

Untersuchung der Eignung verschiedener Fassaden für automatisierte Fensterlüftung in Schulen mit einem Entscheidungsbaumverfahren

von

M. Eng. Simone Steiger ^{*1}
Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Wellisch ^{*2}
Prof. Dr.-Ing. Runa T. Hellwig ^{*3}

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer)
Postfach 80 04 69 - 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 - 70569 Stuttgart

^{*1} Institutsteil Holzkirchen

Postfach 11 52 - 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 - 83626 Valley

^{*2} Hochschule Rosenheim

Fakultät für Angewandte Natur- und Geisteswissenschaften
Hochschulstraße 1 - 83024 Rosenheim

^{*3} Hochschule Augsburg

Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Fachgebiet Energie, Effizienz, Design und Bauklimatik
PF 11 06 05 - 86031 Augsburg

Untersuchung der Eignung verschiedener Fassaden für automatisierte Fensterlüftung in Schulen mit einem Entscheidungsbaumverfahren

Sollen Klassenräume über Fenster belüftet werden, kann dies über Stoßlüftung oder genau dosierte Dauerlüftung erfolgen. Messungen verschiedener Institutionen zeigen, dass die erforderliche regelmäßige Stoßlüftung in Schulen nicht praktiziert wird. Damit eine Dauerlüftung aber funktionieren kann, muss ermittelt werden, welcher Fenstertyp bei welcher Öffnungsweite bei behaglichen thermischen Verhältnissen im Raum den notwendigen Luftwechsel gewährleistet. Deshalb wurden an einem Freilandversuchsstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik Schwingflügel und Kippflügel auf ihre Eignung zur Dauerlüftung in Klassenräumen untersucht.

Da sich bei den vielen Einflussfaktoren auf die freie Lüftung die deskriptive Analyse oft als sehr schwierig erweist, wird ein besonderes statistisches Verfahren, ein Entscheidungsbaumverfahren verwendet, das sowohl hinsichtlich der Auswahl der Einflussgrößen und der Modellüberanpassung sehr günstige statistisch-methodische Eigenschaften besitzt. Mit diesem Verfahren können Einflussgrößen mit unterschiedlichen Skalenniveaus adäquat in die Auswertung einbezogen werden. Dabei erhält man ein intuitiv interpretierbares Regelwerk, welches dem Anwender einen erklärenden Einblick in die Zusammenhangsstruktur des untersuchten Prozesses liefert.

Investigation of different façade systems regarding to their applicability for automated window ventilation in schools with a decision tree method. *In classrooms, where ventilation is managed with windows two kinds of strategies can be used: short-term ventilation or exactly regulated continuous ventilation. Results of measurements of different institutions show that the necessary regular short-term airing in schools is not adhered to. For functional continuous ventilation in classrooms it is necessary to know, which type of window assures the required air change within comfortable thermal conditions and which opening width is necessary. In order to get this information the performance of pivoting windows and bottom-hung windows is investigated at an outdoor test facility at the Fraunhofer Institute for Building Physics. Because of the difficulties in descriptive analysis of natural ventilation with its various influencing factors a specific statistical method, a decision tree method, is used. This method has pretty positive characteristics regarding the choice of influencing factors and the overfitting of the statistical model. With this method there can be implied influencing factors with different scale levels in an adequate way. The result of this method is an interpretable system of rules, which delivers an illustrative insight into the context pattern of the investigated process.*

1 Einführung

Sollen Klassenräume über Fenster belüftet werden, kann dies über Stoßlüftung oder über genau dosierte Dauerlüftung erfolgen. Die Dauerlüftung bietet dabei den Vorteil, dass die Fenster nicht alle 20 Minuten komplett geöffnet werden müssen, was bei sehr niedrigen Außentemperaturen während der Öffnungszeit zu hoher Unbehaglichkeit im Raum führen kann. Außerdem zeigen Messungen verschiedener Institutionen, dass die erforderliche regelmäßige Stoßlüftung in Schulen nicht in ausreichendem Maße praktiziert wird. Damit eine Dauerlüftung aber funktionieren kann, muss zuerst ermittelt werden, welcher Fenstertyp bei welcher Öffnungsweite den notwendigen Luftwechsel und trotzdem behagliche Raumbedingungen gewährleistet. Es ist von Vorteil, wenn ein Fenstertyp oder eine Öffnungskombination möglichst stabile Luftwechsel gewährleistet.

Deshalb werden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes zur automatisierten Fensterlüftung in Schulen grundlegende Messungen zur einseitigen Fensterlüftung an einer Freilandversuchseinrichtung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (Fraunhofer IBP) durchgeführt. Untersucht wird die Eignung verschiedener Öffnungsvarianten für die Automatisierung von Fensterlüftung in Klassenräumen.

Besondere Bedeutung kommt dabei den für Klassenräume spezifischen Randbedingungen zu. Das sind zum einen die hohe Belegungsdichte mit dem dadurch erforderlichen hohen Außenluftvolumenstrom, und zum anderen die bis an die Fassade reichende Aufenthaltszone im Raum. Aufgrund des hohen Außenluftvolumenstroms wird keine Stoßlüftung, sondern Dauerlüftung über genau definierte Öffnungsweiten der Fenster untersucht. Die ideale Öffnungsweite ermöglicht den notwendigen Luftaustausch im Raum, ohne dabei Unbehaglichkeit bei den Raumnutzern zu verursachen. Daneben wird auch die Abhängigkeit des Luftwechsels und der thermischen Behaglichkeit von den Witterungsbedingungen, vor allem im Winter, untersucht.

Die deskriptive Auswertung der Messdaten zeigt aber nur in wenigen Teilbereichen verwertbare Ergebnisse. Das liegt zum einen daran, dass die Messergebnisse bei Freilandversuchen von den gegebenen Witterungsbedingun-

gen abhängig sind, und deswegen nicht alle Versuche unter identischen Witterungsbedingungen durchgeführt werden können, zum anderen daran, dass es mehrere Witterungsfaktoren sind, die die freie Fensterlüftung beeinflussen. So kann nur in seltenen Fällen eine eindeutige Abhängigkeit von nur einem Witterungsparameter, z. B. der Außentemperatur oder der Windgeschwindigkeit, dargestellt werden. Zusätzlich ist bei einer statistischen Auswertung der Daten neben den vielen möglichen Einflussfaktoren die Mischung von nominalen und metrischen Variablen zu beachten.

Bei den normalerweise verwendeten statistischen Modellen zur Berechnung des Luftwechsels bei freier Lüftung werden grundsätzlich zwei verschiedene Herangehensweisen verwendet. Bei der ersten wird nur ein Witterungseinfluss (Temperaturdifferenz oder Windgeschwindigkeit) untersucht. Dabei werden Daten verwendet, die bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten oder Temperaturdifferenzen entstanden, um den jeweils anderen Parameter über eine einfache Regression beschreiben zu können [1]. Da es aber für eine gute Anwendbarkeit des Modells notwendig ist beide Parameter gleichzeitig zu betrachten, werden beim zweiten Ansatz beide Einflüsse über eine Addition zusammengefügt [2, 3]. Die Windrichtung bleibt dabei unberücksichtigt oder wird über die Berücksichtigung von Druckbeiwerten an der Fassade eingerechnet. Ein anderer Ansatz berücksichtigt die Windrichtung über eine Aufteilung der Modelle nach der Windrichtung [4]. Dann ergeben sich für die Anpassungsfaktoren von Temperaturdifferenz und Wind verschiedene Werte je nach Windrichtung. Dabei wird in diesen Untersuchungen gleichzeitig darauf hingewiesen, dass sich die Effekte nicht einfach additiv überlagern [1, 2, 3]. Die Effekte heben sich sogar teilweise auf, was sich dann in negativen Anpassungsfaktoren wiederfinden lässt. Zur Beurteilung des Einflusspotentials eines Faktors steht dann lediglich die Größe eines Anpassungsfaktors im Modell zur Verfügung.

Da es aber bei den vorliegenden Untersuchungen das Hauptziel ist, den Einfluss aller Witterungsbedingungen auf den Luftwechsel und zusätzlich auch auf die Behaglichkeit im Raum zu untersuchen, wird hier eine andere Art der Herangehensweise versucht. Zur statistischen Auswertung der Daten wird ein Entscheidungsbaumverfahren verwendet. Dieses spezielle Entscheidungsbaumverfahren besitzt hinsichtlich der Auswahl der Einflussgrößen und der Modellüberanpassung sehr günstige statistisch-methodische Eigenschaften. Mit dem Verfahren können Einflussgrößen mit unterschiedlichen Skalenniveaus adäquat in die Auswertung einbezogen werden. Dabei erhält man ein intuitiv interpretierbares Regelwerk, welches dem Anwender einen erklärenden Einblick in die Zusammenhangsstruktur des untersuchten Prozesses liefert. Aufgrund des resultierenden Regelwerks können dann die Einflussgrößen, z. B. in ihrem Einflusspotential auf die Zielgröße, bewertet werden.

Mit der Auswertung wird die Abhängigkeit des Luftwechsels, der Raumlufttemperatur und der Zugluft rate von den Einflussgrößen Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung untersucht. Zusätzlich wird ein möglicher Einfluss der Heizung untersucht. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Automatisierung der Fensterlüftung unter Winterbedingungen. Im Folgenden

werden der Versuchsaufbau, das verwendete statistische Auswerteverfahren sowie die wichtigsten Ergebnisse erläutert.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau

Die Messungen finden in einer Freilandversuchseinrichtung des Fraunhofer IBP statt, an der unterschiedliche Fassadensysteme unter natürlichen Witterungsbedingungen untersucht werden können. Der Versuchsstand besteht aus zwei identischen Räumen, mit einer Raumhöhe von 3,20 m und einer Raumtiefe von 7,20 m. In den Räumen befinden sich je 24 Personenlastsimulatoren, die Wärme (75 W/Pers. sensible Wärme) und Kohlendioxid (20 l/(h Pers.)) abgeben. Das emittierte Kohlendioxid wird dabei auch als Tracer gas für die Luftwechselberechnungen verwendet. Die Fassadenlänge von 6 m je Raum ist aufgeteilt in fünf Fensterachsen mit Kippflügeln in zwei verschiedenen Größen bzw. mit Schwingflügeln. Die Bilder 1 und 2 zeigen die Versuchsräume von außen und innen. In den Versuchsräumen werden Kohlendioxid, Lufttemperatur, Oberflächentemperatur und neben der Fassade auch die Strömungsgeschwindigkeit an mehreren Stellen gemessen.



Bild 1. Außenansicht der Freilandversuchseinrichtung am Fraunhofer IBP Holzkirchen

Fig. 1. Exterior view on the outdoor test facility at Fraunhofer IBP Holzkirchen



Bild 2. Innenansicht der Freilandversuchseinrichtung am Fraunhofer IBP Holzkirchen

Fig. 2. Interior view on the outdoor test facility at Fraunhofer IBP Holzkirchen

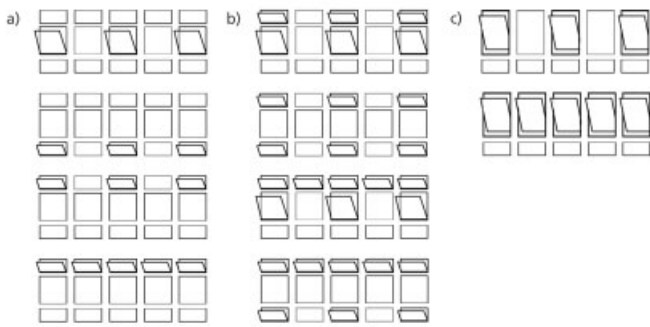


Bild 3. Untersuchte Öffnungsvarianten: a) Kippflügel in einer Reihe; b) Kippflügel in zwei Reihen, Öffnungsweite große Kippflügel: 50 und 100 % bzw. 7° und 13° Öffnungswinkel, Öffnungsweite kleine Kippflügel: 100 % bzw. 32° Öffnungswinkel; c) Schwingflügel, Öffnungsweite: 7, 15 und 30 % der maximalen Öffnungsweite bzw. 6° bis 12° Öffnungswinkel

Fig. 3. Investigated variations of opening: a) bottom-hung windows in one row; b) bottom-hung windows in two rows, opening width of high bottom-hung windows: 50 % and 100 % and accordingly 7° and 13° opening angle, opening width of small bottom-hung windows: 100 % and accordingly 32° opening angle; c) pivoting windows, opening width: 7 %, 15% and 30 % of the maximum opening width and accordingly 6° to 12° opening angle

2.2 Untersuchte Varianten

Untersucht werden Schwingfenster und Kipfenster, da diese Fensterarten in Schulräumen sehr häufig vorzufinden sind [5]. Zusätzlich zur Öffnungsweite wird die Anzahl der geöffneten Fenster variiert. Die Versuche sind dabei 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. 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 3 dargestellt.

2.3 Bewertungskriterien und Witterungsbedingungen

Als Zielgrößen werden drei wichtige Raumklimaparameter, der Luftwechsel, die mittlere Raumlufttemperatur auf 60 cm Höhe für sitzende Personen und die Zugluft rate direkt neben dem Fenster, betrachtet. Letztere ist in Klassenräumen besonders wichtig, da hier die Aufenthaltszone bis an die Fassade reicht und die Wahrscheinlichkeit für Zugluft direkt neben den geöffneten Fenstern am größten ist. Nach dem Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden [6] 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. Nach DIN EN 15251 [7] werden eine Raumtemperatur zwischen 20 und 24 °C in der Heizperiode und nach DIN EN ISO 7730 [8] eine Zugluft rate von maximal 20 bis 30 % als akzeptabel eingestuft. Da die Oberflächentemperaturen während

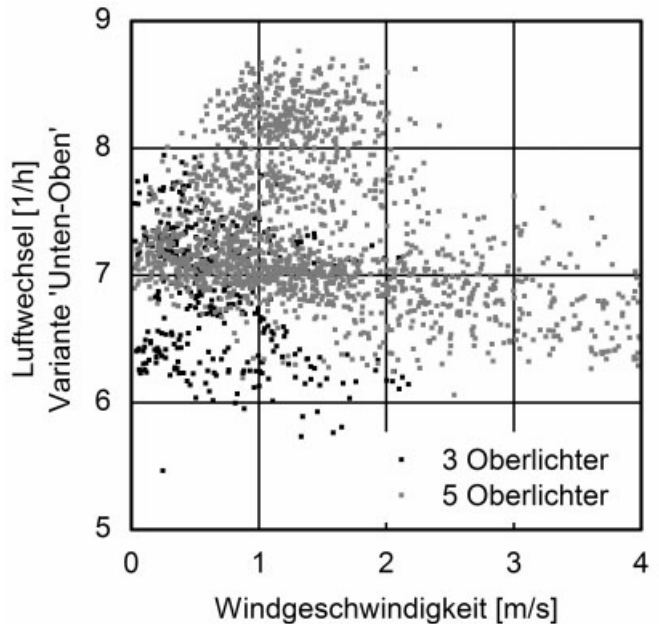


Bild 4. Beispiel für eine bivariate Darstellung im Streudiagramm, das keine Zusammenhänge erkennen lässt: Variante „Unten – Oben“ mit drei (schwarz) und fünf (grau) geöffneten Oberlichtern

Fig. 4. Example for a bivariate description using a scatter plot, which shows no correlation: opening combination “bottom-top” with three (black) and five (grey) opened windows

der Untersuchungen nur wenig von der Raumlufttemperatur abweichende Werte aufweisen, wird in der Arbeit statt der Raumtemperatur die Raumlufttemperatur verwendet.

Die kritischen Raumklimazustände stellen sich vor allem im Winter ein. Deshalb beschränken sich die hier vorgestellten Auswertungen auf Außentemperaturen von -6 bis +4 °C, Windgeschwindigkeiten bis 4 m/s und eine Globalstrahlung bis 100 W/m².

2.4 Statistische Modellbildung

Eine rein deskriptive Auswertung der Messdaten zeigt nur in wenigen Teilbereichen klar interpretierbare Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen und den möglichen Einflussgrößen. Bivariate deskriptive bzw. explorative Darstellungen, wie beispielsweise in Bild 4, sind bei vorliegenden multivariaten Einflüssen offensichtlich nicht allein für eine aufschlussreiche Zusammenhangsanalyse geeignet.

Um einen erklärenden Einblick in die Zusammenhängestruktur des betrachteten Mechanismus zu erhalten, wird deshalb eine statistische Modellbildung durchgeführt. In der Modellbildung kommen induktive, statistische Verfahren zur Anwendung, die statistisch signifikante Aussagen über die Wichtigkeit und Wirkungsweise der Einflussgrößen liefern.

Die statistische Modellbildung erfolgt für die univariaten, metrischen Zielgrößen (Responsevariablen) Luftvolumenstrom, Raumlufttemperatur und Zugluft rate. Als mögliche Einflussgrößen (Kovariablen) werden die Fenster-Variante (Öffnungsweite sowie Lage und Anzahl der geöffneten Fenster), Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung untersucht. Zudem wird ein möglicher Einfluss der Heizung untersucht. Unter den Kovaria-

blen befinden sich sowohl Variablen mit metrischem als auch Variablen mit nominalem Skalenniveau. Ein statistisches Modell, das eine Zielgröße auf mehrere Kovariablen zurückführt, ist in der angewandten Datenanalyse ein Werkzeug mit zwei Hauptfunktionalitäten. Zum einen erlaubt das berechnete Modell bei gegebenen Kovariablenwerten eine Prognose der Werte für die Zielgröße, zum anderen erhält der Anwender einen erklärenden Einblick in den Zusammenhang von Zielgröße und Kovariablen.

Die in der Datenanalyse bekannten Regressionsverfahren besitzen unterschiedliche Schwerpunkte hinsichtlich dieser beiden Hauptfunktionalitäten. Entscheidungsbaumverfahren bilden eine Modellklasse, deren großer Vorteil ein resultierendes Regelwerk ist, das leicht interpretierbar, grafisch darstellbar und damit kommunizierbar den Zusammenhang von Zielgröße und Kovariablen modelliert. Mit Hilfe der Endknoten können Entscheidungsbäume auch für Prognosezwecke verwendet werden.

Beginnend mit der Arbeit von *Morgan* und *Sonquist* [9] wurden bis heute viele verschiedene Entscheidungsbaum-Algorithmus vorgeschlagen. Klassische und in der angewandten Datenanalyse gut bekannte Entscheidungsbaumverfahren sind in verschiedenen Veröffentlichungen [10, 11, 12] beschrieben. Alle Entscheidungsbaumverfahren beinhalten in ihren Algorithmen zwei grundlegende Schritte, die kombiniert oder voneinander getrennt, rekursiv ausgeführt werden:

1. Auswahl einer Kovariablen nach einem vorgegebenen Entscheidungsmaß, das die Erklärung der Zielgröße durch die Kovariable bewertet.
2. Aufteilung (Split) des Datensatzes mit Hilfe der ausgewählten Kovariablen, durch die eine optimale (bzgl. der mit einem bestimmten Bewertungsmaß gemessene) Erklärung der Zielgröße durch die ausgewählte Kovariable geliefert wird.

Die verschiedenen Entscheidungsbaumverfahren unterscheiden sich bzgl. ihrer Anwendbarkeit auf die vorliegenden Skalenniveaus der Responsevariable und Kovariablen. Ein methodisch grundlegender Unterschied bei den verschiedenen Entscheidungsbaumverfahren ist, ob bei den Algorithmen eine statistische Fundierung der Variablenauswahl und der Splitbildung im Hinblick auf die bekannte, statistische Signifikanztheorie implementiert ist (wie z. B. innerhalb von CHAID [10]) oder ob, wie bei den so genannten deskriptiven Algorithmen (z. B. CART [11] und C4.5 [12]) eine andere Variablenauswahl und Splitbildung erfolgt. Weiter verbinden manche Algorithmen diese beiden Schritte, andere Verfahren trennen sie strikt.

Hothorn et al. [13] erläutern, dass die fehlende statistische Fundierung und die Kombination von Variablenauswahl und Splitbildung innerhalb eines Algorithmus Ursachen für die in der Anwendung von Entscheidungsbaumverfahren bekannten Probleme der Modellüberanpassung (Overfitting) und der Verzerrung in der Variablenauswahl sind. Während bei deskriptiven Algorithmen der Modellüberanpassung durch systematisches Eingrenzen der Regeln (Pruning-Verfahren) entgegengewirkt werden kann, bleibt die Problematik der Verzerrung in der Variablenauswahl bei deskriptiven Verfahren bestehen.

In der vorliegenden Modellbildung wird ein Algorithmus nach *Hothorn et al.* [13] verwendet. Der Algorithmus

verwendet Signifikanztests, deren Theorie bei *Strasser* und *Weber* [14] beschrieben wird. Dieses Verfahren erzeugt binäre Splits und erlaubt eine unverzerrte Variablenselektion von Kovariablen mit unterschiedlichen Skalenniveaus. Der 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.

Die Aufteilung in zwei Teilmengen erfolgt für metrische Kovariablen (z. B. Windgeschwindigkeit) durch Festlegung eines Split-Wertes innerhalb des Wertebereichs der Kovariablen. Dadurch werden zwei Werte-Intervalle gebildet. Für nominale Kovariablen (z. B. Öffnungsvariante) findet eine Auswahl von zwei Teilmengen aus allen, aus den Ausprägungen der Variablen bildbaren, Teilmengen statt.

In der vorliegenden Untersuchung wird ein Signifikanzniveau von 0,05 verwendet und die Baumtiefe auf den Wert 3 begrenzt. Zur Anpassung des vorliegenden multiplen Testproblems beim Testen der globalen Hypothese wird eine einfache Bonferroni-Anpassung der p-Werte verwendet, und für die Teststatistiken wird eine Transformation vom Typ einer quadratischen Form mit asymptotischer χ^2 -Verteilung angewandt. Als so genannte „influence function“ wird aufgrund der vorliegenden, jeweils metrischen Zielgrößen die identische Abbildung gesetzt. Zur Einschätzung der Stabilität der berechneten Modelle werden die Modellentwicklungen vergleichend auf zwei getrennten, zufällig ausgewählten Entwicklungsdatensätzen durchgeführt.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Auswertungsergebnisse für die unterschiedlichen Öffnungsvarianten in Bezug auf die drei Raumklimaparameter mittlere Raumlufttemperatur, Luftwechsel und Zugluftrate betrachtet. Zum einen wird eine deskriptive Auswertung durch 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. Die statistische Modellbil-

dung wird durch die graphische Darstellung des Regelwerks der Entscheidungsbäume angegeben. Die Blätter am Ende der einzelnen Entscheidungsbäume enthalten den Mittelwert der Zielgröße dieses Astes (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 (Ta), Windgeschwindigkeit (WG), Windrichtung (WR) und Heizung (Hzg) sowie die Öffnungsvariante (Variante) und die Anzahl der geöffneten Fenster (Anzahl).

Kippflügel in einer Reihe

Bei der Auswertung zeigen sich bei der Gruppe Kippflügel (Bilder 5, 6 und 7) in einer Reihe die größten Schwierigkeiten bei der deskriptiven Auswertung. Aus den Darstellungen der Raumparameter mit Box-Whisker-Plots kann aufgrund der großen Schwankungsbreiten und der geringen Abstände der Mediane der Öffnungsvarianten (Vari-

anten) zueinander weder eine Aussage darüber getroffen werden, welche Variante für eine Automatisierung geeignet ist, noch kann eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Varianten erfolgen. Bei der Untersuchung des Luftwechsels (Bild 6) können zumindest zwei Varianten ausgeschlossen werden, da der ermöglichte Luftwechsel zu niedrig ist. Die Ergebnisse für die Zugluftrate und vor allem für die Raumlufttemperatur (Bild 5) weisen eine so große Überschneidung der Wertebereiche der einzelnen Varianten auf, dass eine differenziertere Auswertung notwendig wird.

Die zugehörigen Ergebnisse aus dem Entscheidungsbaumverfahren zeigen, dass der wichtigste Einflussparameter sowohl auf den Luftwechsel, als auch auf die Raumlufttemperatur, die Windgeschwindigkeit ist (Bilder 5 und 6). Wie zu erwarten, sinkt dabei die Raumlufttemperatur mit steigender Windgeschwindigkeit, wogegen der Luftwechsel ansteigt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten über etwa 2 m/s hat die Variante offensichtlich überhaupt keinen

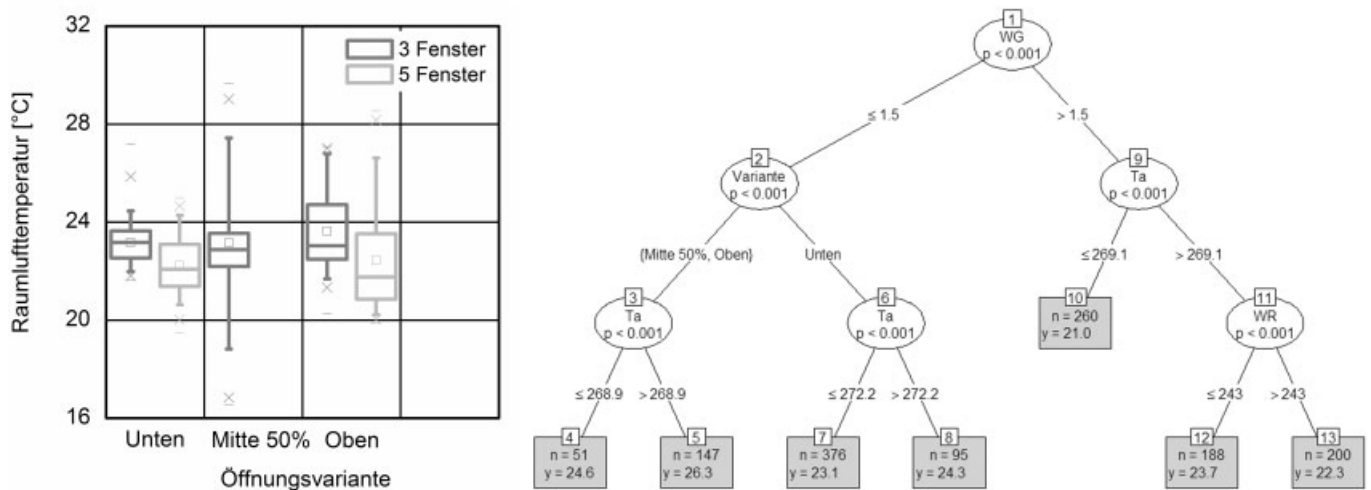


Bild 5. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Raumlufttemperatur bei der Öffnung von einer Reihe Kippflügel

Fig. 5. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable indoor air temperature with bottom-hung windows opened in one row

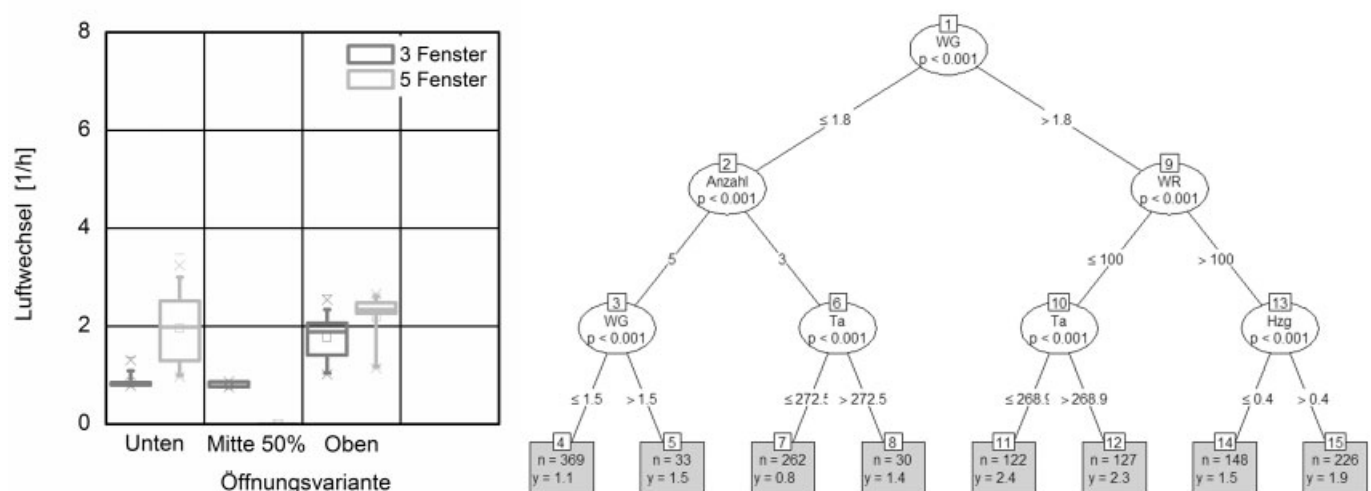


Bild 6. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Luftwechsel bei der Öffnung von einer Reihe Kippflügel

Fig. 6. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable air change rate with bottom-hung windows opened in one row

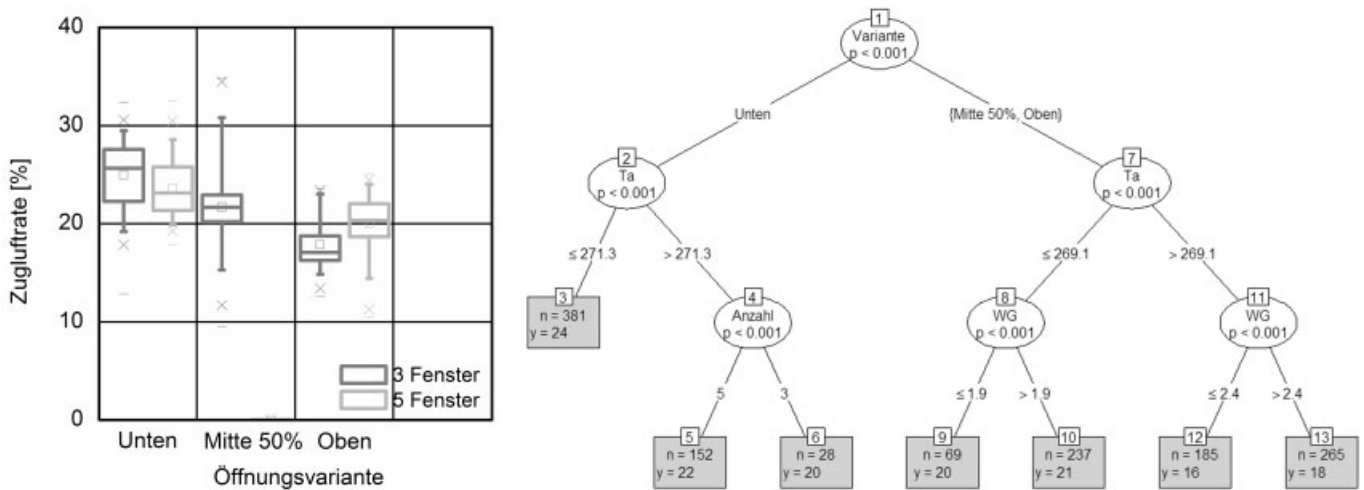


Bild 7. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Zugluftrate bei der Öffnung von einer Reihe Kippflügel.
 Fig. 7. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable draft rate with bottom-hung windows opened in one row

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 Zulufthöhe der Varianten.

Die Auswertung zeigt für die Zugluftrate (Bild 7) 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 5 Prozentpunkte.

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.

Kippflügel in zwei Reihen

Bei der Auswertung der Gruppe Kippflügel in zwei Reihen (Bilder 8, 9 und 10) zeigt sich die deskriptive Auswertung 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. Aus den Darstellungen der Box-Whisker-Plots kann allerdings abgelesen werden, dass die Öffnungsvariante „Unten – Oben“ aufgrund der hohen Werte für die Zugluftrate (Bild 10) und der niedrigen Werte für die Raumlufttemperatur (Bild 8) auf keinen Fall für den untersuchten Fall niedriger Außentemperaturen geeignet ist. Auch bei der Variante „Mitte – Oben“ mit fünf Fenstern sinkt die Raumlufttemperatur zu stark ab. Ein Vergleich der Box-Whisker-Plots in den Bildern 8 bis 10 zeigt, dass Varianten mit höherem Luftwechsel, eine niedrigere Raumlufttemperatur und eine höhere Zugluftrate besitzen. Die dazugehörigen Ergebnisse aus dem Entscheidungsbaumverfahren zeigen für alle untersuchten Zielgrößen als wichtigste Einflussgröße die Variante, auch wenn bei der Zugluftrate nicht alle Varianten bereits in den oberen zwei Ebenen unterschieden werden. 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. Bei der Auswertung der Zugluftrate gibt es keine Aufteilung der Datenmenge nach der Anzahl der geöffneten Fenster. Bei der Raumlufttemperatur und vor allem dem Luftwechsel (Bild 9) hingegen schon. Als nächste Einflussgrößen erscheinen die Außentemperatur und die Windgeschwindigkeit.

Schwingflügel

Anders als bei den Kippflügeln kann bei den Schwingflügeln (Bilder 11, 12 und 13) aus den Darstellungen der Box-Whisker-Plots der Einfluss verschiedener Größen schon besser abgeleitet werden. Vor allem für die Zielgröße Luftwechsel (Bild 12) könnte eigentlich auf eine weitere Auswertung mit dem Entscheidungsbaum verzichtet werden.

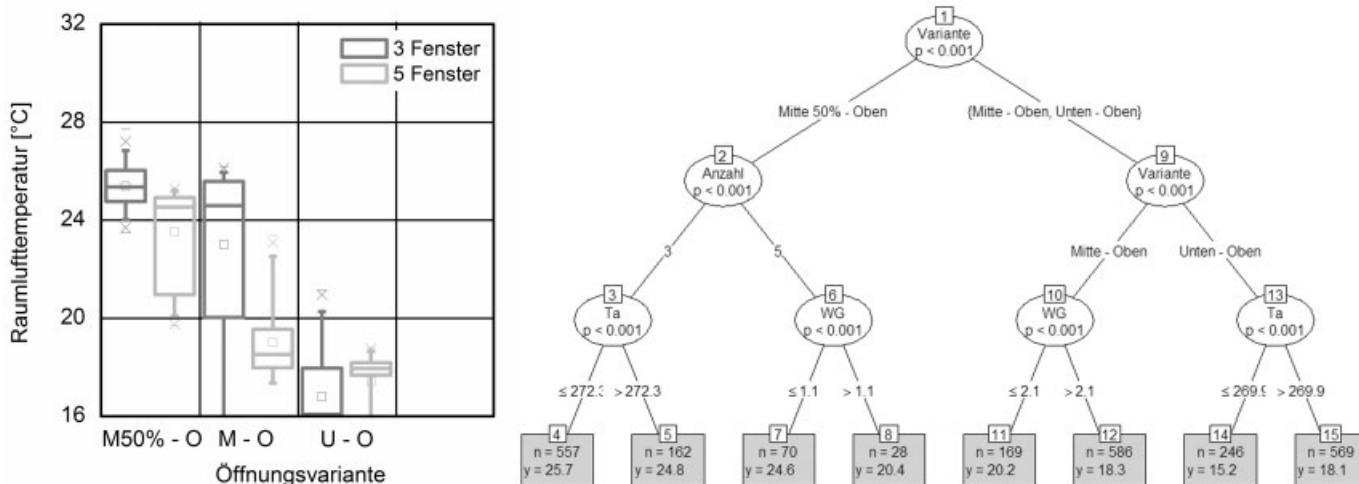


Bild 8. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Raumlufttemperatur bei der Öffnung von zwei Reihen Kippflügel
 Fig. 8. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable indoor air temperature with bottom-hung windows opened in two rows

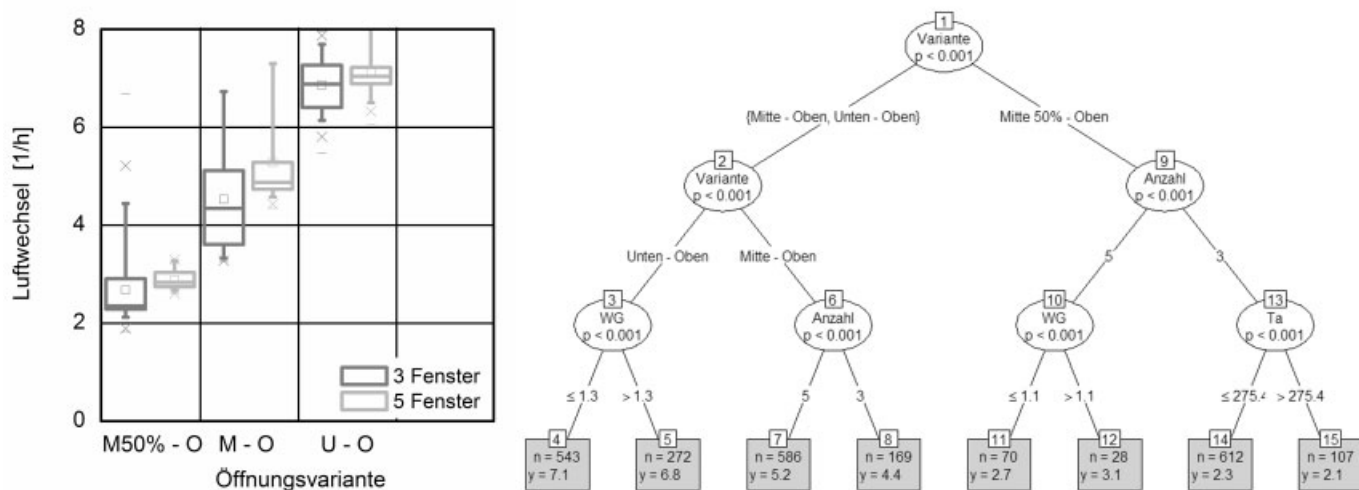


Bild 9. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Luftwechsel bei der Öffnung von zwei Reihen Kippflügel
 Fig. 9. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable air change rate with bottom-hung windows opened in two rows

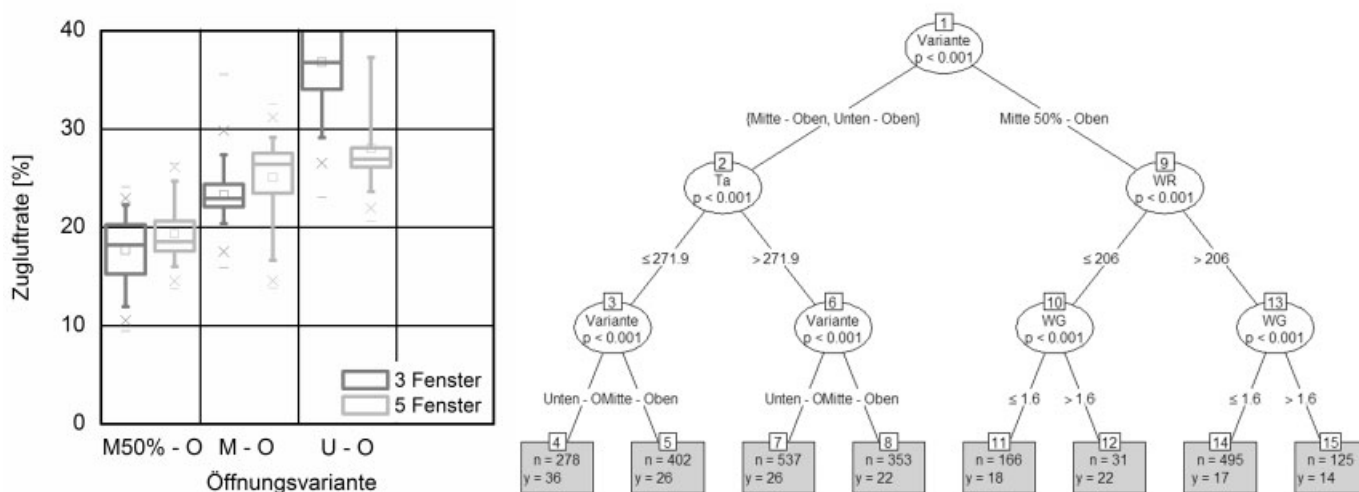


Bild 10. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Zugluft rate bei der Öffnung von zwei Reihen Kippflügel
 Fig. 10. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable draft rate with bottom-hung windows opened in two rows

Der Schwankungsbereich der 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 im Entscheidungsbaum hauptsächlich nach den Varianten und der Anzahl der geöffneten Fenster unterschieden wird. Für die Zugluftrate (Bild 13) verhält es sich ähnlich, wobei hier bei den kleinen Öffnungsweiten die Anzahl der Fenster wichtiger zu sein scheint, als die tatsächliche Öffnungsweite. Allgemein liegt die Zugluftrate zwar noch im akzeptablen Bereich, ist aber bei keiner der Varianten als gut einzustufen.

Ein etwas erstaunliches Ergebnis zeigt jedoch die Auswertung zur Raumlufttemperatur (Bild 11) 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 eher für fünf geöffnete Fenster vermutet werden.

Allgemein ist nach den Varianten die Außentemperatur die entscheidende Einflussgröße. Bei einer separaten

Auswertung der notwendigen Heizleistungen der Varianten zeigt sich, dass die notwendige Heizleistung ab 30 % Öffnungsweite sprunghaft ansteigt. Die hohe Raumlufttemperatur bei drei Fenstern mit 7 % Öffnungsweite liegt nicht an einer zu hohen Heizleistung, die tatsächlich minimal ist, sondern am geringen Luftwechsel.

4 Diskussion

Für Kippflügel in einer Reihe kann aufgrund der berechneten Mittelwerte der Zugluftrate und des Luftwechsels gefolgert werden, dass die Fenster besser auf mittlerer Höhe oder oben zu öffnen sind, um Zugprobleme 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

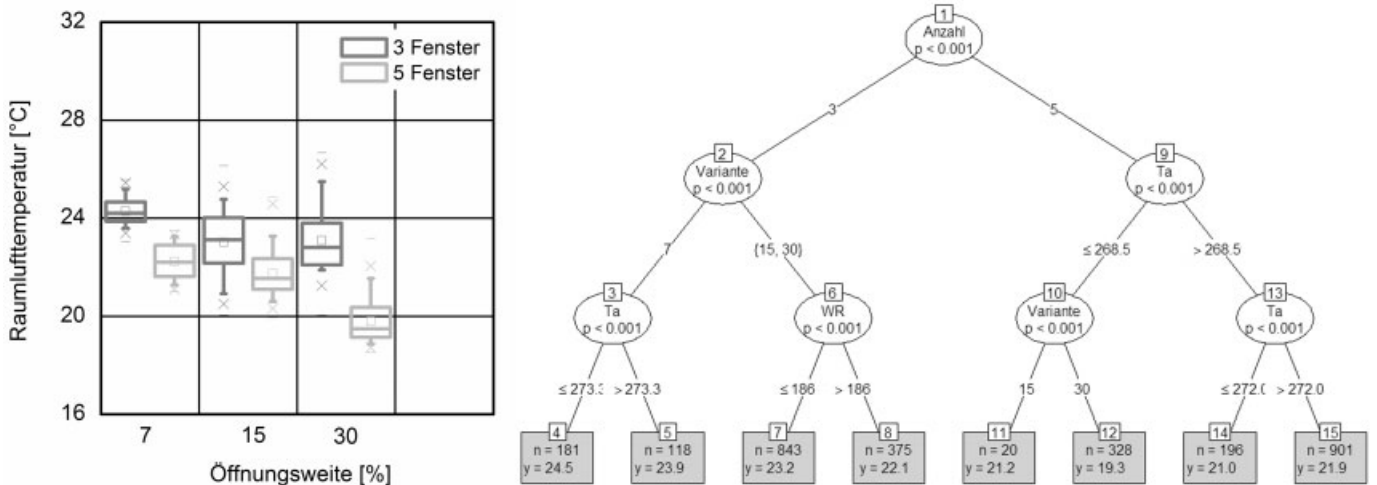


Bild 11. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Raumlufttemperatur bei der Öffnung von Schwingflügeln
 Fig. 11. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable indoor air temperature with pivoting windows

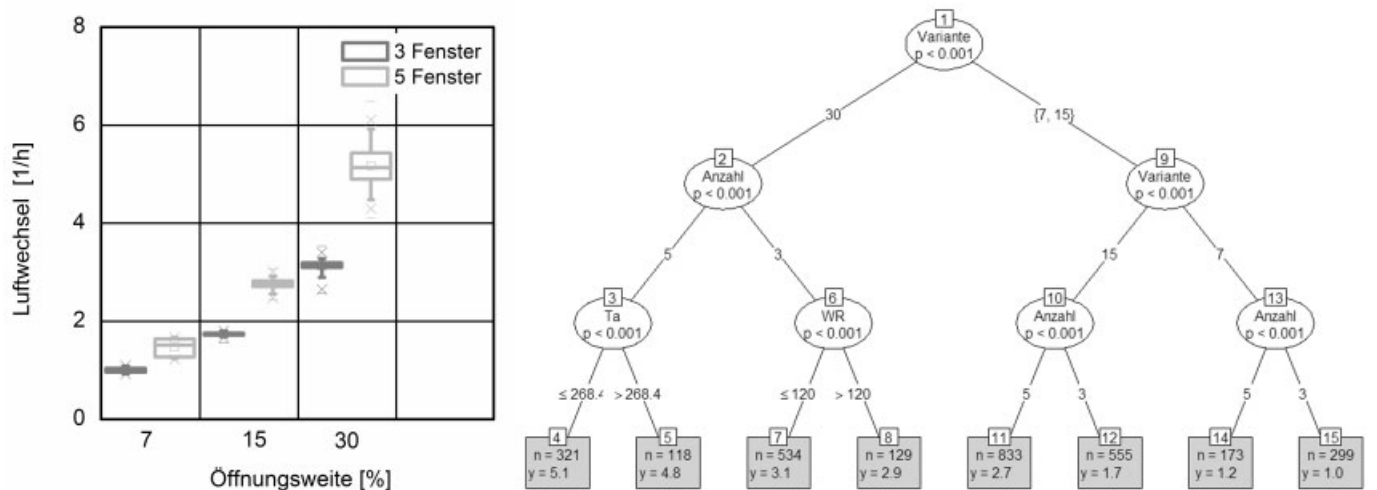


Bild 12. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Luftwechsel bei der Öffnung von Schwingflügeln
 Fig. 12. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable air change rate with pivoting windows

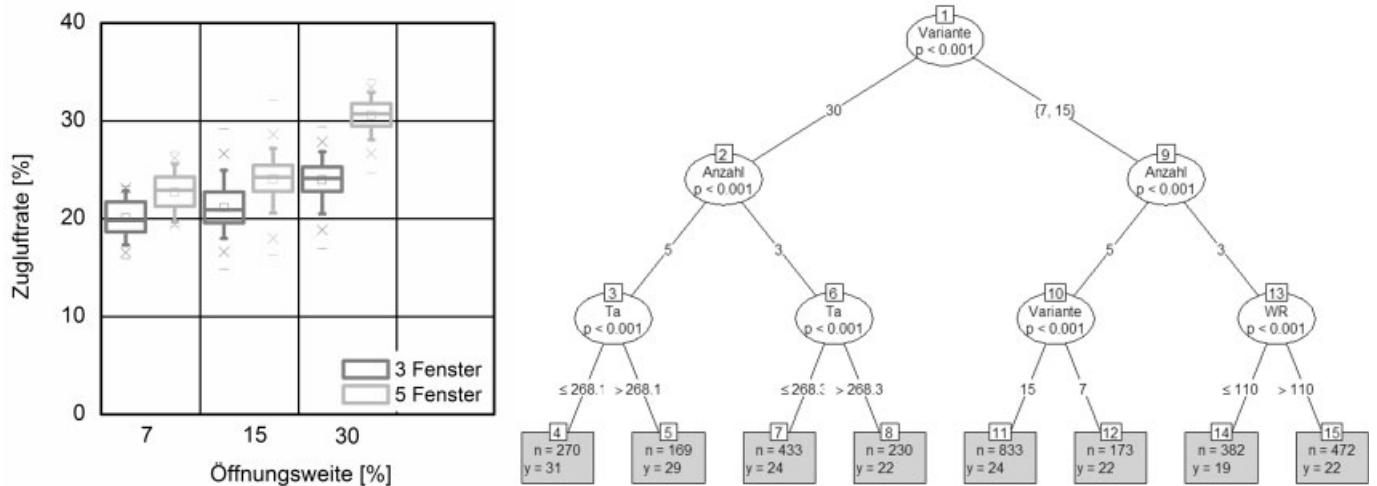


Bild 13. Box-Whisker-Plot und Entscheidungsbaum für die Zielgröße Zugluft rate bei der Öffnung von Schwingflügeln
Fig. 13. Box-Whisker plot and decision tree for the response variable draft rate with pivoting windows

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 Reihe 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. Die hohen Raumlufttemperaturen, die hier bei der Variante mit geeignetem Luftvolumenstrom („Mitte 50 % – Oben“) auftreten, können leicht umgangen werden, wenn die Heizleistung gesenkt wird. Tatsächlich muss aber 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 befunden 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.

Allgemein zeigen die Schwingflügel 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 Zugluft rate 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 Zugluft rate 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.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die statistische Modellbildung führt mittels des verwendeten Entscheidungsbaumverfahrens zu einem sehr guten Einblick in die Zusammenhangsstruktur der betrachteten Prozesse. Die statistische Fundierung des speziellen Algorithmus und die, für Entscheidungsbaumverfahren typische, gute Interpretierbarkeit des resultierenden Regelwerks zeigen sich als passende Kombination für die Analysen. Gegenüber rein deskriptiven und explorativen Analyseverfahren zeigt die induktive Modellbildung einen wirklichen Mehrwert der Untersuchung. Erst sie ermöglicht eine verwertbare Zusammenhangsanalyse.

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 Zugluft rates 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.

Bei einer Automatisierung der Schwing- und Kippflügel wird die Öffnungsweite entsprechend den Witterungsbedingungen genau passend eingestellt. In der Realität sind die Klassenräume je nach Unterrichtsstunde mit einer sehr unterschiedlichen Schülerzahl belegt. Eine reine Steuerung der Öffnungsweite in Abhängigkeit von der Witterung ist daher nicht ohne Einschränkungen möglich, da die oben genannten Ergebnisse nur für eine Maximalbelegung gelten. Deswegen werden bei den anschließenden Versuchen zusätzlich die Luftqualität und die Raumlufttemperatur als

Regelparameter für die automatisierte Fensterlüftung verwendet.

In der vorliegenden Modellbildung steht die klare Interpretierbarkeit der Zusammenhangsstruktur im Vordergrund. Für weitere Arbeiten, in denen eventuell die Prognosefähigkeit des Modells optimiert werden soll, könnten zusätzlich noch auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Analysen, hinsichtlich der Prognosegüte verfeinerte Regressionsmodelle (z. B. Generalisierte Lineare Modelle oder auch Generalisierte Additive Modelle) entwickelt werden.

Zu den Untersuchungen ist eine zweite Veröffentlichung mit dem Schwerpunkt Entwicklung eines Regelungskonzeptes in Vorbereitung.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Heizenergieeinsparung, thermische Behaglichkeit und gute Luftqualität in Schulgebäuden durch hybride Lüftungstechnik“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Aktenzeichen 0327387A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Verwendete Software

Der Algorithmus und eine grafische Ausgabe des berechneten Regelwerks sind in dem Zusatzpaket *party* [13] der Software R [15] implementiert. Sowohl bei R, als auch dem Zusatzpaket handelt es sich um Open Source Software, die über <http://CRAN.R-project.org/> frei erhältlich ist. CRAN (Comprehensive R Archive Network) ist ein weltweites Servernetz, in dem R-Quellcode und Binärdateien bereitgestellt werden. Die Software R ist eine Programmierumgebung und eine Programmiersprache für statistische Datenanalyse und zur Grafikerzeugung, die unter der GNU GENERAL PUBLIC LICENSE entwickelt wird. Eine internationale Arbeitsgruppe (R Development Core Team) koordiniert die Weiterentwicklung des R-Systems.

Literatur

- [1] Daler, R., Hirsch, E., Haberd, F., Knöbel, U., Krüger, W.: Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau. BMFT-Forschungsbericht T 84-028, 1984.
- [2] Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.
- [3] Schmidt, D., Hauser, G.: Messtechnische und theoretische Untersuchungen zum Luftaustausch in Gebäuden. DFG-Forschungsbericht HA 1896/11-1, 1997.

- [4] Larsen, T.: Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference. Dissertation, Aalborg University/ Denmark, 2006.
- [5] Hellwig, R. T., Kersken, M., Schmidt, S.: Ausstattung von Klassenräumen mit Einrichtungen zum Temperieren, Lüften und Belichten. *Bauphysik* 31 (2009), H. 3, S. 157–162.
- [6] Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (Hrsg.): Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Berlin, 2008.
- [7] DIN EN 15251:2007-08 Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [8] DIN EN ISO 7730:2006-05 Ergonomie der thermischen Umgebung. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Berlin: Beuth-Verlag, 2006.
- [9] Morgan, J. N., Sonquist, J. A.: Problems in the analysis of survey data, and a proposal. *Journal of the American Statistical Association* Vol. 58 (1963), pp. 415–434.
- [10] Kaas, G.: An Exploratory Technique for Investigating Large Quantities of Categorical Data. *Applied Statistics* Vol. 29 (1980), No. 2, pp. 119–127.
- [11] Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., Stone, C. J.: Classification and Regression Trees. Wadsworth, California/ U.S.A., 1984.
- [12] Quinlan, R.: C4.5: Programs for Machine Learning. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Mateo, California/ U.S.A., 1993.
- [13] 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.
- [14] Strasser, H., Weber, C.: On the Asymptotic Theory of Permutation Statistics. *Mathematical Methods of Statistics* (1999), No. 8, pp. 220–250.
- [15] R Development Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation of for Statistical Computing, Vienna/ Austria, 2009.

Autoren dieses Beitrages:

M. Eng. Simone Steiger, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley
 Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Wellisch, Hochschule Rosenheim, Fakultät für Angewandte Natur- und Geisteswissenschaften, Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim
 Prof. Dr.-Ing. Runa Tabea Hellwig, Hochschule Augsburg, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Fachgebiet Energie Effizienz Design und Bauklimatik, PF 110605, 86031 Augsburg und Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen