



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

Schlussbericht 2023

Schwerkraftlüftung – Monitoring Mehrfamilienhaus Eidgenossenweg



© M. Hall 2021



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Diese Studie wird im Auftrag vom BFE und dem AHB Stadt Zürich erstellt.

Datum: 22.05.2023/06.12.2024

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Gebäude und Städte
CH-3003 Bern

Amt für Hochbauten Zürich
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik
Franz Sprecher
Lindenhofstrasse 21
CH-8021 Zürich

BFE-Bereichsleitung:

Andreas Eckmanns,
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Nadège Vetterli,
nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502281-01

Auftragnehmer/in:

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau INEB
Hofackerstrasse 30
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/ineb

Autor/in:

Monika Hall, monika.hall@fhnw.ch

Mitarbeit

Vincent Gerber
Asim Kumalic
Achim Geissler

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Aufgrund sehr guter Erfahrungen einer Baugenossenschaft mit einer Schwerkraftlüftung (Schachtlüftung) zur Entfeuchtung von innenliegenden Bädern in bestehenden Mehrfamilienhäusern werden die an derselben Stelle erbauten Ersatzneubauten ebenfalls mit einer Schwerkraftlüftung ausgerüstet. Ziel dieses Projekt ist es, mit einem Monitoring die Möglichkeiten und Grenzen der Schwerkraftlüftung für die Entfeuchtung von innenliegenden Bädern an einem der Ersatzneubauten aufzuzeigen.

Bei dem Ersatzneubau ist die manuelle Fensterlüftung die Hauptlüftung der Wohnungen. Zur Belüftung der innenliegenden Bäder wird auf bedarfsgesteuerte Abluftventilatoren verzichtet und stattdessen die Schwerkraftlüftung vom Typ «Kölner Lüftung» umgesetzt. Hierbei verfügt jedes innenliegende Bad über ein eigenes Zu- und Abluftrohr, so dass keine Verbindung zu Nachbarwohnungen besteht. Da die Badbelüftung bei geschlossener Badtür über das Zu- und Abluftrohr erfolgen soll, verfügt die Badtür über kein Lüftungsgitter oder zusätzlichen Luftspalt.

Die Auswertung erfolgt über elf Monate, um das Verhalten bzw. die Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung in allen Jahreszeiten zu erfassen. Untersucht werden acht innenliegende Bäder, von denen jeweils vier übereinander liegen. Gemessen werden in allen Zu- und Abluftrohren die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit.

Zusätzlich sind alle Wohnungstüren und Fenster mit Öffnungskontakten versehen. Hiermit kann der Einfluss der Fensteröffnung untersucht werden. Da die Schwerkraftlüftung zu einem unkontrollierten Luftaustausch führt und keine Wärmerückgewinnung aufweist, wird zusätzlich untersucht, wie sich dies auf den Heizwärmeverbrauch auswirkt.

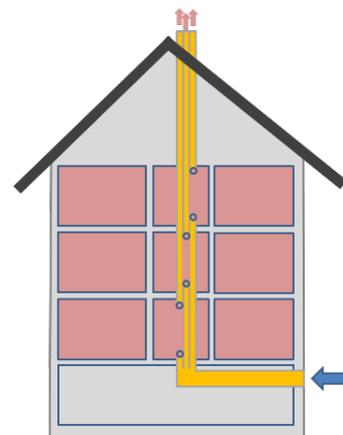
Der Neubau wurde Anfang 2022 bezogen. Das Monitoring läuft von März 2022 bis März 2023 wobei die Periode zwischen März 2022 und Januar 2023 ausgewertet wird. Damit sind alle Jahreszeiten abgedeckt.

Die Resultate zeigen deutlich, dass verschiedene Parameter einen Einfluss auf die Lüftungseffektivität der Schwerkraftlüftung haben:

- Temperaturdifferenz Bad/Aussenluft
- Badtür geschlossen bzw. geöffnet mit/ohne Anschluss an Aussenluft (Fenster auf)
- Schaltzustand der Fortluft-Dunstabzughauben in der Küche

Es zeigt sich weiter, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Abluftrohr fast immer höher ist als im Zuluftrohr. D.h., im Abluftrohr liegen meist höhere Volumen- bzw. Massenströme als im Zuluftrohr vor. Damit enthält die Abluft der Schwerkraftlüftung zusätzlich zu der Luft aus dem Zuluftrohr auch Luft aus dem undichten Installationsschacht (Badtür zu) und der restlichen Wohnung ohne/mit geöffnetem Fenster (Badtür offen).

Bei den untersuchten Bädern stehen die Türen zu über 90 % der Zeit offen. Ist die Badtür geöffnet, steht das Bad im Luftaustausch mit der Wohnung und die relative Feuchtigkeit gleicht sich der restlichen Wohnung an. Der Einfluss der Schwerkraftlüftung auf die Lüftung der gesamten Wohnung ist jedoch nur sehr gering. Ist das Bad über geöffnete Türen und Fenster mit der Aussenluft verbunden, wird das Bad über die normale Wohnungsfensterlüftung belüftet.



Skizze «Kölner Lüftung»



Im Winter, wenn die Fenster oft geschlossen sind, führt die Schwerkraftlüftung aufgrund der hohen Temperaturdifferenzen zwischen Bad und Aussenluft zu den grössten Luftwechseln im Bad, d.h. die Feuchtigkeit der innenliegenden Bäder wird bei geschlossener Badtüre rasch abtransportiert.

Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft wird, desto kleiner werden die Luftwechsel und verlängert sich die Dauer, bis die Feuchtigkeit abtransportiert ist. In den Übergangsjahreszeiten (Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft ca. 8-10 K) kann es rund 3.5 Stunden dauern, bis die relative Luftfeuchtigkeit nach einem Duschvorgang wieder < 60 % beträgt.

Im Sommer sind die Temperaturdifferenzen zwischen Bad und Aussen gering und daher reduziert sich die Luftgeschwindigkeit im Abluftrohr. Dies führt zu einem geringeren Luftwechsel im Bad. Zusätzlich weist die Aussenluft im Sommer eine hohe relative Luftfeuchte auf und dies führt in Kombination mit den geringeren Luftwechseln zu längeren Zeiten für den Abtransport der Feuchte. Zur Einschätzung der Feuchteproblematik muss berücksichtigt werden, dass es sich hier um innenliegende Bäder handelt, welche rundherum von beheizten Räumen umgeben sind. Die innenliegenden Bäder haben hohe raumseitige Oberflächentemperaturen die nahe der Raumlufttemperatur liegen. Entsprechend sind hohe Raumluftfeuchten und längere Zeiten für den Feuchteabtransport erlaubt.

Der worst case für die Schwerkraftlüftung sind Tage, an denen die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Umgebung sehr gering ist und nach einem Duschvorgang die Badtüre mindestens 24 Stunden geschlossen bleibt. In der Realität wird dies jedoch sicherlich die Ausnahme sein. Um diesen Fall auszuschliessen, sollte an entsprechenden Tagen mit einer geöffneten Badtüre und über geöffnete Fenster der Luftaustausch und damit das Abtrocknen des innenliegenden Bades unterstützt werden. Solange die Nutzer:innen die Wohnung inkl. geöffneter Badtüre mit der üblichen Sommerlüftungsstrategie bei Fensterlüftung von einer Morgen- und Abendlüftung bzw. einer Nachtlüftung lüften, ist das Schimmelrisiko im innenliegenden Bad minimiert.

Weitere Aussagen können zusammengefasst werden:

- Eine Abhängigkeit des Luftwechsels von der **Wohnungslage** innerhalb des Gebäudes kann nicht bzw. nur als sehr gering festgestellt werden.
- Der freie Lüftungsquerschnitt des **Ventils im Zuluftauslass** im Bad vergrössert sich, während der Lichtschalter auf «an» steht. Einen Einfluss des kurzzeitig vergrösserten freien Lüftungsquerschnitts auf den Luftwechsel kann nicht belegt werden. Die Anbindung des Zuluftventil an den Lichtschalter kann eingespart werden.
- Der Luftwechsel steigt bei **Ostwind** an. Bei Ostwind wird das Gebäude frei angeströmt.
- Die **Mieter:innen** sind generell mit der Schwerkraftlüftung zufrieden. Die Zuluft in Knöchelhöhe stellt keine Störung dar. Drei von fünf Befragten haben das Bedürfnis, die Badtür nach dem Duschen zu öffnen, da sie das Gefühl haben, dass das Badezimmer sonst länger feucht bleibt. Eine Person erwähnt, dass sie Gerüche aus anderen Wohnungen bemerkt, wobei unklar ist, ob die Gerüche über die Schwerkraftlüftung oder den undichten Installations-schacht, undichten Elektroverteilerkasten oder anderen Leckagen übertragen werden.
- Während des Betriebs der **Fortluft-Dunstabzugshaube** in der Küche und kommt es zu einer **Umkehr der Strömungsrichtung** im Abluftrohr mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Dies ist aus hygienischen Gründen zu vermeiden. Zusätzlich steigt damit das Risiko der Geruchsbelästigung aus anderen Wohnungen. Es wird empfohlen Umluft-Dunstabzugshauben in der Küche einzubauen. Die beim Kochen anfallende Feuchtigkeit muss über die manuelle Fensterlüftung abgeführt werden.
- Eine **Umkehr der Strömungsrichtung** im Abluftrohr tritt auch in Verbindung mit **geöffneten Fenstern** auf. Bei hohen Aussenlufttemperaturen macht die Luft schwache hin und her



Bewegungen in den Zu- und Abluftrohren. Diese Rückströmungen sollte aus hygienischer Sicht vermieden werden.

- Auf Grund des Neubaus ist davon auszugehen, dass sich in den Zu- und Abluftrohren der Schwerkraftlüftung noch kein oder nur sehr wenig **Biofilm** gebildet hat und daher eine Rückströmung im Abluftrohr noch zu keinem **hygienischen Problem** führt. Aussagen zu einer längerfristigen Entwicklung können nicht gemacht werden. Es wird wie für andere rohrgelungene Lüftungssysteme empfohlen, eine regelmässige Hygieneinspektion durchzuführen und ggf. regelmässig Reinigungen vorzunehmen.
- Das Monitoring findet in einem Neubau statt, der gerade bezogen ist. Aussagen zur längerfristigen **Schimmelfreiheit** in den Bädern können daher nicht getroffen werden. Während des Monitorings ist kein (sichtbarer) Schimmel aufgetreten. Die Einordnung der Messwerte in die LIM-Kurven [1] zeigt jedoch, dass infolge der Schwerkraftlüftung generell kein erhöhtes Schimmelrisiko besteht. Sollte Schimmel im Bad auftreten muss evaluiert werden, ob dies eine Folge der Schwerkraftlüftung oder auf Grund anderer Umstände zurückzuführen ist.
- Im Vergleich mit dem Bemessungswert einer **mechanischen Lüftung** im kontinuierlichen Betrieb zeigt sich, dass die Schwerkraftlüftung tiefere Volumenströme aufweist.
- Die Schwerkraftlüftung führt im Winter zu höheren und im Sommer zu ähnlichen Luftwechseln als ein angenommener Vergleich mit bedarfsgesteuerten **Bad-Abluftventilatoren** für 2 Personen. Die Vorteile von Bad-Abluftventilatoren liegen jedoch darin, dass sie bei Bedarf zusätzlich eingeschaltet werden können und die Treibhausgasemissionen für die Erstellung deutlich tiefer als für die Schwerkraftlüftung sind. Wobei beide Konzepte sehr geringe Treibhausgasemissionen aufweisen.
- Die 2 Zi-Wohnungen sind mit 1-2 Personen und die 3 Zi-Wohnungen mit 1 bzw. 3 Personen belegt. Im Rahmen des Monitorings ist die Schwerkraftlüftung ausreichen für die **Entfeuchtung** aller innenliegenden Bäder in den untersuchten Wohnungen.
- Der Vergleich zwischen dem gemessenen **Heizwärmeverbrauch** und dem gemessenen Energieverbrauch durch die Schachtlüftung zeigt, dass rund 8 % des Energieverbrauchs durch die Schwerkraftlüftung ohne Wärmerückgewinnung verursacht wird.
- Das Monitoring zeigt, dass die Schwerkraftlüftung in innenliegenden Bädern eine gute Ergänzung zur Fensterlüftung (Hauptlüftung der Wohnung) in den untersuchten Wohnungen ist. Obwohl es **saisonale Unterschiede** in der Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung gibt, hat sie im gemessenen Setting die innenliegenden Bäder genügend entfeuchtet. Im Sommer sollte sie durch die normale Fensterlüftung der anderen Wohnräume bei geöffneten Bad- und Zimmertüren unterstützt werden

Die genannten Erkenntnisse beziehen sich auf das untersuchte Gebäude mit der aktuellen Nutzung.



Résumé

Suite aux très bonnes expériences d'une coopérative immobilière avec une ventilation par gravité (ventilation par puit) pour l'aération des salles de bains intérieures dans des immeubles collectifs existants, les bâtiments de remplacement construits au même endroit seront également équipés d'une ventilation par gravité. L'objectif de ce projet est de mettre en évidence les possibilités et les limites de la ventilation par gravité dans l'une de ces nouvelles constructions. Le suivi se déroule sur une année complète afin de mesurer le comportement et l'efficacité de la ventilation par gravité à chaque saison. L'étude porte sur deux groupes de quatre salles de bains superposées. La vitesse, la direction du flux d'air, l'humidité relative ainsi que la température sont mesurées dans tous les tuyaux d'arrivée et d'évacuation d'air. De plus, toutes les portes et fenêtres des appartements sont équipées de contacts d'ouverture. Cela permet d'étudier l'influence de l'ouverture des fenêtres.

Dans le nouveau bâtiment de remplacement, la ventilation manuelle par les fenêtres est la ventilation principale des appartements. Pour l'aération des salles de bains intérieures, on renonce aux ventilateurs d'extraction commandés en fonction des besoins et on met en œuvre à la place une ventilation par gravité de type "Kölner Lüftung". Chaque salle de bain intérieure dispose de son propre tuyau d'arrivée et d'évacuation d'air, de sorte qu'il n'existe aucune liaison avec les appartements voisins. Comme l'aération de la salle de bains doit se faire par le tuyau d'arrivée et d'évacuation d'air lorsque la porte de la salle de bains est fermée, la porte de la salle de bains ne dispose pas de grille d'aération ou de fente d'air supplémentaire.

Étant donné que l'aération par gravité entraîne un échange d'air incontrôlé et qu'elle ne comporte pas de récupération de chaleur, il convient d'étudier son impact sur la consommation d'énergie nécessaire pour le chauffage. Pour ce faire, l'énergie de chauffage du bâtiment est relevée et comparée aux besoins selon la norme SIA 380/1. L'écart entre les deux valeurs sera si nécessaire discuté.

L'occupation du nouveau bâtiment a débuté en mars 2022. Le suivi se déroule de mars 2022 à mars 2023.

Les résultats montrent clairement que l'efficacité de la ventilation par gravité dépend de plusieurs facteurs :

- - Différence de température de l'air entre la salle de bains et l'extérieur
- - Ouverture/fermeture de la porte de la salle de bains avec une ouverture vers l'extérieur ou non
- - Allumage de la hotte d'aspiration dans la cuisine

Il s'avère aussi que la vitesse d'écoulement de l'air dans le tuyau d'évacuation est presque toujours plus élevée que dans le tuyau d'amenée d'air. Il en résulte des débits volumiques ou massiques plus élevés dans le tuyau d'évacuation que dans le tuyau d'arrivée d'air. Ainsi, l'air évacué par la ventilation par gravité contient, en plus de l'air provenant du tuyau d'arrivée d'air, de l'air provenant de la gaine technique non étanche (porte de la salle de bains fermée) et du reste de l'appartement (porte de la salle de bains ouverte).

Dans les salles de bains étudiées, les portes sont ouvertes plus de 90 % du temps. Lorsque la porte de la salle de bains est ouverte, l'humidité relative de l'appartement et de la salle de bains convergent. L'influence de la ventilation par gravité sur la ventilation de l'ensemble du logement est toutefois très faible. Si la salle de bains est reliée à l'air extérieur par des portes et des fenêtres ouvertes, la salle de bains est ventilée par l'aération normale des fenêtres de l'appartement.

En hiver, lorsque les fenêtres sont souvent fermées, la ventilation par gravité entraîne les plus grands échanges d'air dans la salle de bains en raison des différences de température élevées entre la salle



de bains et l'air extérieur, c'est-à-dire que l'humidité des salles de bains intérieures est rapidement évacuée lorsque la porte de la salle de bains est fermée.

Plus la différence de température entre l'air de la salle de bain et l'air extérieur est faible, plus le renouvellement d'air est faible et plus la durée nécessaire à l'évacuation de l'humidité est longue. Pendant les saisons intermédiaires (différence de température entre l'air de la salle de bain et l'air extérieur d'environ 8-10 K), il peut s'écouler environ 3,5 heures avant que l'humidité relative de l'air ne redevienne < 60 % après une douche.

En été, lorsque les différences de température entre la salle de bains et l'extérieur sont faibles, la vitesse de l'air dans le tuyau d'évacuation est réduite, ce qui entraîne un échange d'air plus faible lorsque la porte de la salle de bains est fermée. De plus, l'air extérieur présente une humidité relative élevée en été, ce qui, combiné à des échanges d'air plus faibles, entraîne des temps d'évacuation de l'humidité plus longs. En principe, les salles de bains intérieures dont les températures de surface côté pièce sont proches de la température de l'air ambiant permettent un taux d'humidité élevé. Pour évaluer la problématique de l'humidité, il faut tenir compte du fait qu'il s'agit ici de salles de bains intérieures, entourées de pièces chauffées sur tout leur pourtour. Les salles de bains intérieures ont des températures de surface élevées, proches de la température de l'air ambiant. En conséquence, une humidité élevée de l'air ambiant et des temps plus longs pour l'évacuation de l'humidité sont autorisés.

Le cas le plus défavorable pour la ventilation par gravité est celui des journées chaudes d'été, où la différence de température de l'air entre la salle de bains et l'extérieur est très faible, et où la porte de la salle de bains reste fermée pendant au moins 24 heures après une douche. Ce scénario reste peu probable dans l'utilisation réelle de la salle de bains. Toutefois, afin d'éviter ce cas de figure, il convient, les jours d'été correspondants, de favoriser l'échange d'air et donc la déshumidification de la salle de bains en ouvrant la porte de celle-ci ainsi que les fenêtres. Tant que les utilisateurs aèrent l'appartement, y compris la porte de la salle de bain ouverte, avec la stratégie d'aération habituelle en été avec une aération par les fenêtres, une aération matin et soir ou une aération nocturne, le risque de moisissures dans la salle de bain intérieure est minimisé.

D'autres conclusions peuvent être résumées :

- Une dépendance du renouvellement d'air par rapport à la situation de l'appartement dans le bâtiment ne peut pas être constatée ou seulement comme très faible.
- La section d'aération libre de la vanne dans la sortie d'air frais de la salle de bain s'agrandit lorsque l'interrupteur de la lumière est en position « marche ». Il n'est pas possible de prouver l'influence de l'augmentation momentanée de la section d'aération libre sur le renouvellement d'air. Le raccordement de la vanne d'air frais à l'interrupteur d'éclairage peut être évité.
- Le renouvellement d'air augmente par vent d'est. En cas de vent d'est, le bâtiment est librement ventilé.
- Les locataires sont généralement satisfaits de la ventilation par gravité. L'arrivée d'air à hauteur des chevilles ne constitue pas une gêne. Trois personnes sur cinq ressentent le besoin d'ouvrir la porte de la salle de bain après la douche, car elles ont l'impression que sinon la salle de bain reste humide plus longtemps. Une personne mentionne qu'elle remarque des odeurs provenant d'autres appartements, mais il n'est pas clair si les odeurs sont transmises par la ventilation par gravité ou par la gaine technique non étanche, le boîtier de distribution électrique non étanche ou d'autres fuites.
- Pendant le fonctionnement de la hotte aspirante à air sortant dans la cuisine et , il se produit une inversion du sens du flux dans le tuyau d'évacuation avec des vitesses de flux élevées.



Ceci est à éviter pour des raisons d'hygiène. De plus, cela augmente le risque de nuisances olfactives provenant d'autres appartements. Il est recommandé d'installer des hottes aspirantes à recyclage dans la cuisine. L'humidité générée par la cuisson des aliments doit être évacuée par l'aération manuelle des fenêtres.

- Une inversion du sens du flux d'air dans le tuyau d'évacuation se produit également en liaison avec l'ouverture des fenêtres. Lorsque la température de l'air extérieur est élevée, l'air fait de faibles mouvements de va-et-vient dans les tuyaux d'arrivée et d'évacuation. Ces courants de retour devraient être évités d'un point de vue hygiénique.
- En raison de la construction récente, on peut supposer qu'il ne s'est pas encore formé de biofilm, ou très peu, dans les tuyaux d'arrivée et d'évacuation d'air de la ventilation par gravité et qu'un reflux dans le tuyau d'évacuation d'air n'entraîne donc pas encore de problème d'hygiène. Il n'est pas possible de se prononcer sur une évolution à long terme. Il est recommandé, comme pour les autres systèmes de ventilation tubulaires, d'effectuer une inspection régulière de l'hygiène et, le cas échéant, de procéder à des nettoyages réguliers.
- Le monitoring a lieu dans un nouveau bâtiment qui vient d'être occupé. Il n'est donc pas possible de se prononcer sur l'absence de moisissures à long terme dans les salles de bains. Aucune moisissure (visible) n'est apparue pendant le monitoring. Le classement des valeurs mesurées dans les courbes LIM [1] montre toutefois qu'il n'y a généralement pas de risque accru de moisissures en raison de l'aération par gravité. Si des moisissures apparaissent dans la salle de bain, il faut évaluer si elles sont dues à l'aération par gravité ou à d'autres circonstances.
- La comparaison avec la valeur de calcul d'une ventilation mécanique en fonctionnement continu montre que l'aération par gravité présente des débits volumétriques plus faibles.
- La ventilation par gravité entraîne des renouvellements d'air plus élevés en hiver et similaires en été qu'une comparaison supposée avec des ventilateurs d'extraction de salle de bain commandés à la demande pour 2 personnes. Les avantages des ventilateurs d'extraction de salle de bain résident toutefois dans le fait qu'ils peuvent être activés en plus en cas de besoin et que les émissions de gaz à effet de serre pour la création sont nettement plus faibles que pour l'aération par gravité. Les deux concepts présentent de très faibles émissions de gaz à effet de serre.
- Les appartements de 2 pièces sont occupés par 1 à 2 personnes et les appartements de 3 pièces par 1 ou 3 personnes. Dans le cadre du suivi, la ventilation par gravité est suffisante pour déshumidifier toutes les salles de bain intérieures des appartements étudiés.
- La comparaison entre la consommation de chauffage mesurée et la consommation d'énergie mesurée due à la ventilation par gravité montre qu'environ 8 % de la consommation d'énergie est due à la ventilation par gravité sans récupération de chaleur.
- Le monitoring montre que l'aération par gravité dans les salles de bains intérieures est un bon complément à l'aération par les fenêtres (aération principale du logement) dans les logements étudiés. Bien qu'il existe des différences saisonnières dans l'efficacité de la ventilation par gravité, elle a suffisamment déshumidifié les salles de bains intérieures dans le setting mesuré. En été, elle devrait être soutenue par l'aération normale des fenêtres des autres pièces d'habitation, les portes des salles de bain et des chambres étant ouvertes.

Les conclusions mentionnées se réfèrent au bâtiment étudié avec son utilisation actuelle.

Traduit avec DeepL.com (version gratuite)



Summary

Based on the very good experience of a building cooperative with gravity ventilation (shaft ventilation) for the ventilation of interior bathrooms in existing apartment buildings, the new replacement buildings constructed on the same site are also equipped with gravity ventilation. The aim of this project is to demonstrate the possibilities and limitations of gravity ventilation for interior bathrooms in one of the new replacement buildings by means of monitoring. The monitoring extends over a complete year to record the behavior and effectiveness of the gravity ventilation in all seasons. Eight indoor bathrooms are studied, four of which are located on top of each other. Flow velocity and direction as well as temperature and relative humidity are measured in all supply and exhaust air pipes. In addition, all apartment doors and windows are equipped with opening contacts. This allows to investigate the influence of open windows.

In the new replacement building, manual window ventilation is the main ventilation of the apartments. For the ventilation of the interior bathrooms, demand-controlled exhaust fans are not used and instead gravity ventilation of the "Cologne ventilation" type is implemented. Here, each interior bathroom has its own supply and exhaust air pipe so that there is no connection to neighboring apartments. Since the bathroom ventilation is to take place via the supply and exhaust air pipe when the bathroom door is closed, the bathroom door has no ventilation grille or additional air gap.

Since gravity ventilation leads to an uncontrolled air exchange and has no heat recovery, the effect on the heating consumption is also investigated. For this purpose, the heating consumption of the building is determined and compared with the heating requirement according to SIA 380/1. The difference is discussed and classified.

The new building was occupied at the beginning of 2022. The monitoring runs from March 2022 to March 2023.

The results clearly show that various parameters have an influence on the ventilation effectiveness of gravity ventilation:

- Bathroom/outdoor air temperature difference
- Bathroom door closed or open with/without connection to outside air (window open)
- Switching state of the kitchen fume hood

It can also be seen that the flow velocity in the exhaust air duct is almost always higher than in the supply air duct. This means that there are usually higher volume or mass flows in the exhaust air duct than in the supply air duct. Thus, in addition to the air from the supply air duct, the exhaust air of gravity ventilation also contains air from the leaky installation shaft (bathroom door closed) and the rest of the apartment without/with open window (bathroom door open).

In the bathrooms studied, the doors are open over 90 % of the time. If the bathroom door is open, the bathroom is in air exchange with the apartment and the rel. humidity equalizes with the rest of the apartment. However, the effect of gravity ventilation on the ventilation of the entire apartment is very small. If the bathroom is connected to the outside air via open doors and windows, the bathroom is ventilated via normal apartment window ventilation.

In winter, when the windows are often closed, gravity ventilation results in the greatest air changes in the bathroom due to the high temperature differences between the bathroom and the outside air, i.e. the humidity of the interior bathrooms is rapidly removed when the bathroom doors are closed.

The smaller the temperature difference between bath and outside air, the smaller the air changes and the longer the time until the moisture is removed. In the transitional seasons (temperature difference



between bath and outside air approx. 8-10 K), it can take around 3.5 hours until the relative humidity is < 60 % again after a shower.

In summer, the temperature differences between bath and outside are small and therefore the air velocity in the exhaust duct is reduced. This leads to a lower air exchange rate when the bathroom door is closed. In addition, the outside air has a high rel. humidity in summer and this, in combination with the lower air changes, leads to longer times for the removal of humidity. In general, interior bathrooms with room-side surface temperatures close to the room air temperature allow high humidity. In order to assess the moisture problem, it must be taken into account that these are interior bathrooms, which are surrounded by heated rooms. Indoor bathrooms have high room-side surface temperatures that are close to the room air temperature. Accordingly, high room air humidity and longer times for moisture removal are permitted.

The worst case for the gravity ventilation are warm summer days, when the temperature difference between the bathroom and outdoor is very small and the bathroom door remains closed for 24 hours after a shower. However, this is certainly a very unlikely scenario in real use. To exclude this case, the air exchange and thus the drying of the interior bathroom should be supported on corresponding summer days with an open bathroom door and open apartment windows. As long as the user ventilates the apartment including the open bathroom door with the usual summer ventilation strategy with window ventilation of a morning and evening ventilation or night ventilation, the risk of mold in the interior bathroom is minimized.

Further statements can be summarised:

- A dependency of the air exchange on the position of the flat within the building cannot be determined, or only to a very small extent.
- The free ventilation cross-section of the valve in the supply air outlet in the bathroom increases while the light switch is set to 'on'. An influence of the briefly increased free ventilation cross-section on the air exchange cannot be proven. The connection of the supply air valve to the light switch can be omitted.
- The air change rate increases in easterly winds. In easterly winds, the building is freely ventilated.
- The tenants are generally satisfied with the gravity ventilation. The supply air at ankle height is not a problem. Three out of five respondents feel the need to open the bathroom door after showering, as they feel that the bathroom would otherwise remain damp for longer. One person mentions that they notice odours from other flats, although it is unclear whether the odours are transmitted via the gravity ventilation or the leaking installation shaft, leaking electrical distribution box or other leaks.
- During operation of the exhaust air extractor bonnet in the kitchen, the flow direction in the exhaust air pipe is reversed with high flow velocities. This should be avoided for reasons of hygiene. It also increases the risk of unpleasant odours from other flats. We recommend installing recirculating extractor bonnets in the kitchen. The moisture produced during cooking must be removed via manual window ventilation.
- A reversal of the flow direction in the exhaust air pipe also occurs in conjunction with open windows. At high outside air temperatures, the air makes slight back and forth movements in the supply and exhaust air ducts. These backflows should be avoided from a hygienic point of view.
- Due to the new building, it can be assumed that no or very little biofilm has yet formed in the supply and exhaust air ducts of the gravity ventilation system and therefore a backflow in the



exhaust air duct does not yet lead to any hygiene problems. No statements can be made about a longer-term development. As with other ducted ventilation systems, it is recommended that regular hygiene inspections are carried out and, if necessary, regular cleaning is carried out.

- The monitoring takes place in a new building that has just been occupied. It is therefore not possible to make any statements about the long-term absence of mould in the bathrooms. No (visible) mould occurred during the monitoring. However, the classification of the measured values in the LIM curves [1] shows that there is generally no increased risk of mould due to the gravity ventilation. Should mould occur in the bathroom, it must be evaluated whether this is a result of the gravity ventilation or due to other circumstances.
- A comparison with the required flow rate of mechanical ventilation in continuous operation shows that gravity ventilation has lower volume flows.
- Gravity ventilation leads to higher air changes in winter and similar air changes in summer than an assumed comparison with demand-controlled bathroom exhaust fans for 2 people. However, the advantages of bathroom exhaust fans are that they can also be switched on when required and the greenhouse gas emissions for their creation are significantly lower than for gravity ventilation. Both concepts have very low greenhouse gas emissions.
- The 2-bedroom flats are occupied by 1-2 people and the 3-bedroom flats by 1 or 3 people. As part of the monitoring, the gravity ventilation is sufficient for dehumidifying all interior bathrooms in the flats analysed.
- The comparison between the measured heating consumption and the measured energy consumption shows that around 8 % of the energy consumption is caused by gravity ventilation without heat recovery.
- The monitoring shows that gravity ventilation in interior bathrooms is a good supplement to window ventilation (main ventilation of the flat) in the flats analysed. Although there are seasonal differences in the effectiveness of gravity ventilation, it sufficiently dehumidified the interior bathrooms in the measured setting. In summer, it should be supported by the normal window ventilation of the other living spaces with the bathroom and room doors open.

The above findings relate to the analysed building with its current use.



Take-home messages

- Obwohl es saisonale Unterschiede in der Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung gibt, konnte sie im untersuchten Objekt die innenliegenden Bäder ausreichend entfeuchten. Im Sommer wurde sie durch die Fensterlüftung (Hauptlüftung der Wohnung) in den anderen Wohnräumen und geöffneten Bad- und Zimmertüren unterstützt.
- Die Temperaturdifferenz von Bad und Aussenluft hat den grössten Einfluss auf den Luftwechsel. Je grösser diese Differenz ist, desto grösser wird der Luftwechsel. D.h. im Winter treten die grössten Luftwechsel auf.
- Rund 8 % der gesamten Energieverbrauchs für die Heizwärme ist auf die Schwerkraftlüftung zurückzuführen
- Die grauen Emissionen der Schwerkraftlüftung sind – auf tiefem Niveau - deutlich höher als bei einem konventionellen System auf Basis von Badezimmer-Ventilatoren.
- Eine Abhängigkeit des Luftwechsels von der Wohnungslage innerhalb des Gebäudes kann nicht bzw. nur als sehr gering festgestellt werden.
- Während des Betriebs der Fortluft-Dunstabzugshaube in der Küche kommt es zu einer Umkehr der Strömungsrichtung im Abluftrohr mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Dadurch steigt damit das Risiko der Geruchsbelästigung aus anderen Wohnungen. Eine Umkehr der Strömungsrichtung im Abluftrohr tritt auch in Verbindung mit geöffneten Fenstern bei geringeren Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Aussen auf. Die Luft macht schwache hin und her Bewegungen in den Rohren. Diese Rückströmungen sind aus hygienischen Gründen zu vermeiden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	6
Summary	9
Take-home messages	12
Inhaltsverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
1 Einleitung	16
2 Projektziel	18
3 Anforderungen	19
3.1 Bemessung für Aussenluft-Volumenströme	19
3.2 Feuchteschutz	20
3.3 Voraussetzung für Schimmelbildung	20
3.4 Heizwärmebedarf	21
4 Vorgehen	22
4.1 Monitoring	22
4.2 Datenbearbeitung	23
4.2.1 Absolute Luftfeuchtigkeit	23
4.2.2 Luftwechselrate	24
4.2.3 Rel. Luftfeuchtigkeit der Aussen- und Badezimmerluft	25
4.2.4 Signal für Badtüre und Fensterlüftung.....	26
4.2.5 Akkumulierte Temperaturdifferenzen und Heizgradtage.....	27
5 Resultate	28
5.1 Übersicht.....	28
5.1.1 Monatliche Mittelwerte.....	28
5.1.2 Dunstabzug und Duschvorgang	31
5.1.3 Temperaturdifferenz Bad/Aussen.....	33
5.2 Detailbetrachtungen	34
5.2.1 Duschvorgang mit anschliessend geschlossener Badtüre (März)	34
5.2.2 Duschvorgang mit anschliessend geöffneter Badtüre (Juni).....	35
5.2.3 Lüftung an kalten Tagen (April)	36
5.2.4 Lüftung an warmen Tagen (August).....	38
5.2.5 Unbewohnte Wohnungen (August/September).....	39
5.2.6 Windeinfluss	41
5.2.7 Volumenströme im Abluftrohr	43
5.2.8 Luftwechselrate	46
5.2.9 Zulässige Raumlufffeuchte	48



5.2.10	Schimmelrisiko.....	50
6	Mieterbefragung	51
7	Vergleich Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch	52
8	Vergleich Schwerkraftlüftung und Bad-Abluftventilator	53
9	Diskussion und Fazit.....	54
10	Publikationen	57
11	Literaturverzeichnis	58
12	Anhang	59
12.1	Übersicht Wohnungen, Schachtanordnung, Messstellen	59
12.2	Klimadaten.....	62
12.3	Resultate – Detailbetrachtungen der Ostbäder	64
12.3.1	Rel. Luftfeuchtigkeit über Aussenlufttemperatur	64
12.3.2	Abluftvolumenstrom über Temperaturdifferenz Bad/Aussen	66
12.3.3	Luftwechsel über Temperaturdifferenz Bad/Aussenluft	69
12.4	Grunddaten zur Berechnung der Treibhausgasemissionen.....	70



Abkürzungsverzeichnis

ATD Akkumulierte Temperaturdifferenz

HGT Heizgradtage

LIM Lowest Isopleth for Mould



1 Einleitung

Auf Grund der hohen Feuchte- bzw. Geruchsbelastung von Bädern und WCs muss dort auf den Luftaustausch ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Ist keine mechanische Lüftung vorhanden, ist in innenliegenden Räumen dieser Kategorie anderweitig der Luftaustausch sicherzustellen. Häufig werden dezentrale Abluftventilatoren eingesetzt, die die Luft bedarfsgesteuert aktiv aus dem Bad/WC abziehen. Eine andere Möglichkeit ist die sogenannte Schacht- bzw. Schwerkraftlüftung. Hierbei erfolgt der Luftaustausch ohne mechanische Unterstützung. Weil bei der Schwerkraftlüftung der Luftaustausch auf Grund von Druckunterschieden infolge von Dichteunterschieden (Wind/Temperatur) erfolgt, ist er nicht bzw. kaum steuerbar und saisonal unterschiedlich. Die Schwerkraftlüftung ist eine low-tech Lüftungsvariante, die keine oder nur wenige technische Komponenten benötigt (z.B. steuerbares Zuluftventil).

Es gibt die sogenannte «Kölner», «Dortmunder» und «Berliner» Schachtlüftung [2]. Das Prinzip ist bei allen drei Formen die Schwerkraftlüftung. Bei allen drei Formen wird die Abluft vom jeweiligen innenliegenden Raum direkt über einen eigenen Abluftschacht über das Dach angeführt. Die Formen unterscheiden sich in der Zuluftführung (Bild 1). Bei der «Kölner» und «Dortmunder» Lüftung wird die Frischluft auf Kellerhöhe gefasst (Bild 1 links/Mitte). Ein horizontaler Schacht führt im Keller bis zu der Stelle, an der die einzelnen Schächte die Luft vertikal nach oben führen. Während bei der «Kölner» Lüftung jeder zu belüftende Raum direkt mit einem eigenen Schacht verbunden ist, wird bei der «Dortmunder» Lüftung der Schacht in den Flur geführt und von dort strömt die Luft über eine Überströmöffnung in den zu lüftenden Raum. Bei der «Berliner» Lüftung strömt die entsprechende Frischluft aus Öffnungen in den Nachbarräumen (z.B. spezielle Zuluftöffnungen, undichte Aussenhülle, Anbindungen zu Installationsschächten und Treppenhäusern) nach. bei der «Berliner» Lüftung sind keine definierten Zuluftschächte vorhanden (Bild 1 rechts).

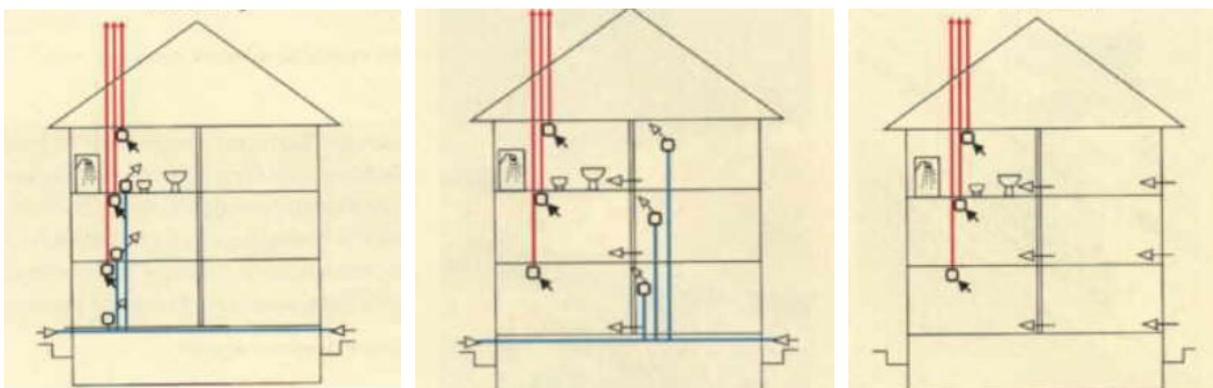


Bild 1 Prinzipskizze für die «Kölner» (rechts), «Dortmunder» (Mitte) und «Berliner» (links) Schachtlüftung (Bilder aus [3]).

Schwerkraftlüftungen wurden in der Schweiz in den 50er und 60er Jahren immer wieder eingebaut. D.h., es gibt Gebäude, bei denen im Fall der energetischen Sanierung das Thema relevant wird und überlegt werden muss, ob diese Lüftungsform auch nach der Sanierung beibehalten wird. Da es zusätzlich im Bauwesen einen gewissen Trend in Richtung low-tech gibt, stellt sich die Frage, ob diese Lüftungsform auch für Neubauten interessant ist.



In Basel wurden bestehende Gebäude mit Schwerkraftlüftung mit dem Typ «Kölner» Lüftung (Bild 2 links) abgerissen und, weil diese lt. Bauherren gut funktioniert hat, werden die Ersatzneubauten ebenfalls mit Schwerkraftlüftung erstellt. Der erste Neubau wurde Anfang 2021, der zweite Anfang 2022 bezogen. An diesem zweiten Neubau erfolgt das Monitoring.

Der vierstöckige Neubau hat 16 Wohnungen, mit vier Wohnungen pro Geschoss (Bild 2 Mitte). Die Wohnungen haben ein innenliegendes Bad oder WC. Jedes innenliegende Bad/WC hat einen eigenen Rohrstrang für die Schwerkraftlüftung (Bild 2 rechts). Vom Grundprinzip ist die sogenannte «Kölner» Lüftung umgesetzt. Als Erweiterung der «Kölner» Lüftung ist bei dem untersuchten Gebäude die Öffnungsweitenaktivierung der Zuluftventile mit dem Lichtschalter gekoppelt.

Die generelle Wohnungslüftung erfolgt über die manuelle Fensterlüftung, nur die innenliegenden Bäder und WCs werden über die Schwerkraftlüftung belüftet.



Bild 2 Links: Prinzipskizze der «Kölner» Lüftung, angewendet auf die Belüftung der innenliegenden Bäder/WC. Mitte: Mehrfamilienhaus mit Monitoring der Schwerkraftlüftung in den innenliegenden Bädern, Neubau Bezug 2022 (© INEB). Rechts: Lüftungsrohre im Erdgeschoss für die Schwerkraftlüftung (© Ferrara Architekten). Jedes innenliegende Bad ist mit einem eigenen Rohrstrang versehen.

Prinzip der hier verwendeten Zu- und Abluftventile:

- Zuluft

Das Zulufttellerventil (Bild 3) ist mit dem Lichtschalter gekoppelt. Brennt das Licht, erwärmt sich der elektrothermische Antrieb und das Ventil öffnet sich innerhalb 2-4 min. Solange der Stromkreis geschlossen ist, bleibt das Tellerventil maximal offen. Wird das Licht gelöscht, d.h. der Stromkreis unterbrochen, bleibt das Tellerventil noch 5-8 min offen, bevor es langsam in die Minimaleinstellung zurückkehrt [4].

Im «geschlossenen» Zustand weist das Ventil eine Minimalöffnung auf. Diese ist vom Bauherrn eingestellt, kann aber vom Mieter bzw. der Mieterin verstellt werden.

- Abluft

Das Abluftventil ist immer zu 100 % offen.



Bild 3 Zulufttellerventil mit elektrothermischem Antrieb (© INEB).

2 Projektziel

Ziel dieses Projektes ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Schwerkraftlüftung für die Entfeuchtung von innenliegenden Bädern aufzuzeigen.

Es wird erwartet, dass der Feuchteausstrag aus den innenliegenden Bädern im Winter grösser ist als im Sommer. Zum einen ist im Winter die Aussenlufttemperatur deutlich geringer als die Raumlufttemperaturen, was zu grossen Temperaturdifferenzen führt und damit zu höheren Luftwechseln. Im Sommer sind die Raumlufttemperaturen in den meisten Tagesstunden tiefer als die Aussenlufttemperaturen und die Temperaturdifferenzen sind insgesamt geringer als im Winter. Der Luftwechsel wird sich daher bis auf Null reduzieren, resp. die Strömungsrichtung ändern.

Über ein detailliertes Monitoring wird die Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung für innenliegende Bäder bestimmt. Das Monitoring erfolgt über fast ein komplettes Jahr, um das Verhalten in allen Jahreszeiten zu erfassen. Ausgewertet wurden 11 Monate. Untersucht werden acht innenliegende Bäder, von denen jeweils vier übereinander liegen (s. Anhang). Gemessen werden in allen Zu- und Abluftrohren (je acht) die Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur und rel. Feuchtigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden an jeder Stelle in beide Richtungen gemessen, so dass überprüft werden kann, in welche Richtung die Luft strömt. Zusätzlich werden alle Türen und Fenster mit Öffnungskontakten versehen. Hiermit kann der Einfluss der Fensteröffnung untersucht werden.

Da die Schwerkraftlüftung zu einem unkontrollierten Luftaustausch führt und keine Wärmerückgewinnung aufweist, wird angenommen, dass dies den Heizwärmebedarf erhöht. Aus diesem Grund soll der gemessene Wärmeverbrauch über die Mieterabrechnung bestimmt und dem Heizwärmebedarf gemäss SIA 380/1:2016 Nachweis gegenübergestellt und diskutiert werden.

Folgende Themen sind im Projekt nicht enthalten:

- Keine Untersuchung zur Belüftung/Entfeuchtung/Luftqualität der gesamten Wohnung
- Kein messtechnischer Vergleich mit Bad-Abluftventilatoren oder anderen mechanischen Lüftungssystemen
- Keine Analyse des Nutzerverhaltens
- Keine Analyse der Geruchsabfuhr



3 Anforderungen

3.1 Bemessung für Aussenluft-Volumenströme

Bemessungswerte für Aussenluft-Volumenströme für Räume mit Dusche sind in SIA 382/1 [5], SIA 382/5 [6] und SIA 2024 [7] genannt (Tabelle 1). Die Werte gelten jedoch für mechanische Lüftungen und nicht für eine natürliche Lüftung, zu der auch die Schwerkraftlüftung (Schachtlüftung) gehört.

Das untersuchte Gebäude weist durch die Kombination von Fensterlüftung (Hauptlüftung der Wohnung), Schwerkraftlüftung (Lüftung im Bad) und ergänzend eine Kochstellenentlüftung (kurzzeitig in Betrieb) gemäss [8] im weitesten Sinne ein hybrides Lüftungssystem auf. Wobei die Fenster- und Schwerkraftlüftung zur Kategorie der natürlichen (freien) Lüftung gehören und die bedarfsgesteuerte Kochstellenentlüftung als mechanische Lüftung gilt. Für natürliche und hybride Lüftung existiert bislang keine Planungshilfe oder Norm.

Das Thema natürliche und hybride Lüftungen wird voraussichtlich in zwei neuen Normen SIA 382/3 mit dem Arbeitstitel *Natürliche und hybride Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen* und SIA 382/4 *Natürliche und hybride Lüftung in Gebäuden – Leistungs- und Energiebedarf* formuliert [8]. Es ist vorgesehen, dass die Schacht-/Schwerkraftlüftung dort ebenfalls berücksichtigt wird.

Tabelle 1 Übersicht der Bemessungswerte für den Aussenluft-Volumenstrom von Räumen mit Duschen in verschiedenen Normen für Gebäude mit mechanischer Lüftung.

	SIA 382/1:2014 (pr SIA 382/1:2022-11 Vernehmlassungsentwurf)		SIA 2024:2021	SIA 382/5:2021
	Kontinuierlicher Betrieb	Bedarfs-gesteuerter Betrieb	Hygiene-bedingter Aussenluft-Volumenstrom	kontinuierlicher/ bedarfs-gesteuerter Betrieb
Raum mit Dusche (Bad/WC/Dusche)	4 m ³ /(h m ²) immer ≥ 40 m ³ /h (40 m ³ /h)	8 m ³ /(h m ²) immer ≥ 50 m ³ /h (60 m ³ /h)	8 m ³ /(h m ²)	30/50 m ³ /h
Hygienischer Grundluftwechsel bei schwach/wenig genutzten Räumen	---	---	---	0.1 h ⁻¹
Entspricht bei einer Grundfläche von 5 m ² und einem Volumen von 12.5 m ³	20 m ³ /h, 1.6 h ⁻¹ immer ≥ 3.2 h ⁻¹ (3.2 h ⁻¹)	40 m ³ /h, 3.2 h ⁻¹ immer ≥ 4.0 h ⁻¹ (4.8 h ⁻¹)	40 m ³ /h, 3.2 h ⁻¹	2.4/4.0 h ⁻¹



3.2 Feuchteschutz

In SIA 180:2014 [9] werden die generellen Anforderungen für den Feuchteschutz genannt. Im Tagesmittel dürfen in Räumen mit Personenbelegung die Grenzen der rel. Raumlufffeuchte von Bild 4 nicht überschritten werden.

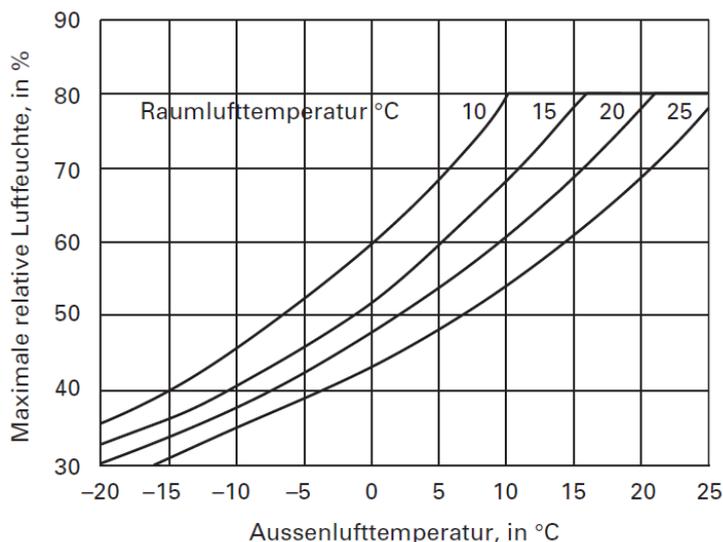


Bild 4 Maximalzulässige relative Raumlufffeuchte in Abhängigkeit von der Raum- und Aussenlufttemperatur (Tagesmittelwerte) [9].

3.3 Voraussetzung für Schimmelbildung

Für die Bildung von Schimmel an raumseitigen Bauteiloberflächen ist die relative Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche sowie die Oberflächentemperatur massgeblich. Um eine Sporenauskeimung bzw. anschliessend ein Myzelwachstum zu provozieren, muss eine bestimmte Kombination aus Oberflächentemperatur und Oberflächenfeuchte über eine bestimmte Zeitdauer vorherrschen. Für die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum gibt es eine absolute Untergrenze der biologischen Aktivität, die sogenannte 'Lowest Isopleth for Mould' (LIM). Die LIM-Kurve gibt für eine bestimmte Substratgruppe an, unterhalb welcher Oberflächentemperatur und -feuchte nicht mit einer Sporenauskeimung bzw. weiterem Myzelwachstum zu rechnen ist. Die Vorhersage zu Sporenauskeimungszeiten wird in einem Isoplethensystem dargestellt Bild 5, [1]).

Für eine zusätzliche Einordnung der in vorangegangenem Abschnitt gezeigten Ergebnisse werden exemplarisch einige Fälle auf Grundlage der LIM-Kurven diskutiert. Dabei werden als Anhaltspunkt die Fliesenfugen und die gestrichene Decke in Substratgruppe I – biologisch verwertbare Substrate – eingeordnet.

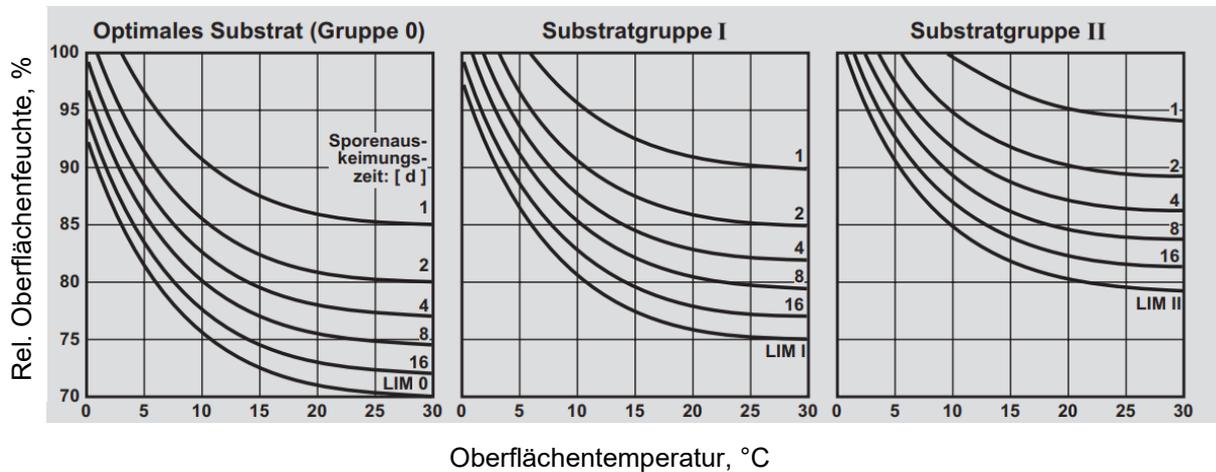


Bild 5 Verallgemeinertes Isoplethensystem für die Sporenauskeimung bei verschiedenen Substratgruppen [1]. Die angegebenen Werte geben die Zeitdauer an, nach der eine Sporenauskeimung abgeschlossen ist. Ablesebeispiel für Substratgruppe I: bei einer Oberflächentemperatur von 25 °C liegt die mögliche Untergrenze der Pilzaktivität bei ca. 75 % rel. Oberflächenfeuchte.

- | | |
|-------------------|---|
| Substratgruppe 0: | optimaler Nährboden |
| Substratgruppe I | biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, starke Verschmutzung |
| Substratgruppe II | poröse Baustoffe, z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen |

3.4 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf des Gebäudes gemäss SIA 380/1:2016 [10] beträgt $Q_H = 30.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ und entspricht 85 % des Grenzwertes. Der Nachweis ist mit dem Standardwert für natürlich belüftete Gebäude für den thermisch wirksamen Aussenluft-Volumenstrom von $0.7 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ geführt.

Die Hauptlüftung der Wohnung ist die Fensterlüftung. Die Schwerkraftlüftung ist für die Belüftung der innenliegenden Bäder vorgesehen, da keine Fenster vorhanden sind. Sie ist auch eine Form der natürlichen Lüftung.



4 Vorgehen

4.1 Monitoring

Untersucht werden acht innenliegende Bäder, von denen jeweils vier Ostwohnungen bzw. vier Westwohnungen übereinander liegen. Gemessen werden in allen Zu- und Abluftrohren (je acht) und im Sammelschacht der gemeinsamen Frischluftfassung die Strömungsgeschwindigkeit v , die Lufttemperatur θ und die rel. Luftfeuchtigkeit rel. F. Die Strömungsrichtung wird erfasst, so dass überprüft werden kann, in welche Richtung die Luft strömt (Bild 6). Die Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit in den einzelnen Bädern werden mit Datenloggern protokolliert. Die Logger befinden sich in Kopfhöhe einer stehenden Person auf ca. 1.7 m neben der Badtüre an der Wand. Zusätzlich sind alle Türen und Fenster der Wohnungen mit Öffnungskontakten versehen, die ebenfalls via Datenloggern protokolliert werden. Hiermit kann der Einfluss der Tür- und Fensteröffnung untersucht werden.

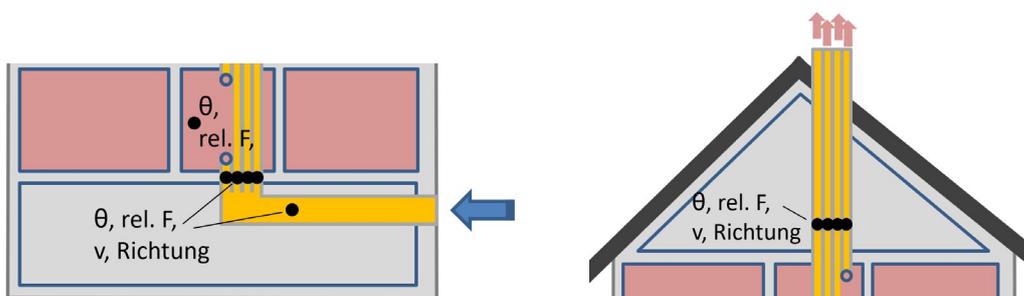


Bild 6 Layout Messtechnik im Keller und Estrich.

Die Messdaten aus den Rohren und dem Frischluftsammschacht werden über eine SPS automatisch erfasst. Die Datenlogger werden ca. alle zwei Monate ausgelesen. Alle Messwerte werden im zwei Sekundentakt geloggt. Die Tür- und Fensterkontakte geben den Status «zu» bzw. «offen» an. Bei «offen» liegt keine Auskunft darüber vor, wie weit die Türe bzw. das Fenster geöffnet ist. Die Öffnungsweite liegt zwischen angelehnt und 100 % offen.

Für das Aussenklima werden die Wetterdaten der Messstation Basel-Binningen von Meteoschweiz berücksichtigt (s. Anhang 11.2).

Die Resultate beziehen sich auf den Messzeitraum vom 08.03.2022 - 06.01.2023.



4.2 Datenbearbeitung

4.2.1 Absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Luftfeuchtigkeit berechnet sich aus der gemessenen Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit über die ideale Gasgleichung (Gl. 1):

$$v_D = \frac{m_D}{V} = \frac{p_D}{R_D \cdot T} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{Gl. 1}$$

mit

v_D	absolute Luftfeuchtigkeit (volumenbezogen), kg/m ³
m_D	Masse Dampf, kg
V	Volumen (Luft), m ³
p_D	Wasserdampfpartialdruck, Pa
R_D	spez. Gaskonstante Wasserdampf, 461.5 J/(kg K)
T	absolute Temperatur, K

Der Wasserdampfpartialdruck wird über den Sättigungsdampfdruck und die rel. Luftfeuchtigkeit berechnet (Gl. 2):

$$p_D = p_s \cdot \varphi \quad \text{Pa} \quad \text{Gl. 2}$$

mit

p_s	Sättigungsdampfdruck, Pa
φ	rel. Luftfeuchtigkeit, -

Der Sättigungsdampfdruck ist temperaturabhängig und berechnet sich gemäss Gl. 3 ([11], für Lufttemperaturen > 0°C):

$$p_s = 610.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}\right) \quad \text{Pa} \quad \text{Gl. 3}$$

mit

θ	Lufttemperatur, °C
----------	--------------------

Da sich die abs. Luftfeuchtigkeit v_D aus zwei unabhängigen Grössen zusammensetzt, berechnet sich die Unsicherheit von v_D auf Grundlage der Fehlerfortpflanzung vereinfacht wie folgt (Gl. 4, [12]):

$$\delta v_D = v_D \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta \varphi}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\delta \theta}{\theta}\right)^2} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{Gl. 4}$$

mit

δv_D	Unsicherheit abs. Feuchtigkeit, kg/m ³
$\delta \varphi$	Unsicherheit der rel. Luftfeuchtigkeit, -
$\delta \theta$	Unsicherheit der Lufttemperatur, °C

Die einfachen Standardabweichungen der Monatsmittelwerte für θ , φ werden hierzu als Unsicherheit der Mittelwerte betrachtet.



4.2.2 Luftwechselrate

Die Luftwechselrate beschreibt, wie oft das Luftvolumen eines Raumes/Bereiches pro Stunde ausgetauscht wird. Sie wird wie folgt berechnet (Gl. 5):

$$n = \frac{\dot{V}}{V} \quad \text{h}^{-1} \quad \text{Gl. 5}$$

mit

n	Luftwechselrate, h ⁻¹
\dot{V}	Volumenstrom, m ³ /h
V	Volumen des betrachteten Bereiches, m ³

Bei der Bestimmung der Luftwechselrate variiert das Bezugsvolumen je nach Betrachtungsbereich. Hierzu werden drei Fälle unterschieden (Bild 7):

- Fall "Badtüre zu": Badtüre ist geschlossen, Zustand Zimmertüren und Fenster unberücksichtigt. Der Luftwechsel bezieht sich auf das Badvolumen.
- Fall "Fenster zu": Badtüre ist geöffnet, Zimmertüren offen/geschlossen, Fenster geschlossen. Der Luftwechsel bezieht sich auf das Volumen vom Flur, der Küche sowie den Zimmervolumen, welche über geöffnete Türen mit dem Bad in Verbindung stehen. Die Volumina des Flurs und der Küche werden immer berücksichtigt, da der Flur an alle Räume grenzt und die Glasschiebetüre zur Küche nicht dicht ist.
- Fall "alle Zustände": Badtüre, Raamtüren und Fenster offen/geschlossen. Der Luftwechsel bezieht sich auf das Badvolumen.

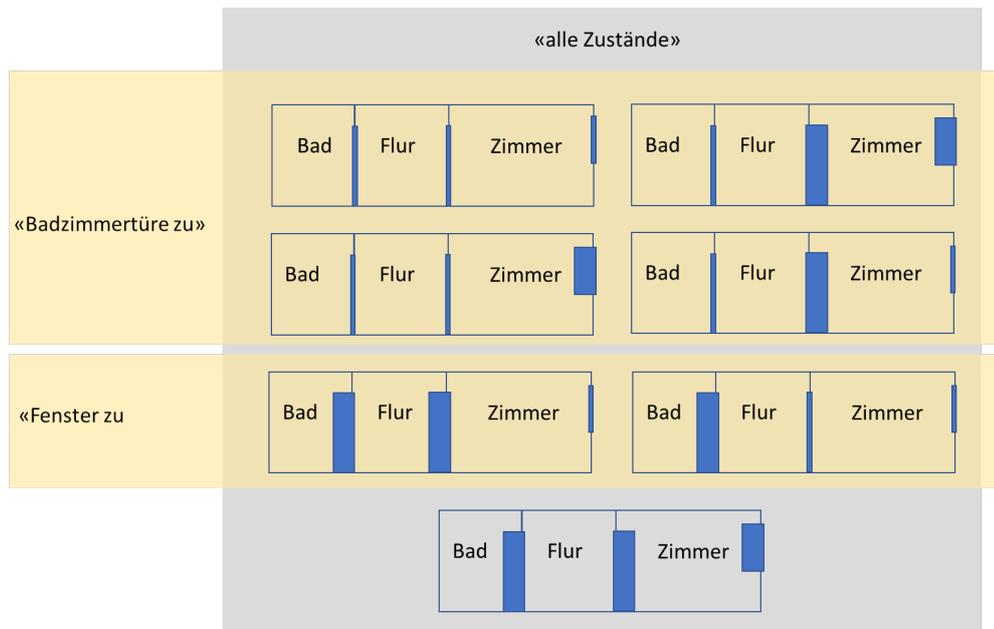


Bild 7 Schematische Darstellung der verschiedenen Fälle für den Luftwechsel.



Für die Berechnung des Luftwechsels wird der Volumenstrom im Abluftrohr verwendet. Der Volumenstrom wird über die gemessene Luftgeschwindigkeit (m/s) im Abluftrohr und mit Hilfe der vom Hersteller des Strömungsgeschwindigkeitssensors gegebenen Umrechnungstabelle berechnet.

Die angegebene Luftwechselrate beinhaltet keinen Luftaustausch, der über die restliche Wohnung im Bad zusätzlich initiiert wird (Leckagen, offene Türen). Da gemäss Bild 7 das betrachtete Bezugsvolumen kleiner ist, ist die Luftwechselrate bei geschlossener Badtüre damit grösser als bei geöffneter Türe.

Tabelle 2 Übersicht von Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom im Abluftrohr (Umrechnung gemäss [13]) und der daraus auf das Badvolumen (12.5 m³) bezogenen resultierenden Luftwechselrate.

Strömungsgeschwindigkeit	Volumenstrom	Luftwechselrate
m/s	m ³ /h	h ⁻¹
0.1	1.8	0.1
0.2	3.9	0.3
0.3	6.1	0.5
0.4	8.2	0.7
0.5	10.3	0.8
0.6	12.5	1.0
0.7	14.6	1.2
0.8	16.7	1.3
0.9	18.9	1.5
1.0	21.0	1.7
1.1	23.1	1.8
1.2	25.3	2.0
1.3	27.4	2.2
1.4	29.5	2.4
1.5	31.7	2.5
1.6	33.8	2.7
1.7	35.9	2.9
1.8	38.0	3.0
1.9	40.2	3.2
2.0	42.3	3.4

4.2.3 Rel. Luftfeuchtigkeit der Aussen- und Badezimmerluft

Um die Trocknungswirkung der Zuluft zu demonstrieren, wird für manche Auswertungen die relative Luftfeuchtigkeit der Aussenluft über den Zwischenschritt der absoluten Feuchte auf die relative Luftfeuchtigkeit bei der entsprechenden Badtemperatur umgerechnet. Hierfür werden die Gleichungen 1-3 aus Kapitel 4.2.1 verwendet.



4.2.4 Signal für Badtüre und Fensterlüftung

Für die Darstellung, ob die Badtüre geöffnet bzw. geschlossen ist und ob das Bad im Luftverbund/Luftaustausch mit der Wohnung steht bzw. zusätzlich eine Verbindung zur Aussenluft über geöffnete Fenster hat, werden zwei Signale verwendet:

- «Badtüre (BZ Türe)»: nur Badtüre: 0 (auf), 1 (zu)
- «Fensterlüftung (Fensterlüftung)»: Kombination aus Zimmertüre und Fenster desselben Raumes und der Badtüre (Bild 8)
 - 0 (auf), wenn (Zimmertüre und Fenster) = 0 (auf) und BZ Türe = 0 (auf)
 - 1 (zu), wenn (Zimmertüre und Fenster) = 0 (auf) und BZ Türe = 1 (zu)
 - 1 (zu), wenn (Zimmertüre und/oder Fenster) = 1 (zu) und BZ Türe = 0 (auf)

Nur wenn die Badtüre geschlossen ist, wird das Bad rein über die Schwerkraftlüftung belüftet und die angegebene Luftwechselrate entspricht dem von der Schwerkraftlüftung induzierten Luftaustausch.

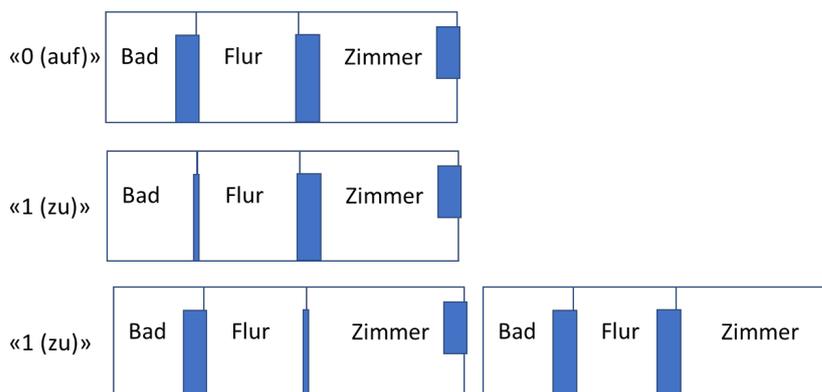


Bild 8 Schematische Darstellung des Signals für die Fensterlüftung. «0 (auf)»: das Bad hat über die geöffneten Türen und Fenster einen Anschluss an die Aussenluft. «1 (zu)»: das Bad hat keinen Anschluss an die Aussenluft.



4.2.5 Akkumulierte Temperaturdifferenzen und Heizgradtage

Um den gemessenen Heizwärmeverbrauch mit dem berechneten Heizwärmebedarf vergleichen zu können, muss zuerst der Verbrauch, der nur für die Monate September '22 bis Februar '23 vorliegt, auf einen Jahreswert hochgerechnet und auf das Standardklima umgerechnet werden. Dies erfolgt gemäss SIA 380:2022 [14] mit den akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD). Die akkumulierte Temperaturdifferenz ist die Summe aus der positiven Differenz der Basistemperatur und dem Tagesmittel der Aussenlufttemperatur. Die akkumulierten Temperaturdifferenzen werden vom HEV Schweiz [15] monatlich bereitgestellt und hier für die Klimastation Basel-Binningen verwendet. Es wird 12 °C als Basistemperatur verwendet. Als Grundlage für das Standardklima wird der langjährige Mittelwert aus der Periode 2017-2022 verwendet.

Mit den akkumulierten Temperaturdifferenzen wird der gemessene Heizwärmeverbrauch (sechs Monate) auf ein Jahr hochgerechnet (Gl. 6) und anschliessend auf das Standardklima umgerechnet (Gl. 7). Wird Gl. 6 in Gl. 7 integriert, kann die Umrechnung von einer gemessenen Periode auf ein Jahr mit Standardklima in einem Schritt erfolgen (Gl. 8).

Die Umrechnung auf ein komplettes Jahr erfolgt mit Gl. 6

$$Q_{H,an,Verbr} = \frac{\theta_{\Sigma,per,an}}{\theta_{\Sigma,per}} \cdot Q_{H,per,Verbr} \quad \text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) \quad \text{Gl. 6}$$

mit

$Q_{H,per,Verbr}$	Heizwärmeverbrauch für eine gemessene Periode < 1 Jahr, kWh/m ²
$Q_{H,an,Verbr}$	Heizwärmeverbrauch für ein Jahr hochgerechnet, kWh/(m ² a)
$\theta_{\Sigma,per}$	Akkumulierte Temperaturdifferenz für eine gemessene Periode < 1 Jahr, K/d
$\theta_{\Sigma,per,an}$	Akkumulierte Temperaturdifferenz für ein Jahr, K/d

Die Umrechnung auf das Standardklima ist wie folgt:

$$Q_{H,std,Verbr} = \frac{\theta_{\Sigma,std,an}}{\theta_{\Sigma,per,an}} \cdot Q_{H,an,Verbr} \quad \text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) \quad \text{Gl. 7}$$

mit

$Q_{H,std,Verbr}$	Heizwärmeverbrauch bei Standardklima, kWh/(m ² a)
$\theta_{\Sigma,std,an}$	Standardwert der akkumulierte Temperaturdifferenz für eine Jahr, K/d

Die Umrechnung von einer gemessenen Periode auf ein Jahr mit Standardklima:

$$Q_{H,std,Verbr} = \frac{\theta_{\Sigma,std,an}}{\theta_{\Sigma,per}} \cdot Q_{H,per,Verbr} \quad \text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) \quad \text{Gl. 8}$$

Dasselbe Verfahren wird vergleichend für die Heizgradtage (HGT) angewendet. Sie bilden sich aus der Summe der Differenzen der Rumlufttemperatur von 20 °C und der Aussenlufttemperatur, wenn diese tiefer als die Basistemperatur ist. Die Heizgradtage werden ebenfalls von [15] zur Verfügung gestellt.



5 Resultate

5.1 Übersicht

5.1.1 Monatliche Mittelwerte

Relative Luftfeuchtigkeit (Bild 9 a)

Die Schwerkraftlüftung wird eingesetzt, um die innenliegenden Bäder zu entfeuchten. Aus diesem Grund interessiert die rel. Luftfeuchtigkeit der einzelnen Bäder. Als Übersicht sind diese als monatliche Mittelwerte in Bild 9 oben dargestellt. Die mittlere rel. Luftfeuchtigkeit der meisten Bäder liegt in dem Bereich von 45-65 %. Nur die Bäder 1 OG-O und EG-W weisen z.T. Werte über 65 % auf. Wobei das Bad 1 OG-O mit über 70 % rel. Luftfeuchtigkeit von Mai bis August (unbewohnt) deutlich heraussticht. Insgesamt weisen die Ostbäder im Mittel eine höhere rel. Luftfeuchtigkeit als die Westbäder auf. Die Standardabweichungen der rel. Feuchtigkeit zeigt an, dass die rel. Luftfeuchtigkeit in den Bädern z.T. sehr stark schwankt. Grundsätzlich muss berücksichtigt werden, dass der frisch bezogene Neubau in Massivbauweise erstellt wurde und daher Bauaustrocknung während des Monitorings stattgefunden hat. Diese führt zu höheren Raumlufffeuchten.

Raumlufftemperatur (Bild 9 b)

Die Raumlufftemperaturen der einzelnen Bäder weisen eine Differenz von ca. 2-6 K auf. Ausser im März und April liegen die meisten Raumlufftemperaturen sehr nahe zusammen. Im Juli und August werden die höchsten Werte erreicht. Die Monatsmittelwerte der Raumlufftemperaturen der Bäder steigen im Mittel von ca. 20 °C auf knapp 27 °C von März bis August an. Im Mittel liegen die Badtemperaturen in dem Bereich von 21 – 23 °C. Die Standardabweichungen der Raumlufftemperaturen in den Bädern sind sehr gering. Dies weist auf recht konstante Raumlufftemperaturen hin.

Absolute Luftfeuchtigkeit (Bild 9 c)

Die mittlere absolute Luftfeuchtigkeit der Aussenluft ist immer tiefer als in den Bädern, so dass die Bäder i.d.R. über das Lüften entfeuchtet werden können. In den Sommermonaten steigt die absolute Luftfeuchtigkeit der Aussenluft jahreszeitlich bedingt an, so dass es mit dem Abtrocknen jahreszeitlich bedingt zu gewissen Zeiten schwierig werden kann. Die absolute Luftfeuchtigkeit schwankt stark.

Luftwechselrate (Bild 9 d)

(Luftwechselrate hier: Abluftvolumenstrom bezogen auf das Badvolumen, «alle Zustände»)

Die mittlere Luftwechselrate nimmt in den warmen Sommermonaten ab. In allen Bädern ist die mittlere Luftwechselrate im Juli am geringsten. Sie nimmt von März bis Juli von rund 1.0 h⁻¹ auf rund 0.5 h⁻¹ ab und steigt dann bis November/Dezember auf knapp 1.2 h⁻¹ an. Die grossen Standardabweichungen zeigen an, dass die Luftwechselraten stark schwanken.

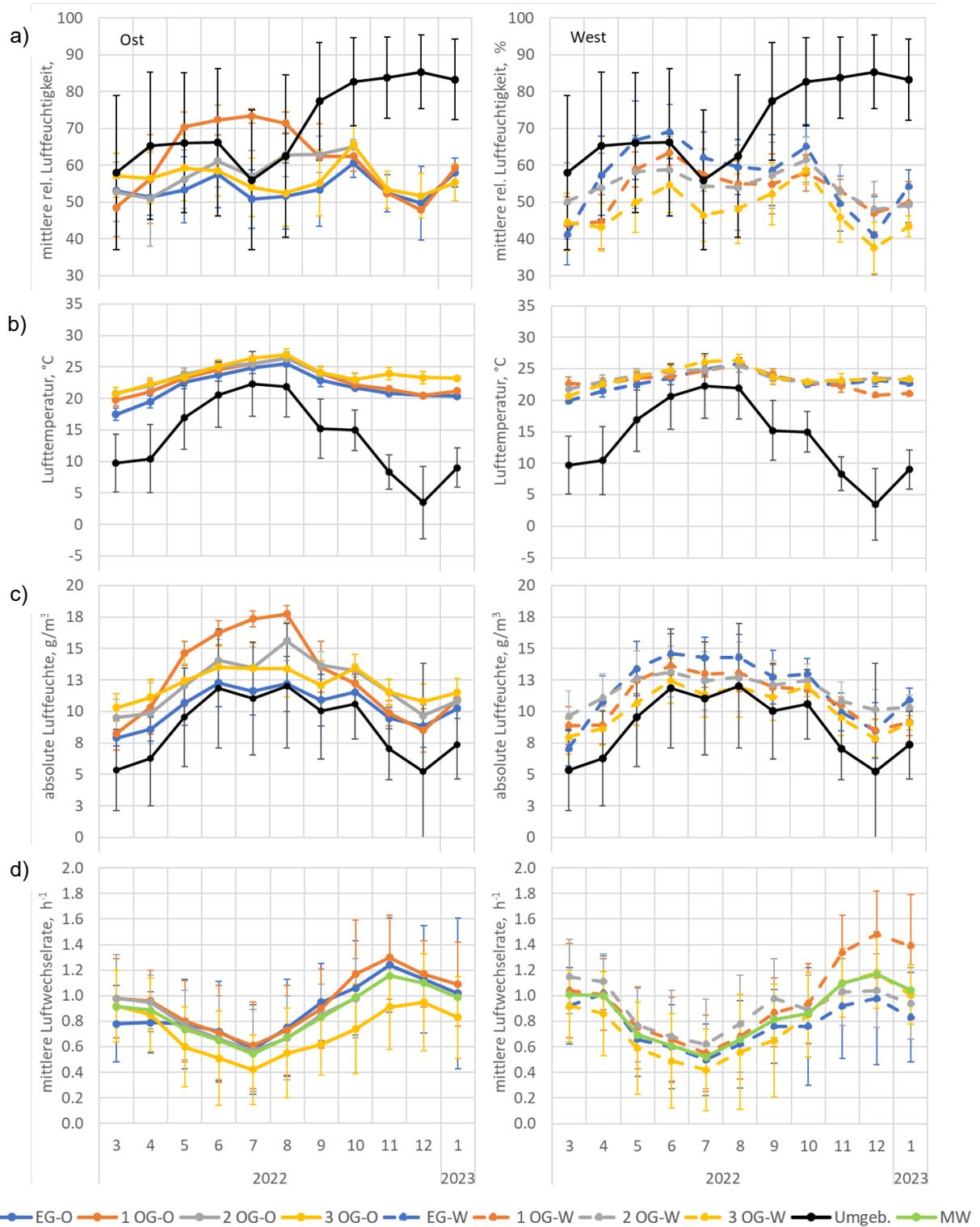


Bild 9 Monatliche Mittelwerte und einfache Standardabweichung der rel. Luftfeuchtigkeit (a), Lufttemperaturen (b), absoluten Feuchte (c, berechnet aus den Monatswerten) und Luftwechsel (d) in den Ost- und Westbädern («alle Zustände», bezogen auf das Badvolumen). Zum Vergleich ist die Aussenluft ebenfalls dargestellt.



Bild 10 zeigt oben für den Fall «alle Zustände» die mittleren Luftwechselraten der Bäder für jeden Monat im direkten Vergleich.

- Die mittleren Luftwechselraten sind im Sommer ausgeglichener als in den Übergangsjahreszeiten und im Winter. Im Juli beträgt die Differenz zwischen der tiefsten und höchsten Luftwechselrate ca. 0.2 h^{-1} , während sie Dezember bis zu knapp 0.6 h^{-1} erreicht. Wobei der Luftwechsel im 1. OG-W von Nov-Jan deutlich von seinem normalen Profil abweicht. Die Wohnung war von Oktober bis Dezember unbewohnt.
- Auf der Westseite weist das 3. OG immer die tiefsten Luftwechselraten auf. Während dies für das 3. OG auf der Ostseite nur bis Oktober gilt. Dies sind die Bäder mit den kürzesten Abluftrohren.
- Die Luftwechsel von EG-W bis 2 OG-W liegen i.d.R. recht nahe beisammen. Die Bäder der Wohnungen auf der Westseite weisen grössere Differenzen auf.
- Im Mittel beträgt die Luftwechselrate in den Bädern auf der Ost- und Westseite $0.9 \pm 0.3 / \text{h}^{-1}$ bzw. $0.8 \pm 0.7 \text{ h}^{-1}$. Im Mittel sind die Luftwechsel sehr ähnlich, aber auf der Westseite weist er eine grössere Schwankung auf. Im Vergleich zu dem Bemessungswerte für mechanisch belüftete Wohnungen mit kontinuierlicher Betrieb nach SIA 382/5:2021 für die untersuchten Bäder von 2.4 h^{-1} , ist dieser Wert sehr gering.
- Die monatliche Luftwechselraten für den Fall «Bad zu» ist unten in Bild 10 dargestellt. Die Luftwechselraten sind sehr ähnlich wie für den Fall «alle Zustände». Wobei angenommen wird, dass im Fall «alle Zustände» der reale Luftwechsel im Bad höher ist, da auch über die offene Badtüre und geöffnete Fenster ein Luftaustausch stattfindet, der hier nicht abgebildet werden kann. Eine Abhängigkeit des Luftwechsels mit der Lage der Bäder im Gebäude ist in dieser Zusammenstellung nicht zu erkennen.

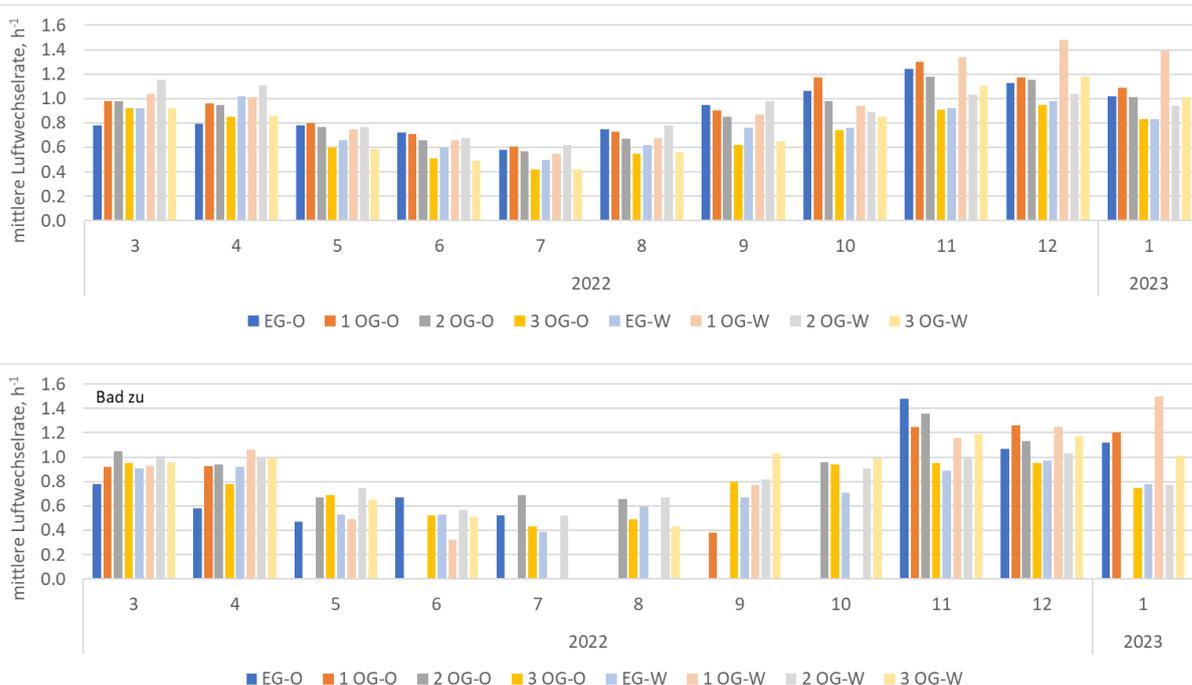


Bild 10 Monatliche Mittelwerte der Luftwechselrate in den Ost- und Westbädern (oben: alle Zustände, unten: Badtüre geschlossen, Abluftvolumenstrom wird in beiden Fällen auf das Badvolumen bezogen).



Es wurde erwartet, dass die Lage der Bäder im Gebäude einen deutlichen Einfluss auf die Luftwechselrate hat. Es wurde angenommen, dass je höher die Wohnung im Gebäude liegt, d.h. je kürzer das Abluftrohr ist, desto geringer ist der Luftwechsel im Bad. Während das 3. OG auf der Westseite immer der Erwartung entspricht, kann für das 3. OG auf der Ostseite die erwartete Reihenfolge nur von März bis September, also im wärmeren Halbjahr festgestellt werden.

Der dargestellte Luftwechsel stellt nur den über die Abluftrohre erfolgten Luftwechsel dar. Bei geöffneter Badtüre findet gleichzeitig ein Luftaustausch mit der restlichen Wohnungsluft und z.T. über geöffnete Fenster mit Aussen statt (Fall «alle Zustände»). Dieser zusätzlich Luftaustausch im Bad hat einen Einfluss auf die gezeigte Luftwechselrate, kann aber aus den verfügbaren Messdaten nicht getrennt ermittelt werden. Da in den meisten Wohnungen die Badtüre über 90 % der Zeit geöffnet ist, wird davon ausgegangen, dass die Luftwechselrate in den Bädern in der Realität höher ist, als hier dargestellt. Insbesondere in den Sommermonaten sind die Fenster sehr oft geöffnet, was zusätzlich zu höheren Luftwechselraten in den Bädern führt, in den hier gezeigten Luftwechselraten aber nicht berücksichtigt ist.

5.1.2 Dunstabzug und Duschvorgang

Eine generelle Übersicht des Zu- und Abluftverhaltens eines innenliegenden Bads im dritten Obergeschoss zeigt Bild 11. Die Geschwindigkeit im Zuluftrohr beträgt ca. 0.2 m/s und im Abluftrohr ca. 0.6 m/s (oben). 0.6 m/s entsprechen einem Luftwechsel im Bad von ca. 1 h⁻¹ (Tabelle 2). Da Fenster und Türen geschlossen sind, muss die Differenz des Volumen- bzw. Massenstroms zwischen Zu- und Abluft aus anderen Verbindungen im Bad kommen. Bei einem Blower-Door Test kann festgestellt werden, dass die Revisionsklappe zum Installationsschacht im Bad undicht ist. Zusätzlich besteht über den Installationsschacht eine Verbindung zum Elektroverteilerkasten/Sicherungskasten zum Flur. Es wird daher angenommen, dass sich die Abluft der Schwerkraftlüftung aus einem Teil, der durch das Zuluftrohr der Schwerkraftlüftung kommt und zu einem Teil, der aus dem Installationsschacht stammt, zusammensetzt.

Der Betrieb der Fortluft-Dunstabzugshaube in der Küche (ca. 19:10-19:25 Uhr) und ein Duschvorgang (ca. 20:20 Uhr) sind deutlich an den Messwerten zu erkennen. Während die Dunstabzugshaube läuft, treten erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 1.6 m/s im Zu- und Abluftrohr auf. Es ist zu erkennen, dass sich die Strömungsrichtung der Abluft umdreht (negative Werte bei der Luftgeschwindigkeit (rot), Bild 11 oben), so dass ein zusätzlicher Zuluftvolumenstrom entsteht. Eine Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s entspricht pro Rohr einem Luftwechsel von 2.7 h⁻¹, d.h. insgesamt liegt ein gut fünffacher Luftwechsel im Bad vor, solange der Dunstabzug läuft. Gleichzeitig sinken die Temperaturen der einströmenden Luft (Mitte) und die rel. Luftfeuchtigkeit in der Zuluft steigt entsprechend an (unten). Bei der Abluft kommt es kurzfristig zu einem Abfall der rel. Luftfeuchtigkeit (trockene Frischluft) bevor sie ansteigt, nachdem sich das Rohr entsprechend abgekühlt hat (kalte Frischluft). Insgesamt sinkt die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad leicht ab. D.h., wenn der Dunstabzug (bei geschlossenen Fenstern) läuft, strömt die Luft durch das Bad nach.

Aus hygienischen Gründen kann die Umkehr der Strömungsrichtung im Abluftrohr während des Betriebs der Fortluft-Dunstabzugshaube bedenklich werden. Infolge der gleichzeitigen erhöhten Strömungsgeschwindigkeit steigt das Risiko zur Geruchsbelästigung aus anderen Wohnungen. Der Geruchseintrag kann über die Schwerkraftlüftung (ggf. Ansaugen von Fortluft aus den anderen Wohnungen über die Dachauslässe) aber auch über den undichten Installationsschacht, den undichten Elektroverteilerkasten oder andere Leckagen erfolgen.

Hinweis: die Küchentüre ist eine Glasschiebetüre, die nicht dicht mit dem Rahmen abschliesst und zusätzlich ein kreisrundes Loch (Ø ca. 4 cm) als Türgriff aufweist.



Während des Duschvorgangs steigt die rel. Luftfeuchtigkeit im Abluftrohr auf ca. 93 %, sinkt danach in rund 15 min auf rund 62 % ab (unten). Während des Duschvorgangs ist eine leichte Erhöhung der Bad- und Ablufttemperatur zu verzeichnen (Mitte).

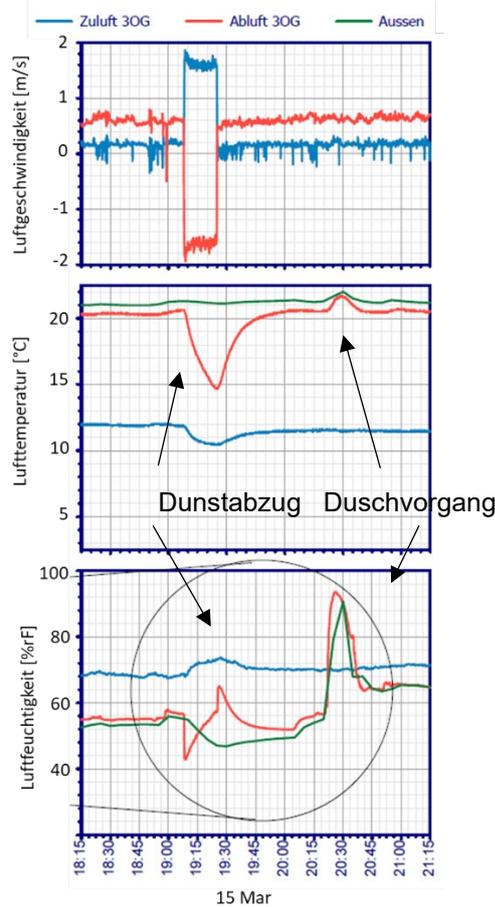


Bild 11 Generelles Verhalten in Zu- und Abluftrohr, wenn die Fortluft-Dunstabzugshaube in der Küche läuft und ein Duschvorgang stattfindet. Detailansicht 15. März 2022, Abendstunden.



5.1.3 Temperaturdifferenz Bad/Aussen

Bei der Schwerkraftlüftung spielen Druckdifferenzen am Gebäude und damit auch Temperaturdifferenzen zwischen Bad und Aussen eine grosse Rolle. Liegt die Temperatur der Aussen über bzw. bis zu höchstens ca. 1.5 K unter der Badtemperatur, wird die Luftgeschwindigkeit in dem Abluftrohr nahezu null und die Strömungsrichtung dreht sich ständig um. Die Luft macht pufferbewegungen. Es wird kein Abluftvolumenstrom induziert (Bild 12, 15.06./16.06. ca. 10:00 bis 00:00 Uhr, Abluft «aus»). Da kaum etwas strömt, stellen sich nahezu Aussenluftbedingungen im Abluftrohr ein. Erst wenn die Aussentemperatur mehr als ca. 1.5 K unter die Badtemperatur sinkt, ergibt sich eine definierte Luftgeschwindigkeit und Strömungsrichtung im Abluftrohr. Eine Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s im Abluftrohr entspricht einem Luftwechsel im Bad von 0.8 h^{-1} (Bild 12, 15.06./16.06. ca. 00:00 bis 10:00 Uhr, Abluft «an»). Am 15.06. und 16.06. wird das Bad nur in der ersten Tageshälfte belüftet. Die rel. Luftfeuchtigkeit erreicht im Bad am 16.06. um ca. 10 Uhr mit rund 72 % das Maximum.

Am 14.06. ist in der zweiten Tageshälfte die Aussentemperatur im Maximum um ca. 5 K wärmer als die Temperatur im Bad. Dies hat zur Folge, dass die Geschwindigkeit und die Richtung des Luftstroms im Abluftrohr stark hin und her schwanken.

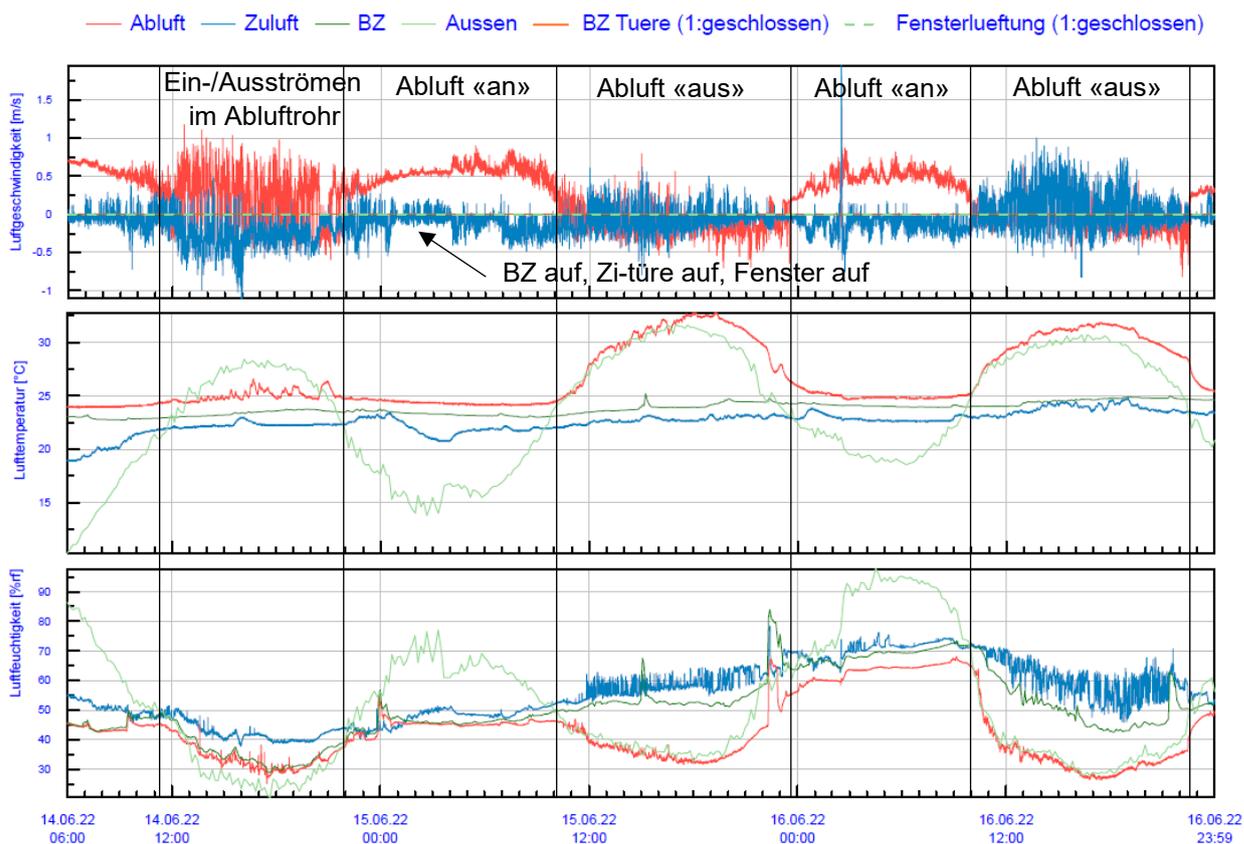


Bild 12 Generelles Lüftungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Bad und Aussen. Während der gesamten Zeit ist die Badtüre (BZ Tuere) geöffnet und mindestens in einem Zimmer sind das Fenster und die entsprechende Zimmertüre auf (Fensterlüftung). Damit weist das Bad eine Verbindung zur Aussenluft auf.



5.2 Detailbetrachtungen

5.2.1 Duschvorgang mit anschliessend geschlossener Badtüre (März)

Am 28.03.22 sind ab 21:30 Uhr zwei aufeinanderfolgende Duschvorgänge erkennbar. Bei jedem Duschvorgang steigt die rel. Luftfeuchtigkeit auf ca. 96 % im Bad an (Bild 13 unten, grüne Linie). Vor dem ersten Duschvorgang ist die Badtüre ab ca. 18:45 Uhr geöffnet, sowie mindestens in einem Raum ein Fenster und die entsprechende Zimmertüre (Bild 13 oben, grüne Linie). Die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad schwankt zwischen 40-65 % (Bild 13 unten, rote/grüne Linie). Während des ersten Duschvorgangs wird entweder die Zimmertüre oder das Fenster bzw. beides geschlossen. Die Badtüre bleibt geöffnet und die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad sinkt schnell auf rund 68 % ab. Es findet ein Luftaustausch mit der restlichen Wohnung statt.

Die Badtüre wird zum zweiten Duschvorgang geschlossen und steht anschliessend ca. 15 min offen, bevor sie wieder geschlossen wird (Bild 13 oben, orange Linie). Von ca. 22:30 bis 02:50 Uhr ist die Badtüre, bis auf einen kurzen Moment, geschlossen. Während die Türe geöffnet ist, sinkt die rel. Luftfeuchtigkeit von 100 % auf ca. 80 % ab, steigt bei geschlossener Türe aber wieder auf rund 88 % an.

Gemäss Logger hat sich die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad nach rund 2.5 Stunden auf ca. 62 % reduziert, während der Sensor in der Abluft noch 84 % rel. Luftfeuchtigkeit anzeigt. Nach rund vier Stunden wird die Badtüre wieder geöffnet und beide Sensoren zeigen dann recht konstant ca. 66 % rel. Luftfeuchtigkeit an. Es ist unklar, warum die rel. Luftfeuchtigkeit der Abluft und des Loggers im Bad im genannten Intervall eine solch grosse Differenz aufweisen, da sie i.d.R. immer sehr ähnliche Werte anzeigen. Evtl. dauert es länger, bis die Restfeuchte auf der Rohroberfläche verdunstet, während die Badluft schon trockener ist. Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen rund 0.55-0.75 m/s im Abluftrohr entspricht einer Luftwechselrate im Bad von ca. 0.9-1.3 h⁻¹.

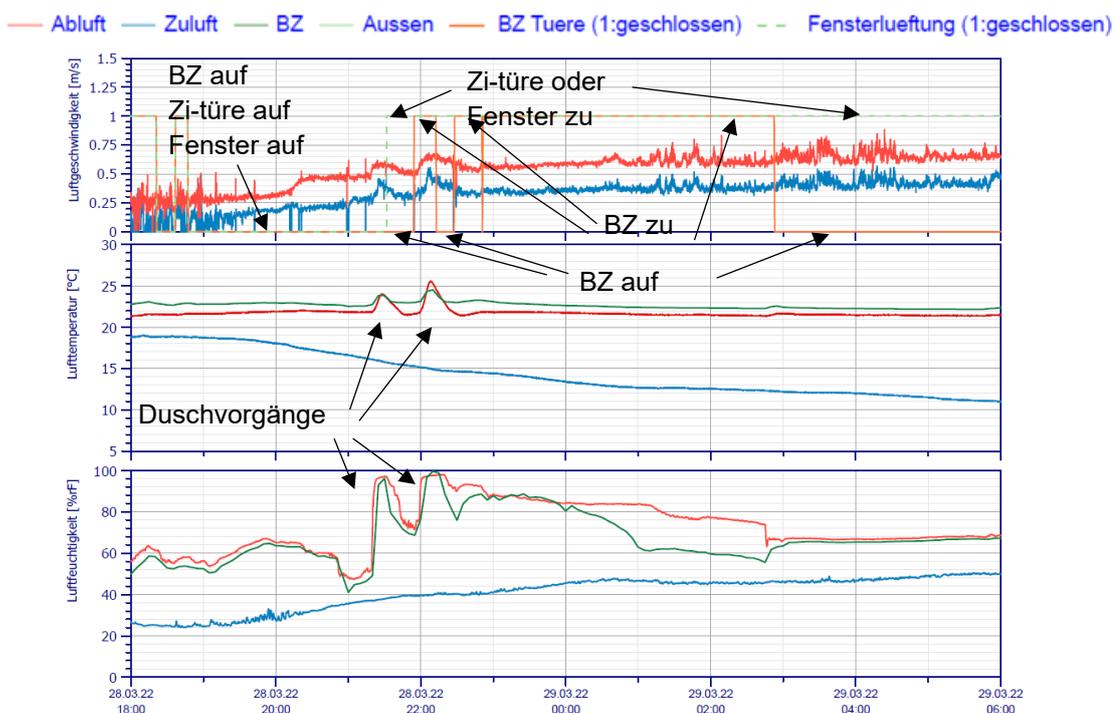


Bild 13 Duschvorgänge und Badtüre geschlossen (BZ Tuere: Badtür, Fensterlüftung: Zimmertüren und Fenster).



5.2.2 Duschvorgang mit anschliessend geöffneter Badtüre (Juni)

In folgendem Beispiel ist die Badtüre nur während des Duschvorgangs geschlossen, ansonsten immer geöffnet (Bild 14). Bis 10:15 Uhr ist zusätzlich mindestens ein Fenster sowie die zugehörige Zimmertüre geöffnet. Ab 10:15 Uhr wird entweder das Fenster oder die Zimmertüre geschlossen, so dass das Bad nicht mehr mit der Aussenluft in Verbindung steht.

Die rel. Luftfeuchtigkeit steigt während des Duschvorgangs schnell auf ca. 96 % an, sinkt aber innerhalb 30 min auf 56 % ab. Im Vergleich zum Fall mit geschlossenen Badtüre in Kapitel 5.2 sinkt hier, durch die Austrocknung infolge der Durchmischung mit der Wohnungsluft, die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad deutlich schneller.

Bis 10:15 Uhr weist das Bad im Mittel einen Luftwechsel von ca. 0.8 h^{-1} , bei einer mittlere Luftgeschwindigkeit im Abluftrohr von ca. 0.5 m/s , auf. Anschliessend reduziert sich die mittlere Luftwechselrate auf ca. 0.3 h^{-1} , bei einer mittlere Luftgeschwindigkeit von ca. 0.2 m/s im Abluftrohr. Ab ca. 11:00 Uhr ist die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Aussen so gering, dass keine Lüftung mehr über das Abluftrohr stattfindet.

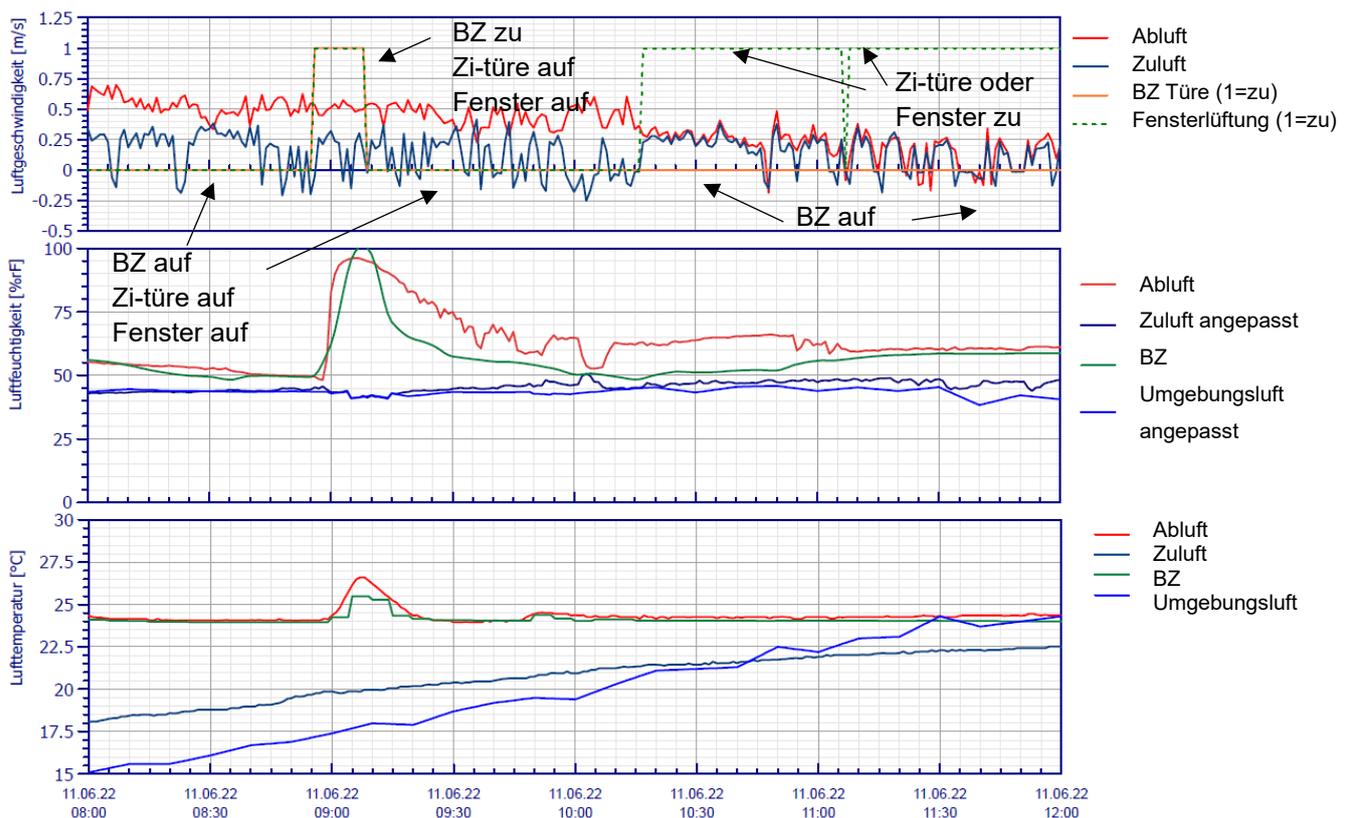


Bild 14 Duschvorgang und Badtüre geöffnet.



5.2.3 Lüftung an kalten Tagen (April)

Um ca. 8:00 Uhr am 31.03. wird die Badtüre geöffnet. Die rel. Luftfeuchte des Bads steigt von ca. 55 % sprunghaft auf 65 % an. Das Bad steht im Luftaustausch mit der restlichen Wohnung und ein Feuchteausgleich findet statt. In den folgenden rund 48 Stunden sinkt die rel. Feuchte im Bad auf rund 60 % ab. Es ist anzunehmen, dass dies auf die rel. Feuchte der gesamten Wohnung zutrifft. Die Feuchtereduktion erfolgt sehr langsam, da keine Anbindung zu Aussen besteht und der Feuchteabtransport für die gesamte Wohnung durch das Abluftrrohr erfolgt. Gemäss [16] kann man davon ausgehen, dass ab einer Türöffnungsweite über 10 cm eine gute Wirkung des Luftaustausches zwischen Bad und Wohnung stattfindet.

Am 02.04. ist die Badtüre von rund 9:00-17:00 Uhr geschlossen. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach einer Stunde die rel. Luftfeuchte im Bad von 60 % auf 45 % gesunken ist und nach acht Stunden auf 35 %.

Während der gesamten Zeit nimmt die Strömungsgeschwindigkeit in Zu- und Abluftrrohr leicht zu, da die Aussentemperatur von ca. 10 °C auf 0 °C sinkt. Ist die Badtüre geschlossen, wirkt die Schwerkraftlüftung nur auf das Badezimmerluftvolumen und eine rasche Reduktion der rel. Feuchte im Bad ist möglich. Ist die Badtüre geöffnet, wirkt die Schwerkraftlüftung auf das Luftvolumen der gesamten Wohnung und die rel. Luftfeuchte reduziert sich nur sehr langsam.

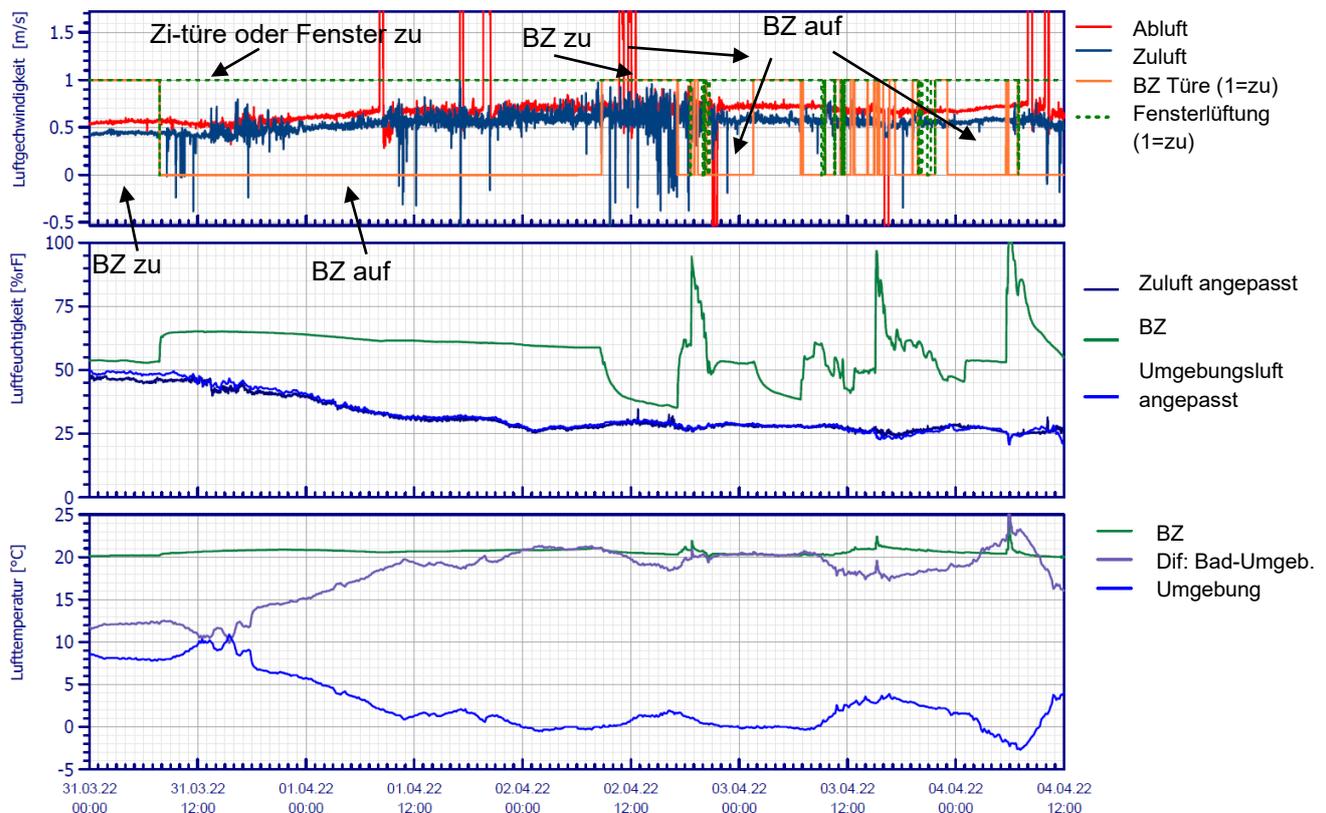


Bild 15 Kalte Periode: Badtüre geöffnet und anschliessend geschlossen.



Bei der grossen Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft ist die Wirkungsweise der Schwerkraftlüftung sehr gut zu sehen. Ist die Badtüre geschlossen, sinkt die rel. Luftfeuchte im Bad sehr rasch in der ersten Stunde ab und nimmt in den folgenden Stunden einen asymptotischen Verlauf an. Wenn die Badtüre geöffnet ist, trocknet das Bad sehr langsam ab, da es im Verbund mit der übrigen Wohnungsluft steht und der Luftaustausch über die Schwerkraftlüftung nur gering ist.

Bei tiefen Aussentemperaturen kann die Schwerkraftlüftung bei geschlossener Türe ein Abtrocknen des Bads sicherstellen. Ist die Türe geöffnet, hat die Schwerkraftlüftung kaum einen Einfluss auf die Wohnungslüftung.



5.2.4 Lüftung an warmen Tagen (August)

Bild 16 zeigt einen Ausschnitt für den 21.08.2022. Zwischen 15:00-19:00 Uhr gibt es keinen Unterschied zwischen Bad- und Aussenlufttemperatur (beide ca. 25 °C). Anschliessend sinkt die Aussenlufttemperatur innerhalb zwei Stunden von ca. 25 °C auf ca. 18 °C ab. Während die Badtemperatur weiterhin bei ca. 25 °C bleibt. Mindestens eine Zimmertüre und ein Fenster im selben Raum ist immer geöffnet, so dass bei geöffneter Badtüre das Bad Anbindung an Aussen hat.

Die Badtüre ist bis ca. 16:50 Uhr geöffnet. Die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad liegt vor dem ersten Duschvorgang bei 50 % und danach trotz Fensterlüftung recht konstant bei 70 %. Nach dem zweiten Duschvorgang ist zuerst die Badtüre geöffnet und das Bad trocknet auf von 100 % auf 75 % über die Fensterlüftung ab. Anschliessend wird die Badtüre geschlossen und die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad erhöht sich auf ca. 85 %. Da die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Aussen nur langsam zu nimmt, nimmt auch die Luftgeschwindigkeit in der Abluft nur langsam zu. Somit bleibt die rel. Luftfeuchtigkeit im Bad sehr hoch. Erst nach dem Öffnen der Badtüre (ca. 21:00 Uhr), sinkt die rel. Luftfeuchte innerhalb 15 min auf 55 % durch die Fensterlüftung ab.

Es zeigt sich, dass wenn die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Aussenluft sehr gering ist, über die Schwerkraftlüftung nicht gelüftet werden kann.

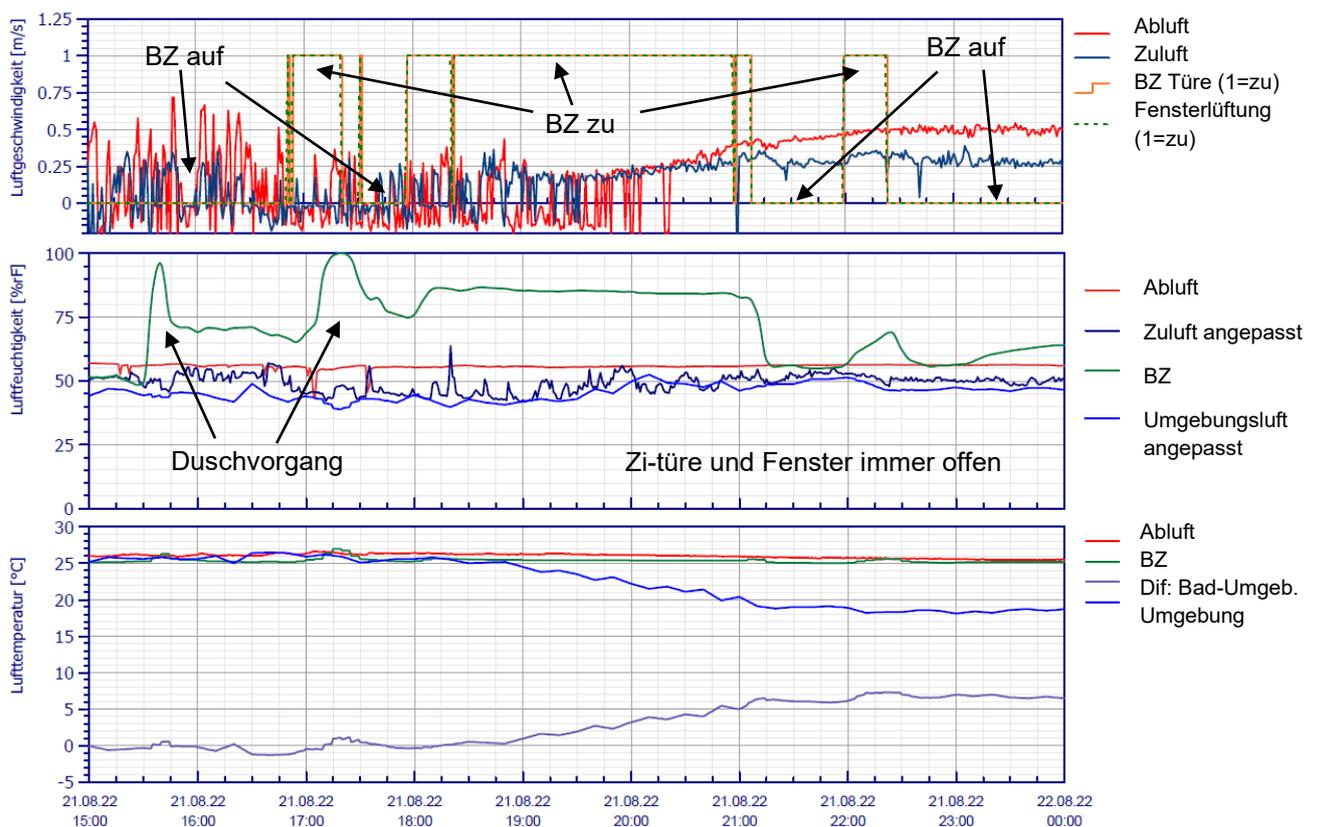


Bild 16 Warme Periode: zwei Duschvorgänge mit Badtüre erst geöffnet und dann geschlossen (BZ Türe Badtür, Fensterlüftung: Türen und Fenster). Während der gesamten Zeit ist immer mindestens eine Zimmertüre und ein Fenster im selben Raum geöffnet).



5.2.5 Unbewohnte Wohnungen (August/September)

Die Wohnungen 1. OG-O und 1. OG-W sind in August/September unbewohnt. In beiden Wohnungen steht zwischen Mitte August und Mitte September die Badtüre immer offen. In Wohnung 1. OG-O sind die Fenster/Zimmertüren geschlossen, während in 1. OG-W die meiste Zeit mindestens ein Fenster und die entsprechende Zimmertüre geöffnet ist (Bild 17).

- Bad 1. OG-O ist über die geöffnete Badtüre an die Wohnungsluft angeschlossen. Es hat aber keinen Anschluss an Aussen (Bild 17 a). Die rel. Luftfeuchtigkeit bleibt recht konstant auf 70 % (Bild 17 c). Deutlich ist zu erkennen, dass um die Mittagszeit bei den hohen Temperaturen der Aussenluft die Strömungsgeschwindigkeiten um 0 m/s schwanken (Bild 17 a). Die Luft bewegt sich in den Rohren hin und her. In der Nacht, wenn die Aussenlufttemperatur fällt, stellt sich wieder eine eindeutige Strömungsrichtung ein. Der Abluftvolumenstrom in der Nacht reicht jedoch nicht aus, um die rel. Luftfeuchtigkeit der gesamten Wohnung zu senken (vergl. Kap. 5.2.3).
- Bad 1. OG-W ist über geöffnete Türen und Fenster an Aussen angeschlossen. Die gemessene rel. Luftfeuchtigkeit in Bad 1. OG-W folgt der rel. Luftfeuchtigkeit der Aussenluft, bis das Fenster bzw. die Badtüren am 08.09.22 mittags geschlossen wird. D.h. das Bad wird über die normale Wohnungsfensterlüftung belüftet (Bild 17 c).
Die Luftgeschwindigkeit der Zuluft weist die meiste Zeit negative Werte auf (max. > -1.5 m/s). Dies bedeutet, dass sich die Strömungsrichtung im Zuluftrohr umkehrt. Das Zuluftrohr wird zum Abluftrohr. Die Badluft strömt auch über das Zuluftrohr nach aussen. Nur in wenigen Nachtstunden kommt Zuluft aus dem Zuluftrohr (Bild 17 b).
Der Einfluss der Wohnungsfensterlüftung auf die Abluft ist deutlich geringer als auf die Zuluft. In der Abluft werden nur leicht geringere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen als in Bad 1. OG-O. Bis auf wenige Tagesstunden mit hohen Aussenlufttemperaturen strömt die Abluft durch das Abluftrohr über das Dach ab.
- Die Badlufttemperaturen sind sehr ähnlich, wobei das Bad 1. OG-O ca. 1 K wärmer ist als das Bad 1. OG-W (Bild 17 d).

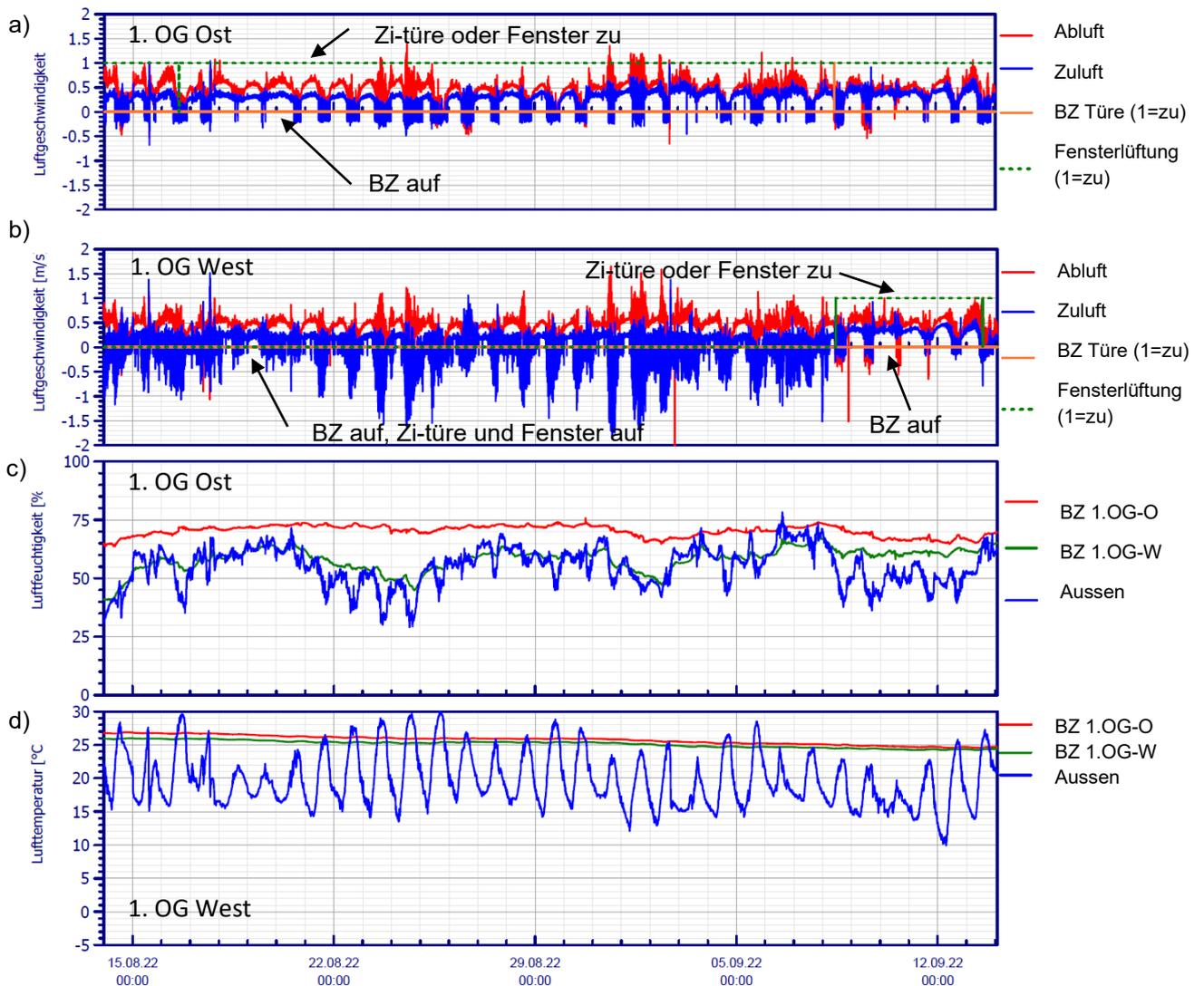


Bild 17 Vergleich der Bäder der unbewohnten Wohnungen 1. OG-O und 1. OG-W.



5.2.6 Windeinfluss

Das untersuchte Gebäude ist ca. 30° Nordost/Südwest ausgerichtet (Bild 18, links, Bezug längere Fassaden). Es liegt an einem Hang, der von Osten nach Westen ansteigt, d.h. südwestlich von dem Gebäude geht es noch leicht eine Böschung hoch, bevor das Plateau mit den nächsten Gebäuden kommt. Von Südwesten ist das Haus daher leicht windgeschützt. Auf der Nordostseite stehen Bäume vor dem Haus, die jedoch nur bis ca. zum 3. Stock reichen. Die Zuluft wird auf Bodenebene auf der Südwestseite gefasst. Die Fortluft wird über das Dach abgegeben. Die Öffnungen des Schachts sind Nordost-Südwest, parallel zu den Stirnseiten des Gebäudes, ausgerichtet.

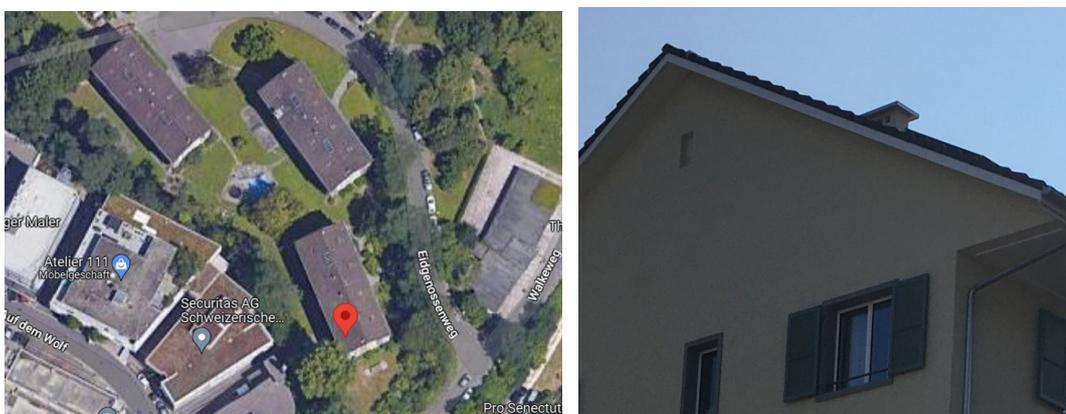


Bild 18 Das untersuchte Gebäude ist mit dem roten Symbol gekennzeichnet und Fortluftschacht auf dem Dach (Quelle: google.com; INEB)

Der Windeinfluss ist am 24.10.22 um ca. 18 Uhr gut zu erkennen (Bild 19). Es liegt eine Windgeschwindigkeit von rund 40 m/s (144 km/h) aus Südwest vor (Anzeige an der Messstation Basel-Binningen). Obwohl das Gebäude bei dieser Windrichtung im Lee der höhergelegenen Nachbargebäude liegt, scheint sich ein Teil des Windes zwischen Gebäude und Hang zu kanalisieren und somit einen Einfluss auf die Zuluft zu haben. Deutlich ist zu erkennen, dass die Zuluftgeschwindigkeit (blau) zu nimmt. Die Abluft erhöht sich leicht (rot), jedoch liegt sie im Rahmen ihrer normalen Schwankungen. Es wird daher davon ausgegangen, dass in diesem Fall der Wind nur einen Einfluss auf die Zuluft, aber nicht auf die Abluft hat.

Die Luftwechselrate der Westbäder in Abhängigkeit von der Windrichtung ist in Bild 20 dargestellt. Bis auf die Ostwindrichtung zeigen alle Luftwechselraten dieselbe Schwankungsbreite 0 - ca. 1 h⁻¹. Für die Ostrichtung ergibt sich ein Maximum von ca. 2 h⁻¹. Es ist zu vermuten, dass dies an der recht freien Anströmung der Gebäude von Osten liegt. Die grössten Windgeschwindigkeiten treten bei Ost- und Westrichtung auf. In Westrichtung steht das Gebäude im Lee der höher gelegenen Nachbargebäude und daher kann kein erhöhter Luftwechsel verzeichnet werden.

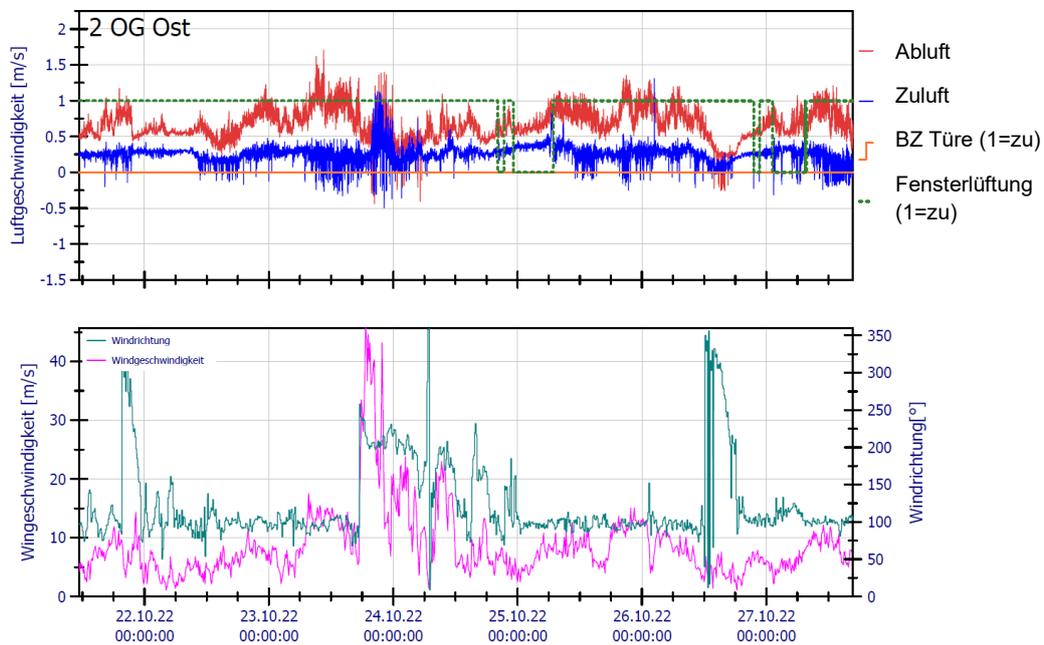


Bild 19 Windeinfluss 2. OG-O. Bild oben: Luftgeschwindigkeit im Zu- bzw. Abluftrohr (blau bzw. rot), Bild unten Windgeschwindigkeit (magenta) und -richtung (olivgrün).

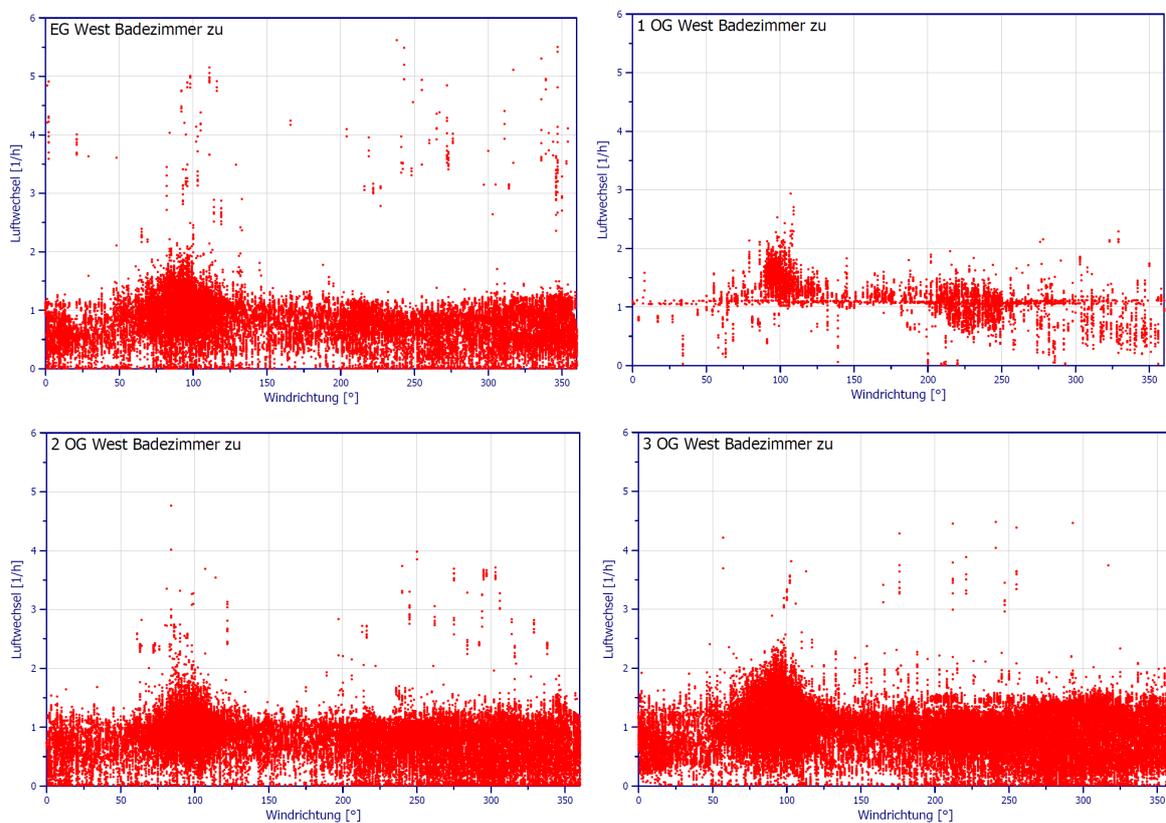


Bild 20 Einfluss der Windrichtung auf die Luftwechselrate für die Westbäder.



5.2.7 Volumenströme im Abluftrohr

Die Abhängigkeit des Abluftvolumenstroms von der Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft zeigt Bild 21 für alle Westbäder, Fall «Badtüre zu». Negative Temperaturdifferenzen bedeuten, dass die Aussenluft wärmer ist als die Luft im Bad (warme Sommertage). Eine starke Streuung der Abluftvolumenströme tritt bei jeder Temperaturdifferenz auf. Tendenziell nimmt bei grösseren Temperaturdifferenzen (ca. > 20 K, Winter) die Streuung ab. Bei Temperaturdifferenzen kleiner 5 K (Sommer) treten vermehrt auch negative Volumenströme auf. Dies bedeutet, dass sich die Strömungsrichtung im Abluftrohr bei warmen Aussentemperaturen z.T. umdreht, was hygienisch bedenklich werden kann. Volumenströme zwischen 10 - 20 m³/h treten sehr häufig auf, was einer Luftwechselrate zwischen 0.8 - 1.6 h⁻¹ bei geschlossener Badtüre entspricht.

Die Volumenströme sind geringer als die Bemessungswerte für eine mechanische Lüftung (Tabelle 1). Die blaue Linie bei 30 m³/h stellt den Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit einer mechanischen Lüftung dar.

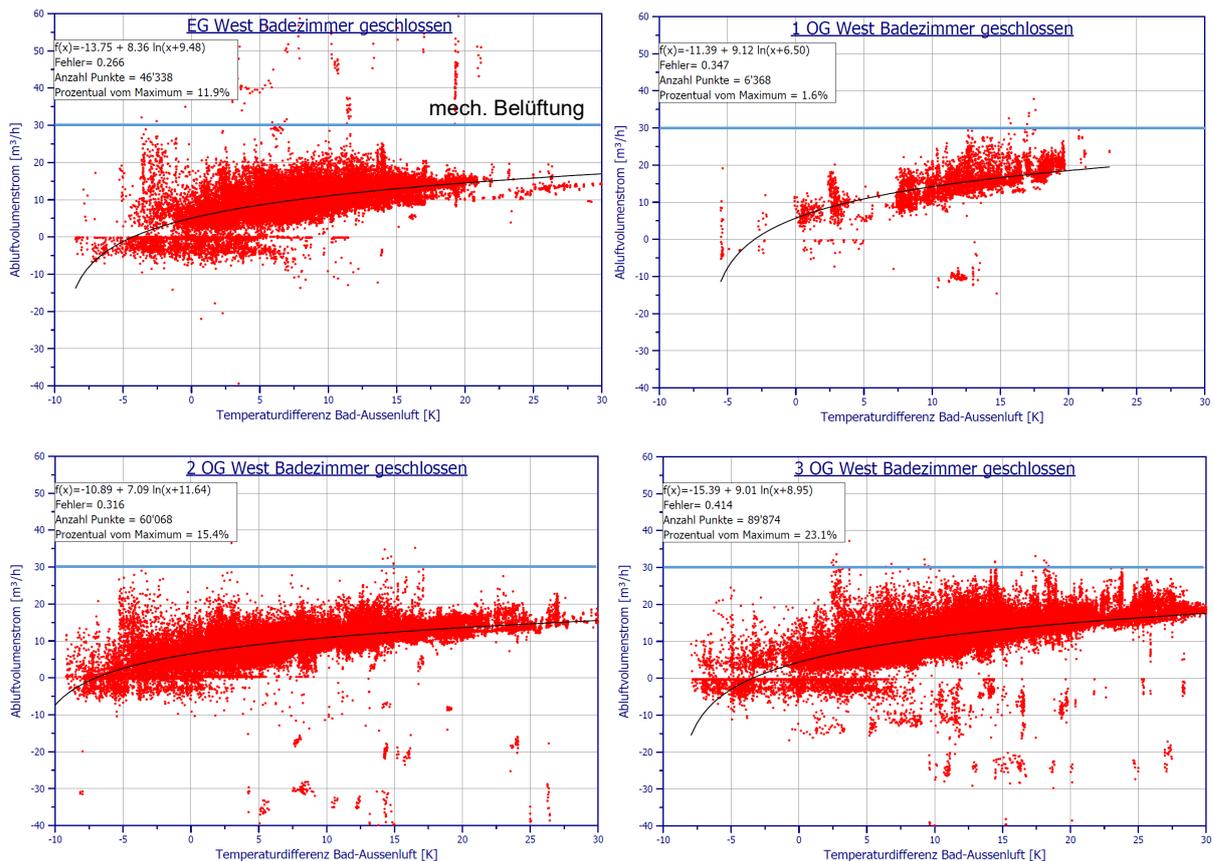


Bild 21 Fall «Badtüre zu»: Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Westbäder (Anhaltswerte: 10 m³/h -> 0.8 h⁻¹, 20 m³/h -> 1.6 h⁻¹). Periode 08.03.22 – 06.01.2023. Die Anzahl der dargestellten Messpunkte und deren prozentualer Anteil an den Gesamtmesspunkten ist angegeben. (Linie bei 30 m³/h: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung)



Bild 22 zeigt die Fälle «Fenster zu» und «alle Zustände». Die Streuung der Abluftvolumenströme wird grösser. Vermehrt werden auch Werte zwischen 20 - 30 m³/h erreicht. Dies entspricht einer Luftwechselrate im Bad von 1.6 - 2.4 h⁻¹. Die Luftwechselrate von 2.4 h⁻¹ entspricht dem Bemessungswert von SIA 382/5:2021 für einen kontinuierlichen Bedarf bei einer mechanischen Lüftung. Das Bad steht jedoch in diesen Fällen über eine geöffnete Badtür im Luftverbund mit den anderen Räumen. Daher müssen die Volumenströme auf das betrachtete Volumen von mehreren Räumen bzw. die ganze Wohnung bezogen werden. Dies führt zu sehr kleinen Luftwechselrate für den betrachteten Bereich.

Für den Fall «alle Zustände» steht das Bad auch über geöffnete Fenster mit der Aussenluft in Verbindung. Es ist gut zu sehen, dass geöffnete Fenster bei kleinen Temperaturdifferenzen zu höheren Abluftvolumenströmen aber auch zu einer vermehrten Umkehr der Strömungsrichtung bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten führen. Geöffnete Fenster haben einen deutlichen Einfluss auf die Wirkung der Schwerkraftlüftung.

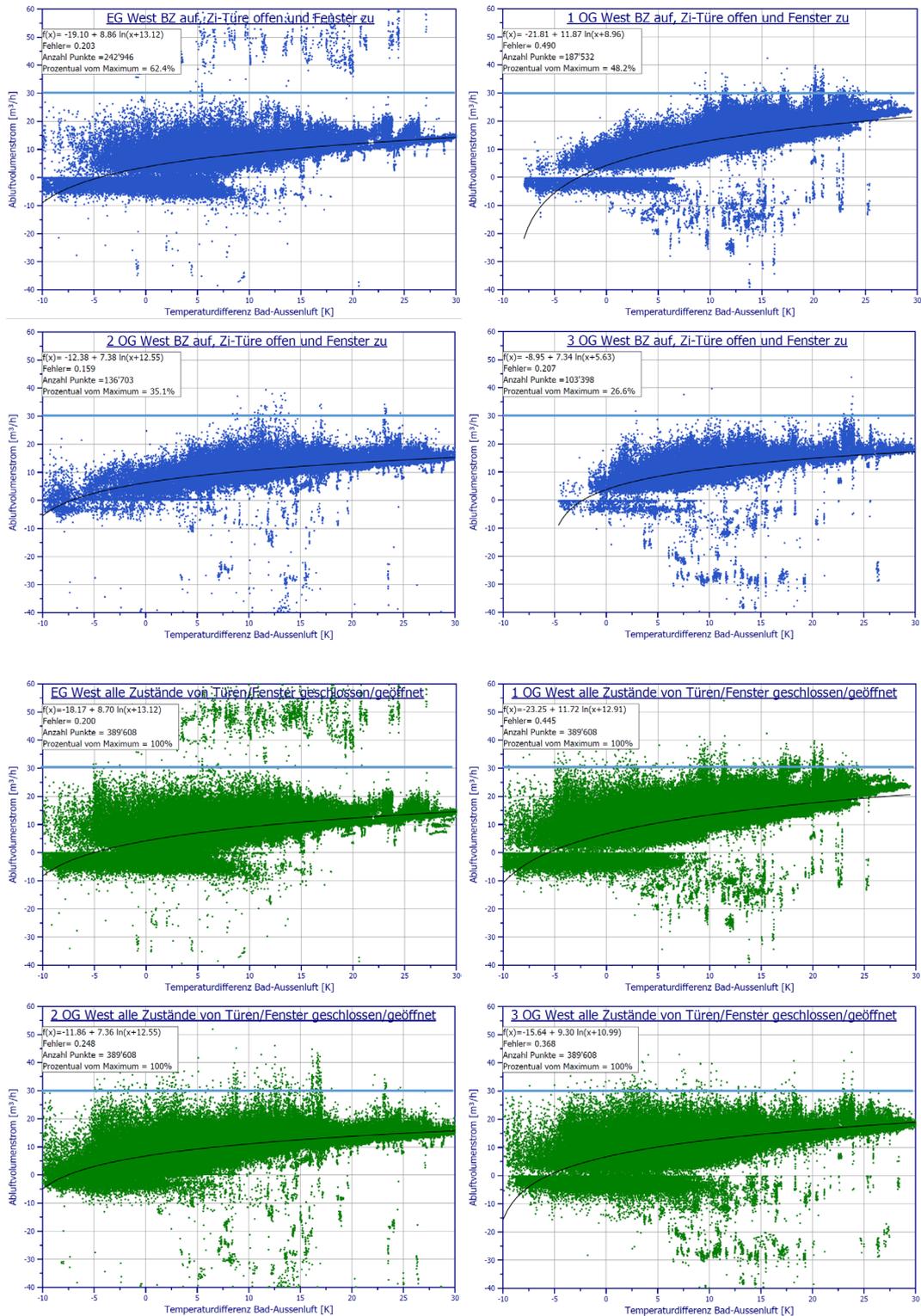


Bild 22 Fälle «Fenster zu» (blau) und «alle Zustände» (grün): Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Westbäder (Anhaltswerte: 10 m³/h -> 0.8 h⁻¹, 20 m³/h -> 1.6 h⁻¹). Periode 08.03.22 – 06.01.2023. Die Anzahl der dargestellten Messpunkte und deren prozentualer Anteil an den Gesamtmesspunkten ist angegeben. (Linie bei 30 m³/h: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung)



5.2.8 Luftwechselrate

Für die Westbäder zeigt Bild 23 die Luftwechselrate in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft. Deutlich ist zu sehen, dass die Luftwechselrate mit steigender Temperaturdifferenz grösser wird (rot: «Badtüre zu», grün «alle Zustände»). Der Anstieg ist asymptotisch und ab ca. 15 K Differenz (EG, 2. OG) tritt kaum eine weitere Änderung ein.

Bei EG, 2. OG und 3. OG ist zu erkennen, dass der Luftwechsel mit der Höhenlage der Wohnung leicht zu nimmt. Es ist unklar, warum die Luftwechsel im 1. OG so hoch sind.

Der Luftwechsel im Bad ist bei geschlossene Badtüre i.d.R. deutlich höher (rot), als wenn die Badtüre geöffnet ist und die Fenster geschlossen sind (blau). Bei «Fenster zu» steigt zwar der Abluftvolumenstrom leicht an (Bild 22), aber das Bezugsvolumen wird viel grösser, so dass der Luftwechsel sehr klein wird. D.h. die Schwerkraftlüftung hat keinen Einfluss auf die allgemeine Wohnungslüftung. In 2. OG und 3. OG scheint es viele Stunden zu geben, in denen zwar die Badtüre offen ist, aber die Zimmertüren geschlossen.

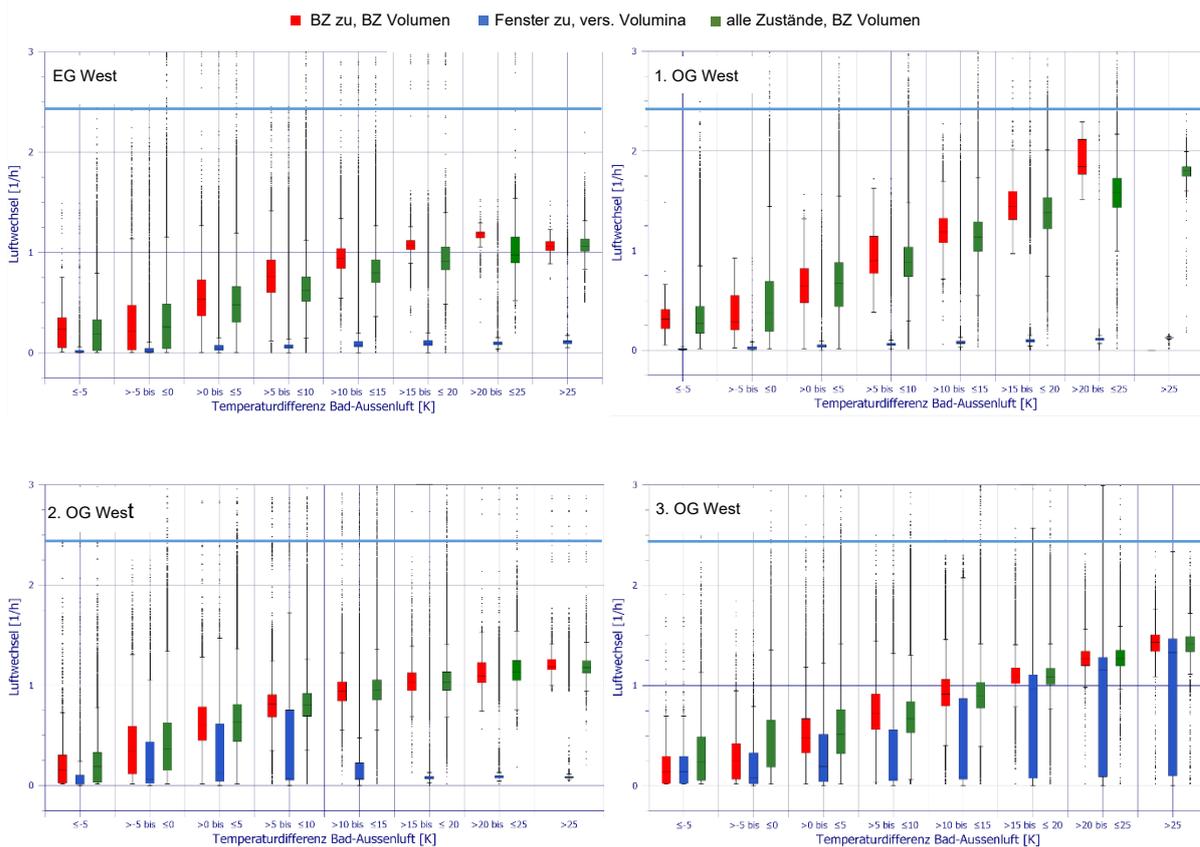


Bild 23 Boxplots der Luftwechselrate in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Westbäder. Periode 08.03.22 – 06.01.2023. Rot: «Badtüre zu» (Bezugsvolumen: Bad), blau «Fenster zu», grün «alle Zustände» (Bezugsvolumen: Bad). (Linie bei 2.4 h⁻¹: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung bezogen auf die untersuchten Bäder).

Bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Bad und Umgebung ($\Delta T > 10$ K) werden in der Regel Luftwechsel im Bad im Mittel von ca. 0.8-1.2 h⁻¹ erreicht. Bei Temperaturdifferenzen zwischen



0 K < $\Delta T \leq 10$ K treten Luftwechsel von ca. 0.5-0.8 h⁻¹ auf. Liegt die Badtemperatur über der Umgebungstemperatur ($\Delta T \leq 0$ K) reduziert sich der Luftwechsel auf ca. 0.1-0.5 h⁻¹.

Alle Bäder zeigen in den Sommermonaten tiefere Luftwechsel als in den Wintermonaten (Bild 24). Dies liegt an den kleiner werdenden Abluftvolumenströmen im Sommer, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft abnimmt. Im Winter ergibt sich eine mittlere Luftwechselrate im Bad von rund 1 - 1.2 h⁻¹, für «Badtüre zu» bzw. für «alle Zustände». Im Sommer liegt die mittlere Luftwechselrate bei rund 0.2-0.6 h⁻¹, wobei die Einzelwerte stark schwanken. Diese Werte stimmen mit den Aussagen aus Kap. 5.1.1. gut überein. Die ermittelten Luftwechsel sind deutlich kleiner, als sich der Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb einer mechanischen Lüftung für diese Bäder mit 2.4 h⁻¹ ergeben würde.

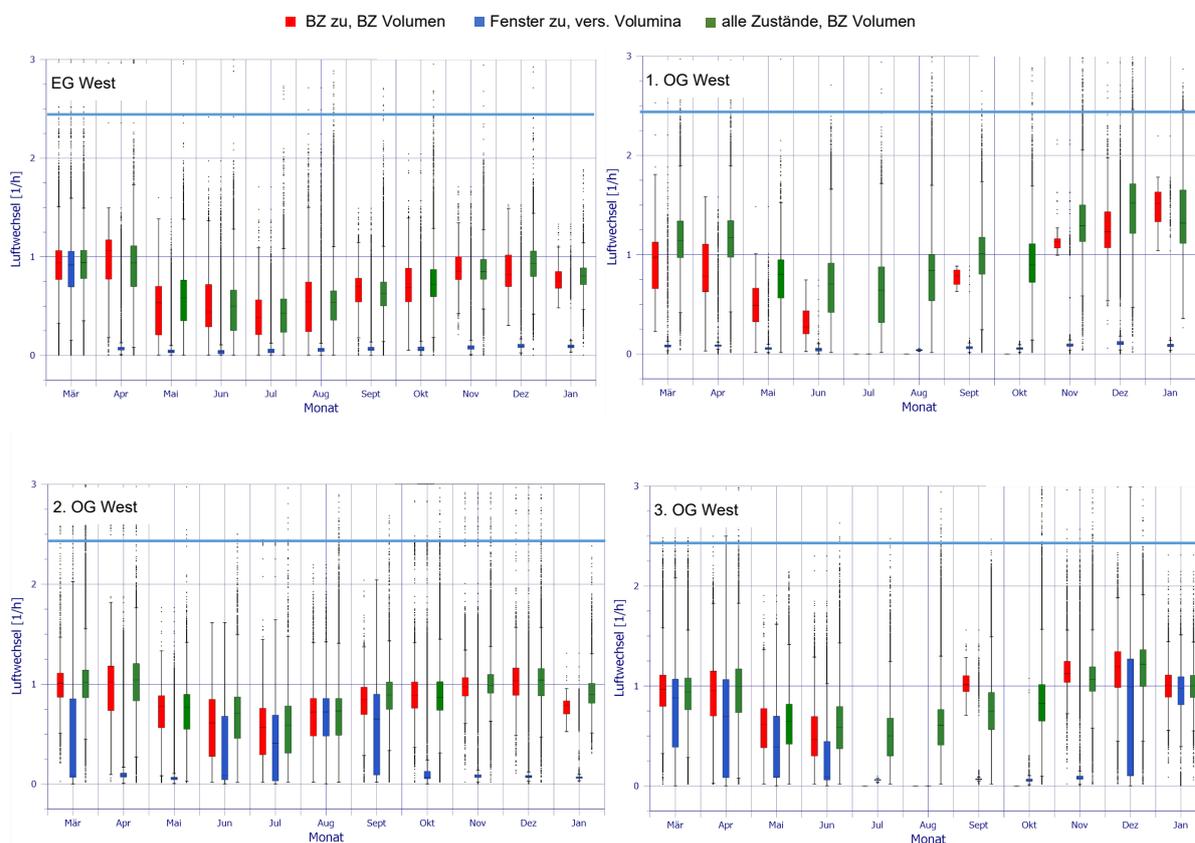


Bild 24 Boxplots der monatlichen Luftwechselrate aller Westbäder. Periode 08.03.22 – 06.01.2023. Rot: «Badtüre zu» (Bezugsvolumen: Bad), blau «Fenster zu» (Bezugsvolumen: je nach Situation), grün «alle Zustände» (Bezugsvolumen: Bad). (Linie bei 2.4 h⁻¹: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung bezogen auf die untersuchten Bäder).



5.2.9 Zulässige Raumlufffeuchte

Um Feuchteschäden zu vermeiden, darf gemäss SIA 180 [11] die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur gewisse Grenzen im Tagesmittel nicht überschreiten. Bild 25 zeigt dies für die Westbäder für den Fall «Badtüre zu». Da die Lufttemperaturen im Bad i.d.R. zwischen 20 – 25 °C liegen, sind die maximal zulässigen Tagesmittelwerte der rel. Raumlufffeuchtigkeit für die Raumlufftemperaturen 20 °C und 25 °C gegeben. Es ist gut zu erkennen, dass an den meisten Tagen die maximal zulässigen Tagesmittelwerte, selbst bei geschlossener Badtüre, unterschritten werden. Da die Badtüre hauptsächlich geschlossen ist, wenn geduscht wird und eine kurze Zeitspanne danach, d.h. hohe Belastungen vorliegen, ist dies der schlechteste Fall. Anzumerken ist, dass die dargestellten Tageswerte nicht auf Norm-Konformen 24-h Mittelwerten beruhen, sondern auf Mittelwerten über die Schliessungsdauer der Badtüre. Dies können z.B. auch nur 30 min an einem Tag sein.

Da die meiste Zeit des Tages jedoch die Badtüren offenstehen, sind für eine Gesamtbetrachtung auch die Fälle «Fenster zu» (Bild 26 oben, «echte» Tagesmittelwerte und kürzer Zeitspannen) und «alle Zustände» (Bild 26 unten, «echte» Tagesmittelwerte) interessant. Bei diesen Fällen verschiebt sich erwartungsgemäss die rel. Feuchte zu niedrigeren Werten, da das Bad im Luftaustausch mit der Wohnung bzw. auch über geöffnete Fenster mit der Aussenluft steht. Der Grenzwert für die rel. Raumlufffeuchtigkeit wird an fast allen Tagen eingehalten. Warum das EG die meisten Überschreitungen aufweist, ist unbekannt.

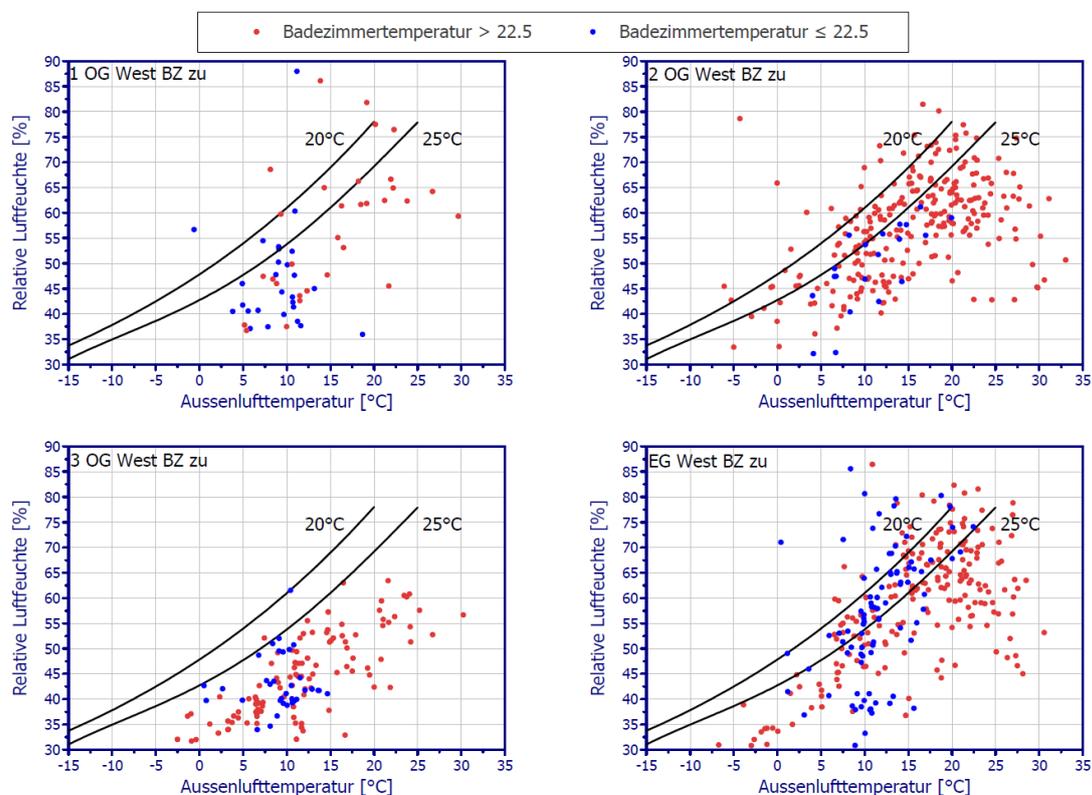


Bild 25 Fall «Bad zu»: maximal zulässige Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchtigkeit aller Westbäder in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Raumlufftemperaturen von 20 ° und 25 °C gemäss SIA 180. Anmerkung: Die hier gezeigten Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchtigkeit beziehen sich nur auf die kurzen Zeiten, in denen pro Tag die Badtüre geschlossen ist. Periode 08.03.22 – 06.01.2023.

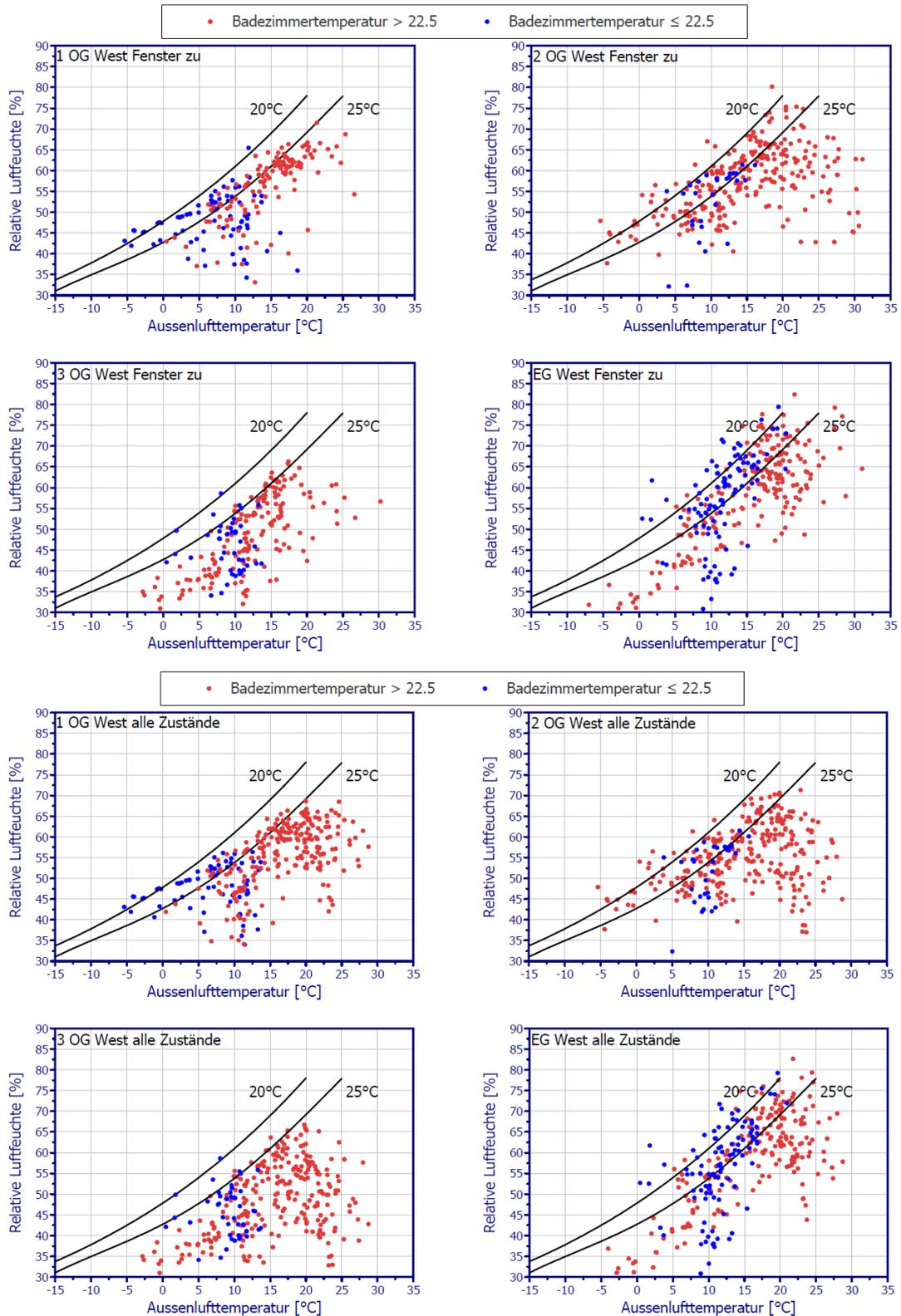


Bild 26 Maximal zulässige Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchtigkeit aller Westbäder in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Raumlufttemperaturen von 20 ° und 25 °C gemäss SIA 180. (oben: «Fenster zu», unten: «alle Zustände»). Periode 08.03.22 - 06.01.2023.



5.2.10 Schimmelrisiko

Um das Sporenauskeimungsrisiko auf Grundlage der LIM-Kurven (Kap. 3.3) zu bestimmen, müssen die Oberflächentemperaturen und -feuchten der innenliegenden Bäder geschätzt werden.

In den innenliegenden Bädern liegen die Raumlufftemperaturen immer über 20 °C. Die Raumlufftemperaturen der Wohnräume, die die innenliegenden Bäder umschliessen sind unbekannt, jedoch wird angenommen, dass diese ebenfalls mindestens 20 °C Lufttemperatur aufweisen. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die Oberflächentemperaturen der innenliegenden Bäder ebenfalls mindestens 20 °C beträgt und ungefähr der Badlufttemperatur entspricht.

Eine Oberflächentemperatur von 20 °C führt im Isoplethensystem bei Substratgruppe I zu einer dauerhaft zulässigen rel. Oberflächenfeuchte von knapp 76 %. Gemäss [17] kommt es bei einer Oberflächentemperatur von 20 °C nicht zur Sporenausbildung, wenn täglich sechs Stunden 85 % rel. Feuchte und 16 Stunden 60 % rel. Oberflächenfeuchte vorliegen. Erst wenn täglich während acht Stunden eine rel. Oberflächenfeuchte von 85 % vorliegt, setzt nach 20 Tagen Pilzbildung ein.

Oberflächenwerte von 20 °C und 76% entsprechen bei 21 °C Lufttemperatur 72 % rel. Luftfeuchte. Dieser Wert wird bei Fall «Badtüre zu» nur an manchen Tagen kurzzeitig (Bild 25) und für Fall «alle Zustände» nur an sehr wenigen Tagen als Tagesmittelwerte überschritten (Bild 26, unten). D.h. mehrere Tage hintereinander mit kontinuierlich hohen Luftfeuchten treten im bewohnten Zustand nicht auf, so dass gemäss LIM-Methode kein Sporenauskeimungsrisiko besteht.

Im Sommer stellt sich bei einer unbewohnten Wohnung mit geöffneter Badtüre und geschlossenen Fenstern eine Badlufttemperatur von ca. 25 °C und eine rel. Luftfeuchte von ca. 70 % über rund vier Wochen ein (Bild 17). Bei einer angenommenen Oberflächentemperatur von 24 °C ergibt dies 74 % rel. Oberflächenfeuchte. Gemäss LIM-Methode ist bei diesen Bedingungen für eine Oberfläche in Substratgruppe I nicht mit Sporenauskeimung zu rechnen.

Kritische könnte es an Sommertagen werden, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Umgebung sehr klein bzw. null ist, da kein Luftaustausch über die Schwerkraftlüftung erfolgt. Bleibt nach einem Duschvorgang die Badtüre mehrere Stunden geschlossen, trocknet das Bad nur sehr langsam ab (Bild 16). Bei den Bedingungen aus Bild 16 (Badlufttemperatur 25 °C und rel. Raumlufffeuchte 85 %) ergibt sich für eine angenommene Oberflächentemperatur von 24 °C eine Oberflächenfeuchte von 90 %. Würde die Badtüre über 24 Stunden geschlossen bleiben und sich dabei die Temperaturen und Feuchten nicht stark ändern, muss gemäss Substratgruppe I in Bild 5 nach 24 Stunden mit Sporenauskeimung gerechnet werden. Wäre die Oberflächentemperatur ebenfalls 25 °C, dann müsste die Badtüre zwei Tage bei gleichen Temperaturen und Feuchten geschlossen sein, um eine Sporenauskeimung zu ermöglichen. Im realen Gebrauch ist dies sehr unwahrscheinlich.

Daraus folgt, dass im (Hoch-)Sommer die Badtüre nicht 24 h am Tag geschlossen bleiben sollte und dass das innenliegende Bad über die normale Wohnungslüftung, d.h. über geöffnete Fenster belüftet werden sollte.



6 Mieterbefragung

Im Rahmen der Ablesung der Messdatenlogger Anfang Januar 2023 werden die Mieter:innen zu ihrem Eindruck zu der Schwerkraftlüftung befragt. Alle acht Wohnungen sind zum Zeitpunkt der Befragung belegt, es können aber nur in fünf Wohnungen die Mieter:innen befragt werden. Die anderen Parteien waren während der Befragungszeit abwesend.

Folgende Aussagen können zusammengestellt werden:

- Die Zuluft, in Höhe des Knöchels neben dem WC, wird entweder gar nicht oder nur schwach wahrgenommen und nicht als störend empfunden.
- Zwei Befragte haben beobachtet, dass die Lüftung stärker wird, wenn der Küchenabzug eingeschaltet ist, jedoch wird dies nicht als störend empfunden.
- Eine Person hat bemerkt, dass die Zuluft noch stärker wird, wenn es sehr windig ist und dieser Effekt verstärkt sich, wenn ein Fenster offen ist.
- Eine Person hat erwähnt, dass sie Gerüche aus anderen Wohnungen bemerkt. Es ist aber nicht eindeutig zuzuordnen, ob die bemerkten Gerüche wirklich über die Schwerkraftlüftung eingetragen werden oder über den undichten Installationsschacht bzw. andere Undichtheiten.
- Drei von fünf Befragten haben das Bedürfnis, die Badtüre nach dem Duschen zu öffnen, da sie das Gefühl haben, dass das Badezimmer sonst länger feucht bleibt.
- Vier von fünf Befragten würden die Badtüre ganz offenlassen, falls die Tür einmal geöffnet wäre.
- Im Sommer lassen viele der Befragten Fenster während einer längeren Zeit gekippt offen.
- Im Winter lüften drei von fünf der Befragten die Wohnung für ein paar Minuten vollständig durch und schliessen dann die Fenster wieder.
- Zwei Befragte haben angegeben, dass sie Fenster auch im Winter über einen längeren Zeitraum gekippt offenlassen.



7 Vergleich Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch

Der Heizwärmebedarf wird gemäss SIA 380/1:2016 zu $Q_H = 30.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ bestimmt. Der Heizwärmeverbrauch für den Zeitraum September 2022 bis Februar 2023 wird mittels der Wohnungswärmemengenzähler zu $Q_{H,\text{Verbr.}} = 21.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ für alle 16 Wohnungen bestimmt. Zwischen September '22 und Februar '23 stehen drei Wohnungen z.T. leer, was sich insgesamt auf 10 Monate Leerstand von 96 Monaten Vollbelegung summiert. Um dies zu berücksichtigen, wird der Verbrauch linear hochgerechnet und es ergibt sich ein theoretischer Verbrauch für alle 16 Wohnungen von $Q_{H,\text{Verbr.}} = 23.7 \text{ kWh}/\text{m}^2$ bei Vollbelegung für die sechs Monate. Dieser bildet die Basis für den Vergleich.

Vor dem Vergleich muss der Verbrauch gemäss Gl. 8 auf ein Jahr mit Standardklima umgerechnet werden. Für die akkumulierte Temperaturdifferenz wird das langjährige Mittel der Periode 2017-2020 herangezogen und für die Heizgradtage die Periode 2011-2020. Mit den beiden langjährigen Mittelwerten ergeben sich folgende Werte für den standardisierten Heizwärmeverbrauch:

- $Q_{H,\text{std,Verbr}} = 33.6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ mit akkumulierten Temperaturdifferenzen
- $Q_{H,\text{std,Verbr}} = 35.3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ mit Heizgradtagen

Es zeigt sich, dass der standardisierte Heizwärmeverbrauch je nach Verfahren um 10 % (akkumulierte Temperaturdifferenzen) bzw. 16 % (Heizgradtagen) höher liegt als der berechnete Heizwärmebedarf. Lt. [18] haben die Nutzer:innen einen Einfluss auf den Wärmeverbrauch von $\pm 50 \%$. Eine weitere Studie belegt einen mittleren Mehrverbrauch durch die Nutzer:innen von 44 % [19]. Damit liegt der Mehrverbrauch im Rahmen dessen, was in der Literatur durch den Einfluss der Nutzer:innen erwartet wird. Zusätzlich ist es der erste Winter nach der Erstellung des Neubaus in Massivbauweise. Infolge der Bauaustrocknung kann es zu mehr Lüftungsaktivitäten kommen, was den Heizwärmeverbrauch erhöht. Aufgrund der durchweg hohen Badtemperaturen ist anzunehmen, dass auch die Wohnungen höher als die normative Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizt werden. Dies erhöht ebenfalls den Heizwärmeverbrauch. Es ist davon auszugehen, dass der Mehrverbrauch auf die Mieter:innen zurückzuführen ist und die Schwerkraftlüftung zu keinem erhöhten Heizwärmeverbrauch führt.

Gemäss Rücksprache mit dem Vermieter sind die Wohnungen immer angenehm warm. Es ist also davon auszugehen, dass trotz der hohen Energiepreise die Raumtemperaturen nicht reduziert werden. Obwohl ein Mehrverbrauch vorhanden ist, wird der Grenzwert gemäss SIA 380/1:2016 von $Q_{H,\text{li}} = 35.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ unterschritten.

Als Nachtrag kann der Heizwärmeverbrauch für das gesamte Jahr 2023 bestimmt werden. Mit den beiden langjährigen Mittelwerten ergeben sich folgende Werte für den standardisierten Heizwärmeverbrauch für das Jahr 2023:

- $Q_{H,\text{std,Verbr,2023}} = 30.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ mit akkumulierten Temperaturdifferenzen (+2 %)
- $Q_{H,\text{std,Verbr,2023}} = 30.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ mit Heizgradtagen (+ 0%)

Dies entspricht fast genau dem gemäss SIA 380/1:2016 berechneten Heizwärmebedarf.

Aus den Abluftvolumenströmen und den Temperaturdifferenzen Bad-Umgebung wird der Wärmeverlust über die Schwerkraftlüftung berechnet. Dieser beträgt $1'900 \text{ kWh}/\text{a}$ für die acht Bäder (Temperaturdifferenz Bad gg. Aussenluft). Da in diesem Gebäude zusätzlich noch acht innenliegende WC mit Schwerkraftlüftung ausgerüstet sind, verdoppelt sich der genannte Wert auf $3'600 \text{ kWh}/\text{a}$, was $2.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für das gesamte Gebäude entspricht. Damit beträgt der Anteil der Schwerkraftlüftung am standardisierten Heizwärmeverbrauch ca. 8 %.



8 Vergleich Schwerkraftlüftung und Bad-Abluftventilator

Bei Gebäude mit manueller Fensterlüftung müssen innenliegende Bäder entfeuchtet werden. Dies erfolgt üblicherweise mit Bad-Abluftventilatoren, deren Fortluft über das Dach abgeleitet wird.

Da die Schwerkraftlüftung anstatt eines bedarfsgesteuerten Bad-Abluftventilators installiert wird, wird sie mit diesem System auf einer theoretischen Basis verglichen. Für einen bedarfsgesteuerter Betrieb z.B. Bad-Abluftventilatoren sind 50 m³/h in SIA 382/5:2021 bzw. 60 m³/h in prSIA 382/1:2022 vorgesehen. Unter der Annahme, dass der Bad-Abluftventilator für eine Badbelegung inklusive 5 min Nachlaufzeit 15 min in Betrieb ist, ergibt dies einen mittleren Volumenstrom für eine Stunde von 12.5 bzw. 15 m³/h was einem Luftwechsel von 1.0 bzw. 1.2 h⁻¹ entspricht. Ist das Bad nicht belegt, d.h. der Bad-Abluftventilator ausgeschaltet, finden kein Luftaustausch statt. Unter der Annahme, dass der Bad-Abluftventilator in 24 h für 120 min in Betrieb ist (2 Personen), ergibt sich ein gemittelter Luftwechsel über 24 h von 0.3 bzw. 0.4 h⁻¹. Dies liegt deutlich unter den mittleren Luftwechsel der Schwerkraftlüftung im Winter von ca. 1.0-1.2 h⁻¹. Im Sommer nähern sich die Luftwechsel an (mittlere Luftwechsel der Schwerkraftlüftung ca. 0.2-0.6 h⁻¹).

Neben den untersuchten Bädern gibt es in anderen Wohnungen noch acht innenliegende WC, die ebenfalls mit Abluftventilatoren ausgerüstet werden müssten. Es wird davon ausgegangen, dass diese pro Tag 60 min in Betrieb sind. Daraus kann grob ein Wärmeverluste von 1.2 kWh/(m² a) über alle 16 Abluftventilatoren für das Gebäude berechnet werden¹. Der Wärmeverlust über die Abluftventilatoren ist damit rund halb so hoch wie bei der Schwerkraftlüftung.

Die Treibhausgasemissionen für die Erstellung für die Schwerkraftlüftung und Bad-Abluftventilatoren wird mit Hilfe der KBOB-Liste (KBOB;2022 v4) grob berechnet (Tabelle 3). Den grössten Anteil bei der Schwerkraftlüftung machen die Sammelschächte für die Luftfassung im Keller aus. Der zweitgrösste Anteil sind die Zu- und Abluftrohre. Die Zu- und Abluftventile spielen eine untergeordnete Rolle. Da für die Bad-Abluftventilatoren deutlich weniger Rohre und keine Sammelschächte benötigt werden, schneidet dieses Lüftungssystem bzgl. Treibhausgasemissionen für die Erstellung besser ab.

Tabelle 3 Treibhausgasemissionen für die Erstellung für die Konzepte Schwerkraftlüftung und Bad-Abluftventilatoren berechnet für die untersuchten Bäder bezogen auf die Energiebezugsfläche der Wohnungen (666 m²). Die Bad-Abluft benötigt neben den Abluftröhren, Ventilatoren (hier gleichgesetzt mit Zuluftventil, 100 % Kunststoff/90% Metall), definierte Zuluftöffnungen (hier gleichgesetzt mit Abluftventil, 100 % Kunststoff) und Überströmöffnungen in der Badtüre und einer weiteren Zimmertüre.

Anzahl	Komponente	Schwerkraftlüftung	Bad-Abluft	Einheit
4	Zuluftventile	29.5	29.5	kgCO ₂ -eq
4	Abluftventile	31.9	31.9	kgCO ₂ -eq
2	Sammelschächte	450	---	kgCO ₂ -eq
4	Zuluftrohre	123	---	kgCO ₂ -eq
4	Abluftröhre	222	222	kgCO ₂ -eq
16	Türüberströmmoff.	---	36.5	kgCO ₂ -eq
	Total	856	320	kgCO ₂ -eq
	spezifisch	1.3	0.5	kgCO ₂ -eq/m ² EBF

¹ Annahme: Badtemp.: 21 °C, Jahresmitteltemp. 10.5 °C, spez. Wärmekap. 1020 J/(kg K), Dichte 1.2 kg/m³



9 Diskussion und Fazit

Einfluss auf Luftaustausch

Nur wenn die Badtüre geschlossen ist, kann man davon ausgehen, dass der Luftwechsel im Bad (weitestgehend) durch die Schwerkraftlüftung induziert wird. Sobald die Badtüre geöffnet ist, ist das Bad an das Luftvolumen der Wohnung angeschlossen und ein Luftaustausch zwischen Bad und Wohnung findet statt. Undichtheiten in der Gebäudehülle sowie geöffnete Fenster haben dann einen zusätzlichen Einfluss auf den Luftaustausch im Bad bzw. der Wohnung, der mit dem Monitoring nicht quantifiziert werden kann. Es wird angenommen, dass in diesen Fällen der Luftwechsel im Bad grösser als hier dargestellt ist. Es wird versucht, diese verschiedenen Zustände mit den drei Fällen «Bad zu», «Fenster geschlossen» und «alle Zustände» abzudecken.

Öffnungszustand der Badtüren

Das Monitoring zeigt, dass in den untersuchten Wohnungen die Badtüren fast immer geöffnet sind. D.h. der Luftwechsel im Bad wird ausser durch die Schwerkraftlüftung fast immer auch über die Wohnung und Fensteröffnung beeinflusst. Trotzdem kann der saisonale Einfluss der Schwerkraftlüftung nur auf das Badvolumen (Fall «Bad zu») bestimmt werden. Die zugrundeliegenden Zeitspannen sind jedoch sehr kurz.

Zuluftventil

Der Einfluss des Öffnens und Schliessens des Zuluftventils mit der Lichtschaltung des Bads kann nicht quantifiziert werden. Da die Bäder an einen undichten Installationsschacht angeschlossen sind, wird die Zuluft ersatzmässig über diesen Installationsschacht gezogen. Die erweiterte Öffnungsstellung des Zuluftventils bei «Licht an» wird dadurch irrelevant, da es auch schon im «geschlossenen» Zustand eine leichte Öffnung aufweist.

Umkehr der Strömungsrichtung

Während des Betriebs der Fortluft-Dunstabzugshaube in der Küche und kommt es zu einer Umkehr der Strömungsrichtung im Abluftrohr mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Diese Rückströmung ist aus hygienischen Gründen zu vermeiden. Zusätzlich steigt damit das Risiko der Geruchsbelästigung aus anderen Wohnungen. Wobei der Geruch nicht nur über die Schwerkraftlüftung übertragen werden kann (ggf. über Dachauslässe), sondern auch über den undichten Installationsschacht bzw. Elektroverteilerkasten und anderen Leckagen. Die beim Kochen anfallende Feuchtigkeit muss über die manuelle Fensterlüftung abgeführt werden.

Eine Umkehr der Strömungsrichtung im Abluftrohr tritt auch in Verbindung mit geöffneten Fenstern auf. Bei hohen Aussenlufttemperaturen macht die Luft schwache hin und her Bewegungen in den Rohren. Auch diese minimalen Rückströmungen sollten aus hygienischer Sicht vermieden werden.

Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung

Die Messungen zeigen, dass im untersuchten Gebäude im Winter die Schwerkraftlüftung die innenliegenden Bäder bei geschlossener Tür ausreichend entfeuchtet. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft wird, desto geringer werden die Luftwechselraten bei geschlossener Badtüre. D.h. im Sommer dauert das Abtrocknen deutlich länger. Dies liegt jedoch nicht nur an der geringen Temperaturdifferenz zwischen Bad- und Aussenluft, sondern auch daran, dass im Sommer die absolute Luftfeuchtigkeit der Aussenluft deutlich ansteigt.



Lüftungsspalt in Badtüre

Ein zusätzlicher Lüftungsspalt in der Badtüre würde die Lüftungssituation bei einer geschlossenen Badtüre nicht verbessern. Im Sommer weist die Wohnungsluft ebenfalls eine sehr hohe Luftfeuchte auf, was das Abtrocknen des Bades erschwert. Im Winter und den Übergangsjahreszeiten ist der zusätzliche Lüftungsspalt überflüssig, da genügend Zuluft im Bad vorhanden ist, um das Bad zu entfeuchten.

Mechanische Lüftung

Vergleicht man die Volumenströme im Abluftrohr mit dem Bemessungswerts von 30 m³/h für den kontinuierlichen Betrieb einer mechanischen Lüftung gemäss SIA 382/2:2021, liegen die Volumenströme meist deutlich unterhalb des Bemessungswertes. Da die Schwerkraftlüftung eine Form der natürlichen Lüftung ist, kann dieser Vergleich nur informativ gesehen werden.

Die Schwerkraftlüftung führt im Winter zu höheren Luftwechseln und im Sommer zu ähnlichen als ein angenommener Vergleich mit bedarfsgesteuerten Bad-Abluftventilatoren für 2 Personen. Die Vorteile von Bad-Abluftventilatoren liegen jedoch darin, dass sie bei Bedarf zusätzlich eingeschaltet werden können und die Treibhausgasemissionen für die Erstellung deutlich tiefer als für die Schwerkraftlüftung sind. Wobei beide Konzepte nur geringe absolute Treibhausgasemissionen für die Erstellung aufweisen. Beide Konzepte benötigen Energie für Lufterwärmung.

Hygiene

Auf Grund des Neubaus ist davon auszugehen, dass sich in den Zu- und Abluftrohren der Schwerkraftlüftung noch kein oder nur sehr wenig Biofilm gebildet hat und daher eine Rückströmung im Abluftrohr sicherlich noch zu keinem hygienischen Problem führt. Aussagen zu einer längerfristigen Entwicklung können nicht gemacht werden. Es wird wie für andere rohrgebundene Lüftungssysteme empfohlen, eine regelmässige Hygieneinspektion durchzuführen und ggf. Reinigungen vorzunehmen.

Schimmelrisiko

Die Einordnung der Messwerte in die LIM-Kurven zeigt, dass infolge der Schwerkraftlüftung generell kein erhöhtes Schimmelrisiko besteht. Die einzige Ausnahme bilden warme Sommertage, an denen die Temperaturdifferenz zwischen Bad und Umgebung sehr gering ist und nach einem Duschvorgang die Badtüre 24 Stunden geschlossen bleibt. Obwohl dieser Fall im realen Betrieb sehr unwahrscheinlich ist, sollte er ausgeschlossen werden. Hierzu sollte im Sommer, wenn kein Temperaturunterschied zwischen Bad und Aussenluft herrscht, mit einer geöffneten Badtüre und geöffneten Fenstern der Luftaustausch und das Abtrocknen im innenliegenden Bad unterstützt werden. Solange die Nutzer:innen die Wohnung inkl. geöffneter Badtüre mit der üblichen Sommerlüftungsstrategie bei Fensterlüftung von einer Morgen- und Abendlüftung bzw. einer Nachtlüftung lüften, ist das Schimmelrisiko im innenliegenden Bad minimiert.

Das Monitoring findet in einem Neubau statt, der gerade bezogen ist. Aussagen zur längerfristigen Schimmelfreiheit in den Bädern können daher nicht getroffen werden. Während des Monitorings ist kein (sichtbarer) Schimmel aufgetreten. Sollte Schimmel im Bad auftreten muss evaluiert werden, ob dies eine Folge der Schwerkraftlüftung oder auf Grund anderer Umstände zurückzuführen ist.

Belegung

Die untersuchten Bäder gehören zu 2 bzw. 3 Zi-Wohnungen. Diese sind im Schnitt mit 1.5 bzw. 2 Personen belegt. Als Durchschnitt für die Schweiz wird eine Wohnfläche pro Person von 46.5 m² und für den gemeinnützigen Wohnungsbau 36.3 m² ausgewiesen [20]. Somit entspricht die Belegung der untersuchten Wohnungen mit 48.8 m² /Person 2.3 m² (+5 %) leicht mehr als bei einer Standardwohnfläche. Bei einer dichteren Belegung wird das Bad mehr benutzt, so dass mehr



Feuchtigkeit anfällt und abgeführt werden muss. Da die Entfeuchtung des Bades mit Hilfe der Schwerkraftlüftung Zeit benötigt, ist davon auszugehen, dass bei dichter Belegung nur im Winter eine ausreichende Entfeuchtung über die Schwerkraftlüftung stattfindet. Zu anderen Jahreszeiten muss die Schwerkraftlüftung über die manuelle Fensterlüftung der anderen Zimmer unterstützt werden.

Heizwärmebedarf

Der Vergleich des berechneten Heizwärmebedarfs und des gemessenen Heizwärmeverbrauchs zeigt, dass der Verbrauch für das Jahr 2023 fast genau dem berechneten Bedarf entspricht. Der Wärmeverlust über die Schwerkraftlüftung verursacht ca. 8 % des Heizwärmeverbrauchs.

Messtechnik

Die Messtechnik und Datenerfassung laufen über den gesamten Zeitraum stabil. Es gab nur zwei kurzzeitige Ausfälle: März 22 Datenaufnahme in den Abluftrohren im Dach und Januar 23 Datenaufnahme in den Zuluftrohren im Keller. Infolge der vielen Messpunkte und der unterschiedlichen Tür- und Fensteröffnungsstellungen ist die Auswertung sehr zeitintensiv.



10 Publikationen

M. Hall, V. Gerber and A. Geissler, "Schwerkraftlüftung - Low-tech Lüftung für innenliegende Bäder in einem Mehrfamilienhaus" in 22. *Status-Seminar, brenet, 8./9.Sep. Aarau, 2022*
doi: 10.5281/zenodo.6798164.

M. Hall, V. Gerber and A. Geissler, "Gravity ventilation for interior bathrooms". Poster und Paper bei der CISBAT 13.-15.09.2023, Lausanne



11 Literaturverzeichnis

- [1] K. Sedlbauer, W. Zillig, and M. Krus, "Isoplethensysteme ermöglichen eine Abschätzung von Schimmelpilzbildung," *IBP-Mitteilungen*, vol. 388, no. 28, 2001.
- [2] Schachtlüftung, "<https://www.creoven.de/berliner-koelner-dortmunder-lueftung>, [https://de.wikipedia.org/wiki/Lüftung#Schachtlüftung_\(ohne_Ventilator\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Lüftung#Schachtlüftung_(ohne_Ventilator))," 2021.
- [3] B. Bosy, "Raumluftechnik." Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <http://www.bosy-online.de/Raumluftechnik/Seite197.jpg>
- [4] Trox Hesco Schweiz AG, "Automatisches Tellerventil - Typ A_TVC-100," 2017, *8630 Rüti, L-07-2-05d*, www.troxhesco.ch.
- [5] SIA 382/1, "Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen," 2014, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [6] SIA 382/5, "Mechanische Lüftung in Wohngebäuden," 2021, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [7] Merkblatt SIA 2024, "Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik (Merkblatt SIA 2024:2021)," 2021, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [8] C. Hoffmann, V. Dorer, C. Hauri, A. Primas, and H. Huber, "Hybride Lüftung - ein guter Kompromiss?," in *brenet 22. Status-Seminar*, M. Sattler, Ed., Aarau: Ökozentrum Langenbruck, 2022, pp. 28–43.
- [9] SIA 180, "Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden (SIA 180:2014)," 2014, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [10] SIA 380/1, "Heizwärmebedarf," 2016, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [11] SIA 180, "Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden," 2014.
- [12] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis*, 2nd ed. University Science Books, 1997.
- [13] Schmidt Technology GmbH, "Gebrauchsanweisung - Strömungssensor SS 20.250, Ausgabe: 529070.01D," 2021, *St. Georgen (D)*.
- [14] SIA 380, "Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden," 2022, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich*.
- [15] HEV Schweiz, "Akkumulierte Temperaturdifferenzen." Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: www.hev-schweiz.ch
- [16] M.-T. Moser, A. Primas, and A. Zakovorotnyi, "Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte," in *22. Status-Seminar, brenet, 8./9.Sep. Aarau*, 22. Status-Seminar, brenet, 8./9.Sep. Aarau: 22. Status-Seminar, brenet, 8./9.Sep. Aarau, 2022. doi: 10.5281/zenodo.6798164.
- [17] K. Sedlbauer, "Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen.," 2001, *Dissertation, Universität Stuttgart*.
- [18] T. Loga, M. Grossklos, and J. Knissel, "Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung," IWU Darmstadt im Auftrag von Viterra Energy Service AG, Essen, 2003.
- [19] I. Mojic, M. Luzzato, M. Haller, M. Lehmann, M. Benz, and S. van Velsen, "ImmoGap - Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern," SPF Institut für Solartechnik, HSR Rapperswil, BFE Schlussbericht SI/501469-01, 208AD.
- [20] Bundesamt für Wohnungswesen BWO and Bundesamt für Statistik BFS, "Statistik des gemeinnützigen Wohnungsbaus 2024." [Online]. Available: www.bwo.admin.ch
- [21] Konferenz kantonaler Energiedirektoren EnDK, "Vollzugshilfe EN-105 - Lüftungstechnische Anlagen," 2018.



12 Anhang

12.1 Übersicht Wohnungen, Schachtanordnung, Messstellen

Der vierstöckige Neubau verfügt pro Etage über vier Wohnungen (Bild 27):

- Aussen: 4.5 Zimmer Whg mit innenliegendem WC (nicht betrachtet)
- innen: 3.5 Zimmer Whg mit innenliegendem Bad (lila, pink)

Es sollen jeweils die innenliegenden Bäder gemessen werden (lila, pink). In den Bädern befindet sich auch der Installationsschacht mit Heizungs- und Wasserversorgung (Bild 28). Es gibt auch eine Anbindung an den Sicherungskasten.

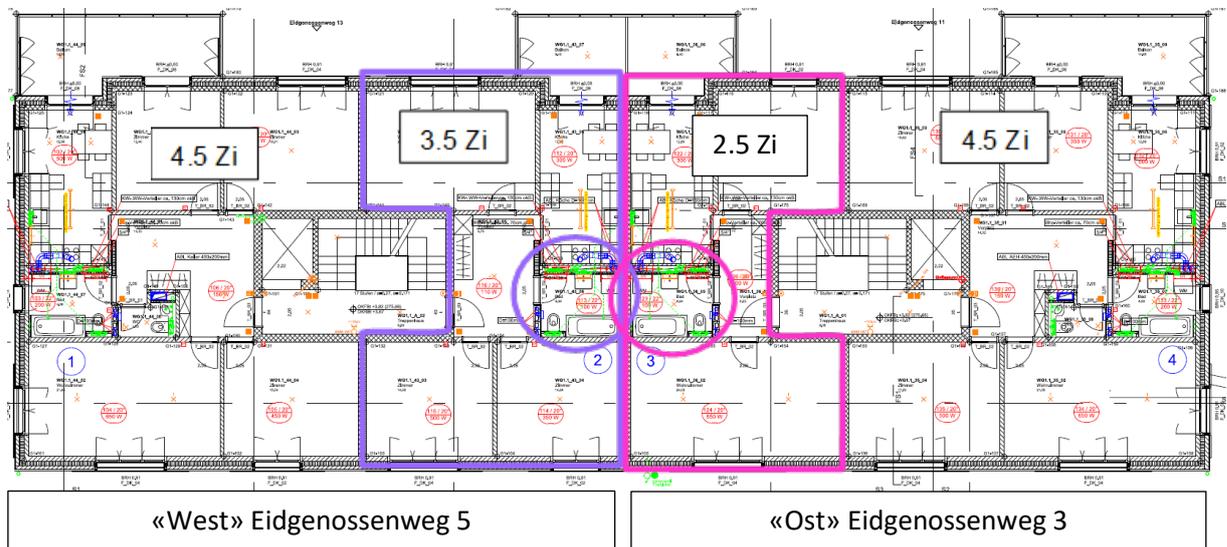


Bild 27 Layout 1 OG (Eidgenossenweg 3/5, Basel)

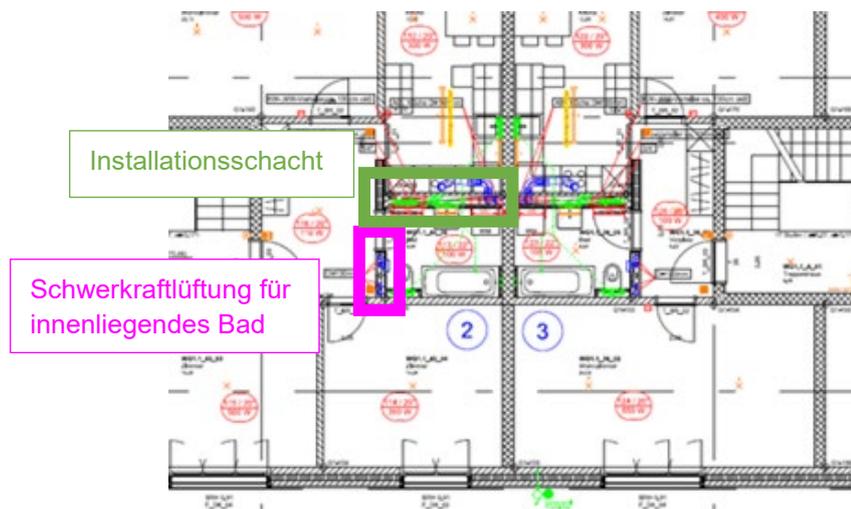


Bild 28 Detailsicht 1 OG: Lage der Schächte für die Schwerkraftlüftung und Installationen.

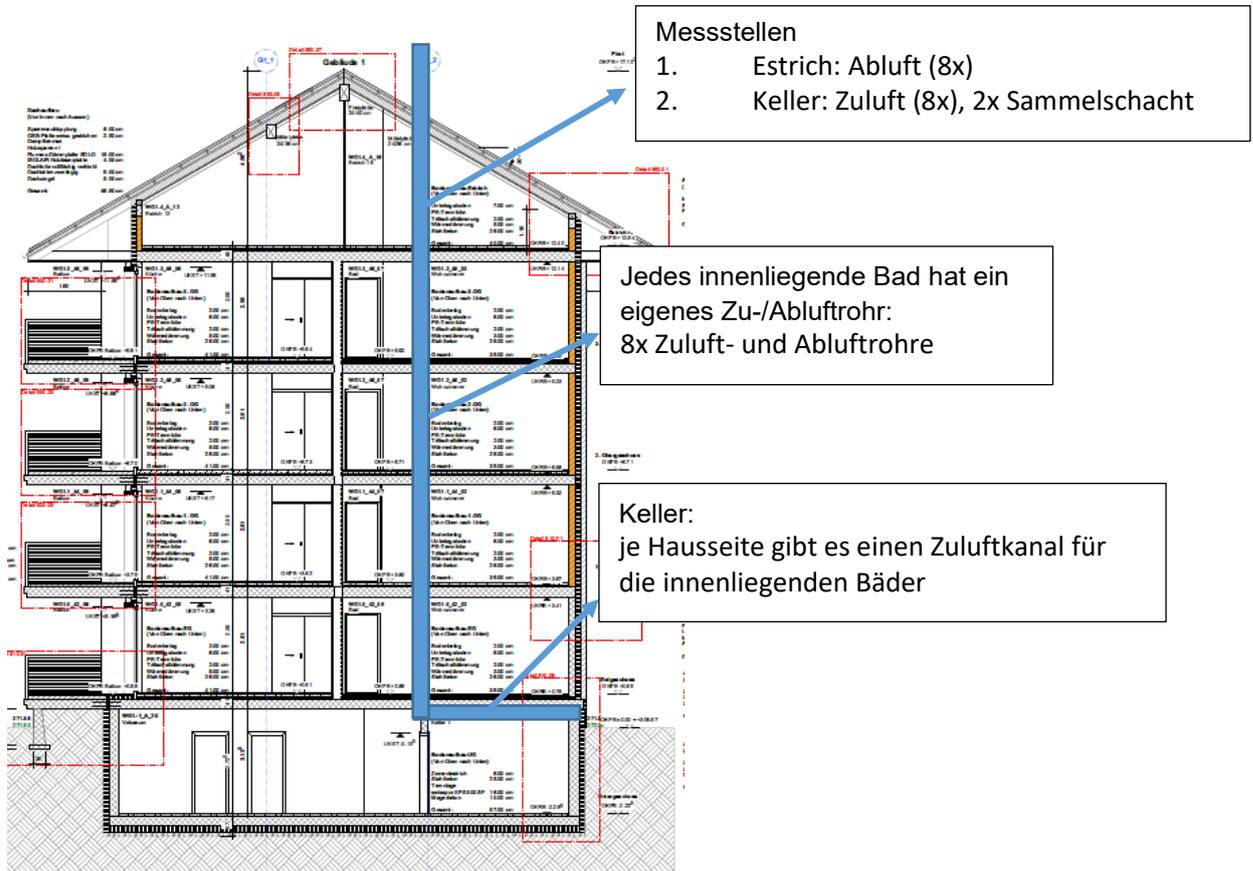


Bild 29 Schematische Darstellung der Schachtanordnung.

Tabelle 4 Anzahl Messstellen in den Lüftungsrohren/-kanälen.

Position	Volumenstrom	Strömungsrichtung	Temperatur	Rel. Feuchte
Zuluft- / Abluftrohr je Bad	8/8	8/8	8/8	8/8
Zuluftkanal	2	-	2	2
Total	18	16	18	18

Weitere Messstellen:

- Jedes Bad wird mit einem Datenlogger versehen, der Temperatur und rel. Feuchte misst
- Alle Fenster und Türen werden mit einem Kontakt versehen, der den Zustand offen/geschlossen angibt (HOBO UX90-001 Status Datenlogger, www.bakronazuerich.ch).



Tabelle 5 Techn. Daten der eingesetzten Messsensoren (MW: Messwert, MB; Messbereich).

Messgrösse	Sensor	Bereich	Messgenauigkeit
Temperatur Luftkanal www.sauter.controls.com	EGH112	-20...+80 °C	± 0.5°C (typ bei 25°C)
Rel. Feuchte Luftkanal www.sauter.controls.com	EGH112	0...100 % rF	± 2 % (10...90 % rF)
Strömungsgeschwindigkeit Luftkanal www.schmidtechnology.ch	SS20.250	0...5 m/s	± (5% vMW+0.4 %vMB) min 0.02 m/s
Strömungsrichtung Luftkanal www.schmidtechnology.ch	SS20.420	-1...1 m/s	± (5%vMW+1%vMB) min 0.05 m/s
Temperatur Badezimmer www.bakronazuerich.ch	UX100-003	-20...70 °C	± 0.21°C im Bereich 0 bis 50°C
Rel. Feuchte Badezimmer www.bakronazuerich.ch	UX100-003	15...95 % rF	± 3.5 % im Bereich 25 bis 85 % rF, sonst ± 5%



12.2 Klimadaten

Tabelle 6 Übersicht der Klimadaten Basel-Binningen erstellt aus Daten von Meteoschweiz (10 min, 01.03.2022 - 06.01.2023). Summe der Globalstrahlung: 1'298 kWh/m².

März 22 - Jan 23	Diffus W/m ²	Glob, hor W/m ²	Temp °C	rel. F. %	Windgeschw. m/s	Windricht. °
Mittelwert	67	173	14.1	70.5	6.4	183
stabw	94	264	7.8	20.2	4.1	95
Median	11	9	14.3	74.3	5.4	185
min	0	0	-9.1	14.7	0.0	0
max	619	1128	36.7	100	53.3	360

Monatsmittelwerte	2022											23
	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
Temp., °C	7.9	10.4	17.0	20.6	22.3	21.9	15.2	15.0	8.3	3.5	9.0	
rel. F, %	57	65	66	66	56	63	77	83	84	85	83	
Glob. hor., W/m ²	166	198	252	264	306	239	149	101	52	32	33	
Windrichtung, °	172	201	199	185	216	175	182	151	163	195	161	
Windgeschw., m/s	6.6	7.6	5.7	6.0	6.1	5.4	5.7	6.0	7.0	7.4	6.8	
max. Windgeschw., m/s	23.8	53.3	26.3	33.1	46.4	33.1	30.2	45.7	27.0	33.1	22.0	

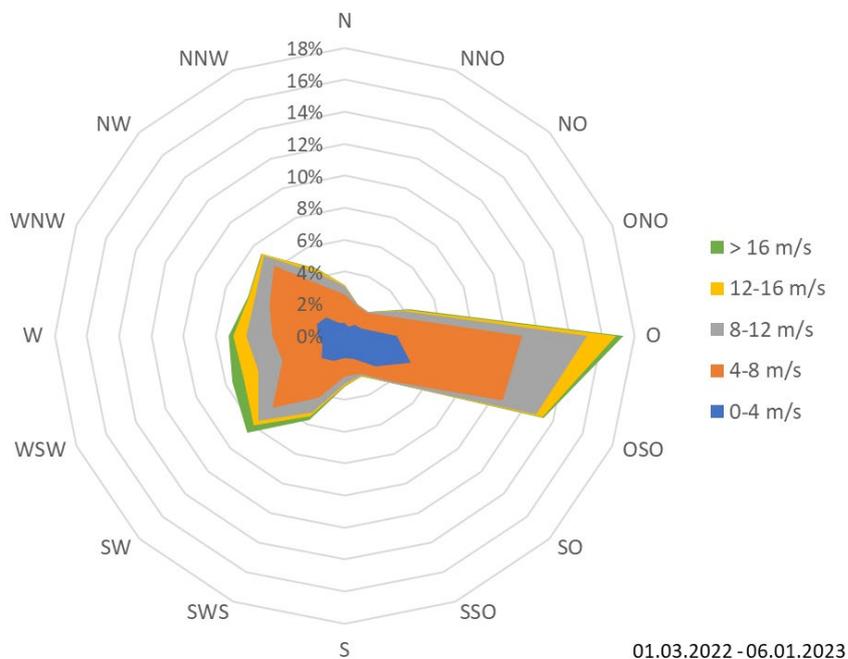


Bild 30 Windrose Basel-Binningen erstellt aus Daten von Meteoschweiz (10 min, 01.03.2022 - 06.01.2023).

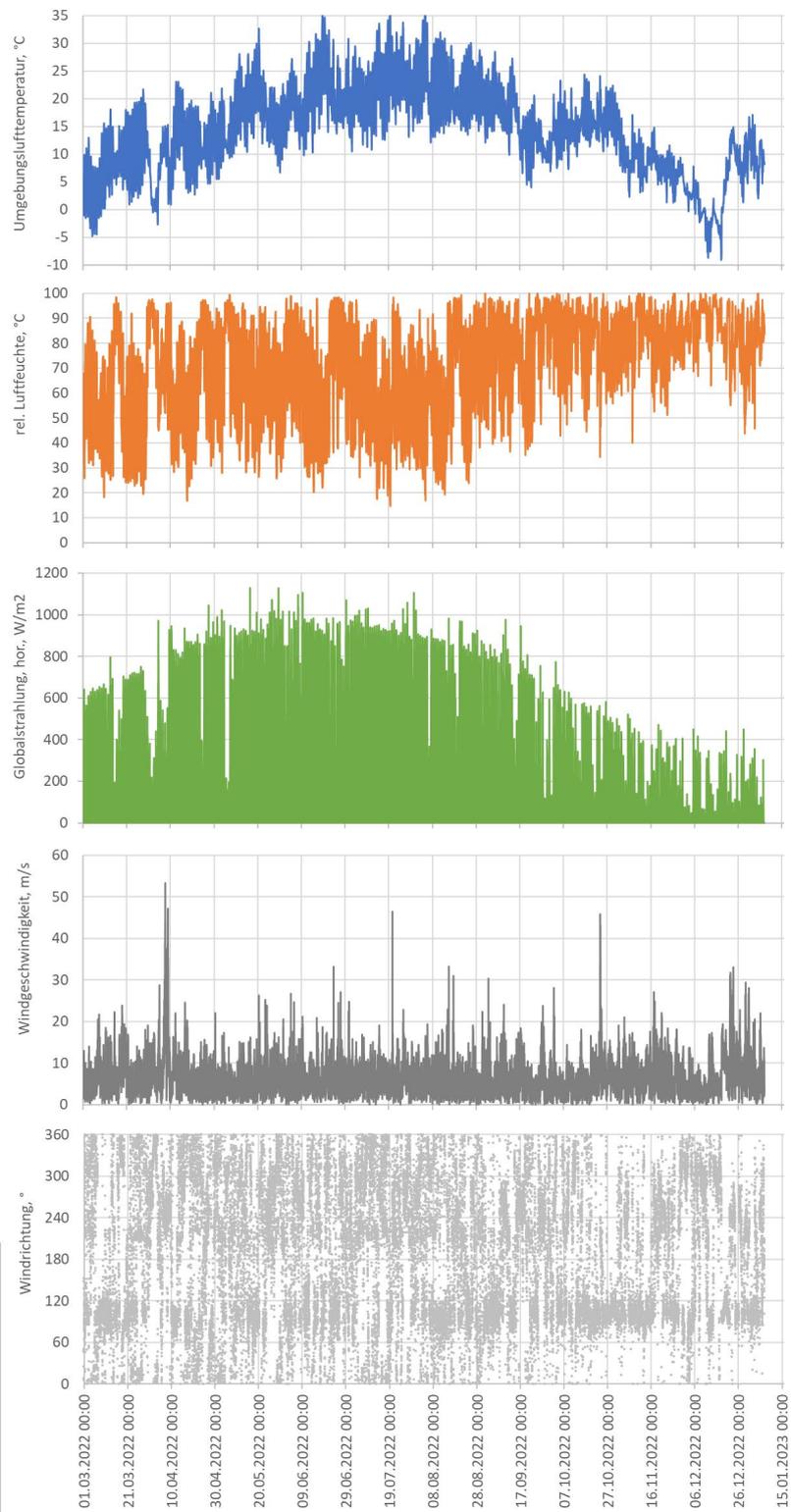


Bild 31 Klimadaten Basel-Binningen erstellt aus Daten von Meteoschweiz (10 min, 01.03.2022 - 06.01.2023).



12.3 Resultate – Detailbetrachtungen der Ostbäder

12.3.1 Rel. Luftfeuchtigkeit über Aussenlufttemperatur

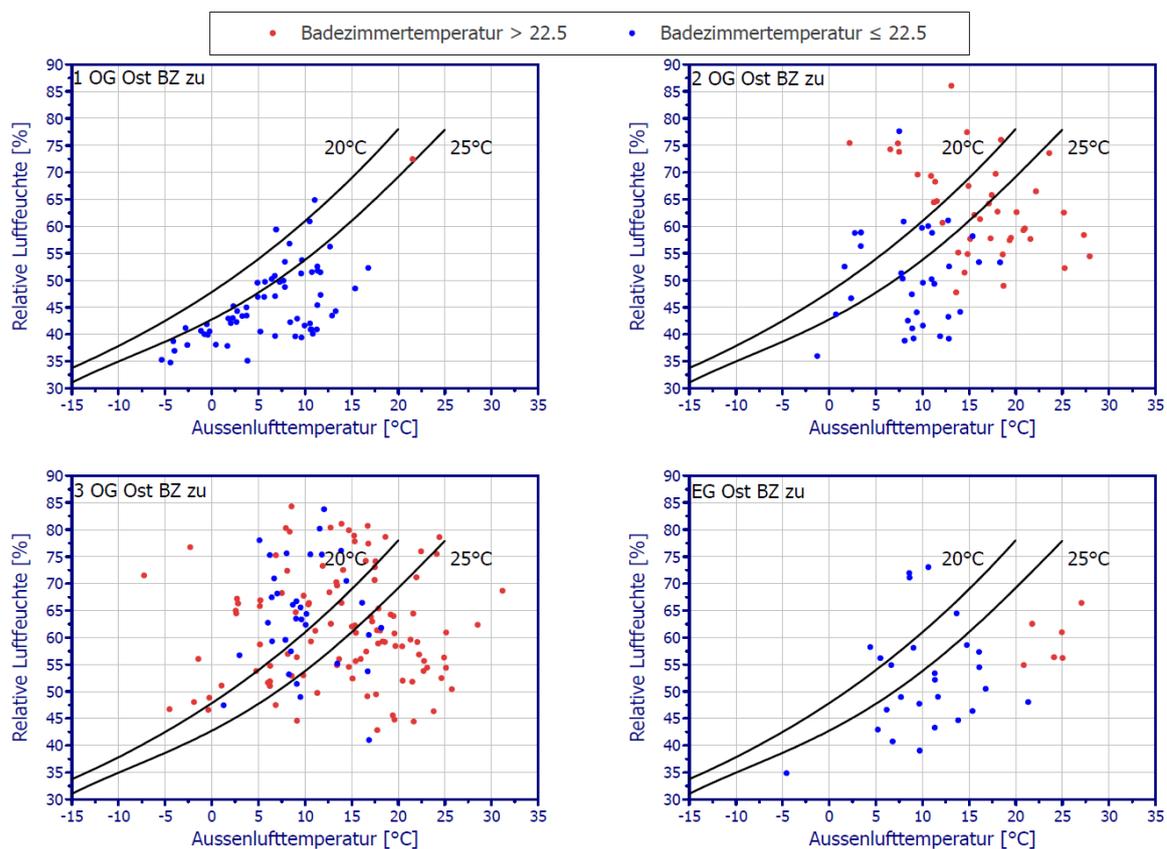


Bild 32 Fall «Badtüre zu»: maximal zulässige Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchte aller Ostbäder in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Raumlufttemperaturen von 20 ° und 25 °C gemäss SIA 180. Anmerkung: Die hier gezeigten Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchtigkeit beziehen sich nur auf die kurzen Zeiten, in denen pro Tag die Badtüre geschlossen ist. Periode 08.03.2022 – 06.01.2023.

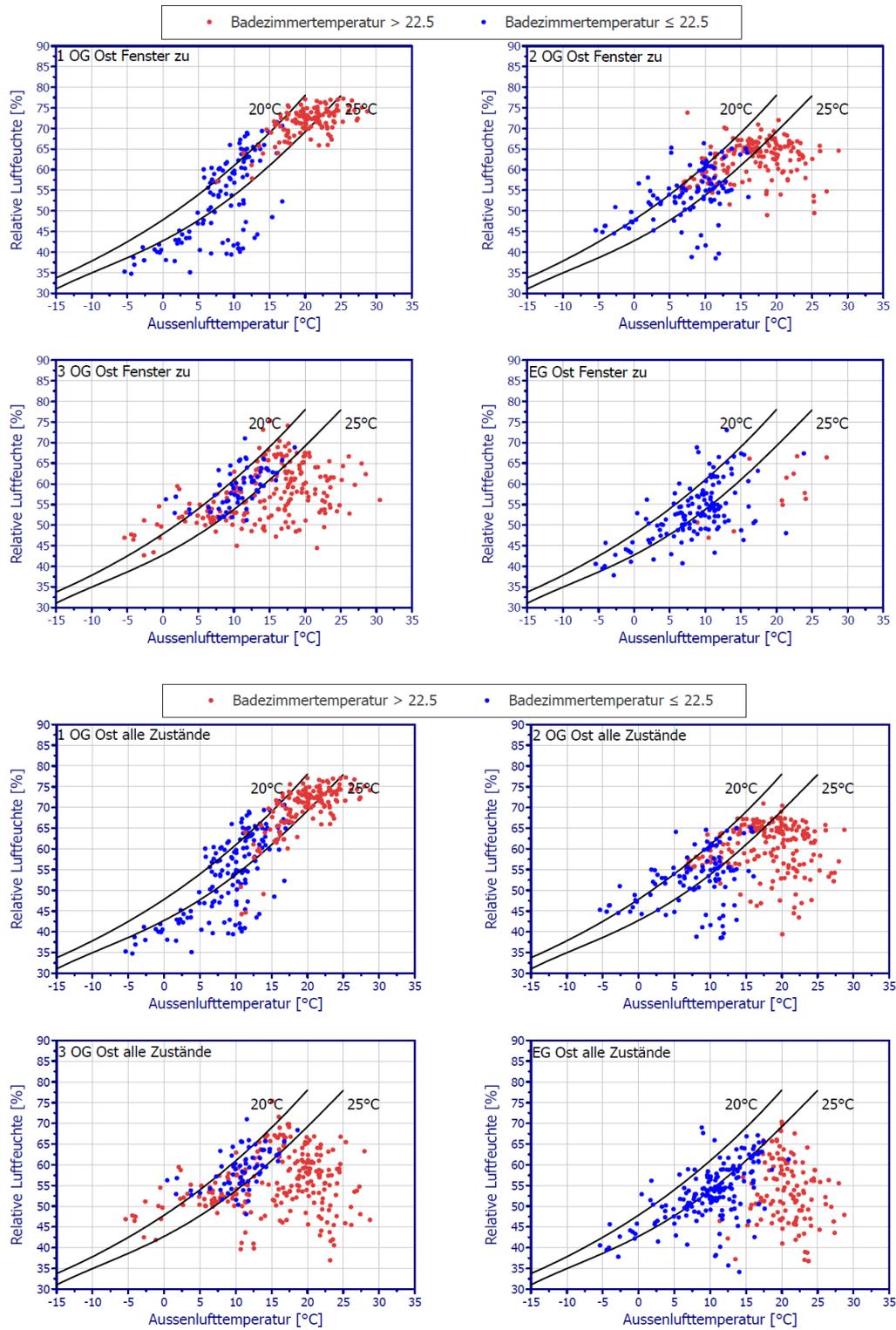


Bild 33 Maximal zulässige Tagesmittelwerte der rel. Luftfeuchtigkeit aller Ostbäder in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Raumlufttemperaturen von 20 ° und 25 °C gemäss SIA 180 (oben: «Fenster zu», unten: «alle Zustände»). Periode 08.03.2022 - 06.01.2023.



12.3.2 Abluftvolumenstrom über Temperaturdifferenz Bad/Aussen

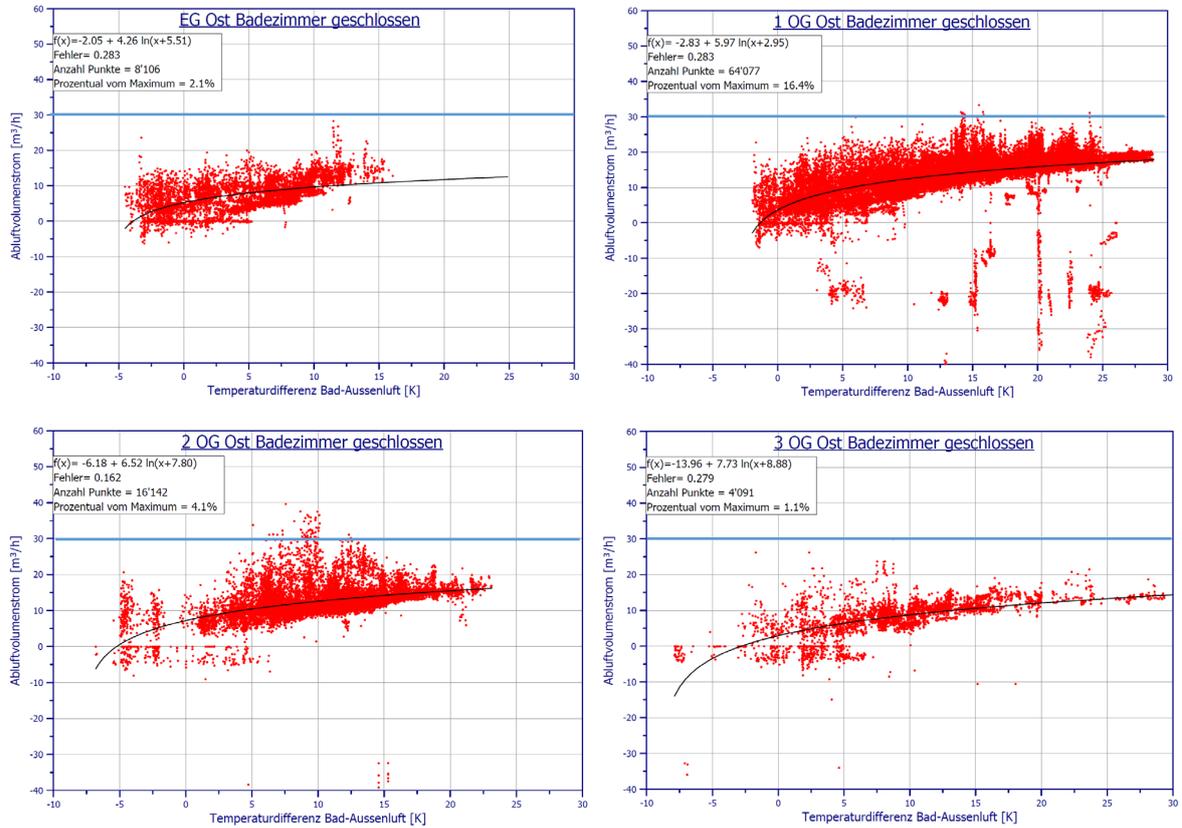


Bild 34 Fall «Badtüre zu»: Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Ostbäder (Anhaltswert: 10 m³/h -> 0.8 h⁻¹). Periode 08.03.2022 – 06.01.2023. Die Anzahl der dargestellten Messpunkte und deren prozentualer Anteil an den Gesamtmesspunkten ist angegeben. (Linie bei 30 m³/h: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb bei mechanischer Lüftung)

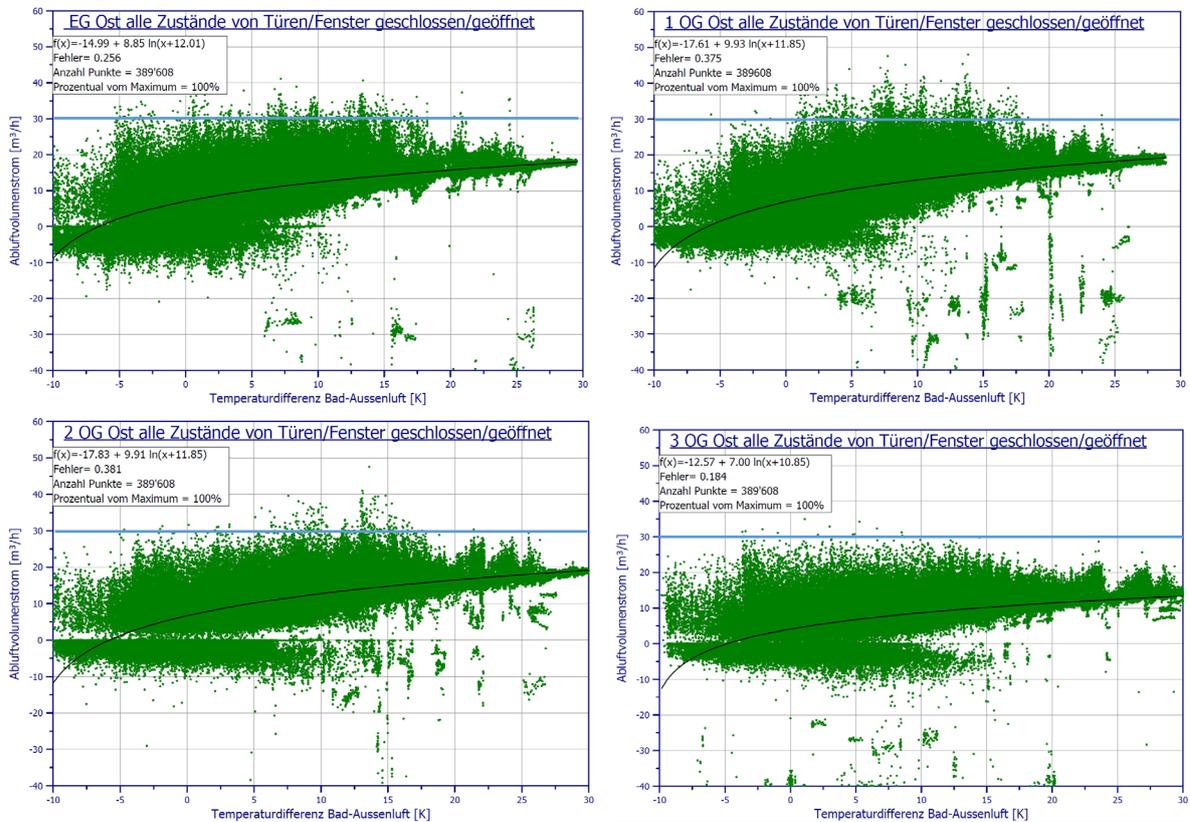


Bild 35 Fall «alle Zustände»: Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Ostbäder (Anhaltswert: 10 m³/h -> 0.8 h⁻¹). Periode 08.03.2022 – 06.01.2023. Die Anzahl der dargestellten Messpunkte und deren prozentualer Anteil an den Gesamtmesspunkten ist angegeben. (Linie bei 30 m³/h: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb bei mechanischer Lüftung)

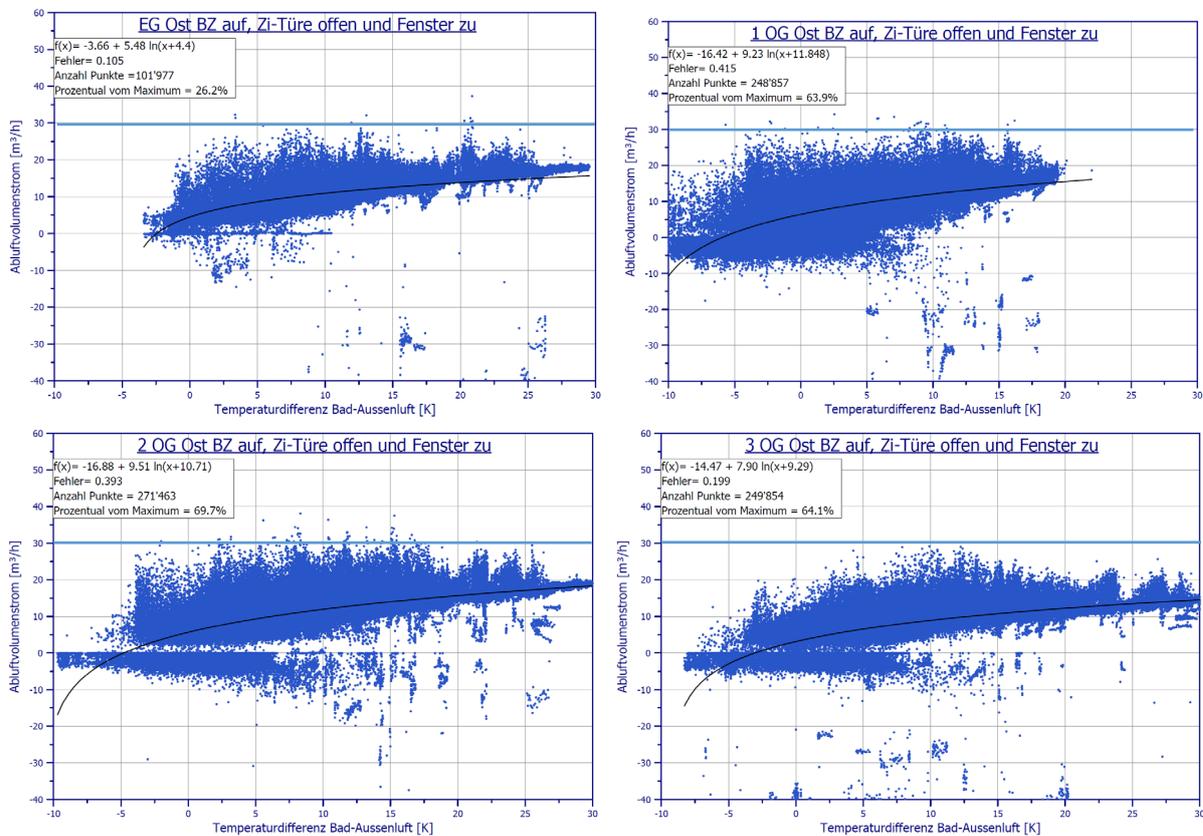


Bild 36 Fall «Fenster zu»: Abluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad/Aussenluft für alle Ostbäder (Anhaltswert: 10 m³/h → 0.8 h⁻¹). Periode 08.03.2022 – 06.01.2023. Die Anzahl der dargestellten Messpunkte und deren prozentualer Anteil an den Gesamtmesspunkten ist angegeben. (Linie bei 30 m³/h: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb bei mechanischer Lüftung)



12.3.3 Luftwechsel über Temperaturdifferenz Bad/Aussenluft

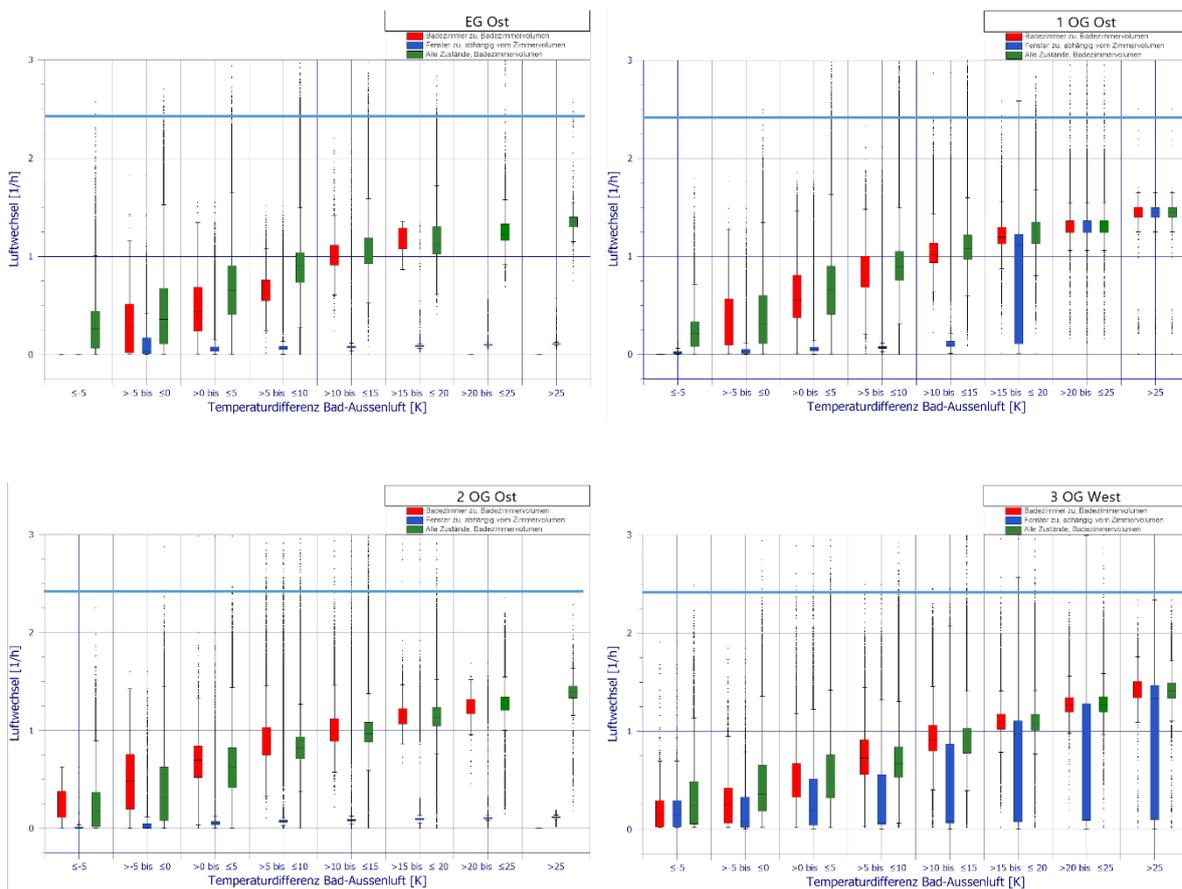


Bild 37 Boxplots der Luftwechselrate in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Bad-/Aussenluft für alle Ostbäder. Periode 08.03.2022 – 06.01.2023. (Linie bei 2.4 h⁻¹: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung bezogen auf die untersuchten Bäder).

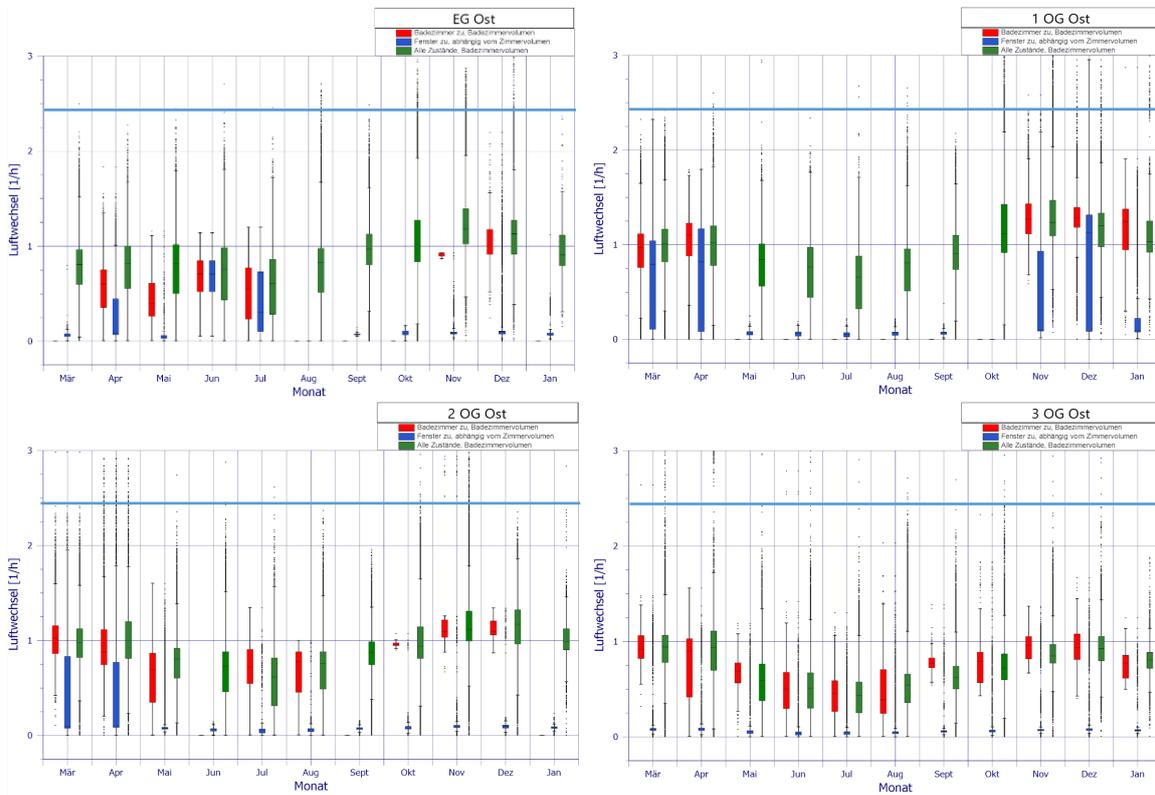


Bild 38 Boxplots der monatliche Luftwechselrate für alle Ostbäder. Periode 08.03.2022 – 06.01.2023. (Linie bei 2.4 h⁻¹: Bemessungswert gemäss SIA 382/5:2021 für den kontinuierlichen Betrieb mit mechanischer Lüftung bezogen auf die untersuchten Bäder).

12.4 Grunddaten zur Berechnung der Treibhausgasemissionen

Grunddaten Schwerkraftlüftung

Wickelfalzrohre (Stahlblech verzinkt): 0.1 m Durchmesser, Blechstärke: 0.00056 m
Rohrlänge: Abluft: 35.8 m, Zuluft: 19.8 m

Sammelschächte (Stahlblech verzinkt): 0.5 x 0.1 m, Länge 9.5 m, Blechstärke: 0.00056 m

Zuluftventil: Annahme 10 % Metall/90 % Kunststoff, Gewicht 0.7 kg

Abluftventil: Annahme 100 % Kunststoff, Gewicht 0.7 kg

Grunddaten Bad-Abluft



Wickelfalzrohre (Stahlblech verzinkt): 0.1 m Durchmesser, Blechstärke: 0.00056 m
Rohrlänge: Abluft: 35.8 m

Abluftventilator: Annahme 10 % Metall/90 % Kunststoff, Gewicht 0.7 kg

Überströmöffnung in Badtüre und einer Zimmertüre: Annahme 100 % Kunststoff, Gewicht 0.2 kg

Aussendurchlass für Zuluft: Annahme 100 % Kunststoff, Gewicht 0.7 kg

Tabelle 7 Materialdaten aus KBOB:2022 v4

Material	Dichte	THGE
	kg/m ³	kgCO ₂ -eq/kg
Stahlblech verzinkt	7'850	4.49
Metall (Stahlblech, blank)	7'850	2.8
Polycarbonat (PC)	1'200	11.4