

Hybride Lüftungssysteme für Schulen

Abschlussbericht zum Förderkennzeichen AZ 0327387A



Forschungsbericht

Hybride Lüftungssysteme für Schulen

Abschlussbericht zum Teilprojekt A des Verbundprojektes

Veröffentlicht im Rahmen des:

FIA-Projekt – Forschungs-Informations-Austausch
unterstützt durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

im Fachverband Gebäude-Klima e.V.
Danziger Straße 20
74321 Bietigheim-Bissingen
Tel.: 07142/78 88 99-0
www.fgk.de

Projekt: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Autoren: M.Eng. Simone Steiger (Fraunhofer IBP)
Prof. Dr.-Ing. Runa T. Hellwig (Hochschule Augsburg für Fraunhofer IBP)

Veröffentlicht im April 2011, Best.-Nr.: 183

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht RKB 029/2010/291-K

Hybride Lüftungssysteme für Schulen

Durchgeführt mit Koordination
des Projektträgers Jülich (PTJ)

Der Bericht umfasst
78 Seiten Text
17 Tabellen
57 Abbildungen

M.Eng. Simone Steiger
Prof. Dr.-Ing. Runa T. Hellwig

Valley, 14. April 2011

Abteilungsleiter



Prof. Dr.-Ing.
Andreas H. Holm

Bearbeiter



M.Eng.
Simone Steiger

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen AZ 0327387A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

1	Zielsetzung	4
2	Lüftung in bestehenden Schulen	5
2.1	Kohlendioxid als Indikator zur Bewertung der Luftqualität	5
2.2	Anforderungen an Luftqualität und thermische Behaglichkeit	6
2.3	Freie Lüftung im Schulbau - Nutzerverhalten	10
3	Fassadenöffnungsvarianten für Schulen	13
3.1	Anforderungsprofil an Fassadenöffnungsmöglichkeiten	13
3.2	Bestehende Fassadenöffnungsmöglichkeiten (Schulbegehungen)	16
3.3	Stand der Forschung bei Fensterlüftung	18
3.4	Untersuchte Varianten und Witterungsbedingungen	21
3.5	Messergebnisse für die Raumparameter im Winter	26
3.6	Messergebnisse für die Raumparameter im Sommer	35
3.7	Eignung der untersuchten Varianten zur automatisierten Fensterlüftung	36
3.8	Möglichkeiten und Grenzen der Fassadenöffnungsvarianten	44
4	Automatisierungskonzepte für Fensterlüftung in Schulen	45
4.1	Anforderungsprofil an die Automatisierung der Fensterlüftung	46
4.2	Bestehende Automatisierungskonzepte	47
4.3	Automatisierungskonzepte in der Literatur	48
4.4	Konfiguration eines Fuzzy-Reglers zur automatisierten Fensterlüftung	51
4.5	Messergebnisse für die Automatisierung mit Fuzzy-Control	59
4.6	Möglichkeiten und Grenzen des Automatisierungskonzeptes	62
5	Unterricht im Testgebäude mit realen Schülern	63
6	Zusammenfassung und Ausblick	64
7	Literaturverzeichnis	69
A.1	Versuchseinrichtung	72

1 Zielsetzung

In Schulen besteht aufgrund der hohen Belegungsdichte von Personen in einem Raum ein zu Wohn- oder Bürogebäuden vergleichbar hoher Luftbedarf. Durch unregelmäßiges Lüften und immer dichtere Gebäudehüllen entspricht die Luftqualität häufig nicht den Anforderungen an eine gute Luftqualität. Verschiedene Untersuchungen an deutschen Schulen haben gezeigt, dass die Luftqualität in den Klassenräumen vor allem im Winter nicht akzeptabel ist [21]. Eine Lösung dieses Problems wäre der Einsatz von Lüftungsanlagen. Doch in bestehenden Schulgebäuden ist ein nachträglicher Einbau oft nicht möglich. Zudem ist der Platzbedarf sowie der Aufwand für Investition, Instandhaltung und Betrieb einer Lüftungsanlage nicht unerheblich. Deswegen sind Maßnahmen zur Verbesserung der Verhältnisse durch Optimierung der freien Lüftung aussichtsreich – insbesondere im Hinblick auf Sanierungen. Besondere Lösungen sind erforderlich, wenn die Schule sich an einer stark befahrenen Straße befindet. Hier ist aus Lärmschutz- und Luftqualitätsgründen eine schallgedämmte mechanisch unterstützte Lüftung erforderlich. Dies soll aber nicht Schwerpunkt dieses Projektes sein.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, geeignete Fassadenöffnungsmöglichkeiten zu finden, die eine in Schulen praktikierbare freie Lüftung ermöglichen. Die Fassaden müssen eine einfache Belüftungsmöglichkeit schaffen, die gleichzeitig eine ausreichende Luftqualität und eine akzeptable thermische Behaglichkeit ermöglichen. Dazu müssen sich die Öffnungsmöglichkeiten an die Witterungsverhältnisse anpassen lassen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die kritische Anordnung der Zuluftöffnung und die Eignung für eine Automatisierung gelegt. Dazu werden ausgewählten Öffnungsgeometrien in einem Fassadenprüfstand am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen untersucht. Es wird dabei auf vorhandene Systeme zurückgegriffen, die jedoch nicht in der üblichen Form der Stoßlüftung eingesetzt werden. Mit den Systemen sollen minimale Öffnungsweiten realisiert werden, die eine genau dosierte Dauerlüftung ermöglichen. Mit den als geeignet befundenen Fassadenkonstruktionen werden im Anschluss geeignete Automatisierungsstrategien mit Fuzzy - Control am Teststand überprüft.

2 Lüftung in bestehenden Schulen

2.1 Kohlendioxid als Indikator zur Bewertung der Luftqualität

In Räumen mit hoher Belegungsdichte trägt hauptsächlich der Mensch, u. a. durch seine Atmung, zur Verschlechterung der Luftqualität bei. Proportional zur Abgabe mit Geruchs- und Schadstoffen (z. B. Bakterien) gibt der Mensch dabei auch Kohlendioxid ab. Nach den Technischen Regeln für Gesundheit und Sicherheit [33] gilt das Kohlendioxid selbst in Konzentrationen bis zu 5000 ppm nicht als schädlich. Es ist aber relativ einfach zu messen und kann daher als Indikatorgas für die Luftqualität im Raum genutzt werden, solange es keine anderen Quellen für Kohlendioxid im Raum gibt, oder die Luftverunreinigung hauptsächlich durch die Materialien im Raum oder die Außenluft verursacht wird.

Die Luftqualitätsmessung mit Hilfe von Kohlendioxid geht zurück auf den Hygieniker Max von Pettenkofer [29]: "Der Kohlensäuregehalt allein macht die Luftverderbnis nicht aus, wir benützen ihn bloß als Maßstab, wonach wir auch noch auf den größeren oder geringeren Gehalt an andern Stoffen schließen" In mehreren Versuchen hat er den Kohlendioxidgehalt der Luft in Schulen, Krankenhäusern, Kneipen und Wohnräumen gemessen und mit dem Geruchseindruck der Raumnutzer verglichen. Er kam zu dem Ergebnis, dass die Luftqualität bei einem Kohlendioxidgehalt über 1000 ppm (Pettenkofer-Wert) als schlecht einzustufen ist. Ähnliche Versuche zur Richtwertbestimmung des Kohlendioxidgehalts für gute Raumlufte führte Wanner 1982 in einem Testraum durch [39]. Dabei wurde in allen Versuchen ein starker Zusammenhang zwischen Kohlendioxidgehalt und Geruchsintensität der Raumlufte festgestellt. Mit einer Geruchsbelästigung muss nach Wanner aber erst ab einer Kohlendioxidkonzentration von 1500 ppm gerechnet werden. Diese Diskrepanz zu Pettenkofer liegt wohl daran, dass sich die hygienischen Bedingungen in den letzten hundert Jahren wesentlich verbessert haben.

Unabhängig von der empfundenen Luftqualität kann mikrobielle Verunreinigung in der Innenluft gerade bei Kindern ernsthafte Gesundheitsprobleme verursachen. Eine Studie von Fox et al. [10] zeigt, dass Kinder in belegten Klassenzimmern einer höheren mikrobiellen Belastung ausgesetzt sind als im Freien. Während der Anwesenheit von Schülern wurden zudem wesentlich mehr Bakterien und Staub in der Luft festgestellt als während der Abwesenheit der Schüler. Die Studie zeigt aber auch, dass diese Verunreinigung durch einen erhöhten Luftwechsel niedrig gehalten werden kann. In einer Bekanntmachung des Umweltbundesamtes [21] werden noch weitere wissenschaftliche Studien beschrieben, die den Einfluss der Raumluftequalität auf den Raumnutzer untersuchen.

Die nichtthermische Luftqualität in Innenräumen wird also im Normalfall nicht durch den Gehalt an Sauerstoff oder Kohlendioxid, sondern vielmehr durch ihre Verunreinigung mit Schad- und Geruchsstoffen bestimmt. In Schulen ist der Kohlendioxidgehalt der Raumlufte aber ein guter Indikator für die Raumluftequalität, der die Möglichkeit bietet, die Luftqualität ständig zu überwachen oder diese Messwerte in ein Regelsystem für die Lüftung einzubinden.

2.2 Anforderungen an Luftqualität und thermische Behaglichkeit

Schulbaurichtlinien

Die Schulbaurichtlinien der einzelnen Länder unterscheiden sich zum Teil erheblich. In manchen werden ausführliche Angaben zur Belüftung der Klassenräumen gemacht, in anderen wird die Lüftung überhaupt nicht erwähnt. Das Gleiche gilt für Sonnenschutz und Raumtemperaturen. In den meisten Fällen beschränken sich die Angaben auf bauaufsichtliche Anforderungen, wie Fluchtwege und Brandschutz oder auf Mindestanforderungen für Raumgrößen. Eine Übersicht der vorhandenen Schulbaurichtlinien geben die Arbeitshilfen zum Schulbau des ZNWB [44].

Für Baden-Württemberg sind die Ausführungen zur Lüftung von Klassenräumen sehr ausführlich. Nach dieser Richtlinie ist freie Lüftung in Klassenräumen unter folgenden Bedingungen möglich:

- Minimale Raumhöhe von 3,20 m
- Maximale Raumtiefe von 8,40 m (einseitige Lüftung) bzw. 12 m (Querlüftung)
- Außengeräuschpegel von weniger als 65 dB
- Keine Luftverschmutzung in der Außenluft
- Stufenweise einstellbare Dauerlüftungsflügel
- Ausreichend große Lüftungsflügel zur Stoßlüftung
- Mindestens 0,3 m² freie Öffnungsfläche pro Schüler
- Sturm- und regensichere Nachtlüftungsmöglichkeit
- Anordnung der Fensterflügel über 2 m bei Querlüftung

Können diese Bedingungen nicht eingehalten werden oder sind die inneren Wärmelasten besonders hoch, wird eine künstliche Be- und Entlüftung empfohlen. Um ausreichenden Sonnenschutz zu erreichen, sollen die Räume nach Norden oder Süden ausgerichtet sein. Alle der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Fenster sollen mit einem außen liegenden und beweglichen Sonnenschutz ausgestattet sein.

Auch im Saarland gibt es genaue Angaben zur Lüftung in Klassenräumen. Die Angaben sind denen in Baden-Württemberg sehr ähnlich, die geforderten Raummaße aber sind unabhängig von der Lüftungsart. Zusätzlich wird dort statt einer Mindestöffnungsfläche ein Mindestzuluftvolumenstrom von 20 m³/(h Pers) (Außentemperatur über 5°C) bzw. 10 bis 20 m³/(h Pers) (Außentemperatur von -15°C bis 5°C) gefordert. Die Raumlufttemperatur der Klassenräumen soll nach der Richtlinie zu Beginn des Unterrichts etwa 16 bis 17°C betragen, und kann dann im Laufe des Unterrichts auf 21°C ansteigen. Die Anforderungen an den Sonnenschutz sind ähnlich denen in Baden-Württemberg, jedoch wesentlich ausführlicher. So wird z.B. darauf hingewiesen, dass südorientierte Räume einen festen Sonnenschutz haben können, und für den beweglichen Sonnenschutz am besten Lamellen verwendet werden. Zudem wird in der Richtlinie auf Tageslichtversorgung, Blendschutz und notwendige Beleuchtungsstärken eingegangen.

In Sachsen und Thüringen sollen die Klassenräume eine gute natürliche Belüftung aufweisen. Die Fenster sollen als stufenweise einstellbare Dauerlüftungsflügel ausgeführt sein, ausreichend groß und sinnvoll angeordnet sein. Auch hier ist ein Mindestöffnungsquerschnitt von 0,3 m² pro Schüler vorgesehen. Lüftungstechnische Anlagen sind nur im Ausnahmefall angedacht. Die Räume sollen eine möglichst gute natürliche Beleuchtung haben und ausreichend vor Aufheizung (außen

liegender Sonnenschutz) und Blendung durch Sonnenstrahlen geschützt werden können. Es wird darauf hingewiesen, dass Sonnenschutzverglasungen und Sonnenschutzfolien nicht empfehlenswert sind. Allerdings wird in der Schulbaurichtlinie in Thüringen von einer Ausrichtung der Klassenräume nach Norden abgeraten.

Lüftungsempfehlungen

Im Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden [20] werden Leitwerte (Tabelle 1) für den maximalen Kohlendioxidgehalt der Raumluft angegeben. Aus den in 2.1 genannten Gründen wird kein toxikologischer Richtwert angegeben [21]. Die dort angegebenen Leitwerte haben gesundheitlich-hygienische Gründe und dienen zur Beurteilung der Luftqualität in Klassenräumen. Die Leitwerte bilden die Grenzen ansteigender Konzentrationsbereiche, weil man aufgrund systematischer praktischer Erfahrungen davon ausgeht, dass die Wahrscheinlichkeit für nachteilige gesundheitliche Auswirkungen mit steigender Konzentration größer wird.

Tabelle 1:

Hygienische Bewertung der Raumluftqualität (CO₂ als Indikator) in Klassenräumen nach dem Leitfaden des Umweltbundesamtes für Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden [20].

Kohlendioxidgehalt [ppm]	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000 - 2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahmen intensivieren Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Im Leitfaden wird darauf hingewiesen, dass freie Lüftung in den Schulen häufig einen Kompromiss zwischen Aufwand und Erfolg darstellt, da besonders im Winter ein Zielkonflikt zwischen Luftqualität und thermischer Behaglichkeit entsteht. Deshalb wird für den Winter eine konsequente Stoßlüftung in den Pausen, und bei langen Unterrichtsstunden, auch während der Schulstunden empfohlen. Zur Nachtauskühlung im Sommer sollten Oberlichter oder Kippfenster nachts geöffnet bleiben. Im Leitfaden wird aber auch darauf hingewiesen, dass eine mechanische Lüftungsanlage zwei Vorteile gegenüber Fensterlüftung hat, nämlich einen garantierten Luftwechsel und die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung. Die Raumtemperaturen sollten nach dem Leitfaden möglichst während des ganzen Jahres zwischen 20 und 26°C liegen. Es werden außerdem typische Situationen im Schulbereich aufgezählt, die mit einer thermischen Belastung der Raumnutzer verbunden sein können [20].

In zwei Bundesländern gibt es zudem Lüftungsempfehlungen. In Sachsen hat die Landesuntersuchungsanstalt für das Gesundheits- und Veterinärwesen eine Mitteilung zur Lüftung und den lufthygienischen Aspekten in Schulen [23] veröffentlicht. Als Leitwert für die maximale Konzentration werden, mit Verweis auf die nicht mehr gültige DIN 1946 - 2 [4], 1500 ppm angegeben. Als effektivste Lüftungsform bei freier Lüftung wird die Stoßlüftung genannt. Diese soll vor dem Unterricht für mindestens 5 min und in allen Pausen während der gesamten Dauer oder für mindestens 10 min durchgeführt werden. Zusätzlich sollte zur Mitte jeder Doppelstunde für mindes-

tens 3 - 5 min gelüftet werden. Ähnliche Angaben werden auch in einem Merkblatt des niedersächsischen Landesgesundheitsamt [24] gemacht. Zusätzlich wird dort auf mögliche Zielkonflikte zwischen Erhaltung der Luftqualität und der thermischen Behaglichkeit sowie Energieeinsparung hingewiesen. In beiden Empfehlungen wird keine grundsätzliche Entscheidung zwischen Lüftungsanlage und freier Lüftung getroffen, sondern es wird auf die momentane Situation in Schulen, in denen größtenteils mit Fenstern gelüftet wird, eingegangen. Mit einem Programm des Landesgesundheitsamts Niedersachsen kann relativ einfach die Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in einem Klassenraum nachgebildet werden [19].

Arbeitsstättenrichtlinien

Schüler sind zwar keine Arbeitnehmer, Klassenräume sind aber Arbeitsstätten von Lehrern. Daher werden hier auch die Arbeitsstättenrichtlinien betrachtet. In der Arbeitsstättenrichtlinie 5 Lüftung [2] gibt es sowohl Angaben zur freien als auch zur maschinellen Belüftung von Arbeitsräumen. Einseitige Fensterlüftung, wie sie in den meisten Schulen vorkommt, ist nur bis zu einer Raumtiefe von maximal $2,5 \cdot$ Raumhöhe möglich. Für eine vorwiegend sitzende Tätigkeit wird dort ein Mindestquerschnitt an freier Öffnungsfläche von $2 \cdot 200 \text{ cm}^2$ pro m^2 Nutzfläche vorgegeben. Hinterlegt ist dabei aber eine Nutzfläche von 6 m^2 pro Raumnutzer. Umgerechnet auf die Person ergibt sich damit eine freie Öffnungsfläche von mindestens $0,24 \text{ m}^2/\text{Person}$. Bei Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage wird ein Zuluftvolumenstrom von 20 bis $40 \text{ m}^3/(\text{h Pers})$ gefordert, der allerdings bei Außentemperaturen über 26 bis 32°C und unter 0 bis -12°C linear bis zu 50% reduziert werden kann. Die Lüftung ist so auszulegen, dass keine Zuglufterscheinungen auftreten. Die neue Technische Regel für Arbeitsstätten A3.5 zur Raumtemperatur [3] gibt einen Lufttemperaturbereich von 20 bis 26°C für leichte Tätigkeiten vor. Raumlufttemperaturen über 26°C sind bei Außentemperaturen über 26°C zulässig, es sollen aber zusätzliche Maßnahmen wie effektiver Sonnenschutz, Nachtauskühlung und Lockerung der Kleidungsvorschrift getroffen werden. Bei Überschreitung der Raumlufttemperatur von 30°C müssen diese Maßnahmen getroffen werden. Räume mit Temperaturen über 35°C sind als Arbeitsräume nicht geeignet.

Nationale und internationale Normen

Die in Deutschland gültigen Normen für thermische Behaglichkeit und nichtthermische Raumluftqualität sind DIN EN 15251 [5] und DIN EN ISO 7730 [6], in der zusätzlich Angaben zur lokalen thermischen Behaglichkeit gemacht werden. Das Raumklima wird in beiden Normen in Kategorien eingeteilt. Die Kategorien A bis C in DIN EN ISO 7730 [6] entsprechen den Kategorien I bis III (Tabelle 2) in DIN EN 15251 [5].

Tabelle 2:
Kategorien des Raumklimas nach DIN EN 15251 [5].

Kategorie	Beschreibung
I	Hohes Maß an Erwartungen (z. B. Krankenhäuser)
II	Normales Maß an Erwartungen (neue und renovierte Gebäude)
III	Annehmbares Maß an Erwartungen (bestehende Gebäude)
IV	Außerhalb der oben genannten Kategorien (sollte nur für einen begrenzten Teile des Jahres angewendet werden)

Empfindet der Nutzer die Möglichkeit das Raumklima selbst zu beeinflussen, was in der Regel bei Fensterlüftung der Fall ist, akzeptiert dieser Nutzer auch ein breiteres Spektrum an Raumtemperaturen. Diesem Umstand trägt das adaptive Model in DIN EN 15251 mit einem breiteren Komfortbereich für die sommerlichen Raumtemperaturen in Räumen ohne mechanische Lüftung und Kühlung Rechnung. Ist die individuelle Beeinflussbarkeit des Raumklimas allerdings eingeschränkt, wie in einem Klassenzimmer, sollte die Raumtemperatur nach DIN EN 15251 in einem engeren Raumtemperaturbereich wie bei Räumen mit mechanischer Kühlung schwanken. Die Temperaturbereiche (Tabelle 3) entsprechen dabei denen von DIN EN ISO 7730. Zusätzlich ist dort die maximale Zugluft rate, in die sowohl Lufttemperatur als auch Luftgeschwindigkeit mit eingehen dargestellt. Der Zuluftvolumenstrom bzw. die maximale Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 3:
Komfortbereich der Operativen Raumtemperatur nach DIN EN 15251 [5] und Zugluft rate nach DIN EN ISO 7730 [6].

Kategorie	Operative Temperatur [°C]		Zugluft rate [%]
	Sommer	Winter	
I / A	21,0 - 23,0	23,5 - 25,5	< 10
II / B	20,0 - 24,0	23,0 - 26,0	< 20
III / C	19,0 - 25,0	22,0 - 27,0	< 30

Tabelle 4:
Empfohlene Lüftungsraten für ein Klassenzimmer (2 m³/Pers) in einem schadstoffarmen Gebäude und maximale Kohlendioxidkonzentration nach DIN EN 15251 [5].

Kategorie	Zuluftvolumenstrom je Person [m ³ /h]	Maximale Kohlendioxidgehalt [ppm] (bei 400 ppm Anteil in der Außenluft)
I	43	750
II	30	900
III	17	1200

VDI - Lüftungsregeln

In den VDI-Lüftungsregeln für Schulen [38] wird in Bezug auf die Raumtemperaturen und den Zuluftvolumenstrom bei Lüftungsanlagen auf die Kategorie II in DIN EN 15251 [5] verwiesen. Nur die Bewertung der Kohlendioxidkonzentration erfolgt in Anlehnung an den Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden [20]. Für weitere Festlegungen zur Raumtemperatur wird auf die VDI-Lüftungsregeln über die Kriterien für das Innenraumklima [36] verwiesen, die ein Ansteigen der Innentemperaturen auf 26,5°C bei Tageshöchsttemperaturen über 32°C zulässt. In den VDI-Lüftungsregeln zur Beurteilung der Raumluftqualität [37] werden die Möglichkeiten zur Lüftung mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Nach der Richtlinie ist freie Lüftung bei Einhaltung aller Richt- und Grenzwerte nach WHO in der Außenluft anwendbar, bei einer Überschreitung bis zu einem Faktor 1,5 nur noch in Ausnahmefällen anwendbar.

2.3 Freie Lüftung im Schulbau - Nutzerverhalten

Zum Thema Luftqualität in Klassenräumen mit Fensterlüftung gibt es umfangreiche Untersuchungen sowohl in Deutschland als auch im europäischen Ausland. Die Untersuchungen in Deutschland sind in einer Bekanntmachung der Innenraumlufthygienekommission des Umweltbundesamtes [21] veröffentlicht. Die Messungen zeigen, dass der langjährig gültige Richtwert für Kohlendioxid (1500 ppm) als Indikator für gute Luftqualität in den meisten Fällen weit überschritten werden. Die höchsten Werte und die häufigsten Überschreitungen treten dabei im Winter auf.

Da in den meisten Schulen in Deutschland über manuell bediente Fenster gelüftet wird, und es dabei gerade im Winter zu Problemen mit der thermischen Behaglichkeit kommt, ist es nicht überraschend, dass die Fenster in den meisten Klassenräumen nicht ausreichend geöffnet werden. Zudem hat sich gezeigt, dass reines Stoßlüften während der Pausen nicht ausreichend für gute Luftqualität ist. Um eine ausreichende Luftqualität zu erreichen, muss mindestens alle 20 min gelüftet werden.

Messungen in einem Testraum am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, der einem realen Klassenraum mit gleicher Belegungsdichte und Kohlendioxidemission nachgebildet ist, zeigen den Kohlendioxidverlauf bei einer Stoßlüftung nach 45 bzw. 20 min für die Dauer von jeweils 5 bzw. 10 min (Bild 1). Die Raumlufttemperatur sinkt dabei bei einer Außentemperatur von -5°C auf 10 bis 12°C ab (Bild 2). Eine Wiederholung der Messung bei einer Außentemperatur von etwa +5°C zeigte noch einen Temperaturabfall im Innern des Raumes auf 15°C.

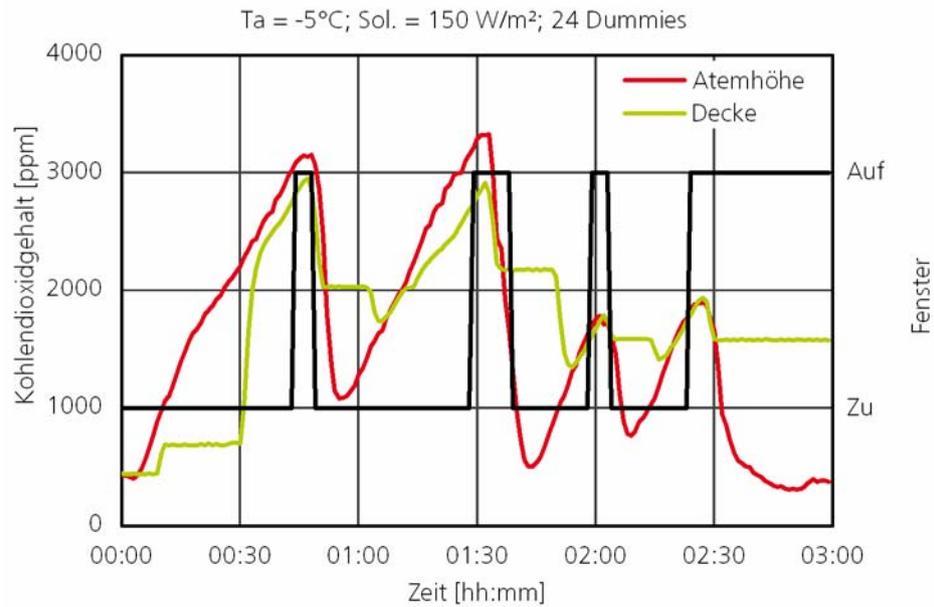


Bild 1:
Kohlendioxidverlauf bei Stoßlüftung im Testraum.

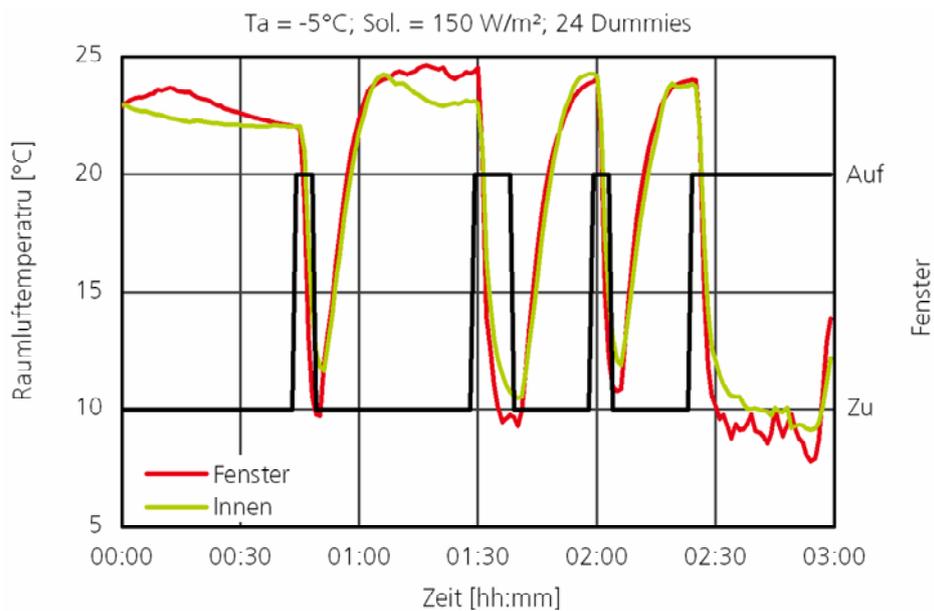


Bild 2:
Temperaturverlauf bei Stoßlüftung im Testraum.

Bei Untersuchungen zum Nutzerverhalten bei manueller Fensterlüftung zeigte sich, dass Fenster meist nicht aufgrund der Luftqualität geöffnet oder geschlossen werden. Dies ist deshalb schwer möglich, weil Menschen ihr Geruchsempfinden schon in relativ kurzer Zeit an die Umgebung und ihre eigenen Emissionen adaptieren, und so eine schlechte Luftqualität nur kurz nach Betreten eines Raumes wahrnehmen können. Grund für das Öffnen und Schließen eines Fensters sind vor allem die vorherrschenden Temperaturen innen und außen. In einer schwedischen Studie [28] wurden Lehrer an verschiedenen Schulen zum Lüftungsverhalten in den Klassenräumen befragt. Die meistgenannten Gründe für das Öffnen der Fenster waren, dass es im Klassenzimmer zu stickig

(86%) oder zu warm (71%) war. Die wichtigsten Gründe für das Schließen der Fenster waren zu kalte Außenluft (67 %) oder zu starker Lärm im Außenbereich (62 %). Im Sommer wird häufig und lange gelüftet (Bild 3). Im Winter dagegen lüften die Lehrer wesentlich seltener. Auch die Lüftungsdauer reduziert sich im Winter erheblich. An einer Schule in Osnabrück konnte durch kontinuierliche Messungen des Fensteröffnungsverhaltens ebenfalls gezeigt werden, dass die Fensteröffnungsdauer im Winter deutlich reduziert ist [15].

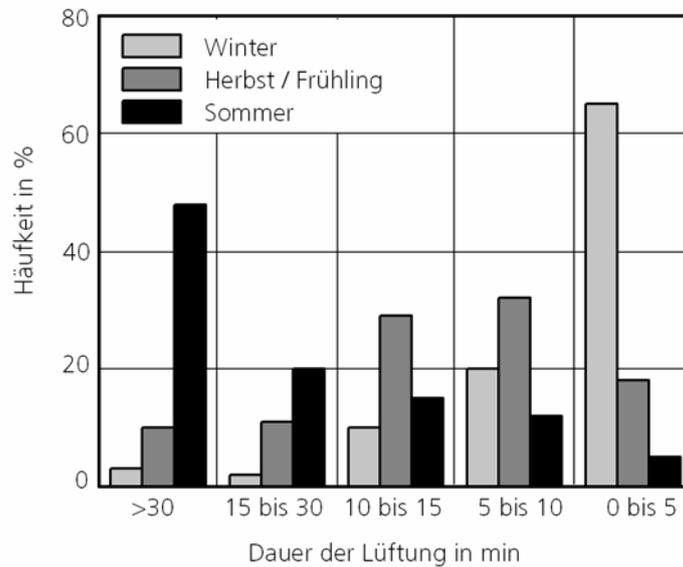


Bild 3:
 Angegebene Lüftungsdauer in Klassenräumen bei einer Befragung von schwedischen Lehrern [28].

Dies bestätigen auch Studien in Bürogebäuden, bei denen der Anteil der offenen Fenster mit der Außentemperatur anstieg [30] und [27]. In einer weiteren Studien wurde außerdem ein plötzlicher Rückgang des Anteils offener Fenster zwischen September und Oktober und ein plötzlicher Anstieg des Anteils offener Fenster zwischen März und April gefunden. Die Änderung des Nutzerverhaltens trat bei der Studie mit dem ersten kalten Tag bei ca. 10 °C bzw. dem ersten warmen Tag mit 15 °C auf [17]. Neben der Außentemperatur scheint auch die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchte in der Außenluft eine Rolle beim Lüftungsverhalten des Nutzer zu spielen. So hat eine Schweizer Studie herausgefunden, dass die Anzahl der geöffneten Fenster mit steigender Windgeschwindigkeit und steigender Außenluftfeuchte sinkt [11]. Außerdem öffnen und schließen die Nutzer vermehrt die Fenster, wenn sie einen Raum betreten oder verlassen. Unabhängig davon können Nutzer in 'Viellüfter' und 'Weniglüfter' eingeteilt werden [31] [13].

3 Fassadenöffnungsvarianten für Schulen

3.1 Anforderungsprofil an Fassadenöffnungsmöglichkeiten

In bestehenden Schulen werden die Fenster vor allem im Winter meist nur kurzzeitig in den Pausen geöffnet (Stoßlüftung). Die üblichen Kippweiten von Fenster sind viel zu groß, um die Fenster im Winter dauerhaft geöffnet zu lassen. Ein Stoßlüftung bei Stundenwechsel (alle 45 min) oder gar nur in den Pausen (alle 90 min) ist aber bei weitem nicht ausreichend, um die erforderliche Luftqualität aufrecht zu erhalten (Bild 1). Dazu müsste spätestens alle 20 min gelüftet werden. Das kann zwar durch sowieso notwendige Pausen mit in den Unterricht eingebaut werden, von manchen Lehrern wird es aber als störend empfunden, wenn sie neben den vielen anderen Dingen auch noch darauf achten müssen, dass immer wieder rechtzeitig gelüftet wird. Viel störender als die notwendige Unterrichtsunterbrechung ist bei sehr kalten Außentemperaturen der durch die Stoßlüftung verursachte starke Temperaturabfall im Raum. Auch nach dem Schließen der Fenster dauert es noch einige Zeit bis die Raumtemperatur wieder annehmbare Werte erreicht hat (Bild 2).

Eine Fassadenöffnungsmöglichkeit sollte daher eine feine Einstellung der freien Querschnittsfläche ermöglichen, damit im Winter nicht mehr als die benötigte Luftmenge ausgetauscht wird, und so eine unnötige Auskühlung des Raums verhindert wird. So kann die Öffnung dauerhaft geöffnet bleiben und es entsteht eine minimale Dauerlüftung.

Fassadenöffnungsmöglichkeiten in Schulen müssen zur Lüftung zusätzliche Anforderungen erfüllen. Anders als bei Büroräumen und anderen Nutzungen geht in Klassenzimmern die Aufenthaltszone der Personen bis direkt an die Fassade. Vor allem bei sehr kalten Außentemperaturen kann die kalte Zuluft dann sehr schnell zu Unbehaglichkeit der Raumnutzer führen.

Dazu kommt, dass die Belegungsdichte in Klassenräumen sehr hoch ist. Bei voller Belegung der Klassenzimmer führt das zu einem sehr hohen notwendigen Luftwechsel im Raum. Bei einer üblichen Belegungsdichte von 0,5 Pers/m² und einer Raumhöhe von 3 m, muss mindestens ein Luftwechsel von 2,1 h⁻¹ erreicht werden, um den Richtwert von 2000 ppm auf Dauer (Ausgleichskonzentration) nicht zu überschreiten (Bild 4). Ein Luftwechsel von mindestens 5,5 h⁻¹ ist erforderlich, um den Richtwert 1000 ppm nicht zu überschreiten. Das entspricht bei einer Klassengröße von 30 Personen Zuluftvolumenströmen von 380 bzw. 990 m³/h.

Je geringer der Luftwechsel allerdings ist, umso später stellt sich die aufgrund der Massebilanz ergebende Ausgleichskonzentration im Raum ein. Der Kohlendioxidgehalt im Raum ist daher nicht konstant, sondern steigt über die Zeit solange an, bis die Ausgleichskonzentration erreicht ist. Bei einem relativ geringen Luftwechsel von z. B. 1 h⁻¹ wird die Ausgleichskonzentration weder nach 45 min noch nach 90 min erreicht. Am Ende einer Unterrichtsstunde (45 min) würde sich ein maximaler Kohlendioxidgehalt von etwa 2200 ppm ergeben (Bild 4). Als Mittelwert über die gesamte Schulstunde ergeben sich etwa 1500 ppm.

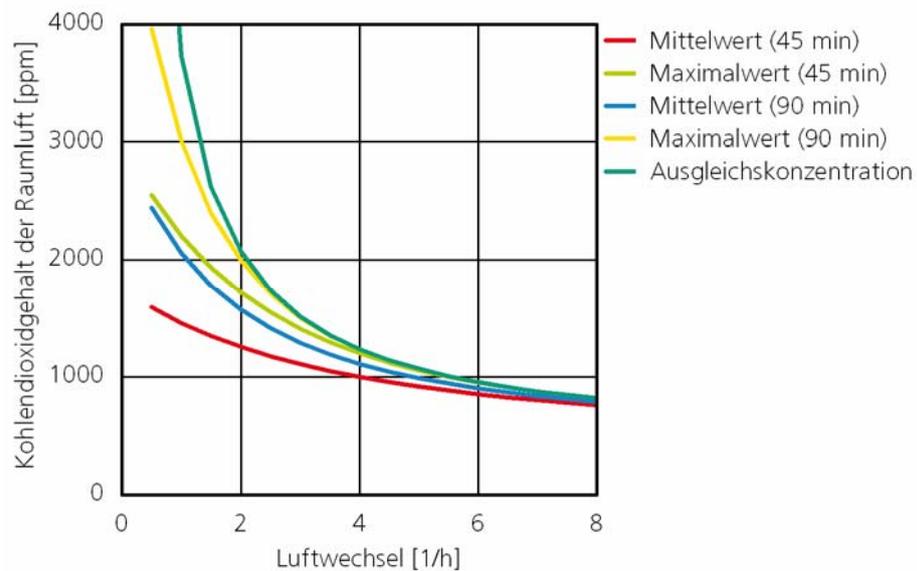


Bild 4:
Mittelwerte und Maximalwerte des Kohlendioxidgehalts in einem Klassenzimmer nach 45 bzw. 90 min bei einem Raumvolumen von 6 m³ und einer Kohlendioxidabgabe von 20 l/h pro Schüler.

Die hohe Belegungsdichte in Klassenräumen bedingt aber auch sehr hohe interne Wärmelasten. Eine erwachsene Person mit leichter Aktivität gibt 75 W sensible Wärme bei 24°C Raumlufttemperatur und 90 W sensible Wärme bei 22°C Raumlufttemperatur ab. Kinder geben zwar durch ihre geringere Oberfläche weniger Wärme ab, die Aktivität von Kindern ist aber meist höher als die von Erwachsenen, so dass die absolute Wärmeabgabe in etwa gleich bleibt. So wird bei einem dreifachem Luftwechsel, das entspricht etwa einer Ausgleichskonzentration von 1500 ppm Kohlendioxid, und einer Wärmeabgabe von 90 W pro Person bereits ab 5°C Außentemperatur von einer Person mehr Wärme abgegeben als durch die Lüftung verloren geht (Bild 5). Das bedeutet, dass die Lüftung in einem Klassenraum schon ab relativ niedrigen Außentemperaturen auch zur Abfuhr von Wärmelasten genutzt werden muss. Hier sind aber die Wärmegewinne durch Solarstrahlung noch nicht eingerechnet.

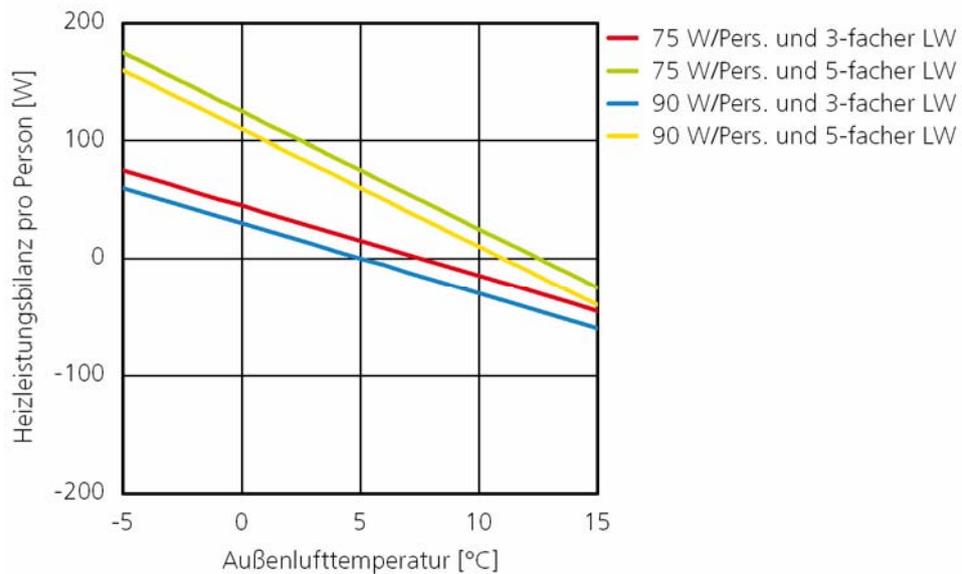


Bild 5:
Heizleistungsbilanz aus der sensiblen Wärmeabgabe pro Person und den personenbezogenen Lüftungswärmeverlusten aufgrund Schad- und Geruchsstoffabfuhr aus dem Raum.

Bei Außentemperaturen über 20°C, wenn nur noch wenig Kühllast durch die freie Lüftung abgeführt werden kann, wird die entstehende Wärme vor allem in den Raumwänden gespeichert. Dazu ist eine schwere Bauweise am besten geeignet. Die tagsüber gespeicherte Wärme muss aber über Nacht wieder abgeführt werden können. Dazu müssen die Klassenzimmer über Nacht gelüftet werden können, damit die Wärme durch die kalte Nachtluft (durchschnittlich etwa 12 bis 16 C in Deutschland) wieder aus dem Raum transportiert wird. Dazu müssen die Lüftungsöffnungen groß genug sein, um einen ausreichenden Luftwechsel zu gewährleisten, aber trotzdem Schutz vor Einbruch bieten.

Die Anforderungen an die freie Lüftung im Sommer und Winter sind also unterschiedlich. Aber auch die Voraussetzungen und die damit erforderlichen Öffnungsflächen sind im Sommer und Winter verschieden. Die treibende Kraft für den Luftaustausch bei einseitiger freier Fensterlüftung bilden der Temperaturunterschied zwischen innen und außen und die Druckunterschiede an der Fassade durch Wind. Der Luftaustausch an der Fassade ist sowohl proportional zum Druckunterschied als auch zur Öffnungsfläche. Da im Sommer vor allem der Temperaturunterschied und oft auch die Windgeschwindigkeit wesentlich geringer sind als im Winter, werden im Sommer wesentlich größere Öffnungsflächen für den gleichen Luftaustausch benötigt als im Winter. Dies betrifft vor allem den Luftaustausch über nur eine Fassade, da hier der Druckunterschied aufgrund von Wind geringer ist als bei gegenüberliegenden Öffnungen. Die Einstellung der Öffnungsweite je nach Witterungsbedingung und Belegung des Raumes kann von einem Nutzer nicht mehr geleistet werden. Dazu braucht es technische Unterstützung. Wird die Öffnung an der Fassade mit Motoren automatisiert, kann das System im Hintergrund aufgrund von Messdaten eine Öffnungsweite vorschlagen, dass dann bei Bedarf vom Nutzer übersteuert werden kann.

Bei großen Schwankungen der Umgebungsbedingungen ist es schwierig bei freier Lüftung einen konstanten Luftaustausch zu ermöglichen. Die Öffnungsweite müsste dazu ständig an die Witterungsbedingungen angepasst werden. Da die Windgeschwindigkeit und Windrichtung stärker

schwanken als die Außentemperatur ist es sinnvoll, die Öffnungen an der Fassade so anzuordnen, dass der Luftaustausch möglichst unabhängig vom Wind ist. Das ist im Winter relativ einfach zu erreichen, weil hier große Temperaturunterschiede an der Fassade bestehen. Im Sommer, mit sinkenden Temperaturdifferenzen, wird der Einfluss des Windes auf den Luftaustausch immer dominanter. Im Sommer sind aber auch die Anforderungen an eine möglichst konstanten Luftwechsel wegen höherer Zulufttemperaturen, in Bezug auf thermische Behaglichkeit und Heizenergiebedarf, geringer. Hier kann der Luftwechsel zeitweise ohne Probleme etwas höher sein.

Zusammenfassend sollen Öffnungsmöglichkeiten in Fassaden von Klassenräumen folgende Anforderungen erfüllen bzw. Eigenschaften aufweisen:

- Feine Einstellung der Öffnungsfläche
- Große Variabilität der Öffnungsfläche
- Stabile Luftwechsel
- Geringe Abhängigkeit des Luftwechsel von den Windverhältnissen
- Möglichst keine Zuluftöffnung in der Aufenthaltshöhe
- Vorerwärmung der Zuluft durch Heizkörper oder durch Vermischung der Zuluft mit der Raumluft
- Eignung zur Nachtauskühlung (Einbruchschutz)

3.2 Bestehende Fassadenöffnungsmöglichkeiten (Schulbegehungen)

Zur Analyse der bestehenden Fassaden wurden die Eigenschaften der Klassenräume aller Schulen im Landkreis Miesbach in Bayern bezüglich der Temperierung, Belüftung und Belichtung aufgenommen, in einer Datenbank erfasst und statistisch ausgewertet. Es wurden insgesamt 21 Schulen im Landkreis Miesbach, in dem auch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik angesiedelt ist, untersucht. Eine weitere Schule liegt im Nachbarlandkreis, wird jedoch auch von Schülern des Landkreises in Anspruch genommen. Eine ausführliche Darstellung der Untersuchung erfolgte bereits in [16].

Aufgrund der Nutzung ergeben sich typische Raumgrößen für Klassenräume. Es ergibt sich ein Spektrum für das Raumvolumen von 76 bis 480 m³ mit einem Medianwert von 216 m³. Es ergeben sich Volumen Kennzahlen für die Hälfte der Räume im Bereich von 7,8 bis 11,3m³/ Platz. Die Klassenräume besitzen Grundflächen im Bereich von 20 bis 114 m², wobei 80% der Klassenräume Flächen zwischen 49 und 83 m² aufweisen. Die Raumhöhen variieren zwischen 2,44 und 4,73 m. Die Hälfte aller Klassenräume weist eine Höhe zwischen 3 und 3,2 m auf. Der Mindestwert der Belegungsdichte der Klassenräume von 2 m² je Schüler wird in ca. 80% der Räume eingehalten. Als Median der Belegungsdichte ergibt sich 2,8 m².

Die meisten untersuchten Klassenräume besitzen einen Fensterflächenanteil von 30 bis 60%. Es gibt nur wenige Klassenräume, deren gesamte Fassade verglast ist. Die Fensterflächen der untersuchten Klassenräume besitzen unterschiedliche Orientierungen. Ausgenommen Orientierungen nach Nordwest und West sind alle Orientierungen in ähnlichem Maße vertreten. Wenige Räume besitzen Fenster in zwei Fassaden.

Einer der wichtigsten Einflüsse auf die sommerlichen Temperaturen ist sowohl das Vorhandensein, als auch Art und Lage eines Sonnenschutzsystems. Etwa 50% der Räume besitzen keinen Sonnenschutz. Gerade bei Ost-Orientierung sind häufig Räume ohne Verschattungssystem anzutreffen. Dies ist besonders ungünstig, da in den meisten Schulen der Unterricht vorwiegend am

Vormittag gehalten wird. Bei den außen liegenden Sonnenschutzsystemen spielt die Größe des Hinterlüftungsspalt zwischen Sonnenschutz und Fassade eine wichtige Rolle nicht nur für die Wirksamkeit des Sonnenschutzes sondern auch für die freie Belüftung des dahinterliegenden Raumes. Als Median für den Hinterlüftungsspalt ergibt sich ein Wert von 14,5 cm. 75% der untersuchten beweglichen Sonnenschutzsysteme besitzen einen Hinterlüftungsspalt, der kleiner als 17cm ist.

Aufgrund der wesentlich höheren inneren Wärmelasten in Schulgebäuden ist die Erfüllung des Nachweises des baulichen sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 zwar kein hinreichendes Indiz für die Vermeidung von Überhitzung. Die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes von über 100 Klassenräumen zeigte jedoch, dass 50% der untersuchten Räume den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gar nicht erfüllen. Der bauliche sommerliche Wärmeschutz ist insgesamt auch vor dem Hintergrund der erhöhten Wärmelasten in den meisten Klassenräumen als unzureichend zu bezeichnen.

Die Fenstertypen, die am häufigsten vorgefunden werden, sind Fenster mit Kipp- bzw. Drehkippflügeln und Fenster mit Schwingflügeln. Auffällig ist auch ein relativ hoher Anteil an Festverglasung. Die Variabilität der Fassaden bezüglich der möglichen Öffnungskombinationen ist recht hoch. Häufig anzutreffen sind kippbare Oberlichter (). Oft sind Anteile der Fassade, die eigentlich offenbar sein sollten, nicht mehr offenbar, z.B. durch das Abmontieren von Griffen. Welche Fenster in Klassenräumen geöffnet werden bestimmt vor allem in Grundschulen die Lehrkraft. Die anderen Fenster sind häufig durch Pflanzen oder durch Gestaltungselemente verstellt.

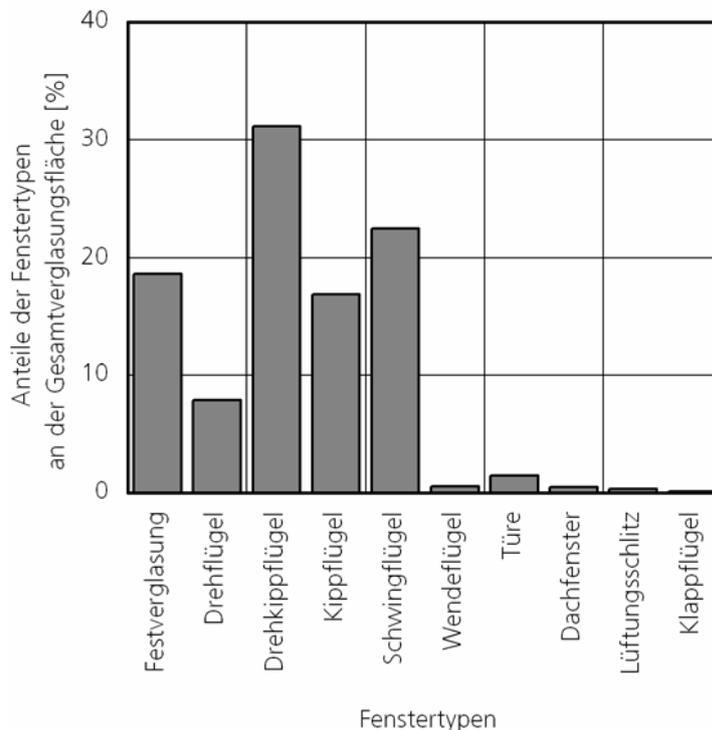


Bild 6:
Fenstertypen in Klassenräumen.

Um die Versorgung der über 100 Klassenräume mit Tageslicht bewerten zu können, wird für jeden Raumtyp der vereinfachte Tageslichtquotient nach DIN V 18599-4 ermittelt. Die untersuch-

ten Klassenräume weisen zu etwa zwei Dritteln eine gute bis mittlere Tageslichtversorgung auf. Bei einem Verhältnis von Fensterfläche zu Raumgrundfläche von größer als 20% sind drei Viertel der Räume „gut“ bis „mittel“ mit Tageslicht versorgt.

3.3 Stand der Forschung bei Fensterlüftung

Bei Fensterlüftung ist das Raumklima wesentlich von vorherrschenden Witterungsbedingungen abhängig. Sowohl Luftaustausch als auch thermische Behaglichkeit im Raum werden dadurch unmittelbar beeinflusst.

Luftaustausch bei Fensterlüftung

Die treibende Kraft für den Luftaustausch bei einseitiger freier Fensterlüftung ist der Druckunterschied am Fenster aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und aufgrund von Wind. Der Volumenstrom durch das Fenster ist abhängig von der Öffnungsfläche des Fensters, vermindert durch die Einschnürung der Luft beim Passieren des Fensterrahmens, und von der Luftgeschwindigkeit, vermindert durch die Reibung am Fenster. Die Luftgeschwindigkeit wiederum ist abhängig von der Druckdifferenz am Fenster und der Dichte der Luft. So kann der Volumenstrom durch das Fenster mit diesen Werten berechnet werden. Einschnürung und Reibung werden dabei durch den Durchflussbeiwert C beschrieben.

Gibt es nur eine Öffnung im Raum, ist dies sowohl Abluft-, als auch Zuluftöffnung. Bei kalter Außenluft strömt die Luft im unteren Bereich des Fensters in den Raum und entweicht durch den oberen Bereich. Bei steigender Außentemperatur wird dieser Effekt durch den Wind überlagert, die Raumluftströmung kann dann jede beliebige Form annehmen. Ob sich im Winter tatsächlich ein Kaltluftsee am Boden bildet hängt nicht nur von der Zulufttemperatur, sondern auch von Größe und Art des Zuluftvolumenstroms ab [14].

Da die Umgebungsbedingungen sehr großen Schwankungen unterliegen, ist es sehr schwierig bei freier Lüftung eine rechnerische Vorhersage über die Lüftungsvorgänge zu machen. Einfache rechnerische Abschätzungen sind daher immer ungenau. Nur mit Hilfe von Finite-Elemente-Methoden können Randbedingungsformulierungen gefunden werden, die eine Simulation der freien Lüftung ermöglichen [14]. Deshalb wird einseitige Fensterlüftung immer wieder in Experimenten untersucht, um eine genauere Vorhersagemöglichkeit für den Luftwechsel zu erhalten.

Maas [25] untersuchte die Einflussgrößen Windgeschwindigkeit, Raum- und Außenlufttemperatur sowie unterschiedlichen Fensteröffnungen auf den Luftwechsel. Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass sich bei gleichzeitiger Einwirkung von Thermik und Wind die Volumenströme keinesfalls additiv überlagern. Es liegen vielmehr Bereiche vor, in denen der reine Temperatureinfluss überwiegt, und Bereiche, in denen der Luftwechsel maßgeblich von der Windgeschwindigkeit hervorgerufen wird. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist, umso geringer ist der Einfluss des Windes. Bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/s scheint allerdings selbst bei sehr großen Temperaturdifferenzen der Wind den entscheidenden Einfluss zu haben. Damit bestätigen sich frühere Untersuchungen, auf die in der Arbeit von Maas hingewiesen wird. Larsen [22] untersuchte vor allem den Einfluss der Windrichtung auf den Luftwechsel. Die Windrichtung hat demnach nicht nur Einfluss auf den Luftwechsel, sondern auch darauf, welche der beiden Faktoren Thermik und Wind entscheidend für den Luftaustausch ist. Beide Arbeiten beziehen

in ihre Berechnungen neben dem Temperaturunterschied und der Windgeschwindigkeit noch einen Faktor für den Einfluss der Windturbulenz mit ein.

Bei der bisherigen Darstellung wird vorausgesetzt, dass das Fenster bündig an der Innenseite der Außenwand anschließt. Wird das Fenster mit einer Laibung versehen, hat dies einen entscheidenden Einfluss auf den Luftaustausch. Kennlinien zur Beschreibung des Luftwechsels sind somit nur unter Beachtung der zugrunde gelegten Randbedingungen verwendbar [25]. Der Einfluss von verschiedenen Fensterlaibungen wird von Hall [12] näher untersucht, allerdings nicht unter realen Bedingungen, sondern in einer Klimakammer, so dass der Einfluss des Windes nicht im Experiment abgebildet werden kann. Die Fensterlaibung hat durch die Verringerung der effektiven Öffnungsfläche beim Kippen des Fensters einen großen Einfluss auf den Außenluftvolumenstrom. Durch die Überschneidung der Fensterrahmen und die Überschneidung der Fensterrahmen und der Fensterlaibung ergeben sich auch verschiedene Möglichkeiten, die tatsächlich wirksame Öffnungsfläche oder den Kippwinkel zu berechnen. Dies ist vor allem deswegen wichtig, weil der Luftvolumenstrom bei freier Lüftung immer in Bezug auf die Öffnungsfläche oder den Kippwinkel angegeben wird. Beim Vergleich verschiedener Messungen ist also immer darauf zu achten, wie diese Referenzgröße berechnet wird, und wie die Einbausituation (Fensterlaibung) des Fensters ist. Hall stellt zudem bei den Versuchen fest, dass auch ein Heizkörper unter dem Fenster Einfluss auf den Volumenstrom hat. Ist der Heizkörper angeschaltet, verringert sich der Volumenstrom durch das Fenster [12].

Die freie Lüftung hängt nicht nur von den Witterungsbedingungen, sondern auch von der Ausrichtung der Öffnungsflächen und ihrer Anordnung zur Umgebungsbebauung ab. Die Luftströmung in der Umgebung von Gebäuden ist sehr komplex und gekennzeichnet von unterschiedlichen Turbulenzen, Luftgeschwindigkeiten und Drücken. Um diese Einflüsse bei besonderen Gebäuden ermitteln zu können, müssen Modelle der Umgebungsbebauung im Windkanal getestet werden. Dort wird dann die Druckverteilung auf den Fassadenflächen bei verschiedenen Windrichtungen gemessen. An der TU Dresden wurden Versuche zu eben diesen Druckbeiwerten für ein Gebäude mit und ohne Umgebungsbebauung durchgeführt [9]. Die gemessenen Volumenströme werden durch die Umgebungsbebauung im unteren Bereich des Gebäudes deutlich gemindert, im oberen Bereich, der über die Umgebungsbebauung hinausragt, zeigt sich kaum ein Einfluss.

Die hier dargestellten Ergebnisse beschreiben zwar einseitige Fensterlüftung, aber in allen genannten Untersuchungen wird nur ein Fenster pro Raum untersucht. In Klassenräumen ist es aber üblich mehrere Fenster nebeneinander zu öffnen. Hier kann der Wind einen größeren Einfluss auf den Luftwechsel haben, als in den Untersuchungen dargestellt.

Thermische Behaglichkeit bei freier Lüftung

Bei freier Lüftung wird Außenluft ohne thermische Vorbehandlung direkt in den Raum eingebracht. Aufgrund dieser Tatsache kann es bei kalten Außenlufttemperaturen zu Behaglichkeitsproblemen kommen.

In einem Versuchstand am Hermann–Rietschel-Institut in Berlin wurde die unterschiedliche Anordnung von horizontalen Luftschlitzen in der Fassade für den Fall einseitiger freier Lüftung im Winterfall auf ihre Auswirkung auf Volumenströme und thermische Behaglichkeit der Raumnut-

zer hin untersucht und mit früheren Versuchen an Kippfenstern verglichen [40], [41], [42]. Der Einfluss des Windes wird bei den Versuchen vernachlässigt. Um die grundsätzliche Anordnung der Luftschlitze zu ermitteln, werden in der Fassade drei waagrechte Luftspalte mit unterschiedlichen Querschnittsflächen über die Raumhöhe verteilt angebracht. Die Raumlufttemperatur wird durch im Raum verteilte Heizlasten konstant gehalten und, ebenso wie die Luftgeschwindigkeit, auf 0,1 m Höhe in 1,2 m Entfernung von der Fassade gemessen. Die Luftströmung im Raum verhält sich bei den Versuchen ähnlich der von Quelllüftung. Bei größerem Abstand zwischen Zu- und Abluftspalt stellen sich höhere Volumenströme ein, und bei steigender Temperaturdifferenz erhöht sich die Luftgeschwindigkeit am Boden. Bei einem zulässigen Wert für die Luftgeschwindigkeit von 0,18 m/s liegen die minimalen Außentemperaturen im Fall des Kippfensters (Öffnungswinkel 3 und 5°) bei 0 und 9°C, beim Zuluftspalt (25 mm hoch) bei 4°C. Bei unterschiedlichen Öffnungswinkeln der Kippfenster ergeben sich nur geringe Unterschiede bei den resultierenden Lufttemperaturen. Die unterschiedlichen Spalthöhen (10 und 25 mm) und vor allem die Anordnung des Zuluftspaltes haben aber einen erheblichen Einfluss auf die Lufttemperatur am Boden. Auch hier werden Minimalwerte für die Außenlufttemperatur festgelegt, bei der eine Lufttemperatur von 20°C in der Aufenthaltszone als Behaglichkeitskriterium erreicht wird. Für die Kippfenster (3 und 5° Öffnungswinkel) liegen die minimalen Außentemperaturen bei 6 und 10°C, für den Zuluftspalt (25 mm) in Fassadenmitte bei 12°C und in Bodennähe sogar bei 17°C. Dieser Wert ist vergleichbar mit der minimalen Zulufttemperatur bei mechanischen Quellluftsystemen. Der vertikale Temperaturgradient liegt bei allen Versuchen innerhalb von 2 K/m. Bei den Zuluftspalten hat die Erhöhung des Abstands zwischen Zuluftöffnung und Boden einen wesentlich größeren Einfluss auf die Raumlufttemperaturen als die Spalthöhe oder die Außenlufttemperatur, weil sich auf dem Weg des Zuluftstrahls nach unten dieser mit der Raumluft vermischt und erwärmt.

An der TU Dänemark wurde die Raumluftströmung für verschiedene Öffnungstypen von Fenstern untersucht [14]. Die Arbeit vergleicht Drehflügel, Schwingflügel und Kippflügel als Oberlichter in einem Testaufbau ohne Bezug zu einer bestimmten Nutzung des Innenraums. Der Drehflügel und der Schwingflügel werden als beste Wahl für die Belüftung im Sommer genannt. Für eine Lüftung im Winter werden sie als ungeeignet eingestuft. Der Grund dafür ist das Eintreten der Zuluft in den Raum direkt neben der Aufenthaltszone, so dass es sehr leicht zu Zugerscheinungen kommt. Zudem wird der Luftwechsel als schwer zu steuern eingestuft, weil bereits sehr kleine Öffnungswinkel sehr große Luftwechsel verursachen. Als beste Wahl für die Belüftung im Winter wird das Oberlicht genannt, weil die Außenluft außerhalb der Aufenthaltszone zugeführt wird, und sich die Luft auf dem Weg nach unten mit der Raumluft vermischen kann. Für eine Belüftung im Sommer reicht der Luftwechsel über Oberlichter allerdings nicht aus.

Bei warmen Außenlufttemperaturen kann der Luftwechsel ohne Windeinflüsse nahezu null werden. Zudem ist die Abfuhr von thermischen Lasten sehr begrenzt. Nach Zeidler [43] sinkt bereits bei 20°C Außenlufttemperatur trotz eines relativ hohen Volumenstroms von 30 m³/hm² die abführbare Kühllast auf 20 W/m². In Klassenräumen wird aber allein schon durch die Anwesenheit der Schüler eine sensible Kühllast von etwa 40 W/m² in den Raum gebracht. Um diese Wärmemengen abführen zu können, sind sehr große Volumenströme notwendig. Eine schwere Bauweise der Gebäude kann zusätzlich Temperaturspitzen im Raum mildern. Der Raum muss dann aber durch Nachtlüftung wieder auskühlen können.

3.4 Untersuchte Varianten und Witterungsbedingungen

Die Versuche werden in einem Fassadenprüfstand auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Valley durchgeführt. Zur Verfügung stehen zwei südorientierte Räume mit ähnlicher Raumtiefe wie reale Klassenräume und je 5 Fensterachsen. Personenlastsimulatoren ermöglichen die Nachbildung der internen Wärmelasten durch die hohe Belegungsdichte in Schulen. Die Simulatoren emittieren auch Kohlendioxid, das als Tracergas für die Luftwechselberechnungen verwendet wird. Die genaue Beschreibung des Versuchsgebäudes, der Personenlastsimulatoren, sowie der installierten Messtechnik ist im Anhang A.1 nachzulesen.

Für die Versuche werden Fassadenelemente mit für Schulen typischen Öffnungsflügeln eingesetzt. Das sind, wie in Kapitel 3.2 erläutert, Dreh-/Kippenster und Schwingenster (Bild 7). Diese werden auf ihre grundsätzliche Eignung im Schulbau und auch im Hinblick auf ihre Eignung für eine Automatisierung der Fensterlüftung untersucht.

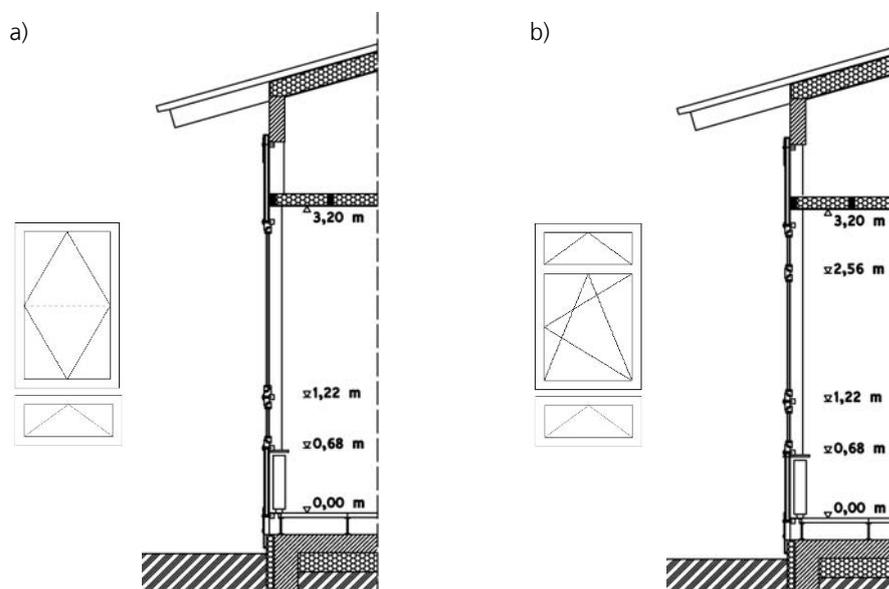


Bild 7:
Kombination der Öffnungsflügel für a) Raum 1 und b) Raum 2.

Die kritische Jahreszeit ist dabei der Winter. Die Bewertungskriterien sind zum einen der durch eine bestimmte Öffnungsgeometrie und -weite erreichte Mindestluftwechsel bzw. der maximale Kohlendioxidgehalt in der Raumluft. Allerdings sollte der Luftwechsel auch nicht zu hoch sein, um unnötigen Heizenergieverbrauch zu verhindern. Zum anderen muss die thermische Behaglichkeit, auch direkt neben dem Fenster, im Raum noch gegeben sein. Das betrifft vor allem die Lufttemperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Raumluft, die hier durch die Zugluft rate (DIN EN ISO 7730 [6]) beschrieben wird. Die Oberflächentemperaturen sind bei den Versuchen von geringerer Bedeutung, da sie eher vom Dämmstandard des Gebäudes als von der Lüftung abhängen. Ein Absinken der Oberflächentemperaturen im Versuchsfall tritt nur bei einem zu hohen Luftwechsel auf. Für die Bewertung der Behaglichkeit in realen Klassenzimmern in Bestandsgebäuden spielt die Oberflächentemperatur aber eine entscheidende Rolle [15].

Zusätzlich werden die Öffnungsflügel auch für sehr warme Außentemperaturen untersucht. Interessant ist dabei nicht nur die Luftqualität, sondern vor allem die thermische Behaglichkeit. Da in den Versuchsräumen keine aktive Kühlung vorhanden ist, können sich hier die Oberflächentemperaturen sehr stark verändern. Die Ergebnisse sind allerdings nicht ohne Weiteres auf jede Schule übertragbar, da die Erwärmung sehr stark von den verfügbaren Speichermassen im Innern und vom vorhandenen Sonnenschutz abhängt. Zu Auskühlung der erwärmten Innenwände wird mit den vorhandenen Öffnungsflügeln eine Nachtauskühlung durch freie Lüftung untersucht.

Untersuchte Varianten im Winter

Die Versuche sind nach der Anordnung der Fassadenöffnungen in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe bilden Kippflügel in einer Reihe, die zweite Gruppe bilden Kippflügel in zwei Reihen übereinander angeordnet und die dritte Gruppe Schwingflügel. Zusätzlich zur Öffnungsweite der großen Kippfenster wird die Anzahl der geöffneten Fenster variiert. Bei den Schwingflügeln wird vor allem die Öffnungsweite variiert, bei den Kippflügeln sowohl die Öffnungsweite als auch die Lage der geöffneten Fenster. Die Öffnungsvarianten sind in Bild 8 dargestellt.

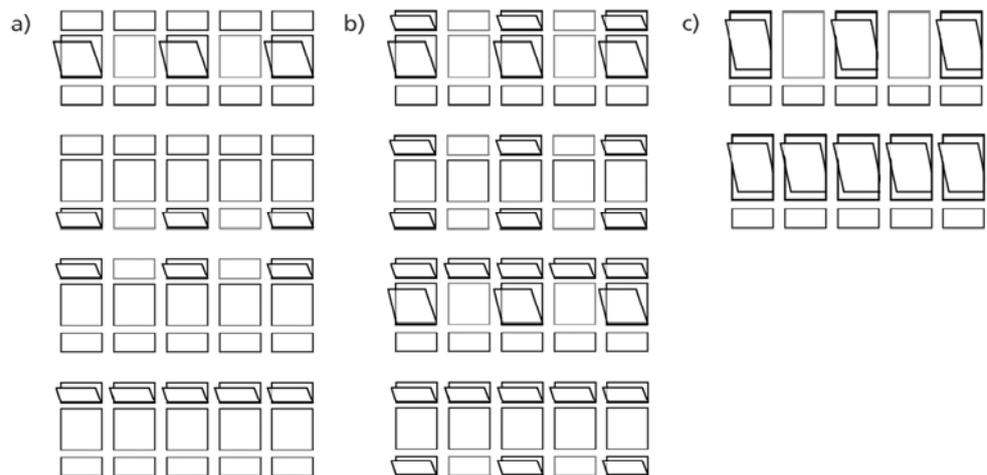


Bild 8:
Kombination der Öffnungen für die Versuche im Winter mit a) Kippflügel in 1 Reihe, b) Kippflügel in 2 Reihen und c) Schwingflügeln. Öffnungsweite kleine Kippflügel: 100%. Öffnungsweite große Kippflügel: 50 und 100%. Öffnungsweite Schwingflügel: 7,15 und 30%.

Eine Zusammenstellung der Abmessungen und Öffnungsflächen der einzelnen Fenster befindet sich im Anhang A.1.4. Tabelle 5 enthält die Gesamtöffnungsflächen der einzelnen Varianten.

Tabelle 5:
Zusammenstellung der Öffnungsflächen der untersuchten Öffnungsvarianten (KF: Kippflügel, SF Schwingflügel, Angabe der Öffnungsweite in %).

Reihe 1	Reihe 2	Fläche [cm ²]
3 KF Mitte mit 50%	-	2115
3 KF Unten mit 100%	-	5859
5 KF Unten mit 100%	-	9764
3 KF Oben mit 100%	-	5859
5 KF Oben mit 100%	-	9764
3 KF Mitte mit 50%	3 KF Oben mit 100%	9974
3 KF Mitte mit 100%	3 KF Oben mit 100%	15358
3 KF Unten mit 100%	3 KF Oben mit 100%	11918
3 KF Mitte mit 50%	5 KF Oben mit 100%	11879
3 KF Mitte mit 100%	5 KF Oben mit 100%	19263
3 KF Unten mit 100%	5 KF Oben mit 100%	15623
3 SF mit 7%	-	2011
5 SF mit 7%	-	3352
3 SF mit 15%	-	2084
5 SF mit 15%	-	3473
3 SF mit 30%	-	4979
5 SF mit 30%	-	8298

Untersuchte Varianten im Sommer

Die Versuche sind eingeteilt in freie Lüftung während der Schulstunden und freie Lüftung zur Nachtauskühlung. In beiden Fällen werden die Versuche mit Kipp- und Schwingflügeln mit einer minimalen und einer maximalen Öffnungsfläche durchgeführt. Anders als bei den Winterversuchen sind hier die Höhendifferenz und die Fläche der Öffnungsvarianten für beide Flügeltypen nahezu identisch und damit direkt vergleichbar. Die minimale Öffnungsfläche beträgt ca. 1,6 m² (0,07 m²/Person) und kann möglicherweise auch zur Dauerlüftung über Nacht eingesetzt werden, da hier keine Personen direkt über das Fenster in den Raum gelangen können. Die maximale Öffnungsfläche beträgt etwa 4,8 m² (0,2 m²/Person). Die Fläche entspricht einem Entwurf der ASR 3.6, der während der Untersuchungen im Sommer 2009 diskutiert wurde. Hier sind die Öffnungsflächen zu groß, um die Fenster unbeaufsichtigt über Nacht zu öffnen. Die untersuchten Varianten zeigt Bild 9.

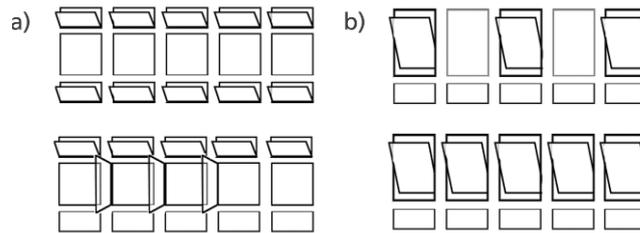


Bild 9:
Kombination der Öffnungen für die Versuche im Sommer mit a) Kipp- und Drehflügeln und b) Schwingflügeln. Öffnungsweite kleine Kippflügel: 100%. Öffnungsweite Schwingflügel: 3 x 54% oder 5 x 90%.

Witterung bei den Versuchen im Winter

Da es sich bei den Untersuchungen um Freilandversuche handelt, können nicht alle Varianten unter den absolut gleichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden. Daher werden die Daten hier zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten auf den Bereich mit der größten Datenmenge eingeschränkt:

- Außentemperatur von -6 bis +4°C
- Windgeschwindigkeit von 0 bis 4 m/s
- Solarstrahlung von 0 bis 200 W/m²

Dieser Bereich entspricht für die Abbildung der Winterbedingungen, v. a. der Außentemperatur, durchaus realistischen Bedingungen. Eine Auswertung der Wetterdaten der Wetterstation am Fraunhofer Institut für Bauphysik (Auslegungstemperatur für die Heizlast: -18°C) während aller Tagesstunden, jeweils zwischen 8:00 und 16:00 Uhr, hat ergeben, dass 95% der auftretenden Außentemperaturen über -5°C liegen (Bild 10).

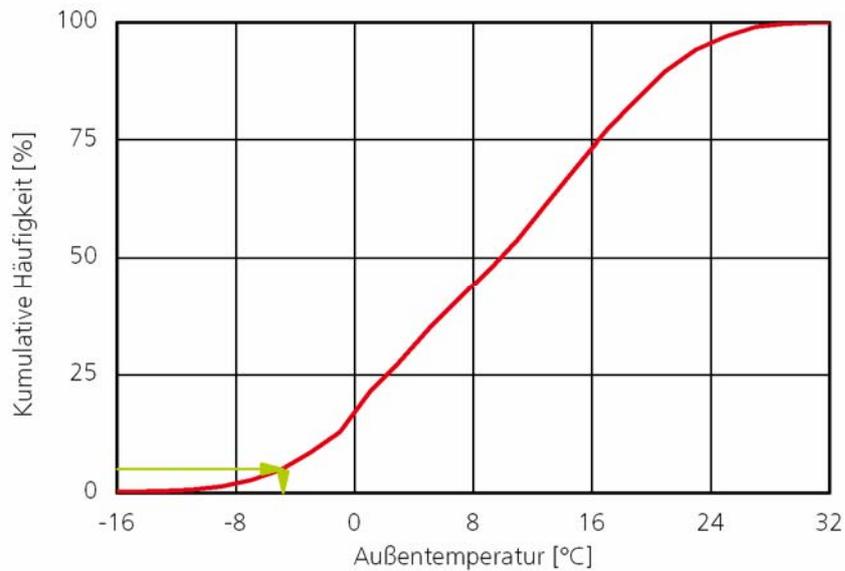


Bild 10:
Außentemperatur zwischen 8:00 und 16:00 Uhr; gemessen in den letzten 10 Jahren an der Wetterstation in Holzkirchen.

Auch für die Windgeschwindigkeit werden mit dieser Einschränkung 80% der auftretenden Fälle abgedeckt. Bei den Windrichtungen kann keine einheitliche Verteilung zwischen den Varianten erreicht werden (Bild 11). Da in am Standort der Wind vorwiegend aus SW bis W und O kommt. Bei manchen Varianten überwiegt daher die eine oder die andere Windrichtung.

Eine Auswertung der Globalstrahlung in den Monaten Dezember bis Februar zeigt, dass in ca. 70% der Tageszeit die Globalstrahlung weniger als 200 W/m² beträgt (Bild 12).

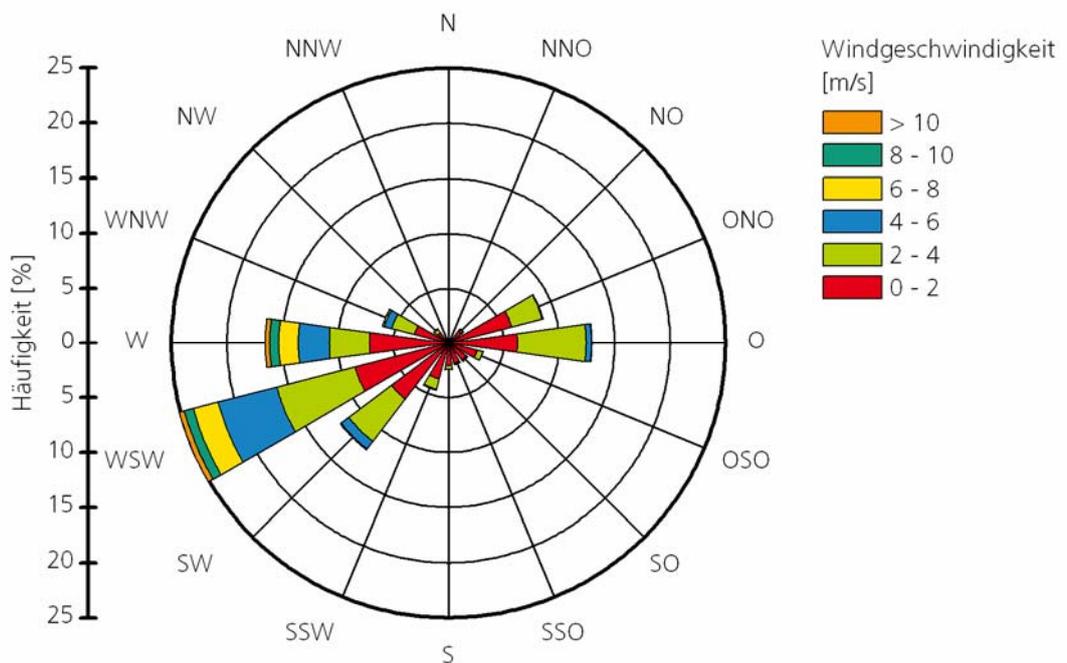


Bild 11:
Windgeschwindigkeiten und Windrichtung zwischen 8:00 und 16:00 Uhr; gemessen in den letzten 10 Jahren an der Wetterstation in Holzkirchen.

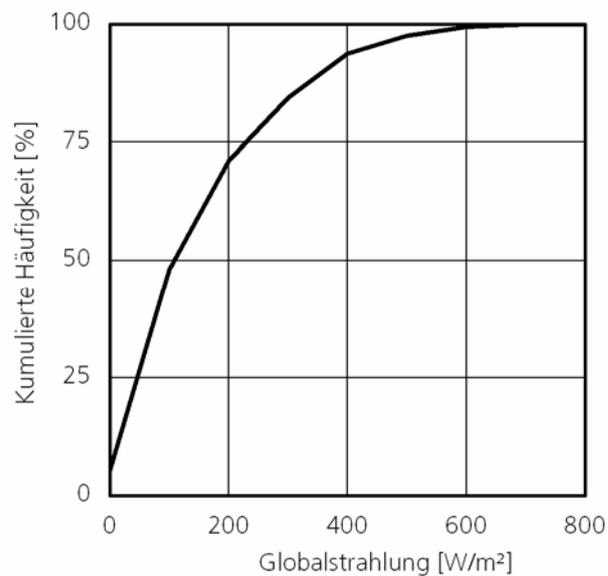


Bild 12:
Globalstrahlung zwischen 8:00 und 16:00 Uhr in den Monaten Dezember, Januar und Februar;
gemessen in den letzten 10 Jahren an der Wetterstation in Holzkirchen.

Witterung bei den Versuchen im Sommer

Die Sommerversuche finden während des Tages bei folgenden Witterungsbedingungen statt:

- Außentemperatur von 15 bis 31°C, am häufigsten von 24 bis 28°C
- Windgeschwindigkeit von 0 bis 6 m/s, am häufigsten von 0 bis 4 m/s

Solarstrahlung von 200 bis 800 W/m², am häufigsten 500 bis 700 W/m²

Die Außentemperaturen sind im Vergleich zur auftretenden Häufigkeit (Bild 10) relativ hoch. Allerdings befindet sich die Versuchsstelle auf freiem Feld. In Innenstädten sind die Temperaturen meistens um 3 bis 4 K höher als auf dem Land. Daher bilden die Versuche auch hier realistische Bedingungen nach.

Während der Versuche zur Nachtlüftung liegen folgende Witterungsbedingungen vor:

- Außentemperatur von 10 bis 22°C, am häufigsten von 12 bis 18°C
- Windgeschwindigkeit von 0 bis 4 m/s, am häufigsten von 0 bis 2 m/s
- Solarstrahlung kleiner 200 W/m²

3.5 Messergebnisse für die Raumparameter im Winter

Im Folgenden werden die Messergebnisse für die unterschiedlichen Öffnungsvarianten in Bezug auf die drei Raumklimaparameter mittlere Raumlufttemperatur, Luftwechsel und Zugluftrate neben dem Fenster betrachtet. Die Ergebnisse sind bereits in [32] veröffentlicht. Zur Darstellung werden Box - Whisker - Plots gewählt. Die Grenzen der Boxen werden durch das untere (25%) und obere Quartil (75%) der Datenmenge gebildet, die Whiskers durch die 5% und 95%-

Quantile. Dargestellt sind auch der Median (durchgezogene Linie in der Box) und der Mittelwert (kleines Quadrat in der Box) sowie Minimum bzw. Maximum (-) und die 1% und 99%-Quantile (x) der Datenmenge.

3.5.1 Luftwechsel

Nach dem Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden [20] soll der Gehalt des Luftqualitätsindikators Kohlendioxid keinesfalls über 2000 ppm steigen. Dies bedeutet bei den üblichen Raumgrößen in Schulen (2 m²/Schüler bzw. 6 m³/Schüler), dass mindestens ein 2-facher Luftwechsel zur Verfügung gestellt werden muss. Soll ein Kohlendioxidgehalt von 1500 ppm nicht überschritten werden, ist ein 3-facher Luftwechsel notwendig.

Bei der Auswertung des Luftwechsels (Bild 13) zeigt sich bei der Gruppe Kippflügel in einer Reihe kein wesentlicher Unterschied zwischen den Varianten mit kleinen Kippfenstern. Die Einbauhöhe in der Fassade scheint keinen wesentlichen Einfluss auf den Luftwechsel zu haben, ebenso die Anzahl der geöffneten Fenster bei den oben geöffneten Fenstern. Die Höhe des Luftwechsels ist bei diesen Varianten nur teilweise ausreichend.

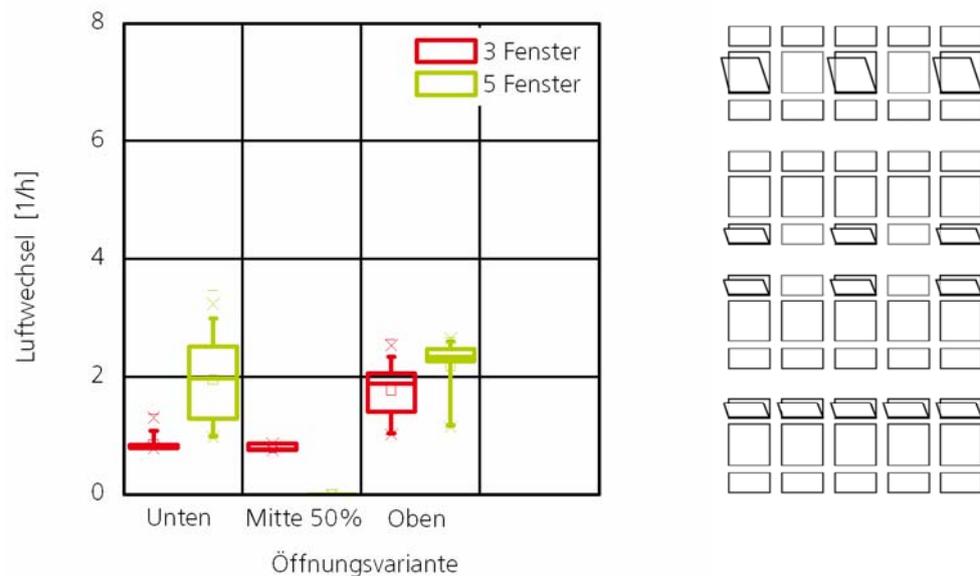


Bild 13: Luftwechsel bei Winterbedingungen für eine Reihe Kippflügel mit Übersicht der Öffnungsvarianten.

Bei der Gruppe der Kippflügel in zwei Reihen (Bild 14) weisen die Varianten sehr unterschiedliche Luftwechsel auf. Beim Vergleich der Mediane der Luftwechsel scheint sich bei den Varianten mit fünf geöffneten Oberlichtern immer ein größerer Luftwechsel einzustellen als bei drei geöffneten Oberlichtern. Die Überlappung der Messwerte ist allerdings zu groß, um eine eindeutige Aussage zu treffen. Die Höhe des Luftwechsels liegt allerdings nur bei der Variante 'Mitte 50% - Oben' in einem akzeptablen Bereich. Die Luftwechsel bei den anderen Varianten sind viel zu hoch und daher ungeeignet zur Lüftung bei Winterbedingungen.

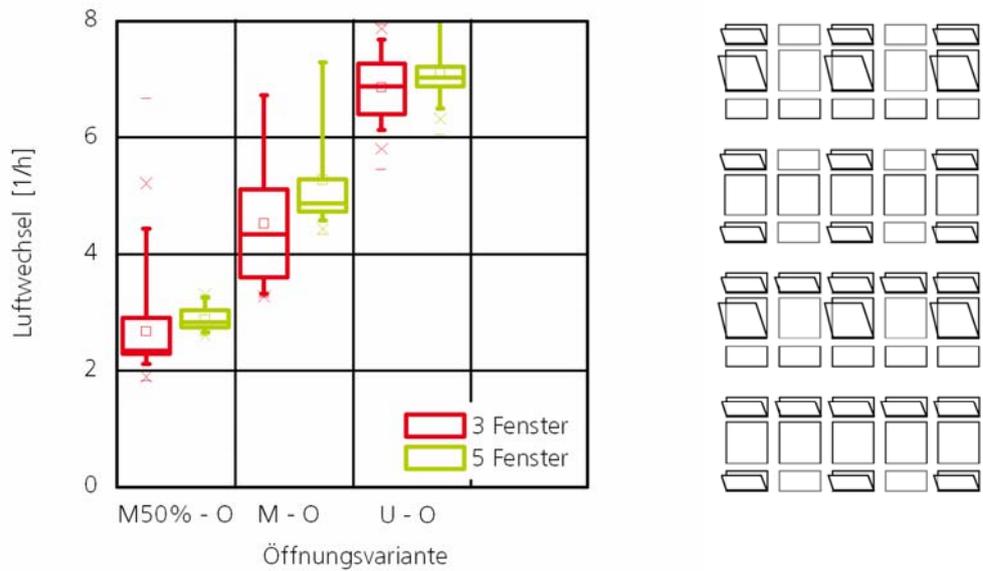


Bild 14: Luftwechsel bei Winterbedingungen für zwei Reihen Kippflügel mit Übersicht der Öffnungsvarianten.

Die sich einstellenden Luftwechsel bei der Fassade mit Schwingflügeln (Bild 15) steigen kontinuierlich mit der Öffnungsweite an. Bei fünf geöffneten Fenstern ist der Luftwechsel immer größer als bei drei geöffneten Fenstern. Alle Varianten weisen eine geringe Streuung des resultierenden Luftwechsels auf. Der Witterungseinfluss, in dem untersuchten Außentemperaturbereich und Windgeschwindigkeitsbereich, kann daher nicht besonders groß sein. Die Varianten ab 30% Öffnungsweite liefern zu hohe Luftwechsel, so dass sie für Winterbedingungen nicht in Frage kommen.

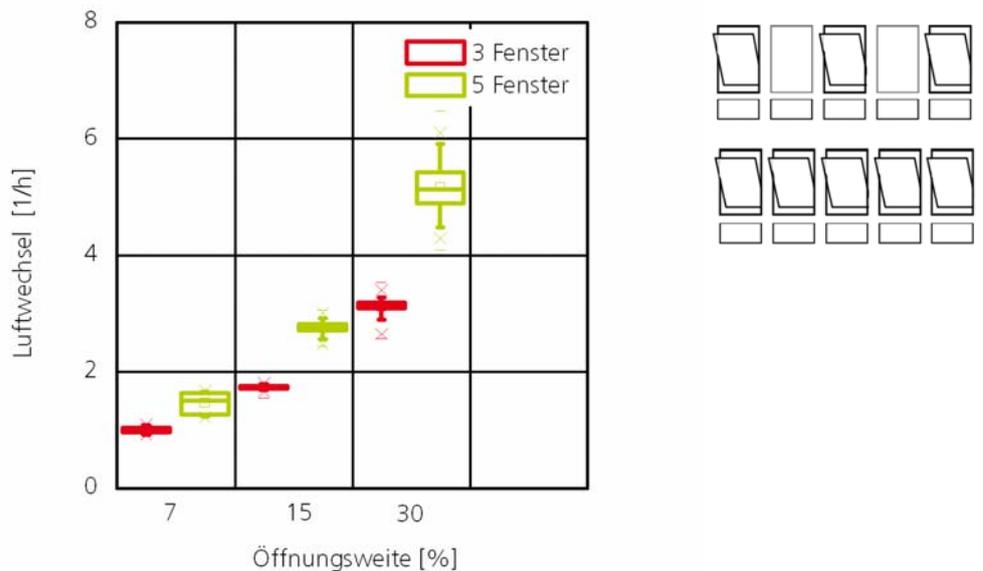


Bild 15: Luftwechsel bei Winterbedingungen für Schwingflügel mit Übersicht der Öffnungsvarianten.

Da die Ergebnisse der Messungen bei vielen Varianten große Schwankungen aufweisen, wird zusätzlich die Abhängigkeit der Raumparameter von den Witterungsbedingungen statistisch unter-

sucht (siehe Kapitel 3.7). Dies ist nicht nur wegen der Eingrenzung geeigneter Öffnungsvarianten von Bedeutung, sondern vor allem in Hinblick auf eine Automatisierung der Öffnungen notwendig.

3.5.2 Thermische Behaglichkeit

Nach DIN EN 15251 [5] werden eine Raumtemperatur zwischen 20 und 24°C in der Heizperiode und nach DIN EN ISO 7730 [6] eine Zugluft rate von maximal 20 bis 30% als akzeptabel eingestuft. Da die Oberflächentemperaturen während der Untersuchungen nur wenige von der Raumlufttemperatur abweichende Werte aufweisen, wird statt der Raumtemperatur die Raumlufttemperatur verwendet.

Die Raumlufttemperaturen bei der Gruppe Kippflügel in einer Reihe (Bild 16) sind, anders als im Winter zu vermuten, bei einigen Varianten zu hoch. Diese hohen Werte entstehen durch solare Einstrahlung. Obwohl bei der Auswertung die Bereiche über 200 W/m² ausgenommen wurden, sind die Auswirkungen in den Raumtemperaturen noch sichtbar. Die Speichermassen des Raums und die geringen Luftwechsel (etwa 1-fach) der Varianten verzögern das Auskühlen des Raums.

Zudem ist die Schwankungsbreite der Temperatur (Bild 16), vor allem bei der Variante mit den großen Kippflügeln auf mittlerer Höhe der Fassade sehr groß. Nur bei dem unten geöffneten kleinen Kippfenster liegen die Raumlufttemperaturen auf Sitzhöhe zum größten Teil in einem akzeptablen Bereich. Allerdings ist bei dieser Variante die Zugluft rate neben dem Fenster am höchsten. Die geringste Zugluft rate zeigen die Ergebnisse für die oben angeordneten Fenster. Hier kann sich die Zuluft auch am besten mit der Raumluft vermischen, bevor sie in die Aufenthaltszone gelangt. Bei allen Varianten liegt die Zugluft rate noch im akzeptablen Bereich, ideal ist sie aber bei keiner Variante.

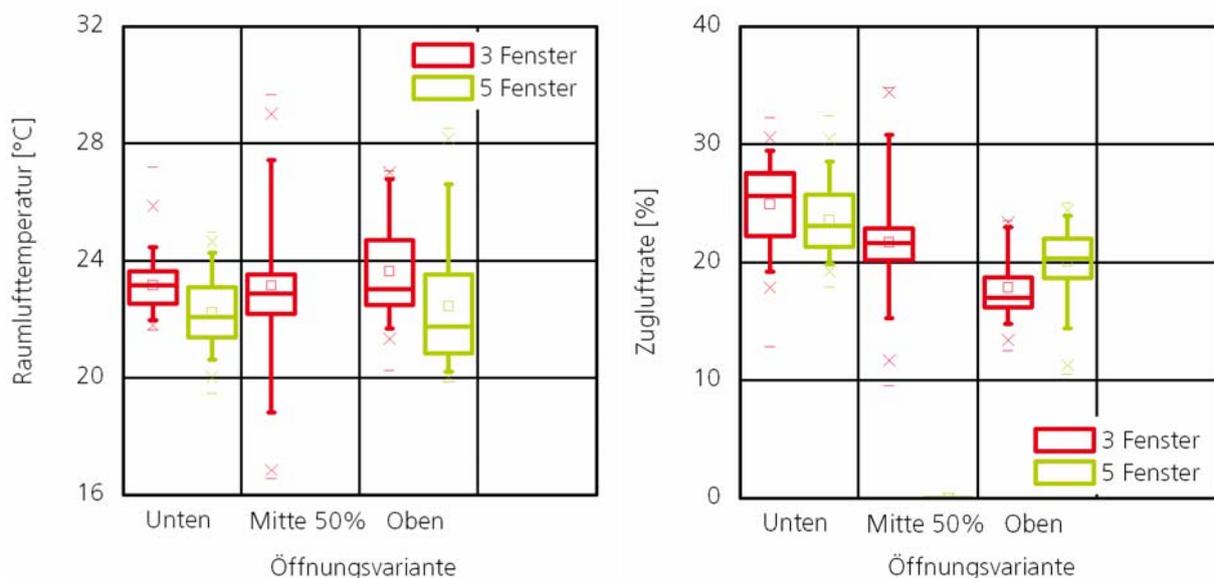


Bild 16: Raumlufttemperatur und Zugluft rate bei Winterbedingungen für eine Reihe Kippflügel.

Die Raumlufttemperaturen der Varianten in der Gruppe mit zwei Reihen Kippflügeln (Bild 17) fallen mit dem Anstieg des Luftwechsels (vgl. Bild 14). Für die Varianten 'Unten - Oben' und 'Mitte - Oben' mit drei Oberlichtern liegen die Temperaturen außerhalb des akzeptablen Bereichs. Hier reicht die Heizleistung nicht mehr aus, um den Lüftungswärmeverlust auszugleichen. Auch die Zugluftrate steigt mit dem Luftwechsel. Für den Variante 'Unten - Oben' liegt sie außerhalb eines akzeptablen Bereichs.

Die Raumtemperaturen der Varianten 'Mitte 50% - Oben' liegen mit 24 bis 27°C sehr hoch. Hier liegt kein Einfluss der Solarstrahlung vor. Die minimalen Temperaturen neben dem Fenster liegen bei dieser Variante in einem akzeptablen Bereich, die maximalen Temperaturen schwanken zwischen 25 und 35°C mit vereinzelt noch höheren Temperaturen. Das deutet auf eine zu hohe Heizleistung hin. Bei angepassten Heizleistungen liegt die maximale Temperatur direkt neben den Heizkörpern bei maximal 30°C. Der Temperatursensor für die Heizung befand sich daher wahrscheinlich in ein 'kalten' Zuluftstrom. Auch die teilweise hohen Temperaturen der Varianten 'Mitte 50% - Oben' mit 5 Oberlichtern und 'Mitte - Oben' mit 3 Oberlichtern sind in zu hohen Heizleistungen begründet.

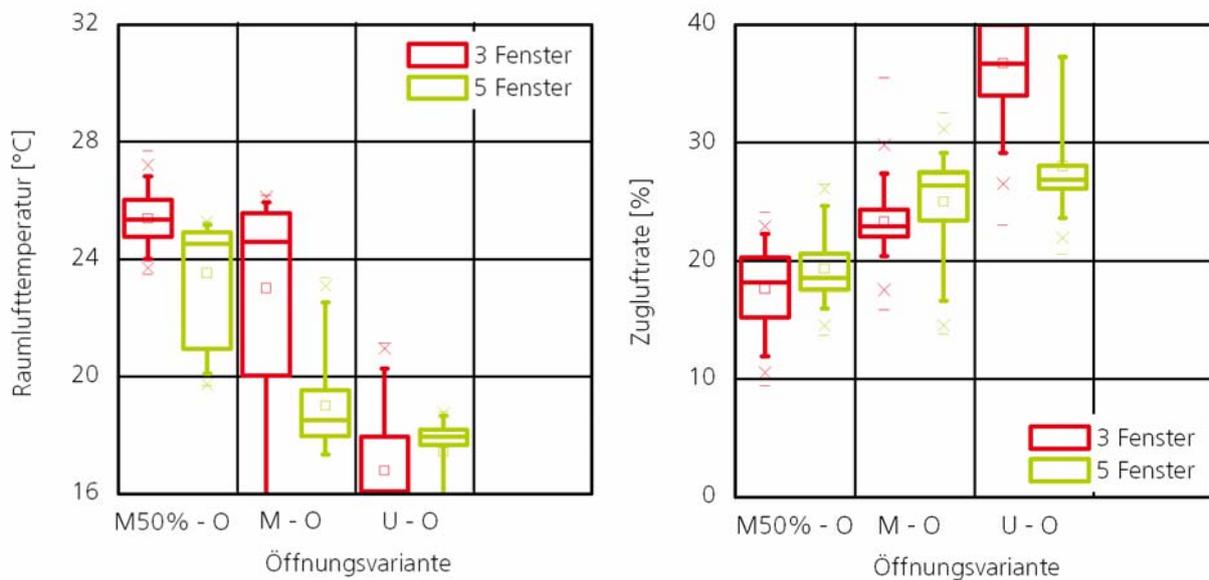


Bild 17:
Raumtemperatur und Zugluftrate bei Winterbedingungen für zwei Reihen Kippflügel.

Bei den Varianten mit Schwingflügeln schwanken die Temperaturen (Bild 18) weit weniger als bei den Varianten mit Kippflügeln. Die Temperaturen befinden sich auch bei fast allen Varianten im akzeptablen Bereich. Die Raumtemperatur bei 30% Öffnungsweite mit 5 Fenstern ist zu niedrig und die Zugluftrate zu hoch. Auch bei den anderen Varianten ist die Zugluftrate relativ hoch, wenn auch noch im akzeptablen Bereich.

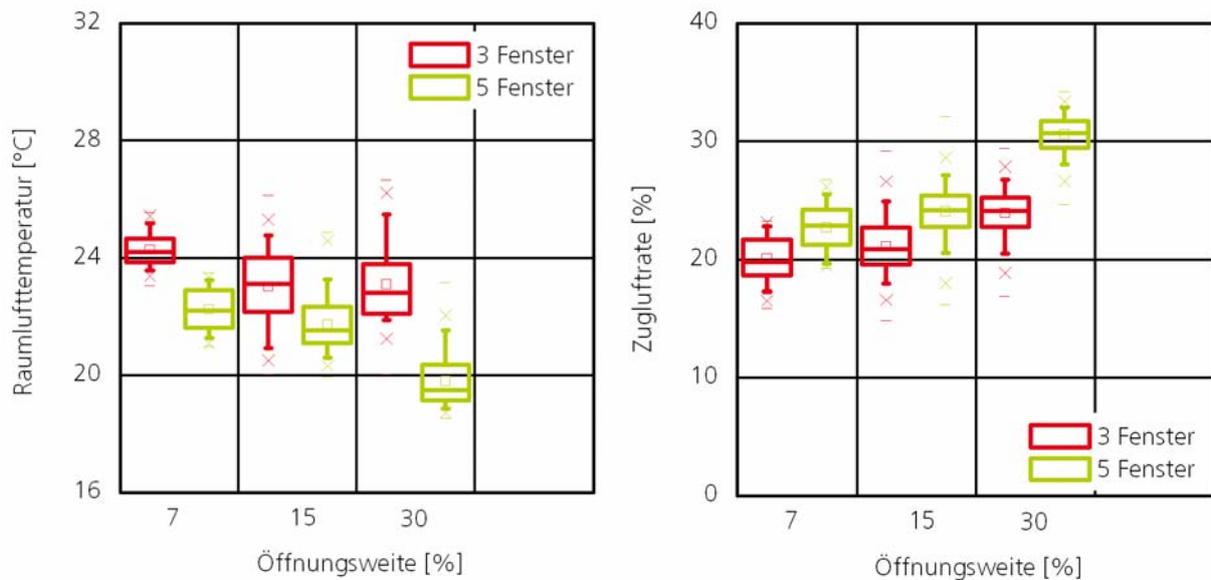


Bild 18:
Raumtemperatur und Zugluftrate bei Winterbedingungen für Schwingflügel.

Auch bei den Behaglichkeitsmessungen wird, ähnlich wie beim Luftwechsel, zusätzlich die Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen untersucht (siehe Kapitel 3.7).

3.5.3 Heizenergieverbrauch

Der theoretische Lüftungswärmebedarf als Bilanz über die Person mit Wärmeabgabe pro Person und Lüftungsbedarf pro Person wurde bereits in Kapitel 3.4 erläutert. Bei Messungen im Testgebäude bei niedrigen Außentemperaturen zeigte sich, dass selbst bei Temperaturen unter 0°C und einsetzender Solarstrahlung die Heizung ausschaltet. Dargestellt sind die Verläufe für einen ca. 1-fachen Luftwechsel (Bild 19) und einen ca. 2,7-fachen Luftwechsel (Bild 20).

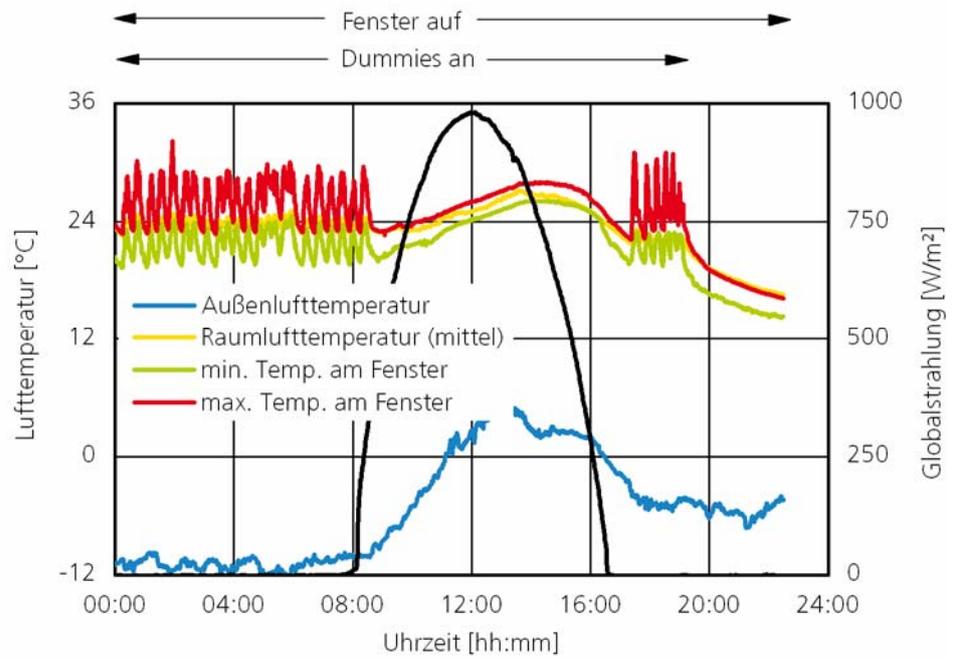


Bild 19: Tagesverlauf der Temperaturen mit einer Dauerlüftung der Öffnungsvariante 'Mitte 50%' mit drei geöffneten Fenstern, internen Lasten (38 W/m²) und ohne Sonnenschutz.

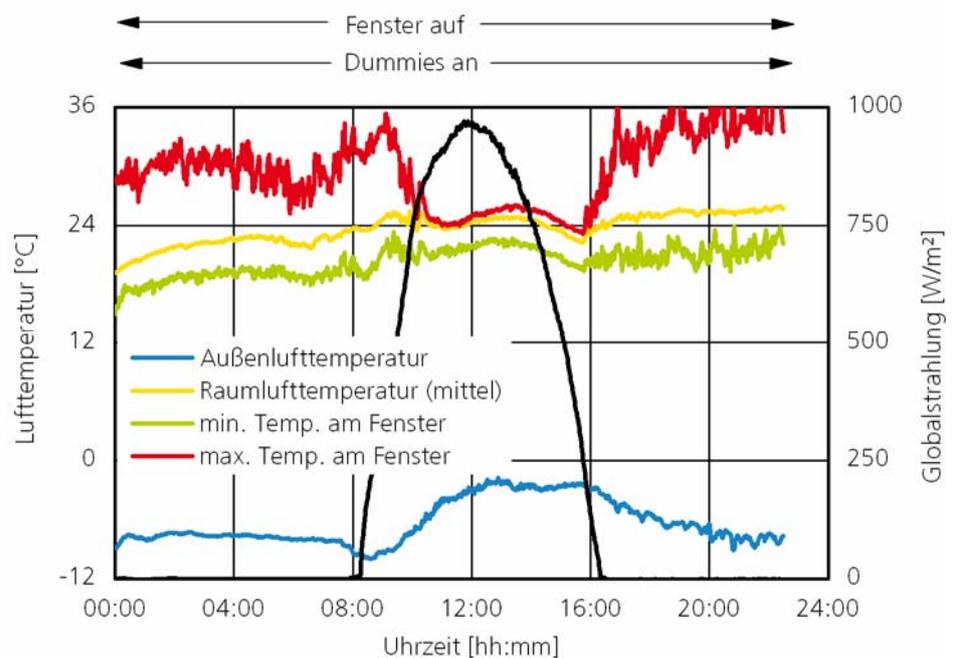


Bild 20: Tagesverlauf der Temperaturen mit einer Dauerlüftung der Öffnungsvariante 'Mitte 50% - Oben' mit fünf geöffneten Oberlichtern, internen Lasten (38 W/m²) und ohne Sonnenschutz.

3.5.4 Raumluftrömung

Im Winter stellt sich bei freier Fensterlüftung aufgrund der niedrigen Zulufttemperaturen meist eine Art Quelllüftung ein, selbst wenn die oben in der Fassade angeordneten Oberlichter geöffnet sind (Bild 21). Bei auf mittlerer Höhe und oben geöffneten Kippflügeln strömt die Zuluft über die seitlichen Dreiecksbereiche der mittleren Kippflügel ein (Bild 22). Die Zuluft verteilt sich damit auf die gesamte Höhe dieses Kippflügels, obwohl der Flügel bis direkt an die Aufenthaltszone heran reicht. Bei den Schwingflügeln konzentriert sich der Bereich der Zuluft auf die untere Öffnungsfläche am Flügel (Bild 23). Da hier die Zuluft konzentriert und direkt neben den Personen in den Raum tritt, ist bei diesem Fensterflügel die Gefahr der Zugluft im Aufenthaltsbereich am größten. Trotz der Temperaturschichtung im Raum bleibt die Temperaturdifferenz in der Aufenthaltszone bei den Varianten, bei denen auch die anderen Behaglichkeitskriterien erfüllt wurden, unter 3 K.

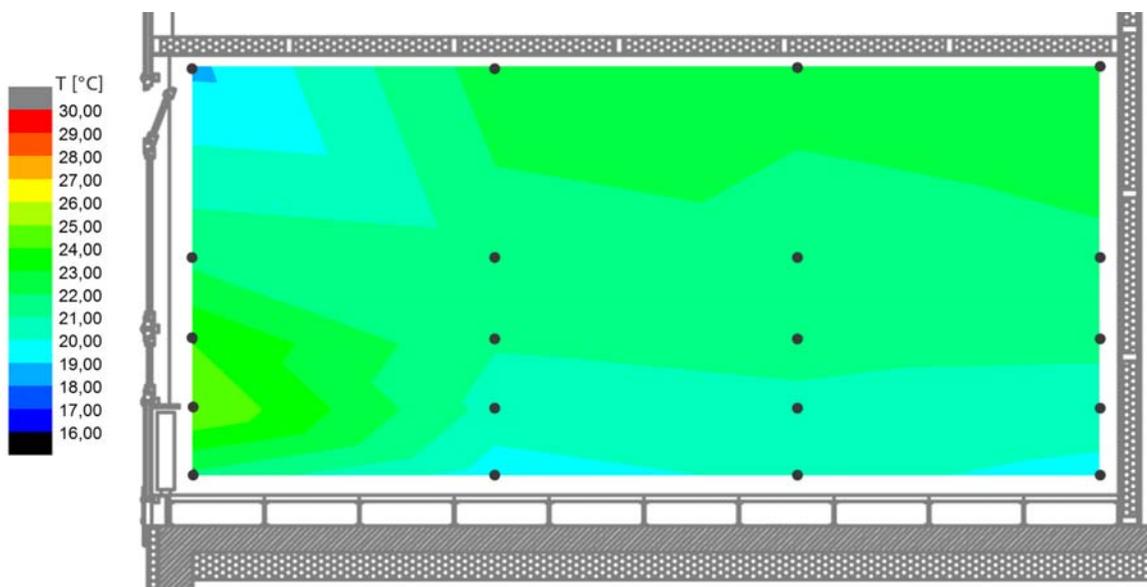


Bild 21:
Verteilung der Raumlufthtemperatur im Querschnitt des Testraums bei gekippten Oberlichtern.
Außentemperatur: -4°C, Wind: 4 m/s Ost, Strahlung: 50 W/m², Luftwechsel: 2,2 h⁻¹ bei 24 Dummies.

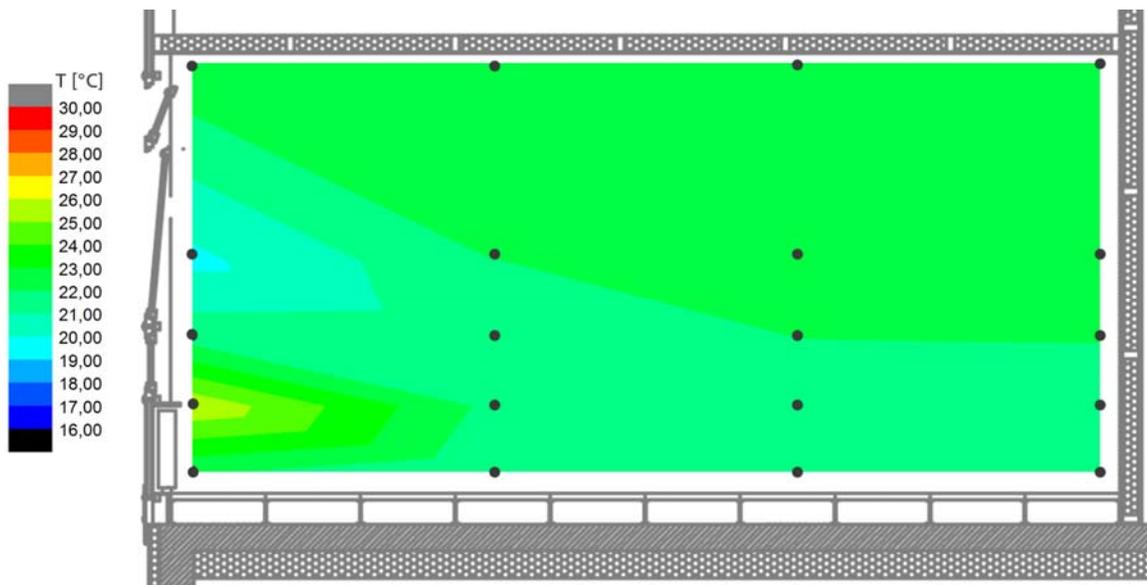


Bild 22:
Verteilung der Raumlufttemperatur im Querschnitt des Testraums bei auf mittlerer Höhe und oben geöffneten Kippfenstern. Außentemperatur: 1 °C, Wind: 1 m/s Südwest, Strahlung: 0 W/m², Luftwechsel: 2,5 h⁻¹ bei 24 Dummies.

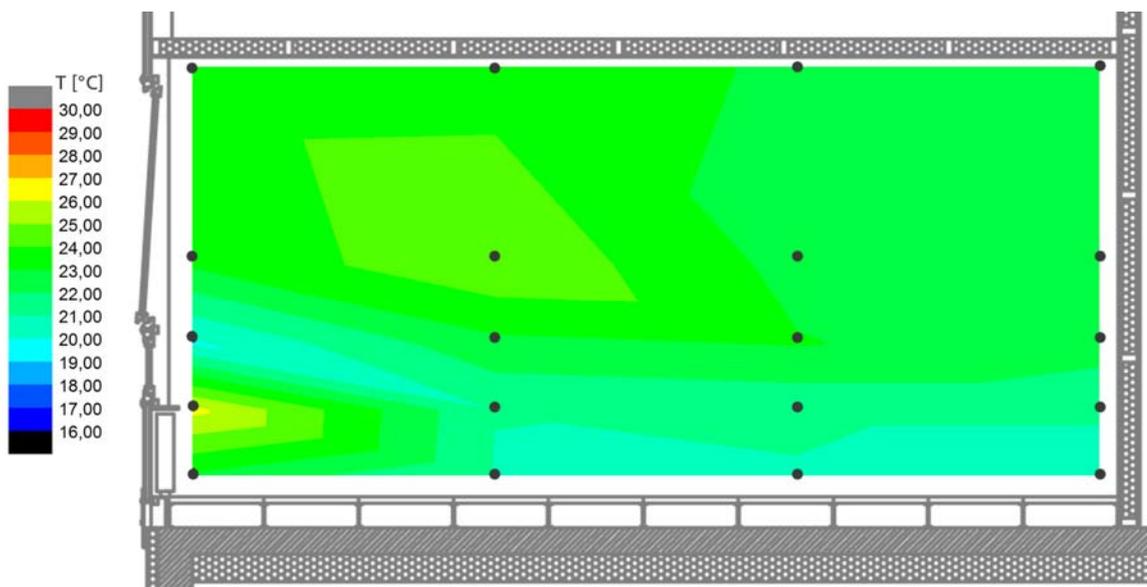


Bild 23:
Verteilung der Raumlufttemperatur im Querschnitt des Testraums bei geöffneten Schwingflügeln. Außentemperatur: -9°C, Wind: 1 m/s West, Strahlung: 950 W/m², Luftwechsel: 2 h⁻¹ bei 15 Personen.

Die Raumluftströmung kann sich allerdings auch im Winter ähnlich einer Mischlüftung ausbilden. Vor allem bei geringen Luftwechslern kann sich die Strömung im Raum selbst bei Anordnung der Zuluftöffnungen weit unten in der Fassade umdrehen. Dies kann deutlich an den Differenzen von Kohlendioxidmesswerten in verschiedenen Raumhöhen dargestellt werden. In den Bereichen des notwendigen Luftwechsels zwischen 2 und 3 h⁻¹, muss der höchste Wert des Kohlendioxidgehalts daher nicht zwangsweise unter der Decke liegen. Je größer der Luftwechsel im Raum, umso stabiler bildet sich eine Raumluftströmung von unten nach oben aus (Bild 24). Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass der Luftvolumenstrom durch Auftrieb an den Dummies in diesem

Bereich noch größer ist als der Zuluftvolumenstrom von außen. Dadurch kommt es zu einer Rückströmung der aufgestiegenen Raumluft in die Aufenthaltszone.

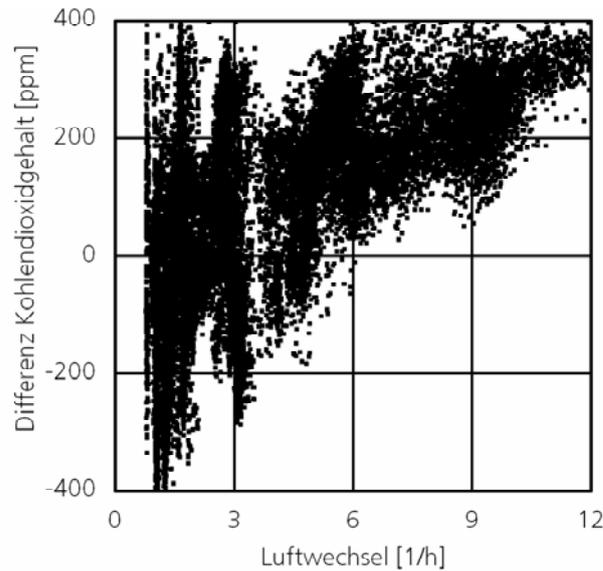


Bild 24:
Differenz des Kohlendioxidgehalts der Raumluft zwischen Aufenthaltszone und Decke bei Schwingflügeln in Abhängigkeit vom Luftwechsel.

3.6 Messergebnisse für die Raumparameter im Sommer

Für den Sommerfall werden sowohl Messungen zur Nachtauskühlung als auch zur Bedarfslüftung während des Tages gemacht. Während es bei den Winterversuchen Unterschiede in den Ergebnissen von Schwing- und Kippflügeln gibt, ist dies bei den Sommersversuchen nicht der Fall. Dabei muss aber darauf hingewiesen werden, dass die oben genannten Öffnungsflächen bei Kippflügeln nicht allein durch das Kippen der Fenster erreicht werden, dazu muss ein Teil der Fenster in Drehstellung geöffnet werden.

Der Vergleich der Nachtauskühlung mit minimaler Öffnungsweite über die gesamte Nacht und Stoßlüftung am morgen (Bild 25) zeigt mehrere Ergebnisse. Zum einen kühlt der Raum selbst durch die minimale Öffnungsweite in der Nacht wesentlich stärker aus als ohne Lüftung. Dies passiert sogar noch bei Außentemperaturen über 15°C. Zum anderen zeigt sich, dass mit einer zweistündigen Stoßlüftung am morgen zwar ähnliche Lufttemperaturen im Raum erreicht werden können wie bei der minimalen Dauerlüftung über Nacht, die Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen aber noch wesentlich höher liegen. Damit wird mit der Stoßlüftung am morgen eine geringere Kühlung im Raum erreicht. Zum dritten zeigt sich bei Tag 1, dass die Raumlufttemperatur in einem bereits ausgekühlten Raum, der nach Süden ausgerichtet ist, schon in den frühen Morgenstunden durch Sonneneinstrahlung wieder aufgeheizt werden kann. Ein Sonnenschutz ist daher auch vor Anwesenheit der Schüler, vor allem bei Osträumen, notwendig.

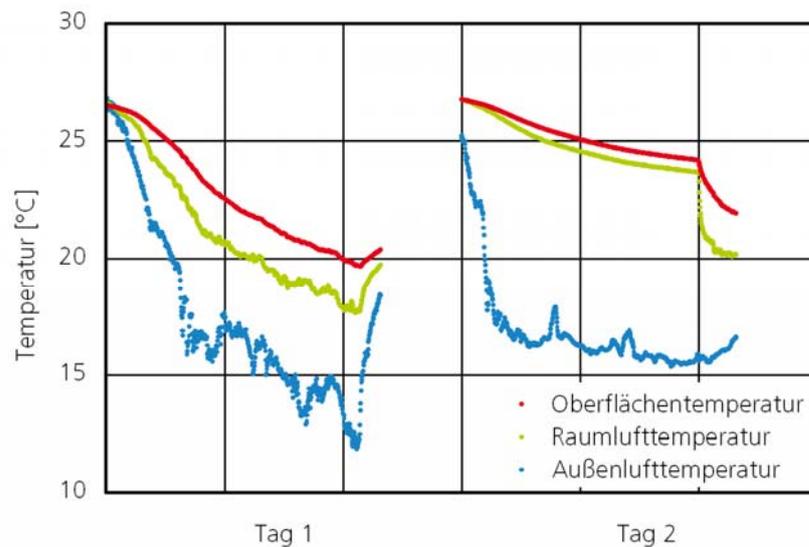


Bild 25:
 Vergleich Nachtlüftungsvarianten bei Kippflügeln. Uhrzeit jeweils 17:00 bis 7:00 Uhr (1 Achsabchnitt = 6 h).
 Tag 1: Nachtlüftung mit minimaler Öffnungsweite durchgehend.
 Tag 2: Nachtlüftung mit maximaler Öffnungsweite ab 5:00 Uhr morgens.

Bei maximaler Lüftung während des Tages (mit Sonnenschutz) stellen sich Innentemperaturen etwa 2 bis 3 K über Außentemperatur im Testraum ein. Die Lufttemperatur hängt allerdings sehr stark von den Oberflächentemperaturen im Raum ab. Bei der Lüftung ergibt sich ein Kohlendioxidgehalt von ca. 600 bis 1000 ppm im Raum. Der Kohlendioxid-Gehalt entspricht recht genau dem während einer einwöchigen Sommermessperiode in drei realen Klassenräumen gemessenen Spektrum [15]. Bei größerer Öffnungsfläche und damit größerem Luftaustausch würde die Raumtemperatur noch etwas absinken.

Auch bei minimaler Lüftung während des Tages stellt sich noch ein akzeptabler Kohlendioxidgehalt von ca. 1200 bis 1500 ppm in der Aufenthaltszone ein. Allerdings steigen die Temperaturen dann während des Tages stärker an. Eine gezielte Nachtauskühlung der Räume, am besten unter 20°C Oberflächentemperatur, ist trotzdem sehr sinnvoll.

3.7 Eignung der untersuchten Varianten zur automatisierten Fensterlüftung

Fassaden- und Öffnungsvarianten eignen sich dann besonders gut zur Automatisierung, wenn sie einen möglichst stabilen Luftwechsel gewährleisten können, ohne dass die Öffnungsweite ständig angepasst werden muss. Der Luftwechsel ist grundsätzlich abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und von der Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Die Temperaturdifferenz ändert sich meist stetig und relativ langsam. Sie ist als Störgröße für eine Automatisierung deshalb relativ gut zu integrieren. Die Windgeschwindigkeit dagegen kann sich sehr schnell ändern und der Einfluss des Windes hängt zusätzlich nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Richtung in Bezug auf das Gebäude und seine Öffnungen ab. Eine starke Abhängigkeit des Luftwechsels vom Wind ist daher für eine Automatisierung der Fenster ungeeignet. Dies betrifft vor allem den Winterfall, da hier aufgrund des Heizenergieverbrauchs und möglicher Zugluftprobleme der Luftwechsel sehr genau kontrolliert werden sollte. Die Öff-

nungsweite müsste dann ständig an die Windbedingungen angepasst werden. Im Sommer ist eine Schwankung des Luftwechsels weniger kritisch, solange ein bestimmter Mindestluftwechsel eingehalten wird. Zur Auswertung für die Eignung der Öffnungsvarianten werden daher die Daten der Winterversuche verwendet.

Da sich bei den vielen Einflussfaktoren auf die freie Lüftung die deskriptive Analyse oft als sehr schwierig erweist (Bild 26), wird ein besonderes statistisches Verfahren, ein Entscheidungsbaumverfahren verwendet. In der Modellbildung kommen Verfahren zur Anwendung, die statistisch signifikante Aussagen über die Wichtigkeit und Wirkungsweise der Einflussgrößen liefern. Mit diesem Verfahren können zudem Einflussgrößen mit unterschiedlichen Skalenniveaus einbezogen werden und man erhält ein intuitiv interpretierbares Regelwerk, welches dem Anwender einen erklärenden Einblick in die Zusammenhangsstruktur des untersuchten Prozesses liefert. Diese Ergebnisse wurden bereits in [32] vorgestellt. Dort wird das angewendete statistische Verfahren ausführlicher dargestellt.

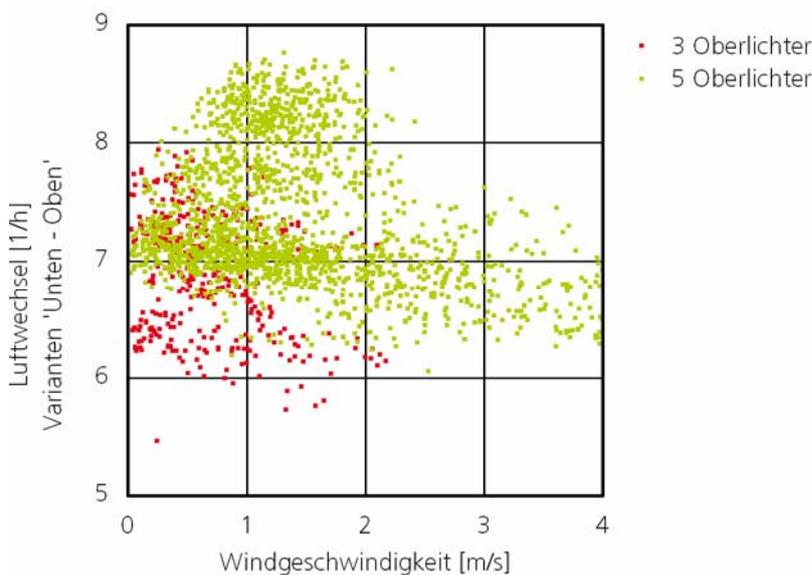


Bild 26: Beispiel für eine deskriptive bivariate Darstellung im Streudiagramm, das keine Zusammenhänge erkennen lässt.

Mit der Auswertung wird die Abhängigkeit des Luftwechsels, der mittleren Raumlufttemperatur auf 60 cm Höhe für sitzende Personen und der maximalen Zugluft rate neben dem Fenster von den Einflussgrößen Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung untersucht. Da die Oberflächentemperaturen während der Untersuchungen nur wenige von der Raumlufttemperatur abweichende Werte aufweisen, wird in der Arbeit statt der Raumtemperatur die Raumlufttemperatur verwendet. Zusätzlich wird ein möglicher Einfluss der Heizung untersucht. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Automatisierung der Fensterlüftung unter Winterbedingungen.

Der angewendete statistische Algorithmus durchläuft, stark vereinfacht dargestellt, rekursiv folgende Schritte:

- Es wird die globale Nullhypothese, dass die Zielgröße und keine der Kovariablen einen Zusammenhang aufweisen, also unabhängig sind, getestet.
- Wird diese Hypothese angenommen, sind also Zielgröße und Kovariablen unabhängig voneinander, so ist die Einbeziehung einer Kovariablen in das Regelwerk des Entscheidungsbaums überflüssig, weil keine Kovariable einen Beitrag zur Erklärung der Zielvariablen leisten kann.
- Wird die Nullhypothese verworfen, besteht also ein Zusammenhang zwischen Zielgröße und den untersuchten Kovariablen, so ist mittels partiellen Hypothesen diejenige Kovariable zu bestimmen, die den sichersten Zusammenhang mit der Zielgröße aufweist.
- Die Wertemenge dieser Kovariablen wird in zwei Teilmengen aufgeteilt (Split). Das Auffinden einer optimalen Aufteilung wird durch entsprechend modifizierte Signifikanztests durchgeführt.
- In den nächsten Schritten wird die Prozedur in den jeweils gebildeten Teilmengen des Datensatzes wiederholt.

Eine genauere Beschreibung der statistischen Modellbildung ist in [18] veröffentlicht. In der vorliegenden Untersuchung wird ein Signifikanzniveau von 0,05 verwendet und die Baumtiefe auf den Wert 3 begrenzt.

Das Modell wird durch die graphische Darstellung des Regelwerks der Entscheidungsbäume angegeben. Die Blätter am Ende der einzelnen Entscheidungsbäume enthalten den Mittelwert der Zielgröße dieses Astes (\bar{y}) und die Anzahl der Daten, aus denen der Mittelwert gebildet wird (n). In den Knoten der Baumstruktur stehen jeweils die Kovariablen mit dem sichersten Einfluss. Die Kovariablen sind Außentemperatur (T_a), Windgeschwindigkeit (WG), Windrichtung (WR) und Heizung (H_zg) sowie die Öffnungsvariante (Variante) und die Anzahl der geöffneten Fenster (Anzahl).

Kippflügel in einer Reihe

Bei der Auswertung zeigen sich bei der Gruppe Kippflügel in einer Reihe die größten Schwierigkeiten bei der deskriptiven Auswertung (Bild 13 und Bild 16). Aus den Darstellungen der Box - Whisker - Plots kann aufgrund der großen Schwankungsbreiten und der geringen Abstände der Mediane der Öffnungsvarianten (Varianten) zueinander weder eine Aussage darüber getroffen werden, welche Variante für eine Automatisierung geeignet ist, noch kann eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Varianten erfolgen. Die Ergebnisse aus dem Entscheidungsbaumverfahren zeigen aber, dass der wichtigste Einflussparameter sowohl auf den Luftwechsel (Bild 27), als auch auf die Raumlufttemperatur (Bild 28), die Windgeschwindigkeit ist.

Wie zu erwarten, steigt der Luftwechsel mit steigender Windgeschwindigkeit, wogegen die Raumlufttemperatur abfällt. Die Raumlufttemperatur ist hier so hoch, dass sie von der Heizung nicht mehr beeinflusst wird, und deshalb abhängig von der Außentemperatur wird. Zusätzlich hat bei hohen Windgeschwindigkeiten über etwa 2 m/s die Variante offensichtlich überhaupt keinen Einfluss mehr, da hier in der folgenden Aufteilung des Entscheidungsbaums nur noch Witterungsparameter, vor allem die Außentemperatur, erscheinen. Der Einfluss der Öffnungsvariante bzw. der Anzahl der geöffneten Fenster, wenn auch untergeordnet, beschränkt sich damit auf Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s.

Beim Luftwechsel tritt bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s als entscheidende Einflussgröße die Anzahl der geöffneten Fenster und nicht die Öffnungsvariante auf. Das könnte daran liegen, dass sich die Öffnungsflächen der Einzelfenster in den Varianten nicht wesentlich unterscheiden. Die Öffnungsfläche variiert damit stärker mit der Anzahl der geöffneten Fenster.

Dagegen wird bei der Raumlufttemperatur bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s nach der Öffnungsvariante unterschieden. Hier steigt die Lufttemperatur in der Aufenthaltszone mit der Zuluftthöhe der Varianten.

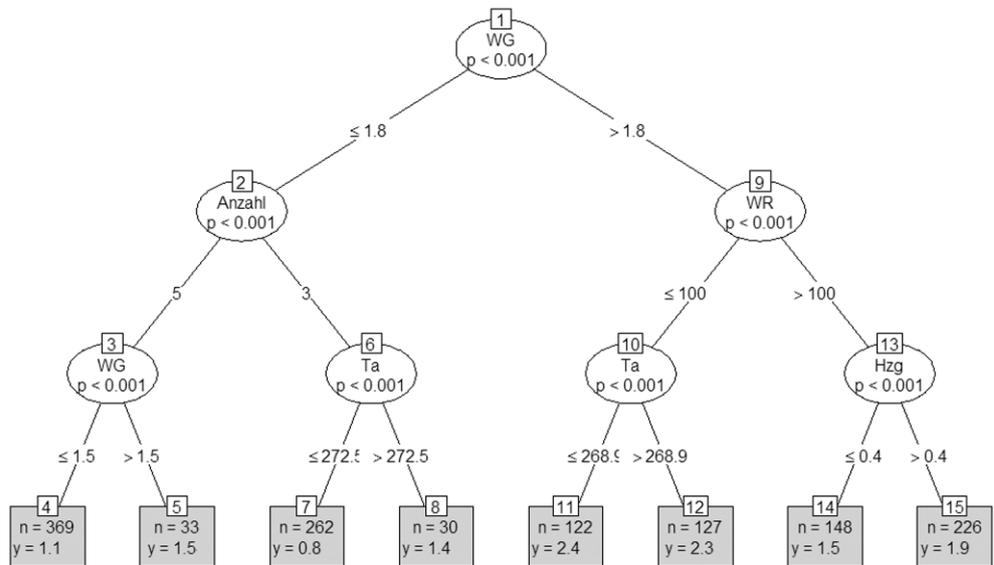


Bild 27: Einflussparameter auf den Luftwechsel bei Kippflügeln in einer Reihe unter Winterbedingungen.

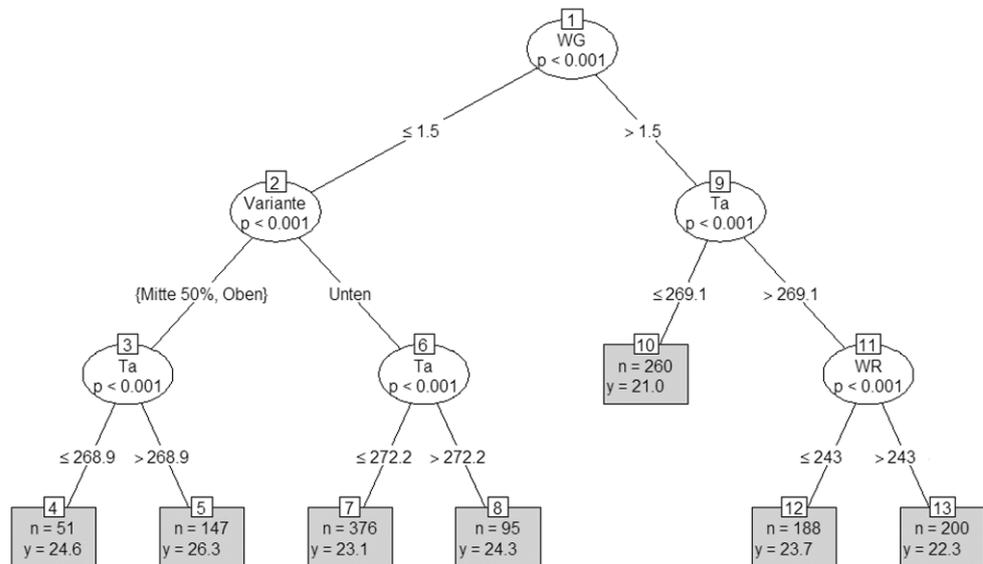


Bild 28: Einflussparameter auf die Raumlufttemperatur bei Kippflügeln in einer Reihe unter Winterbedingungen.

Dagegen zeigt die Auswertung für die Zugluftrate (Bild 29) die Variante als wichtigstes Einflusskriterium. Die maximale Zugluftrate neben dem Fenster ist bei den unten neben der Aufenthaltszone geöffneten Fenstern um ca. 4 Prozentpunkte höher als bei den Öffnungen auf mittlerer Höhe oder oben. Danach ist auch hier die Außentemperatur die wichtigste Einflussgröße und die Windgeschwindigkeit erscheint erst in der letzten betrachteten Ebene. Dabei steigt die Zugluftrate mit steigender Windgeschwindigkeit und sinkender Außentemperatur. Der Unterschied der Zugluftrate für die zwei Außentemperaturgruppen beträgt im Mittel bei den höher gelegenen Fenstern 2 bis 4 Prozentpunkte.

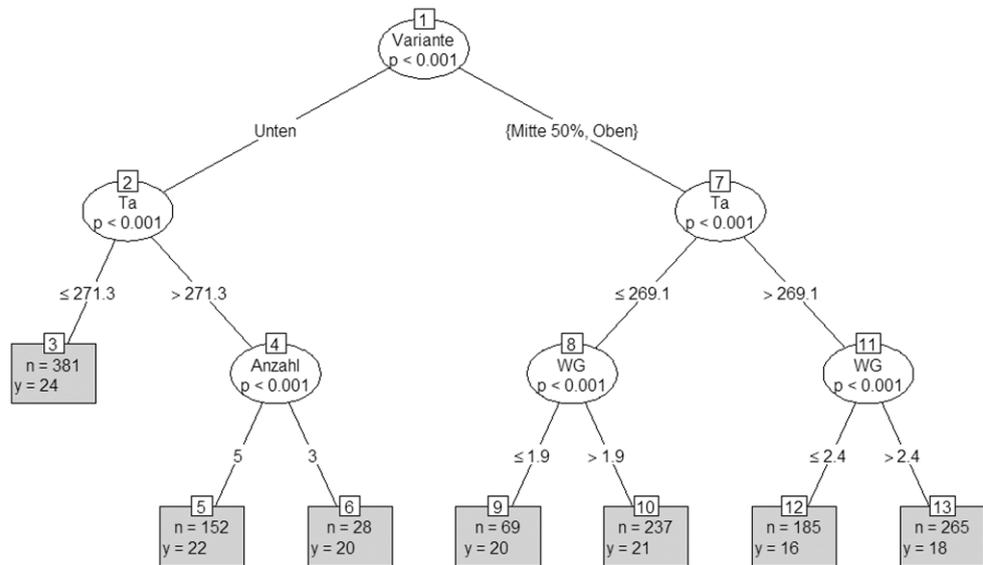


Bild 29: Einflussparameter auf die Zugluftrate bei Kippflügeln in einer Reihe unter Winterbedingungen.

Im Entscheidungsbaum für die Zielgröße Raumlufttemperatur wird die Heizung als Einflussgröße nicht sichtbar. Dies bedeutet nicht, dass die Heizung keinen Einfluss auf die Aufrechterhaltung der Raumlufttemperatur hat, sondern dass die Regelung der Heizung korrekt arbeitet. Für die Zielgröße Luftwechsel erscheint die Heizung in der letzten Ebene des Entscheidungsbaums. Die Tatsache, dass die Heizleistung mit größerem Luftwechsel steigt, lässt darauf schließen, dass der Temperaturfühler für die Heizungsregelung in seiner Position nahe der Fassade durch Wind induzierte Raumluftströmungen beeinflusst wird.

Da sowohl die Luftqualität als auch die Raumlufttemperatur eine größere Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit als von der Öffnungsweite oder Öffnungshöhe zeigen, sind Kippflügel in einer Reihe für automatisierte Fensterlüftung ungeeignet, da dann mit der Öffnungsvariante keinen Einfluss mehr auf die Raumparameter genommen werden kann. Kippfenster in einer Reihe werden daher von den Versuchen zur Regelung ausgeschlossen.

Kippflügel in zwei Reihen

Bei der Auswertung der Gruppe Kippflügel in zwei Reihen zeigt sich die deskriptive Auswertung (Bild 14 und Bild 17) ähnlich schwierig wie bei den Varianten in einer Reihe. Eine Abgrenzung zwischen den Varianten ist hier zwar besser möglich, aber die Schwankungsbreiten der Werte

sind immer noch sehr groß. Die dazugehörigen Ergebnisse aus dem Entscheidungsbaumverfahren zeigen für alle untersuchten Zielgrößen als wichtigste Einflussgröße die Variante.

Allerdings werden bei der Zugluftrate (Bild 30) nicht alle Varianten bereits in den oberen zwei Ebenen unterschieden. Bei der Variante ‚Mitte 50% - Oben‘ scheint der Wind das Haupteinflusskriterium zu sein. Interessant ist aber, dass je nach Windrichtung die Zugluftrate mit steigender Windgeschwindigkeit sinkt oder steigt. Bei den anderen Varianten wird zuerst nach der Außentemperatur unterschieden, bevor weiter nach der Variante aufgeteilt wird. An den absoluten Werten wird noch einmal deutlich, was bei den Kippflügeln in einer Reihe schon gezeigt hat. Je weiter unten die unterste Öffnung liegt, umso höher ist die Zugluftrate.

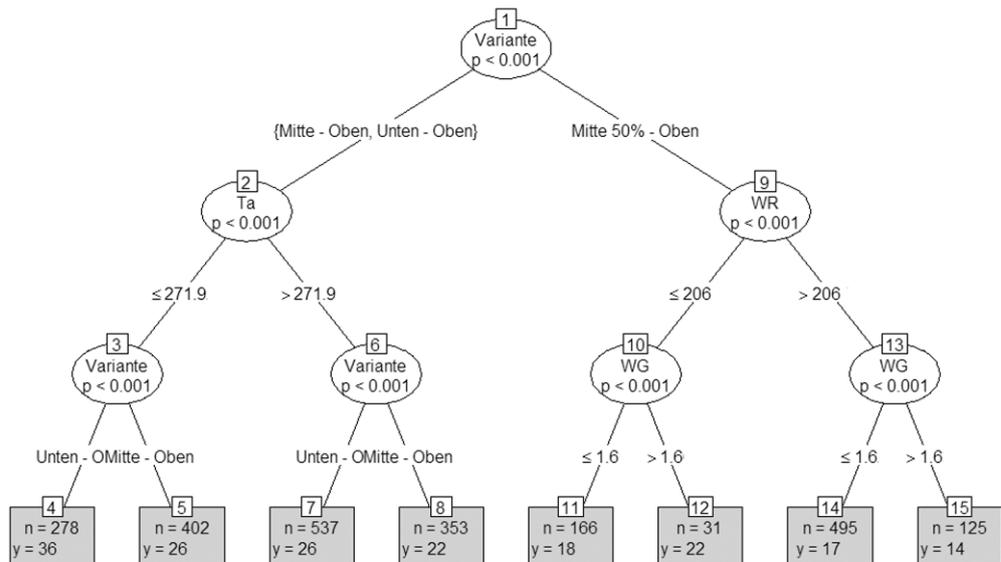


Bild 30:
Einflussparameter auf die Zugluftrate bei Kippflügeln in zwei Reihen unter Winterbedingungen.

Bei der Raumlufttemperatur (Bild 31) und vor allem dem Luftwechsel (Bild 32) wird im Gegensatz zur Zugluftrate bei manchen Varianten auch nach der Anzahl der geöffneten Fenster unterschieden. Als nächste Einflussgrößen erscheinen die Außentemperatur und die Windgeschwindigkeit.

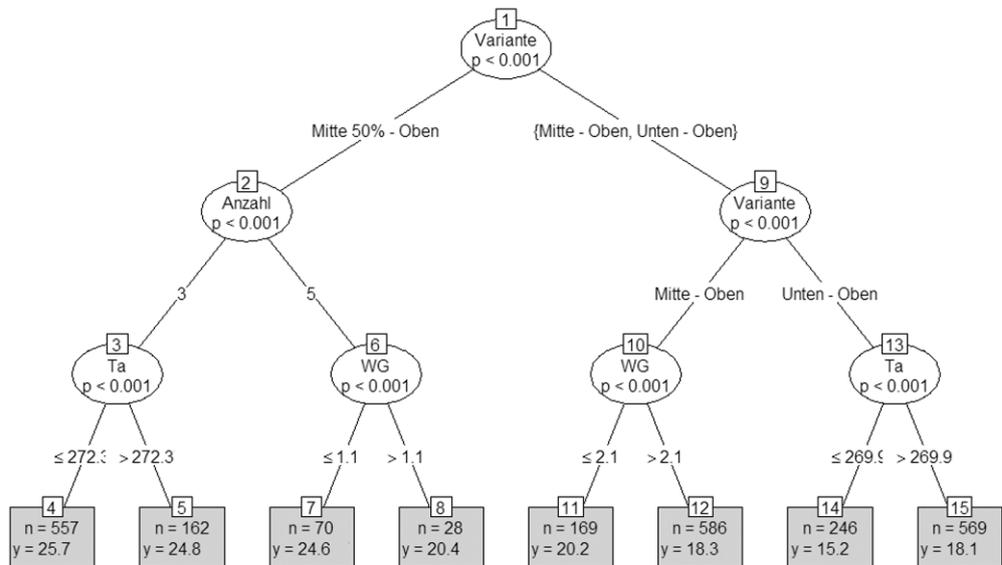


Bild 31: Einflussparameter auf die Raumlufttemperatur bei Kippflügeln in zwei Reihen unter Winterbedingungen.

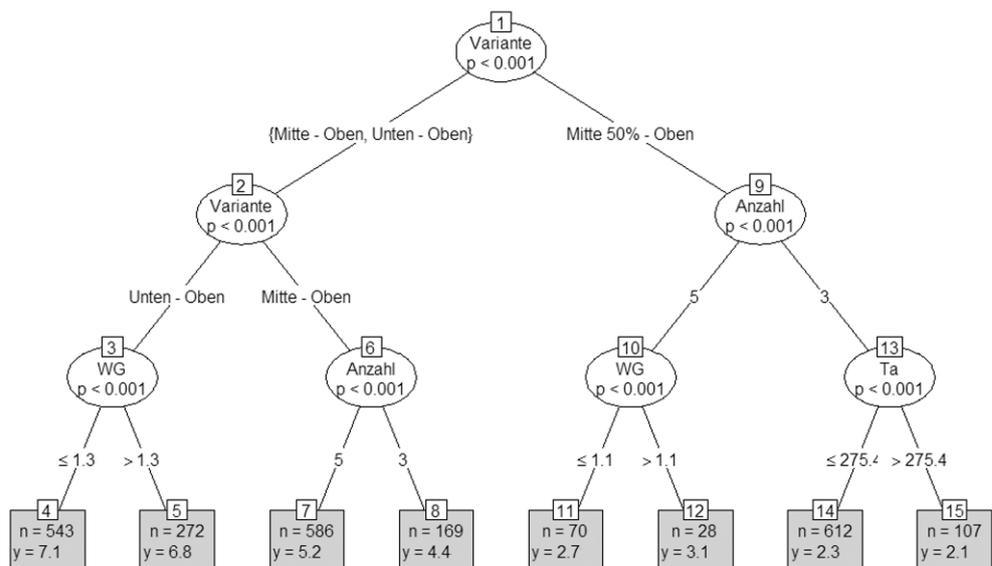


Bild 32: Einflussparameter auf den Luftwechsel bei Kippflügeln in zwei Reihen unter Winterbedingungen.

Bei den Kippflügeln in zwei Reihen können durch die Öffnungsvariante die Raumparameter noch ausreichend beeinflusst werden, um hier eine Automatisierung der Lüftung durchzuführen. Trotzdem sind die Parameter nicht nur von der Außentemperatur, sondern auch von der Windgeschwindigkeit abhängig, wodurch größere Schwankungen in Kauf genommen werden müssen.

Schwingflügel

Anders als bei den Kippflügeln könnte bei den Schwingflügeln, vor allem für die Zielgröße Luftwechsel (Bild 15 und Bild 18), auf eine weitere Auswertung mit dem Entscheidungsbaum verzichtet werden. Der Schwankungsbereich des Luftwechsel der Varianten ist so minimal, dass die Witterung, zumindest in dem hier untersuchten Bereich, keine wesentliche Rolle mehr spielen kann.

So ist es auch nicht verwunderlich, dass für die Zielgröße Luftwechsel (Bild 33) im Entscheidungsbaum hauptsächlich nach den Varianten und der Anzahl der geöffneten Fenster unterschieden wird. Für die Zugluftrate (Bild 34) verhält es sich ähnlich, wobei hier bei den kleinen Öffnungsweiten die Anzahl der Fenster wichtiger zu sein scheint, als die tatsächliche Öffnungsweite. Bei der Variante mit 30% Öffnungsweite hat auch die Außentemperatur noch einen entscheidenden Einfluss auf die Zugluftrate.

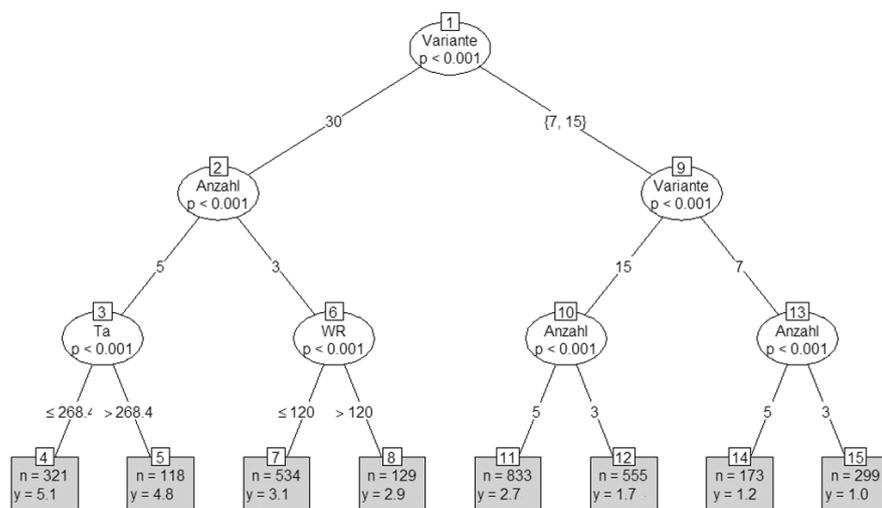


Bild 33: Einflussparameter auf den Luftwechsel bei Schwingflügeln unter Winterbedingungen.

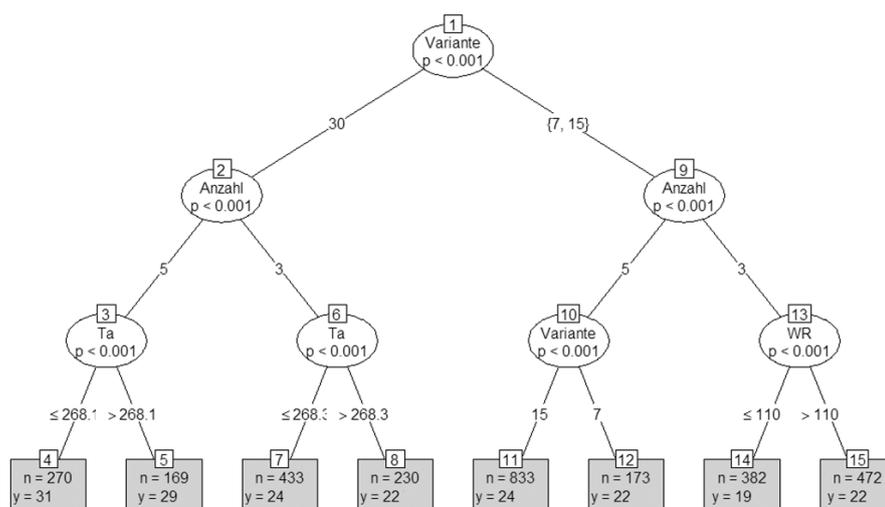


Bild 34: Einflussparameter auf die Zugluftrate bei Schwingflügeln unter Winterbedingungen.

Ein etwas erstaunliches Ergebnis zeigt jedoch die Auswertung zur Raumlufttemperatur (Bild 35) in der Aufenthaltszone. Hier erscheint die Anzahl der geöffneten Fenster als wichtigstes Einflusskriterium. Nach der Öffnungsweite wird nur noch bei drei geöffneten Fenstern unterschieden. Das könnte aus der Darstellung der Box - Whisker - Plots (siehe Kapitel 3.5) eher für fünf geöffnete Fenster vermutet werden.

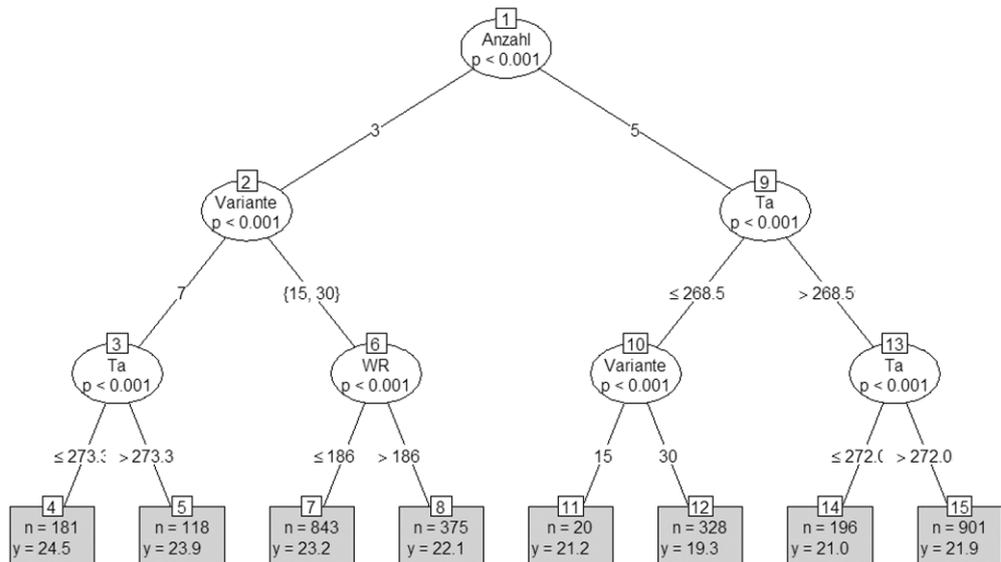


Bild 35:
Einflussparameter auf die Raumlufttemperatur bei Schwingflügeln unter Winterbedingungen.

Aufgrund der gezeigten Ergebnisse scheinen Schwingflügel für eine Automatisierung der Fensterlüftung sind am besten geeignet.

3.8 Möglichkeiten und Grenzen der Fassadenöffnungsvarianten

Für Kippflügel in einer Reihe kann aufgrund der berechneten Mittelwerte der Zugluft rate und des Luftwechsels gefolgert werden, dass die Fenster besser auf mittlerer Höhe oder oben zu öffnen sind, um Zugluftprobleme zu vermeiden. Leider liefern aber diese Varianten für die untersuchten Öffnungsgrößen erst bei einer Windgeschwindigkeit ab ca. 2 m/s akzeptable Luftwechsel. Die grundsätzliche Abhängigkeit des Luftwechsels von der Windgeschwindigkeit, selbst bei den während der Untersuchungen herrschenden sehr niedrigen Außentemperaturen und einer maximalen Windgeschwindigkeit bis zu 4 m/s, lassen jedoch darauf schließen, dass Kippflügel in einer Reihe angeordnet nicht zur Automatisierung der Fenster geeignet sind. Sobald der Einfluss eines Witterungsparameters größer ist als der Einfluss durch die Veränderung der Öffnungsfläche, wird es fast unmöglich, die Raumparameter in ausreichendem Maß zu kontrollieren.

Kippflügel in zwei Reihen übereinander angeordnet sind grundsätzlich zur Automatisierung der Fensterlüftung geeignet, da auch mit Variation der Öffnungsweite in nur einer der beiden Reihen eine ausreichende Einflussnahme auf das Raumklima möglich ist. Zudem scheint es völlig ausreichend, wenn nicht sogar besser zu sein, nur jedes zweite Fenster zu öffnen. Trotzdem ist bei den Kippflügeln allgemein anzumerken, dass hier immer doppelt so viele Fenster geöffnet werden müssen wie bei den Schwingflügeln, um getrennte Zu- und Abluftöffnungen, und damit einen

stabilen Luftwechsel, zu erhalten. Zusätzlich muss ein besonderes Augenmerk auf die Position des Temperatursensors an der Heizung gelegt werden. Bei den Versuchen scheint sich der Sensor, trotz Abstand zur Fassade, genau im Zuluftstrahl befinden zu haben. Dies wird auch durch eine weitergehende Auswertung bestätigt, bei der sich zeigt, dass die Raumlufttemperatur und vor allem auch die maximale Lufttemperatur in der Fensterreihe mit steigender Außentemperatur sinken.

Schwingflügel zeigen die beste Eignung für eine automatisierte Fensterlüftung. Dies liegt hauptsächlich daran, dass sich die wirksame Höhendifferenz am Fenster nicht mit der Öffnungsweite ändert. Dass die Zuluft Höhe bei den Schwingflügeln nicht variierbar ist, kann in Bezug auf die Zugluftrate aber auch als Nachteil gesehen werden. Hier wäre es besser die Zuluft Höhe etwas weiter nach oben zu legen, damit sich die Zuluft besser mit der Raumluft vermischen kann. Dann könnte die Zugluftrate neben dem Fenster noch etwas verringert werden. Grundsätzlich sind sehr große Öffnungsflächen realisierbar. Wie bei den Kippflügeln ist es auch hier ausreichend nur jedes zweite Fenster zu öffnen.

4 Automatisierungskonzepte für Fensterlüftung in Schulen

Die Lüftung in Schulen erfolgt normalerweise während der Anwesenheit der Personen, um die Luftqualität auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Sie kann aber auch zur Nachtauskühlung im Sommer verwendet werden, um die Räume mit kalter Nachtluft zu durchspülen. Sowohl für die raumparameterabhängige Lüftung während und vor dem Unterricht, als auch für die Nachtlüftung ist eine Automatisierung der Fensterlüftung notwendig. Bei letzterem ist dies notwendig, weil hier kein Nutzer anwesend ist, um die Fenster zu bedienen. Aber auch während der Anwesenheit macht eine Automatisierung der Fensteröffnungen Sinn. Zum einen können sich die Lehrer dann auf den Unterricht konzentrieren und müssen nicht noch zusätzlich eine ausreichende Lüftung im Raum sicherstellen. Zum anderen ist mit einer Handbedienung der Fenster bei kalter Witterung nur Stoßlüftung in den Räumen möglich. Eine minimale Dauerlüftung über fein eingestellte Öffnungsweiten würde den Nutzer möglicherweise überfordern. Denn hier muss die Öffnungsweite je nach Witterungs- und Raumbedingungen angepasst werden, um eine optimale Lüftung zu gewährleisten. Dazu ist eine Automatisierung der Fenster mit einer passenden Regelungs- oder Steuerungsstrategie sinnvoll.

Die Ergebnisse aus der Auswertung mit dem Entscheidungsbaumverfahren können direkt dazu verwendet werden, ein Regelungskonzept für automatisierte Fensterlüftung zu entwickeln. Die Kippfenster in einer Reihe werden dabei aber aufgrund der oben genannten Ergebnisse ausgeschlossen. Für das Automatisierungskonzept verwendet werden die Schwingflügel und die Kippflügel in zwei Reihen mit Öffnungen auf mittlerer Höhe und oben in der Fassade. Die Kombination mit Öffnungen unten und oben in der Fassade wurde aufgrund der zu hohen Zugluftraten ebenfalls ausgeschlossen. Die Schwingflügel bieten aber im Vergleich zu den zwei Reihen Kippflügeln zwei wesentliche Vorteile. Zum einen sind mit ihnen wesentlich größere Öffnungsflächen realisierbar und zum anderen müssen nur halb so viele Fenster automatisiert werden. Allerdings muss bei den Schwingflügeln die Zuluft Höhe so gewählt werden, dass es im Winter zu keinen Zugscheinungen neben dem Fenster kommt.

4.1 Anforderungsprofil an die Automatisierung der Fensterlüftung

Das Anforderungsprofil für die Lüftung in Schulen unterscheidet sich je nach Tages- und Jahreszeit und ist zusätzlich abhängig von der Anwesenheit von Personen. Deshalb werden die Anforderungen hier je nach Randbedingungen getrennt beschrieben. Bei allen Punkten ist es aber notwendig, sicherheitsrelevante Überlegungen mit einzubeziehen. Bei der Lüftung müssen negative Auswirkungen durch hohe Windgeschwindigkeiten und Schlagregen vermieden werden. Zusätzlich muss der Einbruchsschutz sichergestellt werden. Diese Punkte sind aber relativ einfach umzusetzen und werden deshalb bei den folgenden Überlegungen nicht mehr weiter betrachtet. Während der Anwesenheit von Personen muss zudem eine Übersteuerung der Regelung durch den Nutzer möglich sein.

Anforderungsprofil während des Unterrichts und vor Unterrichtsbeginn

Sind Personen im Raum anwesend, sind die Anforderungen an eine Automatisierung am größten. Hier müssen sowohl die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit als auch, im Winter, der Energieverbrauch des Gebäudes berücksichtigt werden. Die ständig wechselnden internen Lasten (Änderung der Anzahl der Personen) machen eine reine Steuerung der Öffnungsweite nach der Witterung zusätzlich sehr schwierig. Denn entweder ist dann die Öffnungsweite ideal für eine hohe Belegung und der Luftwechsel wird für eine niedrige Belegung viel zu hoch, oder die Öffnungsweite bietet bei niedriger Belegung einen optimalen Luftwechsel und ist bei voller Belegung zu niedrig. Deshalb sollte bei einer Automatisierung der Fenster die Öffnungsweite in Abhängigkeit von den Raumparametern erfolgen. Ob dabei nur nach einem Parameter oder sogar nach beiden (Luftqualität und Temperatur) geregelt werden muss, bleibt noch zu ermitteln. Die einfachste Möglichkeit die Luftqualität im Raum zu messen, bieten dabei Kohlendioxidensoren. Hier sollte allerdings auf die Qualität der Sensoren geachtet werden. Manche Sensoren haben eine große Ungenauigkeit in den Messwerten und eine nicht unerhebliche Drift der Messwerte über die Jahre. Als Indikator für die thermische Behaglichkeit wird meist die Raumlufttemperatur gemessen. Die Verwendung von Strömungssensoren zur Ermittlung der Zugluft während des Betriebs ist unrealistisch, da die Sensoren viel zu teuer und auch zu empfindlich für einen breiten Einsatz sind. Die Anordnung der Öffnungsflügel und ihre Öffnungsweiten müssen daher so gewählt werden, dass keine Zugluft auftreten kann.

Neben den bis jetzt genannten Randbedingungen sollte ein gutes Automatisierungskonzept noch folgende Punkte berücksichtigen:

- Flexible Öffnungsweiten von minimal für den Winter bis maximal für den Sommer
- Leise Motoren
- Gleichbleibende Öffnungsweite über lange Zeiträume (kein ständiges Öffnen und Schließen)
- Schnelle Reaktion auf Änderung der Umgebungsbedingungen
- Einfache Handhabung und Möglichkeit der Übersteuerung durch den Nutzer
- Kostengünstig (wenig Sensoren, wenig automatisierte Fenster)
- Witterungsschutz bei hohen Windgeschwindigkeiten und Schlagregen

Zusätzlich können die Räume vor dem Unterrichts gelüftet werden. Hier ist aber keine aufwändige Regelung notwendig. Es reicht eine reine Zeitsteuerung, die je nach Jahreszeit oder Außentemperatur die Öffnungsdauer der Fenster für einen 1-fachen Luftwechsel bestimmt.

Anforderungsprofil an die Nachtlüftung

Eine Automatisierung der Nachtlüftung im Sommer zur Auskühlung der Raumspeichermassen benötigt nur die Außen- und Innentemperatur, um zu ermitteln, ob tatsächlich ein Auskühlpotential vorhanden ist. Dieses ermittelt den Zeitpunkt des Öffnens der Fenster. Das Unterschreiten einer festgelegten Innentemperatur regelt den Zeitpunkt des Schließens der Fenster. Eine Einstellung der Öffnungsweite ist nicht notwendig. Wenn möglich wird immer die maximale Öffnungsweite verwendet, um ein möglichst großes Kühlpotential nutzen zu können. Allerdings muss dabei beachtet, dass über die Lüftungsöffnungen nicht in das Gebäude eingebrochen werden kann. Zusätzlich müssen die Fenster bei hohen Windgeschwindigkeiten und Schlagregen automatisch schließen.

4.2 Bestehende Automatisierungskonzepte

Auf dem Markt erhältlichen Automatisierungskonzepte für Fensterlüftung sind vor allem auf die Lüftung von Wohnungen und Büros abgestimmt. Sie haben meist folgende Funktionen integriert:

- Zeitsteuerung (verschiedene Lüftungsoptionen je nach Tages- und Jahreszeit, auch bei Abwesenheit der Personen)
- Steuerung der Öffnungen nach Innen- und Außentemperaturen (Begrenzung der Öffnungsdauer, v. a. im Winter, und zur Nachtauskühlung im Sommer)
- Steuerung der Öffnungen nach dem Kohlendioxidgehalt innen (Bedarfslüftung auch bei hoher Belegungsdichte)
- Witterungsschutz (automatisches Schließen der Fenster unabhängig von der eingestellten Lüftungsoption)
- Übersteuerung durch den Nutzer

Werden bei diesen Systemen die Fenster geöffnet, dann meist in Kippstellung mit der vollen Öffnungsweite. Der Luftwechsel wird nur über die Öffnungsdauer beeinflusst, und diese wird dabei aus der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen bestimmt. Die Systeme entsprechen daher eher dem Prinzip einer Stoßlüftung als einer Dauerlüftung. Das ist meist auch der Fall, wenn die Fenster nach dem Kohlendioxidgehalt der Raumluft angesteuert werden. Dort öffnen und schließen sich die Fenster bei Über- bzw. Unterschreiten eines Schwellwertes. Es gibt auch Systeme, die die Öffnungsweite nach einem Regelparameter modulieren, oder die Öffnungsweite begrenzen, um Zugluft zu vermeiden. Ein System setzt dabei gezielt die Querlüftung über gegenüberliegende Fenster oder Atrien in Schulen ein. Um dort die entsprechenden Winddrücke zu ermitteln, muss im Vorfeld eine CFD - Analyse des Gebäudes durchgeführt werden.

Die Systeme sind alle zonenweise, raumabhängig oder für Einzelfenster ansteuerbar und können auch in übliche Gebäudeautomationsnetze eingebunden werden. In Deutschland werden diese Systeme in Schulen aber kaum eingesetzt. Weiter verbreitet sind sie z.B. in Großbritannien, der Schweiz oder in Dänemark.

4.3 Automatisierungskonzepte in der Literatur

Auch die Automatisierungskonzepte in der Literatur unterscheiden zwischen Lüftung zur Verbesserung der Luftqualität oder zur Abfuhr von Wärmelasten, bzw. zwischen der An- oder Abwesenheit von Personen. Ein gute Übersicht über mögliche Konzepte bietet Allard [1]. Zur reinen Regelung der Luftqualität wird ein 2-Punkt-Regler mit Hysterese vorgestellt (Bild 36). Das heißt, dass der Punkt zum Öffnen und Schließen des Fensters entzerrt wird und ein ständiges Öffnen und Schließen am Schwellpunkt vermieden wird. Dabei ist die Breite der Hysterese ein entscheidendes Kriterium für die Qualität des Reglers. Je größer der Abstand zwischen den Grenzen, umso größer sind die Schwankungen in der Luftqualität und umso länger bleibt das Fenster durchschnittlich geöffnet. Allerdings verringert sich dadurch auch die Häufigkeit mit der die Fenster geöffnet und geschlossen werden müssen.

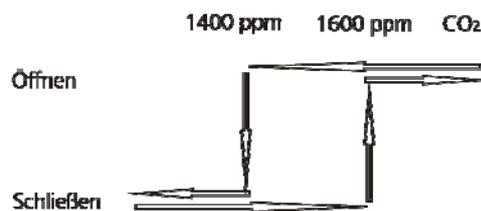


Bild 36: Prinzip eines 2-Punkt-Reglers mit Hysterese für das Öffnen und Schließen eines Fensters nach dem Kohlendioxidgehalt der Raumluft.

Ein anderes Prinzip wird zum Abtransport von übermäßigen Wärmelasten vorgestellt. Es ist dem Prinzip nach eine Logikabfrage (Wenn... dann...), bei der, je nachdem welche Randbedingungen gerade vorherrschen, das Fenster geöffnet oder geschlossen wird. Das Prinzip ist in vereinfachter Form in Bild 37 dargestellt.

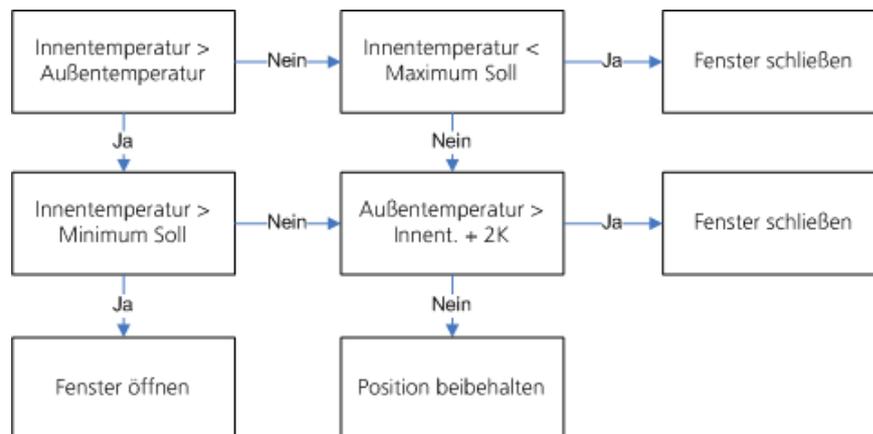


Bild 37: Prinzip einer Logikabfrage zur Abfuhr von Wärmelasten über Fensterlüftung nach Allard [1].

Auch die Steuerung der Fenster nach dem Kohlendioxidgehalt kann nach dem Prinzip der Logikabfrage gestaltet werden, wobei es dann auch hier ein Minimum und ein Maximum des Sollwertes gibt. So können beide Abfragen kombiniert werden. Dann muss allerdings definiert werden,

welche Vorgabe dominiert, sollten nach Temperatur und Kohlendioxidgehalt unterschiedliche Vorgaben resultieren.

Das Öffnen und Schließen des Fensters muss nicht immer 100% der möglichen Öffnungsweite betreffen, es kann, wie oben bereits erwähnt auch schrittweise erfolgen. Dabei muss jedoch der Faktor Zeit mitbedacht werden. Das Maß der Änderung der Öffnungsweite muss an die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Abfragen angepasst werden. Sonst ist das Ergebnis ähnlich dem eines kompletten Öffnens und Schließens.

Beim dem in Allard [1] vorgestellten Prinzip zur Nachtauskühlung werden nicht nur die gerade vorherrschenden Temperaturen verwendet, sondern auch die Summe der Übertemperaturgradstunden während des vorangegangenen Tages. So wird ermittelt, ob überhaupt ein Kühlbedarf besteht (Bild 38). Der Sollwert für die Übertemperaturgradstunden beträgt dabei 3 Kh. Die minimale Innentemperatur, bei der die Fenster wieder geschlossen werden, wird mit einem Beispiel von 16°C angegeben.

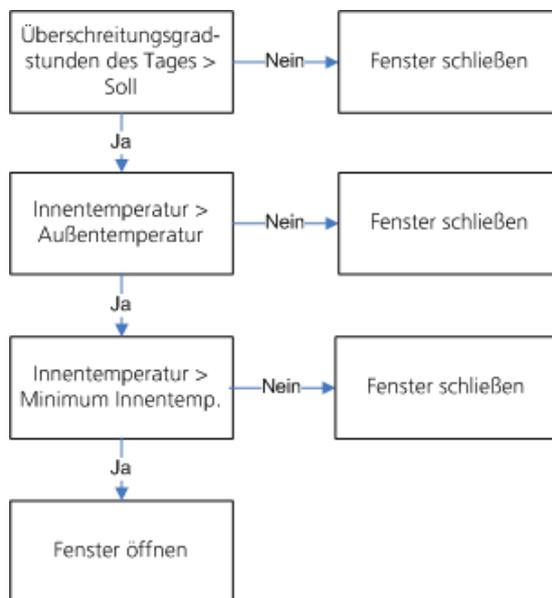


Bild 38:
Prinzip einer Logikabfrage zur Nachtauskühlung über Fensterlüftung nach Allard [1].

Die Schemata sind alle vereinfacht und ohne Witterungsschutz angegeben. Diese Sicherheitsfragen können über Wenn - Dann - Bedingungen eingebunden werden.

In der Zusammenstellung [1] wird auch auf eine Möglichkeit verwiesen, mit der die notwendige Öffnungsweite eines Schwingfensters bei einseitiger Anordnung ermittelt werden kann, um Wärmelasten abzuführen. Zuerst wird nach dem Prinzip eines PI-Reglers mit einem Proportionalbeiwert und einem Integralbeiwert sowie der Differenz der Raumtemperatur zwischen Soll- und Istwert der Lüftungsbedarf ermittelt. Anschließend kann mit diesem Lüftungsbedarf und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen die Öffnungsweite berechnet werden. Die Beiwerte werden von den Wärmelasten abhängig gemacht, die in der Literatur aber leider nicht angegeben sind.

Neben den oben bereits genannten Zweipunktreglern, Logikabfragen und dem linearen PI - Regler ist in der Literatur noch ein anderer nichtlinearer Regelungsansatz zu finden, der Fuzzy - Regler. Dieser Regler (Bild 39) übersetzt konkrete Messwerte der Regel- und Störgrößen in unscharfe Begriffe, wie z. B. eine konkrete Raumtemperatur in den Begriff warm, angenehm oder kalt (Fuzzifizierung). Mit Hilfe dieser Eingangsparameter werden dann Regeln abgearbeitet, wie z. B. "Ist die Raumtemperatur ‚warm‘, dann öffne das Fenster ‚weit‘". Dabei können auch mehrere Regeln gleichzeitig gelten. Als Ergebnis wird wieder eine unscharfe Aussage ausgegeben, die vom Regler über verschiedene Methoden in eine konkrete Öffnungsweite der Fenster umgesetzt wird (Defuzzifizierung).

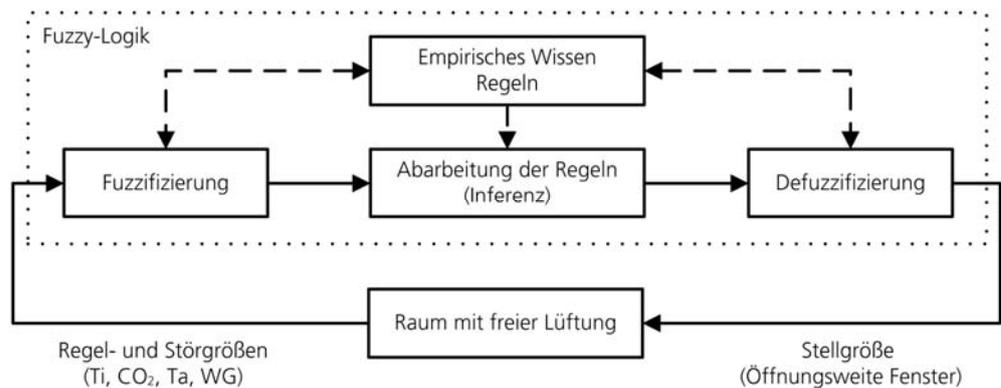


Bild 39:
Übersichtsschema für eine automatisierte Fensterlüftung mit Fuzzy - Regler (nach [26]).

Die positiven Eigenschaften und die grundsätzliche Anwendbarkeit des Fuzzy - Reglers bei automatisierter Fensterlüftung werden in mehreren Veröffentlichungen zum Thema bestätigt. Dounis [8] beschäftigt sich dabei mit der Regelung der Kohlendioxidkonzentration als Indikator für die Luftqualität im Raum, Marjanovic und Eftekhari [26] mit der Regelung der Raumtemperatur. In beiden Arbeiten wurde der Regler nur bei warmen Außentemperaturen (über 15°C) und normaler bis geringer Belegungsdichte (Büro und Wohnräume) getestet. Dounis [7] hat auch die Regelung der thermischen Behaglichkeit nach dem Predicted Mean Vote (PMV) sowohl unter Winter- als auch Sommerbedingungen mit einem Fuzzy - Regler untersucht. Hier wurden die Fenster aber meist nur nachts oder morgens (während der Abwesenheit von Personen) geöffnet. Zudem fanden die Versuche in Griechenland statt, die Witterungsbedingungen, vor allem die Anforderungen an die Behaglichkeit bei Fensterlüftung in Winter, sind daher nicht vergleichbar.

Aus den Untersuchungen ergaben sich zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- der Regler reagiert umso stabiler, je mehr Regeln verwendet werden [26]
- der Regler reagiert umso sensibler auf eine Größe (z. B. Außentemperatur), je mehr Zugehörigkeitsbereiche (z. B. kalt, mild und warm) diese Größe hat [26]
- Kohlendioxid alleine reicht als Regelgröße im Sommer nicht aus [8]
- es können mehrere Regelgrößen ohne Probleme gleichzeitig verarbeitet werden [7]
- es gibt Schwankungen bei den Regelgrößen, diese bleiben aber innerhalb der gesetzten Grenzen [7]
- der Regler ist für die vorgesehene Verwendung nutzbar [26], [8], [7]

Dieser Regler begünstigt die empirische Methodik der Fensterlüftung, da die Ergebnisse sehr einfach in Regeln eingebunden werden können. Sie ist damit auch eine effektive Nachbildung

menschlichen Verhaltens. Hinzu kommt, dass dieser Regler relativ aufwandsarm einzustellen ist und tendenziell robust reagiert.

In der Literatur lassen sich aber keine Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung bei sehr kalten Außentemperaturen finden. Selbst bei den Konzepten zur Bedarfslüftung nach Kohlendioxidgehalt wird empfohlen die Fenster zu schließen, sobald die Außentemperatur unter 12°C fällt [1].

4.4 Konfiguration eines Fuzzy - Reglers zur automatisierten Fensterlüftung

Automatisierungskonzepte zur Nachtlüftung sind, wie in Kapitel 4.3 bereits beschrieben, relativ einfach umzusetzen, zumal hier keine Rücksicht auf anwesende Personen genommen werden muss. Die Versuche beschränken sich damit auf Automatisierungskonzepte zur automatisierten Fensterlüftung während der Anwesenheit von Personen im Klassenraum.

Bei der Auswahl des Automatisierungskonzepts für die Fensterlüftung sind, wie oben bereits genannt, verschiedene Herausforderungen zu beachten. Hauptsächlich zu beachten sind die beiden Raumparameter Temperatur und Luftqualität. Sie bilden die Regelgrößen. Beide Größen sind zu beachten, weil die Öffnungsweite der Fenster beide beeinflusst und, vor allem im Winter, auch in entgegen gesetzter Richtung beeinflusst.

Bei Fensterlüftung können sich je nach Witterung und Öffnungsweite unterschiedliche Zuluftvolumenströme und Zulufttemperaturen und daraus folgend unterschiedliche Raumlüftströmungen einstellen. Die Raumlüftströmung kann dabei sowohl ähnlich der Quelllüftung, als auch der Mischlüftung sein. Vor allem im Winter, wenn die Strömung einer Quelllüftung ähnlich, und der Luftwechsel relativ niedrig ist, kann es bis zu 20 min und länger dauern, bis ein Abfall der Kohlendioxidkonzentration an einem Sensor unter der Decke erkennbar ist. Zudem ist es schwer, Fensterlüftung mit einfachen mathematischen Modellen zu beschreiben, es ist die Kenntnis empirischer Werte erforderlich. Diese hängen von vielen Randbedingungen ab und sind nicht ohne Weiteres auf alle möglichen Konstellationen zu übertragen. Als Störgröße ist vor allem die Außentemperatur, bei manchen Fensterkonstellationen auch Windgeschwindigkeit und Windrichtung in die Regelung mit einzubeziehen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Reglers zur Automatisierung der Fensterlüftung sind daher folgenden Punkte zu bedenken:

Ein Zweipunktregler wäre für das Öffnen und Schließen der Fenster die einfachste Lösung, auch wenn aus Behaglichkeitsgründen die maximale Öffnungsweite nach der Außentemperatur begrenzt werden müsste. Dadurch würden sich die Fenster aber ständig öffnen und schließen, und das ist aufgrund einer möglichen Geräuschbelästigung in einem Klassenraum nicht sinnvoll.

Der Einsatz eines PI- oder PID - Reglers wäre möglich, die Einstellparameter müssten aber über den Jahresverlauf angepasst werden (unterschiedliche Luftmengen, unterschiedliche Raumlüftströmung). Der Regler wäre aber vor allem aufgrund der z. T. großen Totzeiten in der Regelstrecke (Sensorposition und Raumlüftströmung) schwierig einzustellen. Zudem wäre die Kombination aus beiden Regelparametern nur über eine Kaskade oder über Kennlinien möglich.

Deswegen wird hier das System eines Fuzzy - Reglers verwendet, der in seinen Bestandteilen an die Situation eines Raums mit hoher Belegungsdichte und niedrigen Außentemperaturen angepasst und getestet wird. Die Vorteile, das Prinzip und einige Randbedingungen des Reglers wurden bereits in Kapitel 4.3 beschrieben. Auf die drei Bereiche des Reglers (Fuzzifizierung, Abarbeitung der Regeln und Defuzzifizierung) wird im Folgenden näher eingegangen.

Mit einem Fuzzy - Regler wird empirisches Wissen, das in linguistischen Regeln (Wenn – Dann) formuliert wird, verarbeitet. Die Wertebereiche der Eingangs- und Stellgrößen werden dazu in sprachliche Begriffe (Zugehörigkeitsbereiche), z.B. 'Kalt' oder 'Warm' aufgeteilt. Ein Wert kann in der Fuzzy-Logik aber nicht nur ganz oder gar nicht einem Bereich zugeordnet sein, sondern auch prozentual (Bild 40). Der Vorteil dieser Art der Beschreibung z.B. des Raumzustandes ist, das damit Übergangsbereiche in den Werten definiert werden können, so wie es auch bei der menschlichen Bewertung des Raumklimas fließende Übergänge gibt.

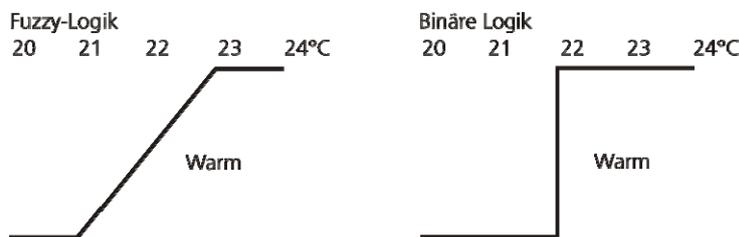


Bild 40: Zugehörigkeit eines Messwertes zum Bereich 'Warm' nach Fuzzy-Logik und Binärer Logik.

Nahezu alle Menschen haben empirisches Wissen bezüglich Fensterlüftung. Dieses grundsätzliche Wissen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: ‚Empirisches Wissen‘ zur Fensterlüftung in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

	Außentemperatur				
	Sehr kalt	Kalt	Leicht kalt	Mild	Warm
Kritische Zielgröße	T_i und CO_2	CO_2 und T_i	CO_2	CO_2 und T_i	T_i
Lüftung	minimal	wenig	mittel	viel	maximal

Um aber diese einfache Tabelle in einen Fuzzy - Regler umsetzen zu können, werden noch andere Informationen benötigt, z.B. bei welcher konkreten Öffnungsweite die Raumtemperatur im Winter noch angenehm, der Luftwechsel aber dennoch ausreichend ist. Dieser Bereich kann dann in die Öffnungsweite 'minimal' übersetzt werden. Dazu werden die Ergebnisse aus den vorangegangenen Variantenversuchen (Kapitel 3) verwendet. Das gewonnene Wissen kann nun in die entsprechenden Regeln und in die Zugehörigkeitsbereiche der Störgrößen und der Stellgröße umgesetzt werden.

4.4.1 Fuzzifizierung der Eingangsparameter

Die Eingangsparameter teilen sich auf in Regelgrößen (Kohlendioxidgehalt der Raumluft und Raumlufttemperatur) und Störgrößen (Außentemperatur und Wind) auf. Bei der Fuzzifizierung der Regelgrößen müssen vor allem die Vorgaben aus der Normung beachtet werden. Bei der Aufteilung der Zugehörigkeitsbereiche der Störgrößen sollen vor allem die Ergebnisse aus den Variantenversuchen mit einfließen.

Grundlage für die einzelnen Bereiche des Kohlendioxidgehalts der Raumluft ist der Leitfaden für Innenraumlufthygiene in Schulen [20], der die Raumluft in drei Kategorien einteilt, nämlich hygienisch unbedenklich, hygienisch auffällig und hygienisch inakzeptabel (siehe Kapitel 2.2). Diese drei Bereiche werden bei der Fuzzifizierung in die drei Bereiche ‚ok‘, ‚akzeptabel‘ und ‚hoch‘ übersetzt (Bild 41). Die Übergangsbereiche sind frei gewählt. Der Übergangsbereich zwischen ‚Akzeptabel‘ und ‚Hoch‘ wird während der Versuche verschoben auf den Bereich zwischen 1800 und 2000 ppm, um dessen Auswirkung auf den maximalen Kohlendioxidgehalt im Raum zu untersuchen. Es zeigt sich dass der Kohlendioxidgehalt der Raumluft dadurch beeinflusst werden kann.

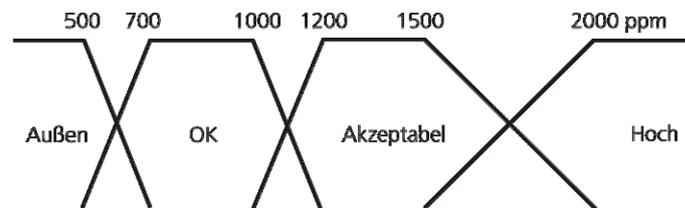


Bild 41:
Fuzzifizierung der Regelgröße Kohlendioxidgehalt angelehnt an die Vorgaben des Leitfadens des Umweltbundesamtes [20].

Die Fuzzifizierung der Raumtemperatur erfolgte in Anlehnung an den vorgegebenen Temperaturbereich für den Winter DIN EN 15251 [5] (Bild 42). Der Übergangsbereich wird durch den Unterschied zwischen Kategorie I und II in der Bewertung der Raumtemperatur festgelegt. Die Abgrenzung zwischen ‚Sehr kalt‘ und ‚Kalt‘ ist frei gewählt. Zu Anfang der Versuche wird der Bereich ‚OK‘ weiter gefasst (Kategorie I bis III für Winter und Sommer). Eine stärkere Eingrenzung begünstigt jedoch eine schnellere Reaktion auf Änderungen im Raum.

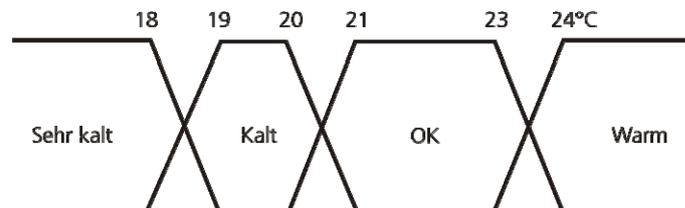


Bild 42:
Fuzzifizierung der Regelgröße Raumtemperatur angelehnt an die Vorgaben von DIN EN 15251 [5].

Die Außentemperatur wird in fünf Bereiche unterschieden. Die Eingrenzung der Bereiche erfolgt hauptsächlich anhand der Ergebnisse der vorangegangenen Versuche und am rechnerischen Lüftungswärmebedarf bei voller Belegung. Ein Bereich ‚Sehr warm‘ ist nicht vorgesehen, weil bereits bei ‚warmen‘ Außentemperaturen die Fenster ‚Maximal‘ geöffnet werden. Eine Reduzierung der Öffnungsweite bei noch wärmeren Außentemperaturen ergibt keinen Sinn, da die internen

Wärmelasten zu hoch sind (siehe Kap. 3.1). Während der Versuche wird auch eine noch feinere Aufteilung der Bereiche verwendet. Sie bringt keine wesentlichen Vorteile in den Ergebnissen, macht aber eine weit größere Anzahl an Regeln notwendig.

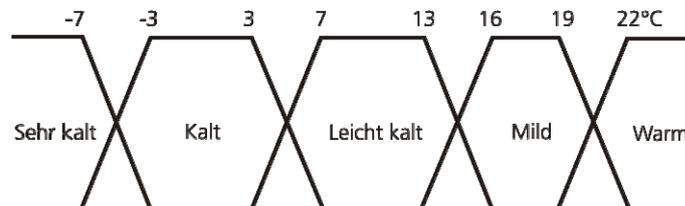


Bild 43:
Fuzzifizierung der Störgröße Außentemperatur.

4.4.2 Regeln

Bei der Zusammenstellung der Regeln werden verschiedene Varianten untersucht, deren Eigenschaften sich größtenteils im Lauf der Versuche aus den vorangegangenen Messergebnissen ergeben. Als Inferenz - Methode zur Abarbeitung der Regeln wird die Max - Min - Inferenz verwendet (Maximaler Wahrheitsgrad in der Kombination der Regeln, minimaler Wahrheitsgrad in der Kombination der Bedingungen innerhalb einer Regel).

Die erste Variante kombiniert die Bedingungen für Innentemperatur und Kohlendioxid in einer Regel. Die Heizung ist nicht eingebunden. Ein Ausschnitt aus den Regeln ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7:
Erste Variante der Regeln der Fuzzy-Logik.

Außentemperatur	Innentemperatur	Kohlendioxid	Lüftung
Kalt	Kalt	OK.	Schließen
Kalt	Kalt	Akzeptabel	Schließen
Kalt	Kalt	Hoch	Minimal
Kalt	OK	OK.	Minimal
Kalt	OK	Akzeptabel	Minimal
Kalt	OK	Hoch	Wenig
Kalt	Warm	OK	Minimal
Leicht kalt	Kalt	OK	Schließen
Leicht kalt	Kalt	Akzeptabel	Minimal
Leicht kalt	Kalt	Hoch	Wenig
Warm			Maximal

Diese Variante zeigte schon relativ gute Ergebnisse. Die Stellweitenänderung ist aber noch zu häufig und es zeigen sich Wechselwirkungen zwischen Heizung und Öffnungsweite.

Deswegen wird in der zweiten Variante die Heizung mit in den Fuzzy - Regler eingebunden. Die Wechselwirkungen können damit behoben werden. Allerdings sind die Zugehörigkeitsfunktionen der Innentemperatur für eine Regelung der Heizung viel zu weit gefasst und es ergeben sich zu große Schwankungen. Um die Heizung mit einbinden zu können, wäre auf jeden Fall eine eigene Fuzzifizierung der Innentemperatur notwendig, was die Kombination in den Regeln wieder erschwert. Deswegen wird von einer Einbindung der Heizung in nachfolgenden Versuchen wieder abgesehen. Um die Wechselwirkungen zwischen Lüftung und Heizung in Bezug auf die Innentemperatur trotzdem ausschließen zu können, muss der Stellbereich der Heizungsregelung zu 100% in einem einzigen Zugehörigkeitsbereich der Innentemperatur (am besten 'OK') liegen.

Durch die Kombination der Regeln für Innentemperatur und Kohlendioxid werden die Möglichkeiten des Fuzzy - Reglers aber nicht voll genutzt. Der Vorteil des Reglers ist nämlich auch, dass er die Ergebnisse der einzelnen Regeln selbsttätig gewichtet. Die Regeln für Temperatur und Kohlendioxid werden deshalb getrennt (Tabelle 8).

Tabelle 8:
Zweite Variante der Regeln der Fuzzy-Logik.

Außentemperatur	Innentemperatur	Kohlendioxid	Lüftung
Kalt		OK.	Schließen
Kalt		Akzeptabel	Minimal
Kalt		Hoch	Wenig
Kalt	Sehr kalt		Schließen
Kalt	Kalt		Schlitz
Warm			Maximal

Obwohl die Anzahl der Regeln bei dieser Variante erheblich abnimmt, weil es weniger Kombinationsmöglichkeiten der Eingangswerte gibt, läuft diese Variante in den meisten Fällen stabiler als die erste Variante. Da die Heizung aber innerhalb des Innentemperaturbereichs 'OK' arbeitet, werden die Regeln für die Innentemperatur, solange die Heizung grundsätzlich einschalten kann, überflüssig. Die Temperaturbereiche 'Kalt' und 'Sehr kalt' können niemals eintreten, solange die Heizleistung ausreicht. Eine Minimierung der Heizleistung kann nur über eine Begrenzung der Luftwechsels, bzw. der Öffnungsweiten erfolgen. Deswegen sind bei kalten Außentemperaturen die Öffnungsweiten in Bezug auf die Raumluftqualität besonders sorgfältig zu definieren, und die Heizung bei steigenden Außentemperaturen auszuschalten. Das kann in Klassenräumen aufgrund der hohen internen Lasten schon ab etwa 5 bis 10°C geschehen (siehe Kapitel 3.1). Wenn zusätzlich die Sonne scheint, ist eine Heizung schon bei wesentlich niedrigeren Außentemperaturen unnötig. Die Heizung ist dann nur noch zum Aufheizen vor Unterrichtsbeginn notwendig.

Bei der dritten Variante wird deshalb die Heizung beschränkt auf die Außentemperaturbereiche 'Sehr kalt' und 'Kalt'. Die Regeln zur Innentemperatur in diesen Bereichen werden weggelassen. Ab dem Außentemperaturbereich 'Leicht kalt' wird die Öffnungsweite, und damit der Luftwechsel, bei Abfallen der Innentemperatur begrenzt. Damit ergibt sich die Regelkombination in Tabelle 9.

Tabelle 9:
Dritte Variante der Regeln der Fuzzy-Logik.

Außentemperatur	Innentemperatur	Kohlendioxid	Lüftung
		Außen	Schließen
Sehr kalt		OK	Schließen
Sehr kalt		Akzeptabel	Minimal
Sehr kalt		Hoch	Wenig
Kalt		OK	Schließen
Kalt		Akzeptabel	Wenig
Kalt		Hoch	Mittel
Leicht kalt		OK	Minimal
Leicht kalt		Akzeptabel	Mittel
Leicht kalt		Hoch	Viel
Leicht kalt	Sehr kalt		Schließen
Leicht kalt	Kalt		Minimal
Mild		OK	Wenig
Mild		Akzeptabel	Viel
Mild		Hoch	Maximal
Mild	Sehr kalt		Wenig
Mild	Kalt		Mittel
Mild	OK		Viel
Mild	Warm		Maximal
Warm		OK/ Akzeptabel/ Hoch	Maximal

4.4.3 Defuzzifizierung der Öffnungsweite

Bei den Schwingflügeln werden drei von fünf Fenstern automatisiert, bei den Kippflügeln in zwei Reihen je drei von fünf Fenstern auf mittlerer Höhe und oben. In die Zugehörigkeitsfunktionen der Öffnungsweite geht vor allem die Information aus den Variantenversuchen in Kombination mit den gesetzten Regeln ein. Eine Veränderung dieser Funktionen während der Versuche zeigte eine sehr große Abhängigkeit der Ergebnisse von der Auswahl dieser Funktionen. Die besten Ergebnisse zeigen sich, wenn die Öffnungsweiten etwas geringer gewählt werden, als sie nach den vorangegangenen Auswertungen optimal wären. Dann kann bei den Regeln bei einem Ansteigen des Kohlendioxidgehalts auf 'Hoch' die nächst höhere Lüftungsstufe angegeben werden. Die Grenze des minimalen Luftwechsels kann besser kontrolliert werden, vor allem wenn keine maximale Belegung des Raumes gegeben ist. Für die Schwingflügel reicht die Öffnungsweite aus, um die Fenster bis in den Sommer zu automatisieren (Bild 45). Bei den Kippflügeln ist die Öffnungsweite nicht ausreichend. Bereits ab Außentemperaturen um die 15°C müssten zusätzlich Fenster in Drehstellung mit der Hand geöffnet werden (Bild 44).

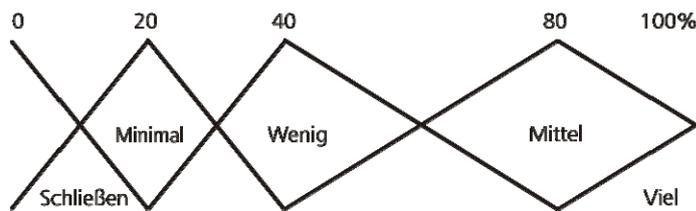


Bild 44:
Defuzzifizierung der Öffnungsweite der großen Kippflügel auf mittlerer Höhe. Die Öffnungsweite der oberen kleinen Kippflügel ist doppelt so groß.

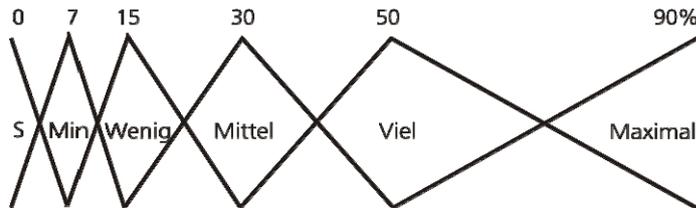


Bild 45:
Defuzzifizierung der Öffnungsweite der Schwingflügel.

Die Kombination der Regeln ergibt eine Kombination der Zugehörigkeitsfunktionen der Öffnungsweite, multipliziert mit ihrem Wahrheitsgrad (entspricht dem Wahrheitsgrad der gesamten Regel). Zur Defuzzifizierung der Öffnungsweite wird der Schwerpunkt dieser gewichteten Kombination berechnet (Bild 46). Die Flächen werden aufgrund der einfacheren Berechnung addiert, die Überlappungen der Dreiecke gehen damit doppelt in die Berechnung ein.

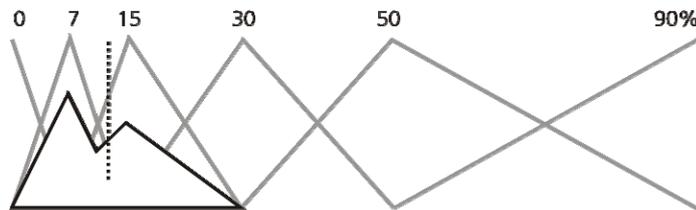


Bild 46:
Beispiel der Defuzzifizierung einer Öffnungsweite aus der gewichteten Kombination aller Regeln.

4.4.4 Zeitintervalle im Ablauf

Die Regeln werden alle 2 min abgefragt. Dieses Zeitintervall ist vollkommen ausreichend und könnte auch noch etwas ausgedehnt werden. Da sowohl die Eingangsgrößen als auch die Stellweite als Absolutgrößen in die Regeln eingehen, ist das Ergebnis des Reglers relativ unabhängig vom Zeitintervall des Ablaufs.

Es wäre auch möglich alle Größen in ihrem Maß der Änderung eingehen zu lassen (vgl. Dounis [7]). Dann wäre das Zeitintervall zwischen den Abfragen in Abhängigkeit vom Zeitverhalten der Regestrecke (Raum) von entscheidender Bedeutung, um einen stabilen Regler zu erhalten. Aufgrund des bereits oben genannten unterschiedlichen Strömungsverhaltens im Raum werden bei diesem Regler deshalb die absoluten Größen verwendet. Dies bringt zwar größere Streubreiten in den sich einstellenden Raumparametern mit sich, macht den Regler aber wesentlich robuster.

4.5 Messergebnisse für die Automatisierung mit Fuzzy - Control

Mit den genannten Einstellungen wurde der Fuzzy - Regler in der Freilandversuchseinrichtung untersucht. Auf den Bildern schwarz dargestellt ist die jeweilige Öffnungsweite in Prozent der Schwingfenster bzw. der großen Kippfenster. Die Oberlichter haben die doppelte Öffnungsweite der großen Kippfenster. Zu Beginn der Versuche ist der Raum immer leer gelüftet.

Der Kohlendioxidgehalt der Raumluft (Bild 47 und Bild 48) kann mit dem Regler ausreichend kontrolliert werden. Bei den Kippfenstern ist Stellweitenänderung jedoch meist häufiger als bei den Schwingflügeln (nicht dargestellt). Zum einen ist diese Öffnungsvariante abhängiger vom Wind, zum anderen ändert sich mit der Öffnungsweite auch die Höhendifferenz zwischen Zu- und Abluftflächen. Zudem ist das Maß der Änderung, um eine ähnliche Öffnungsflächenänderung zu erhalten, systembedingt größer als bei den Schwingflügeln. Der Regler verhält sich in den untersuchten Bereichen stabil, und die Öffnungsweite der Fenster passt sich sehr schnell an ein Ansteigen bzw. Abfallen der Raumlast durch Personen an (vgl. Bild 48 ab 12:30 Uhr). Um die Veränderung der Öffnungsweite an eine geringe Belegungsichte (Bild 48) besser anzupassen, müsste der Zugehörigkeitsbereich 'Akzeptabel' für den Kohlendioxidgehalt noch weiter unterteilt werden. Die Änderung der Raumlast ist hier zu gering, um den Regler anzusprechen, da sich der Kohlendioxidgehalt noch im akzeptablen Bereich befindet.

Bei den Versuchen ist der Kohlendioxidssensor unter der Decke angebracht. Daher ergeben sich, je nach sich einstellender Raumluftströmung, unterschiedliche Konzentrationen in der Aufenthaltszone (vgl. Bild 47). Möglich wäre auch ein Sensor auf Atemhöhe, um die Luftqualität dort direkt zu kontrollieren. So wäre es auch sehr einfach den Zugehörigkeitsbereich 'Hoch' des Kohlendioxidgehalts der Raumluft bereits ab niedrigeren Konzentrationen beginnen zu lassen, ohne dass evtl. sehr hohe Konzentrationen unter der Decke einen Einfluss auf die Öffnungsweite haben.

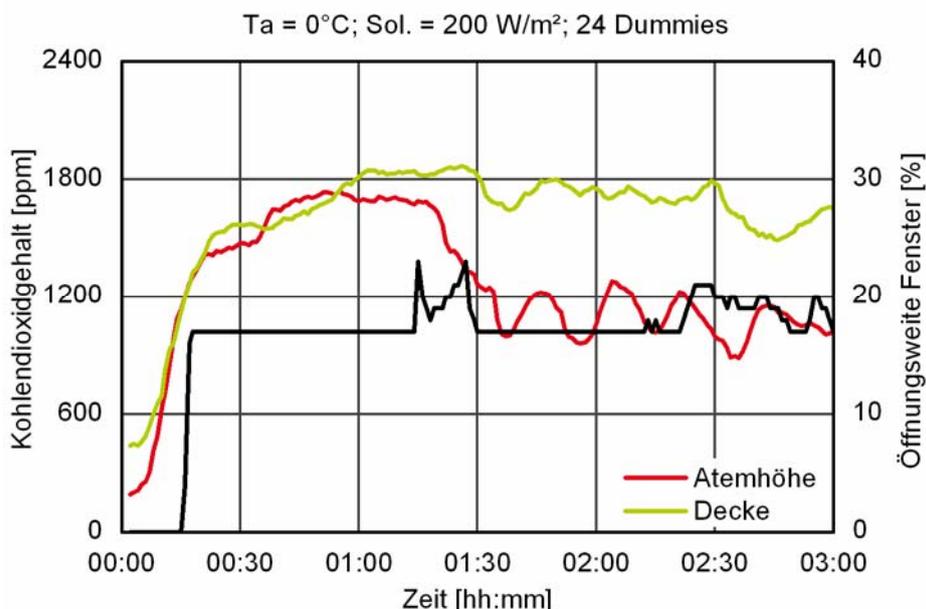


Bild 47: Kohlendioxidgehalt der Raumluft bei einem Regelungsversuch mit Schwingfenstern, Heizung in die Fuzzy - Regelung integriert.

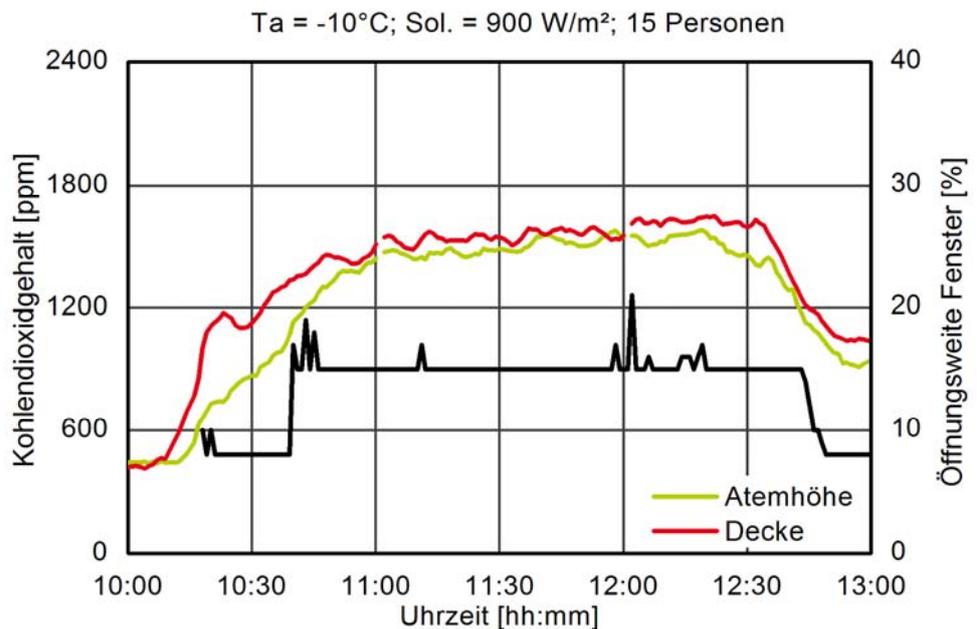


Bild 48:
Kohlendioxidgehalt der Raumluft bei einem Regelungsversuch mit Schwingfenstern und realen Personen, Heizung nicht in die Fuzzy - Regelung integriert (Personen verlassen den Raum ab 12:30 Uhr).

Auch die Raumlufttemperatur kann mit einem Fuzzy - Regler für die Heizung in einem akzeptablen Bereich gehalten werden (Bild 49), die Schwankungen sind aber relativ groß, wenn für die Heizung keine eigenen Zugehörigkeitsbereiche der Raumlufttemperatur definiert werden. Die Heizung kann aber auch durch eine eigene Regelung, unabhängig vom Fuzzy - Regler, gesteuert werden. Solange der Regelbereich innerhalb eines Zugehörigkeitsbereichs der Raumlufttemperatur des Fuzzy - Reglers liegt, gibt es keine Wechselwirkungen zwischen den Reglern (Bild 50).

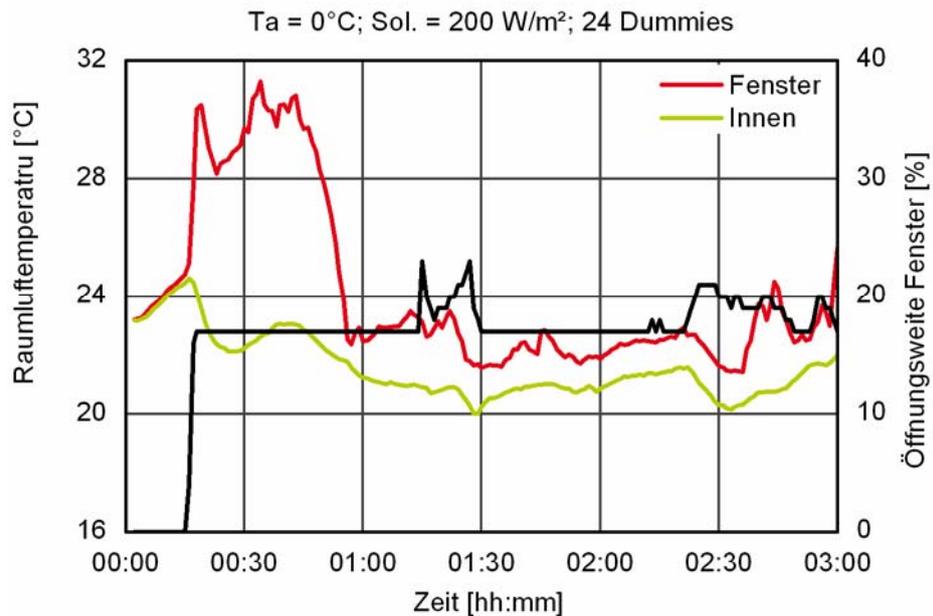


Bild 49:
Raumlufitemperatur bei einem Regelungsversuch mit Schwingfenstern, Heizung in die Fuzzy -
Regelung integriert.

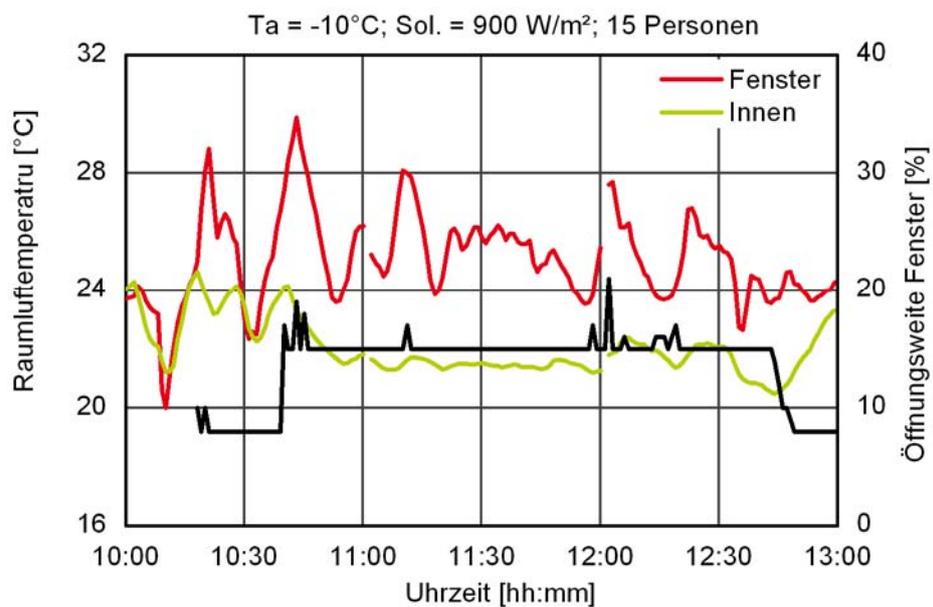


Bild 50:
Raumlufitemperatur bei einem Regelungsversuch mit Schwingfenstern und realen Personen, Hei-
zung nicht in die Fuzzy - Regelung integriert, Sonnenschutz betätigt (Personen verlassen den
Raum ab 12:30 Uhr).

Es ist jedoch, vor allem bei den Kippflügeln darauf zu achten, dass der Temperaturfühler der Hei-
zung sich nicht direkt im Zuluftstrahl der Außenluft befindet. Dann beginnt die Heizung die Zu-
luft so stark zu erwärmen, dass die Zuluft sofort am Fenster aufsteigt, und es zu Kurzschluss-
strömungen an der Fassade kommt.

4.6 Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierungskonzepte

Die Lüftung in Schulen erfolgt normalerweise während der Anwesenheit der Personen, um die Luftqualität auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Sie kann aber auch zur Nachtauskühlung im Sommer verwendet werden, um die Räume mit kalter Nachtluft zu durchspülen. In beiden Fällen ist eine Automatisierung der Fenster mit einer passenden Regelungs- oder Steuerungsstrategie sinnvoll. Automatisierungskonzepte zur Nachtlüftung sind relativ einfach umzusetzen, zumal hier keine Rücksicht auf anwesende Personen genommen werden muss. Sind Personen im Raum anwesend, sind die Anforderungen an eine Automatisierung, vor allem unter Winterbedingungen, wesentlich größer. In der Literatur lassen sich verschiedene Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung finden. Allerdings keine zur Nutzung bei kalten Außentemperaturen. Die Versuche beschränken sich damit auf Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung während der Anwesenheit von Personen im Klassenraum, vor allem bei kalten Temperaturen.

Zur Automatisierung einer Fensterlüftung sollte über eine Regelung für zwei Raumparameter (Luftqualität und Temperatur) erfolgen. Dies ist vor allem im Winter notwendig, da die Fensteröffnung auch beide Parameter beeinflusst. Zudem muss die Witterung als Störgröße mit einbezogen werden. Eine reine Steuerung der Öffnungsweite der Fenster nach Witterungsparametern ist nicht sinnvoll, da die Belegungsichte stark schwankend sein kann. Die Öffnungsweite müsste an feste Belegungsichte angepasst werden und dann Nachteile (zu hoher oder zu geringer Luftwechsel) bei anderen Belegungsichten.

Um die Öffnungsweite über einen Regler zu automatisieren stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Ein Zweipunktregler wäre für das Öffnen und Schließen der Fenster die einfachste Lösung, auch wenn aus Behaglichkeitsgründen die maximale Öffnungsweite nach der Außentemperatur begrenzt werden müsste. Ein ständiges Öffnen und Schließen der Fenster ist aber aufgrund einer möglichen Geräuschbelästigung in einem Klassenraum nicht sinnvoll. Der Einsatz eines PI- oder PID-Reglers wäre möglich, die Einstellparameter müssten aber über den Jahresverlauf angepasst werden (unterschiedliche Luftmengen, unterschiedliche Raumluftrömung). Zudem wäre die Kombination aus beiden Regelparametern nur über eine Kaskade oder über Kennlinien möglich.

Deswegen wird hier das System eines Fuzzy-Reglers verwendet, der in seinen Bestandteilen an die Situation eines Raums mit hoher Belegungsichte und niedrigen Außentemperaturen angepasst und getestet wird. Dieser Regler begünstigt die empirische Methodik der Fensterlüftung und ist zudem eine effektive Nachbildung menschlichen Verhaltens. Dazu kommt, dass diese Art von Regler relativ aufwandsarm einzustellen und tendenziell robust arbeitet.

Der Kohlendioxidgehalt der Raumlufte kann mit dem Regler ausreichend kontrolliert werden. Bei den Kippfenstern ist Stellweitenänderung jedoch meist häufiger als bei den Schwingflügeln. Der Regler verhält sich in den untersuchten Bereichen stabil, und die Öffnungsweite der Fenster passt sich sehr schnell an ein Ansteigen bzw. Abfallen der Raumlast durch Personen an. Allerdings zeigt sich eine große Schwankungsbreite des Kohlendioxidgehalts. Um die Veränderung der Öffnungsweite an eine geringe Belegungsichte noch besser anzupassen, müssen die Zugehörigkeitsbereiche für Regelgröße Kohlendioxid noch weiter unterteilt werden. Eine andere Möglichkeit ist es die Öffnungsweiten nicht für eine maximale Belegung zu definieren. Dann kann bei den Regeln bei einem Ansteigen des Kohlendioxidgehalts die nächst höhere Lüftungsstufe gewählt

werden. Die Eingrenzung der Regelgröße kann auch deutlich über Wahl der Übergangsbereiche zwischen den einzelnen Zugehörigkeitsbereichen des Kohlendioxidgehalt erreicht werden.

Bei den Versuchen ist der Kohlendioxidssensor unter der Decke angebracht. Daher ergeben sich, je nach sich einstellender Raumluftrichtung, unterschiedliche Konzentrationen in der Aufenthaltszone. Möglich wäre auch ein Sensor auf Atemhöhe, um die Luftqualität dort direkt zu kontrollieren.

Auch die Raumlufthtemperatur kann mit einem Fuzzy - Regler in einem akzeptablen Bereich gehalten werden. Wenn die Heizung in den Regler mit integriert wird, sollten dafür aber eigenen Zugehörigkeitsbereiche der Raumlufthtemperatur definiert werden, um größere Schwankungen zu vermeiden. Die Heizung kann aber auch durch eine eigene Regelung, unabhängig vom Fuzzy - Regler, gesteuert werden. Solange der Regelbereich innerhalb eines Zugehörigkeitsbereichs der Raumlufthtemperatur des Fuzzy - Reglers liegt, gibt es keine Wechselwirkungen zwischen den Reglern.

Es ist jedoch, vor allem bei den Kippflügeln darauf zu achten, dass der Temperaturfühler der Heizung sich nicht direkt im Zuluftstrahl der Außenluft befindet. Dann beginnt die Heizung die Zuluft so stark zu erwärmen, dass die Zuluft sofort am Fenster aufsteigt, und es zu Kurzschlussströmungen an der Fassade kommt.

Die Regeln für Temperatur und Kohlendioxid können kombiniert oder einzeln abgearbeitet werden, da der Regler die Ergebnisse der einzelnen Regeln selbsttätig gewichtet. Eine Trennung der Regeln verringert deren Anzahl erheblich ohne nachteiligen Einfluss auf die Regelgüte.

Die Stellgröße wird bei der untersuchten Regelung als absolute Größe ausgegeben. Es wäre auch möglich alle Größen in ihrem Maß der Änderung eingehen zu lassen. Dann wäre das Zeitintervall zwischen den Abfragen in Abhängigkeit vom Zeitverhalten der Regestrecke (Raum) von entscheidender Bedeutung, um einen stabilen Regler zu erhalten. Aufgrund des bereits oben genannten unterschiedlichen Strömungsverhaltens im Raum bringt diese Möglichkeit aber erhebliche Schwierigkeiten mit sich.

5 Unterricht im Testgebäude mit realen Schülern

Im Rahmen des Projektes waren je eine Schulklasse im Juni und November 2009 im Testgebäude zu Gast. Die Schüler erhielten dort jeweils einen Vormittag normalen Unterricht und wurden anschließend kurz zu ihrer Zufriedenheit mit der automatisierten Fensterlüftung befragt. Im Sommer wurde es vor allem als störend empfunden, dass die Schüler in der Versuchseinrichtung nicht noch zusätzliche Fenster öffnen konnten. Obwohl die Messwerte der Luftqualität und der Raumlufthtemperatur in einem akzeptablen Bereich lagen, wurde die Raumlufthtemperatur als zu stickig empfunden. Die meisten Schüler hatten das einmalige Öffnen der Kippfenster zu Beginn des Unterrichts überhaupt nicht bemerkt. Eine Möglichkeit der Übersteuerung durch den Nutzer ist daher auf jeden Fall notwendig und wäre in einem realen Schulgebäude technisch auch machbar durch eine Kombination von automatisierten und manuell bedienbaren Elementen in der Fassade. Im Winter wurde das mehrmalige Nachstellen der Öffnungsweite durch die Regelung während des Unterrichts als störend empfunden. Das Ergebnis ist zwar nicht direkt auf reale Klassenräume über-

tragbar, da der Testraum extrem ungünstige akustische Eigenschaften besitzt, die Lautstärke der Motoren sollte bei einem Einsatz in Schulen aber trotzdem bedacht werden.



Bild 51:
Schüler des Gymnasiums Tegernsee bei einem Unterrichtstag im Testgebäude.

Drei Schüler wurden zudem durch die Möglichkeit einer Facharbeit zu den Versuchsabläufen in das Projekt eingebunden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorgaben für die Lüftung in Schulen sind sehr vielfältig. Neben Angaben zur Art der Lüftung und der Vorgabe für Fensteröffnungsflächen bei freier Lüftung, werden dort vor allem Richtwerte für den Kohlendioxidgehalt der Raumluft gegeben. Das Gas dient hierbei als Indikatorgas für die Verunreinigung der Raumluft mit Schad- und Geruchsstoffen. Die Angaben zu den Richtwerten für das Indikatorgas sind aber je nach Quelle unterschiedlich. In der vorliegenden Arbeit beziehen sich die Bewertungen der Luftqualität auf die Leitwerte, die im Leitfaden für die Innenraumluft-hygiene in Schulgebäuden [20] angegeben werden.

Zum Thema Luftqualität in Klassenräumen mit Fensterlüftung gibt es umfangreiche Untersuchungen sowohl in Deutschland als auch im europäischen Ausland. Die Messungen zeigen, dass die Richtwerte für Kohlendioxid in den meisten Fällen weit überschritten werden. Die höchsten Werte und die häufigsten Überschreitungen treten dabei im Winter auf. Bei Untersuchungen zum Nutzerverhalten bei manueller Fensterlüftung zeigte sich, dass Fenster meist nicht aufgrund der Luftqualität geöffnet oder geschlossen werden, da eine schlechte Luftqualität nur kurz nach Betreten eines Raumes wahrgenommen werden kann. Grund für das Öffnen und Schließen eines Fensters sind vor allem die vorherrschenden Temperaturen innen und außen. Daneben scheint auch die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchte in der Außenluft eine Rolle beim Lüftungsverhalten des Nutzer zu spielen. Außerdem öffnen und schließen die Nutzer vermehrt die Fenster, wenn sie einen Raum betreten oder verlassen. Unabhängig davon können Nutzer in 'Viellüfter' und 'Weniglüfter' eingeteilt werden.

In bestehenden Schulen werden die Fenster vor allem im Winter meist nur kurzzeitig in den Pausen geöffnet (Stoßlüftung). Die üblichen Kippweiten von Fenster sind viel zu groß, um die Fenster im Winter dauerhaft geöffnet zu lassen. Ein Stoßlüftung bei Stundenwechsel (alle 45 min) oder gar nur in den Pausen (alle 90 min) ist aber nicht ausreichend, um die erforderliche Luftqualität aufrecht zu erhalten. Dazu müsste spätestens alle 20 min gelüftet werden. Von manchen Lehrern wird es aber als störend empfunden, wenn sie neben den vielen anderen Dingen auch noch darauf achten müssen, dass immer wieder rechtzeitig gelüftet wird. Viel störender als die notwendige Unterrichtsunterbrechung ist bei sehr kalten Außentemperaturen der durch die Stoßlüftung verursachte starke Temperaturabfall im Raum. Eine Fassadenöffnungsmöglichkeit sollte daher eine feine Einstellung der freien Querschnittsfläche ermöglichen, damit im Winter nicht mehr als die benötigte Luftmenge ausgetauscht wird, und so eine unnötige Auskühlung des Raums verhindert wird. So kann die Öffnung geöffnet bleiben und es entsteht eine minimale Dauerlüftung.

Dabei müssen verschiedene Besonderheiten in Klassenräumen berücksichtigt werden. Zum einen reicht die Aufenthaltszone der Personen bis direkt an die Fassade. Dazu kommt, dass die Belegungsichte sehr hoch ist. Bei voller Belegung der Klassenzimmer führt das zu einem sehr hohen notwendigen Luftwechsel im Raum. Bei einer üblichen Belegungsichte muss mindestens ein Luftwechsel von $2,1 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden, um den Richtwert von 2000 ppm nicht zu überschreiten. Ein Luftwechsel von mindestens $5,5 \text{ h}^{-1}$ ist erforderlich, um den Richtwert 1000 ppm nicht zu überschreiten. Die hohe Belegungsichte in Klassenräumen bedingt aber auch sehr hohe interne Wärmelasten. So wird bei einem dreifachem Luftwechsel, das entspricht etwa einer Ausgleichkonzentration von 1500 ppm Kohlendioxid, und einer Wärmeabgabe von 90 W pro Person bereits ab 5°C Außentemperatur von einer Person mehr Wärme abgegeben als durch die Lüftung verloren geht. Bei Außentemperaturen über 20°C , wenn nur noch wenig Kühllast durch die freie Lüftung abgeführt werden kann, wird die entstehende Wärme vor allem in den Raumwänden gespeichert. Dazu ist eine schwere Bauweise am besten geeignet. Die tagsüber gespeicherte Wärme muss aber über Nachtlüftung wieder abgeführt werden können.

Die kritische Jahreszeit ist allerdings der Winter. Über die Fassadenöffnung muss der notwendige Luftwechsel bereitgestellt werden ohne die thermische Behaglichkeit der Raumnutzer, auch direkt neben dem Fenster, negativ zu beeinflussen. Zudem sollte der Luftwechsel auch nicht zu hoch sein, um unnötigen Heizenergieverbrauch zu verhindern. Bei großen Schwankungen der Umgebungsbedingungen ist es aber schwierig bei freier Lüftung einen konstanten Luftaustausch zu ermöglichen. Die Öffnungsweite müsste dazu ständig an die Witterungsbedingungen angepasst werden. Da die Windgeschwindigkeit und Windrichtung stärker schwanken als die Außentemperatur ist es sinnvoll, die Öffnungen an der Fassade so anzuordnen, dass der Luftaustausch möglichst unabhängig vom Wind ist.

Um geeignete Fassadenöffnungsmöglichkeiten für eine freie Lüftung zu finden, werden in einem Fassadenprüfstand auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Valley Freilandversuche durchgeführt. Für die Versuche werden Fassadenelemente mit für Schulen typischen Dreh-/Kippfenster und Schwingfenster eingesetzt. Diese werden auf ihre grundsätzliche Eignung im Schulbau und auch im Hinblick auf ihre Eignung für eine Automatisierung der Fensterlüftung untersucht.

Für Kippflügel in einer Reihe kann aufgrund der berechneten Mittelwerte der Zuglufttrate und des Luftwechsels gefolgert werden, dass die Fenster besser auf mittlerer Höhe oder oben zu öffnen sind, um Zugluftprobleme zu vermeiden. Die große Abhängigkeit des Luftwechsels von der

Windgeschwindigkeit, selbst bei den während der Untersuchungen herrschenden sehr niedrigen Außentemperaturen und einer maximalen Windgeschwindigkeit bis zu 4 m/s, lassen jedoch darauf schließen, dass Kippflügel in einer Reihe angeordnet nicht zur Automatisierung der Fenster geeignet sind. Kippflügel in zwei Reihen übereinander angeordnet sind grundsätzlich zur Automatisierung der Fensterlüftung geeignet, da eine ausreichende Einflussnahme auf das Raumklima möglich ist. Es sind hier aber immer doppelt so viele Fenster zu öffnen wie bei den Schwingflügeln, um getrennte Zu- und Abluftöffnungen, und damit einen stabilen Luftwechsel, zu erhalten. Zusätzlich muss ein besonderes Augenmerk auf die Position des Temperatursensors an der Heizung gelegt werden. Schwingflügel zeigen die beste Eignung für eine automatisierte Fensterlüftung. Es wäre aber besser die Zuluft Höhe etwas weiter nach oben zu legen, damit die Zugluft rate neben dem Fenster noch etwas verringert werden kann. Grundsätzlich sind mit diesem Öffnungstyp auch sehr große Öffnungsflächen für eine Lüftung im Sommer realisierbar.

Für die raumparameterabhängige Dauerlüftung während dem Unterricht ist eine Automatisierung der Fensteröffnungen sinnvoll. Zum einen können sich die Lehrer dann auf den Unterricht konzentrieren und müssen nicht noch zusätzlich eine ausreichende Lüftung im Raum sicherstellen. Zum anderen würde eine minimale Dauerlüftung über fein eingestellte Öffnungsweiten den Nutzer möglicherweise überfordern. Denn hier muss die Öffnungsweite je nach Witterungs- und Raumbedingungen angepasst werden, um eine optimale Lüftung zu gewährleisten.

Die Lüftung in Schulen erfolgt normalerweise während der Anwesenheit der Personen, um die Luftqualität auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Sie kann aber auch zur Nachtauskühlung im Sommer verwendet werden, um die Räume mit kalter Nachtluft zu durchspülen. In beiden Fällen ist eine Automatisierung der Fenster mit einer passenden Regelungs- oder Steuerungsstrategie sinnvoll. Automatisierungskonzepte zur Nachtlüftung sind relativ einfach umzusetzen, zumal hier keine Rücksicht auf anwesende Personen genommen werden muss. Sind Personen im Raum anwesend, sind die Anforderungen an eine Automatisierung, vor allem unter Winterbedingungen, wesentlich größer. In der Literatur lassen sich verschiedene Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung finden. Allerdings keine zur Nutzung bei kalten Außentemperaturen. Die Versuche beschränken sich damit auf Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung während der Anwesenheit von Personen im Klassenraum, vor allem bei kalten Temperaturen.

Zur Automatisierung einer Fensterlüftung sollte über eine Regelung für zwei Raumparameter (Luftqualität und Temperatur) erfolgen, da die Fensteröffnung auch beide Parameter beeinflusst. Zudem muss die Witterung als Störgröße mit einbezogen werden. Eine reine Steuerung der Öffnungsweite der Fenster nach Witterungsparametern ist nicht sinnvoll, da die Belegungsichte stark schwankend sein kann. Zur Automatisierung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Ein Zweipunktregler wäre die einfachste Lösung, auch wenn aus Behaglichkeitsgründen die maximale Öffnungsweite nach der Außentemperatur begrenzt werden müsste. Ein ständiges Öffnen und Schließen der Fenster ist aber aufgrund einer möglichen Geräuschbelästigung in einem Klassenraum nicht sinnvoll. Der Einsatz eines PI- oder PID - Reglers wäre möglich, die Einstellparameter müssten aber über den Jahresverlauf angepasst werden (unterschiedliche Luftmengen, unterschiedliche Raumluftströmung). Der Regler wäre aber vor allem aufgrund der z. T. großen Totzeiten in der Regelstrecke (Sensorposition und Raumluftströmung) schwierig einzustellen. Zudem wäre die Kombination aus beiden Regelparametern nur über eine Kaskade oder über Kennlinien möglich. Deswegen wird hier das System eines Fuzzy - Reglers verwendet, der in seinen Bestandteilen an die Situation eines Raums mit hoher Belegungsichte und niedrigen Außentemperaturen angepasst und getestet wird. Dieser Regler begünstigt die empirische Methodik

der Fensterlüftung und ist zudem eine effektive Nachbildung menschlichen Verhaltens. Dazu kommt, dass diese Art von Regler relativ aufwandsarm einzustellen und tendenziell robust arbeitet.

Sowohl der Kohlendioxidgehalt der Raumluft als die Raumtemperatur können mit dem Regler ausreichend kontrolliert werden. Bei den Kippfenstern ist Stellweitenänderung jedoch meist häufiger als bei den Schwingflügeln. Der Regler verhält sich in den untersuchten Bereichen stabil, und die Öffnungsweite der Fenster passt sich sehr schnell an ein Ansteigen bzw. Abfallen der Raumlast durch Personen an. Es zeigt sich eine große Schwankungsbreite des Kohlendioxidgehalts, die jedoch innerhalb der gesetzten Grenzen bleibt. Bei den Versuchen ist der Kohlendioxid-sensor unter der Decke angebracht. Daher ergeben sich, je nach sich einstellender Raumluftströmung, unterschiedliche Konzentrationen in der Aufenthaltszone. Möglich wäre auch ein Sensor auf Atemhöhe, um die Luftqualität dort direkt zu kontrollieren. Die Heizungsregelung kann in den Fuzzy - Regler mit integriert oder durch eine eigene Regelung abgedeckt werden. Es muss aber darauf geachtet werden, dass keine Wechselwirkungen zwischen den Reglern auftreten. Vor allem bei den Kippflügeln ist darauf zu achten, dass der Temperaturfühler der Heizung sich nicht direkt im Zuluftstrahl der Außenluft befindet. Dann beginnt die Heizung die Zuluft so stark zu erwärmen, dass die Zuluft sofort am Fenster aufsteigt, und es zu Kurzschlussströmungen an der Fassade kommt.

Die Stellgröße wird bei der untersuchten Regelung als absolute Größe ausgegeben. Es wäre auch möglich alle Größen in ihrem Maß der Änderung eingehen zu lassen. Dann wäre das Zeitintervall zwischen den Abfragen in Abhängigkeit vom Zeitverhalten der Regestrecke (Raum) von entscheidender Bedeutung, um einen stabilen Regler zu erhalten. Aufgrund des bereits oben genannten unterschiedlichen Strömungsverhaltens im Raum bringt diese Möglichkeit aber erhebliche Schwierigkeiten mit sich.

Bei Versuchen im Testgebäude mit realen Schülern zeigt sich eine grundsätzliche Zufriedenheit mit der automatisierten Fensterlüftung. Eine Möglichkeit der Übersteuerung durch den Nutzer ist aber auf jeden Fall notwendig und wäre in einem realen Schulgebäude technisch einfach umzusetzen. Im Winter wurde das mehrmalige Nachstellen der Öffnungsweite durch die Regelung während des Unterrichts als störend empfunden. Das Ergebnis ist zwar nicht direkt auf reale Klassenräume übertragbar, da der Testraum extrem ungünstige akustische Eigenschaften besitzt, die Lautstärke der Motoren sollte bei einem Einsatz in Schulen aber trotzdem bedacht werden.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Aufbauend auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens soll in Abstimmung mit einer Kommune eine ausgewählte Schule mit Sanierungsbedarf der Fenster untersucht werden. Der Erfolg der umgesetzten Sanierungsmaßnahmen ist mittels Messungen und erneuter Nutzerbefragungen zu überprüfen und zu bewerten.

Das Prinzip des verwendeten Reglers hat auch Potential zur Anwendung bei anderen Nutzungen und der Kombination verschiedener Raumklimaparameter. Gerade bei großen Gebäuden mit installierter Gebäudeleittechnik besteht durch die Anwendung des Reglerprinzips ein großes Potential an Energieeinsparung.

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Gerade auf dem Gebiet der Behaglichkeit wird dabei aber zudem den Wissenschaftsstandort Deutschland gestärkt, da maßgebliche Impulse bisher oft aus dem Ausland kamen. Auf dem Gebiet der Behaglichkeit bei freier Lüftung könnte Deutschland sogar die Vorreiter-Rolle übernehmen. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Gebrauchsmuster entwickelt und bereits angemeldet.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Allard, F.: Natural Ventilation in Buildings - A Design Handbook. James & James (Science Publishers) Ltd., London 1998.
- [2] ASR 5 (1979):Arbeitsstättenrichtlinie - Raumtemperatur. Bundesarbeitsblatt 10/1979, S. 103; Bundesarbeitsblatt 12/1984, S. 85. (ASR A3.6 als Ersatz in Bearbeitung).
- [3] ASR A 3.5 (2010): Technische Regeln für Arbeitsstätten - Raumtemperatur. Gemeinsame Ministerialblatt Nr. 35 vom 23. Juni 2010, S. 751.
- [4] DIN 1946 - 2 (1994): Raumluftechnik – Gesundheitliche Anforderungen. Ersetzt durch die DIN EN 13779 (2007): Lüftung von Nichtwohngebäuden; Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme.
- [5] DIN EN 15251 (2007): Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [6] DIN EN ISO 7730 (2005): 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.
- [7] Dounis, A.I., Design of a Fuzzy Set Environment Comfort System, Energy and Buildings 22 (1995), 81-87.
- [8] Dounis, A.I., Indoor Air-Quality Control by a Fuzzy-Reasoning Machine in Naturally Ventilated Buildings, Applied Energy 54 (1996), 11-28.
- [9] Eipper, T.; Hildebrand, V.; Rösler, M.; Seifert, J.; Li, Y.: Interaction between natural ventilation and flow around a multi-storey building. Proceedings of Roomvent 2007; Nr. 1177.
- [10] Fox, A.; Harley, W.; Feigley, C.; Salzberg, D.; Sebastian, A.; Larsson, L.: Increased levels of bacterial markers a CO2 in occupied school room. J. Environmental Monitoring 5 (2003); S. 246-252.
- [11] Haldi, F; Robinson, D.: Interactions with window openings by office occupants. Building and Environment 44 (2009), S. 2378 - 2395.
- [12] Hall, M.: Untersuchungen zu thermisch induzierten Luftwechsell bei Kippfenstern. Bauphysik 26 (2004); Heft 3; S. 109-115.
- [13] Hausladen, G; Oppermann, J: Einfluss von Planungs-, Ausführungs- und Bedienungsfehlern bei Heizungs- und Lüftungsanlagen auf den Energieverbrauch von Niedrigenergie-Gebäuden. Abschlussbericht zum Projekt. Gefördert von Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Kennzeichen 0327257A – Solaroptimiertes Bauen, Teilkonzept 2. Universität Kassel, 2003
- [14] Heiselberg, P.; Svidt, K.; Nielsen, P.: Characteristics of airflow from open windows. Building and Environment 36 (2001); S. 859-869.

- [15] Hellwig, R.T.; Antretter, F.; Holm, A.; Sedlbauer, K.: Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen. Bauphysik 31 (2009), Heft 2, 89-98.
- [16] Hellwig, R.T.; Kersken, M.; Schmidt, S.; Ausstattung von Klassenräumen mit Einrichtungen zum Temperieren, Lüften und Belichten in Schulen im Landkreis Miesbach. Bauphysik 31 (2009), Heft 3, 157-162
- [17] Herkel, S., Knapp, U., Pfafferott, J.: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. Building and Environment Vol. 43 (2008), pp. 588–600.
- [18] Hothorn, T., Hornik, K., Zeileis, A.: Unbiased recursive partitioning: A conditional inference framework. Journal of Computational and Graphical Statistics, Vol. 15 (2006), No.3, pp. 651–674.
- [19] [http://www.nlga.niedersachsen.de/Schwerpunktthemen/Lufthygiene in Schulen.htm](http://www.nlga.niedersachsen.de/Schwerpunktthemen/Lufthygiene%20in%20Schulen.htm)
- [20] Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes: Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden. Umweltbundesamt, Berlin, August 2008.
- [21] Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes: Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Raumluft. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 51 (2008); S.1358 - 1369.
- [22] Larsen, T.; Heiselberg, P.: Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. Energy and Buildings 40 (2008), S. 1031 - 1040.
- [23] Lüftung und lufthygienische Aspekte in Schulen. Offizielles Mitteilungsblatt der Landesuntersuchungsanstalt für das Gesundheits- und Veterinärwesen des Freistaates Sachsen Nr. 3 / 2006; S. 28 bis 38; www.lua.sachsen.de
- [24] Lüftungsempfehlungen für Arbeitsräume (Büro- und Unterrichtsräume). Merkblatt des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes vom August 2004; www.nlga.niedersachsen.de.
- [25] Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.
- [26] Marjanovic, L., Eftekhari, M., Design and Simulation of a Fuzzy Controller for Naturally Ventilated Buildings, Building Services Engineering Research and Technology 25 (2004), 33-53.
- [27] Nicol, F.: Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. Proceedings of 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro/Brazil, 13–15 August 2001.
- [28] Nordquist, B.: Vädring i skolor – ett komplement till normal ventilation? Rapport TABK 98/1014, Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, Lunds tekniska högskola, Lund 1998.
- [29] Pettenkofer, Max von: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta'sche Buchhandlung, München 1858.

- [30] Raja, I. A., Nicol, J. F., McCartney, K. J., Humphreys, M. A.: Thermal comfort: Use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings* Vol. 33 (2001), pp. 235–244.
- [31] Reiß, J; Erhorn, H; Ohl, J: Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei Fensterlüftung. *HLH* (2001), 8, pp 22-66.
- [32] Steiger, S.; Wellisch, U.; Hellwig, R.T. (2010): Untersuchung der Eignung verschiedener Fassaden für automatisierte Fensterlüftung in Schulen mit einem Entscheidungsbaumverfahren. *Bauphysik* 32, Heft 4, S. 253-262.
- [33] Technische Regeln für Gefahrstoffe Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS 900. Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Ausgabe 2006.
- [34] VDI 2078 (1996): Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln). Verein Deutscher Ingenieure e. V.; Düsseldorf.
- [35] VDI 4300 Blatt 7 (2001). Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Verein Deutscher Ingenieure e. V.; Düsseldorf.
- [36] VDI 4706 Blatt 1 (2009) Entwurf: Kriterien für das Innenraumklima. Verein Deutscher Ingenieure e. V.; Düsseldorf.
- [37] VDI 6038 (2010) Entwurf: Raumluftechnik - Raumlufqualität - Beurteilung der Raumlufqualität. Verein Deutscher Ingenieure e. V.; Düsseldorf.
- [38] VDI 6040 Blatt 1 (2010) Entwurf: Raumluftechnik - Schulen - Anforderungen. Verein Deutscher Ingenieure e. V.; Düsseldorf.
- [39] Wanner, H. U.: Belastung der Raumluf durch den Menschen (Kohlendioxid, Gerüche). In: Aurand, K.; Seifert, B.; Wenger, J. (Hrsg.): *Luftqualität in Innenräumen*. Gustav Fischer Verlag Stuttgart – New York 1982; S.11-16.
- [40] Wildeboer, J.; Fitzner, K.; Müller, D.: Einsatzgrenzen der freien Lüftung – Teil 1. *HLH* Bd.57 (2006); Nr. 6; S. 59-65.
- [41] Wildeboer, J.; Fitzner, K.; Müller, D.: Einsatzgrenzen der freien Lüftung – Teil 2. *HLH* Bd.57 (2006); Nr. 7; S. 50-55.
- [42] Zeidler, O.: Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden. *Fortschritt-Bericht*, Reihe 19, Nr. 134 VDI Verlag - Düsseldorf, 2001.
- [43] Zeidler, O.; Finke, U.; Fitzner, K.: Fensterlüftung in Bürogebäuden. *DBZ* Nr. 10/2004; S. 698-670.
- [44] Zentralstelle für Normungsfragen und Wirtschaftlichkeit im Bildungswesen (ZNWB): *Arbeitshilfen im Schulbau*. Berlin, Juli 2008.

Anhang

A.1 Versuchseinrichtung

A.1.1 Gebäude

Der Fassadenprüfstand für die im Bericht dargestellten Messungen befindet sich auf dem Gelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Valley. Das Gebäude (Bild A.1) besteht aus zwei südorientierten Klassenzimmern und einem Technikgang im Norden. Die beiden Klassenzimmer besitzen eine Pfosten-Riegel-Fassade aus grau eloxiertem Aluminium, in die je Raum fünf Fenster mit unterschiedlichen Öffnungstypen eingesetzt werden können.



Bild A.1:
Südansicht des Versuchsgebäudes mit Kipp- und Drehkipppflügeln.

Die opaken Fassadenelemente bestehen aus grau eloxierten Vakuum-Dämmpaneelen. Die Verglasung ist eine Dreischeiben-Verglasung mit Argonfüllung. Der Dämmstandard des Gebäudes entspricht dem eines Neubaus (Tabelle A1). Die Innenwände bestehen aus doppelt mit Gipskarton beplankten Metallständerwänden.

Tabelle A.1
Übersicht über den Dämmstandard des Versuchsgebäudes.

	U-Wert [W/m ² K]	g-Wert [%]
Verglasung	0,7	51
Vakuum-Dämmpaneel	0,4	-
Pfosten-Riegel Fassade gesamt	0,82	-
Außenwand	0,21	-
Dach	0,24	-
Boden	0,39	-

Die Räume haben eine Höhe (3,20 m) und Tiefe (7,20 m) ähnlich einem realem Klassenraum, nur die Länge des Raums (6 m) ist etwas gekürzt. Entsprechend der üblichen Belegungsdichte in Schulen, ist in den Versuchsräumen Platz für 24 Personen oder Personenlastsimulatoren (Bild A.2 und Bild A.3). Beide Räume können zusätzlich über je fünf elektrisch betriebene Rippenradiatoren mit einer maximalen Heizleistung von je 2000 W beheizt werden. Eine mechanische Kühlung ist in den Räumen, wie auch in den meisten realen Schulen, nicht vorgesehen. Der Luftwechsel in den Räumen bei einem Druckunterschied von 50 Pa beträgt $n_{50} = 1,12$ bzw. $1,13 \text{ h}^{-1}$.

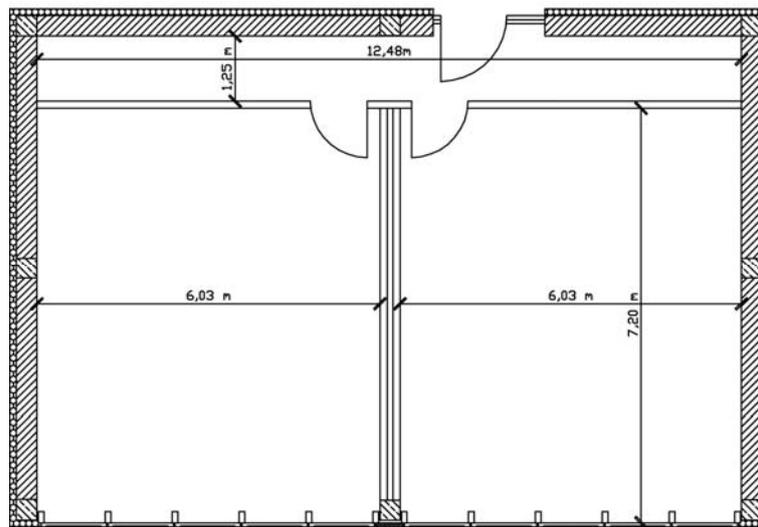


Bild A.2:
Grundriss des Versuchsgebäudes.



Bild A.3:
Klassenraumansicht von innen mit Personenlastsimulatoren.

A.1.2 Personenlastsimulatoren

Um die internen Lasten eines Klassenzimmers nachzubilden, werden Personenlastsimulatoren verwendet. Diese geben Wärme und Kohlendioxid ähnlich einer realen Person ab (Bild A.4). Das abgegebene Kohlendioxid wird dabei als Tracer gas für die Luftwechselberechnungen verwendet.



Bild A.4:
Vergleich der Wärmeabgabe eines Personenlastsimulators mit einer Person.

Nach VDI 2078 [34] beträgt die sensible Wärmeabgabe einer Person ohne körperliche Arbeit zwischen 70 W bei 26°C und 100 W bei 18°C Raumlufttemperatur. Für die Versuche wurde eine konstante Wärmeleistung von 75 W für die Dummies gewählt, das entspricht der sensiblen Wärmeabgabe eines Menschen bei 23 bis 24°C. Damit wird die Wärmeabgabe im Winter etwas unterschätzt und im Sommer überschätzt, und fällt so jeweils in den kritischeren Bereich der Betrachtungen.

Die Angaben über die Kohlendioxidabgabe von Menschen in der Literatur sind sehr unterschiedlich, für Kinder fehlen sie meist ganz. Die Abgabemenge hängt aber in jedem Fall vom Aktivitäts-

grad der Person ab. Die Kohlendioxidabgabe wird nach VDI 4300 Blatt 7 [35] pro Personenlastsimulator mit 20 l/h festgelegt. Das Kohlendioxid wird durch die Simulatoren auf Atemtemperatur aufgeheizt, besitzt dann aber immer noch eine großer Dichte als Atemluft. Durch den starken Auftrieb der Raumluft an den Simulatoren, wird das Kohlendioxid aber mit nach oben getragen und vermischt sich so mit der Raumluft.

A.1.3 Messtechnik

In den Messräumen wird die Lufttemperatur an allen Messachsen in 3 Höhen (0,1, 0,6 und 1,1m), in der Reihe C auch in den Höhen 1,7 und 3,2m sowie vor den Fenstern zusätzlich in 3,2 m Höhe erfasst. Zu den Lufttemperaturen wird die Oberflächentemperaturen an allen 6 Umschließungsflächen und die Luftgeschwindigkeit in Reihe C vor dem Fenster in 3 Höhen gemessen. Der Kohlendioxidgehalt der Raumluft wird in der Reihe vier je auf Atemhöhe und unter der Decke gemessen (Bild A.5). Vor der Fassade (A1) befindet sich eine kleine Wetterstation zusätzlich zur allgemeinen Wetterstation am Gelände.

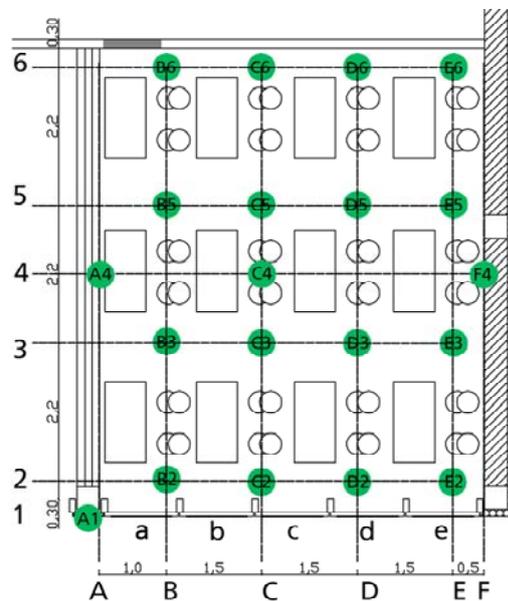


Bild A.5:
Anordnung der Messachsen in den Versuchsräumen.

Die nachfolgenden Tabellen A.2 bis A.4 geben einen Überblick über die für diese Arbeit relevanten Messgrößen und Sensorspezifikationen an den jeweiligen Messstationen.

Tabelle A.2:
Übersicht über die Messeinrichtungen im Klassenraum Messgröße.

	Sensortyp	Einheit	Messbereich	Genauigkeit
Oberflächentemperatur	PT100	°C	-30 / +80	± 0,1 °C
Raumtemperatur (Messpunkt)	PT100	°C	-30 / +80	± 0,1 °C
CO ₂ -Konzentration (Messpunkte)	Nicht-dispersive Infrarot-Spektrometrie (NDIR)	ppm	0 bis 5000	± 50 ppm
CO ₂ -Konzentration (Kalibrierung)	Photoakustische Spektroskopie (PAS)	ppm	0 bis 10.000	± 1,5 ppm
Strömungsgeschwindigkeit	Thermisches Anemometer	m/s	0,01 bis 1,00	± 1,5%

Tabelle A.3:
Übersicht über die Messeinrichtungen am Schulhaus Messgröße.

	Sensortyp	Einheit	Messbereich	Genauigkeit
Lufttemperatur außen	PT100	°C	-30 / +80	± 0,1 °C
CO ₂ -Konzentration außen	Photoakustische Spektroskopie (PAS)	ppm	0 bis 10.000	± 1,5 ppm
Solarstrahlung senkrecht zur Fassade	Pyranometer mit Thermoelementen	W/m ²	0 bis 2000	± 5%
Windrichtung (Einrichtung ab März 2009)	Ultraschall - Anemometer 2D	°	0 bis 360	± 1°
Windgeschwindigkeit (Einrichtung ab März 2009)	Ultraschall - Anemometer 2D	m/s	0,01 bis 75,00	± 0,1 m/s, ab 5 m/s ± 2 %

Tabelle A.4:
Übersicht über die Messeinrichtungen an der Wetterstation Messgröße.

	Sensortyp	Einheit	Messbereich	Genauigkeit
Lufttemperatur außen	PT100	°C	-30 / +80	± 0,1
Solarstrahlung senkrecht zur Erdoberfläche	Pyranometer mit Thermoelementen	W/m ²	0 bis 2000	± 5%
Windrichtung	Ultraschall - Anemometer 2D	°	0 bis 360	± 1°
Windgeschwindigkeit	Ultraschall - Anemometer 2D D	m/s	0,01 bis 75,00	± 0,1 m/s, ab 5 m/s ± 2 %

A.1.4 Abmessungen der Öffnungsvarianten

Die Abmessungen der in Kapitel 3.4 vorgestellten Öffnungsgeometrien sind in den Tabellen A.5 bis A.8 zusammengefasst. Dabei wird die Methode von Hall [12] verwendet, die auch die Überschneidung von Rahmen und Flügel, bzw. mögliche Fensterlaibungen mit einbezieht (Bild A.6).

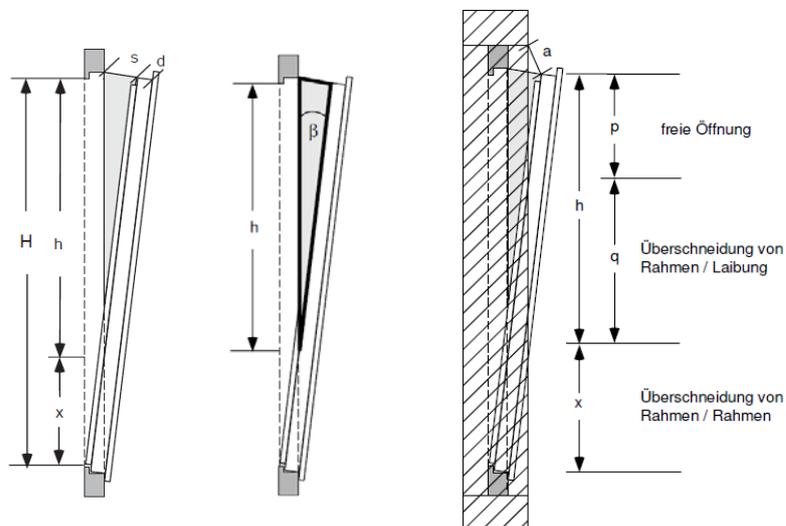


Bild A.6: Maße für das Bestimmen der Öffnungsfläche von Kippflügeln aus der Arbeit von Hall [12].

Tabelle A.5: Abmessungen der verschiedenen Fensterflügel.

Art	Breite [cm]	H [cm]	d [cm]
Kleine Kippflügel	106	45	8
Große Kippflügel	106	119	8
Schwingflügel	86	166	7

Tabelle A.6: Übersicht der untersuchten Öffnungsweiten für kleine Kippflügel.

Öffnungsweite [%]	β [°]	s [cm]	h [cm]	x [cm]	q [cm]	p [cm]	A [cm ²]
50	9	-1	0	45	0	0	640
100	21	8	21	24	12	12	1953

Tabelle A.7: Übersicht der untersuchten Öffnungsweiten für große Kippflügel.

Öffnungsweite [%]	β [°]	s [cm]	h [cm]	x [cm]	q [cm]	p [cm]	A [cm ²]
50	4	0	0	119	0	0	721
100	8	9	55	64	33	31	3125
Drehstellung	90	-	-	-	-	-	12614

Tabelle A.8:
Übersicht der untersuchten lichten Öffnungsweiten für Schwingflügel.

Öffnungsweite [%]	β [°]	s [cm]	h [cm]	x [cm]	q [cm]	p [cm]	A [cm ²]
7	1,1	-7,5	0	81	0	0	670
15	3,7	-4	0	81	0	0	695
30	8,1	2	28	53	28	0	1660
54	14,0	10	48	33	21	32	5570
90	23,5		58	23	5	53	9909