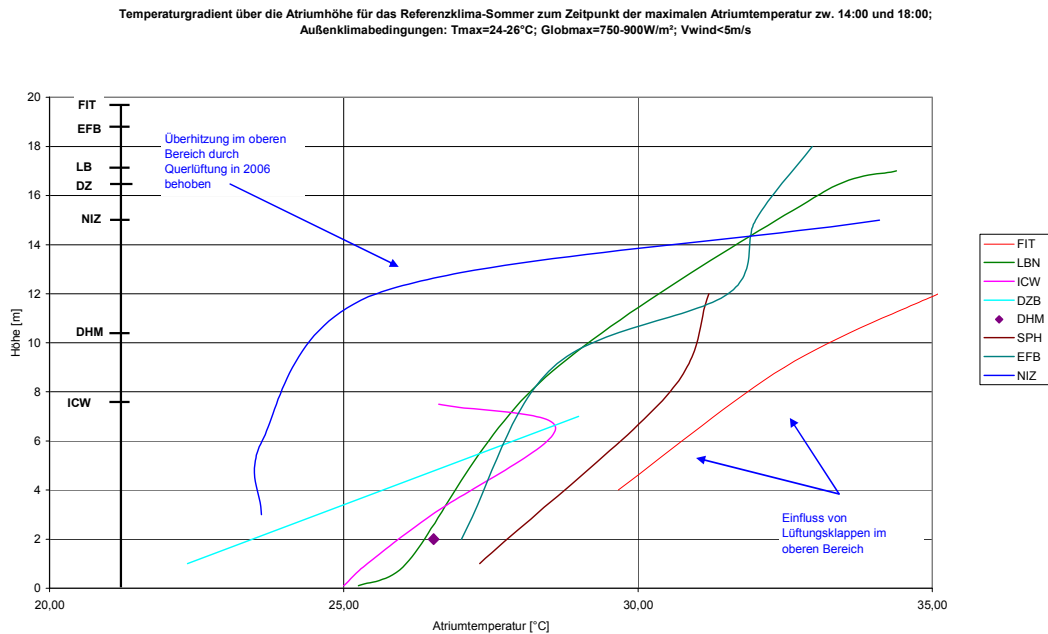


Abbildung 12 Temperaturverteilung über die Höhe im Sommer. Bei den Objekten EFB und ICW fällt knickt die Temperaturkurve aufgrund von Lüftungsklappen in diesem Bereich ein. Links ist die maximale Höhe der Atrien markiert.

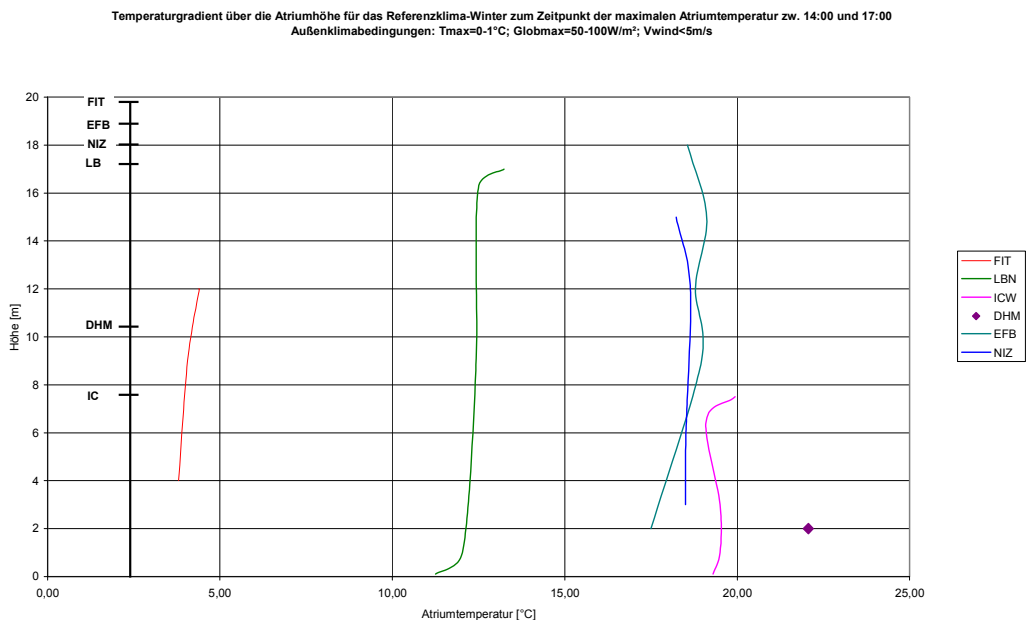


Abbildung 13 Temperaturverteilung über die Höhe im Winter

3.4.4 Energieeffizienz

Die Wirkung der Atrien auf die Energieeffizienz des Gesamtgebäudes erfolgt grundsätzlich infolge der Wärmeübergänge zwischen Atrium und Kerngebäude aufgrund von Konvektion und Transmission durch die innere Fassade bei einer Atriumtemperatur, die in der Regel ganzjährig oberhalb der Außentemperatur liegt. Dadurch ergibt sich im Vergleich zu einer an der Außenluft angrenzenden Fassade eine für das Kerngebäude positive Wärmebilanz, die sich in der Heizperiode positiv und in der Kühlperiode negativ auf den Energieverbrauch auswirkt.

Während der Transmissionswärmeübergang von der Ausführung der inneren Fassade (U-Wert), dem Temperaturniveau im Atrium und der direkten Sonnebestrahlung der inneren Fassadenoberfläche abhängt, ist der konvektive

Wärmeübergang maßgeblich vom Belüftungskonzept und der Betriebsführung abhängig. Ohne eine genaue Untersuchung des sich im Betrieb tatsächlich einstellenden Luftaustausches zwischen Atrium und Kerngebäude, ist eine Bewertung des konvektiven Wärmeüberganges nicht möglich.

Die Atriumtemperatur bestimmt sich im Wesentlichen durch die Strahlungsgewinne und dem Luftaustausch zwischen innen und außen.

Als weiterer Einflussfaktor ist der direkte Sonneneinstrahlung in die direkte Sonneneinstrahlung in die an das Atrium angrenzenden Gebäudebereiche zu nennen. Die Beeinflussung durch das Atrium erfolgt durch den Gesamtenergiedurchlassgrad der äußeren Fassade.

Aufgrund der vielen Einflussfaktoren, deren Größen zum Teil nicht bekannt sind, sind eine pauschale Beurteilung im Rahmen der Querschnittsanalyse auf Basis einer begrenzten Anzahl von individuell konzeptionierten Atrien Grenzen gesetzt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse bestätigen den Einfluss der Atriumtemperatur auf den Energieverbrauch der Gebäude, auch wenn eine statistische Belegbarkeit aus den genannten Gründen ausbleibt.

In Abbildung 14 ist der Energieverbrauch für Wärme und Strom im Vergleich zu den EVA-Gebäuden dargestellt. Ein tendenziell erhöhter oder reduzierter Energieverbrauch aller Atriengebäude im Vergleich zu Nicht-Atriengebäude fällt zunächst nicht auf. Jedoch zeigt sich, dass Gebäude mit Atrien, die direkt oder indirekt beheizt werden und demzufolge auch über eine Wärmeschutzverglasung (WSV) verfügen einen geringeren Wärmeverbrauch aufweisen als Atrien mit einem geringen Temperaturniveau und Einscheibenverglasung (ESV). Abbildung 15 zeigt den Wärmeverbrauch aller untersuchten Atriengebäude, sofern diese bekannt sind.

Bezüglich des Stromverbrauches (inkl. Kühlung) ist feststellen, dass die Gebäude, deren Atrien in ein Nachtlüftungskonzept als Abluftatrium integriert sind, den geringsten Stromverbrauch aufweisen. Die Gebäude mit dem höchsten Stromverbrauch haben, wie aus EVA bekannt ist, betriebliche und konzeptionelle Probleme, die einen erhöhten Aufwand für die Kühlung rechtfertigen. Es ist jedoch zu bemerken, dass sich der Stromverbrauch nur zu einem Teil in dem Bedarf für die Kühlung begründet ist und weitere Faktoren wie Luftförderung und Beleuchtung hinzuzurechnen sind.

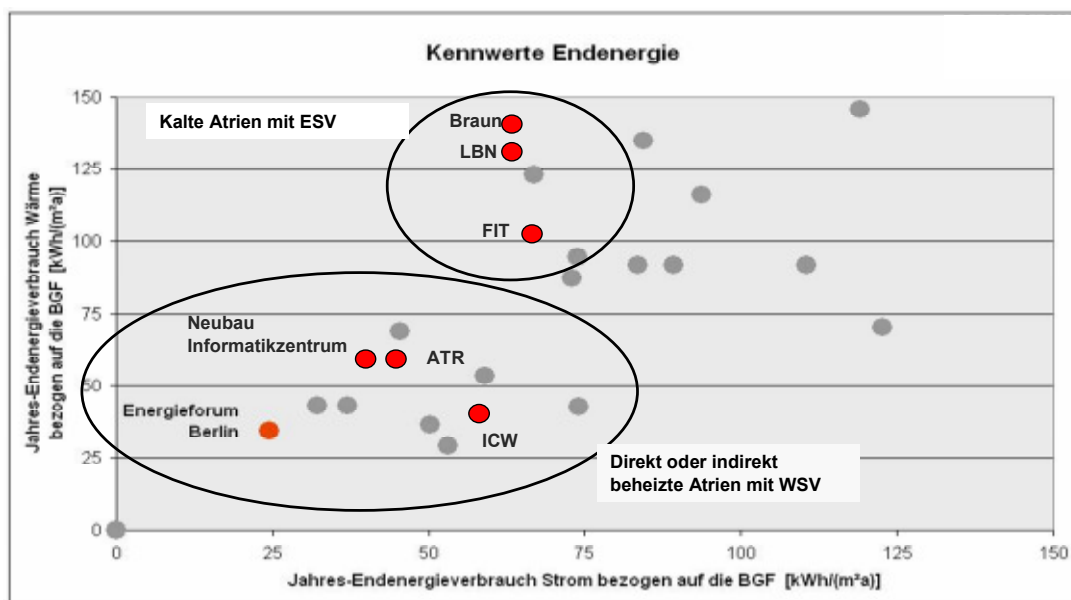


Abbildung 14 Energieverbrauch der Atriengebäude im Vergleich zu anderen Gebäuden aus dem F+E Projekt EVA

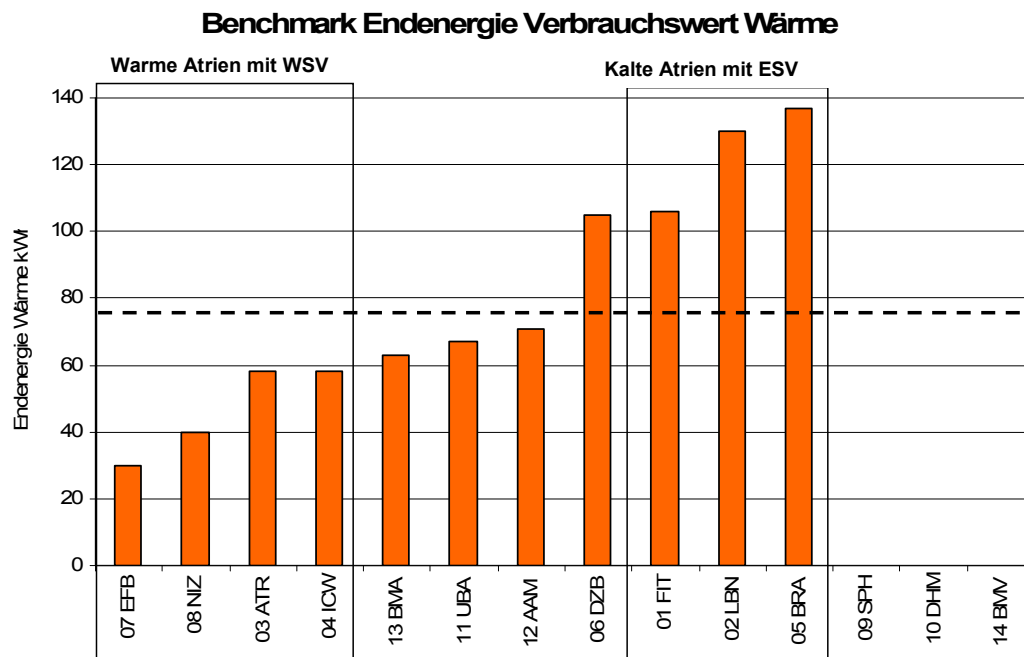


Abbildung 15 Wärmeverbrauch der Atriengebäude und Durchschnitt bei 75 kWh/m²a

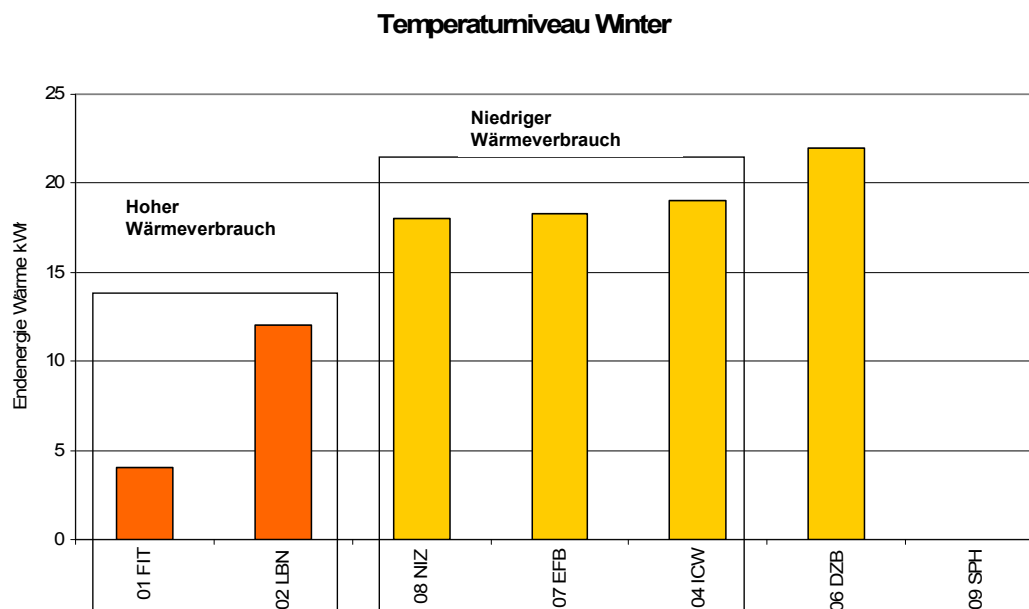


Abbildung 16 Winterliches Temperaturniveau der Atrien

Benchmark Endenergie Verbrauchswerte Strom (inkl. Kälte)

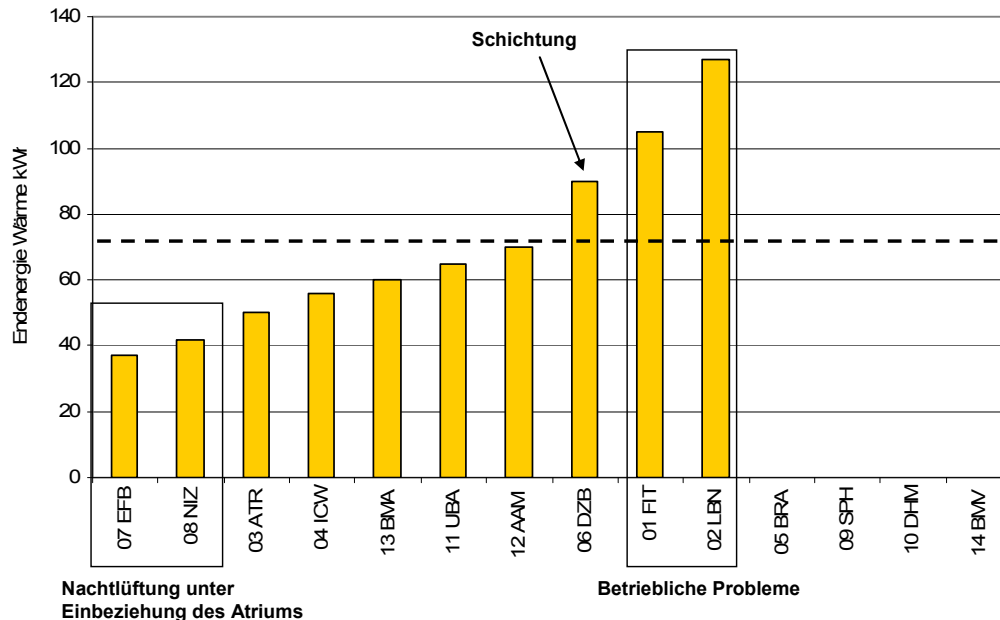


Abbildung 17 Stromverbrauch der Atriengebäude

3.4.5 Bewertung der Atrienkonzepte

Zusammenfassend lassen sich auf Basis der bisherigen Betrachtungen und der Analyse der Steckbriefe folgende Thesen zusammentragen, deren Stichhaltigkeit und Ursache unter anderem in der Phase II behandelt wird:

- 4-seitige Atrien neigen weniger zur sommerlichen Überhitzung als Atrien mit vertikalen Flächen
- 1 bis 3-seitige Atrien weisen i.d.R. ganzjährig Übertemperaturen auf
- Die sommerlichen Übertemperaturen können über die Höhe gemittelt bis zu 10K betragen, sie lassen jedoch bei geeigneter Ausführung auf 2K reduzieren
- Die Atrien stehen in der Regel in einem Luftaustausch mit dem Kerngebäude, der jedoch in seltenen Fällen unter energetischen Gesichtspunkten in das Gesamtkonzept des Gebäudes einbezogen wird
- Die nachteilige Wirkung der Temperaturschichtung kann durch eine Überhöhung und Querlüftung im überhöhten Bereich ausgeglichen werden
- Bepflanzungen in Atrien wirken sich aufgrund der erforderlichen Vegetationsruhe negativ auf den Wärmeverbrauch aus und die mögliche Obergrenze der winterlichen Temperatur wird wahrscheinlich nicht immer ausgeschöpft

Zu den häufigsten negativen Aspekten, die beim Betrieb der Atrien auffallen, gehören

- Überhitzung im Sommer – ungeeignet für Aufenthalt – Potentiell Erhöhung des Kühlenergieverbrauchs
- Eintrag der ungewollter Wärme in angrenzende Bereiche durch unkontrollierte Luftführung
- Schichtung mit besonderer Wärmebelasten der oberen Geschosse
- Durch Umnutzung bedingtes zu niedriges Temperatur-Niveau im Winter (Verkehrsfläche wird zur Aufenthaltsfläche)

Zu den häufigsten positiven Aspekten gehören

- Überhöhung vermeidet Hitzestau im Bereich der Kerngebäude
- Solar vorgewärmte Luft wird zur natürlichen Belüftung der angrenzenden Bereiche genutzt
- Hohe Kompaktheit verringert potentiell den Wärmeverbrauch
- Geringer Wärmeverbrauch bei Warmatrien
- Positiver Effekt der Schichtung: akzeptables Temperaturniveau im Aufenthaltsbereich

Folgende Optimierungspotentiale konnten häufig identifiziert werden

- Verbesserung der Luftführung zur Nutzung von solaren Wärmegewinnen in der Heizperiode, Vermeiden von konvektiven Wärmeeintrag in der Kühlperiode, Verbesserung der Nachtlüftung (Abluftatrium - Erhöhung des Luftwechsels in den angrenzenden Räumen)
- Optimierung der Regelung zur Steuerung der Klappen: Nachtlüftung, rechtzeitiges Öffnen im Sommer, Maximierung der Temperatur im Winter
- Überprüfung des erforderlichen Temperaturniveaus zur Vegetationsruhe
- Verbesserung der Akustik bei freier Lüftung zum Atrium

3.4.6 Unbeheizte Glasvorbauten (Atrien) in der Normung

Im Folgenden werden die maßgeblichen Normen dargestellt, soweit sie mit einer Bewertung und der Planung eines Atriums im Zusammenhang stehen. Diese Betrachtung ist erforderlich, da es sich bei den vorliegenden Normen um die einzig maßgebliche verbindliche Maßgabe als Planungshilfe für die Einbeziehung von Atrien handelt.

Die jeweilige Vorschrift wird hinsichtlich der Möglichkeit bewertet, Atrien und verschiedene Atrienkonzepte angemessen bei der Bewertung des Energieverbrauchs des Gebäudes zu berücksichtigen.

3.4.7 Wärmeschutzverordnung 1994

Die Wärmeschutzverordnung 1994 war zum Zeitpunkt der Planung der meisten im F+E Projekt ATRIEN untersuchten Gebäude maßgebend.

3.4.7.1 Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Glasvorbauten im Heizfall

Das höhere Temperaturniveau und die geringeren Luftbewegungen in Glasvorbauten wird durch Abminderungsfaktoren für den k-Wert der an das Atrium angrenzenden Fassade berücksichtigt. Dieser Abminderungsfaktor orientiert sich an der Art (Wärmeleitfähigkeit) der Verglasung des Glasvorbaus.

Art der Verglasung	Faktor f
Einfachverglasung	0,70
Doppelverglasung	0,60
Wärmeschutzglas mit $k < 2,0$	0,50

Der Glasvorbau wird sowohl nach außen, als auch zum Kerngebäude hin als geschlossener Luftraum betrachtet.

Bewertung:

Die Wärmeleitfähigkeit der Verglasung der äußeren Fassade ist nur einer von mehreren Einflussfaktoren, die die Lufttemperatur im Glasvorbau beeinflussen. Die Lufttemperatur des Glasvorbaus ist darüber hinaus abhängig von

- der Gesamtenergiedurchlassgrad der äußeren Fassade (Verglasung, Rahmenanteil, Verschattungselemente)
- die Ausrichtung der transparenten Flächen der äußeren Fassade.

Die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch ein Atrium wird in der Norm nur ungenau beschrieben. Durch die **pauschalisierte Annahme der solaren Wärmeerträge im Atrium** können sich je nach Ausrichtung der transparenten Flächen oder der Nutzung von Sonnenschutzgläsern erhebliche Abweichungen ergeben.

Atrien, die in einem Luftaustausch mit dem Kerngebäude stehen sind als Bestandteil des beheizten Kerngebäudes zu betrachten oder- falls sie nach außen hin belüftet werden- zu vernachlässigen.

3.4.7.2 Reduzierung der Lüftungswärmeverluste durch Atrien im Heizfall

Der Glasvorbau ist als geschlossener Luftraum definiert ist, wird in der Berechnungsvorschrift keine Möglichkeit geboten, die Nutzung solar erwärmter Luft zur Belüftung des Gebäudes zu berücksichtigen.

Bewertung:

Ein Konzept zur Nutzung solar vorgewärmter Luft zur Belüftung des Kerngebäudes über das Atrium findet in der Berechnung keine Berücksichtigung. Möglichkeiten zur Reduzierung von Lüftungswärmeverlusten werden vernachlässigt.

3.4.7.3 Direkte solare Wärmeeinträge in das Kerngebäude im Heizfall

Strahlungsgewinne im Kerngebäude durch die Fenster der inneren Fassade werden durch die Bildung des äquivalenten k-Wertes für die Fenster berücksichtigt: $k_{EQ,F} = k_F - g \cdot S_F$

Der Gesamtenergiedurchlassgrad g der Fenster findet einen Eingang in die Rechnung, so dass bei korrekter Berechnung die Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades durch die äußere Fassade des Atriums berücksichtigt werden kann.

Der Wert S_F ist nach vier Himmelsrichtungen differenziert und es wird zwischen horizontalen und vertikalen Flächen unterschieden.

Normungssituation

WSVO 1995

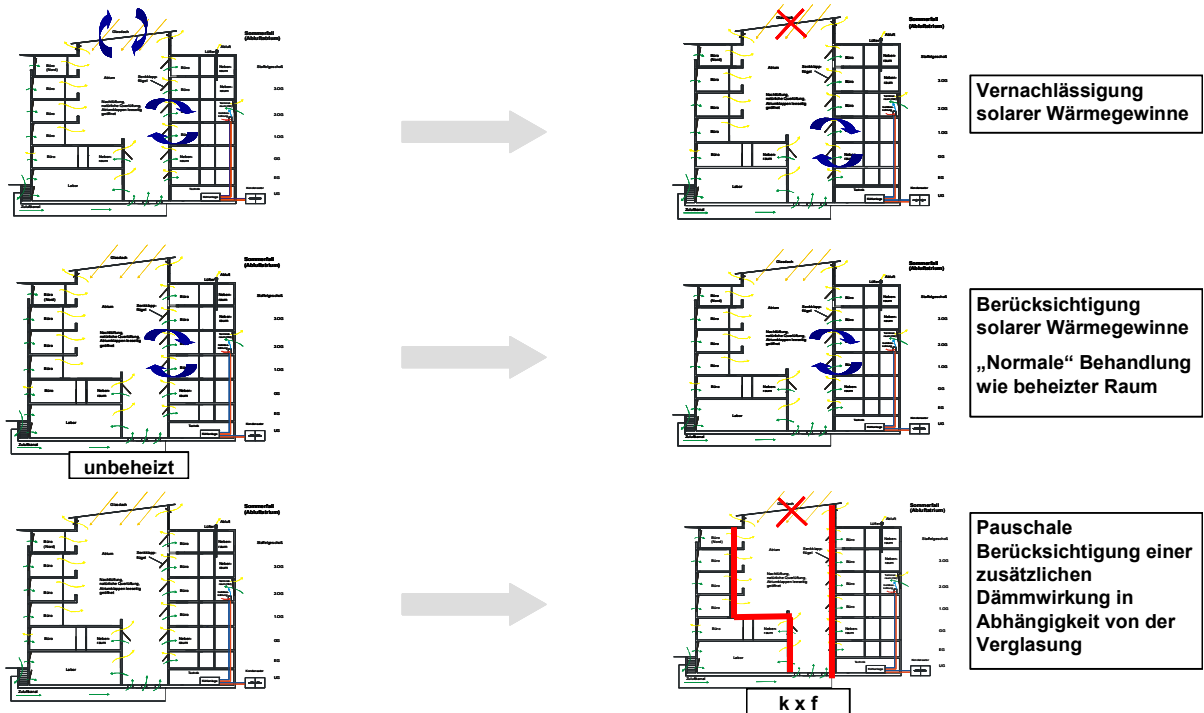


Abbildung 18 Annahmen der WSVO 95 bei der Berücksichtigung von Atrien bei der Berechnung und Eingang der Atrienkonzepte im Berechnungsmodell

Bewertung

Der Einfluss der Fassade des Atriums auf die direkten Strahlungsgewinne im Gebäude findet Eingang in die Rechnung. Die Reduzierung der direkten Strahlungsgewinne durch das Atrium wirkt sich im Heizfall negativ auf den Heizenergiebedarf aus. Verschiedene Verglasungsarten des Atriums werden berücksichtigt.

3.4.7.4 Direkte solare Wärmeeinträge in das Kerngebäude im Sommer – Vermeidung der sommerlichen Überhitzung

Der Nachweis zur Begrenzung sommerlicher Raumtemperaturen erfolgt über die Begrenzung des Produktes $g \cdot f$, mit g als Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster und f für den Fensterflächenanteil. Der g -Wert der Verglasung des Atriums geht bei korrekter Berechnung in den Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster der inneren Fassade wie ein Verschattungselement ein.

Bewertung

Die Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades durch die Fassade des Atriums, inklusive eventuell vorhandener Verschattungselemente kann berücksichtigt werden. Damit ist die wesentliche Einflussgröße des Atriums auf die direkten solaren Wärmeeinträge beschrieben.

3.4.8 ENEC 2002 mit Verweis auf EN 18599-2

Der wesentliche Unterschied zur WSVO1995 besteht in der monatlich aufgelösten Betrachtung in der EN18599 im Gegensatz zur ganzjährigen Bilanzierung der WSVO1995. Für jeden Monat werden durchschnittliche Randbedingungen herangezogen. Dazu zählt auch die Atriumtemperatur, die als Randbedingung für die angrenzende Zonen im Kerngebäude dient.

3.4.8.1 Bestimmung der Atriumtemperatur

Die EN 18599-2 bietet eine **vereinfachte Verfahren** und ein detailliertes Verfahren zur Berechnung der Wärmeverluste durch unbeheizter Glasvorbauten im Heizfall an. In beiden Verfahren wird die Atriumtemperatur infolge der solaren Einstrahlung und anderer Einflussgrößen bestimmt und für die angrenzende beheizte Zone als Randbedingung angenommen. Das vereinfachte Verfahren entspricht inhaltlich dem Verfahren nach der Wärmeschutzverordnung 1994. Jedoch werden die Abminderungsfaktoren (0,5 bis 0,8 in Abhängigkeit von der Verglasungsart) der Wärmeschutzverordnung 1994 zur Reduzierung des k-Wertes herangezogen, hingegen in der EN18599-2 zur Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen beheizter Zone und Außenumgebung. Bezüglich der resultierenden Wärmeverluste im Heizfall ist dies im Ergebnis gleichwertig. Im Kühlfall führt diese Berechnungsvorschrift zu einer Reduzierung der Atriumtemperatur gegenüber der Außentemperatur. Auf das vereinfachte Verfahren wird hier nicht noch mal eingegangen.

Das **detaillierte Verfahren** entspricht dem Verfahren nach EN 832 (erschienen 1998) und der DIN 4108-6 (erschienen 2000) für die Berechnung nach dem Monatsbilanzverfahren. Für die Berechnung der Atriumtemperatur gehen alle Wärmeströme zum Atrium in der Form von Wärmetransferkoeffizienten in die Berechnung ein. Die EN 18599-2 verweist für die Berechnung der Nutzung indirekter solarer Wärmegewinne infolge eines Luftaustausches zwischen dem Atrium und dem Kerngebäude auf die DIN EN ISO 13789.

Bewertung

Bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens gilt das Gesagte in dem Abschnitt zur Wärmeschutzverordnung 1995. Ergänzend muss angeführt werden, dass im Verfahren der EN18599 zur Berechnung der Atriumtemperatur im Gegensatz zur DIN 4108-6 auch für den Kühlfall anzuwenden ist. Die berechnete Atriumtemperatur läge bei einer Außentemperatur

größer der Innenraumtemperatur unterhalb der Außentemperatur. In der Regel konnten jedoch Atriumtemperaturen beobachtet werden, die ganzjährig oberhalb der Außentemperatur liegen. Daraus folgt eine Unterschätzung des Kühlbedarfs. Auf die Bewertung des detaillierten Verfahrens wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

3.4.8.2 Größen und Randbedingungen unter Anwendung des detaillierten Verfahrens

Folgende Größen werden für die Energiebilanzierung des Atriums und der angrenzenden Gebäudezonen herangezogen:

Klimarandbedingungen:

I_s : Mittlere monatliche Solarstrahlung

Für die Bestimmung der Atriumtemperatur:

$\phi_{s,u}$: Solare Wärmeeinträge in das Atrium

$\phi_{i,u}$: Interne Wärmequellen oder -senken

$H_{T,iu}$: Wärmetransferkoeffizient für den Transmissionswärmestrom zwischen dem Atrium und der angrenzenden Gebäudezone

$H_{T,ue}$: Wärmetransferkoeffizient für den Transmissionswärmestrom zwischen dem Atrium und der Außenumgebung

$H_{V,iu}$: Wärmetransferkoeffizient für den konvektiven Wärmestrom zwischen dem Atrium und der angrenzenden Gebäudezone

$H_{V,ue}$: Wärmetransferkoeffizient für den konvektiven Wärmestrom zwischen dem Atrium und der Außenumgebung

Für die Wärmebilanz in der angrenzenden Gebäudezone:

$\dot{Q}_{s,tr}$: direkte solare Wärmeeinträge, deren Reduktion durch die Fassade des Atriums berücksichtigt wird.

$H_{T,iu} + H_{V,ue} = H_{iu}$: Wärmetransferkoeffizienten für Transmissionswärmeströme und Konvektionswärmeströme zur Atriumzone

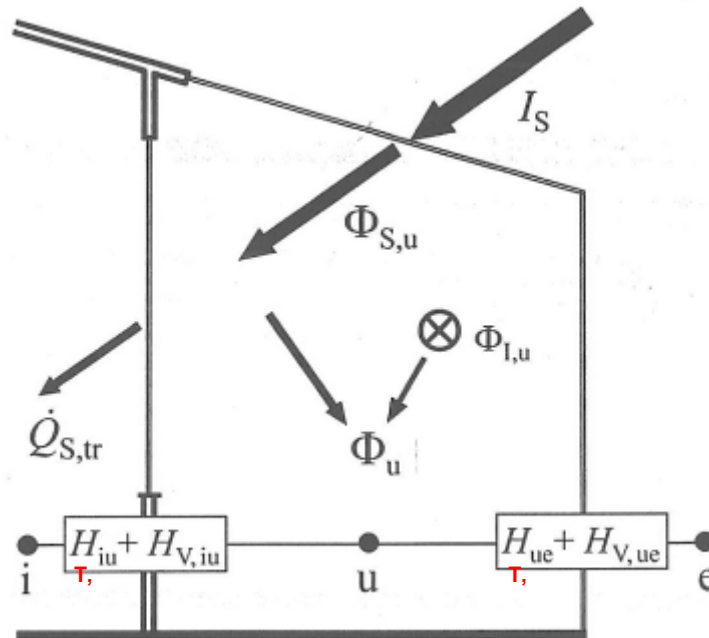


Abbildung 19 Energetisches Modell der DIN V 18599 zur Berechnung der Atriumtemperatur

Folgende Randbedingungen werden vorgegeben:

I_s : globale mittlere monatliche Sonneneinstrahlung nach Orientierung und Neigung der Trennfläche zwischen Atrium und Kerngebäude nach EN 18599-10 Tabelle 7

$H_{V,iu}=0$ Wärmetransferkoeffizient für den konvektiven Wärmestrom zwischen dem Atrium und der angrenzenden Gebäudezone nach EN 18599 -2 Gleichung (95) („in der Regel auf Null zu setzen“). Dem liegt die Annahme zugrunde, dass kein Luftaustausch zwischen Atrium und Kerngebäude besteht:

$n_{ue}=0,6 \text{ h}^{-1}$ Außenluftwechsel des Atriums wird nach EN 18599 -2 Gleichung (96) auf $0,6 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Wenn die Atriumtemperatur größer 20°C ist, darf er auf $n=2,0 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden.

Bewertung

Im Vergleich zum vereinfachten Verfahren ist das Monatsbilanzverfahren aufgrund seiner differenzierteren zeitlichen Auflösung höherwertiger einzuschätzen. Weiterhin werden fast alle

maßgeblichen konstruktiven Parameter, die die Temperatur im Atrium sowie die Wärmeübertragung zum Kerngebäude bestimmen, berücksichtigt. Eine Ausnahme unter den berücksichtigten konstruktiven Parametern bildet die Größe und Anordnung der Lüftungsöffnungen. Ihre Ausbildung ist entscheidend für den sich einstellenden Luftwechsel in einem Atrium.

Eine vereinfachende Planungshilfe stellt die pauschale Vorgabe der Luftaustausch zwischen Kerngebäude und Atrium, sowie zwischen Atrium und Außenumgebung dar. Zwischen Kerngebäude und Atrium besteht „in der Regel“ Luftaustausch somit auch kein konvektiver Wärmeübergang. Daher kann eine natürliche Belüftung des Kerngebäudes über das Atrium nicht angemessen berücksichtigt werden. Bei anspruchsvoller Nachweisführung besteht jedoch die Möglichkeit, den Standardwert, der durch die Zusatz „in der Regel“ nicht verpflichtend ist, einen Luftaustausch zwischen Atrium und Kerngebäude zu berücksichtigen.

Die Vorgabe der Außenluftwechsels des Atriums von $n=0,6 \text{ h}^{-1}$ (Atriumtemperatur $< 20^\circ\text{C}$) bis $n=2,0 \text{ h}^{-1}$ (Atriumtemperatur $> 20^\circ\text{C}$) ist zu hinterfragen. So werden oder sollten Atrien zur Maximierung von solaren Warmegewinnen in der Praxis im Heizfall nicht oder nur sehr selten nach außen hin belüftet. Hingegen kann der Luftwechsel für eine gezielten Abkühlung (Vegetationsruhe der im Atrium befindlichen Pflanzen) die Vorgabe von $n=0,6 \text{ h}^{-1}$ wesentlich überschreiten. Betriebliche Konzepte, die in der Heizphase eine Zieltemperatur im Atrium vorsehen, finden keine Berücksichtigung. Die Festlegung der Atriumtemperatur, die diese Betriebskonzepte beschreiben würde, ist in der Norm nicht vorgesehen.

Normungssituation

ENEV – DIN V 18599

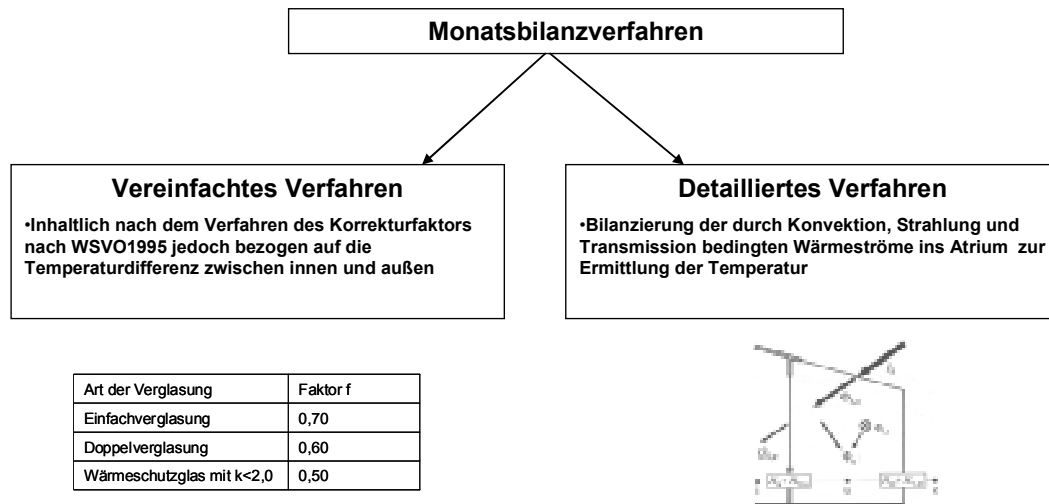


Abbildung 20 Verfahrensmöglichkeiten der DIN V 18599 zur Berücksichtigung von Atrien in der Berechnung

3.5 Methodik und Vorgehen in der Phase II

Die übergeordnete Zielsetzung und die Methodik sind bereits in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erläutert. Einzelne Zielsetzungen werden hier noch einmal herausgestellt:

- Präzisierung der Randbedingungen, insbesondere der Luftwechsel mithilfe Messungen und CFD-Analysen
- Quantitative Bewertung der untersuchten Atrienkonzept hinsichtlich ihres Einflusses auf die Energieeffizienz der Gebäude

Die Beantwortung folgender Fragestellungen ist als Ziel zu setzen:

- Neutralisiert bei in der Regel ganzjährig überhitzten Atrien der erhöhte Kältebedarf in der Kühlperiode den reduzierten Heizbedarf in der Heizperiode?
- Welche Anteile des Wärmestroms zwischen Atrium und Kerngebäude entfallen auf Konvektion und Transmission?
- Ist eine Überhitzung bei Unterbindung des Luftaustausches zwischen Atrium und Kerngebäude im Sommer hinnehmbar?
(Ausnahme: Überhitzung im Aufenthaltsbereich)

3.6 Messung und Simulation

Folgende Messprogramme sind geplant:

- Langzeitmessungen der Atriumtemperaturen über die gesamte Höhe:
Einordnung der Kurzzeitmessungen im Gesamtkontext, bessere Vergleichbarkeit zwischen den Gebäuden
- Langzeitmessung der einfallenden Globalstrahlung:
neben dem Außenluftwechsel wesentlicher Einflussgröße der Atriumtemperatur
- Langzeitmessung Oberflächentemperaturen der Fassaden (bzw. Wärmestromplatten):
Abgleich mit Ergebnissen der
- Langzeiterfassung GLT-Parameter:
Kenntnis der Klappensteuerung, Analyse der Regelstrategie
- Kurzzeitmessungen Luftwechselmessungen bei verschiedenen Bedingungen:
Ermittlung von Randbedingungen für CFD und Ingenieurmethoden (British Standard Method)

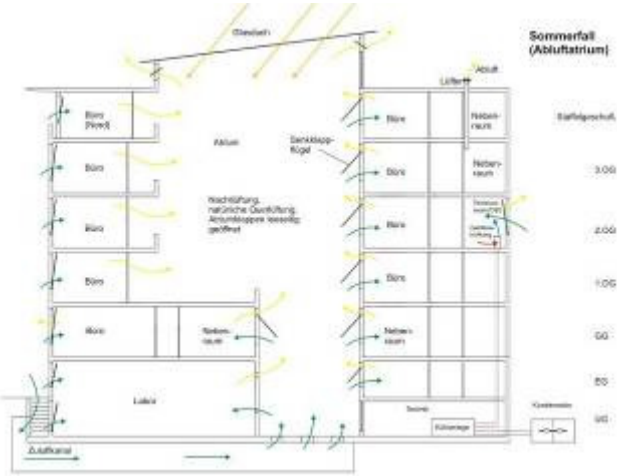
3.7 Ausgewählte Gebäude

Die 3 Gebäude der Phase II bestimmten sich in erster Linie durch ihre Zugänglichkeit für messtechnische Untersuchungen und der Bereitschaft der Gebäudebetreiber aktiv mitzuwirken.

Bei den zu untersuchenden Gebäuden handelt es sich im Einzelnen um folgende Objekte:

NIZ Neubau Informatikzentrum, TU Braunschweig

Das Energiekonzept dieses Gebäudes wurde unter der Leitung des IGS erstellt und es folgte eine wissenschaftliche Betriebsbegleitung im Rahmen des Forschungsprojektes SolarbauMonitor. Es handelt sich um ein 4-seitiges Atrium beheiztes Atrium mit einem winterlichen Temperaturniveau um 18°C, siehe auch Abbildung 21. Die angrenzenden Bürozonon werden natürlich belüftet und das Atrium wird als Abluftatrium in das Belüftungskonzept einbezogen. Aufgrund betrieblicher Probleme kann die angestrebte Temperatur nicht immer erreicht werden. In manchen Büroräumen wird infolgedessen der Behaglichkeitsbereich ab 22°C nicht erreicht.



Objekt Neubau Informatikzentrum

LBN LBS Nord, Hannover

Dieses Atrium stellt ein Haus in Haus Konzept dar, bei welchem das Kerngebäude größtenteils an das Atrium angrenzt, siehe Abbildung 22. Das Gebäude weist einen hohen Energiebedarf für Strom und Wärme auf. Im Winter wird die Temperatur aufgrund der im Atrium befindlichen mediterranen Bepflanzungen zur Vegetationsruhe gezielt abgesenkt. Es wird nicht aktiv in ein Belüftungskonzept einbezogen, die Bürobereiche sind vollklimatisiert. Es wird vermutet, dass sich die sommerliche Überhitzung durch eine Verbesserung der Klappensteuerung und Einbeziehung der vorherrschenden Windrichtung abgemildert werden kann. Weiterhin soll die Frage der erforderlichen Temperaturen für eine Vegetationsruhe anhand dieses Objektes geklärt werden.



Abbildung 22 Objekt LBS Nord

EFB Energieforum Berlin

Auch dieses Gebäude ist dem IGS durch eine anhaltende wissenschaftliche Begleitung von der Planung bis jetzt gut bekannt. Es ist teilklimatisiert und das Atrium wird als Abluftatrium zur Nachtlüftung der angrenzenden Bürobereiche genutzt, siehe auch Abbildung 23. Das 3-seitige Atrium neigt zur Überhitzung im Sommer zum Teil mit Wirkung auf die angrenzenden Bürobereiche. In der Planungsphase wurden aufwendige Windkanaluntersuchungen zur Optimierung der Durchlüftung durchgeführt deren Prognosegüte in diesem Zusammenhang beurteilt werden kann. In einer am IGS angefertigten Dissertation wurden anhand dieses Gebäudes für bestimmte Wettersituation das Messverfahren der Luftwechsellmessungen in Atrien angewendet und erprobt. Weiterhin erfolgte eine Anpassung des Simulationsmodells unter besonderer Berücksichtigung der thermischen und windinduzierten Antriebe für den Luftaustausch. Auf die bereits gewonnen Erkenntnisse wird insgesamt aufgebaut, die objektspezifischen Ergebnisse werden für vertiefende Untersuchungen mit Schwerpunkt auf die energetischen Betrachtungen herangezogen. Z.B. wurde die Frage der Funktion des Atriums als Abluftatrium in den bisherigen Untersuchungen nicht beleuchtet.

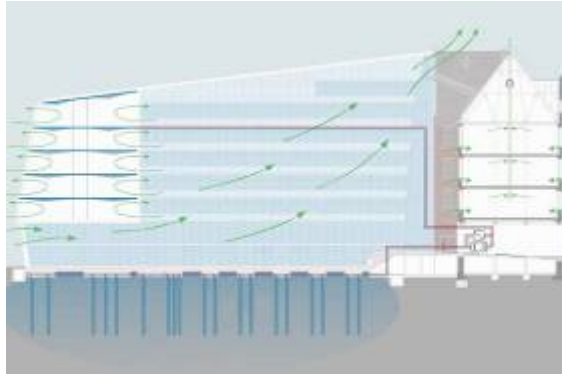


Abbildung 23 Objekt Energieforum Berlin

Tabelle 1 Übersicht der in Phase II zu untersuchenden Gebäude

	Einfassung	Luftaustausch zum Kerngebäude	Temperaturniveau Winter
NIZ	4-seitiges Atrium	Natürliche Lüftung (Abluftatrium)	18°C (beheizt)
LBN	Haus in Haus	Mechanische Zuluft	12°C
EFB	3-seitiges Atrium	Zeitweise mechanische Abluft, sonst natürliche Belüftung (Abluftatrium)	18°C (beheizt)

4 Feinanalyse

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Feinanalyse dargestellt. Zunächst werden die Grundlagen und die Methodik der Bearbeitung, insbesondere die Messverfahren, vorgestellt. Anschließend wird die Durchführung der Untersuchungen bei den einzelnen Gebäuden dokumentiert. Die Ergebnisse werden als Querschnittsbetrachtungen zum thermischen Verhalten der Atrien, zur Energieeffizienz sowie zur Anwendung von Planungswerkzeugen dargestellt.

4.1 Grundlagen und Methodik in Phase II

4.1.1 Luftwechsellmessungen und Konzept des Luftalters

Um den Luftaustausch umfassend zu beschreiben, reicht es nicht aus, den raumvolumenbezogenen Volumenstrom, bekannt als die Luftwechselzahl n , heranzuziehen. Für eine differenziertere Betrachtung wird das Konzept des Luftalters eingeführt.

Die den Recherchen zugrunde liegende Literatur entstammt zum Teil dem angloamerikanischen und skandinavischen Raum, da dort früher als in Deutschland begonnen wurde, Luftaustausch, Lüftungseffektivität und Schadstoffabfuhr zu beschreiben. Hervorzuheben sind hier die Arbeiten von [Shermann,] [Etheridge und Sandberg] [Recknagel]. Im Weiteren werden die Begriffsdefinitionen nach [Recknagel] verwendet, da diese sich auch an die englische Begriffsdefinition anlehnen.

Der Luftwechsel (weitere Bezeichnungen: „globaler Luftwechsel“, „nominal air change rate“, „air exchange frequency“, im englischen Sprachraum abg. A) ist definiert als der Quotient aus dem je Zeiteinheit aus der Umgebung in eine Zone eintretenden Volumenstrom und dem Gesamtvolumen der Zone¹.

¹ Werden keine Einheiten angegeben, so sind SI-Einheiten zu verwenden

$$n = \frac{\dot{V}_Z}{V_R} \quad [h^{-1}]$$

n *Luftwechselzahl* (3-1)

$\dot{V}_Z$ *Zuluftvolumenstrom*

V_R *Raumvolumen*

Diese Definition bezeichnet jedoch nur das Verhältnis des stündlich zuströmenden Außenluftvolumens zum Raumvolumen. Ein Luftwechsel von $n=1$ bedeutet nicht zwangsläufig, dass das Raumvolumen nach einer Stunde komplett ausgetauscht wurde. Dies wäre nur im Fall einer hocheffizienten Verdrängungslüftung der Fall. Der Luftwechsel ist zunächst ein theoretischer Wert, der den Luftaustausch im optimalen Fall beschreibt und daher als Bezugswert geeignet ist, wie später gezeigt wird.

Aus der Verfahrenstechnik (Behälterdurchströmung) haben sich auch in der Raumluftechnik die Begriffe des mittleren Luftalters $\bar{\tau}$ („mean age of air“) und der Verweilzeit τ_E („residence time“, Alter der Abluft) durchgesetzt.

Die durchschnittliche Verweilzeit τ_E ist die Zeit, die die Luft benötigt, um einen Raum zu durchströmen, und entspricht dem durchschnittlichen Alter der Luft an der Abluftöffnung. Das mittlere Alter der Luft im Raum $\bar{\tau}$ ist der Durchschnitt des Alters aller Luftteilchen im Raum und liegt zwischen 0s (Luftteilchen die gerade den Raum betreten haben) und τ_E (Alter der Luft beim Austritt). Im Fall der perfekten Verdrängungsströmung ist das mittlere Luftalter aller Teilchen im Raum $\bar{\tau}$ halb so groß wie die Verweilzeit oder das Alter der Luft an der Abluftöffnung τ_E , siehe Abbildung 24.

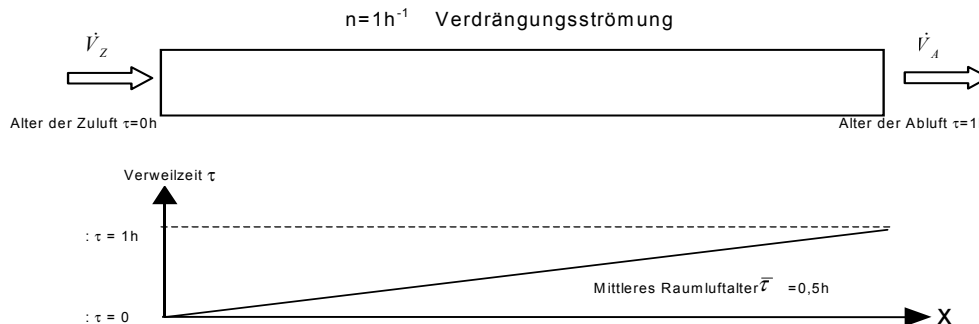


Abbildung 24 Zusammenhang zwischen Luftalter beim Austritt und mittlerem Luftalter in einer Zone bei einer idealen Verdrängungsströmung. Die durch die Gerade eingeschlossene Dreiecksfläche stellt das durchschnittliche Alter dar.

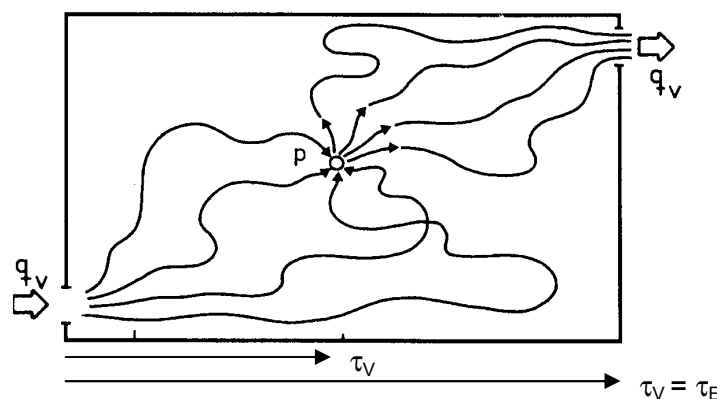


Abbildung 25 Zusammenhang zwischen der Verweilzeit und des durchschnittlichen Alters an der Abluftöffnung

Bleibt man zunächst bei dem Fall der idealen Verdrängungsströmung, so ist die Verweilzeit τ_E gleich dem Reziprokwert des Luftwechsels n und heißt dann nominale Zeitkonstante τ_n („transit time“, „nominal time constant“, „nominelles Raumlufalter“):

$$\tau_n = \frac{1}{n} \quad [s]$$

(3-2)

τ_n nominale Zeitkonstante
 n globale Luftwechselzahl

Die nominale Zeitkonstante ist die kürzest mögliche durchschnittliche Verweilzeit der Luft im Raum, also die Zeit zwischen Eintritt und Austritt aus dem Raum im Fall der idealen Verdrängungsströmung.

Bei einer Verdrängungsströmung ist das mittlere Raumlufalter $\bar{\tau}$ halb so groß wie das nominale Raumlufalter τ_n . Das Verhältnis zwischen Verweilzeit und mittlerem Raumlufalter ist nicht nur im Fall der Verdrängungsströmung 0,5, sondern immer, also auch bei anderen Strömungsarten:

$$\bar{\tau} = 0,5 \cdot \bar{\tau}_E \quad [s]$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau} & \text{ durchschnittliches Raumlufalter} \\ \bar{\tau}_E & \text{ durchschnittliche Verweilzeit} \end{aligned} \quad (3-3)$$

Das Verhältnis des Volumenstroms zu dem sich im Raum einstellenden Luftalter wird als Luftaustauschwirkungsgrad bezeichnet. Wie bereits gezeigt, kann man das durchschnittliche Raumlufalter auch durch die durchschnittliche Verweilzeit, die doppelt so groß ist, darstellen.

Dann ergeben sich unterschiedliche Bezugsgrößen:

$$\eta_g = \frac{\tau_n}{2 \cdot \bar{\tau}} = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_V}$$

$$\begin{aligned} \eta_g & \text{ globaler Luftaustauschwirkungsgrad} \\ \tau_n & \text{ nominaler Luftwechsel} \\ \bar{\tau} & \text{ durchschnittliches Raumlufalter} \\ \bar{\tau}_V & \text{ durchschnittliche Verweilzeit, Luftaustauschzeit} \end{aligned} \quad (3-4)$$

Vereinzelte Autoren verwenden zur Bestimmung des Luftaustauschwirkungsgrades das durchschnittliche Luftalter, verzichten jedoch auf den Faktor 2 im Nenner, so dass der Luftaustauschwirkungsgrad zwischen 0 und 2 und nicht zwischen 0 und 1 liegt.

Wird das durchschnittliche Luftalter $\bar{\tau}$ durch eine Tracergasmessung bei vollständiger Durchmischung der Raumluft bestimmt, so ist dieses nach Sandbeg doppelt so groß wie im Falle der idealen Verdrängungsströmung: 50% der Zuluft mit dem Alter $\tau=0$ verlässt den Raum. Dadurch verbleibt bei gleichem Volumenstrom (und gleichem τ_n) eine größere Menge alter Luft im Raum, die das Durchschnittsalter der gesamten Raumluft anhebt. Der Luftaustauschwirkungsgrad beträgt dann 0,5.

Die Verdrängungsströmung führt zu einem Luftaustauschwirkungsgrad von 1, wie in Abbildung 24 gezeigt. In dem Fall einer Kurzschlussströmung, also der direkten Strömung vom Einlass zur Abluftöffnung auf einem Strömungspfad, verbleiben Teile des Raumlufvolumens im Raum und heben das durchschnittliche Raumlufalter noch weiter an. Das

Raumluftalter ist dann noch größer, als in dem Fall der vollständigen Durchmischung. Der Luftaustauschwirkungsgrad liegt unter 0,5.

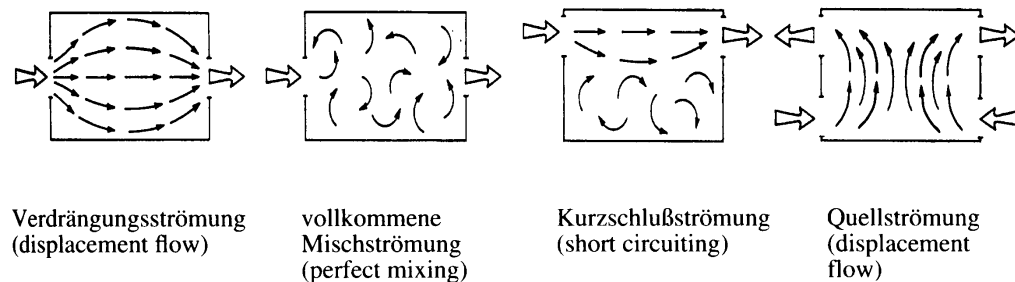


Abbildung 26 Grundformen der Raumströmung nach [Recknagel]

Das durchschnittliche, globale Luftalter ist der Mittelwert aus allen lokalen Luftaustauschwirkungsgraden, die sich örtlich unterscheiden. So ist das Luftalter an einem schlecht belüfteten Ort höher, als an einem gut belüfteten Ort. Genauso stellt der globale Luftaustauschwirkungsgrad den Mittelwert aller lokalen Luftaustauschwirkungsgrade dar, die sich wie folgt definieren:

$$\eta_l = \frac{\tau_n}{2 \cdot \bar{\tau}_l} = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_{v,l}}$$

η_l lokaler Luftaustauschwirkungsgrad (3-5)

τ_n nominaler Luftwechsel

$\bar{\tau}_l$ lokales Raumluftalter

$\bar{\tau}_{v,l}$ durchschnittliche, lokale Verweilzeit

Die Bestimmung lokaler Luftaustauschwirkungsgrade ist z.B. von Bedeutung, wenn die Lüftungsqualität in der Aufenthaltszone bestimmt werden soll. Orte mit niedrigen lokalen Luftaustauschwirkungsgraden werden als „Dead Spots“ bezeichnet.

Der lokale Luftaustauschwirkungsgrad beschreibt, wie effizient, Luft an einem Ort im Raum in Bezug auf den Außenluftvolumenstrom ausgetauscht wird. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Lüftungswirkungsgrad und der Lüftungswirksamkeit („Ventilation effectiveness“). Die Lüftungswirksamkeit beschreibt die lokale Schadstoffabfuhr bei einer im Raum befindlichen Emissionsquelle und ist unter anderem von der Position der Schadstoffquelle abhängig. Die

Zusammenhänge der Schadstoffabfuhr sind für die Auswertung von Tracergasversuchen daher ohne Belang.

4.1.2 Indikatorgasmessungen

Indikatorgasmessungen, auch Tracergasmessungen genannt, basieren auf der messbaren Verdünnung eines Tracergases in Abhängigkeit vom Luftaustausch. Diese Messmethode zur Bestimmung des Außenluftvolumenstromes ist anderen Methoden, wie z.B. der Differenzdruckmessung an Zu- oder Abluftöffnungen überlegen, da sie die Summe aller Außenluftvolumenströme erfasst, also auch durch Infiltration der Gebäudehülle verursachte. Das einzige Fehlerpotential (neben Messungenauigkeiten) liegt in der ungleichmäßigen Durchmischung, sofern die vollständige Durchmischung Voraussetzung der ausgewählten Methode ist.

Bei der Abklingmethode wird zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Arten unterschieden: dem Fall mit einer vollständigen Durchmischung während der Konzentrationsabnahme und der Konzentrationsmessung an der Abluftöffnung ohne Durchmischung während der Abnahme. In beiden Fällen ist zu Beginn der Konzentrationsabnahme eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung im untersuchten Raum vorausgesetzt. Diese kann bei der Messung in der Abluftöffnung auch erreicht werden, indem der Raum mit einer Zuluft konstanter Tracergaskonzentration gespült wird, bis sich an allen Orten im Raum die gleiche Konzentration eingestellt hat.

Wird die Luft im Raum während der Konzentrationsabnahme durchmischt, so wird dem Raum eine Strömungsform aufgezwungen, deren Luftaustauschwirkungsgrad bekannt ist, nämlich der der vollständigen Durchmischung. Dieses erlaubt zwar keine Beurteilung der sich unter natürlichen Bedingungen einstellenden Strömungsformen, ermöglicht jedoch eine zuverlässige Ermittlung des Außenluftvolumenstromes bzw. seinem Reziprokwert, der nominalen Zeitkonstante. Dieses kann von Bedeutung sein, wenn der Außenluftvolumenstrom z.B. infolge freier Lüftung nicht auf anderem Wege (z.B. Differenzdruckmethode) bestimmbar ist.

Der Konzentrationsabfall erfolgt im Fall der vollständigen Durchmischung immer exponentiell. Das hat den Vorteil, dass die logarithmische Lösungsfunktion durch zwei Wertepaare bestimmt werden kann. Weitere Messungen zu anderen Zeitpunkten dienen der

Kontrolle, ob diese der logarithmischen Kurve folgen. Ist dies der Fall, kann von einer ausreichenden Durchmischung zur Anwendung dieser Methode ausgegangen werden. Trägt man den Konzentrationsabfall logarithmisch skaliert auf, so ergibt dies eine Gerade, deren Steigung dem Luftwechsel n entspricht.

$$n = \frac{\ln(C_1) - \ln(C_2)}{t_2 - t_1} \quad [h^{-1}]$$

n Luftwechselzahl (3-6)

C_1 Konzentration zum Zeitpunkt t_1

C_2 Konzentration zum Zeitpunkt t_2

Für die Messung des Luftwechsels in den Atrien würde man im idealisierten Fall zunächst eine gleichmäßige Verteilung des Tracergases herstellen und während des Belüftungsversuches den Konzentrationsverlauf an der Abluftöffnung messen. Dadurch ließe sich sowohl das durchschnittliche Luftalter (Kehrwert des tatsächlichen Luftaustausches), als auch der nominale Luftwechsel (Außenluftvolumenstrom bezogen auf das Raumvolumen) bestimmen. Das Verhältnis dieser Größen zueinander beschreibt die Lüftungseffektivität. Die untersuchten Atrien verfügen jedoch nicht über ausschließlich eine Abluftöffnung und bei Windaufkommen kann darüber hinaus nicht sichergestellt werden, dass durch diese Öffnung die Luft ausschließlich ausströmt. Kommt es zu einer Umkehr der Strömung an der Abluftklappe sind die dortigen Konzentrationsmessungen nicht für eine derartige Auswertung zu verwenden. Im Fall vom Energieforum Berlin war die Abluftklappe aus örtlichen Gründen ohne Steiger nicht zu erreichen. Im Fall der LBS gibt es mehr als eine potentielle Abluftöffnung. Daher wird hilfsweise eine Kombination aus beiden Verfahren angewendet und das Ergebnis überschlägig mit Volumenstrommessungen an den Zuluftöffnungen (sofern definierbar) überprüft. Es erfolgt die Messung des Konzentrationsverlaufs an drei Punkten im Atrium. Somit kann eine Aussage über das lokale Luftalter an diesen Punkten gewonnen werden. Die Kenntnis der jeweils lokalen Lüftungseffektivität vorausgesetzt, ließe sich auf den Außenluftvolumenstrom schließen. Da diese jedoch nicht bekannt ist, sind die Gesetzmäßigkeiten des logarithmischen Abfalls unter Annahme einer vollständigen Durchmischung auf den Konzentrationsverlauf eines der Messpunkte anzuwenden.

Erfahrungsgemäß bewegt sich die Lüftungseffektivität in Atrien im Bereich zwischen 0,5 und 0,7 [Zargari], [Gerder]. Die Durchmischung überwiegt in der Regel den Zustrom der Außenluft, die eine Inhomogenität der Konzentrationsverteilung bewirkt. Während im Sommer der Außenluftvolumenstrom gering ist, sorgen durch die Sonneneinstrahlung verursachte thermische Antriebe für eine Durchmischung der Raumluft. Bei kalter Witterung ist der Außenluftvolumenstrom höher, aber bewirkt durch seine hohe Eintrittsgeschwindigkeit ebenfalls eine Durchmischung, sofern nicht schon die Abwärme der Kerngebäude in einem kühlen Atrium für thermische Auftrieb und eine Durchmischung sorgt. Während der ersten Phase der Tracergasversuche -selbständige Durchmischung der Atriumluft bei geschlossenen Klappen zur Homogenisierung der Tracergaskonzentration- wurden die Erfahrungen bestätigt. Nach 30-60 Minuten konnte bei allen Atrien eine Homogenisierung der Tracergaskonzentration beobachtet werden.

Für die Tracergasmessung wird SF_6 als inertes Tracergas verwendet und ein Messsystem der Fa. DANTEC DYNAMICS, Vivo TriGas und Vivo Dosing verwendet. Der Gasanalysator verfügt über ein photoakustisches Messsystem mit einer Crosscompensation gegenüber Wasserdampf und Kohlendioxyd. Die Dosiereinheit Vivo Dosing dient der Injektion des Tracergases mit einem konstanten Volumenstrom. Diese ist normalerweise erforderlich für die Messung nach dem Konstant-Injektions-Verfahren, es erfolgt jedoch die Anwendung für den Konzentrationsaufbau im Atrium während der Injektionsphase. Zur Anreicherung der Atriumluft mit dem Tracergas werden möglichst eine Zuluftklappe und eine Abluftklappe geöffnet, so dass eine gleichmäßige und vollständige Durchströmung des Atriums erfolgt. Im Bereich der Zuluftklappe erfolgt die Injektion des Tracergases mit einem konstanten Volumenstrom, siehe Abbildung 27 und Abbildung 28.

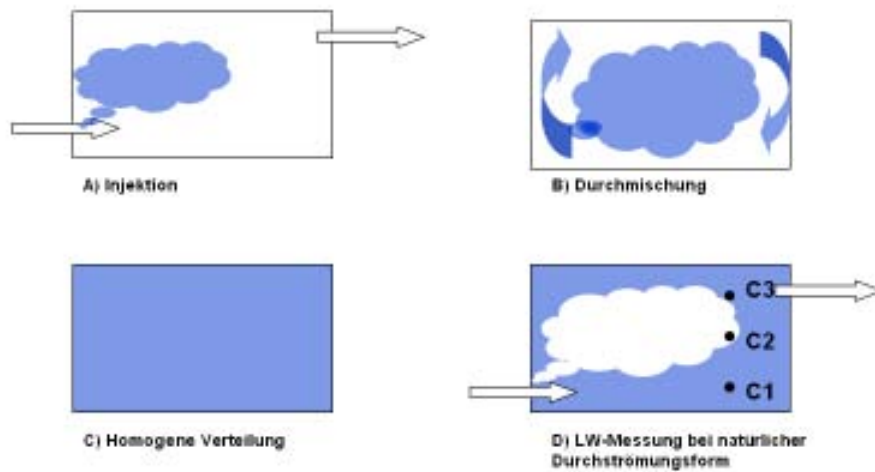


Abbildung 27 Vorgehen bei Luftwechsellmessungen in großen Räumen

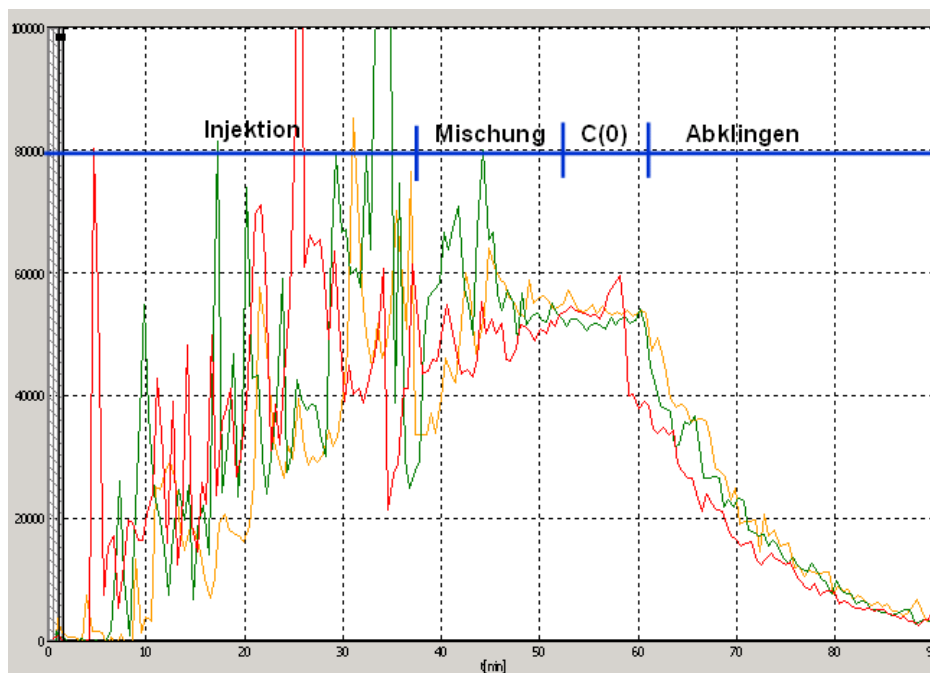


Abbildung 28 Konzentrationsverlauf während einer Luftwechsellmessung

4.1.3 Anwendung von Ingenieurmethoden und Simulationsprogrammen

Der Außenluftwechsel ist neben den solaren Wärmegeinnen die maßgebliche Einflussgröße für das Temperaturniveau in den Atrien.

Der Außenluftwechsel stellt die einfachste, schnellste und energetisch effektivste Methode dar, ungewollte solare Wärmegewinne abzuführen. Als Einflussgrößen auf den Außenluftwechsels sind zu benennen:

- Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Atriumluft
- Windrichtung und –geschwindigkeit

Maßgebliche konstruktive Randbedingungen der Öffnungsflächen, die die Größe des Außenluftwechsels beeinflussen, sind

- Größe und Durchströmungswiderstand der Öffnungsflächen
- ihre vertikale Höhendifferenz
- ihre Lage auf der Gebäudeaußenfläche bzgl. der Windanströmungsverhältnisse

Die vertikale Höhendifferenz der Öffnungen ist maßgeblich für den durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen hervorgerufenen Luftwechsel, die Lage der Öffnungsflächen auf der Gebäudeaußenseite beeinflusst den windinduzierten Luftwechsel. Betrachtet man die kritische Situation im Sommerfall mit hohen solaren Wärmeeinträgen und einem geringen Windaufkommen, so stellt sich die Frage, ob thermische Antriebe für den Luftwechsel überhaupt eine Rolle spielen. Zumal es das Ziel sein sollte, im Sommerfall möglichst geringe Übertemperaturen in einem Atrium zu erzielen, die wiederum geringere Antriebe für den Luftwechsel bewirken.

Die Berechnung des Luftwechsels kann auf folgende Arten erfolgen:

- Analytische Methoden (empirische Gleichungen)
- CFD- Programme
- Dynamische Gebäudesimulationsprogramme mit entsprechenden Modulen zur Berechnung des natürlichen Luftwechsels infolge Wind und Thermik

Empirische Gleichungen sind hilfreich, um Ergebnisse aus Simulationsprogrammen zu überprüfen oder um Luftwechselzahlen für einzelne Situationen zu bestimmen, die anschließend in Simulationsprogrammen zur Anwendung kommen. Die betrachteten Berechnungsmodelle sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die durch **Dachaufsätze** erzielbare Lüftung berechnet sich nach Hansen nach der Gleichung:

$$w_2 = \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot \frac{\Delta t}{T_1}}{\frac{1 + A_2^2}{A_1^2}}}$$

w_2 = Luftgeschwindigkeit in der oberen Öffnung A_2 in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

g = Erdbeschleunigung in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

H = Höhe der Halle in m

Δt = Temperaturdifferenz Hallen - /Außenluft in K

T_1 = Lufteintrittstemperatur in K

A_1 = Querschnittsfläche der unteren Öffnung in m^2

A_2 = Querschnittsfläche der oberen Öffnung in m^2

(3-7)

Tabelle 2 Analytische Gleichungen zur Bestimmung des Luftwechsels

Rechenmodell	Abhängigkeiten	Eingangsgrößen
Schachtlüftung nach Albers und Rahn	Thermischer Auftrieb	Temperaturdifferenz zwischen innen und außen Kleinste Öffnungsfläche im Durchströ- mungsquerschnitt Höhendifferenz zw. Zu- und Abluftöffnung
Dachaufsatzlüftung nach Hansen	Thermischer Auftrieb	Temperaturdifferenz zwischen innen und außen Verhältnis der Flächen der Zuluftöffnung und der Abluftöffnung zueinander Höhendifferenz zw. Zu- und Abluftöffnung
British Standard Method (BS 5925)	Thermischer Auftrieb Windeinfluss	Effektive Öffnungsflächen (Zu. Und Ab.) Temperaturdifferenz Wirksame Druckdifferenz zwischen Zu- und Abluftöffnung auf Basis von Druckbeiwerten und Windgeschwindigkeit und –richtung
Anton Maas/ Phaff	Thermischer Auftrieb Windeinfluss Turbulenzanteil	Windgeschwindigkeit Temperaturdifferenz Geometrie und Lage der Öffnungen (gehen durch Koeffizienten ein)

Die durch **Schachtlüftung** erzielbare Volumenstrom berechnet sich nach **Albers** und **Rahn** mit:

$$\dot{V} = 3600 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{\rho_{\text{Außen}}}{\rho_{\text{Raum}}^2} \cdot A^2 \cdot H \cdot \frac{\rho_{\text{Außen}} - \rho_{\text{Raum}}}{\left(\frac{\rho_{\text{Außen}}}{\rho_{\text{Raum}}} - 1\right) + \frac{1}{2}}}$$

$\dot{V}$ = Abluftvolumenstrom aus dem Raum in $\frac{m^3}{s}$

(3-8)

g = Erdbeschleunigung in $\frac{m}{s^2}$

$\rho_{\text{Außen}}$ = Dichte der Außenluft in $\frac{kg}{m^3}$

ρ_{Raum} = Dichte der Raumluft in $\frac{kg}{m^3}$

A = Querschnittsfläche des Schachts in m^2

H = Höhe des Schachts in m

Der Außenluftvolumenstrom infolge von Wind und Thermik berechnet sich nach **Phaff und Maas** zu:

$$\dot{V}_{zu,R} = 3600 \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{(C_1 \cdot u^2 + C_2 \cdot H \cdot \Delta\vartheta + C_3)}$$

$$\dot{V}_{zu,R} = \text{Außenluftvolumenstrom in } \frac{m^3}{s}$$

A_{eff} = Effektive Öffnungsfläche in m^2

C_1 = Geschwindigkeitskoeffizient des Modellansatzes

(3-9)

C_2 = Temperaturkoeffizient des Modellansatzes in $\frac{m}{(s^2 \cdot K)}$

C_3 = Turbulenzkoeffizient des Modellansatzes in $\frac{m^2}{s^2}$

u = Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

H = lichte Höhe der Fensteröffnung in m

$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz in K

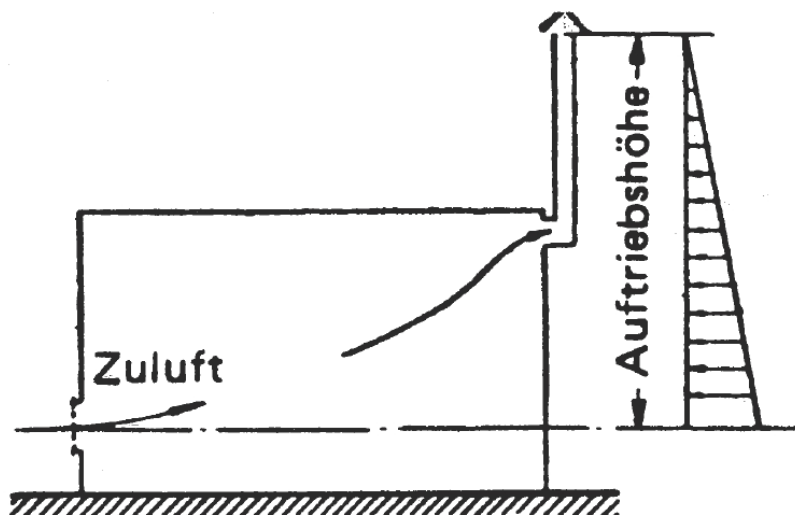


Abbildung 29

Relevante Auftriebshöhe in einem Gebäude [Recknagel]

Nach der British Standard Method erfolgt die Berechnung des windinduzierten Außenluftwechsels zu [BS 5925]:

$$\dot{V}_{\text{Wind}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{c_{D1}A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{c_{D2}A_2}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_w}{\rho}} \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

c_{Di}	[-]	Durchflusskoeffizient
A_i	[m ²]	Öffnungsfläche
ρ	[kg/m ³]	Dichte von Luft
Δp_w	[Pa]	wirksame Druckdifferenz

(3-10)

Die Berechnung des temperaturinduzierten Luftwechsels ergibt sich nach der British Standard Method zu:

$$\dot{V}_{\text{Thermik}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{c_{D1}A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{c_{D2}A_2}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta T \cdot \Delta h}{T_m}} \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

c_{Di}	[-]	Durchflusskoeffizient
A_i	[m ²]	Öffnungsfläche
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
ΔT	[K]	wirksame Temperaturdifferenz zwischen innen (über die Höhe der gemittelten Innentemperatur) und außen
Δh	[m]	wirksame Höhendifferenz zwischen der Zu- und Abluftöffnung
T_m	[K]	mittlere absolute Temperatur zwischen innen und außen

(3-11)

Der windinduzierte und der thermisch induzierte Luftwechsel sind getrennt zu betrachten und nicht additiv zu überlagern. Die Abgrenzung, welche von beiden Gleichungen anzuwenden ist, erfolgt durch:

$$n = n_{\text{Wind}}, \text{ wenn } \frac{u}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta c_p}} \text{ mit } \Delta T = T_i - T_a$$

und

$$n = n_{\text{Thermik}}, \text{ wenn } \frac{u}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{\Delta c_p}} \text{ mit } \Delta T = T_i - T_a$$

ΔT	[K]	wirksame Temperaturdifferenz zwischen innen und außen
Δh	[m]	wirksame Höhendifferenz zwischen der Zu- und Abluftöffnung
u	[m/s]	Windgeschwindigkeit
Δc_p	[-]	Druckbeiwertdifferenz

(3-12)

Das Rechenmodell nach Anton Maas hat den Vorteil, dass konstruktive Randbedingungen in der Form von zu bestimmenden Koeffizienten eingehen. Weiterhin wird ein wind- und temperaturunabhängiger Turbulenzanteil berücksichtigt, der infolge minimaler Luftbewegungen und Diffusionsaustausch einen Luftwechsel bewirkt. Die Grundgleichung gilt für Dreh- und Kippflügel bei einseitiger Lüftung; nach [Hauser; Maas] existiert auch eine Erweiterung zur Berücksichtigung der Querlüftung. Der Nachteil besteht darin, dass die Koeffizienten gebäudespezifisch sind und der Einfluss der Windanströmungsrichtung nur ungenau berücksichtigt wird. Es fehlt jegliche Berücksichtigung der Windrichtung. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Luftwechselversuchen im Projekt, ist eine Bestimmung der gebäudespezifischen Koeffizienten nicht möglich. Daher wird dieses Berechnungsmodell nicht weiter verfolgt.

Die British Standard Method (BS 5925) erlaubt die umfangreichste Berücksichtigung der Einflussgrößen zur Berechnung des Luftwechsels. Das Rechenmodell besteht aus zwei getrennten Gleichungen, die den Luftwechsel infolge von Wind oder Thermik separat behandeln. Unter der Annahme, dass beide Effekte sich nicht überlagern, erfolgt mit Gleichung 3-12 eine Abgrenzung, ob der Wind, oder der thermische Einfluss überwiegen und welche Gleichung entsprechend anzuwenden ist. Der Wind geht indirekt in die Berechnung ein, da statt einer Windgeschwindigkeit die resultierende, effektive Druckdifferenz an den Lüftungsöffnungen anzusetzen ist. Diese lässt sich z.B. über Druckbeiwertverteilungen auf den Gebäudeaußenflächen ermitteln. Druckbeiwerte für standardisierte Gebäudeformen sind der Literatur zu entnehmen oder lassen sich im Einzelfall zuverlässig mit CFD-

Programmen bestimmen. Weiterhin sind die Druckbeiwerte abhängig von der Anströmungsrichtung.

Die Rechenmodelle „Schachtlüftung“ und „Dachaufsatzlüftung“ berücksichtigen lediglich den thermisch induzierten Luftaustausch, werden aber hier versuchsweise ebenfalls angesetzt, für Fälle, in denen der thermische Einfluss überwiegt. Das Rechenmodell der Schachtlüftung nach Albers und Rahn wurde ursprünglich zur Berechnung von Druckverhältnissen in einem hohen Treppenhaus entwickelt. Das Modell zur Dachaufsatzlüftung nach Hansen beschreibt den Luftwechsel in einer Industriehalle mit Übertemperatur, Zuluftöffnungen und Dachaufsätzen als Abluftöffnungen. Geeignete Dachaufsätze dienen letztendlich dem Zweck, eine Beeinträchtigung des Luftwechsels bei Wind zu vermeiden, wie es bei einer ungünstigen Wahl der Öffnungen der Fall sein könnte. Es wird nicht davon ausgegangen, dass Dachaufsätze den Luftwechsel wesentlich forcieren. Für die Verwendung des Rechenmodells in einem Atrium ohne Dachaufsätze wird angenommen, dass die Formel für die Berechnung des ungestörten thermisch bedingten Luftwechsels anwendbar ist.

Im Abschnitt 4.7.3 werden die gemessenen Luftwechselzahlen den Ergebnissen der analytischen Berechnungen gegenübergestellt. Als Eingangsgrößen für die Berechnung werden gemessene Werte herangezogen, die während der Messung aufgenommen wurden. Da sich die Luftwechselfmessung über ca. 1 Stunde hinzieht, sind die Größen der Randbedingungen nicht stationär. Daher werden Mittelwerte über dem Versuchszeitraum gebildet. Diese gelten für Windrichtung, Windgeschwindigkeit sowie Außen- und Atriumtemperatur. Die Atriumtemperaturen werden aufgrund der vertikalen Temperaturschichtung zusätzlich über die Höhe gemittelt. Die British Standard Method erfordert zur Berücksichtigung des Windeinflusses zusätzlich die Kenntnis der Winddruckdifferenz bzw. der Druckbeiwertdifferenz zwischen den Bereichen, in denen sich Zu- und Abluftklappen befinden. Sofern die Drücke nicht gemessen wurden, erfolgt eine Abschätzung mit Hilfe der Außendruckbeiwerte für die Berechnung von Lastannahmen für die Tragwerksberechnung infolge von Windeinfluss [DIN 1055-4: 2005-3].

Bei den hier infrage kommenden Simulationsprogrammen ist zwischen thermisch-dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen und numerischen Strömungssimulationsprogrammen (Computational Fluid Dynamics: CFD-Programme) zu unterscheiden. Thermische Gebäudesimulationsprogramme rechnen dynamisch und in der Regel mit einem

standardisierten jährlichen Wetterdatensatz, zum Beispiel dem Testreferenzjahr (TRY) des DWD. Die Berechnung der Raumklimazustände erfolgt für jeden (stündlichen) Zeitschritt auf der Basis von analytischen oder empirischen Funktionen. Der Nachteil besteht darin, dass innerhalb einer im Simulationsmodell definierten thermischen Zone (auch „Knotenpunkt“), z.B. einem Raum, keine lokale Unterscheidung des Raumklimas möglich ist. Das schränkt ihre Anwendung für die Berechnung eines Atriums ein, da ein großer Luftraum allein schon aufgrund der Temperaturschichtung nicht mehr durch eine einzelne Zone beschreibbar ist. Diese Einschränkung kann umgangen werden, indem für eine Zone mehrere Luftknoten angenommen werden. Anwendung findet dieses Modell im Simulationsprogramm Trnsys [BauSim 2008]. Bei der Anwendung eines dynamischen Simulationsprogramms für die Berechnung eines Atriums besteht zusätzlich die Problematik, dass die Berechnung des natürlichen Luftwechsels für Standardräume ausgelegt ist. In einem Atrium hingegen fallen die thermisch bedingten Luftwechsel aufgrund der Höhe des Raumes höher aus. Die Verteilung und die Lage von Öffnungsflächen eines Atriums lassen sich nicht ohne weiteres standardisiert beschreiben. Jedoch sind dynamische Gebäudesimulationsprogramme unerlässlich, um das thermische Verhalten zumindest der an ein Atrium angrenzenden Büroräume zu untersuchen, da Wärmespeichereffekte erst in der dynamischen Betrachtung zum Tragen kommen, die Programme diesbezüglich hinreichend validiert und sicher in der Anwendung sind. Besteht Kenntnis über den Luftwechsel infolge natürlicher Lüftung in einem Atrium ließe sich ein dynamisches Gebäudesimulationsprogramm mit Einschränkungen zur Berechnung eines Atriums verwenden. Zur Ermittlung der Luftwechselzahlen bedient man sich üblicherweise CFD-Programmen oder analytischen Ingenieurmethoden. CFD-Programme bieten die Möglichkeit einen Raum individuell darzustellen, mit dem Nachteil einer hohen Anzahl von Berechnungsknoten, die jeweils ein Raumelement darstellen. Dies erfordert einen hohen Rechenaufwand, der den Anwender meist zu einer stationären, nicht zeitabhängigen Berechnung zwingt. Für diese Momentbetrachtung mit nicht veränderlichen Randbedingungen können Wärmespeichereffekte, die im Tagesverlauf zum Tragen kommen, nicht oder nur durch Annahmen berücksichtigt werden. Weiterhin erfordert die Anwendung von Strahlungsmodellen eine fundierte Erfahrung des Anwenders. Daher eignen sich CFD-Programme nur bedingt, um das Temperaturniveau in einem Atrium in Abhängigkeit vom Außenklima darzustellen. Je nach Fragestellung im Planungsprozess führt oftmals eine Kombination aus CFD-Simulation und dynamischer Gebäudesimulation zu einem Ergebnis.

4.1.4 Behaglichkeitsmessungen

Die thermische Behaglichkeit ist eine Basisgröße für körperliches und geistiges Leistungsvermögen. Sie wird durch die physikalischen Größen

- Operative Temperatur aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur,
- Relative Luftfeuchtigkeit,
- Luftgeschwindigkeit,
- Zugluftrisiko,
- Strahlungstemperaturasymmetrie und
- Temperaturgradient

bestimmt. Zur Bewertung einer Abkühlung infolge Zugluft wird nach [DIN EN ISO 7730:2006] aus den Parametern Lufttemperatur, mittlere Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad ein prozentualer Anteil Unzufriedener ermittelt. Strahlungsasymmetrie zwischen gegenüberliegenden Bauteiloberflächen verursacht durch warme bzw. kalte Decken oder Wände kann thermische Unbehaglichkeit hervorrufen. Der Temperaturgradient bzw. die Temperaturschichtung beschreibt den Unterschied zwischen der Lufttemperatur am Boden (0,1m über dem Boden) und auf Körperhöhe (1,1 m).

Darüber hinaus wurden weitere Größen berechnet bzw. abgeleitet:

- PMV - **P**redicted **M**ean **V**ote
- PPD - **P**redicted **P**ercentage of **D**issatisfied

Aus den gemessenen Größen kann der **PMV-Index** (**P**redicted **M**ean **V**ote, PMV-Index) ermittelt werden, der eine Vorhersage über das zu erwartende mittlere Votum zur thermischen Behaglichkeit erlaubt. Grundlage der Berechnung sind experimentelle Untersuchungen in verschiedenen Raumklimaten und entsprechende statistische Auswertungen. Der PMV-Index wird auf einer 7-Punkte Skala von -3 bis +3 nach ASHRAE bewertet, Tabelle 3 .

Tabelle 3 Klassifizierung der Raumtemperatur nach DIN EN ISO 7730:2006

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß

Aus den gemessenen physikalischen Größen kann auch ein Prozentsatz Unzufriedener Nutzer berechnet werden – der „**PPD- Index**“ (**P**redicted **P**ercentage of **D**issatisfied, PPD-Index). Über den PPD lässt sich der thermische Raumkomfort bewerten. Als Maßstab für die Bewertung werden sowohl normierte Grenzwerte nach [DIN EN ISO 7730:2006] als auch Messergebnisse von Referenzgebäuden verwendet.

Neben den genannten Größen wurde auch die für die Leistungsfähigkeit bedeutsame CO₂-Konzentration in den Räumen gemessen.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die untersuchten Kriterien sowie die zur Bewertung verwendeten Grenzwerte und ihre normativen Grundlagen. Die Kennwerte sind im Folgenden mit den Farben der Kategorien gekennzeichnet:

Kategorie A (gut) - Grün

Kategorie B (akzeptabel) - Gelb

Kategorie C (eingeschränkt) - Rot

Kennwerte, die außerhalb der Kategorie C liegen, sind in weiß markiert.

Tabelle 4 Grenzwerte für die thermische Behaglichkeit

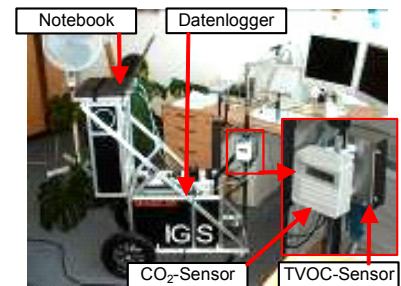
Messwert	Kategorie A (gut)	Kategorie B (akzeptabel)	Kategorie C (eingeschränkt)	Normative Grundlage
Operative Temp.	W: $21^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} \leq 23^{\circ}\text{C}$ S: $23,5^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} \leq 25,5^{\circ}\text{C}$	W: $20^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} < 21^{\circ}\text{C}$ W: $23^{\circ}\text{C} < T_{\text{op}} \leq 24^{\circ}\text{C}$ S: $23,0^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} < 23,5^{\circ}\text{C}$ S: $25,5^{\circ}\text{C} < T_{\text{op}} \leq 26,0^{\circ}\text{C}$	W: $19^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} < 20^{\circ}\text{C}$ W: $24^{\circ}\text{C} < T_{\text{op}} \leq 25^{\circ}\text{C}$ S: $22,0^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{op}} < 23,0^{\circ}\text{C}$ S: $26,0^{\circ}\text{C} < T_{\text{op}} \leq 27,0^{\circ}\text{C}$	DIN EN ISO 7730:2006
Relative Feuchte	40 – 50 %	30 – 40 % 50 – 60 %	30 – 20 % 60 – 70 %	prEN 15251:2005 ²
Geschwindigkeit	W: $v_a \leq 0,10$ S: $v_a \leq 0,12$	W: $0,10 < v_a \leq 0,16$ S: $0,12 < v_a \leq 0,19$	W: $0,16 < v_a \leq 0,21$ S: $0,19 < v_a \leq 0,24$	DIN EN ISO 7730:2006
Zugluftrisiko	DR < 10%	10% ≤ DR < 20%	20% ≤ DR < 30%	DIN EN ISO 7730:2006
Strahlungsym. (vertikal)	< 10 K (Kühle Wand) < 23 K (Warme Wand)	< 10 K (Kühle Wand) < 23 K (Warme Wand)	< 13 K (Kühle Wand) < 35 K (Warme Wand)	DIN EN ISO 7730:2006
Temp. Gradient	$\Delta t < 2 \text{ K}$	$2 \text{ K} \leq \Delta t < 3 \text{ K}$	$3 \text{ K} \leq \Delta t < 4 \text{ K}$	DIN EN ISO 7730:2006
CO ₂ -Gehalt	< 1.000 ppm	1.000 – 1.500 ppm	> 1.500 ppm	DIN 1946-2:1994
CO ₂ -Gehalt	400 - 600 ppm	600 – 1.000 ppm	> 1.000 ppm	DIN EN 13779:2005
PMV	-0,2 < PMV < +0,2	-0,5 < PMV ≤ -0,2 +0,2 ≤ PMV < +0,5	-0,7 < PMV ≤ -0,5 +0,5 ≤ PMV < +0,7	DIN EN ISO 7730:2006
PPD	PPD < 6%	6% ≤ PPD < 10%	10% ≤ PPD < 15%	DIN EN ISO 7730:2006

Die mobile Messeinheit, siehe Abbildung 30, entspricht den Anforderungen der Normen DIN EN ISO 7726:2002 und DIN EN ISO 7730:2006. Die Sensoren wurden vor Beginn der Untersuchungen kalibriert.

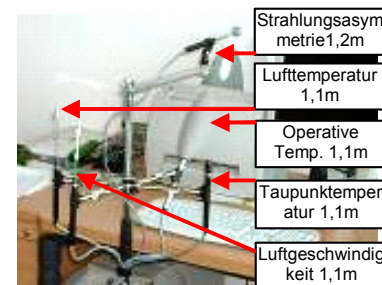
² DIN 1946-2:1994 gibt für die relative Feuchte mit 30 – 70 % ebenfalls einen Komfort-Bereich an, jedoch ohne weitere Unterteilung.



Abbildung 30 Messtechnikaufbau des MobileLAB



Mobile-LAB während einer Messung am Arbeitsplatz



Die Werte der Lufttemperatur, der Taupunkttemperatur, der operativen Temperatur, der Asymmetrie der Strahlungstemperatur und der Luftgeschwindigkeit werden mit Sensoren des Fabrikats "Brüel & Kjær" aufgenommen. Mit Ausnahme des Lufttemperatursensoren, der sich in einer Höhe von 0,1 m über dem Boden befindet, sind alle anderen Sensoren in einer Höhe von 1,1 m angeordnet.

Die Außenlufttemperatur wird jeweils im Rahmen der Messungen in der unmittelbaren Umgebung der Gebäude gemessen. Außerdem wird der Bewölkungsgrad bewertet.

Für die Untersuchung in den Atrien erfolgt eine Messung an drei Orten im Aufenthaltsbereich der Atrien. Die Messorte sind so verteilt, dass sowohl zentrale Bereiche als auch kaltluftabfallgefährdete Bereiche in der Nähe der Glassfassaden erfasst werden.

4.2 Energieforum Berlin

Das Energieforum Berlin wurde 2003 am Stralauer Platz in Berlin als Neubau und Sanierung eines bestehenden Lagerhauses errichtet. Das Bürogebäude mit seinem an drei Seiten umbauten und zur Spree nach Süden geöffneten Atrium wurde als Demonstrationsprojekt im Rahmen des Forschungsprogramms EnOB Energieoptimiertes Bauen (früher „solarbau“) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie errichtet und im Betrieb wissenschaftlich begleitet und optimiert.

4.2.1 Beschreibung des Gebäudes

Das Energieforum Berlin verfügt über ein innenliegendes, dreiseitig umbautes, nach Süden verglastes Atrium mit einer Grundfläche von 1288m² und einem Volumen von 37.600m³. Die Höhe beträgt 27,50 m und das Dach schließt nahezu mit dem Kerngebäude ab, so dass nur eine geringe Überhöhung von ca. 3,0 m besteht. Die Verglasung besteht aus einem Sonnenschutzglas mit einer hohen Durchlässigkeit für sichtbaren Licht (Ipasol Natura, Fa. Interpane; g-Wert: 0,34; τ -Wert=0,68). Das Atrium selber wird nicht verschattet, wohingegen die anliegenden Büros über einen innenliegenden Sonnenschutz verfügen. Belüftet wird das Atrium über Lamellen in der vertikalen Verglasung auf der Süd- und Nordseite, siehe Abbildung 31 und Abbildung 32.

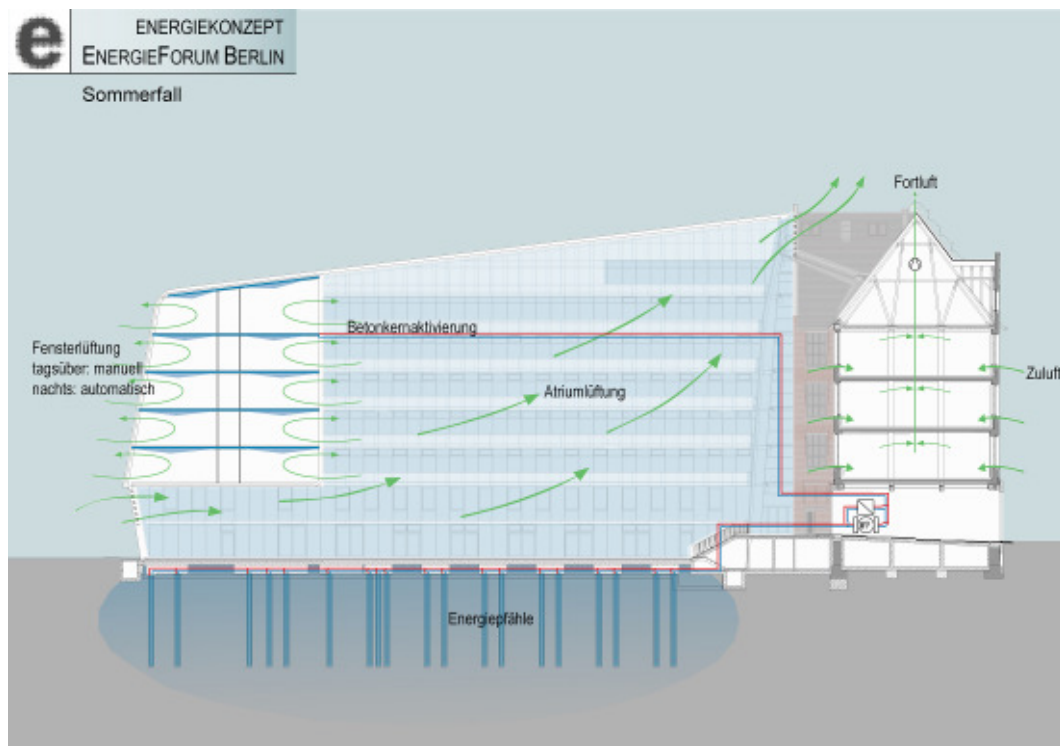


Abbildung 31 Energie- und Belüftungskonzept des Energieforums im Sommerfall

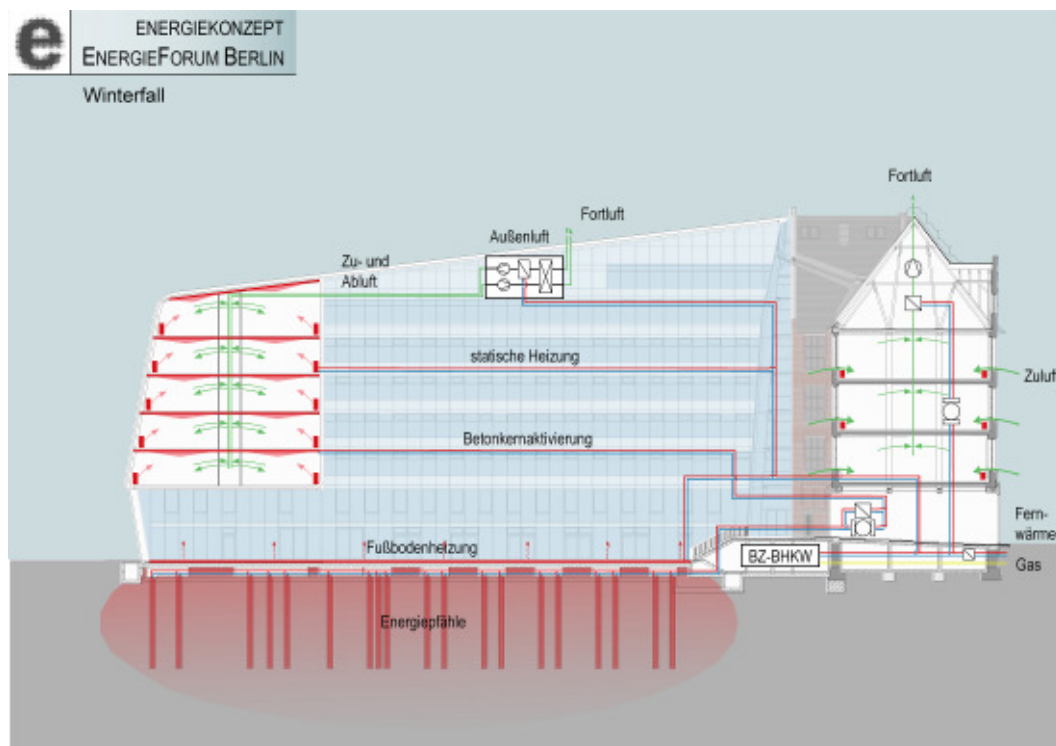


Abbildung 32 Energie- und Belüftungskonzept im Winterfall

Die Zuluftlamellen im Süden befinden sich in einer Höhe von 3,0 - 5,0 m, die Abluftlamellen im Norden sind direkt unterhalb der horizontalen Dachverglasung des Atriums angeordnet. Die mittlere Höhe zwischen Zu- und Abluftöffnung beträgt 22,0 m. Das Atrium verfügt über eine Fußbodenheizung, die bei Atriumtemperaturen geringer als 18°C in Betrieb geht. Bei vereinzelt Veranstaltungen wird, wenn erforderlich, durch zusätzliche, temporäre Luft-Elektroheizungen im Atrium die Temperatur auf bis zu 25°C angehoben. Während der Heizperiode öffnen die Lamellen zur Belüftung des Atriums ab einer Temperatur von 25°C. Außerhalb der Heizperiode werden die Lamellen schon bei 18°C geöffnet, siehe Abbildung 33. Bei Nichteinhaltung der Anforderungen werden Nord- und Südklappen ohne Zwischenstufen vollständig Auf- bzw. Zufahren. Die Hysterese der Temperaturregelung beträgt in diesen Fällen 3K. Ist zur Auskühlung der Büroräume eine Nachtlüftung erforderlich, so erfolgt diese durch natürliche Lüftung, indem sämtliche Bürofenster und die Lamellen des Atriums aufgefahren werden. Die Nachtkühlung erfolgt von 23:00 bis 7:00 Uhr. Die Voraussetzung für die Nachtlüftung ist erfüllt, wenn außerhalb der Heizperiode das 72h-Mittel der Außentemperatur von 12°C überschritten wird. Sofern innerhalb eines Mietbereiches die Türen offen gelassen werden, ist eine Querlüftung von der Außenseite des

Gebäudes durch den Mietbereich in das Atrium möglich. Andernfalls ist für die atriumseitigen Büroräume nur eine einseitige Lüftung zum Atrium hin möglich.

Wenn keine Nachtlüftung erforderlich ist, werden die Büroräume ausschließlich mechanisch be- und entlüftet. Weiterhin verfügen die Büroräume über statische Heizkörper und eine Betonkernaktivierung zum Heizen und Kühlen, siehe Abbildung 34 und Abbildung 35. Das nördlich gelegene Magazingebäude wird im Gegensatz zu den seitlichen Häusern ganzjährig mechanisch be- und entlüftet.

Regelstrategie: Zu- / Abluftlamellen Atrium

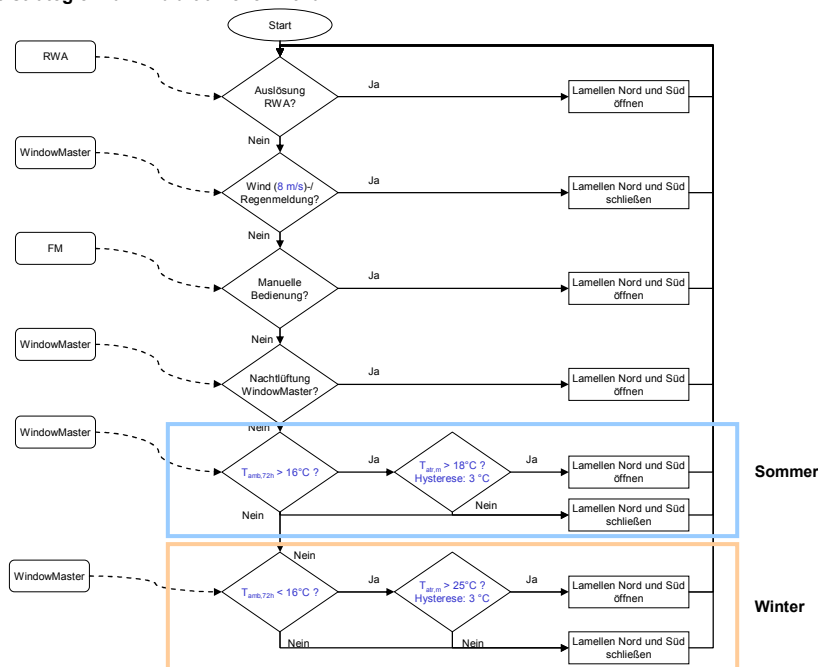


Abbildung 33 Regelstrategie der Zu- und Abluftlamellen des Atriums

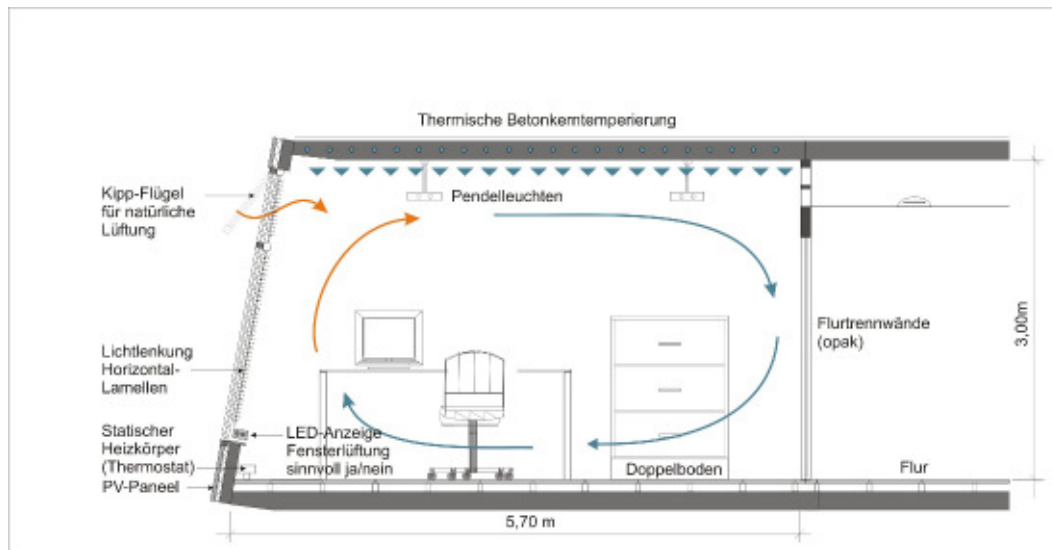


Abbildung 34 Bürokonzept des Energieforum im in der Kühlperiode bei natürlicher Lüftung

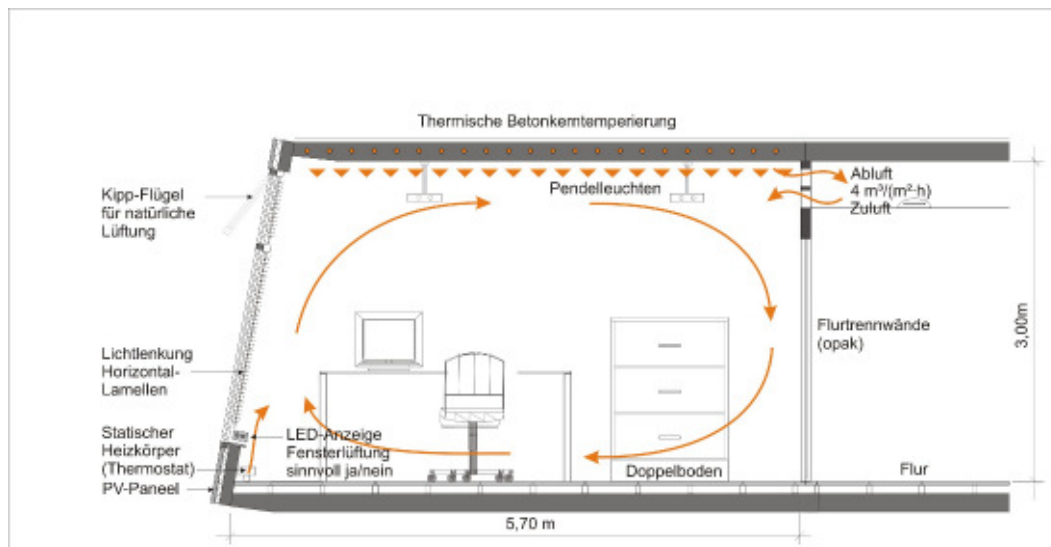


Abbildung 35 Bürokonzept Energieforum während der Heizperiode

4.2.2 Langzeitmonitoring

Im Langzeitmonitoring erfolgt die Aufzeichnung relevanter GLT-Parameter. Die Genauigkeit der Temperatursensoren im Atrium wurde mit eigenen Messungen abgeglichen. Zur Ergänzung der vorhandenen Temperaturmessstellen erfolgt die Messung der Lufttemperatur in 2,5 m Höhe auf der Ost- und Westseite des Atriums. Temporär erfolgt die Installation einer zusätzlichen Temperaturmesskette vor der Fassade des Magazingebäudes. Zu den aufgezeichneten GLT-Parametern gehören die Klappenstellung, Lufttemperaturen im Atrium,

relevante Einflussgrößen für die Regelstrategie und Außenklimabedingungen (Wetterstation Dach).

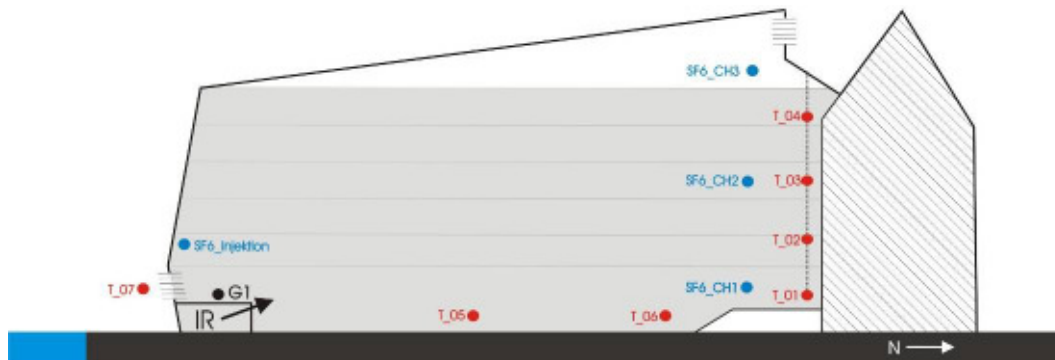


Abbildung 36 Lage der Messpunkte im Schnitt, EFB, Lang- und Kurzzeitmonitoring

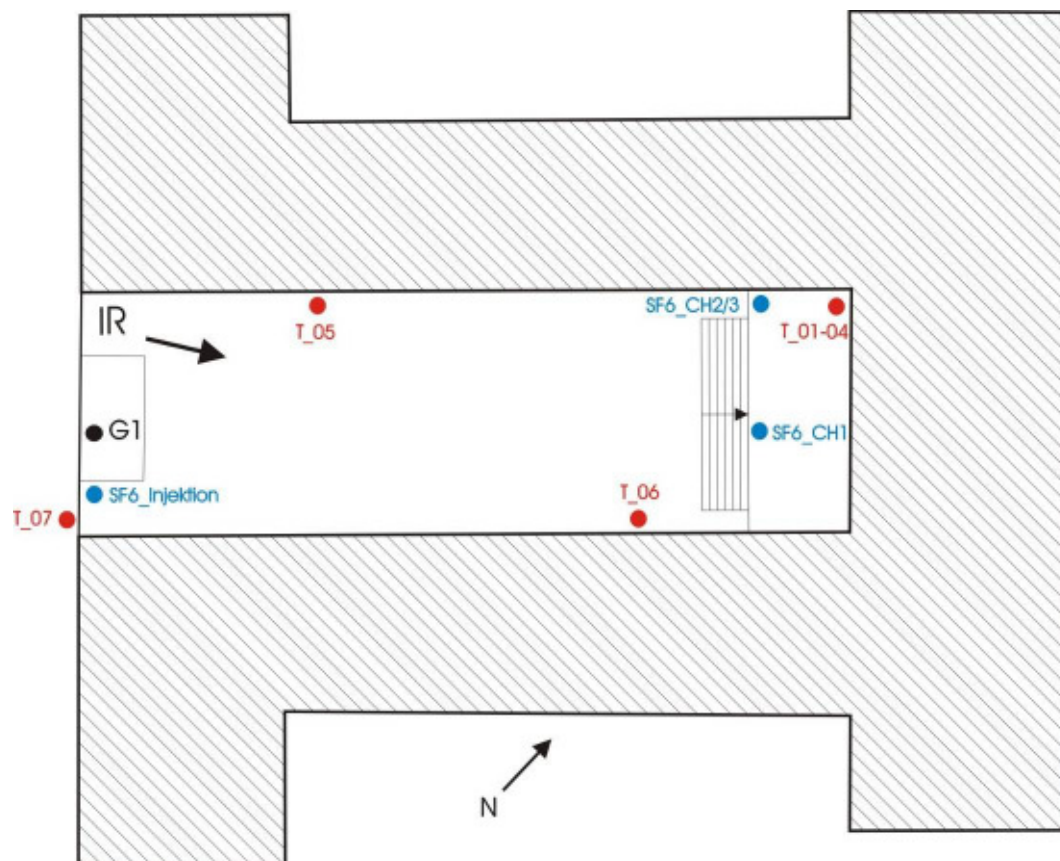


Abbildung 37 Lage der Messpunkte im Grundriss, EFB Lang- und Kurzzeitmonitoring

Tabelle 5 Messpunktliste EFB, Langzeitmessung

Messpunkt	Bezeichnung
T_01	Lufttemperatur 1.OG Magazingebäude
T_02	Lufttemperatur 2.OG Magazingebäude
T_03	Lufttemperatur 3.OG Magazingebäude
T_04	Lufttemperatur 4.OG Magazingebäude
T_05	Lufttemperatur Atrium EG Ost
T_06	Lufttemperatur Atrium EG West
T_07	Außenlufttemperatur Nord
T_08	Lufttemperatur maschinelle Abluft
HU_02	Rel. Luftfeuchte Atrium EG West
HU_03	Relative Luftfeuchte außen
G1	Globalstrahlung horizontal Atrium EG
IR	Wärmebildkamera
Z_WG	Zuluftwindgeschwindigkeit
Z_T	Zulufttemperatur
SF6_Injektion	Injektion Tracergas
SF6_CH1	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 02m
SF6_CH2	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 09m
SF6_CH3	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 18m

Tabelle 6 Messpunktliste EFB (GLT + Wetterstation), Langzeitmessung

Messpunkt	Bezeichnung
W_01_T	Wetterstation Außenufttemperatur
W_02_Gv	Wetterstation Globalstrahlung vertikal
W_03_AP	Wetterstation Luftdruck
W_04_HU	Wetterstation rel. Luftfeuchte
W_05_WG	Wetterstation Windgeschwindigkeit
W_06_WR	Wetterstation Windrichtung
W_07_R	Wetterstation Regen
GLT_01_M_AHU	Magazin Lüftungszentrale Abluftfeuchte
GLT_02_M_AT	Magazin Lüftungszentrale Ablufttemp.
GLT_03_M_FHU	Magazin Lüftungszentrale rel. Luftfeuchte Fortluft
GLT_04_M_FT	Magazin Lüftungszentrale Fortlufttemp.
GLT_05_M_V	Magazin Volumenstrom Abluft (Ostteil)

GLT_06_M_V	Magazin Volumenstrom Abluft (Westteil)
GLT_07_B_T	Brücke 2.OG Atriumlufttemperatur
GLT_08_B_T	Brücke 3.OG Atriumlufttemperatur
GLT_09_B_T	Brücke 4.OG Atriumlufttemperatur
GLT_10_B_T	Brücke 5.OG Atriumlufttemperatur
GLT_11_H_T	FB-Heizung Atrium/Büro Raumlufttemp.
GLT_12_H_P	FB-Heizung Atrium/Büro Umwälzpumpe
GLT_13_H_VT	FB-Heizung Atrium/Büro Vorlauftemp.
GLT_14_A_V	Abluft Atrium Volumenstrom BTA
GLT_15_A_V	Abluft Atrium Volumenstrom BTB
GLT_16_AK	Atrium Abluft Klappenstellung
GLT_17_ZK	Atrium Zuluft Klappenstellung
GLT_18_H	Wärmemengenzähler FB-Heizung Atrium/Büros
GLT_19_T72	72 h Außentemperatur
GLT_20_T72	72 h Außentemperatur mittel
GLT_21_OPC	Außentemperatur OPC



Temperatursensor Atrium
(Westseite)



Temperatursensor Atrium
(Ostseite)



Temperaturmesskette

Abbildung 38

Messtechnik EFB, Langzeitmonitoring

4.2.3 Kurzzeitversuche

Im Energieforum Berlin erfolgte am 8.11.2008 eine Luftwechselmessung. Das bestehende Langzeitmonitoring wird dafür um eine Aufzeichnung der Oberflächentemperaturen mit einer Wärmebildkamera ergänzt.

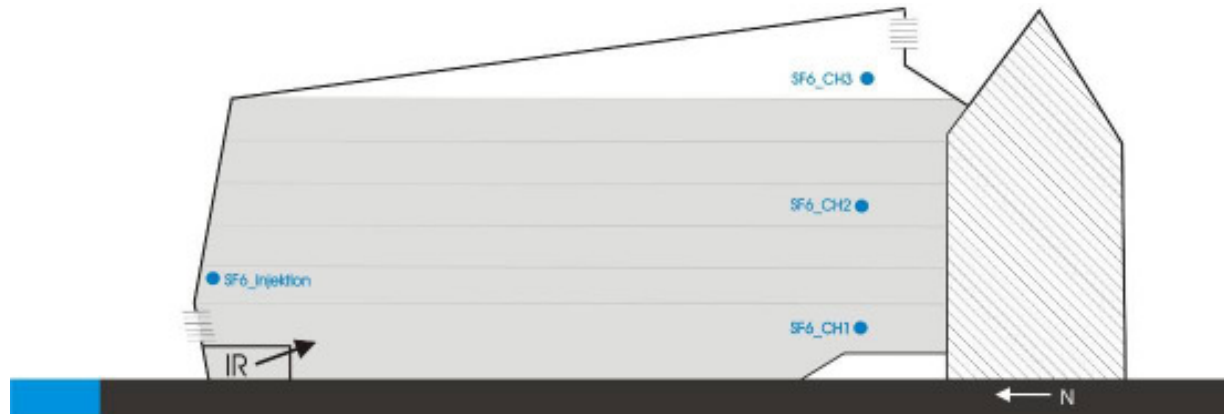


Abbildung 39 Lage der Messpunkte für die Tracergaskonzentration

Tabelle 7 Messpunktliste EFB, Kurzzeitmonitoring

Bezeichnung	Bezeichnung
IR	Wärmebildkamera
Z_WG	Zuluftwindgeschwindigkeit
Z_T	Zulufttemperatur
SF6_Injektion	Zufuhr des Tracergases
SF6_CH1	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 02m
SF6_CH2	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 09m
SF6_CH3	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 18m



Volumenstrom-Messung



IR-Kamera (2)



Behaglichkeitsmessung

Abbildung 40 Messtechnik EFB, Kurzzeitmonitoring

4.2.4 Behaglichkeit

Im November erfolgten Behaglichkeitsmessungen mit dem Mobile Lab des IGS. Die Außentemperatur betrug ca. 11°C. Insgesamt ist das Temperaturniveau für einen Aufenthaltsbereich an allen drei Messstellen zu niedrig (PMV -1,77 bis -1,90). An der Messstelle vor der Außenfassade wird zusätzlich eine erhöhte Zugluft gemessen. Die CO₂-Konzentration beträgt rund 700 ppm.

Das niedrige Temperaturniveau entspricht der Nutzung des Atriums als Verkehrsfläche und ist nicht negativ zu bewerten. Deutlich messbar ist der Kaltluftabfall an der Außenfassade.

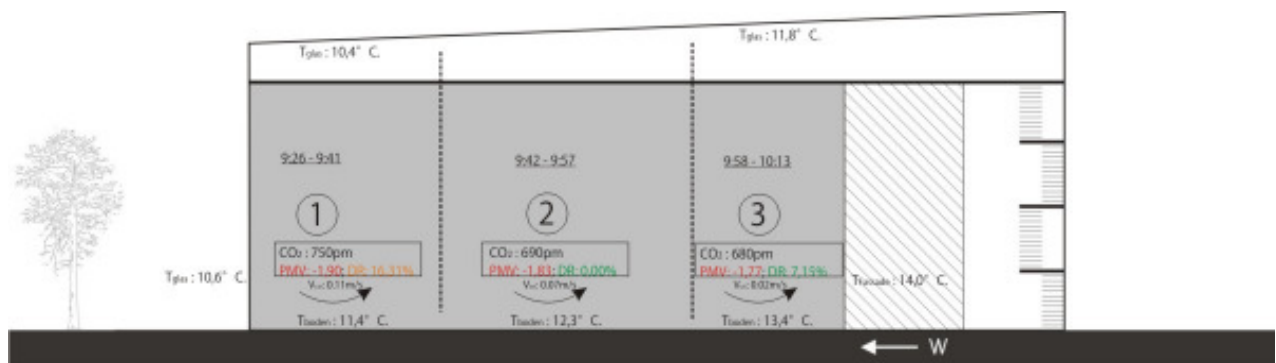


Abbildung 41 Ergebnis der Behaglichkeitsuntersuchung im EFB (Außentemperatur 11 °C)

4.2.5 Auswertung

Die Differenz der fassadennahen Außenlufttemperaturen vor der Südfassade im Bereich der Zuluftöffnungen und den Werten des Temperatursensors der GLT auf dem Dach des Gebäudes zeigt eine Abhängigkeit von der Intensität Solarstrahlung. In Zeiträumen erhöhter Solarstrahlung misst der Sensor an der Südfassade deutlich höhere Werte als der Dachsensor. Nachts zeigen beide Sensoren die gleichen Werte an, siehe Abbildung 43 und Abbildung 42. Die maximale Temperaturdifferenz beträgt bis zu 6 K.

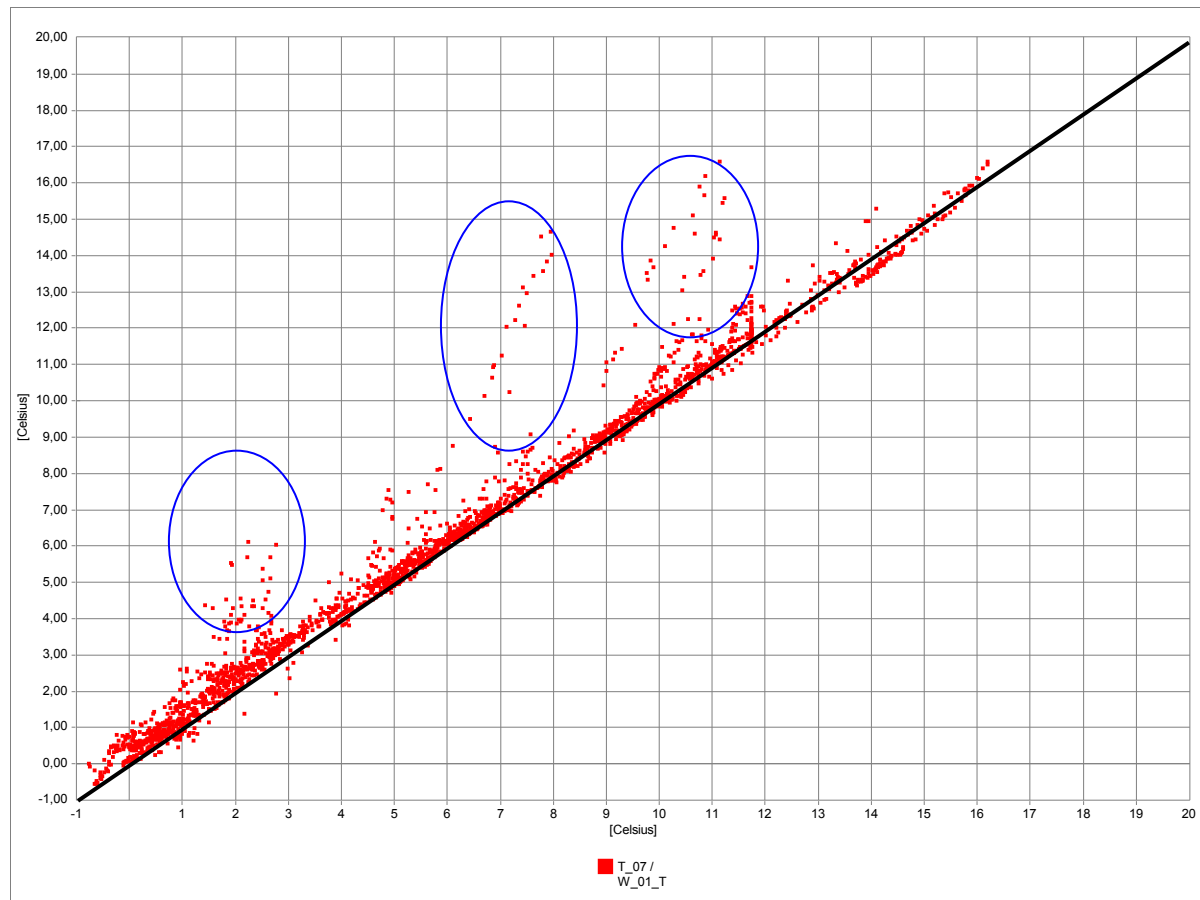


Abbildung 42 Außenlufttemperatur GLT Wert (Dach W_01) über der fassadennahen Lufttemperatur im Bereich der Zuluftklappe (T_07). Ausreißer nach oben sind bedingt durch die Bestrahlung des Temperatursensors.

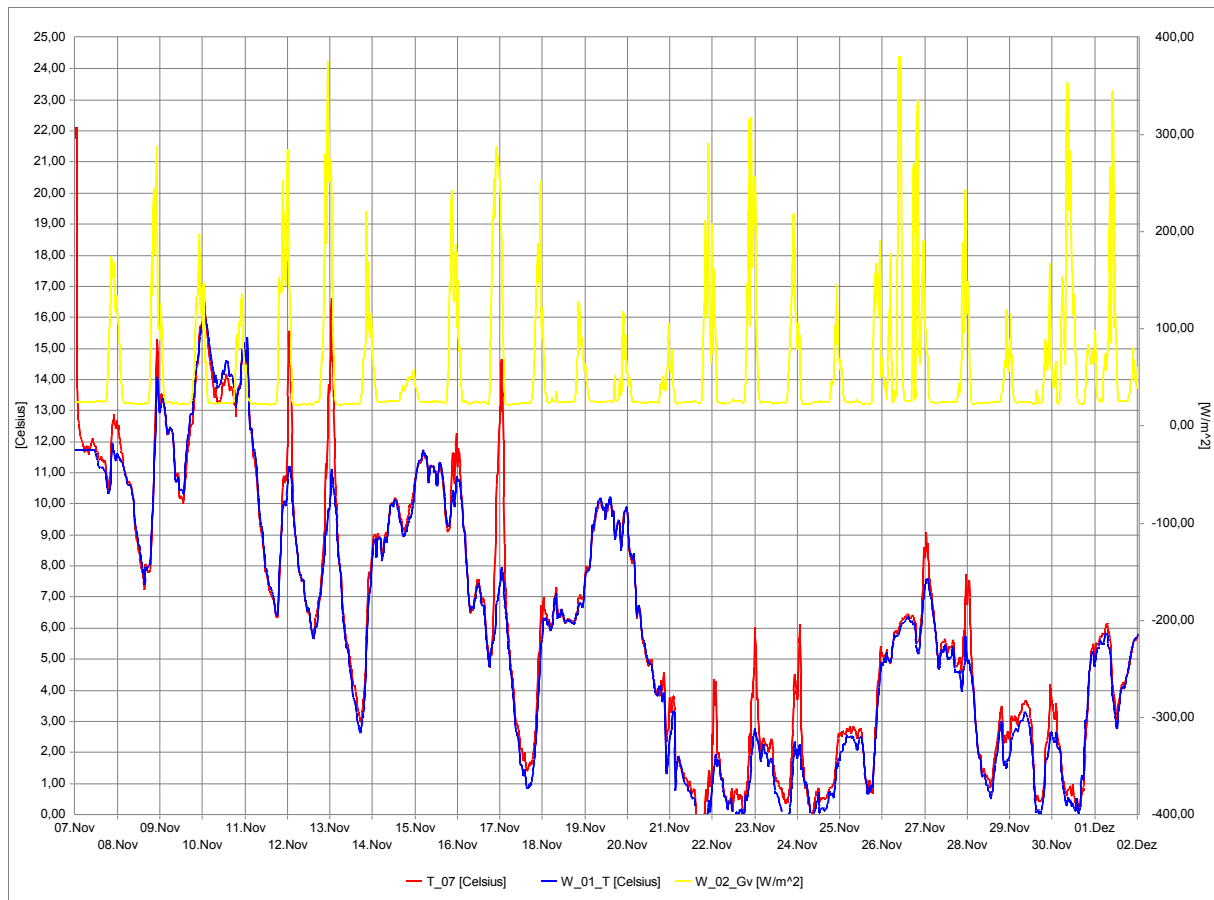


Abbildung 43 Globalstrahlung (W_02_Gv), Außenlufttemperatur GLT Wert (Dach, W_01_T) und der fassadennahen Lufttemperatur im Bereich der Zuluftklappe (T_07)

4.2.6 CFD-Simulation

Für die Nachstellung der Versuchsbedingungen in einer CFD-Simulation wird der Luftraum des Atriums und der Umgebung des Gebäudes dargestellt. Der gesamte Luftraum ist umschlossen von einem Achteck, dessen gegenüberliegenden Flächen jeweils die Zu- und Abluftflächen zur Generierung der Windanströmung bilden. Während der Versuchsdurchführung herrschte ein Südwind mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 2 m/s, gemessen auf dem Dach des Gebäudes. Für die Simulation wirkt ein homogenes Geschwindigkeitsfeld (kein höhenabhängiges Profil) auf das Gebäude ein. Die Temperatur der umgebenden Luft beträgt 13°C und die Lufttemperatur im Atrium 17°C. Die Lufttemperatur wird eingestellt, indem die Temperatur der angrenzenden Wandflächen des Atriums sukzessive angepasst werden. Die Einflussgrößen für den Luftwechsel reduzieren sich somit auf den Temperaturunterschied zwischen innen und außen und die Windanströ-

mung. Thermische Aspekte spielen bei dieser Untersuchung keine Rolle. Das Simulationsmodell ist in der Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt.

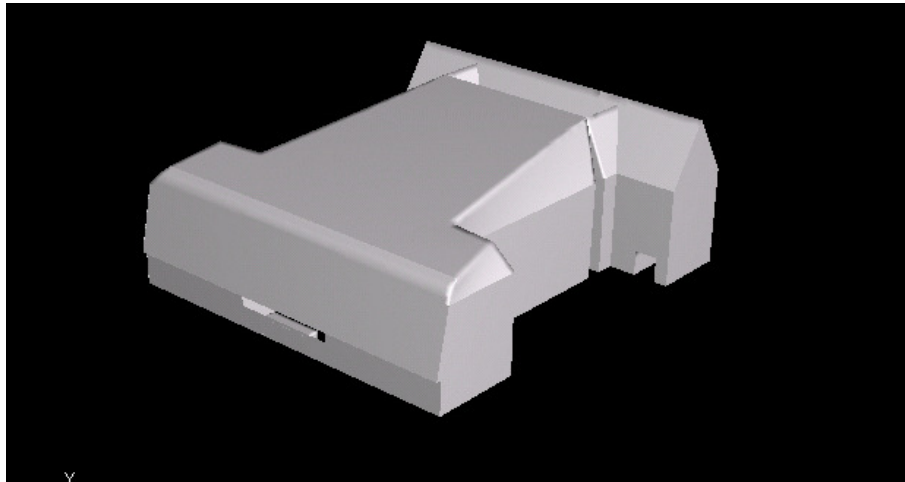


Abbildung 44 Simulationsmodell EFB Südansicht

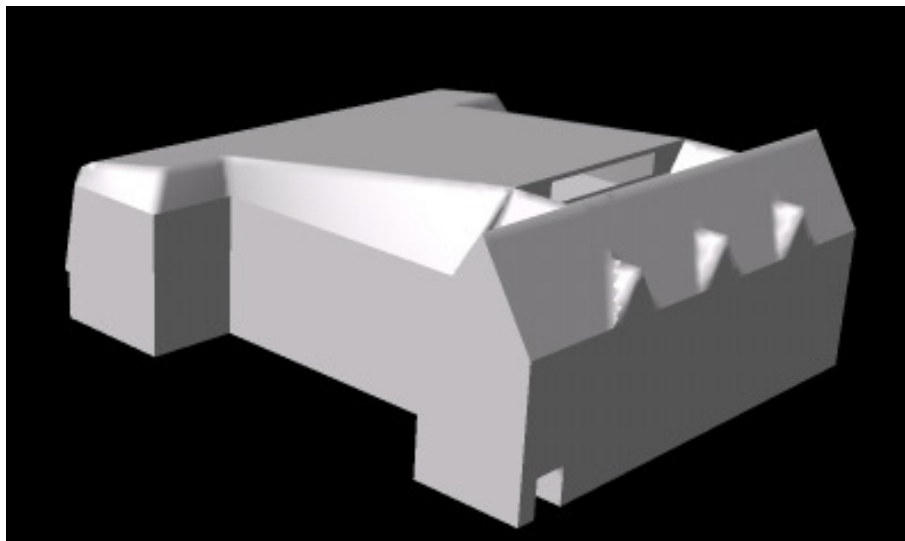


Abbildung 45 Simulationsmodell EFB Nordansicht

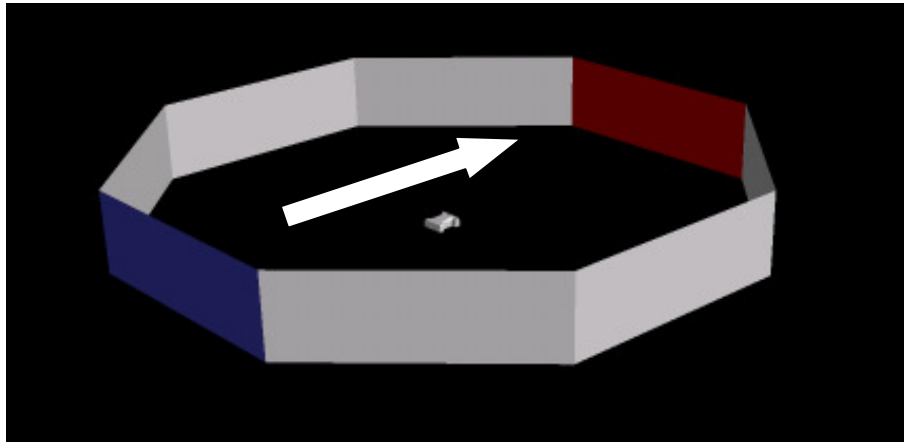


Abbildung 46 Simulationsmodell mit umgebenden Luftraum mit Zu- und Abströmfläche (blau, rot) für die Windgenerierung

Die Konfiguration der Berechnungsmodelle im Simulationsprogramm beschränkt sich bewusst auf die notwendigsten Einstellungen zur Darstellung der gewünschten Effekte, wie Auftrieb, Turbulenzverhalten und Temperatúraustausch. Durch diese Herangehensweise soll geprüft werden, ob mit den „Grundeinstellungen“ bereits annehmbare Ergebnisse erzielt werden können. Als Turbulenzmodell wird das Standard-k- ϵ Modell verwendet. Die Darstellung der resultierenden Geschwindigkeitsfelder und Temperaturverteilungen erfolgt in der Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49.

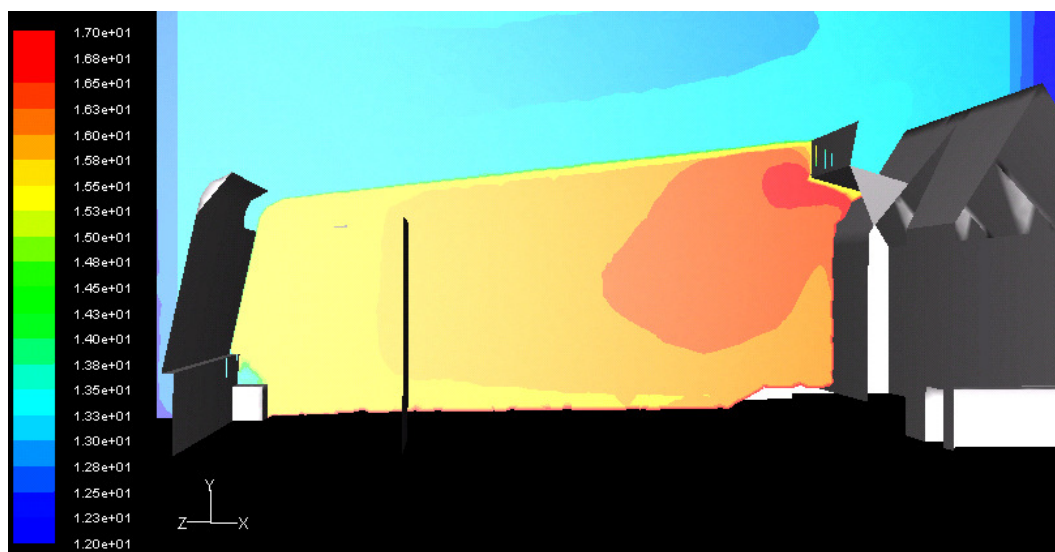


Abbildung 47 Temperaturverteilung im Atrium des EFB in [°C]

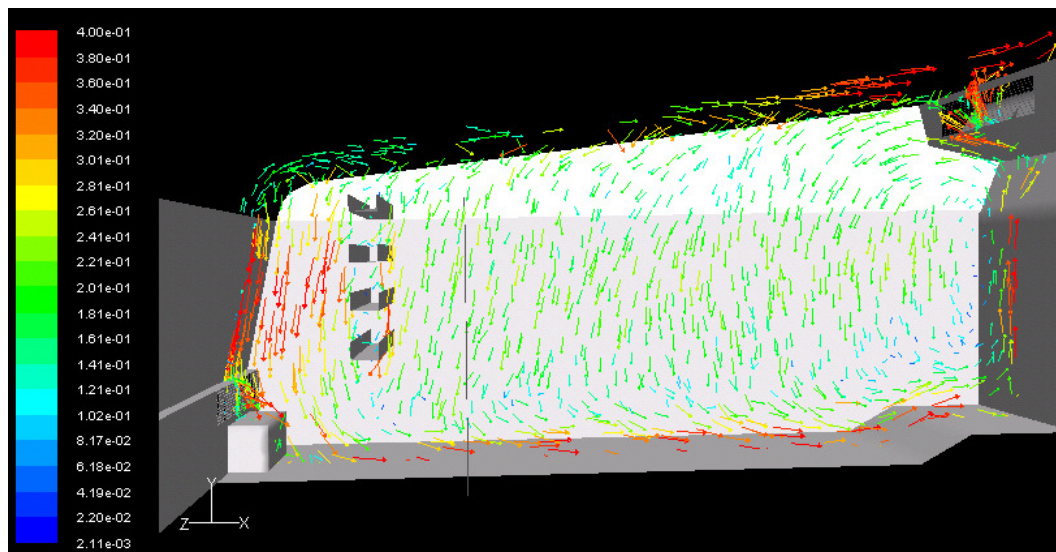


Abbildung 48 Strömungsgeschwindigkeiten im Atrium des EFB [m/s]

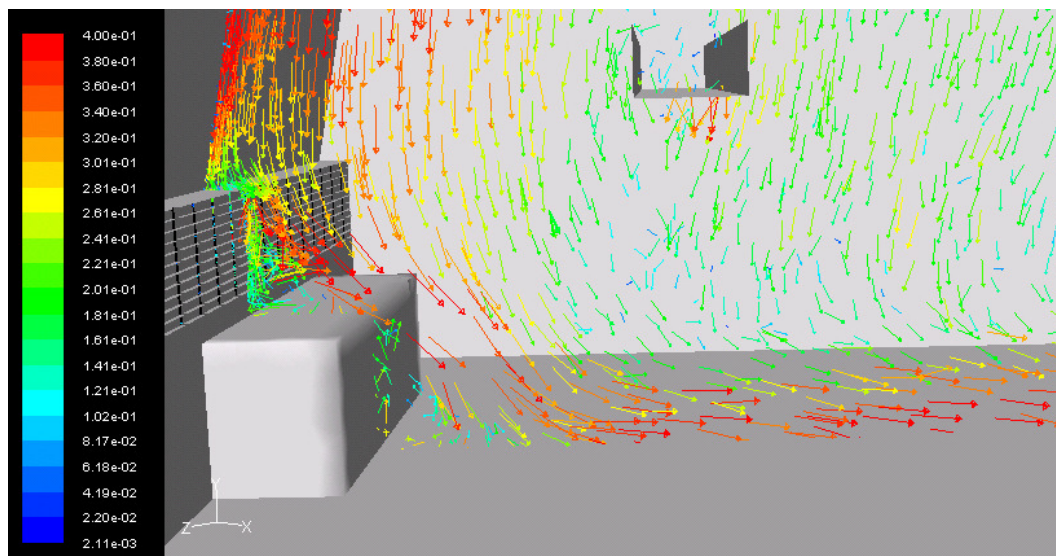


Abbildung 49 Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Zuluftklappe [m/s]

Der durch die Simulation ermittelte Zuluftvolumenstrom beträgt $231.336 \text{ m}^3/\text{h}$. Der gemessene Zuluftvolumenstrom beträgt $202.655 \text{ m}^3/\text{h}$. Demnach wird durch die CFD Simulation ein 14% höherer Luftwechsel berechnet. In Anbetracht der Tatsache, dass die Berechnungsmodelle in ihrer Grundeinstellung verwendet wurden, ist die Genauigkeit als hoch zu bezeichnen. In der Kurzzeitmessung konnten keine Nebelversuche durchgeführt werden, die auf die Luftbewegung im Atrium schließen ließen. Insofern war auch zunächst nicht zu erklären, warum sich an den lokalen Messstellen ein geringeres Luftalter (ein größerer lokaler Luftaustausch) einstellt, als im Durchschnitt des Luftraums im Atrium. In

Abbildung 48 ist zu erkennen, wie die kalte Luft nach dem Einströmen zunächst über den Boden streicht und anschließend an der nördlichen Wand des Magazingebäudes hochzieht. Ein Teil der Luft verlässt das Gebäude durch die Abluftöffnung, der andere Teil strömt unter der Dachfläche wieder in Richtung Süden. Dadurch bildet sich im gesamten Atrium eine große Luftwalze aus. Die Messstellen für die Tracergaskonzentration befinden sich allesamt im nördlichen Bereich in der Nähe der Fassade des Magazingebäudes, wo die frisch eingeströmte Luft hochzieht.

4.2.7 Steuerung der Lüftungsklappen und ihre Führungsgrößen

Nach den Vorgaben der Gebäuderegulierung stellt die GLT auf Heizbetrieb um, wenn das 72h-Mittel der Außentemperatur unter 16°C fällt. In diesem Fall wird eine Atriumtemperatur von $22\text{--}25^{\circ}\text{C}$ statt $15\text{--}18^{\circ}\text{C}$ angestrebt. Umgesetzt werden die Zieltemperaturen im Atrium durch die Klappensteuerung, die Fußbodenheizung setzt erst bei Atriumtemperaturen unterhalb 12°C ein. Die höhere Atriumtemperatur im Heizbetrieb reduziert die Wärmeverluste der Büroräume, eine kühlere Atriumtemperatur im Sommerbetrieb unterstützt die Auskühlung der Büroräume. Insofern ist die betriebsformabhängige Regelung (Heizfall/Kühlfall) der Atriumtemperatur hinsichtlich des Energieverbrauches positiv zu bewerten.

Jedoch tritt im Beobachtungszeitraum der Fall ein, dass trotz Kühlbedarfs in den oberen Geschossen, weiterhin eine Atriumtemperatur von $22\text{--}25^{\circ}\text{C}$ statt $15\text{--}18^{\circ}\text{C}$ angestrebt wird. Da es sich bei der maßgeblichen Atriumtemperatur um einen Mittelwert aus den 4 Temperatursensoren vom 2.OG bis zum 5.OG handelt, liegt bei einer mittleren Temperatur von 24°C die Lufttemperatur im Bereich des obersten 5.OG bereits bei 27°C . Bei einer angestrebten Temperatur in den Büroräumen von unter 26°C erfolgt hier bereits ein unerwünschter Wärmeintrag, insbesondere bei Fensterlüftung zum Atrium.

Durch eine Mittelwertbildung der Außentemperatur über einen Zeitraum von 3 Tagen sollen häufige Wechsel zwischen Heiz- und Kühlperiode vermieden werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass durch die GLT statt einem 72h-Mittel ein 18h-Mittel gebildet wird und dieses auch die Grundlage für den Wechsel zur Heizperiode ist. Der Ausgabewert der GLT (18h-Mittel) wird in den Abbildung 50 und Abbildung 51 dem gemäß den Planungen selbst berechneten Wert gegenübergestellt. Dadurch wird im Jahresverlauf während der Sommerzeit, siebenmal statt viermal in die Heizperiode umgeschaltet, siehe Abbildung 50.

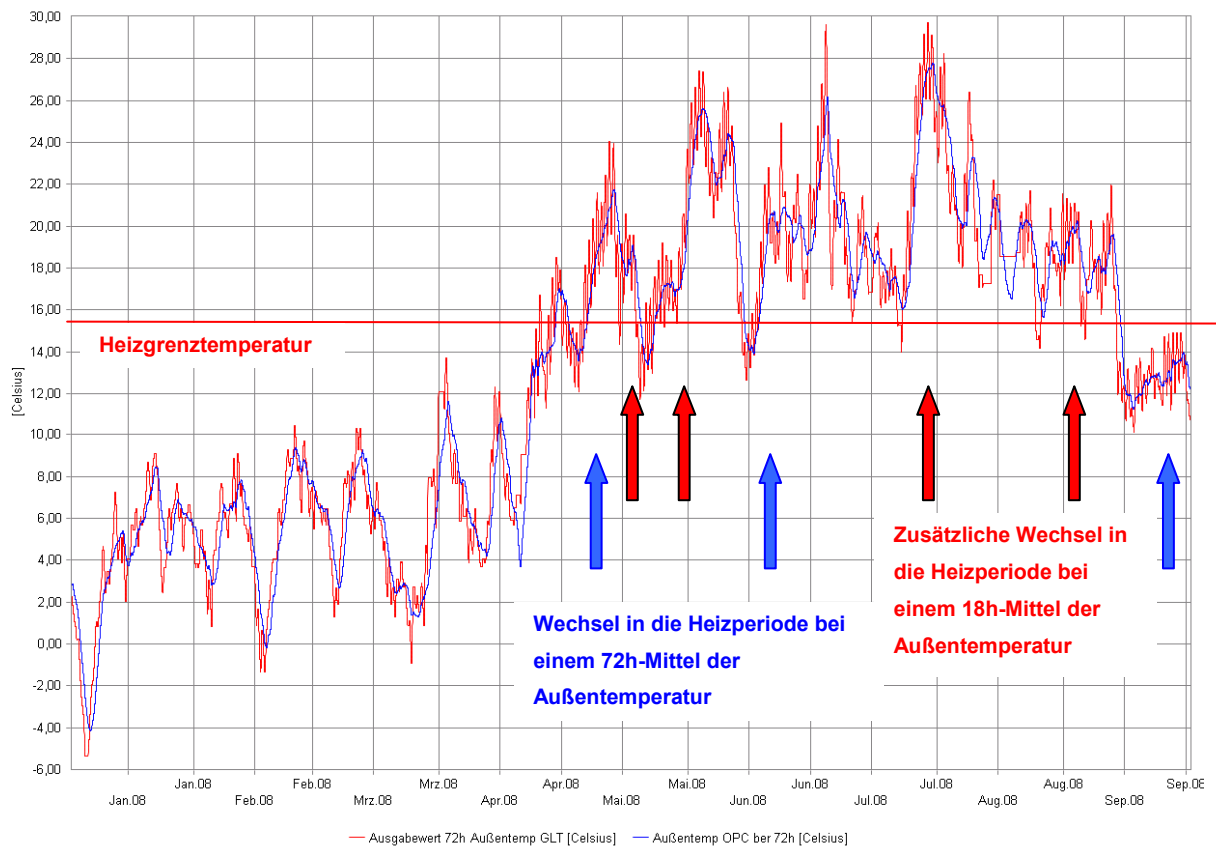


Abbildung 50 Gleitendes Mittel der Außentemperatur: Ausgabewert der GLT (18h-Mittel) und selber berechnetes 72h-Mittel

Da im 18h- Mittel die Amplituden deutlicher ausfallen, treten zusätzlich Situationen ein, in denen binnen weniger Stunden zwischen Heizperiode und Kühlperiode umgeschaltet wird, siehe Abbildung 51. In der Folge kommt es zu einer Schließung der Klappen über mehrere Stunden am Vormittag mit einem steilen Anstieg der Atriumtemperaturen, siehe Abbildung 52 und Abbildung 53.

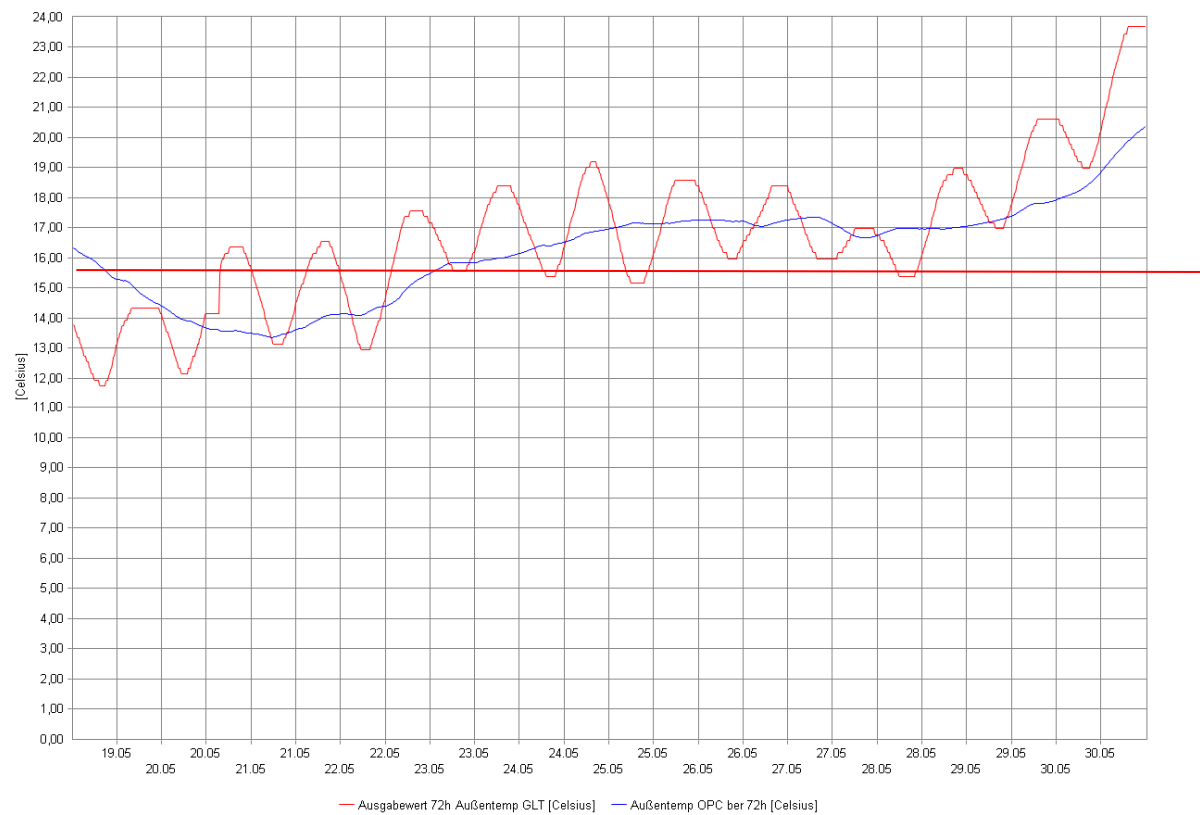


Abbildung 51 Durch einen zu kurzen Mittelungszeitraum der Außentemperatur wird die Heizgrenztemperatur täglich überschritten (rote Kurve). Bei korrektem Mittelungszeitraum würde die Heizgrenztemperatur nur einmal überschritten werden (blaue Kurve).

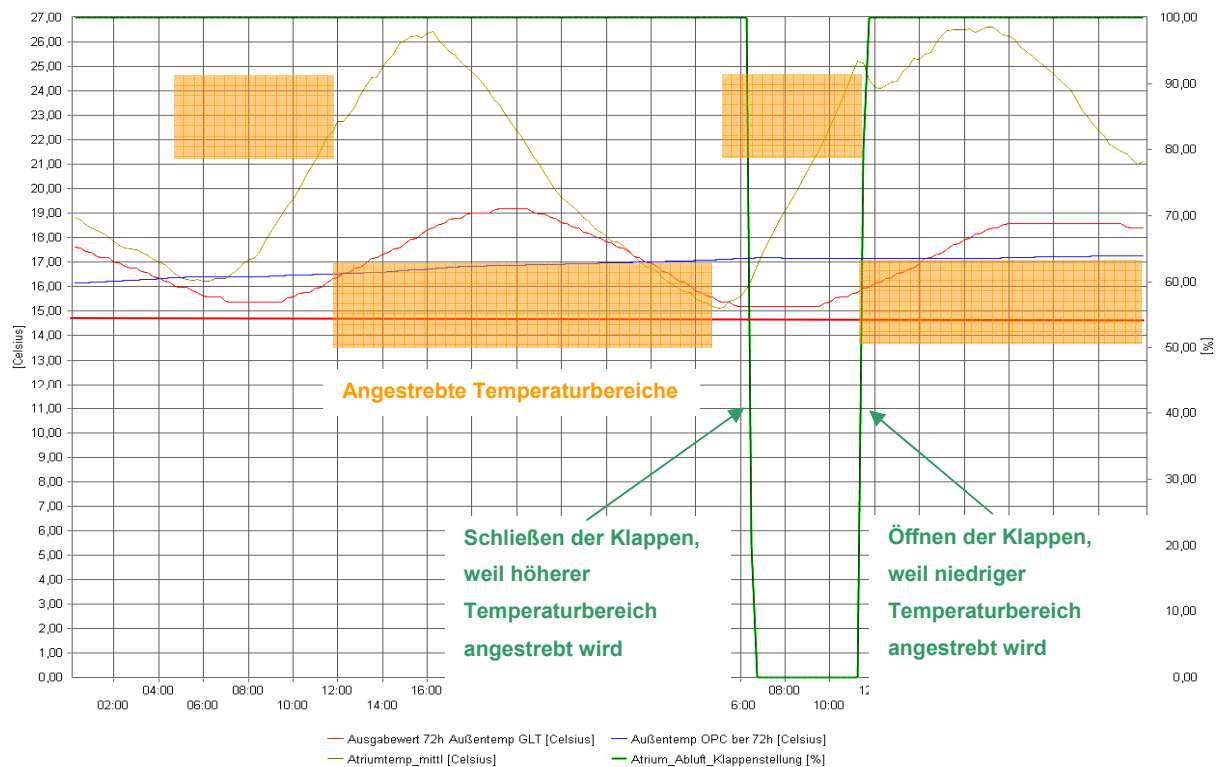


Abbildung 52 Aufgrund des unplanmäßigen Wechsels zwischen Heiz- und Kühlperiode werden die Lüftungs-klappen am 25.05.2008 für 6h geschlossen. Die Temperatur im Atrium steigt steil an und fällt nach Öffnung der Klappen innerhalb kurzer Zeit um ca. 1K

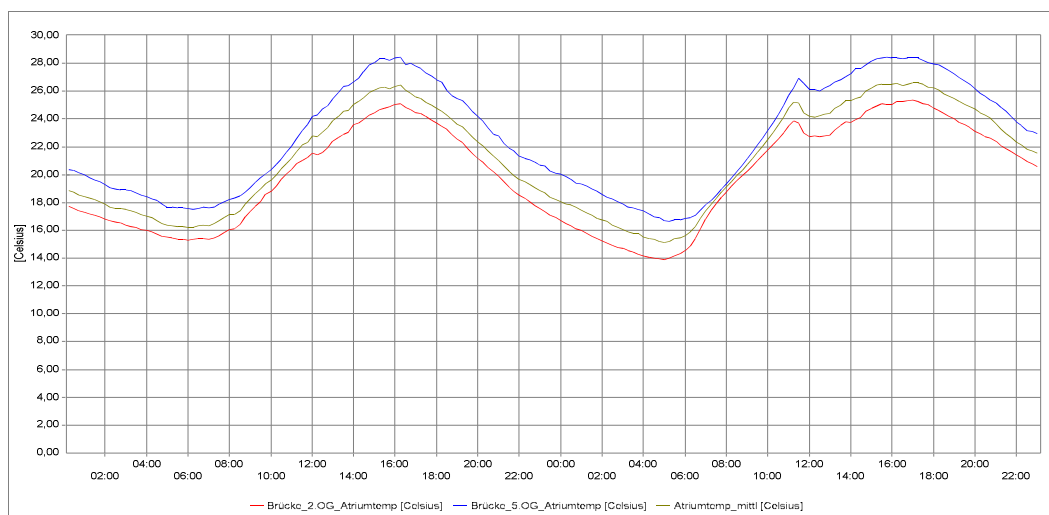


Abbildung 53 Die Atriumtemperaturen auf Höhe des 5.OG steigen während der unplanmäßigen Schließung der Klappen auf ca. 28°C. Diese Temperatur wird bei geöffneten Klappen ca. 3h später wieder erreicht.

Eine rein qualitative Überprüfung der Klappensteuerung erfolgt durch das Carpet-Diagramm. Die über die Höhe gemittelte Atriumtemperatur wird für jede Stunde eines Tages für alle Tage im Erfassungszeitraum dargestellt, siehe Abbildung 54. Die Temperaturen werden über die Farbe von blau (kalt) nach rot (warm) und die Klappenöffnung durch die schraffierten Bereiche dargestellt. Aus dem Carpet-Diagramm wird ersichtlich, dass die höchsten Temperaturen in den Nachmittagsstunden auftreten. Das Temperaturmaximum wird zwischen 17:00 und 18:00 erreicht. Ab dann erfolgt eine langsame Abkühlung bis ca. 8:00. Im Idealfall sollten alle Zeiträume mit hohen Temperaturen durch die schraffierte Fläche, die die Öffnungen der Lüftungsklappen anzeigt, überdeckt sein. Ausnahmen dürfen bei zu hohem Windaufkommen oder Regen gegeben sein, wenn zum Schutz der Klappenmechanik oder zur Verhinderung des Eindringens von Regen, die Klappen trotz Übertemperaturen geschlossen werden.

Für die warmen Sommermonate bis ca. Mitte August ist eine fast durchgängige Klappenöffnung zu beobachten. Somit kann festgestellt werden, dass die Klappensteuerung grundsätzlich richtig zur Entwärmung des Gebäudes und zum Erhalt solarer Wärmegewinne während der Heizperiode funktioniert.

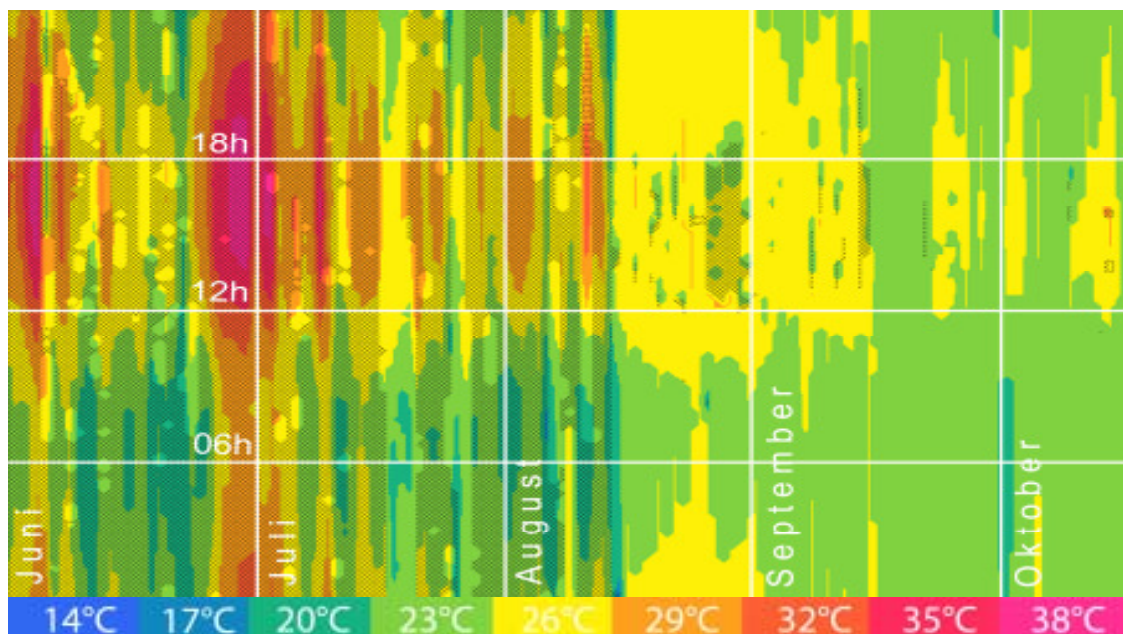


Abbildung 54

Carpet-Diagramm der mittleren Atriumtemperatur und der Öffnung der Klappen

4.2.8 Optimierungspotentiale

Bezüglich der Steuerung des Atriums konnten keine erheblichen Optimierungspotentiale lokalisiert werden. Zeitweise Überhitzungen in den oberen Schichten des Atriums könnten

nur mit größeren Lüftungsquerschnitten begegnet werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine Ausweitung der Öffnungszeiten der Lüftungsklappen insbesondere in Zeiten hoher Atriumtemperaturen nicht möglich ist, da die Klappen bereits durchgängig geöffnet sind. Zur Vermeidung von Überhitzungen der angrenzenden Büroräume sollten Maßnahmen innerhalb der Büroräume ergriffen werden. Zur Vergrößerung der effektiven Öffnungsfläche der Lamellen sollte die Stellung der Lamellen überprüft werden. Es hat sich gezeigt, dass die Lamellen über die 90°-Stellung ca. 10-20° hinausfahren. Hierdurch ergibt sich eine Reduzierung der effektiven Öffnungsfläche.

4.3 Neubau Informatikzentrum

Der Neubau Informatikzentrum wurde im Jahr 2000 auf dem Campus der Technischen Universität Braunschweig als Anbau an ein bestehendes 12-stöckiges Hochhaus errichtet. Das Gebäude, dessen Büros, Seminarräume und ein Labor für Robotik um ein zentrales Atrium angeordnet sind, wurde als Demonstrationsprojekt im Rahmen des Forschungsprogramms EnOB Energieoptimiertes Bauen (früher „solarbau“) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie errichtet und im Betrieb wissenschaftlich begleitet und optimiert.

4.3.1 Beschreibung des Gebäudes

Kernbaustein des Lüftungskonzeptes ist das Atrium mit vorgeschaltetem Erdkanal. In diesem Zuluftkanal befindet sich neben dem Kondensator einer Kältemaschine noch ein Nachheizregister mit 69 kW Heizleistung, das über die Fernwärme versorgt wird. Das Atrium wird im Winter tagsüber über eine Luftheizung mit Bodenauslässen im KG sowie Planradiatoren im 1.OG auf 18-20°C beheizt. Im unteren Teil hat das Atrium eine Breite von 7m und eine Länge von etwa 14m. Ab dem 1. Obergeschoss weitet es sich auf etwa 14 m Breite auf.



Abbildung 55 links: Bodenauslässe im KG; rechts: Planradiatoren im 1.OG

Zielsetzung der Planung war ein möglichst geringer Stromverbrauch der Lüftung. Zur Unterstützung der Konvektion bei nicht ausreichenden Druckverhältnissen wurde ein 7,5 kW-Ventilator installiert, der stufenlos bis zu einem Volumenstrom von 12.000 m³/h im Entrauchungsfall hochgeregelt werden kann.



Abbildung 56 links: Austrittsöffnung mech. Lüfter; rechts: Volumenstrom

Ein vorgeschalter Filter (EU5) garantiert die Qualität der zugeführten Luft. Eine kombinierte gegenläufige Jalousieklappe erlaubt die Umschaltung zwischen Sommer- und Winterfall und lenkt die Luft wahlweise über die Zuluftgeräte oder erlaubt den natürlichen Auftrieb. Eine Möglichkeit mit beiden Klappen den Kanal komplett zu verschließen, ist gegeben.

**Abbildung 57**

links: Ansicht Zuluftkanal; rechts: Jalousieklappe zur freien Lüftung des Atriums

Im Winterfall steigt die mit geringer Geschwindigkeit und Übertemperatur eingebrachte Warmluft im Atrium auf. Während die innenliegenden Büros ausschließlich über das Atrium belüftet werden, verfügen die außenliegenden Räume über eine zusätzliche Lüftungsmöglichkeit über die Außenfenster. Diese sollten allerdings in der Regel während der Heizperiode

geschlossen bleiben (außer für eine kurze Stoßlüftung). Ein ausreichender Luftwechsel wird über die Zuluftelemente bzw. die Türen zum Atrium erreicht.



Abbildung 58 Türoberlicht zum Atrium und Raumbedienpaneel

Um Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung zu kompensieren, kann über die in den außenliegenden Büros installierten Plattenheizkörper individuell einstellbar von 19-21°C nachgeheizt werden. Büros zum Atrium besitzen keine eigenen Heizflächen. Im Sommerfall wird das Atrium durch freie Lüftung über den Zuluftkanal, die Thermik des Atriums (Auftriebshöhe 26m) und den Windsog geöffneter Dachklappen be- und entlüftet. Die Dachklappen werden in Abhängigkeit von der Windrichtung leeseitig geöffnet.



Abbildung 59 Abluftklappen im Atriumdach

Die Grundlüftung kann jetzt über die Außenfenster funktionieren. Wie auch im Winter besteht optional die Möglichkeit, die Büros über das Atrium zu belüften. Die nächtliche Querlüftung des Gebäudes über das Atrium, eingebunden in die Einzelraumregelung und das GLT-Konzept stellt den zur Nachtkühlung erforderlichen Luftwechsel und die Bauteilaktivierung sicher.



Abbildung 60 Fensterlüftungsflügel der innenliegenden Büros zum Atrium

Beim Über- bzw. Unterschreiten der eingestellten Grenzwerte werden, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und einer Regenmeldung, automatisch die nachfolgenden Betriebsarten aktiviert:

- **Betriebsart Freie Lüftung**

In Abhängigkeit der Raumtemperatur bzw. der Luftqualität wird das Atrium durch Öffnen von zwei Jalousieklappen im Erdkanal und entsprechender Klappen im Dachbereich (abhängig von der Windrichtung) belüftet.

- **Stoßlüftung**

In Abhängigkeit der Raumtemperatur bzw. der Luftqualität wird das Atrium durch Öffnen von zwei Jalousieklappen im Erdkanal und aller Klappen im Dachbereich belüftet.

- **Mechanische Lüftung**

In Abhängigkeit von der Raumtemperatur bzw. der Luftqualität wird das Atrium mittels einer Lüftungsanlage im Erdkanal und entsprechender Klappen im Dachbereich (abhängig von der Windrichtung) belüftet. Die Temperaturregelung der mechanischen Lüftung ist hierbei nicht aktiv.

- **Geregelter Lüftungsbetrieb**

In Abhängigkeit der Raumtemperatur bzw. der Luftqualität wird das Atrium mittels einer Lüftungsanlage im Erdkanal und entsprechender Klappen im Dachbereich (abhängig von der Windrichtung) belüftet. Die Temperaturregelung erfolgt als konstante Zulufttemperaturregelung. Der geregelte Lüftungsbetrieb wird mit zwei unterschiedlichen Luftmengen (Motordrehzahlen) betrieben.

- **Stat. Heizung**

Der Heizkreis im Atrium wird bei Unterschreitung einer eingestellten minimalen Raumtemperatur freigegeben.

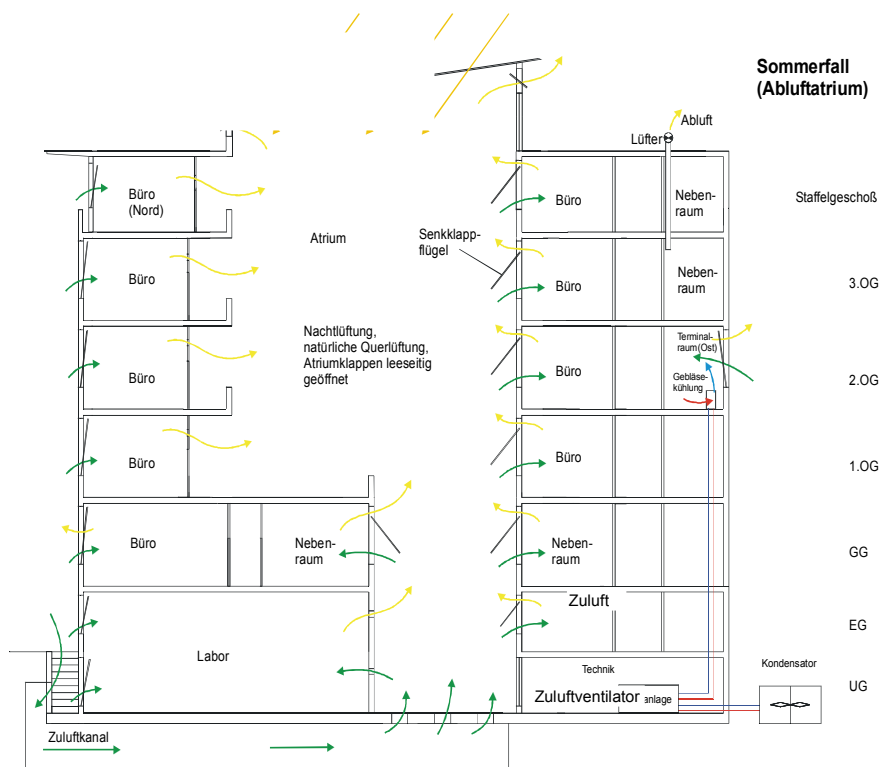


Abbildung 61 Lüftungskonzept während des Sommers

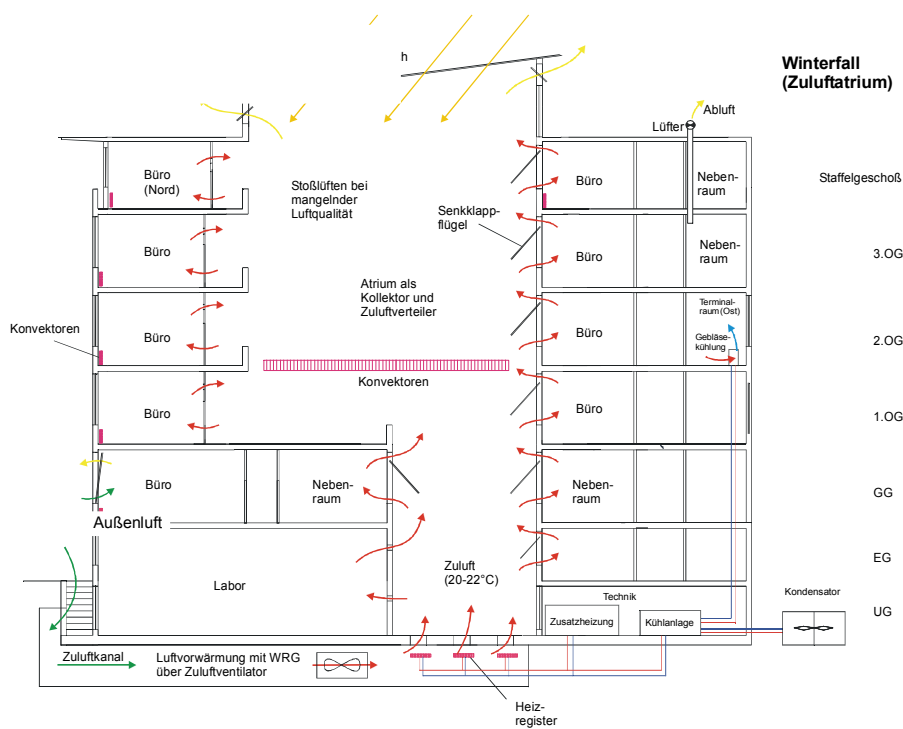


Abbildung 62 Lüftungskonzept während der Heizperiode

4.3.2 Langzeitmonitoring

Es erfolgen Temperaturmessungen über die gesamte Atrienhöhe, die Erfassung der horizontalen Globalstrahlung, sowie der Kohlendioxydkonzentration. Strahlungsgeschützte Temperatursensoren erfassen die fassadennahen Lufttemperaturen außerhalb des Gebäudes auf der Nordwest- und Ost-Seite. Zur Erfassung der Temperaturveränderung der durch den Erdkanal zugeführten Luft erfolgt die Messung der Ansaugtemperatur außen, sowie im Einströmbereich im UG des Atriums.

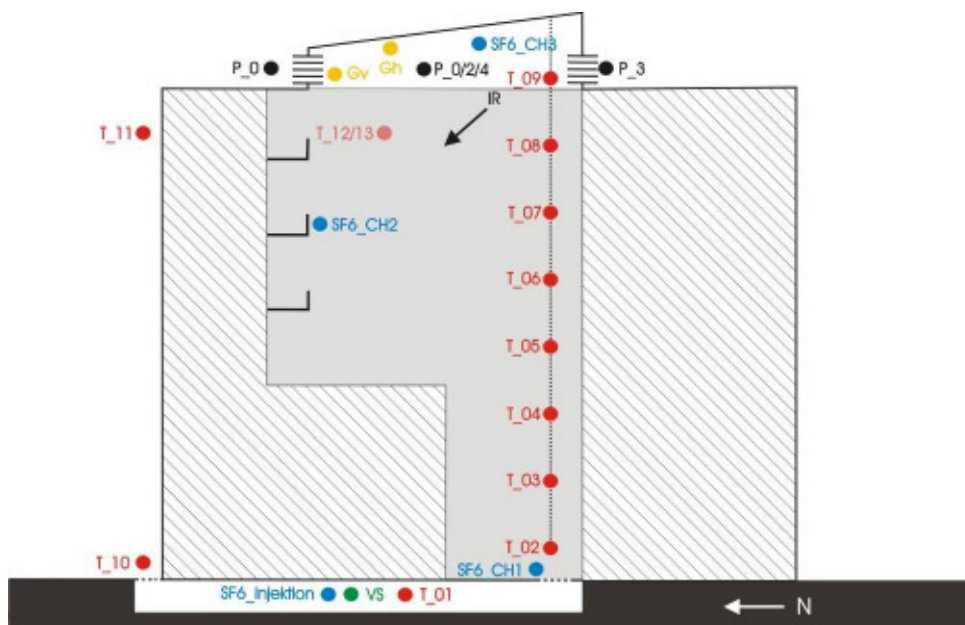


Abbildung 63 Querschnitt Lage der Messpunkte im NIZ Lang- und Kurzzeitmonitoring

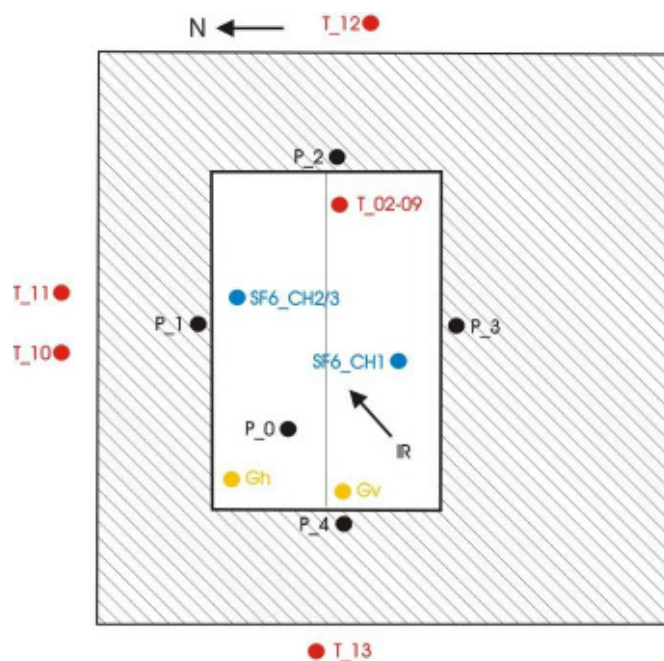


Abbildung 64 Grundriss Lage der Messpunkte im NIZ Lang- und Kurzzeitmonitoring

Tabelle 8 Messpunkte NIZ

Messpunkt	Monitoring	Beschreibung
T_01	LZM	Zulufttemperatur (innen)
T_02	LZM	Lufttemperatur Atrium 1m
T_03	LZM	Lufttemperatur Atrium 4m
T_04	LZM	Lufttemperatur Atrium 8m
T_05	LZM	Lufttemperatur Atrium 11m
T_06	LZM	Lufttemperatur Atrium 15m
T_07	LZM	Lufttemperatur Atrium 19m
T_08	LZM	Lufttemperatur Atrium 23m
T_09	LZM	Lufttemperatur Atrium 26m
T_10	LZM	Zulufttemperatur (außen)
T_11	LZM	Fassadentemperatur Nord
T_12	LZM	Fassadentemperatur Ost
T_13	LZM	Fassadentemperatur West
Gh	LZM	Globalstrahlungssensor (horizontal)
Gv	LZM	Globalstrahlungssensor (vertikal)
VS	KZM	Volumenstrommessung am Zuluftkanal
IR	KZM	Wärmebildkamera
SF6_Injektion	KZM	Injektion Tracergas

SF6_CH1	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 01m
SF6_CH2	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 19m
SF6_CH3	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 26m
P_0	KZM	Differenzdruck Atrium
P_1	KZM	Differenzdruck Fassade Nord
P_2	KZM	Differenzdruck Fassade Ost
P_3	KZM	Differenzdruck Fassade Süd
P_4	KZM	Differenzdruck Fassade West



Wetterstation



Globalstrahlungssensor
(horizontal)



Globalstrahlungssensor
(vertikal)



Zulufttemperatur (innen)



Temperaturmesskette (1)



Temperaturmesskette (2)

Abbildung 65

Messtechnik NIZ

4.3.3 Kurzzeitversuche

Es werden drei Kurzzeitversuche im Atrium des NIZ mit Schwerpunkt Bestimmung des Luftwechsels durchgeführt. Parallel erfolgen eine Aufzeichnung der Oberflächentemperaturen mit einer Wärmebildkamera und die Erfassung der Differenzdrücke an den Fassaden der Abluftöffnungen. Aufgrund eines Ausfalls der Messwertaufzeichnung konnten die Ergebnisse der Sommermessung nicht verwendet werden.

Tabelle 9 Zusätzliche temporäre Messungen während der Kurzzeitversuche

Bezeichnung	Benennung	Positionierung
IR	IR-Kamera	Süd-West Ecke am Geländer der Überhöhung des Atriums installiert
P_0	Differenzdruck Atrium	Direkt an Ostseite der Überhöhung des Atriums
P_1	Differenzdruck Fassade Nord	Direkt an Nordseite der Überhöhung des Atriums
P_2	Differenzdruck Fassade Ost	Direkt an Ostseite der Überhöhung des Atriums
P_3	Differenzdruck Fassade Süd	Direkt an Südseite der Überhöhung des Atriums
P_4	Differenzdruck Fassade West	Direkt an Westseite der Überhöhung des Atriums
SF6_Injektion	Injektion Tracergas	Zuluftkanal
SF6_CH1	Tracergasmessung 1	Die Positionierung der Tracergasmessung sind den einzelnen Kurzzeitmessungen (Sommer, Winter) zu entnehmen!
SF6_CH2	Tracergasmessung 2	
SF6_CH3	Tracergasmessung 3	



IR-Kamera (1)



IR-Kamera (2)



Tracergas-Messstation



Injektion von Tracergas im
Zuluftkanal



Injektion von Tracergas
im Zuluftkanal (2)



Messschlauch 2.OG



Messschlauch 4.OG



Druckmessung



Druckmesspunkt (Bohrung
im Profil)

Abbildung 66

Messtechnik Kurzzeitversuche

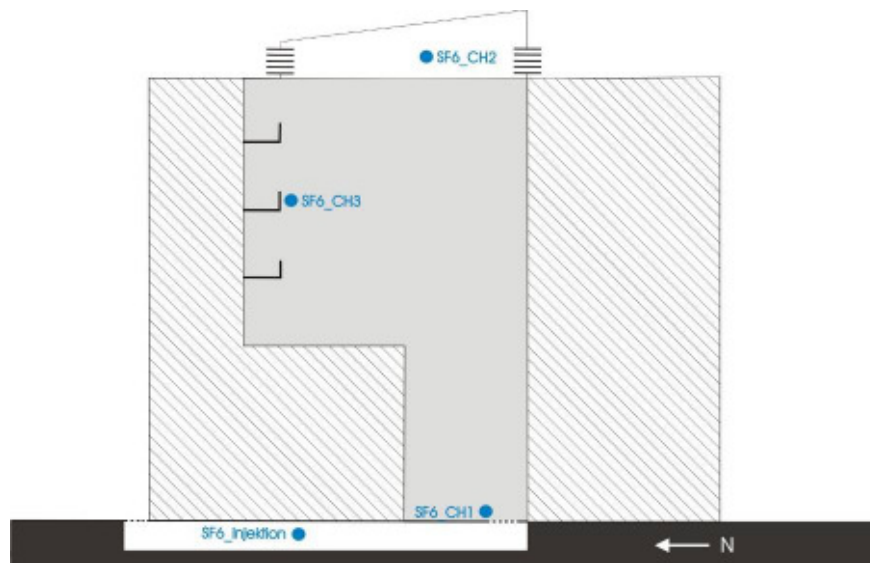


Abbildung 67 KZM 27.08.2008 Tracergasmesspunkte

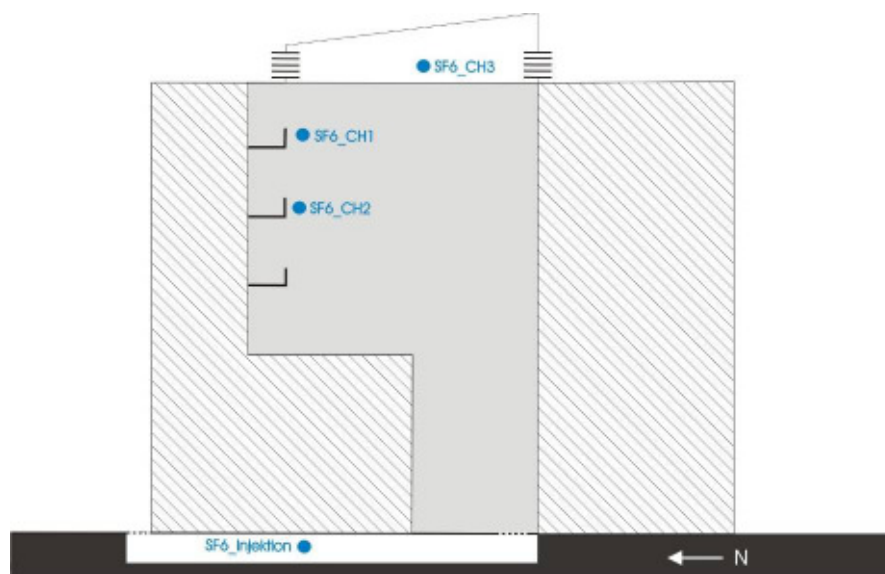


Abbildung 68 KZM 06.11.2008 Tracergasmesspunkte

Tabelle 10 Randbedingungen

Ort		NIZ
Datum		06.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Außenlufttemperatur	[°C]	13,0
Atriumlufttemperatur	[°C]	21,0
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3,0
Windrichtung	[°]	90
Globalstrahlung	[W/m ²]	30
Relative Luftfeuchte (außen)	[%]	-

Tabelle 11 Messprotokoll

Zeit	Vorgang
12:00	2 Westklappen werden geöffnet, Injektion
12:46	Beendigung der Injektion
12:49	Schließen aller Klappen #1 von Zuluft umgelegt auf 4.OG #2 2.OG #3 Lichtkuppel SO Ecke Konzentration steigt als erstes im Kuppelbereich
13:01	Klappen West und Ost geöffnet (angereicherte Luft im Kuppelbereich abgeführt)
13:05	Klappen geschlossen
13:15	#3 umgelegt in Nähe der Westklappe
13:23	Öffnen von 2 Klappen auf der Westseite
13:30	#1 Zuluftbereich Volumenstrommessung 283 ppm bei 40ml/s
13:37	# umgelegt auf 4.OG
13:38	große Jalousie geöffnet
15:40	Schließen aller Klappen, Ventilator 20, 2HZ

4.3.4 Behaglichkeit

Es erfolgte im November die Messung der thermischen Behaglichkeit an drei Orten im Atrium des NIZ. Die Zwischenebene im Galeriegeschoss dient als Aufenthaltsort mit Arbeitsplätzen für Studenten. Während im zurückgesetzten Bereich (links) die Empfindungstemperatur leicht unter dem Optimum liegt (eher zu kühl), werden am Rand (Mitte) die Behaglichkeitskriterien deutlich unterschritten. Ursache ist die hohe Luftgeschwindigkeit an dieser Stelle, die durch die Ergebnisse der Strömungssimulation bestätigt werden. Aufgrund der niedrigen Zulufttemperatur ist die Empfindungstemperatur im untersten Geschoss niedriger als im restlichen Atrium. Diese Temperaturschichtung wird ebenfalls durch die Simulationsergebnisse bestätigt.

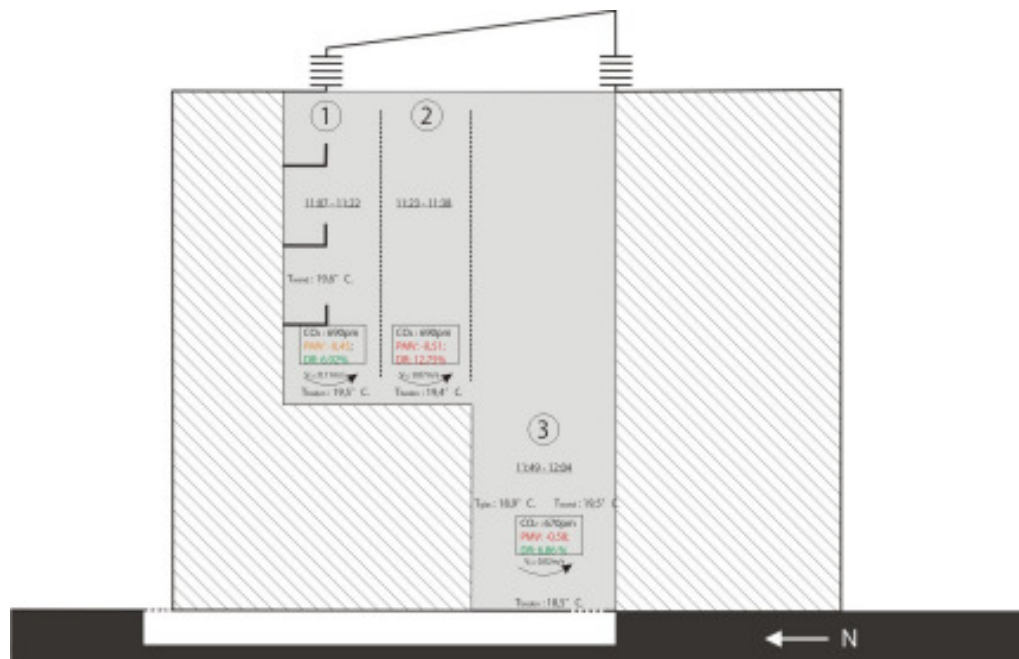


Abbildung 69 Ergebnis der Behaglichkeitsuntersuchung im NIZ (Außentemperatur 10°C)

4.3.5 Auswertung

Die Kohlendioxydmessung im Atrium des NIZ zeigt eine tageszeitliche Abhängigkeit mit einem Anstieg der Konzentration auf maximal 590 ppm, siehe Abbildung 70. In der Nacht sinkt die Konzentration wieder auf das Niveau der Außenluftkonzentration von 380 ppm. Unterschreitungen dieses Wertes resultieren aus Messfehlern des Sensors. Der vorherige Abgleich des Sensors ergab eine Genauigkeit von mindesten 50 ppm. Die sogenannte Pettenkofer-Grenze von 1000 ppm, die als Grenzwert für die Kohlendioxydkonzentration anzusetzen ist, wird bei weitem nicht überschritten. Hinsichtlich der Luftbelastung im Atrium ist der Außenluftvolumenstrom als ausreichend zu bezeichnen. Eine höhere Kohlendioxydkonzentration wäre bzgl. der Frischluftversorgung der innenliegenden Büros nachteilig.

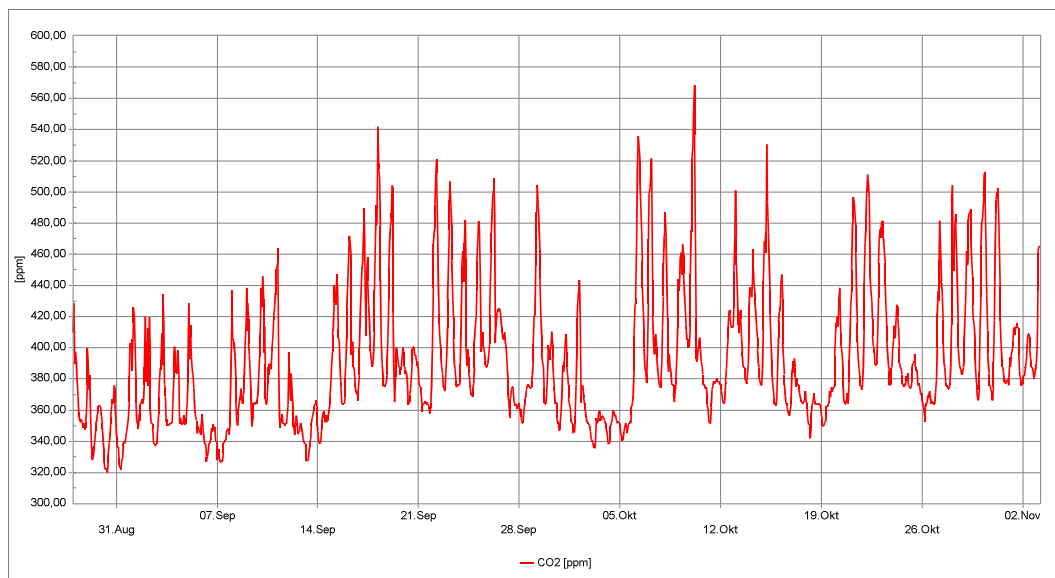


Abbildung 70

Verlauf der Kohlendioxydkonzentration im Atrium des NIZ

Abbildung 71 zeigt den Tagesverlauf der fassadennahen Temperatur auf der Nordseite, der Ansaugtemperatur der ebenerdigen Öffnung zum Zuluftkanal und der Zulufttemperatur im UG beim Eintritt in das Atrium an einem sonnigen Sommertag. Während die fassadennahe Außenlufttemperatur auf Höhe des 2.OG eine Temperatur von ca. 26°C aufweist, hat die Temperatur auf Höhe der ebenerdigen Ansaugung nur noch eine Temperatur von ca. 24°C. Bei der Einströmung im UG beträgt sie nur noch 22°C.

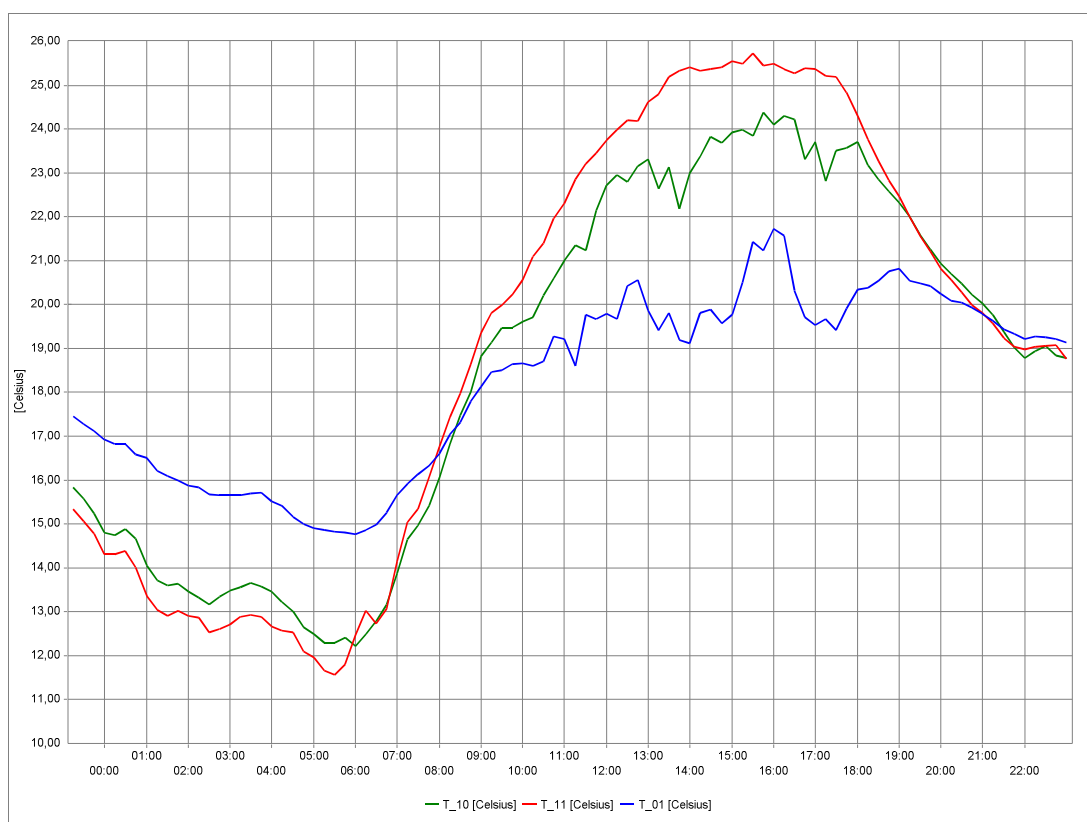


Abbildung 71 Verlauf der Zulufttemperaturen am 31.8.2009 (T11 Fassadennahe Lufttemperatur Nord, T 10 Ebenerdige Ansaugstelle Nordseite, T 01 Zuluftkanal Einströmung in UG)

Abbildung 72 zeigt den Verlauf der fassadennahen Temperaturen auf Höhe des 2.OG auf der West-, Nord- und Ostseite für mehrere Tage im Sommer. Die Temperaturen sind in der Nacht auf dem gleichen Niveau, während sie mit Beginn des Tages auseinanderdriften. Die jeweiligen Maxima folgen dem Verlauf der Sonne. Eine hohe Sonneneinstrahlung erhöht die Temperaturdifferenz. Die maximale Differenz beträgt zwischen Nord- und Westseite um 17:00 Uhr ca. 6 K, siehe Abbildung 72.

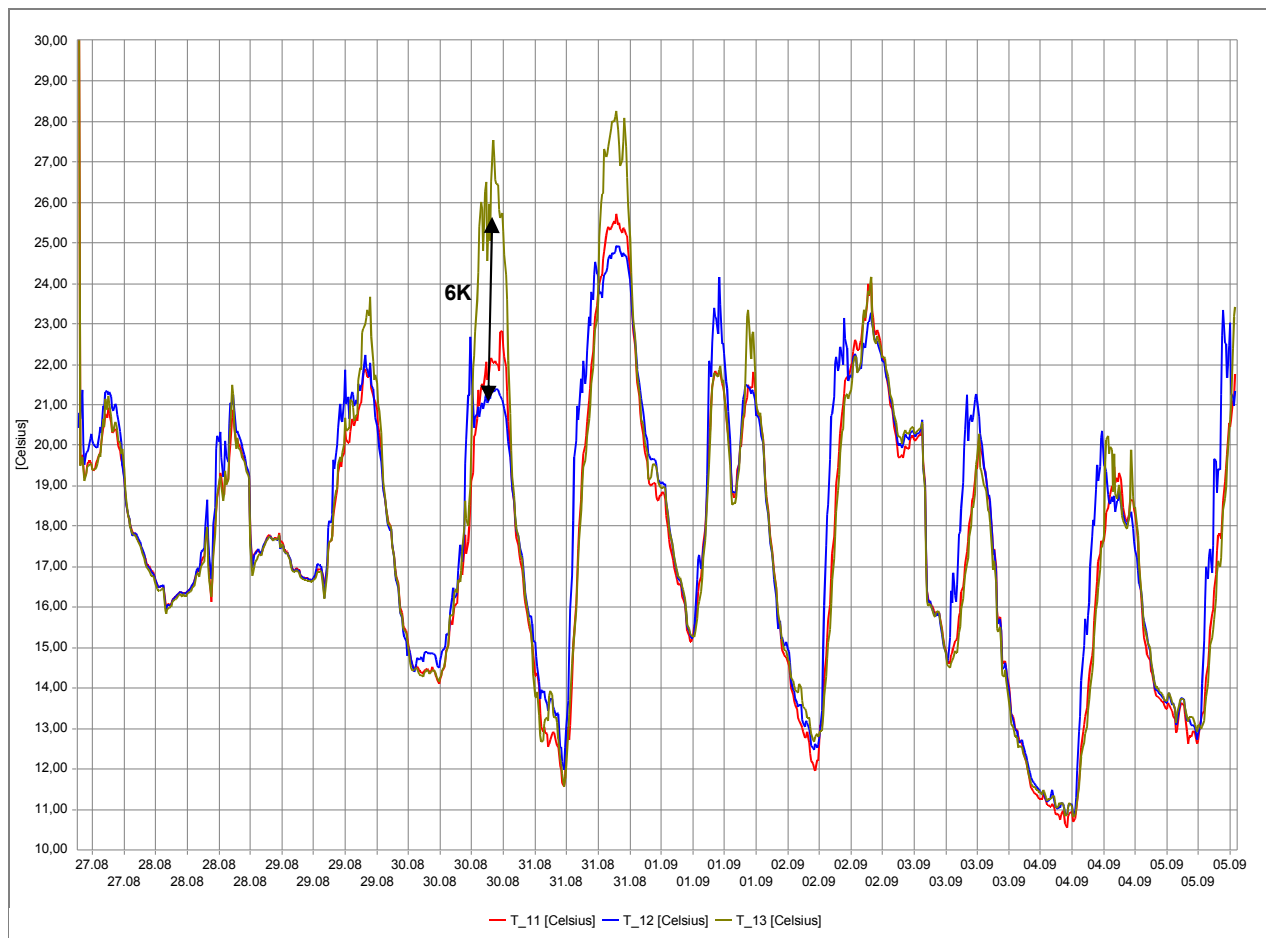


Abbildung 72 Verlauf der fassadennahen Temperaturen (Ostseite T12, Westseite T13, Nordseite T11)

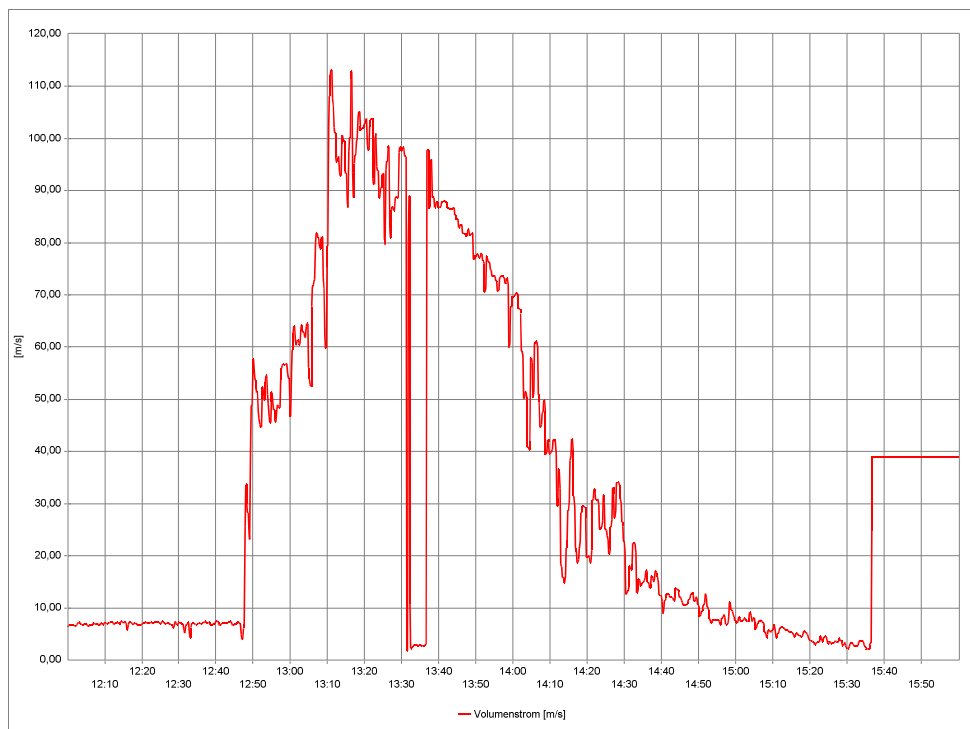


Abbildung 73 Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal während des Abklingversuches

4.3.6 CFD-Simulation

Die Versuchsbedingungen während der Luftwechsellmessung am 6.11 werden in einer Strömungssimulation zur Berechnung des Außenluftvolumenstroms angesetzt. Im Gegensatz zur Simulation am Objekt EFB wird der umgebende Luftraum nicht mit abgebildet, sondern die gemessenen Differenzdrücke als Druckrandbedingung an den Öffnungen angesetzt. An der Abluftöffnung ergab sich im geöffneten Zustand ein mittlerer Druck von -2,79 Pa. Die Durchflussbeiwerte werden nach Literaturangaben abgeschätzt, z.B. nach [DIN 18232-2]. Das Simulationsmodell ist in Abbildung 74 dargestellt.

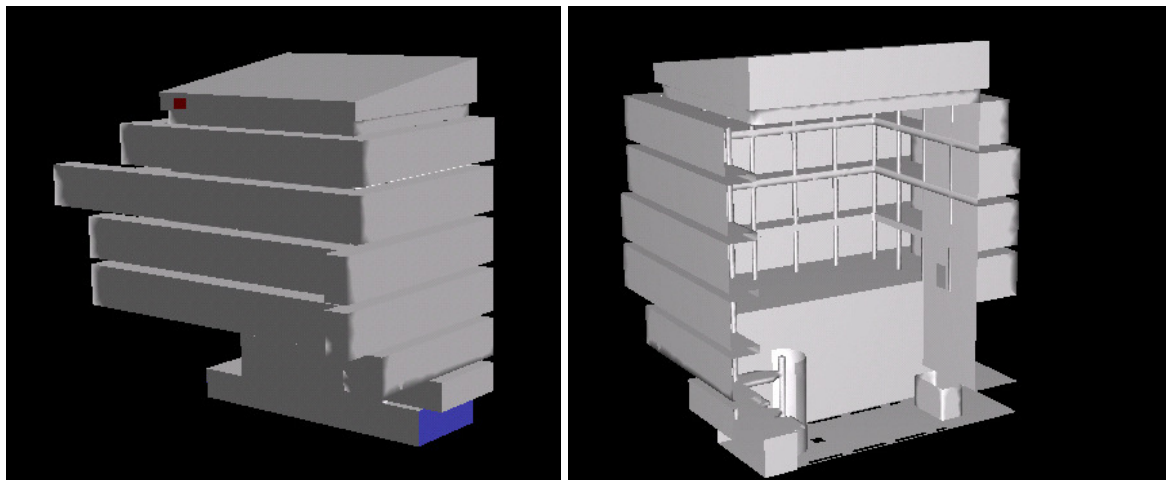


Abbildung 74 Nord- und Südansicht des geometrischen Simulationsmodells

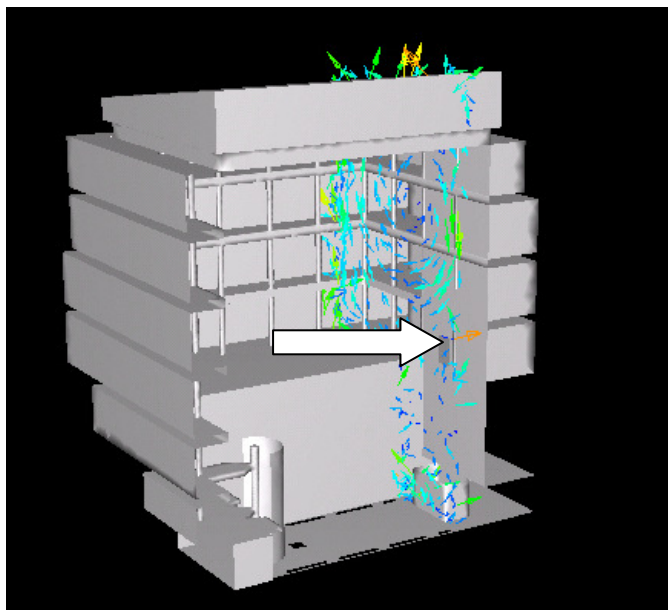


Abbildung 75 Lage der Ebene für die Ergebnisdarstellung im geometrischen Modell und Blickrichtung

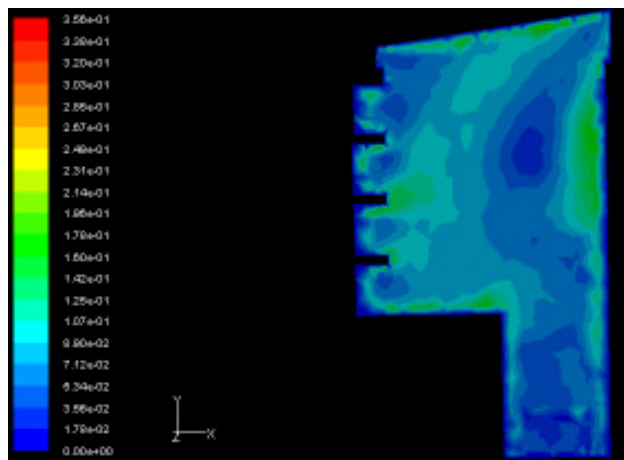


Abbildung 76 Verteilung der Luftgeschwindigkeiten [m/s]

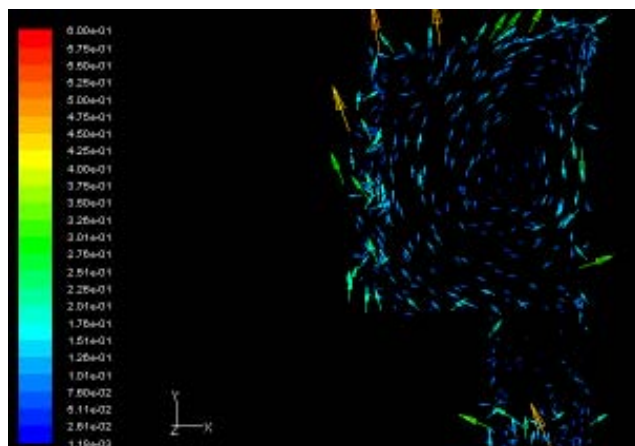


Abbildung 77 Geschwindigkeitsvektoren [m/s]

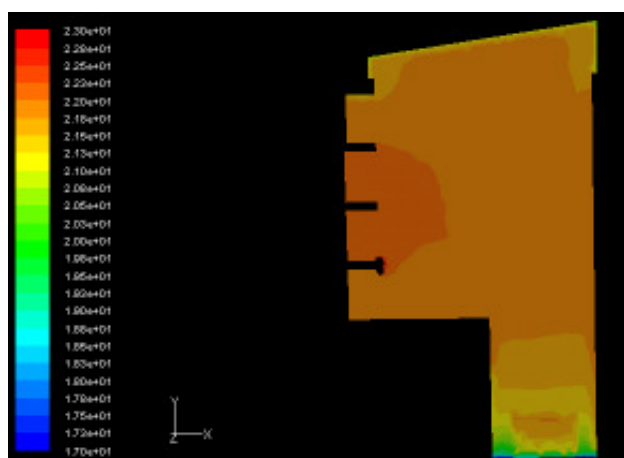


Abbildung 78 Temperaturverteilung [°C]

Die Temperaturrendbedingungen sind so gewählt, dass sich gemäß den Versuchsbedingungen eine mittlere Temperatur von 21°C einstellt. Die durch die Infrarotaufnahmen gemessenen Oberflächentemperaturen kommen hier zur Anwendung. Die Flächenheizkörper zwischen Galerie und 1.Geschoss erzeugen ein Warmluftpolster, welches bis zum 2.OG reicht, siehe Abbildung 78. Aufgrund der geringen Einströmgeschwindigkeit und der geringen Vorheizung der Zuluft bildet sich eine Temperaturschichtung aus, die im UG am deutlichsten ist. Die maximalen Luftgeschwindigkeiten betragen 0,16 m/s im Aufenthaltsbereich des Galeriegeschosses. Infolge der Flächenheizkörper, die sich auf der West- Ost- und Nordseite des Atriums befinden, steigt die Luft auf diesen Seiten auf und bildet eine raumfüllende Luftwalze aus, siehe Abbildung 77. Der berechnete Außenluftvolumenstrom beträgt 17.600 m³/h (gemessen 18.750 m³/h)

4.3.7 Analyse des Gebäudebetriebes

Das Carpetdiagramm zeigt die mittleren Atriumtemperaturen (dargestellt durch die Farbe) und den Öffnungszustand der Lamellen (Schraffur). Im Juni sind Zeiträume zu verzeichnen, in welchen trotz hoher Atriumtemperaturen die Klappen geschlossen sind. Die Atriumtemperaturen sind in diesen Zeiträumen erhöht, siehe die Markierungen in Abbildung 79. Im Juli und im August, sind die Lamellen mit Unterbrechungen geöffnet. Während der kühlen Witterung sind sie fast ausschließlich geschlossen. Eine durchgängige Nachtlüftung während der warmen Periode ist nicht zu beobachten.

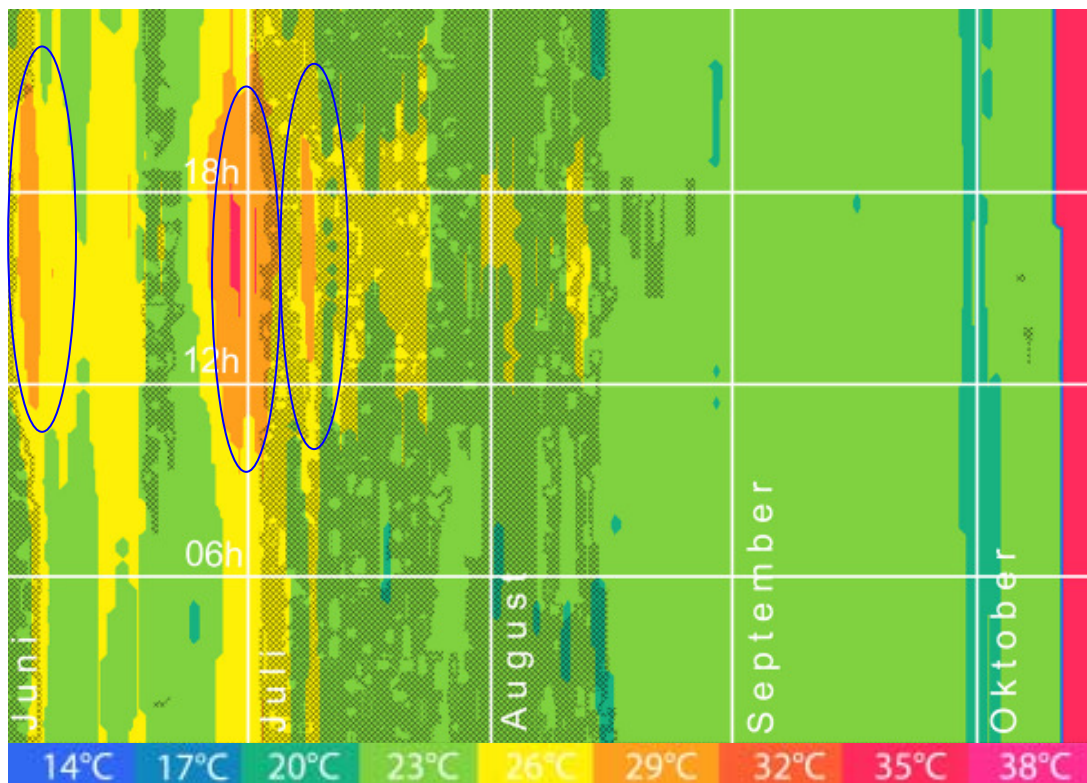


Abbildung 79 Carpetdiagramm mittlere Atriumtemperatur und Klappenöffnung für das NIZ

4.3.8 Optimierungspotentiale

Die Lage der Zuluftöffnung ist hinsichtlich des gebäudenahen Mikroklimas und der Ansaugtemperaturen optimal gewählt, woraus die relativ gute Performance des NIZ resultiert. Jedoch sind im Beobachtungszeitraum Phasen, in denen es aus nicht nachvollziehbaren Gründen zu einer Schließung der Klappen kommt, die mit einer Erhöhung der Atriumtemperatur über 26°C auf bis zu 35°C einhergeht. Sind die Klappen geöffnet, steigt die Temperatur nicht über 26°C. Insofern sollte die Klappensteuerung überprüft und verbessert werden. Spitzentemperaturen von 35°C wären dann vermieden worden.

4.4 LBS Nord

Die Hauptverwaltung der LBS Nord wurde im Jahr 2000 in Hannover Laatzen errichtet. Charakteristisch für das Bürogebäude sind insbesondere drei Grünhöfe, die als temperierte Atrien Teil des energetischen Konzepts des Gebäudes sind.

4.4.1 Gebäudebeschreibung

Das Gebäude der LBS Nord besteht aus 5 Häusern, die von einer Glashülle umschlossen werden. Zwischen den Häusern befinden sich überdachte Grünhöfe mit einer mediterranen Bepflanzung. Die Umschließung der Häuser umfasst ebenfalls die Verbindungswege zwischen den einzelnen Häusern und Treppenhäusern. Abgesehen vom südlich gelegenen ersten Grünhof, sind die Lufträume aller weiteren Grünhöfe miteinander verbunden. Der erste Grünhof dient als Eingangsfoyer und Aufenthaltsbereich und wird daher thermisch konditioniert. Die anderen Grünhöfe sind weder beheizt noch gekühlt. Ihre thermische Konditionierung erfolgt lediglich durch die Steuerung der Lüftungsklappen. Die an die Grünhöfe anschließenden Bürogebäude werden maschinell belüftet, die Abluft wird in den innenliegenden Bereichen des Kerngebäudes (Flure, innenliegendes Atrium³) oder – bei Fensteröffnung - über die Grünhöfe nach außen abgeführt. Für den Fall, dass keine Lüftungsklappen im Grünhof geöffnet sind, so dass der Grünhof nicht als „Abluftatrium“ dienen kann, erfolgt parallel zur Absaugung im Kerngebäude eine Absaugung der Luft aus dem Grünhof. Die Absaugung im Grünhof ist auch aktiv, wenn die Klappen offen sind. Weiterhin sind die Büroräume mit einer Kühl- und Heizdecke sowie einem Blendschutz ausgestattet. Die maschinelle Belüftung kann büroweise durch die Nutzer an- oder abgeschaltet werden.

Aufgrund der Vegetation in den Grünhofen, darf im Winter eine Temperatur von 15°C nicht überschritten werden, siehe dazu auch Abschnitt 4.4.5.

Auf der Ost- und Westseite der Grünhöfe befinden sich jeweils drei Reihen von offenbaren Klappen, die sich in Gruppen durch die GLT ansteuern lassen. Für eine weitere Beschreibung der Klappensteuerung siehe Abschnitt 4.4.4.1.

4.4.2 Langzeitmonitoring

Das Gebäude der LBS verfügt über vier sogenannte Grünhöfe, die über den Dächern der Kerngebäude B bis D verbunden sind und somit einen Luftraum darstellen. Die Untersuchung reduziert sich auf den nord-östlichen Grünhof D-E (zwischen Haus D und E).

³ Das innenliegende Atrium ist nicht Bestandteil der Untersuchungen

Für die Luftwechsellmessungen werden die anderen Grünhöfe durch eine Folie von dem zu untersuchenden Grünhof abgetrennt. Während des Langzeitmonitorings erfolgt die Messung der Lufttemperatur auf verschiedenen Höhen, der horizontalen Globalstrahlung innerhalb der Grünhöfe, und der fassadennahen Außentemperaturen auf beiden Längsseiten des Gebäudes im Bereich der unteren Zuluftklappen.

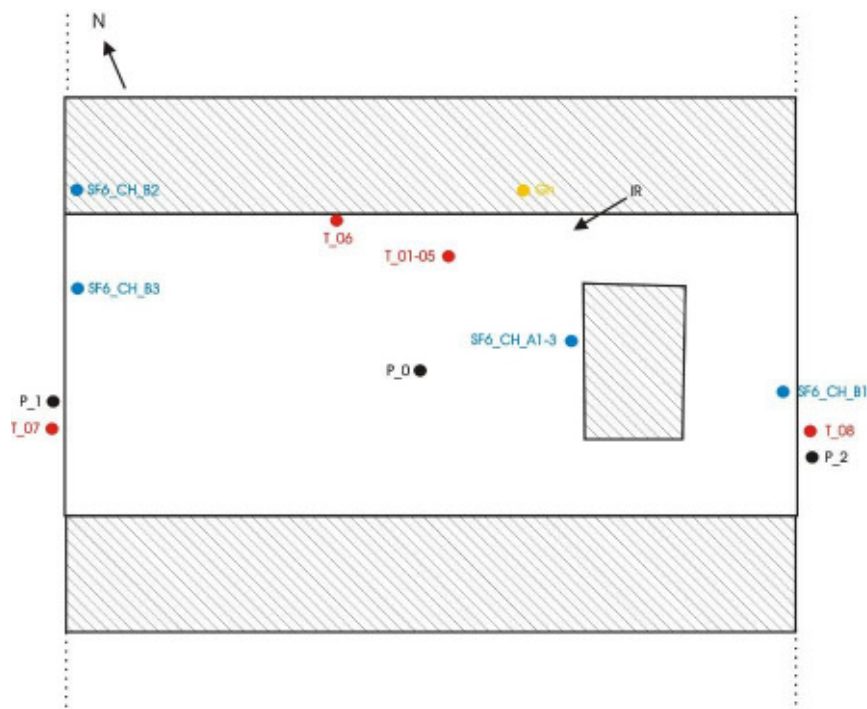


Abbildung 80 Lage der Messpunkte im Grundriss

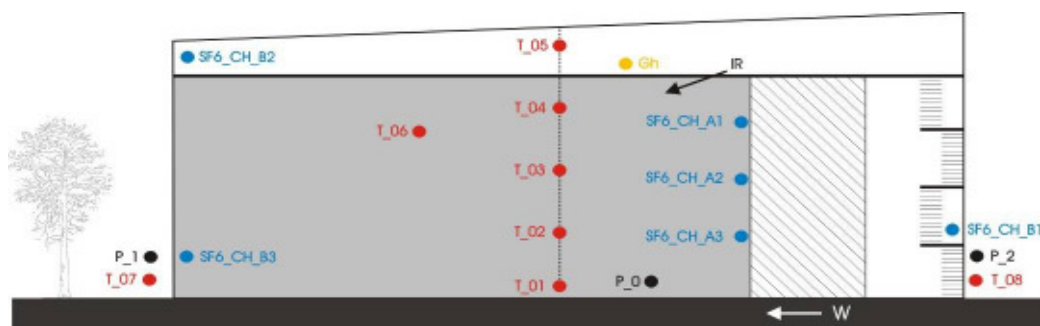


Abbildung 81 Lage der Messpunkte im Schnitt

Tabelle 12 Messtechnik LBN

Messpunkt	Langzeit- oder Kurzzeitmonitoring	Beschreibung
T_01	LZM	Atriumlufttemperatur 0,1m
T_02	LZM	Atriumlufttemperatur 1,1m
T_03	LZM	Atriumlufttemperatur 09m
T_04	LZM	Atriumlufttemperatur 16m
T_05	LZM	Atriumlufttemperatur 17m
T_06	LZM	Oberflächentemperatur Glas (12m)
T_07	LZM	Fassadennahe Lufttemperatur West
T_08	LZM	Fassadennahe Lufttemperatur Ost
Gh	LZM	Globalstrahlungssensor (horizontal)
IR	KZM	Wärmebildkamera
SF6_CH_A1	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 12m
SF6_CH_A2	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 8m
SF6_CH_A3	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt 3m
SF6_CH_B1	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt Klappen Ost
SF6_CH_B2	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt Klappen West oben
SF6_CH_B3	KZM	Tracergaskonzentrationsmesspunkt Klappen West unten
P_0	KZM	Differenzdruck
P_1	KZM	Differenzdruck Fassade West
P_2	KZM	Differenzdruck Fassade Ost
W_01_T	LZM	Außentemperatur Wetterstation
W_02_Gv	LZM	Globalstrahlung (vertikal) außen
W_03_Hu	LZM	Relative Feuchte
W_04_WG	LZM	Windgeschwindigkeit
W_05_WR	LZM	Windrichtung

Tabelle 13 Messpunktliste LBN (GLT)

Messpunkt	Monitoring	Beschreibung
GLT_01_T	LZM	Atriumtemperatur (1)
GLT_02_T	LZM	Atriumtemperatur (2)
GLT_03_T	LZM	Atriumtemperatur (3)
GLT_04_T	LZM	Außentemperatur GLT



Wetterstation

Globalstrahlungssensor
(horizontal)Oberflächentemperatur Glas
(Atrium)

Außentemperatur



Temperaturmesskette

Abbildung 82

Messtechnik LBN

4.4.3 Kurzzeitversuche

Während der Kurzzeitversuche erfolgt die Abtrennung der anderen Grünhöfe von dem untersuchten Grünhof D-E.

Am 26.07.2008 erfolgten zwei Luftwechsellmessungen. Die durchschnittliche Außentemperatur während der Versuche betrug 28°C. Weiter wurden Tracergasmessungen, Druckmessungen und Nebelversuche durchgeführt. Am 15.11.2008 erfolgten bei einer Außentemperatur von 10°C weitere Luftwechsellmessungen für den Winterfall. Parallel erfolgte die Aufzeichnung der Oberflächentemperaturen der an das Atrium angrenzenden Flächen mit einer Wärmebildkamera.



Abbildung 83 Lage der Messpunkte im Kurzzeitmonitoring

Tabelle 14 Messpunktliste

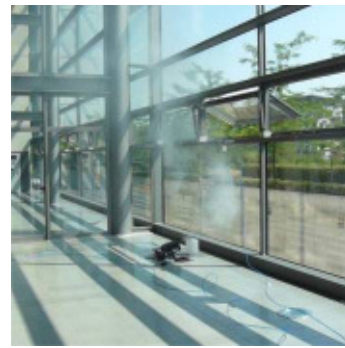
Bezeichnung	Benennung	Positionierung
IR	IR-Kamera	Auf dem Dach des Bürotraktes
SF6_CH_A1	Tracergasmesspunkt	0,3m vor Fassade des Bürotraktes (12m)
SF6_CH_A2	Tracergasmesspunkt	0,3m vor Fassade des Bürotraktes (8m)
SF6_CH_A3	Tracergasmesspunkt	0,3m vor Fassade des Bürotraktes (3m)
SF6_CH_B1	Tracergasmesspunkt	An den Lüftungsklappen (West)
SF6_CH_B2	Tracergasmesspunkt	An den Lüftungsklappen (West)
SF6_CH_B3	Tracergasmesspunkt	An den Lüftungsklappen (West)
P_1	Druckmessung West	Direkt an der Westseite des Atriums
P_2	Druckmessung Ost	Direkt an der Ostseite des Atriums



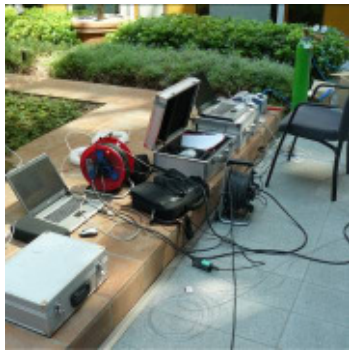
Druckmesspunkt West



Rauchversuche



Rauchversuche



Druck- und Gasmessung



Tracergas Injektion Ost



Tracergas
Injektion/Druckmessung Ost

Abbildung 84 Messtechnik LBN

4.4.4 Analyse des Gebäudebetriebes

4.4.4.1 Klappensteuerung

Die folgenden Angaben basieren zum Teil auf den zur Verfügung stehenden Planungsunterlagen und den verzeichneten Sollwerten der GLT, die den Screenshots des GLT-Rechners entnommen wurden. Im Betrieb erfolgten offensichtlich Anpassungen, die von den Planungsvorgaben abweichen.

Die Klappensteuerung erfolgt jeweils für die einzelnen Grünhöfe unabhängig voneinander. Auf der Ost- und Westseite der Grünhöfe befinden sich jeweils drei Reihen von öffnbaren Klappen zur natürlichen Belüftung der Grünhöfe. Die Lüftungsklappen befinden sich auf unterschiedlichen Höhen und sind in Gruppen unterteilt. Durch die gruppenweise Öffnung ergeben sich verschiedene Öffnungskombinationen, sogenannten Lüftungsstufen (LS). Bei der Durchschaltung der Lüftungsstufen werden sukzessive immer weiter Klappengruppen

geöffnet bis in der Lüftungsstufe 8 alle seitlichen Klappen geöffnet sind. Ab der Lüftungsstufe 9 werden zusätzlich Klappen im Dachbereich geöffnet. Der maximale Öffnungsanteil wird mit der Lüftungsstufe 11 erreicht. Die Lüftungsstufe 12 zeigt lediglich an, dass die Klappen per Hand gesteuert werden, die Lüftungsstufe 15 ist aktiv, wenn die Klappen bei Windgeschwindigkeiten größer 12,5 m/s oder Regen geschlossen werden. In diesem Fall wird die Gruppensteuerung bei Rücknahme des Wind- oder Regenwarners auf LS1 zurückgesetzt

Die Öffnung der Klappen erfolgt erst, wenn an drei aufeinanderfolgenden Tagen der Tagesmittelwert der Außentemperatur 10°C überschreitet und die über die Höhe gemittelte Grünhoftemperatur 16°C erreicht.

Weitere Lüftungsstufen werden erst mit höheren Grünhoftemperaturen geschaltet, wobei die Temperaturdifferenz zwischen jeder Stufe 1K betragen soll. So wird die LS 1 erst bei 21°C geschaltet, LS 2 bei 22°C usw..

Die Öffnung der Klappen in den Lüftungsstufen 1-10 erfolgt ausschließlich in der Zeit von 7:00 bis 18:00. Zur Nachtauskühlung öffnen alle Klappen gem. LS 11. Die Nachtauskühlung erfolgt nur während der Betriebsart „Sommer“ von 19:00 bis 6:00.

Die Solltemperaturen betragen im Sommer 16°C am Tag und 18°C in der Nacht. Im Winter beträgt die Solltemperatur 10°C. Die Sommer-Umschaltung erfolgt, wenn an drei Tagen die Außentemperatur 10°C überschreitet, andernfalls wird das Winter-Programm gefahren. Laut den Planungsunterlagen muss zusätzlich an drei aufeinander folgenden Tagen die mittlere Grünhoftemperatur von 24°C überschreiten werden und 1 K über der Außentemperatur liegen. In der Praxis wird die Wahl Betriebsart manuell übersteuert. Bei Außentemperaturen kleiner als 6°C sollen die Klappen zum Schutz der Bepflanzung gar nicht mehr geöffnet werden.

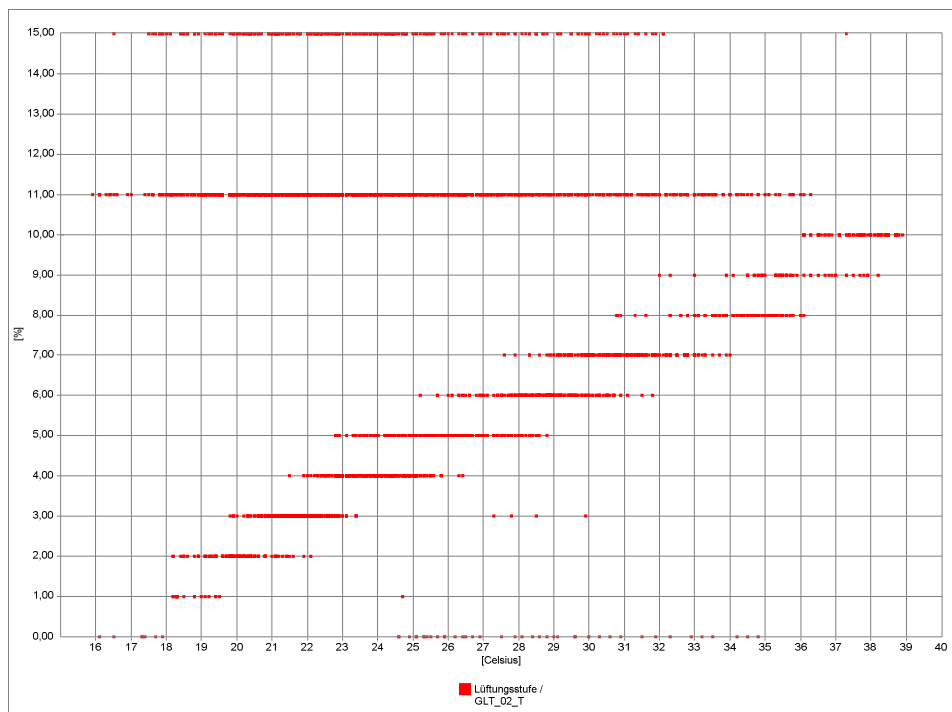
Zur Analyse der Klappensteuerung wird die Lüftungsstufe (LS 1-15) zeitabhängig (Tagesverläufe) bzw. in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur im Grünhof dargestellt. Einen umfassenden und trotzdem zeitabhängigen Überblick der Klappensteuerung und der Grünhoftemperaturen erfährt man durch die Anwendung eines Carpetdiagramms. Die

mittlere Temperatur im Grünhof, gebildet aus den beiden Temperatursensoren der GLT, bildet die Führungsgröße für die Klappensteuerung. Zum einen wird die korrekte Abbildung der geplanten Steuerung überprüft, zum anderen wird untersucht, ob die Klappensteuerung im Sinne der Verbesserung des Raumklimas und der Steigerung der Energieeffizienz verbesserungsfähig ist.

Die Darstellung der Lüftungsstufen in Abhängigkeit von der Grünhoftemperatur für die Sommermonate Juni-Juli zeigt, dass alle Lüftungsstufen durchgeschaltet werden, siehe Abbildung 85. Die Lüftungsstufe 1 wird ab ca. 16°C aktiviert, weitere Lüftungsstufen erfolgen in 2 K –Schritten. Die Lüftungsstufe 10 (maximale Öffnung im Tag - Betrieb) wird bei 36°C erreicht. Es erfolgte offensichtlich eine Anpassung der Vorgaben aus der Planung. Diese war in sich nicht konsistent: Bei einer sommerlichen Solltemperatur im Atrium von 16°C sollte die Öffnung der Klappen mit LS 1 erst ab 20°C erfolgen. Daher ist die Klappenregelung so umgesetzt worden, dass LS 1 bereits ab 16°C beginnt. Vermutlich, um den ursprünglichen Temperaturbereich, innerhalb dessen die Anzahl der geöffneten Klappen sich sukzessive erhöht, auch einzuhalten, wurde der Temperaturschritt zwischen den Lüftungsstufen auf 2 K erhöht.

Die Nachtlüftungsstufe LS 11 wird ab 18°C bis ca. 36°C aktiviert. LS 15 zeigt an, dass die Klappen aufgrund zu hohen Windaufkommens oder Regens geschlossen wurden. Diese Situationen treten im Beobachtungszeitraum bei einer Grünhoftemperatur bis 31°C auf. Abbildung 90 zeigt den Temperaturverlauf im Grünhof und die eingestellte Lüftungsstufe an einem typischen Sommertag. Bis 6:00 morgens ist die Nachtlüftung mit LS 11 aktiv. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur im Grünhof auf ca. 23°C gefallen. Ab 6:00 wird das Tag-Programm mit der stufenweisen Öffnung der Klappen in Abhängigkeit von der Grünhoftemperatur aktiviert. Dementsprechend wird auf LS 5 heruntergeschaltet. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Grünhoftemperatur steil an bis sie gegen Mittag ein vorläufiges Maximum von 34°C erreicht. Bis dahin wurde entsprechend der Grünhoftemperatur in Schritten bis zur Lüftungsstufe 8 hochgeschaltet. Erst ab diesem Zeitpunkt sinkt die Grünhoftemperatur vorläufig, steigt dann aber wieder bis 15:00 weiter an. Die höchste Lüftungsstufe im Tag-Programm, LS 10, wird erst ab 14:30 geschaltet. Ab 19:00 beginnt wieder die Nachtauskühlung mit LS 11 mit einer stetigen Abkühlung des Grünhofes.

Während der Heizperiode im November sind vorwiegend LS 1 bis LS 3 und LS 11 (Nachtlüftung) aktiv, siehe Abbildung 86. Alle weiteren Stufen öffnen vereinzelt im gesamten Temperaturbereich zwischen 11°C und 20°C. Die Umsetzung des Regelkonzeptes für eine stufenweise Öffnung der Klappen lässt sich auf Basis dieses Zusammenhanges nicht erkennen. So öffnet die Lüftungsstufe 3 ab ca. 11°C, LS 1 jedoch erst ab 14°C. Bei Außentemperaturen geringer als 5°C erfolgt planungskonform keine Öffnung der Klappen zum Schutz der Bepflanzung, siehe Abbildung 87. Überraschenderweise erfolgt bei Temperaturen ab 11°C aufwärts eine Nachtlüftung. In der zeitabhängigen Darstellung ist zu beobachten, dass LS 11 ab 20:00 aktiviert wird, bis die Atriumtemperatur auf 11°C abgefallen ist. Zuvor wurde tagsüber die LS 3 gefahren bei einer Grünhoftemperatur von 17°C. Das Carpetdiagramm, siehe Abbildung 89, gibt die Ergebnisse dieser Analyse wieder. Dargestellt wird durch die schraffierten Bereiche Öffnungszeiträume der Lüftungsstufen 10 und 11, also der maximalen Öffnung, während die Raumtemperaturen im Tagesverlauf durch verschiedene Farben hinterlegt sind. Während des Auftretens der höchsten Temperaturen im Beobachtungszeitraum von 36°C, sind LS 10 und LS 11 tagsüber nur vereinzelt aktiv. Die Nachtauskühlung LS 11 hingegen wird regelmäßig nachts aktiviert.

**Abbildung 85**

Lüftungsstufen im Juni/Juli in Abhängigkeit von der Raumtemperatur

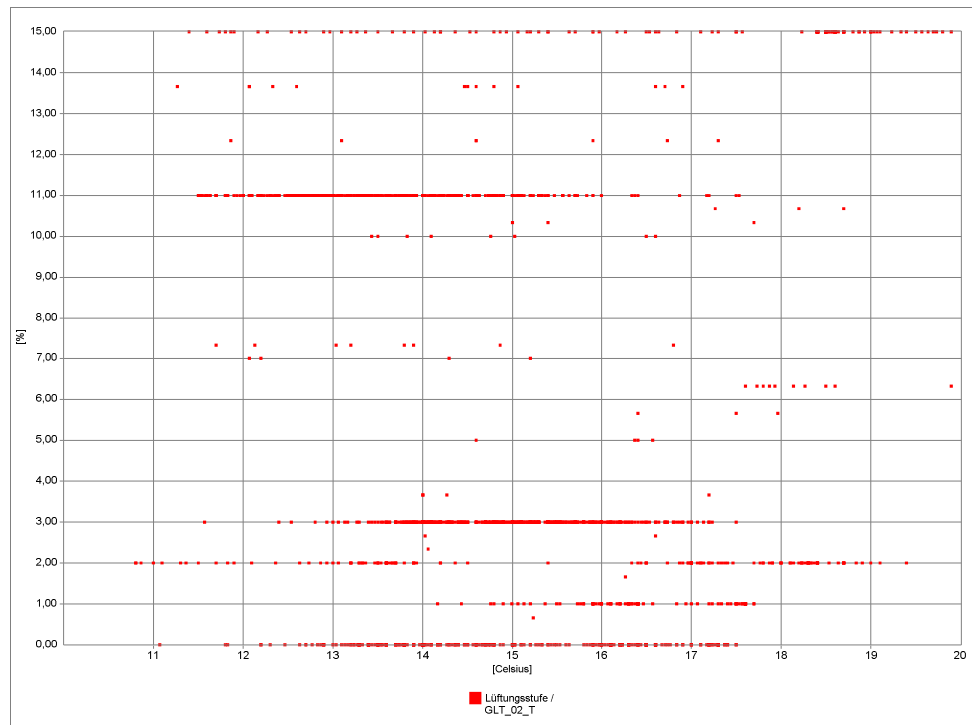


Abbildung 86 Lüftungsstufen im November in Abhängigkeit von der Raumtemperatur

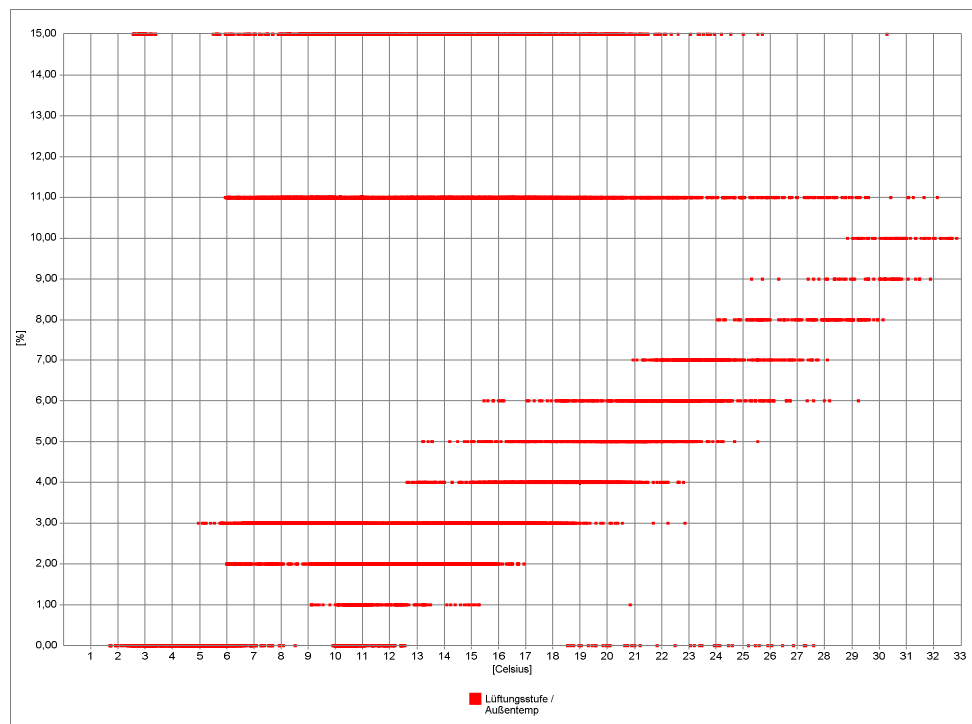


Abbildung 87 Abhängigkeit der Lüftungsstufe von der Außentemperatur, ganzjährig

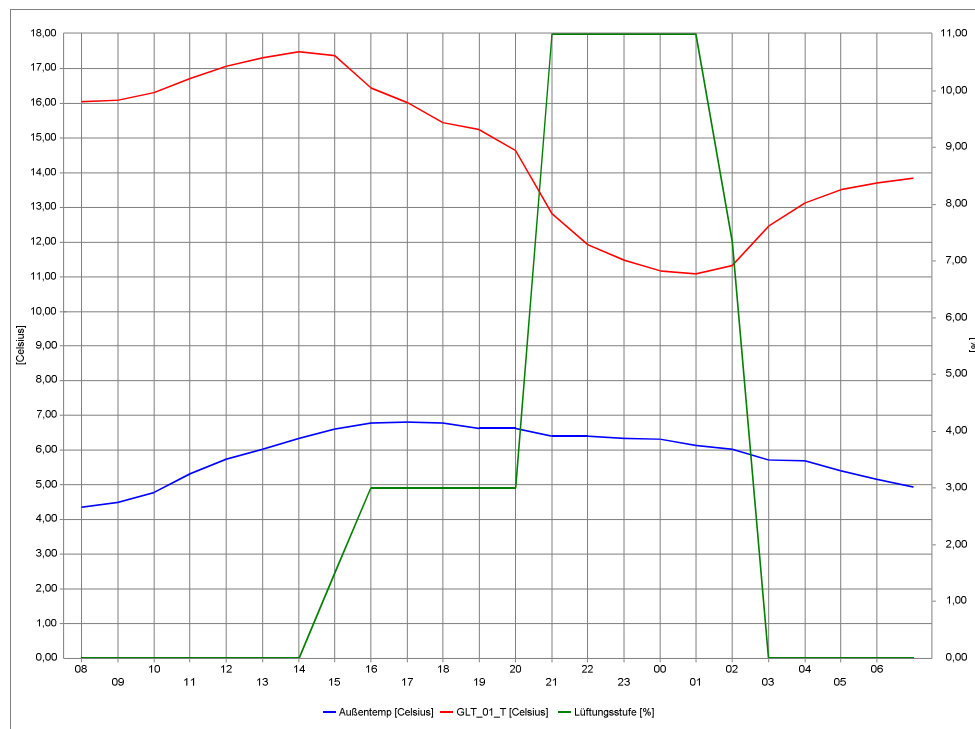


Abbildung 88 Aktivierung der Nachtlüftung im Winter

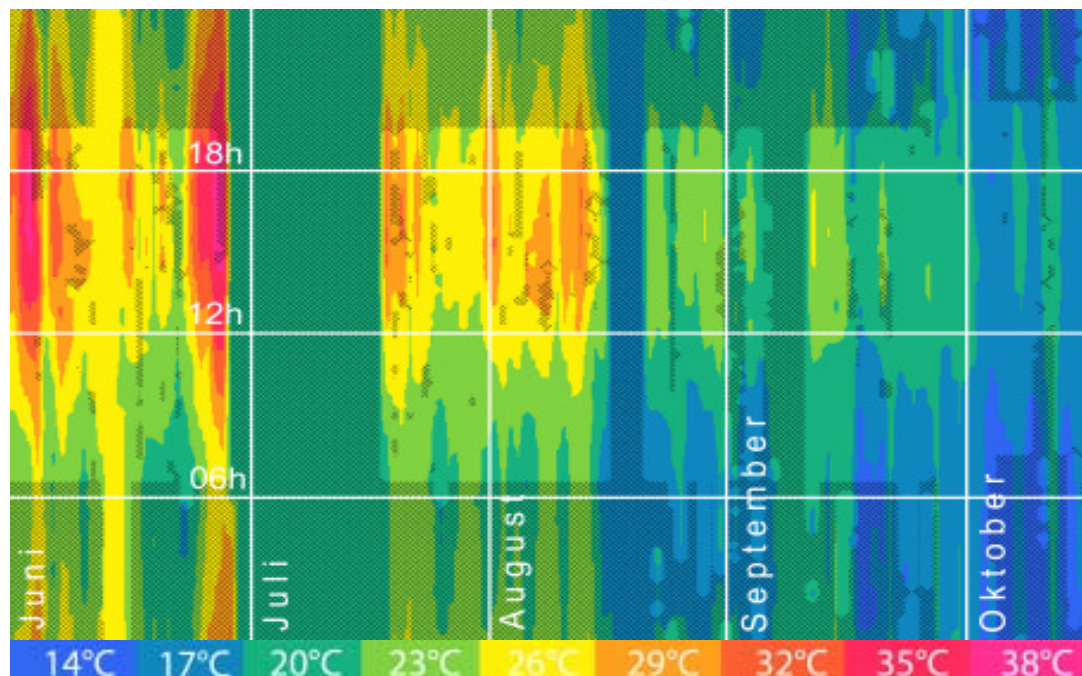


Abbildung 89 Carpet-Diagramm der mittleren Grünhoftemperatur und der Öffnung der Klappen gem. LS10 und LS11 (Nachtlüftung)

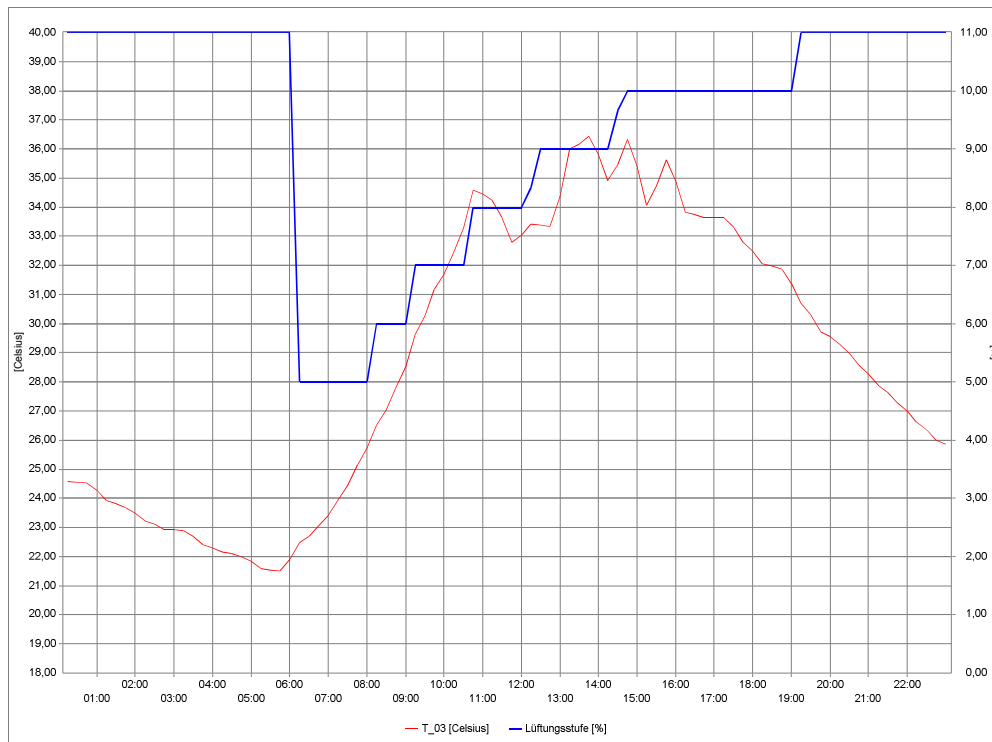


Abbildung 90

Schrittweise Öffnung der Klappen im Verlauf eines typischen Sommertages

Konzept der temperaturabhängigen stufenweisen Klappensteuerung

Das Regelschema zur Klappenöffnung sieht vor, dass bei einer geringen Überschreitung der Solltemperatur des Grünhofes nur wenige Klappen öffnen. Diese geringe Öffnungsfläche führt bei einer starken sommerlichen Sonneneinstrahlung zwangsläufig zu einem weiteren Ansteigen der Raumtemperatur. Erst mit steigenden Raumtemperaturen werden sukzessive weitere Klappengruppen geöffnet, wobei sich die Temperaturspanne, in der eine Regelung stattfindet bis ca. 36°C erstreckt. Erst ab dieser Temperatur ist die im Tag-Programm maximal verfügbare Klappenanzahl geöffnet. Da die Solltemperatur im Atrium im Sommer 16°C betragen soll, ist nicht nachvollziehbar, warum erst mit 36°C die maximale Öffnungsfläche zur Verfügung steht. Jedoch kann man daraus schließen, dass eine Grünhoftemperatur von 36°C offenbar bereits zum Zeitpunkt der Planung für möglich gehalten wurde. Da die mittlere Grünhoftemperatur zur Regelung herangezogen wird sind die Temperaturen in den oberen Schichten noch höher (3.OG bis zu 40°C, EG: ca. 32°C). Im Winterfall ist das Regelkonzept im praktischen Gebäudebetrieb nicht im Einzelnen nachvollziehbar. Die Nachtauskühlung wird nach wie vor praktiziert, was nur durch die Anforderung der Bepflanzung erklärlich wäre (wenn besonders tiefe Temperaturen während

der Nacht erforderlich wären). Durch die gezielte Absenkung der Grünhoftemperatur auf bis zu 5°C steigen die Wärmeverluste. Ein überarbeitetes Regelkonzept für die Klappensteuerung sollte eine durchgängig maximale Öffnung der Klappen inkl. der RWA-Klappen für Kühlperiode vorsehen, um es gar nicht erst zu einer Aufheizung der Grünhöfe kommen zu lassen. Die Führungsgröße der über die Höhe gemittelten Temperatur ist ein Kompromiss zwischen sommerlichen und winterlichen Anforderungen: Während im Sommer kritische Temperaturen in den oberen Schichten zuerst auftreten (Überhitzung der Büroräume), treten im Winter die kritischen Temperaturen in den unteren Schichten auf (Temperaturanforderungen der Bepflanzung). Daher wäre es sinnvoll als Führungsgröße jahreszeitlich zwischen oberem und unterem Temperatursensor zu wechseln. Ein zu häufiges Öffnen und Schließen der Klappen kann erfahrungsgemäß durch geeignete zeitabhängige Steuerungen und geeigneter Wahl der Lage der Temperatursensoren vermieden werden.

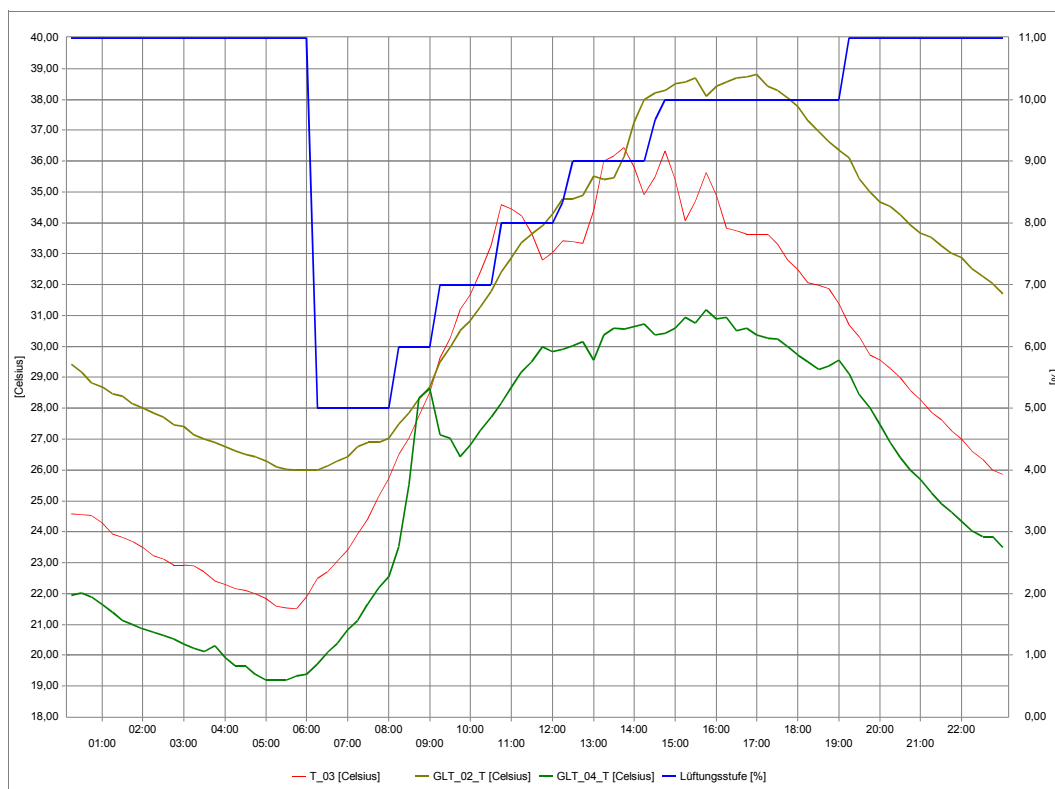


Abbildung 91 Lüftungsstufen und Atriumtemperaturen im Tagesverlauf

4.4.4.2 Führungsgrößen

Die Messung der Temperatur in den Grünhöfen erfolgt durch zwei Sensoren. Ein Sensor ist an der Fassade des Kerngebäudes auf einer Höhe von ca. 1,5m angebracht, der zweite

Sensor auf dem Dach des Kerngebäudes, siehe Abbildung 92. Der Mittelwert aus beiden Temperaturmessungen bildet die Basis für die Gebäuderegulung.



Abbildung 92 Temperatursensoren zur Messung der der Temperaturen im Grünhof D-E

Zur Überprüfung der Genauigkeit der GLT-Sensoren erfolgt ein Abgleich mit den auf gleicher Höhe frei hängenden, strahlungsgeschützten Sensoren der zusätzlich installierten Messtechnik. Im mehrtägigen Tagesverlauf zeigt sich eine Abweichung der Sensoren nach oben von 2 K für den unteren bzw. 4 K für den oberen Sensor im Sommer, siehe Abbildung 93 und Abbildung 94. Im Winter ist diese Differenz insbesondere für den oberen Sensor noch größer und beträgt bis zu 11 K. In der Abbildung 96 und der Abbildung 97 sind die Werte der GLT-Sensoren in Abhängigkeit von den Werten der eigenen Messungen dargestellt und zwar auf Basis des gesamten Messzeitraumes. Während der untere Sensor ganzjährig ein Offset von 2 – 3 K mit größer werdenden Streuungen bei hohen Temperaturen aufweist, zeigt der obere Sensor eine zunehmende Abweichung für niedrige Temperaturen. Ursächlich für die Abweichung des oberen GLT-Sensors ist die Abwärme des Kerngebäudes, die insbesondere im Winter zum Tragen kommt. Das generelle Offset von 2 K für beide Sensoren könnte seine Ursache in der Grundjustierung der Sensoren haben. Berücksichtigt man die Mittelwertbildung aus beiden Sensoren für die Gebäuderegulierung ergibt sich ein resultierender Fehler für die gemittelte Grünhoftemperatur von 3 K - 7 K nach oben. Für eine präzise Temperaturregelung der Grünhöfe ist die Lage und Kalibrierung der GLT-Sensoren somit ungeeignet. Die Abweichung der Messwerte nach oben kompensiert jedoch ein wenig die zu späte Öffnung der temperaturgesteuerten Klappen.

Ungeachtet der Abweichung der GLT-Sensoren erfolgt die Mittelwertbildung an sich korrekt, wie der Abgleich des durch die GLT ausgegeben Mittelwertes mit einer eigenen Mittelwertberechnung ergibt, siehe Abbildung 95.

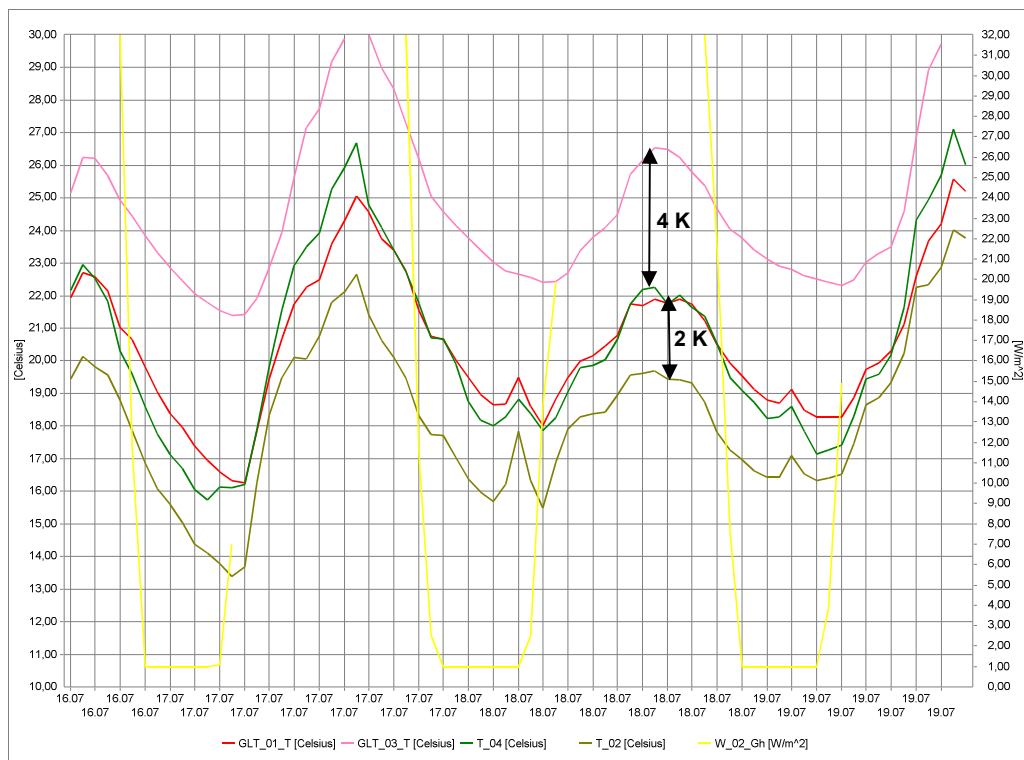


Abbildung 93 Abgleich der GLT Sensoren mit den eigenen Sensoren, Grünhof D-E, Sommer (GLT: Gebäudeleittechnik; T_04 und T_02: eigene Sensoren; W_02: Globalstrahlung)

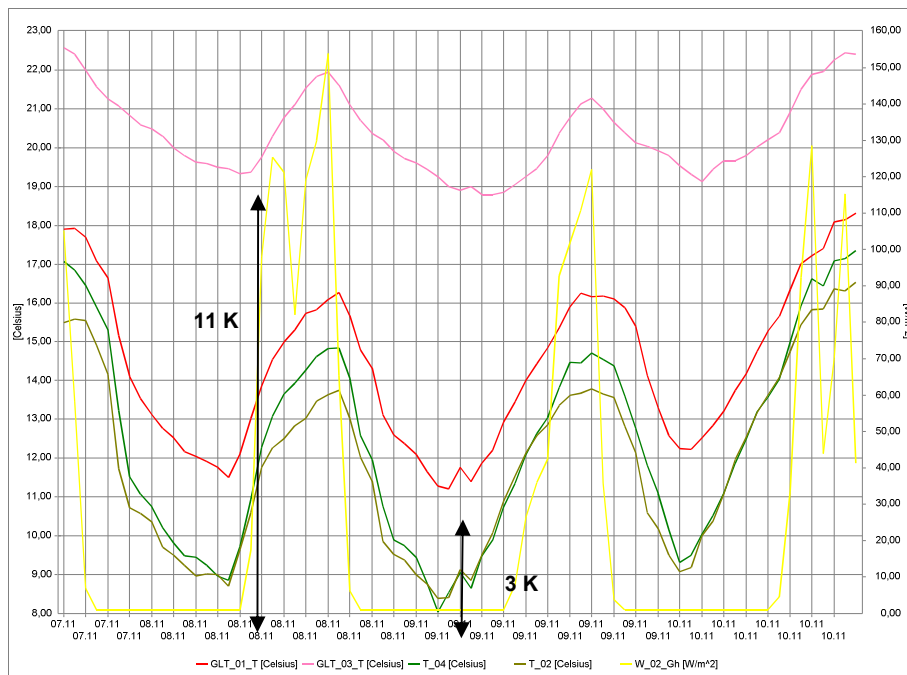


Abbildung 94 Abgleich der GLT Sensoren mit den eigenen Sensoren, Grünhof D-E, Winter (GLT_01 GLT Temperatur unten; GLT_02 GLT Temperatur oben; T_04 IGS Sensor unten; T02 IGS Sensor oben; W_02 Globalstrahlung)

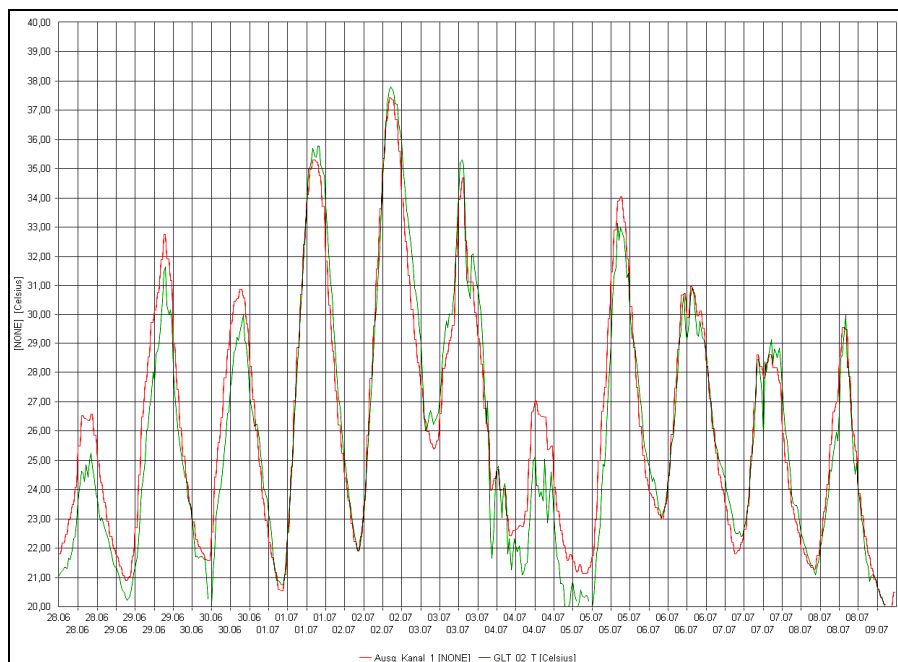


Abbildung 95 Überprüfung der Mittelwertbildung der beiden Temperatursensoren der GLT, Grünhof D-E , durch Gegenüberstellung des selbst berechneten Mittelwertes (Ausg_Kanal_1) mit dem Ausgabewert der GLT (GLT_D2)

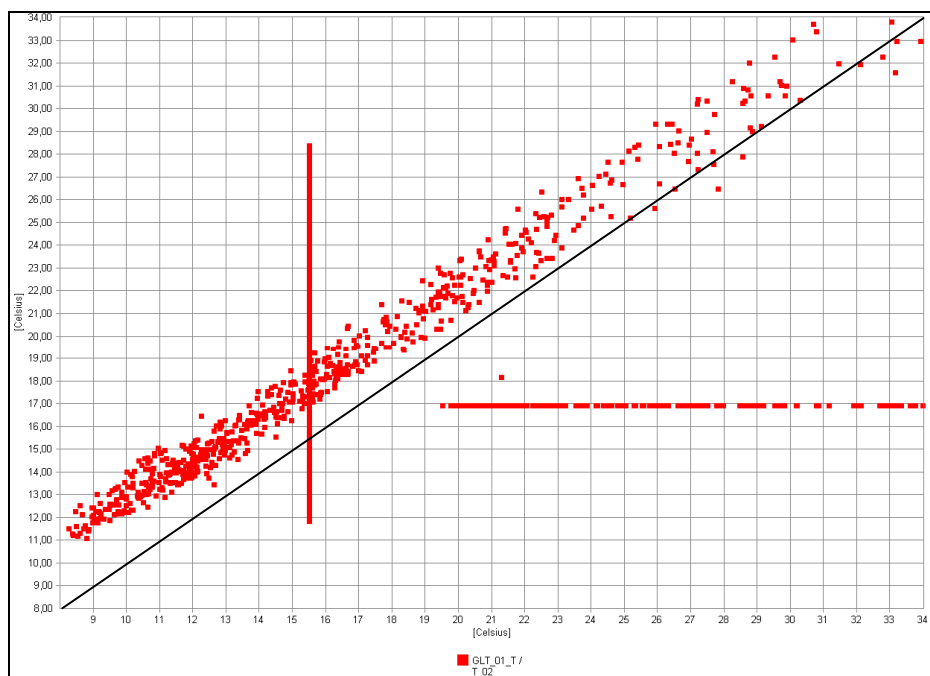


Abbildung 96 Abgleich unterer Temperatursensor der GLT mit eigenen Temperaturmessungen (GLT 01 GLT Sensor auf Y-Achse; T_02 IGS Sensor auf x-Achse)

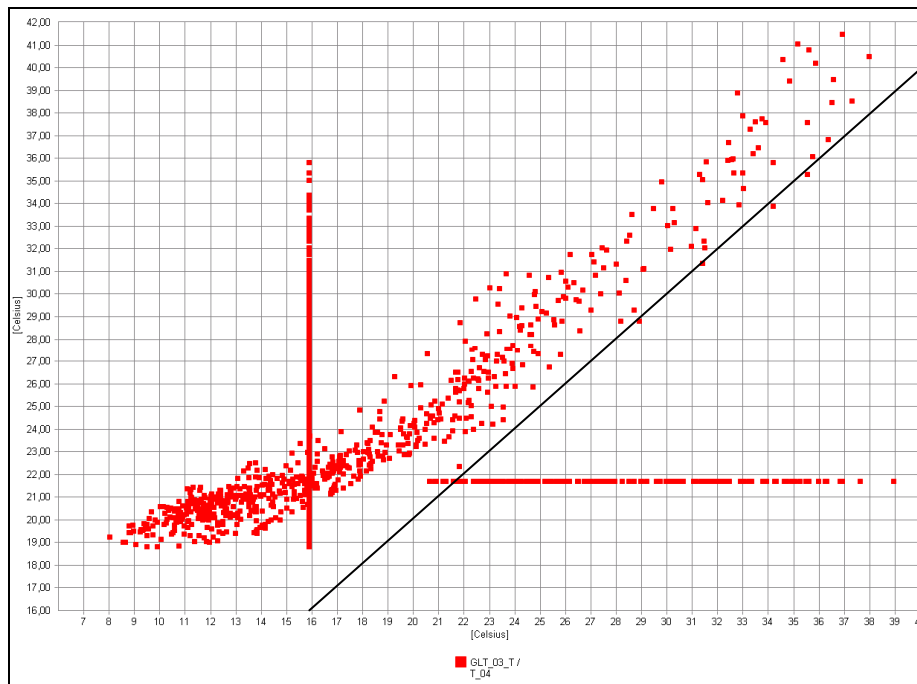


Abbildung 97 Abgleich oberer Temperatursensor mit eigenen Temperaturmessungen (GLT 03 GLT Sensor auf Y-Achse; T_04 IGS Sensor auf x-Achse)

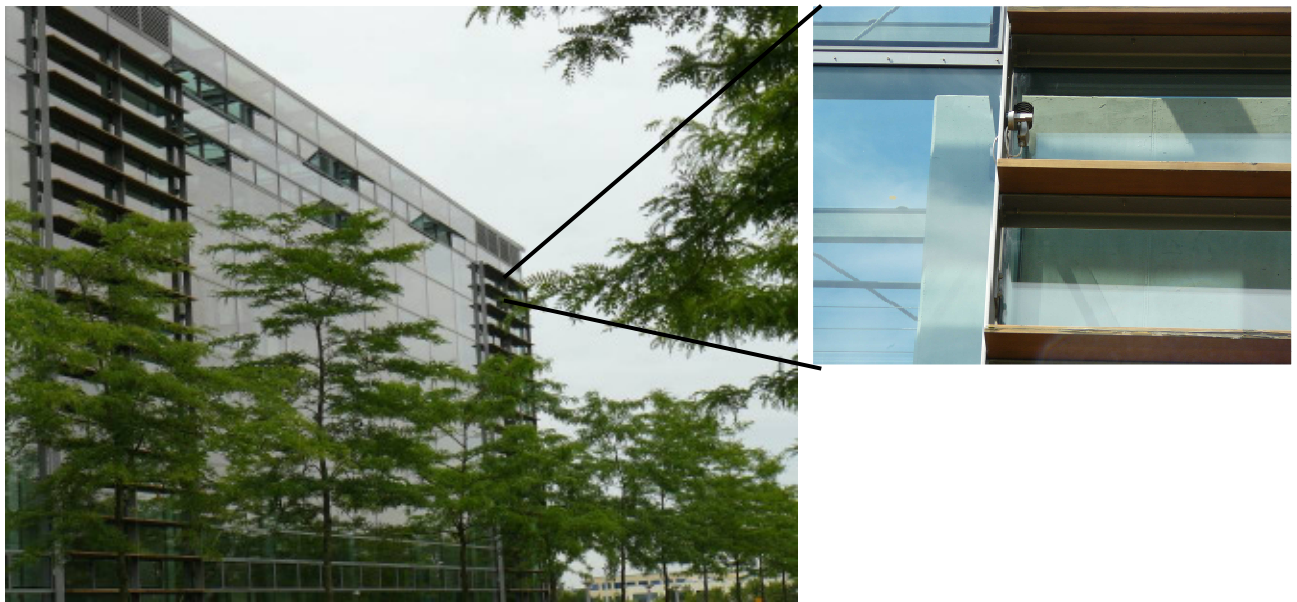
Außentemperatursensoren

Die gemessene Außentemperatur ist eine weitere maßgebliche Eingangsgröße für die Gebäuderegulierung. Sie entscheidet z.B. darüber, wann die Betriebsart von Sommer auf Winter umgestellt wird. Im Rahmen des Langzeitmonitorings erfolgte die Messung der fassadennahen Lufttemperaturen, die letztendlich die maßgebliche Zulufttemperatur wiedergeben. Für diese Sensoren zeigt sich eine starke Abhängigkeit vom Sonnenstand. Der gebäudeeigene Außentemperatursensor befindet sich auf der Ost-Seite des Gebäudes, siehe Abbildung 98

Die fassadennahen Sensoren des Langzeitmonitorings befinden sich tiefer auf einer Höhe von ca. 2,0 m über GOK. Die Gegenüberstellung der Temperaturverläufe für einen sonnigen Tag im September zeigt, dass der GLT-Sensor vom Sonnenstand unbeeinflusst zu sein scheint, während die tiefer gelegenen Sensoren des Langzeitmonitorings eine deutliche Abhängigkeit vom Sonnenstand aufweisen (Seitenwechsel der Sonne um 14:00). In der Nacht sind alle Sensoren in etwa auf dem gleichen Niveau, was für eine korrekte Kalibrierung der Sensoren spricht. Vormittags stimmt der GLT-Sensor überraschenderweise mit dem Sensor auf der gegenüberliegenden Westseite überein. Hierfür sind zwei Ursachen

denkbar: Entweder der Außentemperatursensor der GLT liegt tatsächlich auf der West- und nicht, wie angenommen, auf der Ostseite, oder aber die exponierte und erhöhte Lage des GLT-Sensors erfährt einen deutlicheren Windeinfluss und ist daher unabhängig von der Strahlung. Ein Vergleich mit dem Temperatursensor der Wetterstation des Langzeitmonitorings bestätigt die relative Strahlungsunabhängigkeit des GLT-Sensors. Bei starker Sonneneinstrahlung zeigt der Temperatursensor der Wetterstation (dauerhaft beschienene Dachfläche) höhere Temperaturen als der GLT-Sensor, siehe Abbildung 100 und Abbildung 101. Nachts und bei schwacher Sonnenstrahlung sind beide Sensoren gleichauf.

Auch wenn die Lage des GLT Außentemperatursensors nicht mit Sicherheit bekannt ist, so kann festgestellt werden, dass der Sensor die unbeeinflusste Außenlufttemperatur mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt.

**Abbildung 98**

Vermutete Lage des Außentemperatursensors der GLT auf der Ostseite des Gebäudes

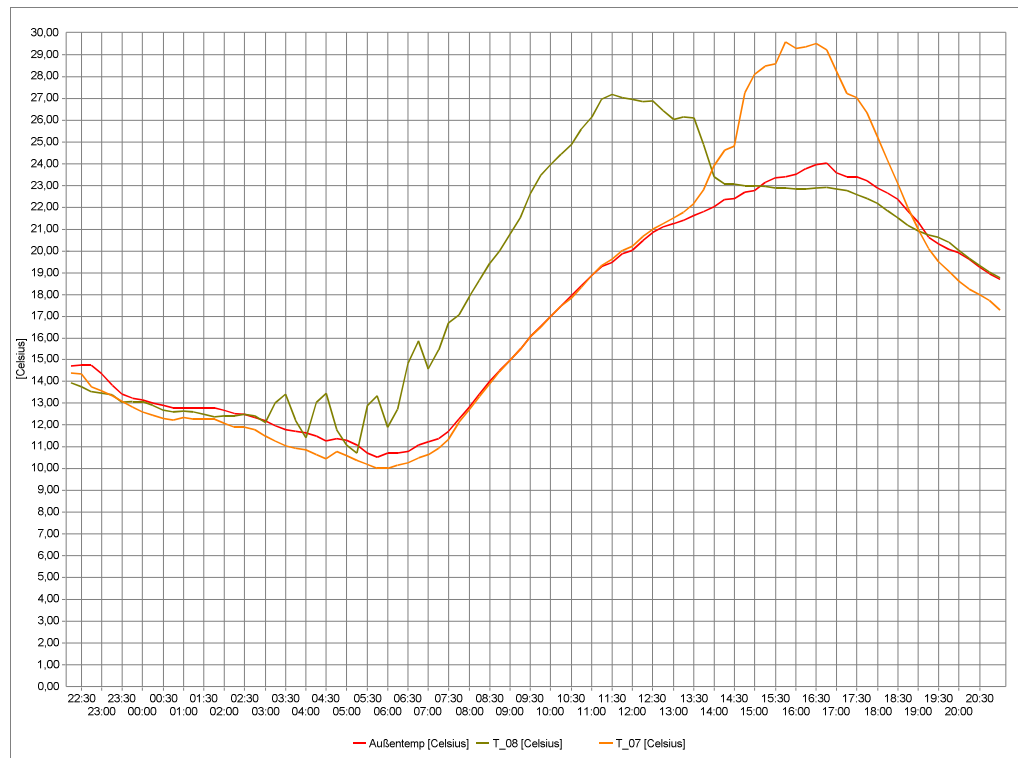


Abbildung 99 Gegenüberstellung des GLT-Außentempersensors (Außentemp) mit den fassadennahen Sensoren des Langzeitmonitorings (T_08; T_07)

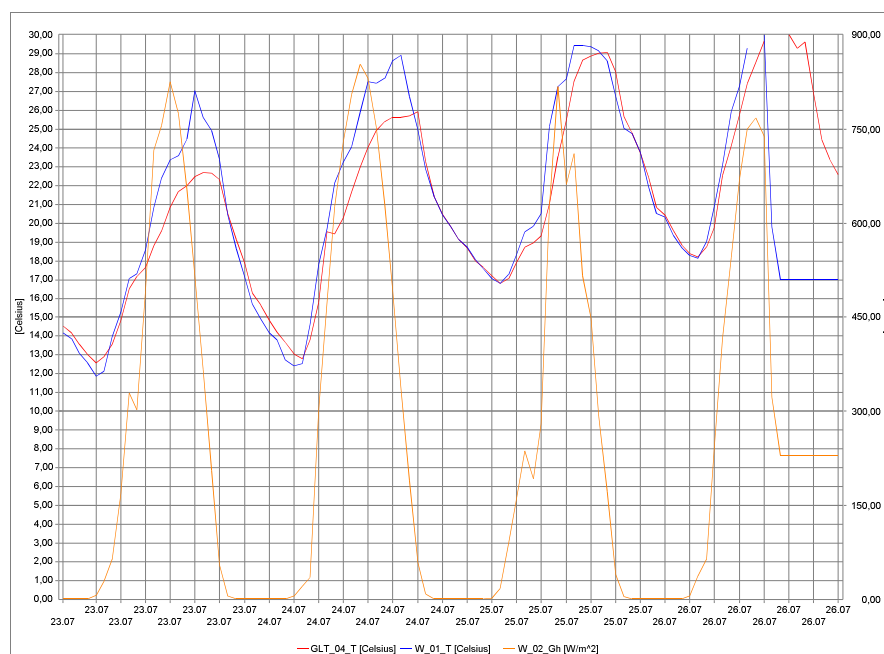


Abbildung 100 Gegenüberstellung des GLT-Außentempersensors (GLT_04) mit dem Außentempersensor der Wetterstation auf der Dachfläche (W_01); Globalstrahlung: W_02

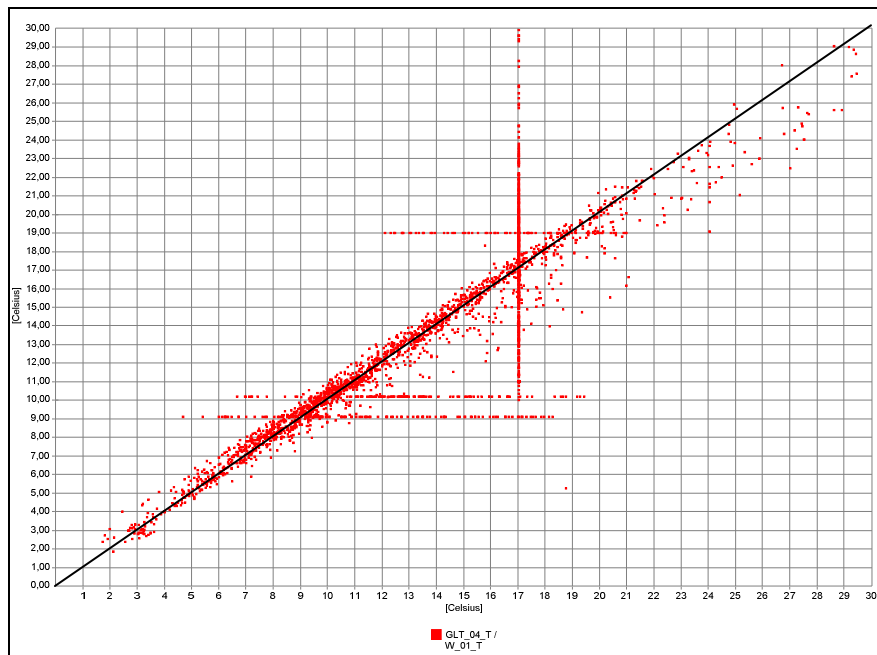


Abbildung 101 GLT-Außentempersensor und Außentempersensor der Wetterstation auf der Dachfläche , x-y-Abhängigkeit (GLT 04 GLT-Sensor auf y-Achse; W_01

4.4.5 Optimierungspotential

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass insbesondere die sommerliche Überhitzung in den Grünhöfen mit einer nachhaltigen Wirkung auf den Kühlbedarf des Gebäudes durch eine verbesserte Regelung der Klappensteuerung erheblich verringert werden könnte. Obwohl Öffnungsflächen für eine ausreichende Lüftung bei starker solarer Einstrahlung vorhanden sind, werden diese während der höchsten Temperaturen nicht genutzt. Hintergrund dieses Regelkonzeptes ist eine Schonung der Stellmechanismen der Klappen. Es sollen grundsätzlich nicht mehr Klappen gefahren werden als erforderlich und infolgedessen werden immer nur Gruppen einer geringen Anzahl von Klappen bei steigenden Grünhoftemperaturen hinzugeschaltet. Das bestehende Regelkonzept erlaubt eine Aufheizung der Grünhöfe auf 36°C, bevor die maximal verfügbare Anzahl von Klappen geöffnet werden.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand spräche nichts gegen eine dauerhafte (24/7) Öffnung aller zur Verfügung stehenden Klappen während der gesamten Kühlperiode. Einschränkungen sind Kälteeinbrüche oder Regen- und Windwarnungen. Ein neues Regelkonzept für die Klappensteuerung sollte evaluiert und im Betrieb angepasst werden.

Während der Heizperiode stellt die Bepflanzung in den Grünhöfen Anforderungen an das Temperaturniveau in den Grünhöfen. Die Temperatur in den Grünhöfen darf zur Einhaltung der Vegetationsruhe 15°C nicht überschreiten, eher sind Temperaturen um die 10°C anzustreben. Dies entspricht den Vorgaben des zuständigen Grünhof-Pflegers. In den Grünhöfen befinden sich mediterrane Pflanzen, die bei Temperaturen unterhalb 15°C das Wachstum einstellen. Würden die Temperaturen im Winter über 15°C steigen, beginnen die Pflanzen das Wachstum. Aufgrund der kurzen Tage und dem geringen Lichtangebot im Winter würden die Pflanzen zum Schießen (übermäßiges Längenwachstum) neigen. Um dies zu verhindern wäre ein sehr starkes Lichtangebot im Bereich von 20.000-30.000 LUX erforderlich. Mit der vorhandenen Beleuchtung ließe sich diese Bestrahlungsstärke nicht umsetzen. Nach Aussage des Grünhofpflegers entsprechen 15°C der maximal zuträglichen Temperatur für die Bepflanzung zur Einhaltung der Vegetationsruhe.

Bei einer Außentemperatur von 13°C erfolgt gem. Regelkonzept die Anforderung zur Klappenöffnung nach Lüftungsstufe 2. Bei dieser Lüftungsstufe werden 4 Klappengruppen in der obersten Ebene geöffnet. Bei den Nebelversuchen hat sich gezeigt, dass die eindringende kalte Luft nach unten fällt. Warme Luft zieht wieder oben ab. Infolgedessen wird der Grünhof auf der gesamten Höhe durchströmt, siehe Abbildung 102. Eine in diesem Fall wünschenswerte Temperaturschichtung kann sich nicht einstellen. Bei einer Temperaturschichtung würden sich die Pflanzen in einem Kaltluftsee mit maximal 15°C befinden, wohingegen zumindest in den oberen Ebenen eine höhere Temperatur erzielt werden könnten, mit dem Ziel solare Wärmegewinne für eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs nutzbar zu machen.

Versuchsweise erfolgt die Öffnung der gleichen Anzahl der Lüftungsklappen auf in der untersten Ebene (h=2m). Parallel erfolgt die Messung der Lufttemperaturen über die Höhe, siehe Abbildung 103.

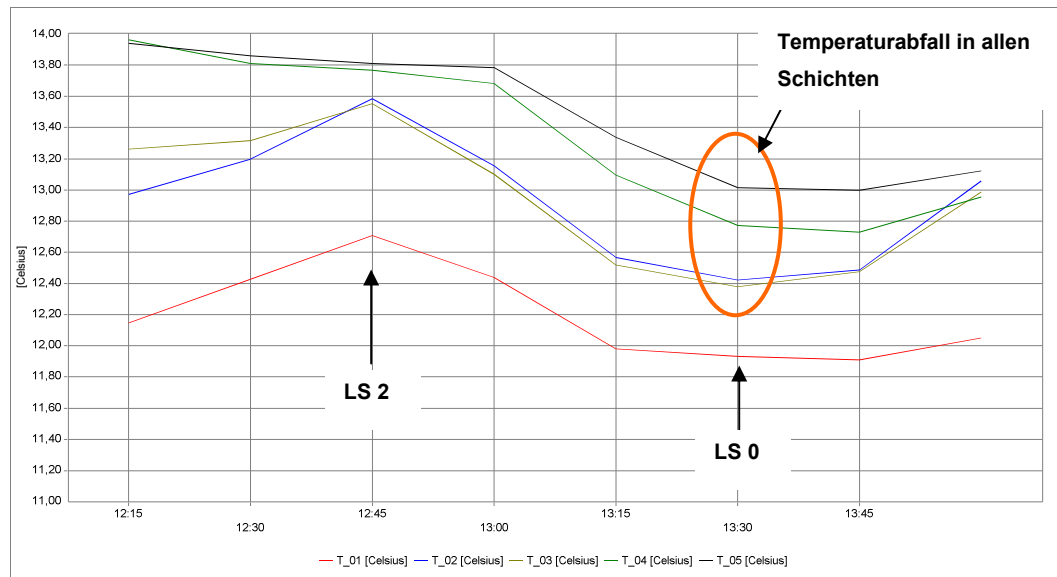


Abbildung 102 Lüftungsstufe 2, obere Klappen werden geöffnet, die Temperaturen fällt auf allen Schichten

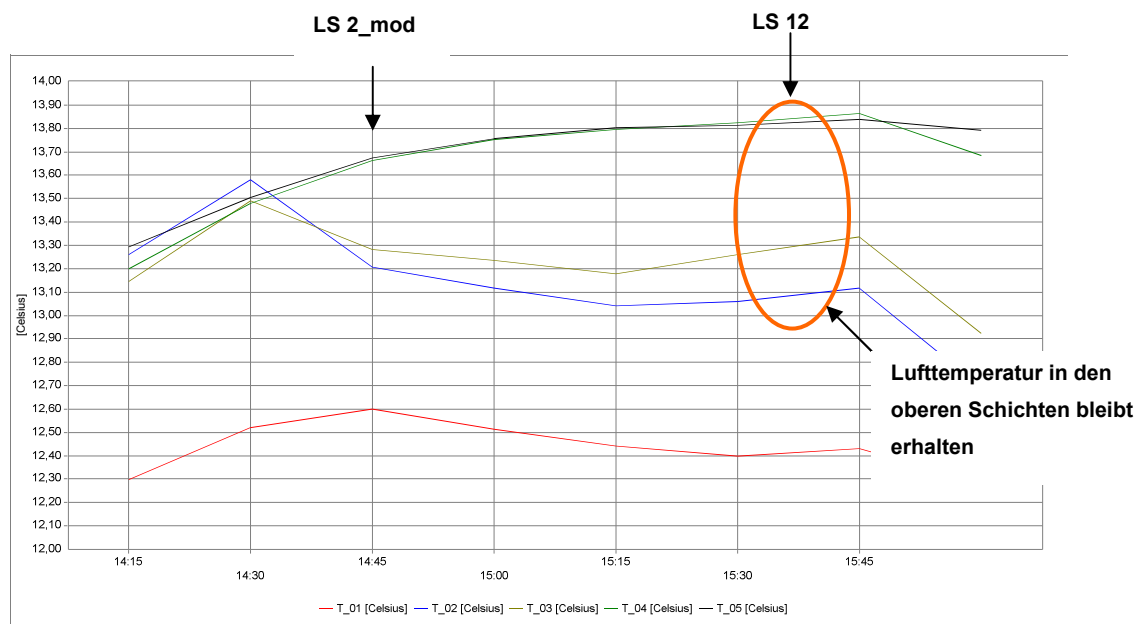


Abbildung 103 Werden in einer modifizierten Öffnungskombination nur die unteren Klappen geöffnet, wirkt sich dies nicht auf die Temperaturen in den oberen Schichten aus

Bei der modifizierten Klappenkombination bleibt die Lufttemperatur oberhalb des 2.OG erhalten. Der Versuchszeitraum betrug hier nur eine halbe Stunde, bei der fortwährenden Anwendung dieser Lüftungsstrategie ist aufgrund von Wärmespeichereffekten der umgebenden Flächen mit einer stärkeren Ausprägung der Temperaturschichtung zu rechnen.

4.5 Thermisches Verhalten der Atrien

4.5.1 Temperaturniveau Sommer - Winter

4.5.2 Temperaturschichtung

Sowohl in der Querschnittsanalyse der Phase I als auch in der Feinanalyse der Phase II konnten im Sommer erhebliche Temperaturschichtungen beobachtet werden. Während auf Höhe des EG durchaus Außentemperaturen vorzufinden sind, können im 4. oder 5.OG Übertemperaturen von bis zu 10 K beobachtet werden. Die einzigen, nicht-konstruktiven Möglichkeiten den Übertemperaturen in den oberen Ebenen zu begegnen, besteht neben einer Erhöhung des Luftwechsels durch eine Vergrößerung der effektiven Öffnungsfläche zur Belüftung, die Möglichkeit der Querlüftung im oberen Bereich, sofern zuvor eine windabhängige einseitige Klappenöffnung erfolgte. Im Fall des NIZ konnten so

Überhitzungen im 4.OG verringert werden. Konstruktiv besteht die Möglichkeit einer Überhöhung des Luftraums über die Oberkante des Kerngebäudes hinaus, so dass die wärmsten Luftschichten die Aufenthaltsbereiche und Büroräume nicht tangieren. Der Luftraum einer Überhöhung kann als Puffer für erwärmte aufsteigende Luft dienen, bevor dies durch Abluftöffnungen abziehen kann.

4.5.3 Luftwechselzahlen bei freier Lüftung

Im Sommer konnten bei verschiedenen Klappenstellungen beim Objekt LBN Luftwechselzahlen zwischen $2,0 \text{ h}^{-1}$ und $2,8 \text{ h}^{-1}$ beobachtet werden. Auf Basis der Ergebnisse des Langzeitmonitorings und durch die Beobachtung der Temperaturentwicklung im Tagesverlauf, kann festgestellt werden, dass die Luftwechselzahlen bei Weitem zu gering sind und zu einer erheblichen Überhitzung des Atriums führen. Die British Standard Method zur Berechnung des Außenluftvolumenstroms bei natürlicher Lüftung gibt ein Abgrenzungskriterium vor, ob thermische Auftrieb oder der Windeinfluss den Luftwechsel bestimmt. Demnach bestimmt für alle untersuchten Sommerfälle der Windeinfluss den Luftwechsel, da die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen für einen thermisch induzierten Luftwechsel zu gering ist. Rauchversuche an den unteren Öffnungsklappen während eines heißen Sommertages haben gezeigt, dass zwar überwiegend Luft an der unteren Klappe einströmt, es aufgrund des turbulenten Verhaltens des leichten Windes jedoch auch zu einer Strömungsumkehr kam. Dies verdeutlicht den überwiegenden Einfluss des Windes bei geringen Temperaturdifferenzen. Nur bei annähernd Windstille überwiegt der thermisch induzierte Antrieb.

4.5.4 Strömungspfade und Durchströmungsformen

Die einzelnen, nicht systematisch durchgeführten Rauchversuche während der Kurzzeitmessungen haben folgende Erkenntnisse hervorgebracht.

Infolge der turbulenten Windanströmung sind keine konstanten Druckdifferenzen an den Öffnungsflächen zu beobachten. Rauchversuche an den Öffnungsflächen haben gezeigt, dass sich eine pumpende Luftbewegung mit mehrfacher Strömungsumkehr einstellt.

Eine sonnenbeschienene Fassadenfläche innerhalb des Atriums entwickelte eine Warmluftschicht, die nach oben aufsteigt. Infolge fehlender Winde innerhalb des Atriums sind diese Luftschicht und ihre Aufwärtsbewegung stabil.

Thermischer Auftrieb innerhalb des Atriums und Impulse der einströmenden Luft kann eine Luftwalze mit einer Ausdehnung über das gesamte Atrium erzeugen. Ein Kaltluftabfall an vertikalen Flächen kann dadurch verstärkt werden.

Weiterhin bewirkt der thermische Auftrieb –sowohl im Sommer an sonnenbeschienenen Flächen, als auch im Winter durch die direkte oder indirekte Beheizung- eine weitestgehende Durchmischung des Raumvolumens. Dies haben sowohl die Rauchversuche gezeigt, die Ergebnisse der Strömungssimulationen und der logarithmische Abfall der Tracergaskonzentration bei den Luftwechselversuchen. Ausnahmen bilden Fälle, in denen die Luftwechselzahl sehr hoch ist und eine gerichtete Durchströmung erfolgt. Dies ist beim EFB während der Wintermessung der Fall, wobei anzumerken ist, dass bei der niedrigen Außentemperatur während Versuchsdurchführung und dem daraus resultierenden hohen thermischen Antrieb für den Außenluftwechsel im Normalbetrieb keine Öffnung der Lamellen erfolgt wäre und diese Öffnung nur für die Versuchsdurchführung erfolgte. Insofern kann in der Regel in einem Atrium von einer Durchmischung während der Durchströmung ausgegangen werden.

4.5.5 Identifizierung der Einflussgrößen auf das thermische Verhalten

Betrachtet man das thermische Verhalten der Atrien, so erweist sich die sommerliche Überhitzung als größte Einschränkung und schwierig zu bewältigendes Problem. Die geringsten Überhitzungen weisen 4-seitig umschlossene Atrien auf, insbesondere in den nicht direkt beschienenen unteren Ebenen. Problematisch sind vor allen Dingen Atrien, die über vertikale Glasflächen verfügen, die noch dazu in Richtung Süden oder Westen ausgerichtet sind. Dies ist bei den Objekten LBS (Süd-West-Ausrichtung) und EFB (Südausrichtung) der Fall. Hier fallen hohe Außentemperaturen ab Mittag mit einem hohen solaren Wärmeeintrag zusammen. Alle in der Phase II untersuchten Atrien verfügen über ein Sonnenschutzglas mit einem g-Wert von 0,34. In Anbetracht der Tatsache, dass die zur Verfügung stehenden Öffnungsflächen in vielen Situationen der erforderlichen Wärmeabfuhr schon bei diesem g-Wert nicht gerecht werden, also die Atrien überhitzen, kann man davon ausgehen, dass höhere g-Werte die Überhitzungen in einem Atrium erheblich forcieren würden. Daraus folgt die Forderung, grundsätzlich die Atriumverglasung mit einem g-Wert $\leq 0,34$ zu verwenden.

Übertemperaturen in einem Atrium sind generell nicht vermeidbar, wenn durch natürliche Lüftung Wärme abgeführt werden soll. Bei Windstille muss eine wirksame Temperaturdifferenz zwischen Innen und außen bestehen, damit ein Antrieb für den Luftaustausch besteht.

Jedoch kann vermieden werden, dass in allen Höhen des Luftraums die Außentemperatur überschritten wird. Die Nachteile der erwärmten Luft im Atrium können eingedämmt werden, indem das Atrium überhöht wird. In der Phase I erfolgte eine Darstellung der Abhängigkeit der Atriumtemperaturen auf verschiedenen Höhen von der Außentemperatur. Aufgrund dieses Zusammenhanges ist es möglich Atriumtemperaturen bei ähnlichen Gebäudekonzepten vorab abzuschätzen oder Planungsergebnisse zu überprüfen.

Im Winterfall wird das Temperaturniveau im Atrium durch die Wärmedämmung der Fassade bestimmt, sofern nicht aus anderen Gründen eine gezielte Absenkung der Atrientemperatur erforderlich ist. Bei den untersuchten Gebäuden ist im Winter eine Temperaturdifferenz zwischen Atrium und außen zu beobachten. Die Kenntnis der Bandbreite der Übertemperaturen in Atrien auf verschiedenen Höhen bei verschiedenen Außentemperaturen ist in der Entwurfsphase für die Abschätzung des thermischen Verhaltens der Atrien ein zuverlässiges Hilfsmittel für den Entwurf von Atrien.

4.5.6 Randbedingungen für die Simulation

Sowohl für thermische als auch für CFD- Simulationen ist die Wahl der Randbedingungen ausschlaggebend für das Ergebnis. Relevant sind vor allen Dingen die Randbedingungen, die durch das Außenklima vorgegeben werden. Dazu zählen

- Sonnenstand, Strahlungsstärke, diffuser und direkter Strahlungsanteil
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit
- Außenlufttemperatur

Auf dem Dach des Kerngebäudes der LBS Nord ca. 2,0 m unter der Verglasung des Grünhofes erfasst ein Globalstrahlungssensor die horizontale Strahlungsstärke innerhalb des Grünhofes. Der Sensor ist so montiert, dass er die meiste Zeit der direkten Strahlung ausgesetzt ist. Im Tagesverlauf gibt es zwei Einbrüche in der Strahlungsstärke durch die Verschattung der Rahmen der Dachfassade. Parallel erfolgt die Messung der Globalstrahlungsstärke außerhalb des Gebäudes. Der Quotient beider Messwerte bildet den Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung bezogen auf die horizontale Globalstrahlungsstärke bei nicht senkrechtem Strahlungseinfall. Durch diese Messung wird geprüft, in wie

weit Verschmutzungen und Winkelabhängigkeit des g-Wertes den Strahlungsdurchgang beeinflussen und in wie weit die Annahmen mit der Praxis übereinstimmen. Die Winkelabhängigkeit des g-Wertes bedingt sich durch die zunehmende Reflektion der auftretenden Strahlung bei zunehmender Abweichung aus der Senkrechten. Die Angaben der Glashersteller und die Annahmen im Berechnungsalgorithmus der thermisch dynamischen Simulationsprogramme basieren auf Berechnungen, die die physikalischen Gesetze der Strahlungsreflektion zur Grundlage haben. Infolge des veränderlichen Sonnenstandes ändert sich im Tagesverlauf der Einfallswinkel, wodurch der g-Wert im Tagesverlauf ebenfalls eine Änderung erfährt. Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen den Verlauf der Globalstrahlungsstärke innerhalb und außerhalb des Grünhofes für einen Winter- und einen Sommertag und dem daraus gebildeten Quotienten, der den g-Wert bildet. Während morgens und abends die Strahlung in einem sehr flachen Winkel einfällt und die Sensoren teilweise verschattet werden, zeigt die Kurve des Quotienten Unstetigkeiten. Der innenliegende Sensor wird im Tagesverlauf dreimal durch die Rahmen der Überkopfverglasung verschattet, so dass zu diesen Zeitpunkten der ermittelte g-Wert ebenfalls einbricht. Abgesehen von diesen Störungen ergibt sich ein annähernd stetiger Verlauf. Für den Wintertag mit ausschließlich diffusem Strahlungsanteil schwankt der g-Wert bei feiner Auflösung im Tagesverlauf erheblich, so dass ein stündlicher Mittelungszeitraum für die Darstellung gewählt wird.

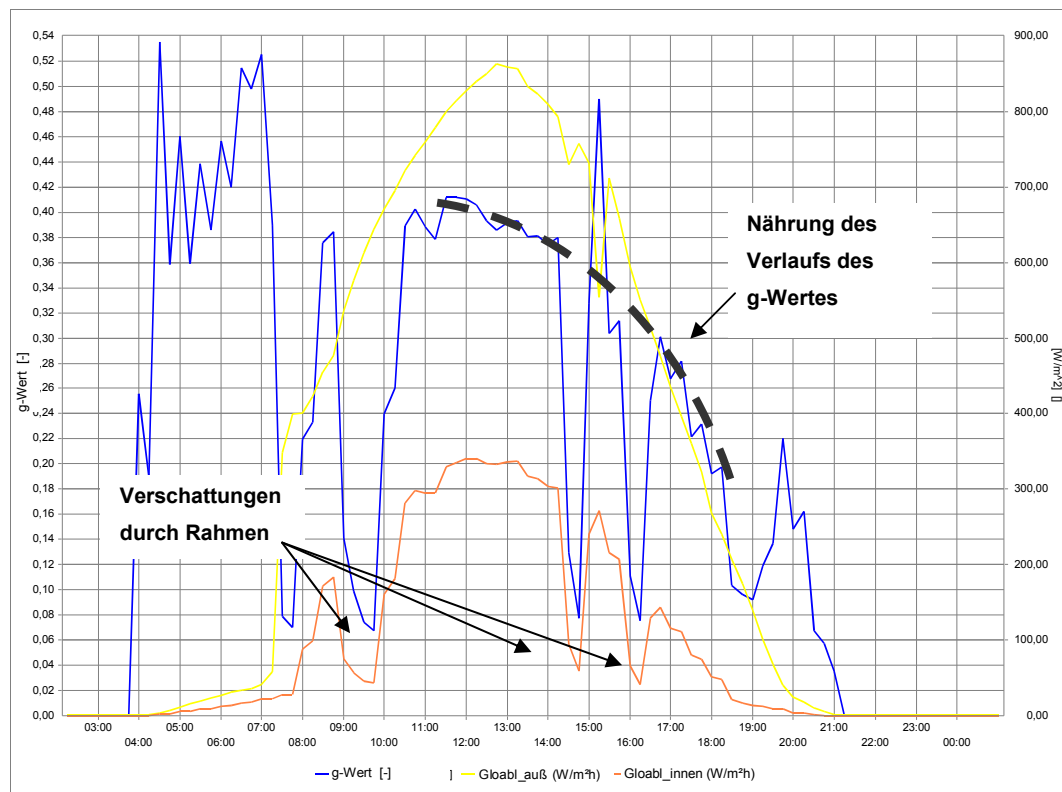


Abbildung 104 Globalstrahlungsstärke innerhalb (Glob:innen) und außerhalb (Glob_außen) des Grünhöfe im Tagesverlauf am 24.Juli und dem daraus gebildeten Quotienten (g-Wert)

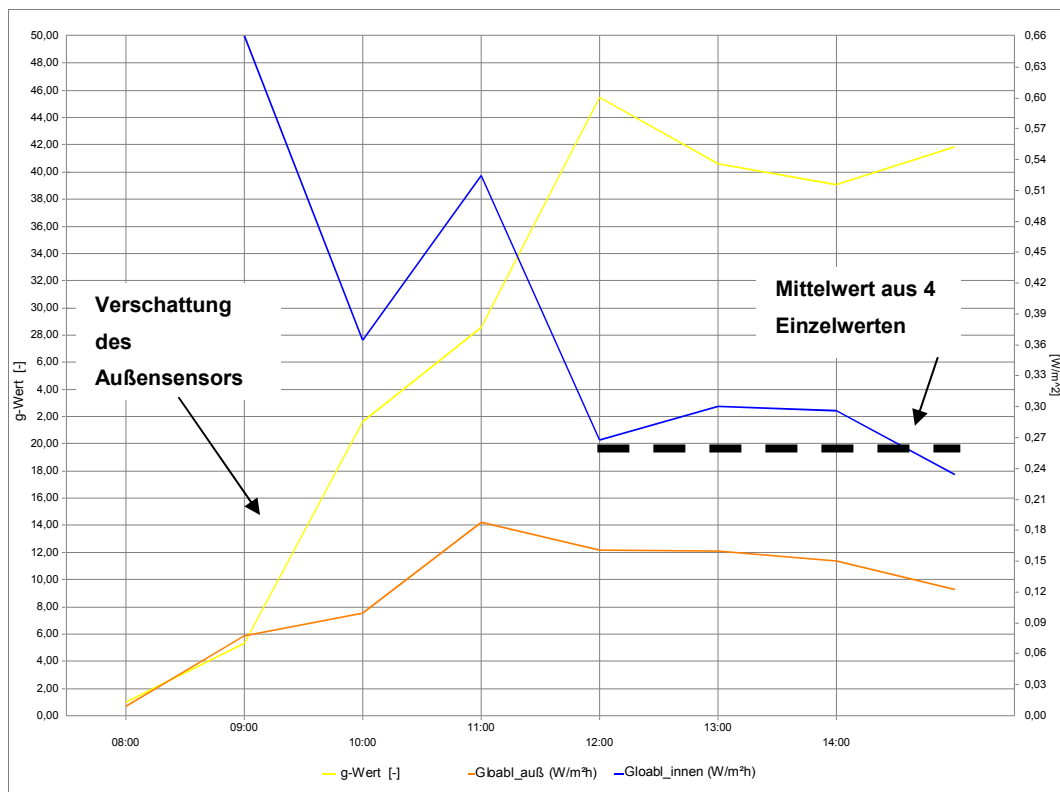


Abbildung 105 Globalstrahlungsstärke innerhalb (Glob_innen) und außerhalb (Glob_außen) des Grünhöfe im Tagesverlauf am 24. November und dem daraus gebildeten Quotienten

Zur Überprüfung des ermittelten g-Wertes erfolgt ein Abgleich mit dem Einfallswinkel im Tagesverlauf, siehe Sonnenstandsdiagramm Abbildung 106, und den berechneten winkelabhängigen g-Werten. Die berechneten g-Werte entstammen dem thermisch dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS für die Glassorte Ipasol natura 16/4/16 des Herstellers Interpane. Für Einfallswinkel zwischen 10° und 60° sind die durch Messung ermittelten g-Werte **10-20% höher** als die theoretischen g-Werte. Als mögliche Ursache ist die durch die seitliche vertikale Verglasung zusätzlich einfallende Strahlung zu nennen. Eine weitere Einflussmöglichkeit ist geben durch die Lage des außenliegenden Sensors. Durch eine in der Nähe befindlichen vertikalen Fläche, die zwar keinen Einfluss auf den direkten Strahlungsanteil hat, kann jedoch der diffuse Strahlungsanteil reduziert werden. Für die Diffusstrahlung ergibt sich ein ca. 3% höherer Wert.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Abweichungen zwischen theoretischem und tatsächlichem Wert durch Messfehler erklärlich sind und der winkelabhängige g-Wert durch

Berechnungen in dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen die richtige Tendenz aufweist.

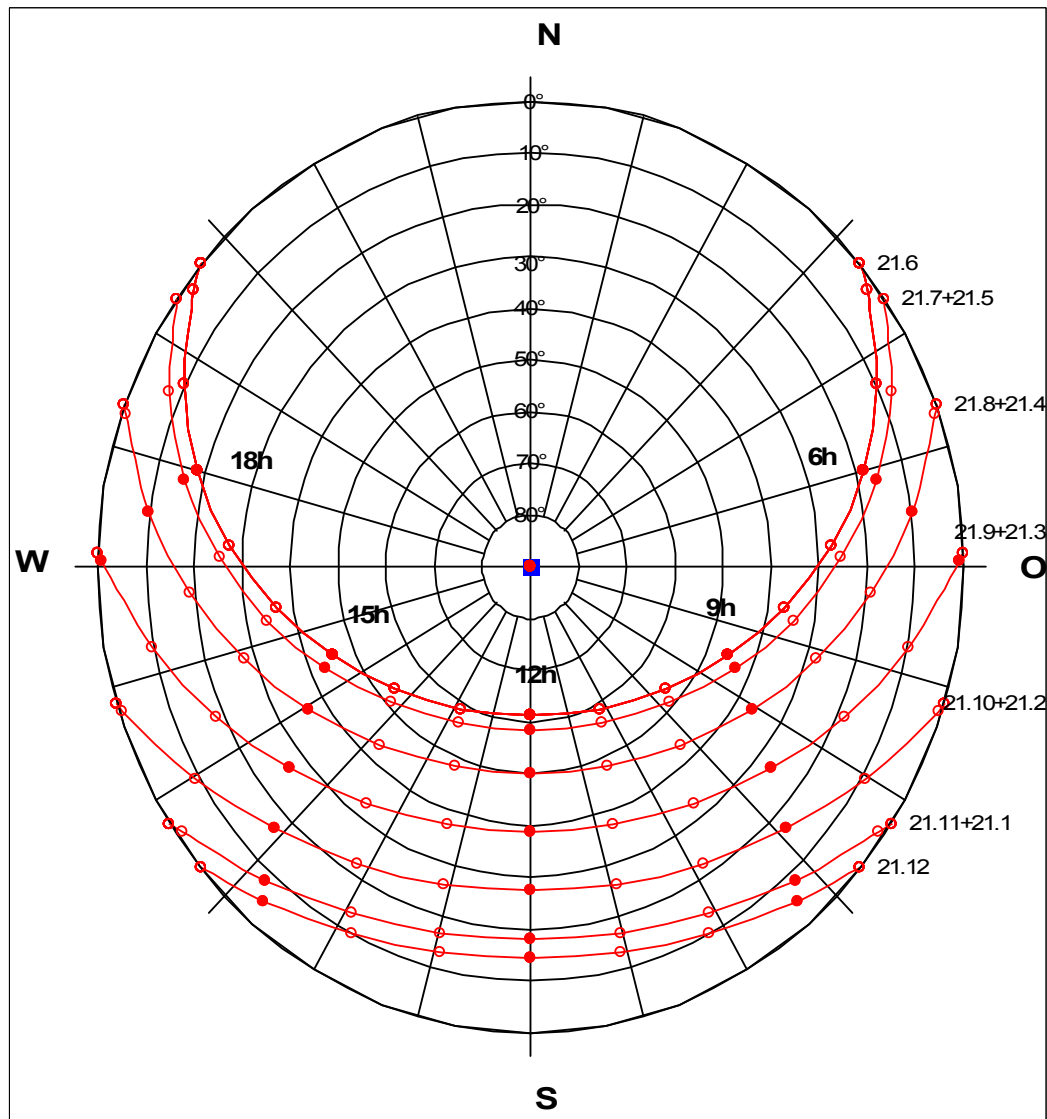


Abbildung 106 Sonnenstandsdiagramm für Hannover

Tabelle 15 Gegenüberstellung gemessener und ermittelter winkelabhängiger g-Werte

Einfallswinkel [°]	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	Diffus
Theoretischer g-Wert [-]	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0,27	0,20	0,10	0	0,27
Gemessener g-Wert [-]	-	-	-	0,39	0,38	0,33	0,29	0,23	0,12	-	0,28

4.6 Energetische Bewertung mit einer thermisch-dynamischen Simulation

4.6.1 Thermisch-dynamische Simulation

Anhand des Gebäudes der LBS erfolgt eine thermische Simulation mit dem Ziel, den Einfluss eines Atriums auf den Energieverbrauch eines Gebäudes zu quantifizieren. Problematisch an einer derartigen Aussage ist die Bildung eines adäquaten Referenzwertes für ein Gebäude ohne Atrium: Gebäude mit beheizten Atrien, die nach der Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSVO 95) geplant wurden, weisen atrienseitig eine geringere Wärmedämmung auf, als es ohne Atrium erforderlich wäre. Dies ist für die Gebäude NIZ und EFB der Fall. Wie diese Gebäude ohne Atrium geplant worden wären, kann nur vermutet werden. Eine derartige Annahme ist als Referenzwert für einen objektiven Vergleich ungeeignet.

Ein weiterer Ansatz wäre gewesen, messtechnisch den Energieverbrauch von Räumen, die zu einem Atrium hin ausgerichtet sind, mit dem Energieverbrauch von Räumen, die nach außen hin ausgerichtet sind, zu vergleichen. Neben den erwähnten unterschiedlichen konstruktiven Randbedingungen, finden sich bei diesem Ansatz eine Reihe von weiteren Einflussparametern, die sich messtechnisch nicht quantifizieren lassen. Genannt seien beispielsweise nur der Nutzereinfluss auf die Raumregelung und Fensteröffnung oder Wärmeströme die innerhalb des Gebäudes konvektiv durch offene Türen erfolgen.

Das Gebäude der LBS hingegen verfügt über ein unbeheizten Grünhof, so dass gemäß der WSVO 95 die Fassaden der grünhofseitigen Räume den gleichen Wärmedämmwert aufweisen, wie die an der Außenluft angrenzenden Büroräume. Bei dem Gebäude der LBS erfolgten darüber hinaus ausreichend lange Messungen des Atriumklimas und des Außenklimas, die es gestatten, die Parameter des Grünhofklimas in Abhängigkeit vom Außenklima darzustellen. Die Datenpaare werden zu Funktionsgleichungen approximiert.

Wendet man die Funktionsgleichungen auf die Datenreihe des Testreferenzjahres an, so erhält man einen angenäherten, synthetisch erzeugten Jahresverlauf des Grünhofklimas auf Basis des Testreferenzjahres. Mit diesen beiden Wetterdatensätzen, Außenklima und Grünhofklima, werden thermische Gebäudesimulationen anhand eines Büroraumes durchgeführt und der Energieverbrauch für beide Varianten bestimmt.

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass das Atriumklima nicht im Detail durch Simulationsrechnungen bestimmt werden muss. Weiterhin ist eine genaue Kenntnis des Gebäudebetriebes nicht erforderlich (Klappenöffnungen, etc). Die thermische Simulationsrechnung erlaubt es, sämtliche Einflussparameter, bis auf die zu untersuchenden, zu fixieren.

Die Untersuchung erfolgt für insgesamt 6 Büroräume, die auf drei unterschiedlichen Höhen und nach Norden und Süden ausgerichtet sind. Diese 6 Räume repräsentieren somit einen Großteil des Gebäudes. Bei den Räumen in der obersten Etage wird zusätzlich berücksichtigt, dass die Decke an das Atrium angrenzt. Angrenzende Flächen der untersuchten Räume zu anderen Gebäudeteilen hin werden ansonsten adiabatisch gerechnet.

Zur Approximation der Funktionsgleichung, erfolgt die Darstellung der Grünhoftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Aufgrund der sommerlichen Temperaturschichtung im Grünhof werden die Grünhoftemperaturen für drei verschiedene Höhen dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass sich die Punktwolken am Besten mathematisch beschreiben lassen, wenn man sie in etwa gemäß der Abstufung zwischen Sommerbetrieb und Winterbetrieb getrennt betrachtet. Für jeden dieser Teile eignet sich ein viergliedriger polynomischer Term um alle Trends der Temperaturentwicklung darzustellen. Die Trennung der Punktwolken erfolgte für Außentemperaturen größer und kleiner als 8°C. In den folgenden Abbildungen sind die Punktwolken für den Messzeitraum und ihre Approximationskurven dargestellt. Die Ermittlung erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL.

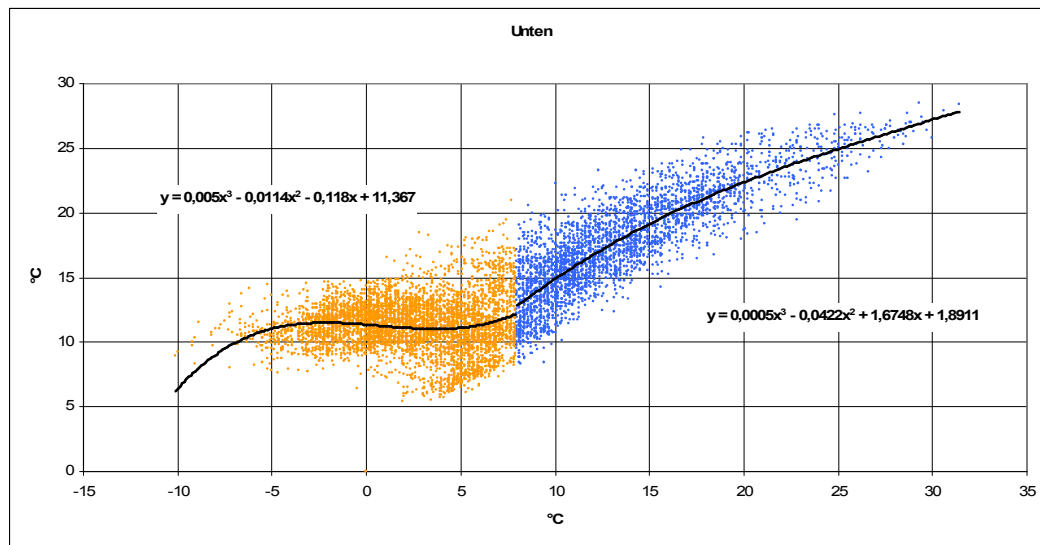


Abbildung 107 Approximierung der gemessenen Abhängigkeit der Atriumtemperatur von der Außentemperatur, unterste Ebene

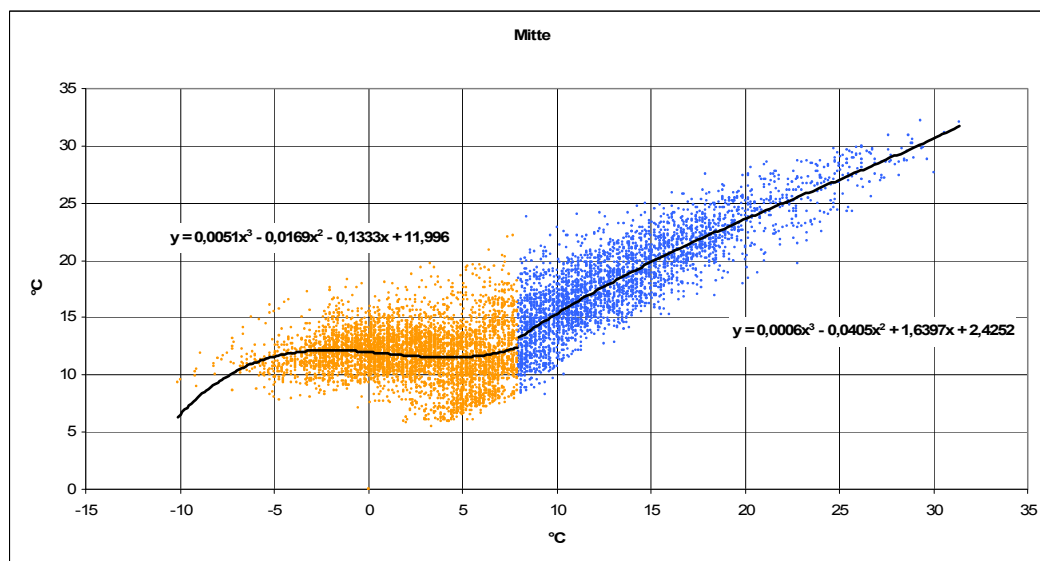


Abbildung 108 Approximierung der gemessenen Abhängigkeit der Atriumtemperatur von der Außentemperatur, mittlere Ebene

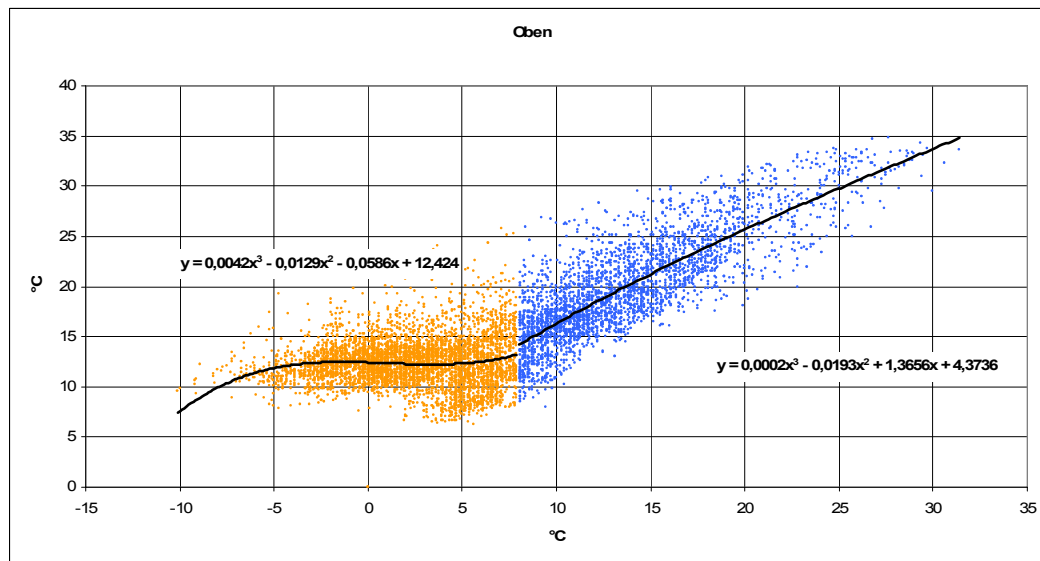


Abbildung 109 Approximierung der gemessenen Abhängigkeit der Atriumtemperatur von der Außentemperatur, oberster Ebene

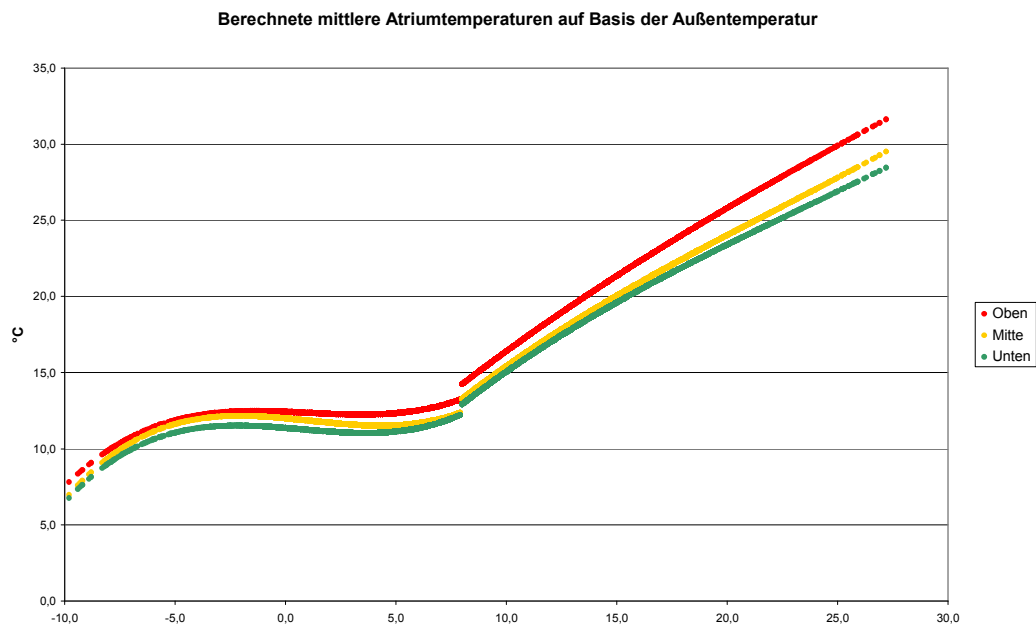


Abbildung 110 Berechnete Abhängigkeit der Atriumtemperatur von der Außentemperatur für drei Höhen

Abbildung 110 zeigt die berechneten Atriumtemperaturen auf Basis des Testreferenzjahres 03 des DWD für Hannover. Diese Darstellung dient auch der Überprüfung des Berechnungsergebnisses. Die fehlende Streuung der Atriumtemperaturen bei gleicher Außentemperatur ist

für eine ausschließliche Bilanzierung des Energieverbrauches hinnehmbar. Abbildung 111 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der berechneten Atriumtemperaturen.

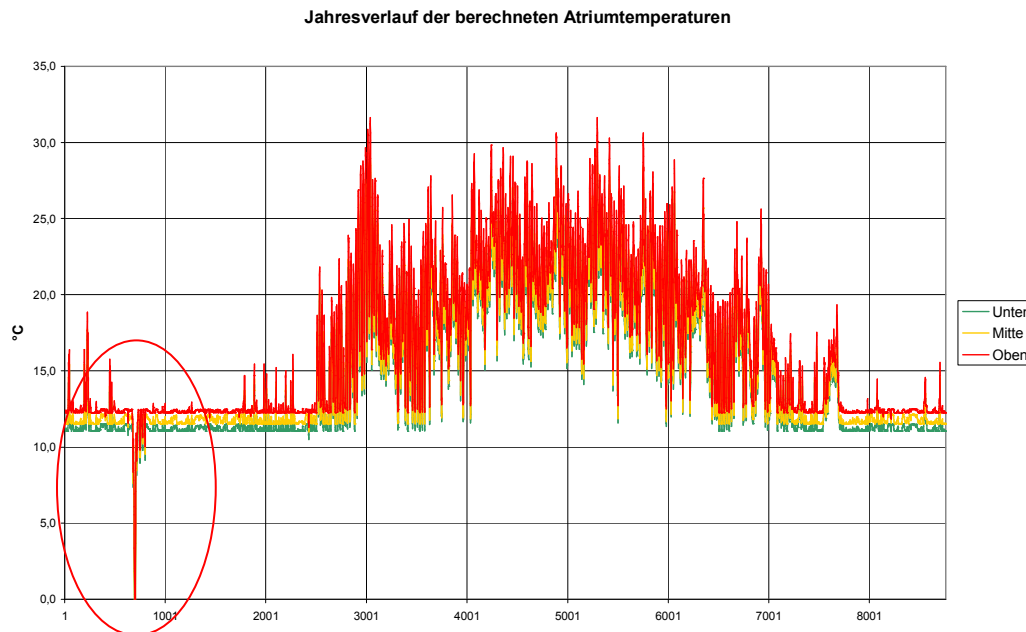


Abbildung 111 Jahreszeitlicher Verlauf der berechneten Atriumtemperatur bei der Anwendung eines Testreferenzjahres

Die Reduzierung der Globalstrahlung durch die Verglasung erfolgt ebenfalls auf Basis der Messungen. Gemessen wurde die Globalstrahlung auf einer horizontalen Fläche innen und außen. Da der Gesamtdurchlassgrad einer Verglasung abhängig ist von dem Einfallswinkel der direkten Strahlung ergibt sich eine Streuung. Auch hier erfolgt eine Approximierung der Abhängigkeit zwischen äußerer und innerer Globalstrahlung. Es ergibt sich ein durchschnittlicher g-Wert von 0,3. Der Rechenwert der Atriumverglasung für einen senkrechten Lichteinfall beträgt 0,36. Wind und Regenereignisse werden für das Atriumklima auf Null gesetzt. Die Berechnung erfolgt für zwei Varianten: natürlich und mechanisch belüftete Räume. Für die natürlich belüfteten Räume gilt, dass sie ihre Zuluft von außen bzw. aus dem Atrium erhalten. Erwartungsgemäß steigt infolge der ganzjährig höheren Temperaturen im Atrium der Kühlbedarf wohingegen der des Heizbedarfs sinkt. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung (Strompreis 0,11 EUR/kWh, Wärmepreis 0,07 EUR/kWh, Arbeitszahl 3) überwiegen in der Variante der natürlich belüfteten Büros die Mehrkosten für die Kühlung die der Beheizung. Im Resultat ergeben sich Mehrkosten von 0,60 EUR/m²a. In der Variante der mechanisch belüfteten Räume ergibt sich ein Minderverbrauch für beide Betriebszustände (Heizen und Kühlen). Die Reduzierung des Kühlverbrauchs resultiert aus

der verringerten Sonneneinstrahlung durch die Atriumverglasung. Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs erfolgt aufgrund geringerer Transmissionswärmeverluste. Insgesamt ergibt sich eine Einsparung von 2,63 EUR/m²a. Würde man die Art der Belüftung von der Atriumtemperatur und der Konditionierungsanforderung abhängig machen, ließen sich theoretisch die maximalen Einsparungen aus beiden Varianten nutzen.

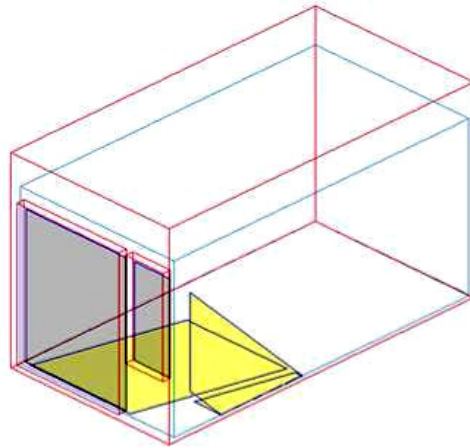


Abbildung 112 Geometrisches Simulationsmodell eines Referenzbüros, LBN

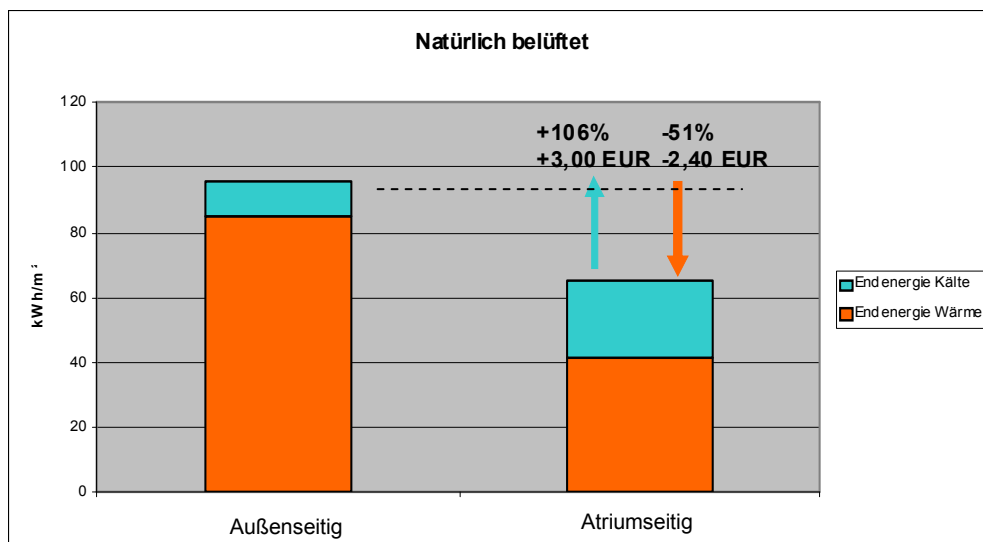


Abbildung 113 Endenergiebedarf für einen Raum der LBN in kWh/m²a und resultierende Kostenänderung in EUR/m²a für die Variante natürlich belüfteter Büros

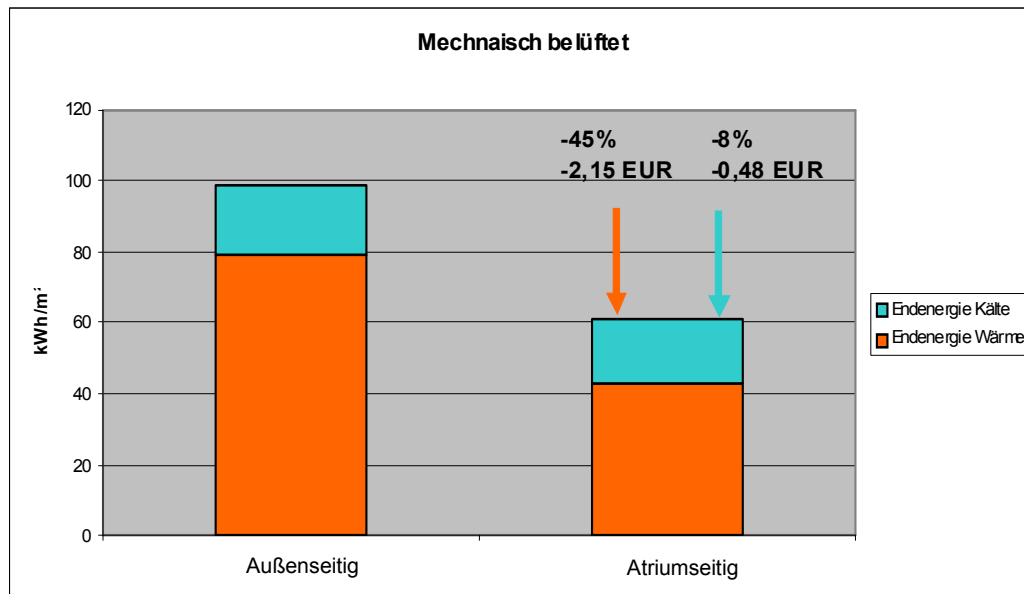


Abbildung 114 Endenergiebedarf für einen Raum der LBN in kWh/(m²a) und resultierende Kostenänderung in EUR/m²a für die Variantemechanisch belüfteter Büros

4.7 Bewertung der Planungswerkzeuge

4.7.1 Anwendung von CFD

Für zwei Gebäude werden die Luftwechselversuche im CFD-Programm Fluent nachgestellt. Dabei wird im Wesentlichen untersucht, ob CFD-Programme grundsätzlich geeignet sind, Luftwechselzahlen für bestimmte Klimazustände zu bestimmen. Die Berechnungen erfolgen stationär und ohne Berücksichtigung des thermischen Verhaltens der Atrien. Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens der Atrien sollten thermisch-dynamische Gebäudesimulationsprogramme angewendet werden, da mit diesen Speichereffekte und zeitabhängige Verläufe dargestellt werden können. Die Anwendung der CFD-Programme beschränkt sich in diesem Fall auf die Ermittlung der Luftwechselzahlen zur potentiellen Anwendung in thermisch-dynamischen Simulationsprogrammen. Die nicht-konstruktiven Einflussgrößen für den Luftwechsel sind der thermische Auftrieb aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und die Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Beides verursacht an den Lüftungsöffnungen Druckdifferenzen, die wiederum einen Volumenstrom an der Öffnung bewirken. Grundsätzlich ist es praktikabel durch andere Methoden ermittelte Druckdifferenzen ohne Darstellung des Luftraums der Umgebung anzusetzen. So können z.B. mit Hilfe eines Modells in einer Windkanalstudie Druckbeiwerte am geschlossenen Gebäudekörper für verschiedene Anströmrichtungen ermittelt werden. Durch analytische

Rechenmethoden ist die durch Windanströmung resultierende Druckdifferenz ermittelbar. Die Druckdifferenz, die sich durch einen Auftrieb ergibt, ist ebenfalls durch analytische Methoden ermittelbar und kann am isolierten Luftraum des Gebäudes angesetzt werden.

In einer aufwendigeren Strömungssimulation wird der umgebende Luftraum mit abgebildet. Die Generierung des Windes erfolgt durch umgebende Flächen, aus welchen die Luft ein- und wieder abströmt. Erhebliche Abweichungen können sich durch nahe Bebauung und daraus resultierenden Turbulenzen und Ablenkungen ergeben. Für die Erhöhung der Genauigkeit eines solchen Modells kann ein höhenabhängiges Geschwindigkeitsprofil der Windanströmung nach [Gerder] angesetzt werden. Wird eine CFD Simulation genutzt, um Druckbeiwerte für den Luftaustausch infolge der Windanströmung zu ermitteln, so ist zu beachten, dass laut [Gerder] bei geschlossenen Lüftungsklappen höhere Druckbeiwerte ermittelt werden, die bei der Luftwechselberechnung im Fall des EFB zu 40 – 50% höhere Luftwechselzahlen führen können. Die Ursache liegt im Druckausgleich, wenn Lüftungslamellen geöffnet sind.

4.7.2 Dynamische Gebäudesimulation

Dynamisch-thermische Gebäudesimulationen sind vor allen Dingen geeignet, Raumzustände eines Raumes wie z.B. einem Büro oder einer Bürozone darzustellen. Für diesen Zweck wurden die Programme entwickelt und hinsichtlich ihrer Optionen ausgelegt. Bei der Darstellung eines Atriums stoßen die Programme an ihre Grenzen. Am problematischsten ist die Bestimmung der Luftwechsel, die sich in einem Atrium einstellen und das Ergebnis nachhaltig beeinflussen. Weiterhin ist eine örtliche Auflösbarkeit der Temperaturen im Atrium nur mit Hilfsmitteln gegeben. Dies gilt für die hier betrachteten Programme BSim und Trnsys, weitere Programme dieser Klasse sind jedoch ähnlich strukturiert. Soll das thermische und energetische Verhalten eines Gebäudes oder Raumes mit integriertem Atrium untersucht werden, empfiehlt es sich, das thermische Verhalten des Atriums und des Restgebäudes getrennt zu betrachten. Das geplante oder unter Zuhilfenahme von Erfahrungswerten realistisch angesetzte Temperaturverhalten des Atriums in Abhängigkeit vom Außenklima sollte als Randbedingung für das Kerngebäude angesetzt werden, anstatt Kerngebäude und Atrium in einem Simulationsmodell zu vereinen. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Komplexität und Fehleranfälligkeit des Simulationsmodells reduziert ist.

4.7.3 Weitere Methoden

Neben Simulationsprogrammen sollte man einfache analytische Methoden zur Auslegung von Öffnungsflächen nicht vernachlässigen. Insbesondere die British Standard Method ist als

geeignet zu bezeichnen, da sie neben dem thermischen Auftrieb auch den Windeinfluss auf den Luftwechsel berücksichtigt. Bei allen untersuchten Fällen ergab sich durch diese Methode eine Abbildungsgenauigkeit von 73%, das heißt der berechnete Luftwechsel lag im Schnitt 26% unter dem tatsächlichen Luftwechsel. Weitere Methoden, die nur den thermischen Auftrieb berücksichtigen und auch keine Aussage über die Art der Öffnungsflächen treffen (effektive oder geometrisch Öffnungsfläche?) kommen eher zu einem zu niedrigen Luftwechsel. Berücksichtigt man bei diesem Vergleich, dass es für die Fälle LBS Winter 1 und Winter 2, sowie NIZ Winter und Sommer Unsicherheiten in der Wahl der Eingangsgrößen gab, so verbleiben drei Fälle, bei denen alle analytischen Methoden sehr gut funktionieren, wobei die Schachtformel nach Albers und Jahn die größten Abweichungen (32-68% Abweichung vom Messwert) aufweist und die British Standard Method die geringsten (3-33% Abweichung vom Messwert). Beim NIZ besteht Unsicherheit bei der Bewertung des Zuluftkanals und vor und nach geschalteter Überströmbereiche für die Abschätzung der effektiven Fläche der Zuluftöffnung in den analytischen Gleichungen. Die Wahl des äquivalenten Durchflussbeiwertes fiel offensichtlich zu gering aus. In dem Fall LBN Winter bestand praktisch kein Höhenunterschied zwischen Zu- und Abluftöffnungen, da sich bei den Winterversuchen alle Öffnungsflächen innerhalb einer Ebene befinden. Infolgedessen wird die Höhe der Öffnung als Höhendifferenz zwischen Zu- und Abluftöffnung angesetzt (0,5 m). Die Ergebnisse der ausschließlich aufgrund des thermischen Auftriebes berechneten Gleichungen fallen bei weitem zu gering aus. Dies erklärt sich womöglich dadurch, dass durch Infiltrationen praktisch Zuluftöffnungen in niedrigeren Ebenen bestehen und somit eine deutlich höhere effektive Höhendifferenz zwischen Zu- und Abluftöffnungen besteht als angenommen.

Volumenstromberechnung

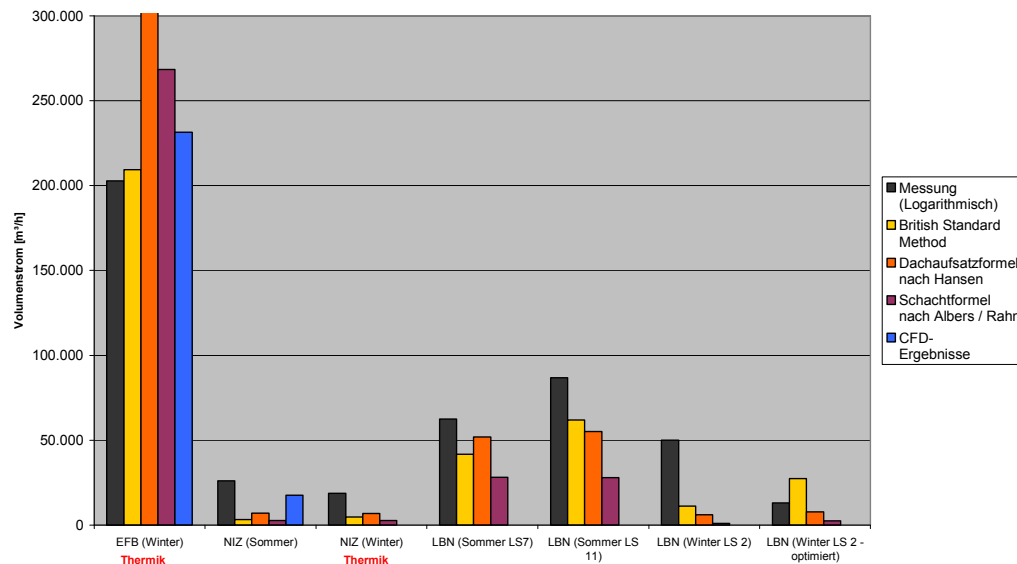


Abbildung 115 Gegenüberstellung der gemessenen Werte mit den berechneten Werten des Außenluftvolumenstromes. Bei Anwendung der British Standard Method, die eine Berechnung aufgrund des thermischen Auftriebes erfordert, sind entsprechend gekennzeichnet, alle anderen Fälle der British Standard Method werden unter Berücksichtigung des Windeinflusses gerechnet.

Volumenstromberechnung: Prozentualer Anteil vom Messwert

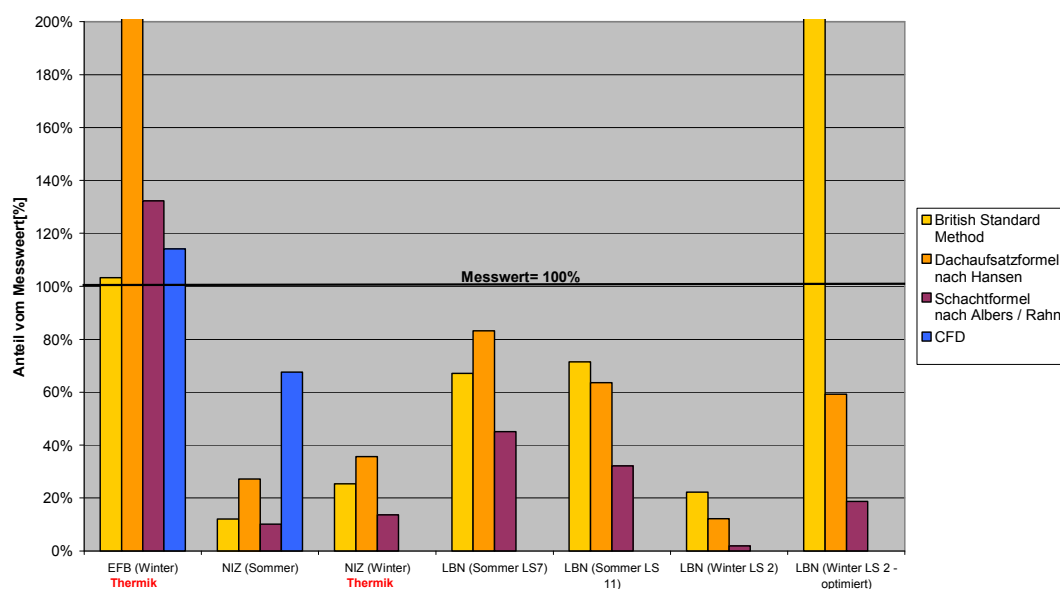


Abbildung 116 Prozentualer Anteil der berechneten Werte am Messwert

Tabelle 16 Außenluftvolumenstrom gemessen und berechnet

LW Messung/Berechnung [m³/h]	Messung Volumenstrom	Messung Luftwechsel [-]	British Standard Method	Dachaufsatzformel nach Hansen	Schachtformel nach Albers / Rahn	CFD- Ergebnisse
EFB (Winter)	202.655	5,4	209.285	723.284	268.187	231.336
NIZ (Sommer)	26.054	3,2	3.147	7.077	2.658	17.600
NIZ (Winter)	18.750	2,3	4.767	6.692	2.550	
LBN (Sommer LS7)	62.294	2,0	41.781	51.824	28.071	
LBN (Sommer LS 11)	86.742	2,8	61.961	55.128	27.907	
LBN (Winter LS 2)	50.022	1,6	11.120	6.120	935	
LBN (Winter LS 2 - optimiert)	13.080	0,4	27.277	7.756	2.452	

Anhang A Ablauf und Auswertung der Luftwechsellmessungen EFB

Tabelle 17 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

EFB (Winter)				
	CH1	CH2	CH3	Mittel
Luftalter [sec]	84	118	193	155
lokaler Luftaustausch n [1/h]	43	31	19	31
Außenluftvolumenstrom [m³/h]	427.214	305.735	186.523	246.129
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	0,54	0,76	1,24	

Tabelle 18 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	16:31:55	C_1 [1000 ppm]	15.205
T_2	16:48:24	C_2 [1000 ppm]	58
n [1/h]			20,3
Außenluftvolumenstrom [m³/h]			202.655

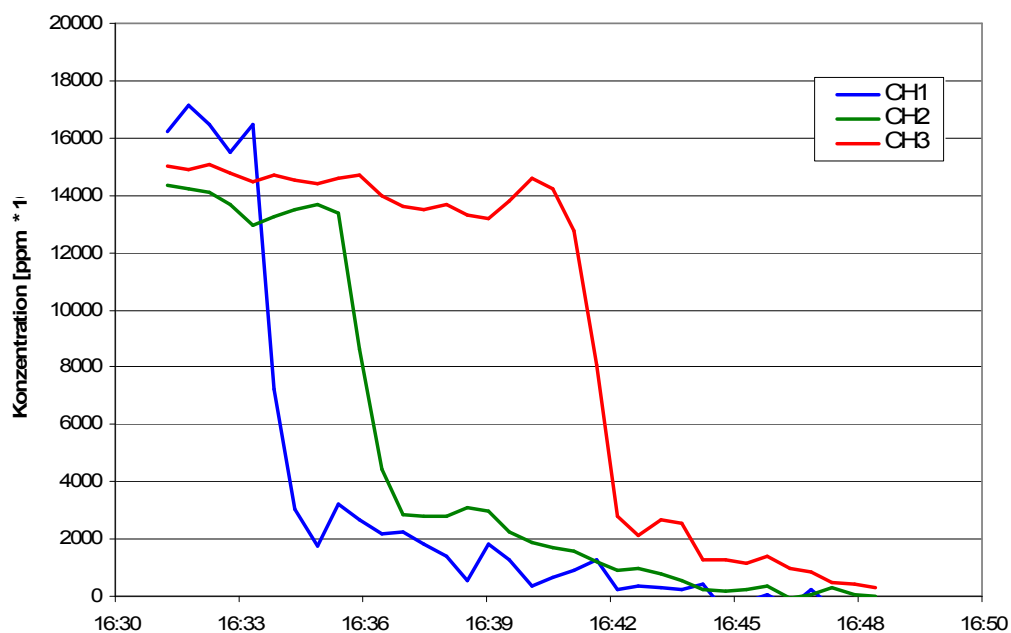


Abbildung 117 Konzentrationsverlauf

Anhang B Versuchsablauf und Auswertung der Luftwechsellmessungen NIZ**Wintermessung****Tabelle 19** Randbedingungen

Ort		EFB
Datum		08.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Außenlufttemperatur	[°C]	12,0
Atriumlufttemperatur	[°C]	15,0
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2,0
Windrichtung	[°]	180
Globalstrahlung	[W/m²]	130
Relative Luftfeuchte (außen)	[%]	65

Tabelle 20 Ablaufplan

Zeit	Vorgang
15:20	alle Klappen auf, Injektion
15:35	Abluftklappen zu
16:00	Ende der Injektion
16:02	Alle Klappen zu
16:10	30sec Zuluft geöffnet
16:31	Zuluft auf
16:32	Abluft auf

Tabelle 21 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

NIZ (Winter)				
	CH1 4.OG	CH2 2.OG	CH3 Abluftbereich	Mittel
Luftalter t [sec]	3666	1683	3493	2588
lokaler Luftaustausch n [1/h]	0,98	2,14	1,03	1,4
Außenluftvolumenstrom [m³/h]	7.935	17.282	8.328	12805
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	1,42	0,65	1,35	

Tabelle 22 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	13:38:10	C_1	93.258,82
T_2	15:35:04	C_2	1.014,32
n [1/h]			2,3
Außenluftvolumenstrom [m³/h]			18.750

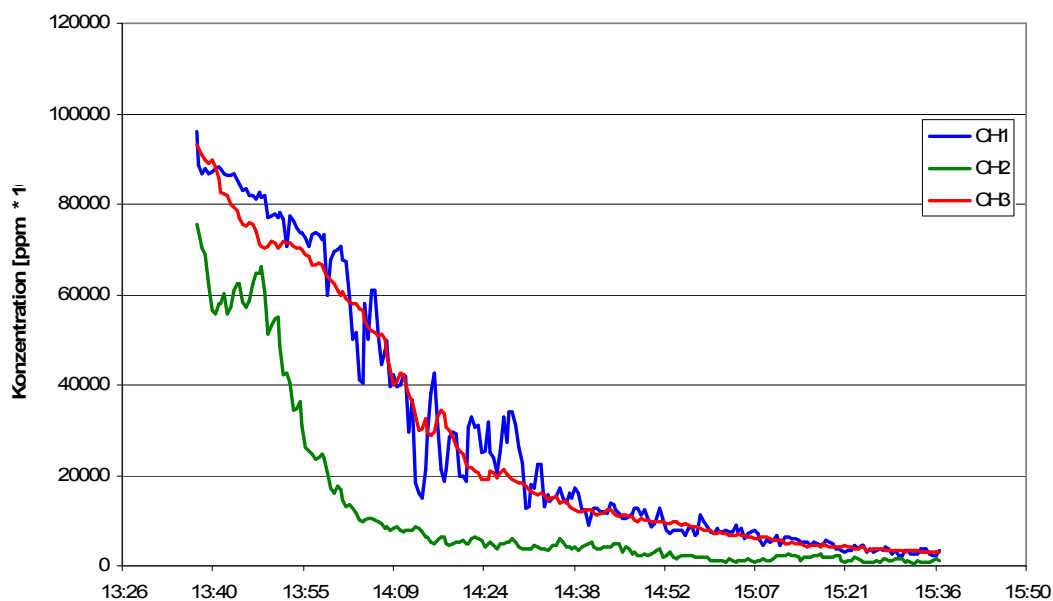


Abbildung 118 Tracergaskonzentration während des Abklingversuches

Sommermessung

Tabelle 23 Randbedingungen

Ort		NIZ
Datum		27.08.2008
Fallunterscheidung		Sommer
Außenlufttemperatur (Dach GLT)	[°C]	20,0
Fassadennahe Lufttemperatur Nord	[°C]	20,0
Fassadennahe Lufttemperatur Ost	[°C]	20,4
Fassadennahe Lufttemperatur West	[°C]	20,6
Atriumlufttemperatur	[°C]	22,0
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5,0
Windrichtung	[°]	180
Globalstrahlung	[W/m²]	100
Relative Luftfeuchte (außen)	[%]	65

Tabelle 24 Versuchsprotokoll

Zeit	Vorgang
14:03	konstante Injektion, Prüfung der Verteilung im Zuluftkanal 50 ml/s, C=35 ppm Kanal 1 und 2 temporär im Zuluftbereich angeschlossen während der Injektion 4 Klappen Nord und 2 Ost offen
14:40	Schließung der Abluftklappen Nord Nur Klappen Ost geöffnet
15:15	Alles geschlossen, Ende der Injektion
15:38	Nord Klappen und Zuluft geöffnet
15:43	#3 auf Kellergeschoss umgesteckt
15:49	Neue Messung

Kurzzeitversuch am 06.11.2008 (Winterfall)

Tabelle 25 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

NIZ (Sommer)				
	CH1/Abluft/lok	CH2/lokal	CH3/Zuluftbereich	Mittel
Luftalter t [sec]	1019	1035	776	905
lokaler Luftaustausch n [1/h]	3,53	3,48	4,64	3,9
Außenluftvolumenstrom [m³/h]	28.535	28.113	37.478	32795
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	1,13	1,14	0,86	

Tabelle 26 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	16:06:04	C_1 [1000 ppm]	71.195
T_2	16:23:33	C_2 [1000 ppm]	27.822
n [1/h]			3,2
Außenluftvolumenstrom [m³/h]			26.054

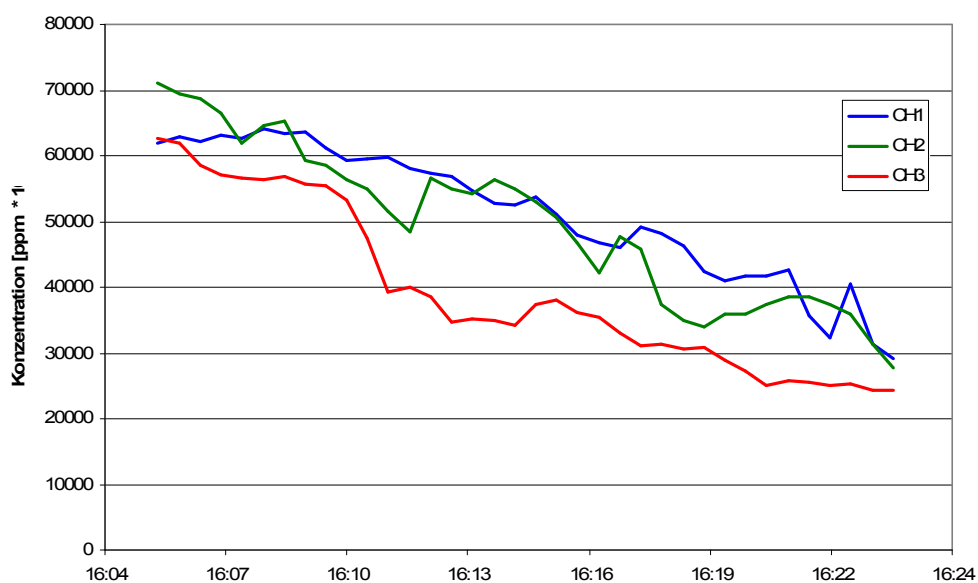


Abbildung 119 Tracergaskonzentration während des Abklingversuches

Anhang C Versuchsablauf und Auswertung der Luftwechsellmessungen LBS**LBS Sommermessung 1****Kurzzeitversuch am 26.07.2008 (Sommerfall)****Tabelle 27** Randbedingungen während der Versuchsdurchführung

Ort		LBN
Datum		26.07.2008
Fallunterscheidung		Sommer
Außenlufttemperatur	[°C]	31,0
Fassadennahe Lufttemperatur Ost	[°C]	29,5
Fassadennahe Lufttemperatur West	[°C]	32
Atriumlufttemperatur	[°C]	35,0
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3,0
Windrichtung	[°]	90
Globalstrahlung	[W/m²]	750
Relative Luftfeuchte (außen)	[%]	50

Tabelle 28 Versuchsprotokoll

Zeit	Vorgang
8:30	Lüftungsstufe 0
10:00	Lüftungsstufe 8
11:30	Injection, zuerst bei 100ml/sec, dann bei 200 ml/sec Lüftungsstufe 7
12:00	Nebelversuche
12:16	Lüftungsstufe 0, Ende der Injektion, Verteilung
12:43	Konzentration auf drei Höhen: konstant 18ppm
12:48	Lüftungsstufe 7
13:17	Injektion 207 ml/s
13:39	Lüftungsstufe 0, Injektion beendet
13:53	Lüftungsstufe 11
14:30	Beendigung

Kurzzeitversuch am 15.11.2008 (Winterfall)**Tabelle 29** Randbedingungen

Ort		LBN
Datum		15.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Außenlufttemperatur	[°C]	10,0
Atriumlufttemperatur	[°C]	13,5
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5,0
Windrichtung	[°]	270
Globalstrahlung	[W/m²]	30
Relative Luftfeuchte (außen)	[%]	95

Tabelle 30 Versuchsprotokoll

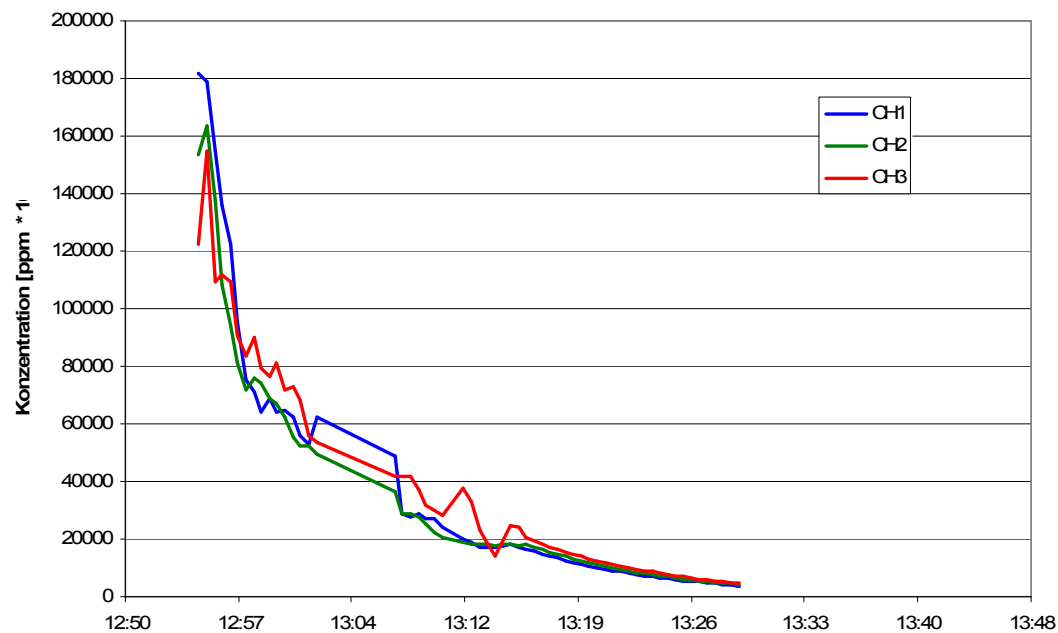
Zeit	Vorgang
11:53	Injektion 40ml/s 4 Klappen unten, 4 oben diagonal geöffnet (Westwind) Konstante Konzentration ca. 5ppm
12:10	Klappen fahren zu (Windanforderung)
12:22	Lüftungsstufe 04
12:23	alle Klappen zu
12:45	Lüftungsstufe 2 Skizze Notizbuch für Strömungspfade
13:16	Injektion Tracergas 1 Min
13:24	Injektion
13:34	Messung beendet
13:59	Lüftungsstufe 4, 30sec Bild Strömungspfade Handbuch
15:00	OK11, WK9 und OK 12 (4 Kl. West, 3 Kl. Ost) geöffnet
15:52	alle Klappen auf

Tabelle 31 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

LBN (Sommer 1)				
	CH1	CH2	CH3	Mittel
Luftalter t [sec]	1351	1293	1396	1344
lokaler Luftaustausch n [1/h]	2,66	2,78	2,58	2,7
Außenluftvolumenstrom [m³/h]	26.645	27.844	25.792	26818
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	1,01	0,96	1,04	

Tabelle 32 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	12:55:04	C_1 [1000 ppm]	152.551
T_2	13:14:25	C_2 [1000 ppm]	18.574
n [1/h]			6,5
Außenluftvolumenstrom [m³/h]			65.294

**Abbildung 120** Konzentrationsverlauf während des Abklingversuches

LBS Sommermessung 2

Tabelle 33 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

LBN (Sommer 2)				
	CH1	CH2	CH3	Mittel
Luftalter t [sec]	935	1060	907	984
lokaler Luftaustausch n [1/h]	3,85	3,39	3,97	3,7
Außenluftvolumenstrom [m³/h]	38.517	33.947	39.682	36815
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	0,95	1,08	0,92	

Tabelle 34 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	13:56:51	C_1 [1000 ppm]	105.764
T_2	14:13:49	C_2 [1000 ppm]	9.100
n [1/h]			8,7
Außenluftvolumenstrom [m³/h]			86.742

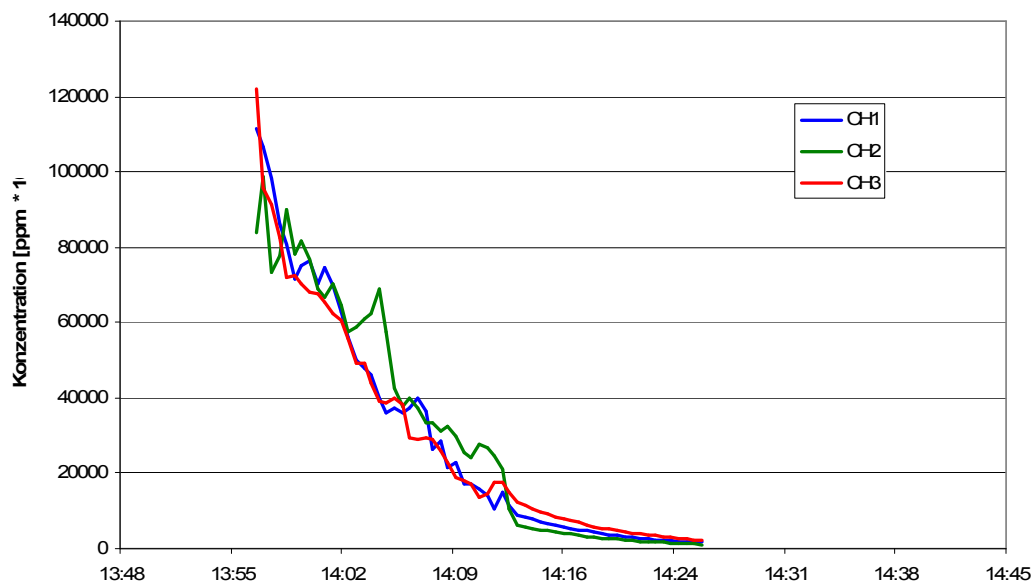


Abbildung 121 Konzentrationsverlauf während des Abklingversuches

LBS Wintermessung 1

Tabelle 35 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

LBN (Winter 1)				
	CH1	CH2	CH3	Mittel
Luftalter t [sec]	762	952	954	953
lokaler Luftaustausch n [1/h]	4,72	3,78	3,77	4,1
Außenluftvolumenstrom [m ³ /h]	47.224	37.829	37.727	37778
Lokaler Luftaustauschwirkungsgrad η [-]	0,80	1,00	1,00	

Tabelle 36 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	12:45:54	C_1 [1000 ppm]	52.526
T_2	13:15:52	C_2 [1000 ppm]	4.319
n [1/h]			5,0
Außenluftvolumenstrom [m ³ /h]			50.022

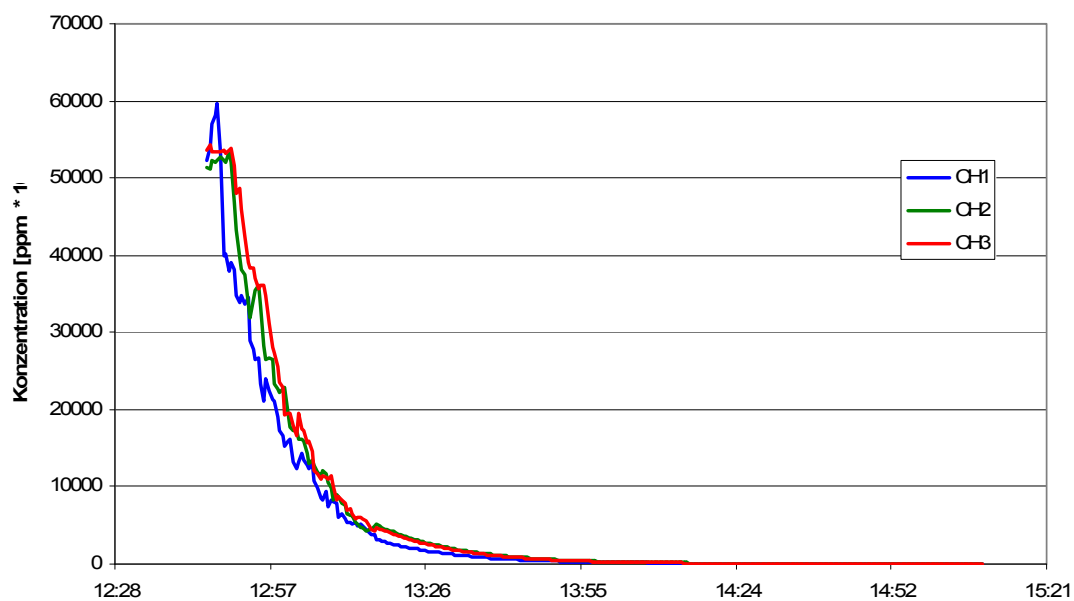


Abbildung 122 Konzentrationsverlauf während des Abklingversuches

LBS Wintermessung 2

Tabelle 37 Auswertung nach dem Konzept des Luftalters

LBN (Winter 2)				
	CH1	CH2	CH3	Mittel
Luftalter t [sec]	4792	5969	6310	6140
lokaler Luftaustausch n [1/h]	0,75	0,60	0,57	0,6
Außenluftvolumenstrom $[m^3/h]$	7.513	6.031	5.705	5868
Lokaler Luftaustauauswirkungsgrad η [-]	0,78	0,97	1,03	

Tabelle 38 Logarithmische Auswertung eines Kanals

T_1	14:29:01	C_1 [1000 ppm]	109.295
T_2	14:50:29	C_2 [1000 ppm]	68.448
n [1/h]			1,3
Außenluftvolumenstrom $[m^3/h]$			13.080

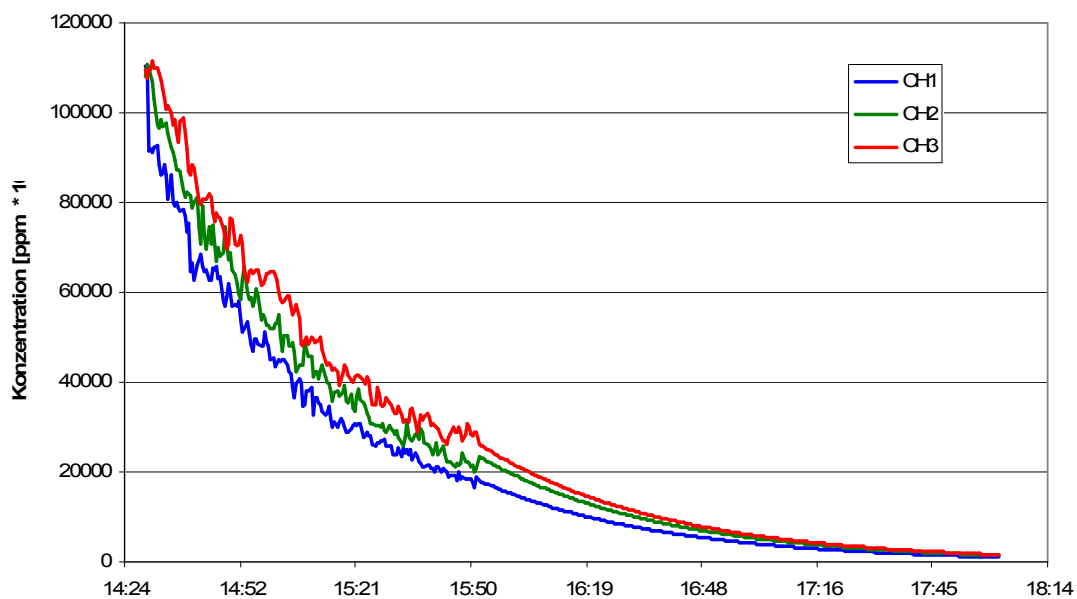


Abbildung 123 Konzentrationsverlauf während des Abklingversuches

Anhang D Berechnung der Luftwechselraten**Luftwechselberechnungen EFB****Tabelle 39** Randbedingungen

Ort		EFB
Datum		08.11.2009
Fallunterscheidung		Winter
Öffnungsflächen		Zuluft+Abluft
Außenlufttemperatur	[°C]	12
Atriumlufttemperatur	[°C]	15
Windgeschwindigkeit	[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

Tabelle 40 Britisch Standard Method

A_{eff1}	[m ²]	36,855
A_{eff2}	[m ²]	45,695
Δp_w	[Pa]	5,2
ρ_{Luft}	[kg/m ³]	1,230
V_{Wind}	[m ³ /h]	300.299

A_{eff1}	[m ²]	36,855
A_{eff2}	[m ²]	45,695
ΔT	[°C]	3,0
Δh	[m]	20,000
T	[°C]	13,5
V_{Thermik}	[m ³ /h]	209.285

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2,0
Δc_p		1,0
linker Term		1,2
rechter Term		1,2
V berechnen aufgrund von		Thermik

Tabelle 41 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	20,000
ΔT	[°C]	3,0
T außen	[°C]	12,0
A_1	[m ²]	36,855
A_2	[m ²]	45,695
V_{Thermik} Hansen	[m ³ /h]	723.284

Tabelle 42 Schachtformel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	36,855
T innen	[°C]	15,0
T außen	[°C]	12,0
Δh	[m]	20,0
V_{Thermik} Albers/Rahn	[m ³ /h]	268.187

Luftwechselberechnung NIZ (Winter)**Tabelle 43** Randbedingungen

Ort		NIZ
Datum		06.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Öffnungsflächen		2West+Zuluft
Außenlufttemperatur	[°C]	13
Atriumlufttemperatur	[°C]	21
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3
Windrichtung	[°]	90
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	0,81
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	2
Durchflusskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen Aeff 1	[m²]	0,405
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen Aeff 2	[m²]	1
Δh	[m]	23
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-2,79
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	0,00
Druckdifferenz	[Pa]	2,79

Tabelle 44 British Standard Method

A _{eff1}	[m²]	0,405
A _{eff2}	[m²]	1,000
Δp_w	[Pa]	2,8
ρ_{Luft}	[kg/m³]	1,230
V _{Wind}	[m³/h]	2.878

A _{eff1}	[m²]	0,405
A _{eff2}	[m²]	1,000
ΔT	[°C]	8,0
Δh	[m]	23,000
T	[°C]	17,0
V _{Thermik}	[m³/h]	4.767

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3,0
Δc_p		0,3
linker Term		1,1
rechter Term		2,3
V berechnen aufgrund von		Thermik

Tabelle 45 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	25,000
ΔT	[°C]	2,0
T außen	[°C]	20,0
A1	[m ²]	0,405
A2	[m ²]	1,000
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	6.692

Tabelle 46 Schachtformel Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	0,405
T innen	[°C]	22,0
T außen	[°C]	20,0
Δh	[m]	23,0
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	2.550

Luftwechselberechnung NIZ (Sommer)**Tabelle 47** Randbedingungen

Ort		NIZ
Datum		27.08.2008
Fallunterscheidung		Sommer
Öffnungsflächen		4Nord+Zuluft
Außenlufttemperatur	[°C]	20
Atriumlufttemperatur	[°C]	22
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5
Windrichtung	[°]	180
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	0,81
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	4
Durchflusskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen A _{eff 1}	[m²]	0,405
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen A _{eff 2}	[m²]	2
Δh	[m]	25
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-2,92
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	0,00
Druckdifferenz	[Pa]	2,92

Tabelle 48 Britisch Standard Method

A _{eff 1}	[m²]	0,405
A _{eff 2}	[m²]	2,000
Δp _w	[Pa]	2,9
ρ Luft	[kg/m³]	1,204
V _{Wind}	[m³/h]	3.147

A _{eff 1}	[m²]	0,405
A _{eff 2}	[m²]	2,000
ΔT	[°C]	2,0
Δh	[m]	23,000
T	[°C]	21,0
V _{Thermik}	[m³/h]	2.503

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5,0
Δc _p		0,6
linker Term		3,5
rechter Term		1,6
V berechnen aufgrund von		Wind

Tabelle 49 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	25,000
ΔT	[°C]	2,0
T außen	[°C]	20,0
A1	[m ²]	0,405
A2	[m ²]	2,000
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	7.077

Tabelle 50 Schachtformel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	0,405
T innen	[°C]	22,0
T außen	[°C]	20,0
Δh	[m]	25,0
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	2.658

Luftwechselberechnung LBN Sommer Lüftungsstufe 7**Tabelle 51** Randbedingungen

Ort		LBS
Datum		26.07.2008
Fallunterscheidung		Sommer
Öffnungsflächen		LS7
Außenlufttemperatur	[°C]	31
Atriumlufttemperatur	[°C]	35
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3
Windrichtung	[°]	90
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	10,24
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	11,86
Durchflusskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen A _{eff} 1	[m²]	5,12
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen A _{eff} 2	[m²]	5,93
Δh	[m]	12
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-2,74
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	2,23
Druckdifferenz	[Pa]	4,97

Tabelle 52 Britisch Standard Method

A _{eff1}	[m²]	5,120
A _{eff2}	[m²]	5,930
Δp _w	[Pa]	5,0
ρ Luft	[kg/m³]	1,115
V _{Wind}	[m³/h]	41.781

A _{eff1}	[m²]	6,590
A _{eff2}	[m²]	4,460
ΔT	[°C]	4,0
Δh	[m]	12,000
T	[°C]	33,0
V _{Thermik}	[m³/h]	23.321

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3,0
ΔC _p		0,5
linker Term		1,5
rechter Term		1,3
V berechnen aufgrund von		Wind

Tabelle 53 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	12,000
ΔT	[°C]	4,0
T außen	[°C]	31,0
A1	[m ²]	6,590
A2	[m ²]	4,460
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	51.824

Tabelle 54 Schachtformel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	4,460
T innen	[°C]	35,0
T außen	[°C]	31,0
Δh	[m]	12,0
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	28.071

Luftwechselberechnung LBN Sommer Lüftungsstufe 11**Tabelle 55** Randbedingungen

Ort		LBS
Datum		26.07.2008
Fallunterscheidung		Sommer
Öffnungsflächen		LS7
Außenlufttemperatur	[°C]	32
Atriumlufttemperatur	[°C]	35
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3
Windrichtung	[°]	90
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	18,24
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	13,16
Durchflussskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen Aeff 1	[m²]	9,12
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen Aeff 2	[m²]	6,58
Δh	[m]	12
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-1,84
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	3,96
Druckdifferenz	[Pa]	5,80

Tabelle 56 British Standard Method

A _{eff1}	[m²]	9,120
A _{eff2}	[m²]	6,580
Δp_w	[Pa]	5,8
ρ_{Luft}	[kg/m³]	1,115
V _{Wind}	[m³/h]	61.961

A _{eff1}	[m²]	10,590
A _{eff2}	[m²]	5,120
ΔT	[°C]	3,0
Δh	[m]	11,500
T	[°C]	33,5
V _{Thermik}	[m³/h]	24.655

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	3,0
Δc_p		0,5
linker Term		1,7
rechter Term		1,2
V berechnen aufgrund von		Wind

Tabelle 57 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	12,000
ΔT	[°C]	3,0
T außen	[°C]	32,0
A1	[m ²]	10,590
A2	[m ²]	5,120
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	55.128

Tabelle 58 Schachtformel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	5,120
T innen	[°C]	35,0
T außen	[°C]	32,0
Δh	[m]	12,0
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	27.907

Luftwechselberechnung LBN Winter Lüftungsstufe 2**Tabelle 59** Randbedingungen

Ort		LBS
Datum		15.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Öffnungsflächen		LS2
Außenlufttemperatur	[°C]	10
Atriumlufttemperatur	[°C]	13,5
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5
Windrichtung	[°]	270
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	1,5
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	5,84
Durchflusskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen A _{eff 1}	[m²]	0,75
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen A _{eff 2}	[m²]	2,92
Δh	[m]	0,5
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-5,63
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	-16,93
Druckdifferenz	[Pa]	-11,30

Tabelle 60 Britisch Standard Method

A _{eff1}	[m²]	0,750
A _{eff2}	[m²]	2,920
Δp _w	[Pa]	11,3
ρ Luft	[kg/m³]	1,250
V _{Wind}	[m³/h]	11.120

A _{eff1}	[m²]	1,835
A _{eff2}	[m²]	1,835
ΔT	[°C]	3,5
Δh	[m]	0,500
T	[°C]	11,7
V _{Thermik}	[m³/h]	1.622

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5,0
Δc _p		0,5
linker Term		2,7
rechter Term		0,3
V berechnen aufgrund von		Wind

Tabelle 61 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	0,500
ΔT	[°C]	3,5
T außen	[°C]	10,0
A1	[m ²]	1,835
A2	[m ²]	1,835
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	6.120

Tabelle 62 Schachtformel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	0,750
T innen	[°C]	13,5
T außen	[°C]	10,0
Δh	[m]	0,5
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	935

Luftwechselberechnung LBN Winter Lüftungsstufe 2 (optimiert)**Tabelle 63** Randbedingungen

Ort		LBS
Datum		15.11.2008
Fallunterscheidung		Winter
Öffnungsflächen		4West,3Ost
Außenlufttemperatur	[°C]	10
Atriumlufttemperatur	[°C]	13,5
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5
Windrichtung	[°]	270
Geometrische Fläche Zuluftklappen	[m²]	4,4
Geometrische Fläche Abluftklappen	[m²]	6
Durchflusskoeffizient der Klappen (70°) [DIN 18232-2: 2007]	[-]	0,5
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Zuluftklappen Aeff 1	[m²]	2,2
Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche Abluftklappen Aeff 2	[m²]	3
Δh	[m]	12
Winddruck Zuluftbereich	[Pa]	-1,08
Winddruck Abluftbereich	[Pa]	-12,49
Druckdifferenz	[Pa]	-11,41

Tabelle 64 Britisch Standard Method

A _{eff1}	[m²]	2,200
A _{eff2}	[m²]	3,000
Δp_w	[Pa]	11,4
ρ_{Luft}	[kg/m³]	1,250
V _{Wind}	[m³/h]	27.277

A _{eff1}	[m²]	2,600
A _{eff2}	[m²]	2,600
ΔT	[°C]	3,5
Δh	[m]	0,400
T	[°C]	11,7
V _{Thermik}	[m³/h]	2.055

Abgrenzung Wind oder Thermik		
Windgeschwindigkeit	[m/s]	5,0
Δc_p		0,5
linker Term		2,7
rechter Term		0,2
V berechnen aufgrund von		Wind

Tabelle 65 Dachaufsatzformel nach Hansen

Δh	[m]	0,400
ΔT	[°C]	3,5
T außen	[°C]	10,0
A1	[m ²]	2,600
A2	[m ²]	2,600
$V_{\text{Thermik Hansen}}$	[m ³ /h]	7.756

Tabelle 66 Schachtförmel nach Albers und Rahn

kleinste Öffnungsfläche	[m ²]	2,200
T innen	[°C]	13,5
T außen	[°C]	10,0
Δh	[m]	0,4
$V_{\text{Thermik Albers/Rahn}}$	[m ³ /h]	2.452

Literaturverzeichnis

[Air Flow Consulting] Air Flow Consulting (CH): Untersuchung an Schulgebäuden mit vollverglasten Fassaden; im Auftrag vom Amt für Hochbauten, Zürich

[Aiulfi] Aiulfi, D: Modellentwicklung für große Atrien; IEA-Projekt

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

[Beausoleil-Morrison] Beausoleil-Morrison, I: Demonstration of ESP-r's adaptive convection algorithm; CANMET Energy Technology Centre, Ottawa, Canada

[Beausoleil-Morrison] Beausoleil-Morrison, I: The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation; University of Strathclyde (UK), Department of Mechanical Engineering, 2000

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

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

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

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

[Fisch] Fisch, M.N.: Plessner, 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

[Grimm] Grimm, F: Energieeffizientes Bauen mit Glas, 2003

[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; Tavi, A; Özkan, E: Thermal performance simulation of an atrium building; Beykent University, Istanbul, Turkey, 2006

[Hausladen] Hausladen, G; Saldhana, M; Liedl, P; Sager, C: Klima Design, 2004

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

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

[Hopkirk] Hopkirk, N: Tageslichtnutzung in Atrien angrenzende Räume

[IEMB] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken: Energiesparrechtliche Maßnahmen im Rahmen EnEV – Energiebeauftragter für die umzugsbedingten Bundesbaumaßnahmen; Berlin, 2006

[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

[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

[Pan] Pan, S; Zheng, M; Yoshida, H: Commissioning of a Coupled Earth Tube and Natural Ventilation System at the Acceptance Phase; Nagoya / Kyoto Japan

[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

[Rosenheinrich] Rosenheinrich, H; Kornadt, O: Raumakustik in Atrien; Beitrag in Bauphysik 3/2005

[Saxon] Saxon, R: Atrium Buildings Development and Design, 1983

[Schälin] Schälin, A: Komfortuntersuchungen in Schulhäusern mit vollverglasten Fassaden, Felduntersuchungen und Grundlagenberechnungen; AFC AG, Zürich

[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

[Senatsverwaltung] Flyer Berliner Impulse: IHK Berlin Ludwig-Erhard-Haus; im Auftrag der Senatsverwaltung

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

[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] Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen, 2005

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