

Bauteilintegrierte Lüftung

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts
zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“



Bauteilintegrierte Lüftung

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum
Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff:

„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern - Integrierte
Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche Forschung
im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere“

Teilvorhaben EnStadt:Pfaff: „Fraunhofer EnergieIKT“

Förderndes Ministerium: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH

Förderkennzeichen: 03SBE112D

Projektlaufzeit: 01.10.2017 – 31.12.2024

Autoren: Sven Auerswald, Peter Engelmann

Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2, 79100 Freiburg

Veröffentlicht: Juli 2025

Die Verantwortung der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Verbundprojekt EnStadt:Pfaff wurde von 8 Partnern durchgeführt und als Leuchtturmprojekt gemeinsam gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Titelbild: Fensterrahmen-integriertes Lüftungsgerät am Alten Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier
Kaiserslautern, Quelle: Triolog / EnStadt:Pfaff

Weitere Informationen zu EnStadt:Pfaff: <https://pfaffquartier-klimaneutral.de/>

Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundvorhabens EnStadt:Pfaff wurde die Entwicklung und Erprobung bauteilintegrierter Lüftungssysteme mit Fokus auf Energieeffizienz, Nutzerkomfort und technische Robustheit untersucht. Der Bericht beleuchtet die Relevanz kontrollierter Wohnraumlüftung vor dem Hintergrund zunehmender Luftdichtheit moderner Gebäudehüllen, steigender Anforderungen an Raumlufthqualität sowie gesundheitlicher und energetischer Aspekte. Mechanische Lüftungssysteme – insbesondere Fassadenintegrierte, dezentrale Lösungen – bieten hier ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Luftqualität bei gleichzeitiger Reduktion von Wärmeverlusten. Die Integration der Systeme in Bauteile wie Fensterrahmen, Rollladenkästen oder Fassadendämmung ermöglicht Zeitersparnis bei der baulichen Umsetzung.

Im Demonstrationsobjekt, dem Alten Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier wurde ein hybrides, Fassadenintegriertes Pendellüftungssystem demonstriert. Die Weiterentwicklung und Erprobung erfolgte aufgrund der Verzögerungen bei der Sanierung des Gebäudes nicht am Gebäude in Kaiserslautern, sondern an einem Demonstrationsgebäude in Adorf (Vogtland, Sachsen). Die Optimierung basierte auf einer detaillierten Analyse bestehender Schwachstellen, darunter fehleranfällige Klappensteuerung, unzureichende Sensorik, hohe Geräuschentwicklung und Systemausfälle. Zwei zentrale Maßnahmen wurden umgesetzt: die vollständige Überarbeitung der Steuerungslogik sowie der Ersatz der Klappenmechanik durch einen strömungstechnischen Schichtdiffusor. Ergänzt wurden diese durch eine verbesserte Sensorik, nutzerfreundlichere Betriebsmodi und eine moderne Datenvisualisierung mittels Zeitreihendatenbank und Grafana Datenanalyse.

Die Validierung im Realbetrieb zeigte signifikante Verbesserungen: Die Systemstabilität wurde erhöht, die Geräuschentwicklung deutlich reduziert und die Energieeffizienz gesteigert. Der spezifische Energieverbrauch im Demonstrationsgebäude in Adorf lag bei 32,2 kWh/(m²a), was der Energieklasse B entspricht, bei konsequenter Nutzung einer sensorbasierten Regelung wäre Klasse A erreichbar. Die Rückwärmzahl betrug im Mittel 95,5 %. Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial Fassadenintegrierter Lüftungssysteme für eine nachhaltige, nutzerzentrierte Gebäudemodernisierung. Ergebnisse aus dem Einsatz der Pendellüfter im Alten Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier liegen noch nicht vor, da das Monitoringsystem erst im folgenden Monitoringprojekt in Betrieb genommen wurde.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abkürzungen	6
Abbildungen	7
Tabellen	8
1 Motivation: Warum (sollten) wir wie lüften?	9
1.1 Welche Aspekte aus unserem Alltag und allgemeine Entwicklungen haben Einfluss auf unsere Raumluftqualität?	9
1.1.1 Einflussfaktoren der Innenraumluftqualität	9
1.1.2 Indirekt reduzierte Raumluftqualität durch ungünstige Raumluftfeuchte	10
1.1.3 Direkt reduzierte Raumluftqualität durch aerogene Luftschadstoffe	10
1.1.4 Indikatorgase (Tracergase)	11
1.2 Können wir nicht einfach weiterhin über die Fenster lüften?	12
1.3 Welche Arten der mechanischen Lüftung gibt es?	12
1.3.1 Abluftsysteme	13
1.3.2 Zuluftsysteme	13
1.3.3 Zu-/Abluftsysteme	14
1.3.4 Kombinierte Systeme	15
1.4 Wie wird der Volumenstrom einer Lüftung ausgelegt?	15
1.4.1 Infiltration und reale Luftwechselraten	15
1.4.2 Unterschiede zwischen Volumenströmen, Luftwechsel und Anlagenluftwechsel	16
1.5 Gesundheit versus Energieeffizienz: Wie sollte richtig gefiltert werden?	20
1.6 Spannungsfeld der Dimensionierung von Luftleitungen: Akustik, Wärmeverluste und Ventilatorleistung	21
1.7 Warum sollten kontrollierte Lüftungslösungen oder -systeme in die Fassade oder Fassadenbauteile integriert werden?	22
1.8 Wie können solche integrierten Lüftungen aussehen und was ist für deren Gestaltung zu beachten?	23
1.8.1 Dezentrale, raum- oder wohnungsweise Systeme	23
1.8.2 Zentrale Systeme mit Fassadenintegration	24
1.8.3 Hybride Ansätze: Raumweise Systeme mit zentraler Steuerung und Wartung	26
2 Umsetzung Fenster-integrierte Lüftung im Pfaff-Quartier	28
2.1 Ausgangssituation und identifizierte Schwachstellen	28
2.2 Optimierung der Steuerungslogik und mechanische Anpassungen	29

2.2.1	Weitere Verbesserungen	29
3	Ergebnisse	31
4	Erkenntnisse	32
5	Literatur	33

Abkürzungen

ACE	Air-change efficiency (Luftaustauscheffizienz ϵ^a)
ALD	Außenluftdurchlässe
ATC	Airtightness Classes
CO	Kohlenstoffmonoxid
CRE	Contaminant removal effectiveness (Schadstoffabfuhereffektivität ϵ^c)
DALY	Disability-Adjusted Life Years
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
LPh	Leistungsphase
m/s	Meter pro Sekunde
m ³ /h	Kubikmeter pro Stunde
NO _x , NO ₂	Stickoxide, Stickstoffdioxid
O ₃	Ozon
Pa	Pascal (Einheit für (Luft)Druck)
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PM _{2,5} , PM ₁₀	Particulate matter (Feinstaub mit Partikelgröße kleiner 2,5 bzw. 10 Mikrometer)
ppm	Parts per Million (Teile pro Million Teile)
%r.F.	Prozent relative Luftfeuchtigkeit
Rd	Radon
UBA	Umweltbundesamt
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
WRG	Wärmerückgewinnung

Abbildungen

Abbildung 1:	Arundel-Sterling-Diagramm für die optimale relative Raumluftheuchte, welche die Feuchte-induzierten Gesundheitsrisiken minimiert [11].	10
Abbildung 2:	Schemata für Abluftsysteme nach DIN V 18599 [25]	13
Abbildung 3:	Schemata für Zuluftsysteme nach DIN V 18599 Teil 6 [25]	14
Abbildung 4:	Schemata für Zu- und Abluftsysteme nach DIN V 18599 Teil 6 [25]	14
Abbildung 5:	Vereinfachtes Schema für die Auslegung von Luftleitungen	21
Abbildung 6:	Beispiele für dezentrale, regenerativ arbeitende Lüftungsgeräte. Die Auswahl der Modelle begründet sich nicht durch besondere Leistungsdaten, sondern primär durch die Aussagekraft für das Funktions- und Einbauprinzip dieser Geräteklasse. Ähnliche Modelle sind von diversen Herstellern erhältlich.	23
Abbildung 7:	Beispiele für dezentrale, rekuperative und balancierte Lüftungsgeräte. Die Auswahl der Modelle begründet sich nicht durch besondere Leistungsdaten, sondern primär durch die Aussagekraft für das Funktions- und Einbauprinzip dieser Geräteklasse. Ähnliche Modelle sind von diversen Herstellern erhältlich.	24
Abbildung 8:	RetroKit Demonstrationsgebäude Nauheimer Straße 1 und 3, Frankfurt a. M. der ABGnova GmbH [71, S. 275-279]	25
Abbildung 9:	Sanierung Demonstrationsobjekt Adorf i. V. aus dem Projekt FIHLS [73]	26
Abbildung 10:	3D-Modell des dezentralen Lüftungsgeräts aus dem FIHLS-Projekt für das Demonstrationsgebäude in Adorf i. V.	27
Abbildung 11:	Logiken der Feuchteregeleungen im Vergleich	30
Abbildung 12:	Logiken der CO ₂ -Regelungen im Vergleich	30

Tabellen

Tabelle 1: Kategorien für die CO ₂ -Überkonzentration gegenüber der Außenluftkonzentration nach der EN 16798-1.....	11
Tabelle 2: Kategorien für die Raumluftheuchte nach EN 16798-1	11
Tabelle 3: Typische Werte für die Luftdichtigkeit von Gebäudehüllen gegenüber Infiltration für unterschiedliche Gebäudetypen.	16
Tabelle 4: Luftleitungsdichtheiten und deren Dichtheitsklassen nach DIN EN 16798 Teil 3 [30]	17
Tabelle 5: Typische Beispielwerte für die relative Luftaustauscheffizienz nach DS 447. In der Quelle werden die Werte für den Normierungsbereich [0; 2] angegeben.....	19
Tabelle 6: Vergleich unterschiedlicher Gase und deren Mischungsfähigkeit in feuchter Luft [40]. ...	19
Tabelle 7: Kosten- und Organisationsvorteile der Fassaden-integrierten Lüftung für die Bestandssanierung.	22
Tabelle 8: Aktualisierte Betriebsmodi des Lüftungssystems.....	29

1 Motivation: Warum (sollten) wir wie lüften?

1.1 Welche Aspekte aus unserem Alltag und allgemeine Entwicklungen haben Einfluss auf unsere Raumlufthqualität?

Die Qualität der Raumlufth ist entscheidend für Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit. Menschen verbringen durchschnittlich 80 % bis 90 % ihrer Zeit in Innenräumen – zu Hause, in Schulen, am Arbeitsplatz oder in öffentlichen Gebäuden [1]. Mit jedem Atemzug nehmen wir Stoffe aus der Raumlufth auf, die sowohl chemischer, biologischer als auch physikalischer Natur sind. Die Relevanz guter Innenraumlufthqualität ist durch Pandemien, steigende Allergieraten und die wissenschaftlichen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte zunehmend ins Bewusstsein gerückt [2], [3].

1.1.1 Einflussfaktoren der Innenraumlufthqualität

Die Innenraumlufthqualität wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst:

1. Haustiere: Sie erhöhen die Konzentration von Allergenen, Endotoxinen und Mikroorganismen in der Raumlufth [4], [5], [6]. Haustiere stehen mit höheren Schimmelpilz- und Bakterienbelastungen sowie einer erhöhten Prävalenz respiratorischer Erkrankungen in Zusammenhang.
2. Aktivitäten mit Verbrennungen: Heizen und Kochen mit Gas, offene Kamine, Kerzen, Räucherstäbchen, Rauchen; Abgase von außen setzen Feinstaub (PM_{10} , $PM_{2.5}$), Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid (CO), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und weitere Schadstoffe frei [4], [5].
3. Pflanzen: Über Blätter und Wurzelwerk können Pflanzen Stickoxide (NO_x) aufnehmen und flüchtige organische Verbindungen (VOC) aufnehmen und abgeben, wobei sie sowohl zur Luftreinigung beitragen als auch Emittenten sein können [5].
4. Reinigungsprodukte: Diese setzen eine Vielzahl von VOCs, wie Formaldehyd, Toluol und Terpene frei, die akut und chronisch das Atemwegssystem irritieren und zum Teil als krebserregend eingestuft werden [4], [7].
5. Bauprodukte und Inneneinrichtung: Farben, Lacke, Klebstoffe, Dämmstoffe, Möbel und Textilien emittieren VOCs, Flammschutzmittel, Weichmacher und Mikroplastik, teils noch Jahre nach Einbau oder Herstellung [5].
6. Dichter werdende Gebäudehüllen: Um Energieverluste zu reduzieren, werden Gebäude heute sehr luftdicht gebaut [8]. Damit sinkt der natürliche Luftwechsel („Fugenlüftung“) drastisch – ohne gezielte Lüftung steigt die Schadstoff- und Feuchteakkumulation.
7. Nicht abgeführte Feuchtelasten: Durch Atmung, Duschen, Kochen, Pflanzen und Wäschetrocknung entsteht erhebliche Feuchtigkeit, die bei unzureichender Abfuhr zu erhöhtem Schimmelrisiko und indirekten Schadstoffquellen führt [6], [9], [10].

1.1.2 Indirekt reduzierte Raumluftqualität durch ungünstige Raumluftfeuchte

Wird Feuchtigkeit in Innenräumen nicht genügend abgeführt, steigt die relative Luftfeuchte dauerhaft über 60 %r.F. bis 70 %r.F., was das Wachstum von Schimmelpilzen, Bakterien und Hausstaubmilben begünstigt [9], [10], [11]. Schimmelpilzsporen, Mykotoxine und (1→3)- β -D-Glucane können allergische und nicht-allergische Reaktionen auslösen, darunter Asthma, Bronchitis, Infektionen, Müdigkeit und Kopfschmerzen, Schleimhautreizungen, allergische Symptome, Infektionen und Konzentrationsminderung auf [10], [12], [13]. Chronisch steigt das Risiko für Asthma, chronisch obstruktive Erkrankungen, Herz-Kreislauf-Leiden und Krebs [3], [12]. Besonders betroffen sind Kinder, ältere Menschen und Personen mit Vorschädigungen. Dagegen birgt zu niedrige Luftfeuchte (< 30 %r.F. bis 40 %r.F.) v. a. im Winter das Risiko für Atemwegsinfekte. Die Austrocknung der Schleimhäute schwächt ihre Abwehrfunktion, erhöht die Anfälligkeit für virale und bakterielle Infekte und führt zu Reizhusten, Nasenbluten und eine Verschlimmerung von Asthmasymptomen [11], [14]. Die optimale relative Luftfeuchte liegt daher wie in Abbildung 1 dargestellt zwischen 40 %r.F. und 60 %r.F.

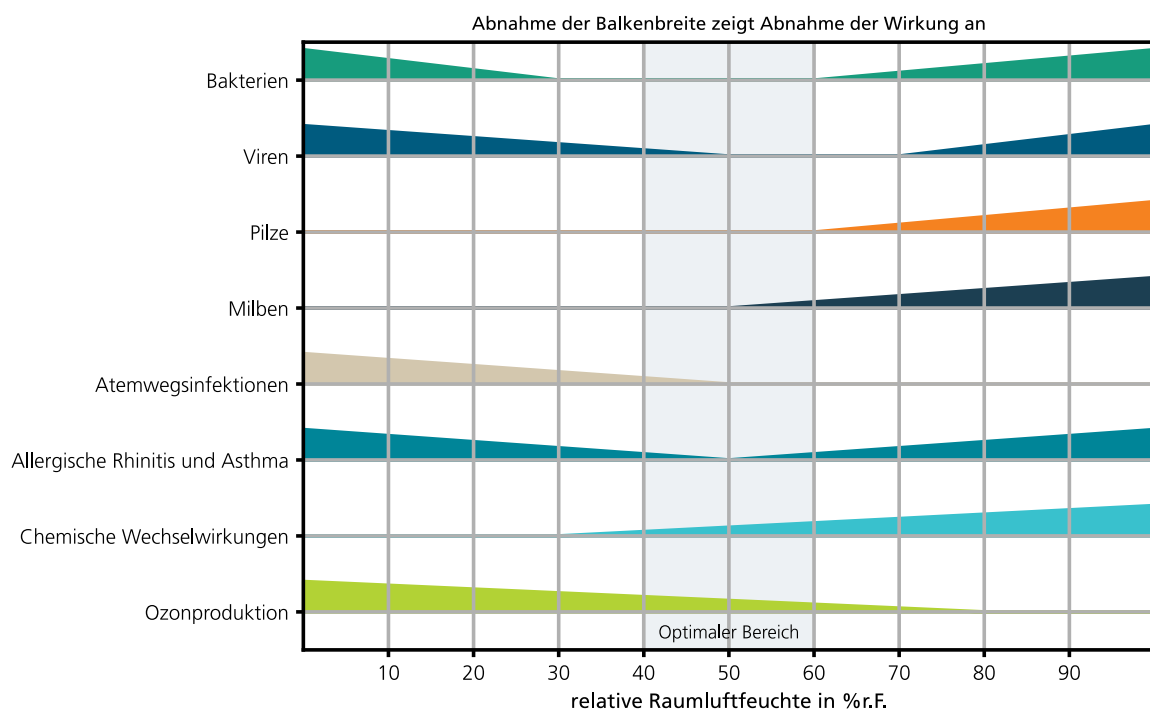


Abbildung 1: Arundel-Sterling-Diagramm für die optimale relative Raumluftfeuchte, welche die Feuchte-induzierten Gesundheitsrisiken minimiert [11].

1.1.3 Direkt reduzierte Raumluftqualität durch aerogene Luftschadstoffe

Luftschadstoffe verursachen vielfältige gesundheitliche Effekte: Akut können Kopfschmerzen, Müdigkeit, allergische Symptome, Infektionen sowie langfristig Herz-Kreislauf-Erkrankungen auftreten. Die WHO und nationale Fachgremien empfehlen, die Schadstoffbelastung zu minimieren und eine „hinreichende“ Raumluftqualität sicherzustellen; dies gilt insbesondere während der Anwesenheit von Nutzern [15], [16].

Zur Bewertung gesundheitlicher Auswirkungen wird zunehmend das Konzept der „Disability-Adjusted Life Years“ (DALY) eingesetzt. Es quantifiziert die Krankheitslast durch Schadstoffexposition als Summe verlorener gesunder Lebensjahre durch Krankheit oder vorzeitigem Tod. Studien zeigen, dass insbesondere Feinstaub (PM₁₀, PM_{2,5}), Formaldehyd, Stickstoffdioxid, Radon und Ozon hohe DALY-Werte aufweisen [15], [17]. Die gesamt-ökonomischen Folgekosten pro DALY können bis zu 265.000 € pro Jahr und Person betragen [17]. Die WHO hat für die wichtigsten Innenraumschadstoffe gesundheitsbasierte Grenzwerte veröffentlicht, die regelmäßig aktualisiert werden [3], [15]. Messmethoden und Bewertung erfolgen nach anerkannten technischen Standards, z. B. VDI 4300 und DIN EN ISO 16000 [18]. Die Einhaltung der Anforderungen ist v. a. in Anwesenheitszeiten sicherzustellen [16].

1.1.4 Indikatorgase (Tracergase)

CO₂ und Luftfeuchte sind als leicht messbare Indikatoren für die Lüftungseffektivität etabliert. Die Einteilung erfolgt gemäß EN 16798-1, siehe Tabelle 1 und Tabelle 2.

Tabelle 1: Kategorien für die CO₂-Überkonzentration gegenüber der Außenluftkonzentration nach der EN 16798-1

Kategorie	CO ₂ -Zusatz in ppm über Außenluft	Beschreibung
I	350	hohe Qualität
II	550	mittlere Qualität
III	800	Akzeptabel
IV	1350	Gering

Für die Raumluftheuchte gilt zusätzlich, dass diese neben der in der Tabelle 2 angegebenen relativen Feuchte auf einen Maximalwert von 11,5 g(H₂O) kg(trL)⁻¹ zu begrenzen ist.

Tabelle 2: Kategorien für die Raumluftheuchte nach EN 16798-1

Kategorie	Auslegungswert der relativen Luftfeuchte	
	für Entfeuchtung in %r.F.	für Befeuchtung in %r.F.
I	50	40
II	60	30
III	70	20

Lüften ist demnach die zentrale Maßnahme, um die Ansammlung von Schadstoffen und Feuchtigkeit zu verhindern und eine gesunde Innenraumlufte sicherzustellen [2], [3], [12]. Die Anforderungen an die Luftqualität orientieren sich an aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und den Empfehlungen der WHO sowie geltenden Normen (VDI 4300, DIN EN ISO 16000, DIN EN 16798-1). Eine balancierte Luftfeuchte (40 %r.F. bis 60 %r.F.) sowie die Unterschreitung der Schadstoffgrenzwerte sollte angestrebt werden, da sonst nachweislich gesundheitliche Risiken zunehmen.

1.2 Können wir nicht einfach weiterhin über die Fenster lüften?

Seit der ersten Ölkrise nehmen die Wärmeschutzanforderungen an Gebäude aufgrund der energiepolitischen und Klimaschutzziele in Europa und in Deutschland immer weiter zu, um so die Wärmeverluste zu minimieren. Im Zuge dieser legislativen Entwicklung gilt heute nach § 12 und 13 GEG [19]:

8. „Der Einfluss konstruktiver Wärmebrücken auf den Jahresheizwärmebedarf ist so gering wie möglich zu halten.“
9. „Gebäude sind so zu errichten, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche dauerhaft luft- und undurchlässig abgedichtet ist, wobei der erforderliche Mindestluftwechsel davon unberührt bleibt.“

Direkte Konsequenz dieser Entwicklung ist, unter der Annahme reiner nutzerbasierter natürlicher Lüftung durch Fensteröffnen, dass die Nutzer mehr und häufiger tätig werden müssen, um den gleichen Luftwechsel zu erzielen. Bereits im Jahr 2003 wurde anhand einer Studie über 5530 Wohnungen belegt, dass Fensterlüftung aber auch nutzerabhängige mechanische Lüftungen mit einem häufigeren Auftreten von Feuchteschäden verbunden ist [6].

Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen die Schwierigkeiten hinsichtlich der Feuchtelasten und stellen zusätzlich fest, dass die CO₂-Konzentration als Indikator für den Luftwechsel in Wohnräumen mit reiner Fensterlüftung häufig über den Richtwerten liegen [20], [21]. Daraus ergibt sich eine schlechtere Raumluftqualität mit zunehmender Luftdichtheit. Zudem wird auf die schlechtere Energieeffizienz aufgrund der fehlenden Wärmerückgewinnung hingewiesen.

Die erste Kernbotschaft des Umweltbundesamtes (UBA) zur Lüftungskonzeption in Gebäuden ist damit folgerichtig: „Allein mit Fensterlüftung sind hygienisch einwandfreie Raumluftverhältnisse regelmäßig über den Tag verteilt in Wohngebäuden oft nicht mehr zu erreichen“ [22]. Es wird daher gemäß DIN 1946-6 empfohlen, mindestens eine reduzierte Lüftung mit einem personenbezogenen Außenluftstrom zwischen 20 m³/h und 30 m³/h sicherzustellen [23]. Eine reine Fensterlüftung würde laut UBA erfordern, dass Nutzer tagsüber und nachts alle 90 bis 120 Minuten eine intensive Lüftung mit weit geöffneten Fenstern durchführen [22]. Vor diesem Hintergrund sollten entsprechende mechanische, kontrollierte Lüftungskonzepte bereits in der Vorplanung (Leistungsphase 2 (LPh 2)) der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [24] für Neubau und Sanierung vorgesehen werden.

Eine reine Fensterlüftung reicht damit unter heutigen baulichen und energetischen Rahmenbedingungen nicht mehr aus, um dauerhaft eine hygienisch einwandfreie Raumluftqualität sicherzustellen. Wissenschaftliche Studien und Empfehlungen des UBA zeigen, dass mechanische Lüftungskonzepte notwendig sind, um Feuchteschutz, Energieeffizienz und Luftqualität zuverlässig zu gewährleisten.

1.3 Welche Arten der mechanischen Lüftung gibt es?

Mechanische Lüftungssysteme lassen sich in verschiedene Typen unterteilen, die sich hinsichtlich ihrer Funktionsweise, Komponenten und energetischen Eigenschaften unterscheiden [23], [25]. Grundsätzlich wird zwischen freien, ventilatorgestützten und kombinierten Lüftungssystemen unterschieden. Die Auswahl eines geeigneten Systems hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter Gebäudeart,

Nutzungsanforderungen, Schallschutz, Brandschutz, thermischer Komfort und Energieeffizienz. Die Normen liefern hierzu Entscheidungshilfen und Systemübersichten (z. B. Bild 1 und 2 in DIN 1946 Teil 6 [23] sowie Anhang A in DIN V 18599 Teil 6 [25]).

1.3.1 Abluftsysteme

Diese Systeme fördern verbrauchte Luft aktiv aus Ablufträumen (z. B. Küche, Bad) nach außen. Die Zuluft strömt passiv vorzugsweise definiert über Außenluftdurchlässe (ALD) oder undefiniert über Undichtheiten in der Gebäudehülle nach. Sie sind einfach aufgebaut, können aber ohne Wärmerückgewinnung energetisch nachteilig sein. Es gibt zentrale Anlagen, z. B. für ein ganzes Mehrfamilienhaus, und dezentrale Geräte, z. B. für einzelne Wohnungen oder Räume (siehe Abbildung 2).

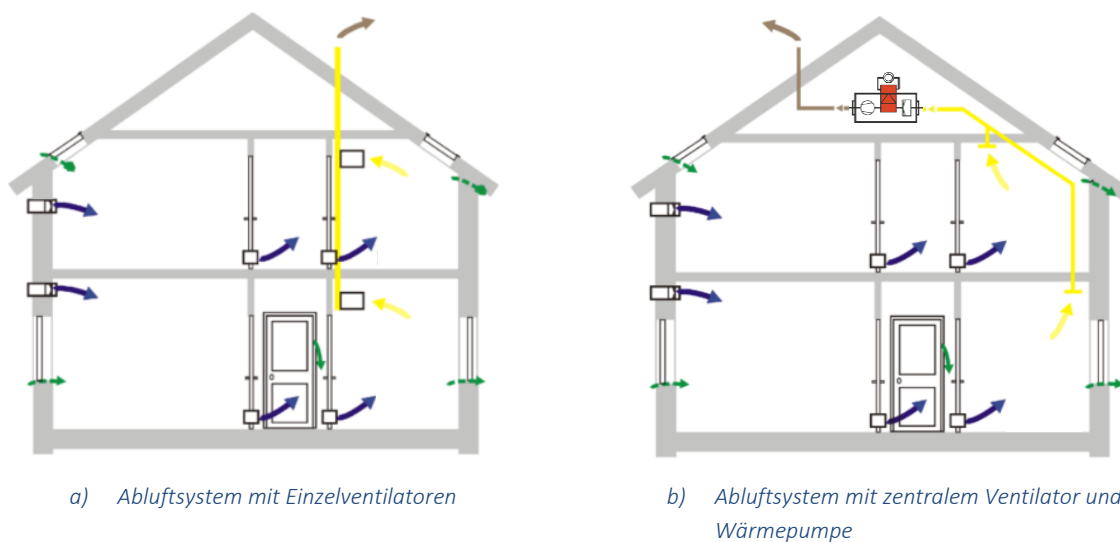


Abbildung 2: Schemata für Abluftsysteme nach DIN V 18599 [25]

1.3.2 Zuluftsysteme

Hier wird frische Außenluft mechanisch in Zulufräume (z. B. Wohn- und Schlafzimmer) eingebracht. Die Abluft entweicht passiv über Abluftöffnungen oder Undichtheiten. Diese Systeme können mit Luftfiltern und Luftvorwärmung ausgestattet sein, sind aber seltener als Abluftsysteme (siehe Abbildung 3).

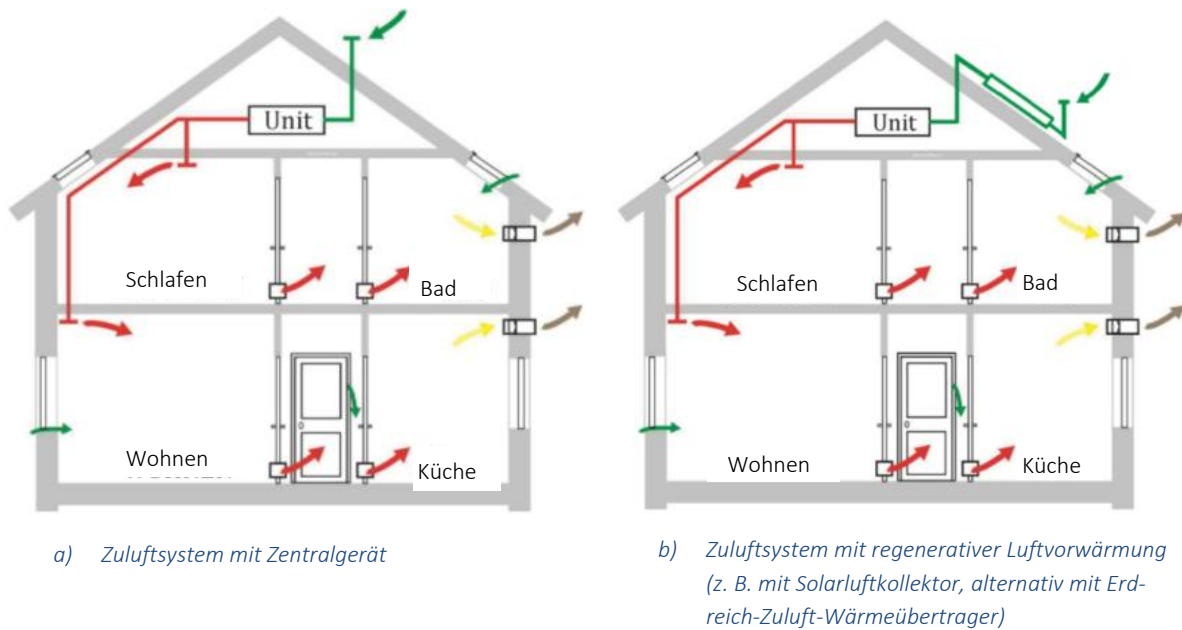


Abbildung 3: Schemata für Zuluftsysteme nach DIN V 18599 Teil 6 [25]

1.3.3 Zu-/Abluftsysteme

Diese Systeme fördern sowohl die Zuluft als auch die Abluft mechanisch. Sie ermöglichen eine kontrollierte Luftführung und sind oft mit Wärmerückgewinnung (WRG) ausgestattet, was sie besonders energieeffizient macht. Auch hier gibt es zentrale Anlagen (z. B. für ein ganzes Mehrfamilienhaus) und dezentrale Geräte (z. B. für einzelne Wohnungen oder Räume).

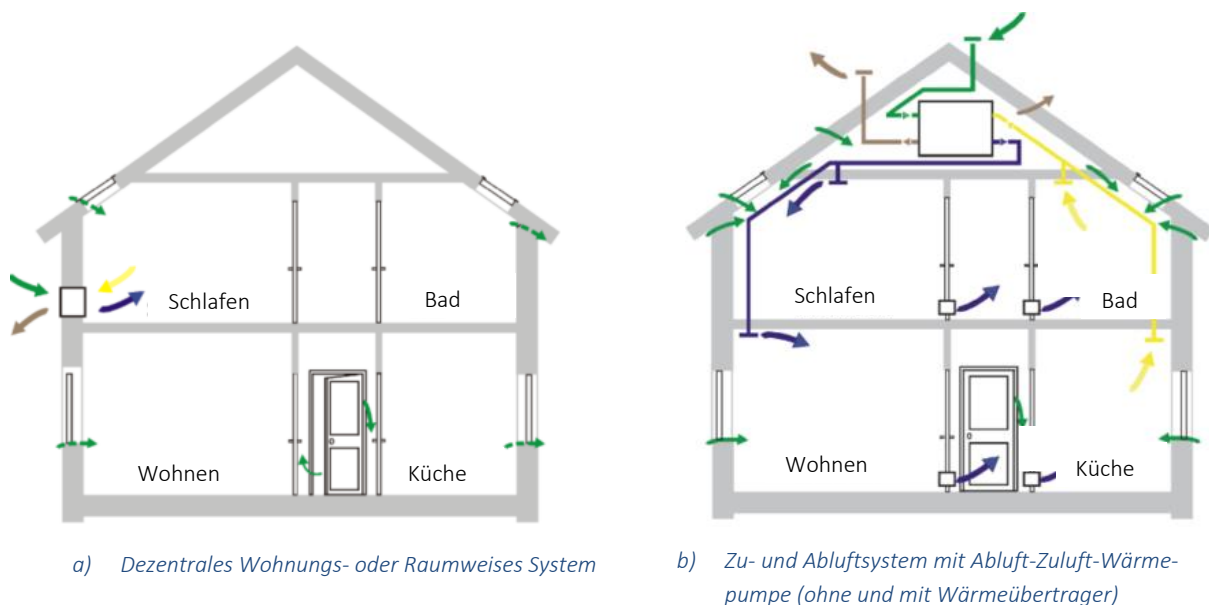


Abbildung 4: Schemata für Zu- und Abluftsysteme nach DIN V 18599 Teil 6 [25]

1.3.4 Kombinierte Systeme

Diese verbinden verschiedene Lüftungsarten innerhalb einer Nutzungseinheit, z. B. ein Abluftsystem in Küche und Bad kombiniert mit einem Zu-/Abluftsystem mit WRG im Wohnbereich. Auch Systeme für Bäder und Toiletten ohne Außenfenster nach DIN 18017 Teil 3 [26] können integriert werden.

1.4 Wie wird der Volumenstrom einer Lüftung ausgelegt?

Die Auslegung von Lüftungsanlagen erfolgt in Deutschland für Wohngebäude in der Regel auf Grundlage der DIN 1946 Teil 6 [23] in Kombination mit DIN 18017 Teil 3 für fensterlose Räume [26]. Insbesondere für Nichtwohngebäude wird die europäische Norm DIN EN 16798-1 [16] und deren Interpretationshilfe EN/TR 16798-2 [27] verwendet, welche jedoch auch Empfehlungen für den Wohnbereich enthält. Ziel ist, einen nutzerunabhängigen Luftaustausch zur Sicherstellung des Feuchte- und Gesundheitsschutzes sowie der Raumluftqualität zu gewährleisten. Wesentliches Element der DIN 1946 Teil 6 [23] ist die Berechnung von Volumenströmen für die vier Lüftungsstufen – Feuchteschutz, reduziert, nenn, intensiv – in Abhängigkeit des Gebäudewärmeschutzes, der Belegungsdichte sowie der Beiträge durch Infiltration und Fensterlüften. Die europäischen EN-Normen sind wissenschaftlich mit internationalen Normen (z.B. ASHRAE, ISO) abgestimmt und führen im Vergleich zu nationalen Regelwerken – wie auch dem Nennvolumenstrom der DIN 1946 Teil 6 [23] – zu etwas höheren geforderten Raumluftvolumenströmen für die Luftqualitätskategorie II (vgl. [28]).

Die verschiedenen Kategorien für Raumluftqualität und thermischen Komfort aus der DIN 16798 Teil 1 [16] orientieren sich an internationalen Standards und Forschungsergebnissen. Diese Kategorien werden in vielen Ländern ähnlich verwendet, wobei sich die Anforderungen für den Mindest-Außenluftvolumenstrom meist an einer Unzufriedenheitsrate von max. 20 % (Kategorie II) orientieren. Diese Kategorie II sollte für alle Neubauten und Sanierungen als Mindestmaß angesetzt werden.

1.4.1 Infiltration und reale Luftwechselraten

Ein Teil des realen Luftaustauschs eines Gebäudes erfolgt durch Infiltration, also unbeabsichtigte und in ihrer Größe sowie Position häufig unbekannte Undichtheiten der Gebäudehülle. Für die Berücksichtigung in der Wärmeverlustberechnung und in der Auslegung des mindestens noch erforderlichen Luftwechsels nach DIN 1946 Teil 6 [23] werden verschiedene Werte unterschieden. Traditionell wird der Luftwechsel n_{50} pro Stunde bei einem positiven und negativen Prüfdruck von 50 Pa verwendet. Zunehmend erhält aber auch die flächenbezogene Luftdurchlässigkeit q_{E50} nach DIN EN ISO 9972 [29] Einzug. In Tabelle 3 sind beide Kenngrößen zusammen mit typischen real resultierenden Luftwechseln für unterschiedliche Gebäudetypen aufgelistet.

Infiltrationen leisten also einen Beitrag zum Luftwechsel realer Gebäude und können auch nach der aktuellen DIN 1946 Teil 6 [23] für die Auslegung eines Lüftungssystems angerechnet werden. Allerdings sinkt dieser Beitrag mit zunehmender Qualität eines Gebäudes, denn Infiltrationen sind aus Wärmeschutzsicht in erster Linie ein Mangel und müssen sogar für die Wärmeverlustrechnung berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Typische Werte für die Luftdichtigkeit von Gebäudehüllen gegenüber Infiltration für unterschiedliche Gebäudetypen.

Gebäudetyp	n_{50} -Wert in 1/h	q_{E50} -Wert in $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \text{ h})$	Typischer realer Luftwechsel in 1/h
Altbau (unsaniert)	[3; 4,5; 12]	6 – 10	0,7 – 1,2
Sanierter Altbau	[1; 2; 3]	3 – 5	0,4 – 0,7
Neubau (Standard EnEV/GEG)	[1; 1,5; 2]	1,5 – 2,5	0,2 – 0,4
Effizienzhaus KfW 55/40/Plus	[0,6; 0,8; 1,0]	1 – 1,5	0,05 – 0,2
Passivhaus	$\leq 0,6$	0,5 – 1	$< 0,05$

1.4.2 Unterschiede zwischen Volumenströmen, Luftwechsel und Anlagenluftwechsel

Für die Planung und Bewertung von Lüftungssystemen wird davon ausgegangen, dass der Volumenstrom, welcher von den Ventilatoren einer Lüftungsanlage gefördert wird, auch 1-zu-1 in den Anforderungszonen des Innenraums ankommt. Eine solche Annahme hat implizit folgende wesentliche Konsequenzen:

1. Das Luftverteilnetz wird als vollständig dicht angenommen.
2. Für die Luftaustauscheffizienz ϵ^a wird von einer idealen Mischung der gesamten Raumluft zwischen der Zuluft- und Abluftöffnung ausgegangen.

Beide Aspekte sind starke Vereinfachungen der realen Gegebenheiten.

1.4.2.1 Luftdichtheit von Luftverteilnetzen

Die Luftdichtheit von Luftverteilnetzen wird in der DIN EN 16798 Teil 3 [30] über die Airtightness Classes (ATC) geregelt. Diese reichen von ATC 1 (sehr dicht) bis ATC 5 (wenig dicht), wobei die zulässige Leckage mit steigendem Druck exponentiell zunimmt [31]. In der Praxis für die Sanierung und den Neubau wird, um Energieverluste zu minimieren, mindestens ATC 3 angestrebt. Werden Luftleitungen außerhalb des beheizten Gebäudevolumens verlegt gilt als Limit ATC 2. Studien zeigen, dass Leckagen in Luftverteilnetzen zu Verlusten von 5 % bis 15 % des Luftvolumenstroms führen können [32], [33], [34]. Für Frankreich gilt mittlerweile, dass Luftleitungsnetze, deren Dichtigkeit auch nach Ertüchtigung nicht unter 12 % Lecklufrate liegen, ersetzt werden müssen [35]. In der DACH-Region wird empfohlen, bei fehlender Netzkonfiguration oder Messdaten pauschal 10 % bis 15 % Leitungsverluste zusätzlich zum Raumluftvolumenstrom bei der Auslegung zu berücksichtigen [36]. Diese Abschätzungen aus Tabelle 4 dienen als Sicherheitszuschlag zur Gewährleistung der Luftqualität und Energieeffizienz [37].

Tabelle 4: Luftleitungsdichtheiten und deren Dichtheitsklassen nach DIN EN 16798 Teil 3 [30]

ATC-Klasse	Typische Leckage in % des Luftvolumenstroms	Bemerkung
ATC 1	< 0,5 %	Sehr hoher Aufwand, selten angewendet
ATC 2	1–2 %	Passivhaus-Standard; Leitungen außerhalb beheizter Zonen
ATC 3	3–5 %	Häufiger Standard bei guter Ausführung
ATC 4	5–10 %	Nur bei geringen Anforderungen
ATC 5	> 10 %	Vermeiden in energieeffizienten Gebäuden

Eine niedrige Dichtheitsklasse für Luftverteilnetze kann den zu fördernden Volumenstrom um bis zu 15 % und damit verbunden die Leistungsaufnahme um bis zu 38,6 % erhöhen.

1.4.2.2 Luftaustauscheffizienz, Schadstoffabfuhereffektivität, Lüftungseffektivität & Lüftungseffizienz

Diese vier Begriffe und deren technischer Hintergrund werden leider häufig gar nicht berücksichtigt oder synonym verwendet, obwohl dahinter zwar zwei verwandte, aber unterschiedliche Konzepte stehen. Am eindeutigsten im wörtlichen Sinne beschrieben werden die beiden Konzepte durch die Begriffe Luftaustauscheffizienz ϵ^a (engl. Air-change efficiency, ACE) und Schadstoffabfuhereffektivität ϵ^c (engl. Contaminant removal effectiveness, CRE).

Da in der Regel bei Lüftung in erster Linie ein bestimmter Raumlufthwechsel gefordert wird, liegt die Vermutung nah, dass die ACE ϵ^a die Praxis-relevantere Größe der beiden ist. Diese wurde von Sandberg und Sjöberg [38] als „air diffusion efficiency“ mit einem Definitionsbereich von [0; 2] eingeführt und später auf das Intervall [0; 1] normiert [39]. In dieser Form beschreibt diese Größe, basierend auf dem statistischen Alter der Raumlufth, wie effizient der zwischen der Zu- und Abluftdüse bereitgestellte Luftstrom die Raumlufth – insbesondere in der Anforderungszone – mit Außenluft verdünnt und austauscht. Eine detaillierte deutschsprachige Beschreibung des Konzepts findet sich in Auerswald [40]. Zentral für das Konzept sind jedoch folgende drei charakteristische Werte:

10. $\epsilon^a = 0$: vollständiger Lüftungskurzschluss, das heißt das Raumlufthalter ist im gesamten Raum unendlich und die junge Luft strömt direkt an der Raumumfassungsfläche von der Zuluft- zur Abluftöffnung. Dieser Wert ist real nicht erreichbar.
11. $\epsilon^a = 0,5$: ideale Mischung, das heißt die Zuluft mischt sich sofort nach Eintritt in den Raum mit der gesamten Raumlufth und verlässt den Raum mit dem doppelten mittleren Raumlufthalter. Dieser ideale Zustand ist real ebenfalls nicht erreichbar, aber der Wert ist real erreichbar, da alle Innenräume immer Zonen jüngerer und älterer Luft beinhalten. Ein Raum der einen Wert von etwa 0,5 erreicht wird daher Lüftungstechnisch als Mischlüftung bezeichnet.
12. $\epsilon^a = 1$: Blockströmung, das heißt die bereitgestellte Luft durchquert den belüfteten Raum auf dem direktesten Weg zwischen Zuluft- und Abluftöffnung und erfasst dabei dennoch den gesamten Raum. Das Raumlufthalter im Raum nimmt linear von der Zuluft- zur Abluftöffnung zu.

Die Definition von ϵ^a folgt Gleichung (1).

$$\epsilon_j^a = \frac{1}{2} \frac{\tau_j}{\langle \bar{\alpha}_j \rangle} = \frac{1}{2} \frac{\langle \bar{n}_j \rangle}{n_j} \quad (1)$$

ϵ_j^a	Absolute Luftaustauscheffizienz des Systems j	[-]
τ_j	Nominale Zeitkonstante des Systems j als charakteristische statistische Größe für die Zeit, in der sich Luft mindestens in einem Raum aufhält	[h]
$\langle \bar{\alpha}_j \rangle$	Mittleres Luftalter über das gesamte System j	[h]
$\langle \bar{n}_j \rangle$	Mittlerer Raumlufthauswechsel	[h ⁻¹]
n_j	Nominale Luftwechselrate des Systems j	[h ⁻¹]

Hierbei gilt Gleichung (2) für die nominale Luftwechselrate, was die Verbindung zum Volumenstrom herstellt.

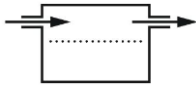
$$n_j = \frac{\dot{V}_j}{V_j} = \frac{1}{\tau_j} \quad (2)$$

$\dot{V}_j$	Effektiver Volumenstrom für den Luftaustausch in System j	[m ³ h ⁻¹]
V_j	Gesamtvolumen von System j	[m ³]

Bewertet wird die Raumlufthauswechselrate oder auch das Luftalter in der Regel aber nicht im gesamten Raum, sondern in einer bestimmten Anforderungszone, welche in der Regel die Atemzone der Raumnutzer ist. Diese kann zum Beispiel als horizontale Ebene im Raum auf 1,7 m über dem Boden mit 0,5 m Abstand zu den Raumumfassungsflächen definiert sein [30]. Im Falle einer personalisierten Lüftung wären es kleine Volumen um die Köpfe aller Raumnutzenden. Es handelt sich in jedem Fall um ein Subsystem i innerhalb von System j , sodass die bewertete ACE in der Regel eine relative Luftaustauscheffizienz $\langle \epsilon_j^a \rangle_i$ ist [41].

Auslegungsinformationen zur ACE $\langle \epsilon_j^a \rangle_i$ finden sich leider nicht in deutschen Normen oder Richtlinien, aber zum Beispiel in der dänischen Norm DS 447 [42], wie in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Typische Beispielwerte für die relative Luftaustauscheffizienz nach DS 447. In der Quelle werden die Werte für den Normierungsbereich [0; 2] angegeben.

Mischlüftung		Mischlüftung		Verdrängungs- / Quelllüftung		Personalisierte Lüftung	
							
$T_{zu}-T_{atem}$ in K	$\langle \epsilon_j^a \rangle_i$	$T_{zu}-T_{atem}$ in K	$\langle \epsilon_j^a \rangle_i$	$T_{zu}-T_{atem}$ in K	$\langle \epsilon_j^a \rangle_i$	$T_{zu}-T_{atem}$ in K	$\langle \epsilon_j^a \rangle_i$
< 0	]0,45; 0,5]	< -5	0,45	< 0	]0,6; 0,7]	-6	]0,6; 1,1]
[0; 2[	0,45	[-5; 0[	]0,45; 0,5[	[0; 2[	]0,35; 0,45[	-3	]0,65; 1,15]
[2; 5[	0,4	≥ 0	0,5	≥ 2	]0,1; 0,35[	0	]0,8; 1,75]
≥ 5	]0,2; 0,35]						

In den für Deutschland relevanten Normen und Richtlinien präsenter ist die Schadstoffabfuhereffektivität ϵ^c [16], [43]. Diese Größe wurde von Skåret und Mathisen [44] eingeführt und bewertet, wie effektiv ein Lüftungssystem einen bestimmten aerogenen Schadstoff oder eine Überkonzentration eines Luftbestandteils abführen kann. Auch diese Größe wird in der Regel für einen Teilbereich des gesamten belüfteten Raums betrachtet.

Die Verwandtschaft zwischen ACE und CRE entsteht primär durch den Umstand, dass für die Bewertung nach CRE CO₂ als universeller Indikator für – durch menschliche Atmung – verunreinigte Luft verwendet wird. CO₂ an sich ist jedoch kein gesundheitlich relevanter Schadstoff, jedenfalls nicht bei Konzentrationen deutlich unter 20.000 ppm. Es ist aber ein ganz hervorragender Indikator für alle aerogene Schadstoffe, die sich gut in Luft lösen oder in dieser verteilen. Wie gut sich ein relevanter Schadstoff mit der Raumluft mischt, muss genaugenommen im Einzelnen untersucht und im Anschluss bewertet werden, ob CO₂ hier als Indikator geeignet ist.

Tabelle 6 liefert hierfür einen kurzen Überblick.

Tabelle 6: Vergleich unterschiedlicher Gase und deren Mischungsfähigkeit in feuchter Luft [40].

Stoff j	Diffusionsvolumen Δ_v in -	Molare Masse M in g mol ⁻¹	Resultierende binäre Diffusionskoeffizien- ten $D_{M,j}$ in $\cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Schmidtzahlen der Stoffe j im Medium Luft $Sc_{M,j}$ in -
H ₂ O	13,1	18,02	25,1 ± 3,5	0,63 ± 0,14
O ₂	16,3	32,0	20,0 ± 2,8	0,79 ± 0,17
Luft	19,7	28,799 ± 0,079	19,3 ± 2,7	0,82 ± 0,18
CO ₂	26,9	44,01	15,8 ± 2,2	1,00 ± 0,22
N ₂ O	35,9	44,01	14,2 ± 2,0	1,11 ± 0,24
SF ₆	71,3	146,06	9,3 ± 1,3	1,7 ± 0,4

Für die Fälle in denen CO₂ ein guter Indikator ist, haben Novoselac und Srebric [45] gezeigt, dass näherungsweise davon ausgegangen werden kann, dass Gleichung (3) gilt.

$$\langle \epsilon_j^c \rangle_i \cong 2 \langle \epsilon_j^a \rangle_i \quad (3)$$

Für die Auslegung einer Lüftung sind diese Hintergründe relevant, weil diese zeigen, dass Luft, die für einen Raum bereitgestellt wird, nicht automatisch in der gleichen Intensität da ankommt, wo diese tatsächlich im Raum benötigt wird. Insbesondere abhängig ist die Lüftungseffizienz von der Position der Zu- und Abluftöffnung relativ zum Anforderungsbereich und von der Temperaturdifferenz zwischen der Zuluft und der Raumluft. Dass eine ideale Mischung, wie in DIN EN 16798 Teil 1 [16] und Teil 3 [30] als Standardwert vorgegeben und von Skåret [46] als Minimalziel ausgegeben, in vielen realen Fällen nicht erreicht wird, haben Auerswald *et al.* [41] gezeigt.

“Rule no. 1 for designing effective ventilating systems is therefore defined to design for air exchange efficiencies above 50 %.” [46, S. 421]

Realistischere Standardwerte sind demnach $\langle \epsilon_j^c \rangle_i = 0,9$ oder $\langle \epsilon_j^a \rangle_i = 0,45$. Dieser Unterschied mag zunächst vernachlässigbar erscheinen, bedeutet aber:

1. Für einen konsequenterweise höher angesetzten Anlagenvolumenstrom eine höhere Leistungsaufnahme von etwa 15 %, oder
2. Dass sich der Energieumsatz von Lüftungsanlagen entsprechend drastisch reduzieren ließe, wenn der Luftaustauscheffizienz ϵ^a und der Schadstoffabfuhereffektivität ϵ^c mehr Bedeutung beigemessen werden würde.

1.5 Gesundheit versus Energieeffizienz: Wie sollte richtig gefiltert werden?

Die Qualität der Innenraumluft in Form von deren Reinheit ist ein entscheidender Faktor für unsere Gesundheit, insbesondere, da wir rund 90 % unserer Zeit in Innenräumen verbringen. Schadstoffe wie Feinstaub (PM₁₀, PM_{2,5}), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Formaldehyd oder Radon (Rd) können, wie zuvor bereits beschrieben, dort in relevanten Konzentrationen auftreten und gesundheitliche Belastungen verursachen. Gleichzeitig verursacht die Luftfiltration in Lüftungsanlagen einen relevanten Energieaufwand, insbesondere durch den Druckverlust an Filtern und den damit verbundenen Stromverbrauch der Ventilatoren.

Ein effektives Filtersystem muss daher zwei Ziele in Einklang bringen:

1. die Minimierung gesundheitlicher Risiken und
2. die Begrenzung des Energieeinsatzes.

Die Auswahl geeigneter Filterklassen sollte sich an der Art und Konzentration der zu erwartenden Schadstoffe orientieren [47], [48], [49]. Auf dem Strömungsweg von außen nach innen sollte zunächst ein Wetter- oder Schlagregenschutz und anschließend ein Insekten- und Kleintierschutz in Form eines Gitters mit einer Maschenweite von etwa 1 mm vorgesehen werden. Die nächste Ebene wäre entweder ein ISO-coarse-Filter nach DIN EN ISO 16890 Teil 1 [47] (früher G4 nach DIN EN 779 [50]). Gegen Feinstaub empfiehlt sich ein ePM1-Filter $\geq 80 \%$ (früher F7 nach DIN EN 779 [50]). Diese Filterqualität ist

Pflicht für öffentliche Gebäudebauprojekte, denn die VOB/C-RLT [51] fordert die Einhaltung der VDI 6022 Blatt 1 [52], welche diese Filterklasse als Mindestanforderung für die Zuluft definiert.

Insbesondere für Luftreiniger und den Umluftanteil von Lüftungsanlagen ist zudem ein Aktivkohlefilter der Klassen LD oder MD nach DIN EN ISO 10121 Teil 3 [49] sinnvoll. Diese Filter deaktivieren gasförmige Schadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Formaldehyd und andere VOCs. Des Weiteren sind H14-HEPA-Filter nach DIN EN 1822 Teil 1 [48] die geeignete Wahl, um Keime und Viren aus der Luft abzuscheiden.

Moderne Lüftungssysteme sollten darüber hinaus immer mit einer sensorbasierten Regelung ausgestattet sein (basierend beispielsweise auf CO_2 -, VOC-, Feinstaub und Feuchtesensoren). Dies ermöglicht eine adaptive Regelung der Luftmengen und Filterstufen. So kann die Luftqualität bedarfsgerecht gesichert und gleichzeitig der Energieeinsatz minimiert werden.

1.6 Spannungsfeld der Dimensionierung von Luftleitungen: Akustik, Wärmeverluste und Ventilatorleistung

Die Dimensionierung von Luftleitungen erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen Energieeffizienz, thermischen Verlusten, Investitionskosten und akustischem Komfort. Die DIN 1946 Teil 6 [23, S. 50] empfiehlt für Leitungsabschnitte nahe an Nutzungseinheiten eine maximale Luftgeschwindigkeit von ca. 3 m/s, um Strömungsgeräusche zu minimieren und die Telefoniedämpfung zu verbessern. Diese Empfehlung unterstützt auch eine geringe Ventilatorleistungsaufnahme.

In Hauptleitungen hingegen ist eine höhere Strömungsgeschwindigkeit wirtschaftlich sinnvoll. Kriegel und Schaub [53] schlagen eine optimierte Auslegung vor, bei der die Druckverluste, Investitionskosten und Betriebskosten in ein ausgewogenes Verhältnis gebracht werden. Hier können Geschwindigkeiten von bis zu 5 m/s oder mehr sinnvoll sein – abhängig von der Netzstruktur und der energetischen Bewertung. Neben einer entsprechenden Dämmung der Luftleitungen nach DOM 1946 Teil 6 [23, S. 51-52] in Abhängigkeit von deren Einbausituation, führen höhere Strömungsgeschwindigkeiten zu kleineren Leitungsmantelflächen und damit zu geringeren Wärmeverlusten. Auch wirken sich höhere Strömungsgeschwindigkeiten positiv auf die Investkosten und den Platzbedarf aus. Ein vereinfachtes Auslegungsschema könnte Abbildung 5 folgen.



Abbildung 5: Vereinfachtes Schema für die Auslegung von Luftleitungen

Insbesondere für die akustische Auslegung sind noch weitere Normen relevant, sodass der Überblick hier nicht als abschließend zu betrachten ist. Des Weiteren sind für die Auslegung der Lüftungsleitungen

auch die Hinweise zur Luftdichtheit aus Abschnitt 2.4.2.1, sowie die sich ergebenden Druckverluste der Leitungen zu berücksichtigen.

Ein Richtwert für ein energieeffizient ausgelegtes Lüftungssystem könnte auch für Deutschland die dänische Norm BR 18 [54] sein. Diese enthält eine systemische Begrenzung der spezifischen Ventilatorarbeit auf 1.500 J/m³ geförderter Luft als Maßstab.

1.7 Warum sollten kontrollierte Lüftungslösungen oder -systeme in die Fassade oder Fassadenbauteile integriert werden?

Die Integration kontrollierter Lüftungslösungen in Fassadenbauteile bietet eine Vielzahl an Vorteilen, insbesondere im Kontext der energetischen Sanierung und Modernisierung von Bestandsgebäuden. Ein zentrales Argument ist die gleichzeitige Verbesserung der Energieeffizienz und der Raumluftqualität infolge einer minimalinvasiven Gebäudemodernisierung von außen. Durch kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung können die Lüftungswärmeverluste gegenüber der Fensterlüftung um bis zu 50 % und mit der gleichzeitigen Modernisierung der Gebäudehülle die Transmissionswärmeverluste um bis zu 85 % reduziert werden [55], [56], [57]. In der Konsequenz ergeben sich also zum einen deutlich reduzierte Heizkosten zum zweiten aber auch, durch die unabhängig vom Nutzerverhalten zuverlässig gewährleistet Raumluftqualität, weniger Feuchte- und Schimmelprobleme. Außerdem sind die finanziellen Einsparungen aufgrund der Vorbeugung gegen die in Abschnitt 2.1.3 erläuterten Luftschadstoffinduzierte Erkrankungen nicht zu unterschätzen.

In Bezug auf die Investition für die Modernisierung von Bestandsgebäuden konnten diverse Studien übereinstimmend ein erhebliches Potenzial für Fassaden-integrierte, vorgefertigte Lösungen gegenüber konventionellen, intern verlegten zentralen Lüftungssystemen im Gebäudebestand ermitteln [56], [57], [58], [59], [60]. Die wichtigsten Zahlen und Aussagen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Kosten- und Organisationsvorteile der Fassaden-integrierten Lüftung für die Bestandssanierung.

System / Kostenart	Zentrale, intern verlegte Systeme	Fassaden-integrierte, vorgefertigte Systeme
Investitionskosten gesamt	80–120 €/m ² (Wohnfläche)	30–80 €/m ² (Wohnfläche)
Anteil „Bau, Putz, Kernbohrungen“	25–35 % der Gesamtkosten	<10 % der Gesamtkosten
Montageaufwand	3–6 Gewerke, meist >1 Woche pro WE	1–2 Gewerke, 1–3 Tage pro WE
Umzug/Nutzerstörung	häufig notwendig	i.d.R. nicht notwendig
Anfahrts-/Koordinationskosten	bis 30 % höher	bis 30 % niedriger
Kostendifferenz Beispiel	~2.000 €/WE mehr als Fassadenlösung	bis zu 30 % Einsparung

Die Integration kontrollierter Lüftungssysteme in Fassadenbauteile trägt damit wesentlich zu einer nachhaltigen, wirtschaftlichen und nutzerfreundlichen Gebäudemodernisierung bei. Sie verbessert die Energieeffizienz, Raumluftqualität und den Nutzerkomfort und minimiert Installationsaufwand und Nutzerstörung.

1.8 Wie können solche integrierten Lüftungen aussehen und was ist für deren Gestaltung zu beachten?

Der wichtigste Aspekt für die Planung von Lüftungssystemen ist, dass diese mit den Endnutzern und nach deren Bedürfnisse geplant und umgesetzt werden, da sonst deren Vorteile nicht zum Tragen kommen [40, S. 13-14], [61], [62]. Abgesehen davon lassen sich integrierte Lüftungssysteme grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: raum- oder wohnungsweise dezentrale Systeme sowie zentralisierte Systeme mit Luftverteilung über die Fassade. Weiter sind hybride Ansätze möglich, die Elemente beider Konzepte kombinieren.

1.8.1 Dezentrale, raum- oder wohnungsweise Systeme

Diese Systeme sind meist direkt in der Gebäudehülle oder im Fensterbereich integriert und zeichnen sich durch eine hohe Modularität und einfache Nachrüstbarkeit aus. Es lassen sich zwei Haupttypen unterscheiden:

13. **Regenerativ alternierende Pendellüfter:** Diese Geräte arbeiten paarweise im Wechselbetrieb. Während ein Gerät Frischluft einbläst, führt das andere Abluft ab. Die Wärmerückgewinnung erfolgt über einen keramischen Speicher. Vorteile sind der geringe Platzbedarf und die einfache Integration in die Fassade. Allerdings ist die Luftführung nicht kontinuierlich, was zu Schwankungen im Luftvolumenstrom führen kann [40, 7 ff.], [57, S. 154ff], [60], [63]. (Abbildung 6)



a) Pendellüfter in Kernlochbohrung [64]

b) Pendellüfter am Fensterrahmen oder über einem Raffstorekasten [65]

Abbildung 6: Beispiele für dezentrale, regenerativ arbeitende Lüftungsgeräte. Die Auswahl der Modelle begründet sich nicht durch besondere Leistungsdaten, sondern primär durch die Aussagekraft für das Funktions- und Einbauprinzip dieser Gerätekategorie. Ähnliche Modelle sind von diversen Herstellern erhältlich.

14. **Rekuperativ kontinuierlich balancierte Geräte:** Diese Systeme verfügen über zwei Ventilatoren und einen Wärmeübertrager, der eine gleichzeitige Zu- und Abluftführung mit hoher Wärmerückgewinnung ermöglicht. Sie bieten eine gleichmäßigere Luftqualität und eignen sich besonders für Räume mit konstantem Lüftungsbedarf [57, S. 157], [59, 42 ff.], [63]. (Abbildung 7)



a) *Rekuperativ balanciertes Einzelraumgerät für Kernlochbohrungen [66]*



b) *Rekuperativ balanciertes Einzelraumgerät in Kombination mit dem Fenster [67]*

Abbildung 7: Beispiele für dezentrale, rekuperative und balancierte Lüftungsgeräte. Die Auswahl der Modelle begründet sich nicht durch besondere Leistungsdaten, sondern primär durch die Aussagekraft für das Funktions- und Einbauprinzip dieser Geräteklasse. Ähnliche Modelle sind von diversen Herstellern erhältlich.

Die beiden dezentralen Systeme werden am Markt sowohl in der Ausführung, welche in separate Außenwanddurchbrüche eingebaut wird, angeboten als auch in der Ausführung zur Integration in bestehende Fensterdurchbrüche zur Installation gemeinsam mit einem neuen Fenster. Beispiele für beide Typen sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

1.8.2 Zentrale Systeme mit Fassadenintegration

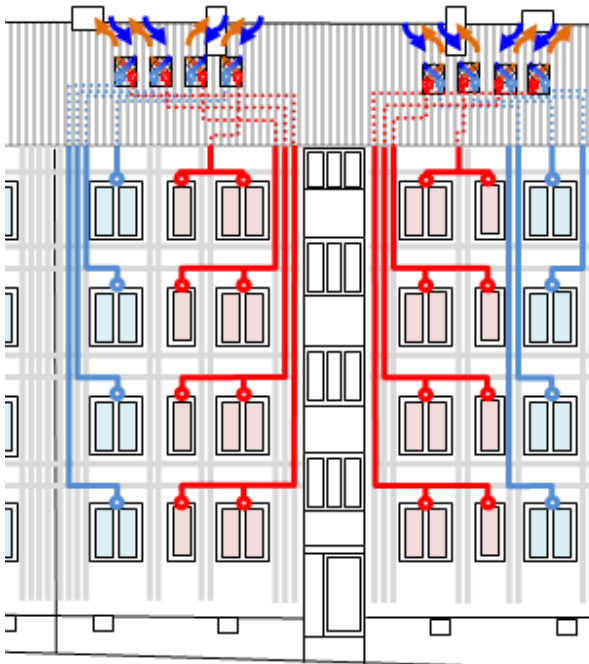
Zentrale Lüftungssysteme mit Luftverteilung über die Fassade bieten Vorteile bei der Wartung und Steuerung, erfordern jedoch eine sorgfältige Planung der Luftführung. Von Coydon [57] und weiteren darauf aufbauenden Studien wurde ein Konzept vorgestellt und demonstriert, bei dem Luftkanäle – wie in Abbildung 8 dargestellt – in die Dämmebene der Fassade integriert werden [56], [58], [59, S. 38-41], [68], [69], [70]. Dies reduziert den Installationsaufwand im Innenraum und ermöglicht eine minimalinvasive Nachrüstung im Zuge einer energetischen Hüllsanierung. Außerdem bietet die Lösung speziell für Eigentümergemeinschaften und Wohnbaugenossenschaften den Vorteil einer zentralen Wartung ohne organisatorische Abstimmung mit den Mietern. Die Luftverteilung erfolgt über dezentrale Auslässe in den einzelnen Räumen, die an ein zentrales Lüftungsgerät im Dach- oder Kellerbereich angeschlossen sind.

Die zentralen Anforderungen solcher Systeme sind die Sicherstellung der Luftdichtheit und der thermischen Qualität der Kanäle in der Fassade. Zudem müssen Brandschutzanforderungen und Revisionsmöglichkeiten berücksichtigt werden [57, S. 136ff], [69].

Für die erfolgreiche Integration solcher Systeme sind folgende Aspekte zu beachten:

15. **Luftdichtheit** der Leitungen ATC 2 nach 30

16. **Wärmebrückenfreiheit:** Die Integration in die Dämmebene muss so erfolgen, dass keine zusätzlichen Wärmeverluste entstehen [60, S. 18ff]. General sollten die Luftleitungen so nah wie möglich an der thermisch-leitenden statisch tragenden Fassade verlegt werden, sodass diese sich quasi geometrisch außen am Gebäude, aber thermisch im Gebäude befinden [57, S. 148-149].



a) Beplante Fassade mit integrierten Lüftungsleitungen



b) Installierte wandnahe 80 mm Dämmschicht mit den integrierten Leitungen vor der Installation der äußeren 80 mm Dämmschicht.



c) Abluftseitige Ventilatoren und Schalldämpfer im Dachboden



d) Integrierte Sensoren für die Ventilatoren

Abbildung 8: RetroKit Demonstrationsgebäude Nauheimer Straße 1 und 3, Frankfurt a. M. der ABGnova GmbH [71, S. 275-279]

17. **Wartungszugänglichkeit:** Sämtliche wartungsbedürftige Komponenten sollten zentralisiert, vor Eintritt bzw. nach Austritt der Lüftungswege im besten Fall zentralisiert im Dachboden oder Keller eingeplant werden.
18. **Schallschutz:** Die Luftführung darf keine zusätzlichen Schallbrücken erzeugen.
19. **Brandschutz:** Insbesondere bei zentralen Systemen mit Luftverteilung über mehrere Nutzungseinheiten sind Brandschutzklappen und -konzepte erforderlich [69].

Aufgrund dieser vielfältigen, bisher nicht traditionell gemeinsam gedachten Anforderungen durch die Integration wird derzeit im Rahmen des EU-Projektes [AEGIR](#) ein Auslegungsprogramm erstellt, mit dem die Planung eines solchen Systems vereinfacht wird [72]. Die Anwendbarkeit des Programms und die Umsetzbarkeit als vollständig vorgefertigtes Modulsystem werden hier in weiteren vier sehr unterschiedlichen Demonstrationsgebäuden getestet.

1.8.3 Hybride Ansätze: Raumweise Systeme mit zentraler Steuerung und Wartung

Ein innovativer Zwischenansatz wurde im [FIHLS](#)-Projekt vorgestellt [73], [74]. Dabei handelt es sich um ein raumweises, dezentral integriertes Lüftungssystem, das, wie in Abbildung 9 dargestellt, vollständig in die Fassadenelemente eines Mehrfamilienhauses integriert wurde. Die Besonderheit liegt in der Kombination aus dezentraler Luftführung und zentraler Steuerung sowie der teilweisen Vorfertigung der Fassadenelemente inklusive Lüftungstechnik. Konkret wurden für jeden Raum einzeln ein Lüftungsgerät nach dem Pendellüfter-Prinzip in den Sockelbereich eines kleinen Mehrfamilienhauses in die Dämmebene installiert. Die Steuerung wurde zentral im Keller untergebracht, wobei jedes Gerät individuelle Sensorik und eine Nutzerschnittstelle in der Fensterlaibung besitzt. Dies ermöglicht eine schnelle Montage, hohe Qualitätssicherung und minimale Eingriffe in den Innenraum.



a) Fassadenbeplanung aus kurzen Luftleitungen mit dezentralen Geräten außen im Sockelbereich



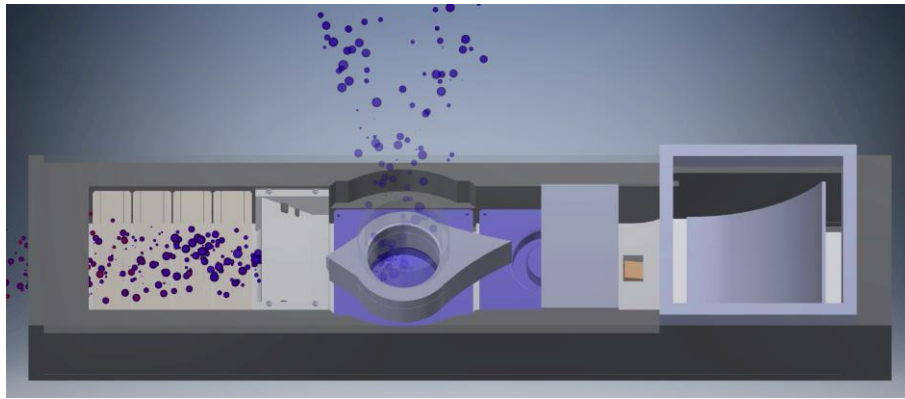
b) Fertig saniertes Gebäude in Adorf i.V.

Abbildung 9: Sanierung Demonstrationsobjekt Adorf i. V. aus dem Projekt [FIHLS](#) [73]

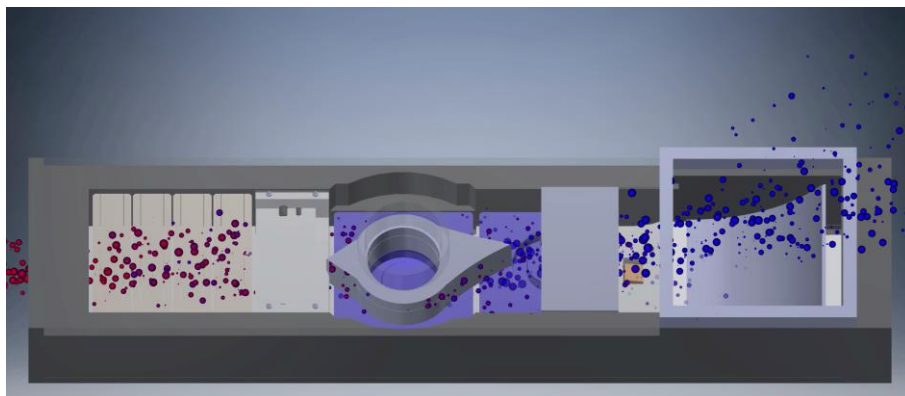
Die Lüftungsgeräte selbst sind vertikal in die Dämmebene integriert. Sie bestehen, wie in Abbildung 10 dargestellt, aus einem EPS-Gehäuse, welches zwei Radialventilatoren, eine Klappenmechanik, einen regenerativen Wärmespeicher sowie die Feuchte- und CO₂-Sensorik beherbergt.

Neben der technischen Entwicklung des Gerätes und dessen Integration ist insbesondere die Relevanz der Rückmeldungen der Endnutzer in den Fokus geraten. Aus diesem Grund wurde von Maier [75] eine umfangreiche psychologische Studie durchgeführt und in zwei Veröffentlichungen aufbereitet [61, Tabelle 6], [62]. Die wichtigste Erkenntnis daraus ist vereinfacht folgende:

„Lüftungsgeräte und -Systeme können rechnerisch beliebig energieeffizient sein, praktisch ist deren Effizienz gleich null, wenn diese nicht nach den Hygiene-, Gesundheits-, Akustik- und Bedienungsanforderungen der Endnutzer entworfen und deren Planung daran ausgerichtet wird.“



a) Lüftungsgerät im Zuluftbetrieb



b) Lüftungsgerät im Abluftbetrieb

Abbildung 10: 3D-Modell des dezentralen Lüftungsgeräts aus dem FIHLS-Projekt für das Demonstrationsgebäude in Adorf i. V.

Die Gestaltung Fassaden-integrierter Lüftungssysteme muss dementsprechend nutzerbezogene, bautechnische, bauphysikalische und brandschutztechnische Anforderungen erfüllen. Die Wahl zwischen dezentralen, (halb-)zentralen und zentralen Systemen hängt von Gebäudetyp, Sanierungsziel, Nutzerakzeptanz, Platzangebot und Wirtschaftlichkeit ab. Moderne Planungs- und Routing-Tools (z. B. digitale Werkzeugketten, Assisted Routing) können die Integration erheblich vereinfachen und optimieren.

2 Umsetzung Fenster-integrierte Lüftung im Pfaff-Quartier

Die ursprünglich geplante Integration Fassaden- oder Bauteil-integrierter Lüftungsgeräte mit Anbindung an ein SmartHome-System im Demonstrationsobjekt Altes Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier in Kaiserslautern konnte aufgrund der Verzögerungen bei der baulichen Umsetzung nicht im geplanten Umfang durchgeführt werden. Deshalb wurde alternativ das Gerät und Lüftungssystem im Demonstrationsobjekt Adorf i. V. (siehe Kapitel 2.8.3) weiterentwickelt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Code- und Steuerungsoptimierung mit folgenden Zielen:

1. Verbesserung der Nutzerakzeptanz durch Reduktion der Geräteeigengeräusche.
2. Erhöhung der Robustheit des Systems.
3. Verbesserung der Energieeffizienz.

2.1 Ausgangssituation und identifizierte Schwachstellen

Das dezentrale Pendellüftungssystem bestand aus jeweils einem Zu- und Abluftventilator pro Raum, die alternierend betrieben wurden. Die Geräte waren im Sockelbereich der Fassade in das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) integriert. Die Steuerung erfolgte über Mikrocontroller (Arduino Mega 2560), die die Sensordaten (CO₂, Temperatur, Feuchte) auswerteten und bedarfsgerechte Regelstrategien ermöglichten. Eine manuelle Handsteuerung erlaubte die Auswahl verschiedener Betriebsmodi. Der Aufbau des Lüftungsgeräts gleicht in wesentlichen Punkten den in der Alten Verwaltung im Pfaff-Quartier eingesetzten Pendellüftern, sodass Erkenntnisse aus der Optimierung auf die Geräte dort übertragen werden konnten. Entscheidender Unterschied ist die in Adorf verwendete mechanische Umlenkung der Luft über verstellbare Klappen, ein für das System in Adorf wichtiger Parameter, der für das System im Kaiserslautern keine Relevanz hat.

Die Analyse des Systems in Adorf offenbarte mehrere Schwachstellen:

20. Systemausfälle durch Sensordefekte:
Feuchtigkeitsschäden führten zu Ausfällen der Sensorik, was wiederum zum Einfrieren des Programmcodes führte.
21. Asynchrone Klappensteuerung:
Die mechanische Klappensteuerung arbeitete nicht zuverlässig synchron mit den Lüftern, was zu ineffizientem Betrieb und erhöhter Geräuschentwicklung führte.
22. Fehlerhafte CO₂-Messwerte:
Eine fehlende Kalibrierung der Sensoren führte zu unrealistischen Werten.
23. Hohe Geräuschentwicklung:
Insbesondere der Klappenmotor erzeugte störende Geräusche, die die Nutzerakzeptanz beeinträchtigten.
24. Vertauschte Sensordaten:
In Einzelfällen wurden Innen- und Außensensorwerte inkonsistent übermittelt.
25. Wärmeverluste im Winterbetrieb:
Nutzer berichteten über zu kalte Zuluft trotz Wärmerückgewinnung.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden zwei zentrale Weiterentwicklungen umgesetzt:

2.2 Optimierung der Steuerungslogik und mechanische Anpassungen

Der Steuerungscode wurde vollständig überarbeitet und modularisiert. Die neue Logik basiert auf einem zentralen Intervallzähler, der sowohl die Lüfter als auch die Klappenpositionen synchronisiert. Fehlerhafte Lichtschrankensignale, die zuvor zu asynchronem Verhalten führten, wurden durch eine robuste Interrupt-Logik mit Entprellung ersetzt. Zusätzlich wurde ein Fallback-Modus implementiert, der bei Sensorausfall einen sicheren Minimalbetrieb gewährleistet.

Anstelle der mechanischen Klappen wurde ein neu entwickelter strömungsmechanischer Schichtdiffusor eingesetzt. Dieser kommt ohne bewegliche Teile aus und nutzt Druckverluste zur Strömungslenkung. Dadurch entfällt die fehleranfällige Klappenmechanik vollständig. Erste Tests zeigten, dass der Diffusor vergleichbare Volumenströme bei deutlich reduzierter Komplexität ermöglicht.

2.2.1 Weitere Verbesserungen

Auf Basis der Problemanalyse wurden zusätzlich folgende Verbesserungen umgesetzt:

26. Sensorik:

Die CO₂-Sensoren wurden mit einer automatisierten Kalibrierung (ASC) ausgestattet. Zusätzlich wurden die Sensoren hydrophob beschichtet, um Feuchteschäden zu vermeiden.

27. Betriebsmodi:

Die Betriebsarten wurden nach Tabelle 8 überarbeitet und nutzerfreundlicher gestaltet. Die CO₂- und Feuchteregelung orientiert sich nun nach Abbildung 11 und Abbildung 12 an 16.

Tabelle 8: Aktualisierte Betriebsmodi des Lüftungssystems

Modus	Beschreibung	Ventilatorleistung in %
0	Schlafstellung: System ist für 10 Stunden ausgeschaltet	0
1	Standardstellung: System läuft im alternierenden Modus bei minimaler Geräuschbelastung	25
2	Ruhestellung: System ist für 3 Stunden ausgeschaltet	0
3	Feuchtestellung: System regelt in Abhängigkeit der Feuchtwerte	25 – 100
4	Luftqualitätsstellung: System regelt in Abhängigkeit der CO ₂ -Werte	25 – 100
5	Durchzugstellung: System läuft für eine Stunde auf 100 %	100

28. Datenmanagement:

Die Datenübertragung erfolgt im JSON-Format an eine Zeitreihendatenbank. Die Visualisierung erfolgt über Grafana, was eine dynamische Analyse und Alarmierung ermöglicht.

29. Nutzerinteraktion:

Die Handsteuerung wurde funktional erweitert, u. a. durch eine Rückmeldefunktion über LED-Signale. Perspektivisch ist eine digitale Anzeige vorgesehen.

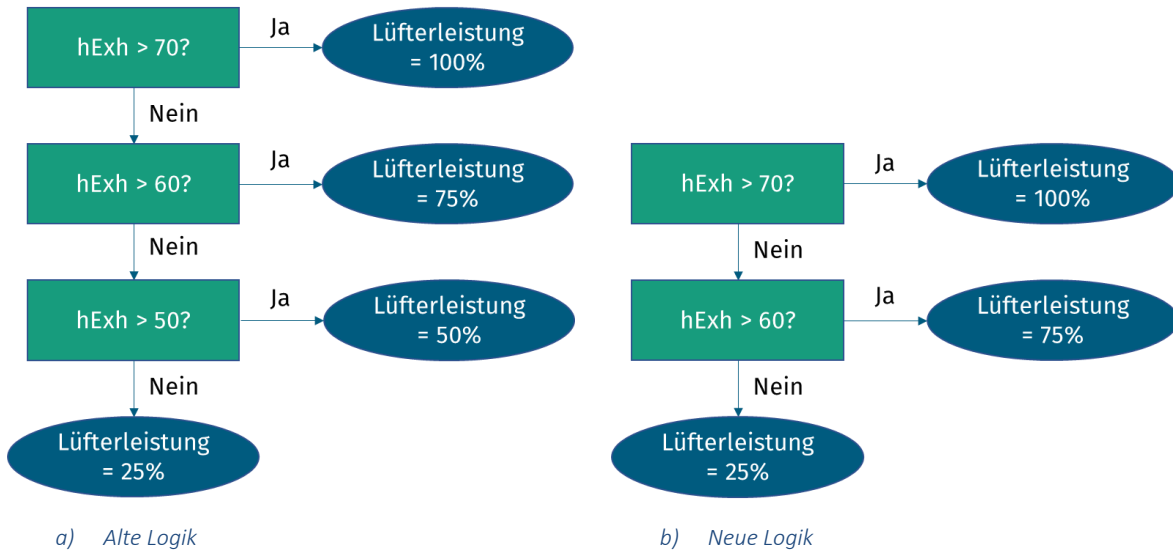


Abbildung 11: Logiken der Feuchteregelungen im Vergleich

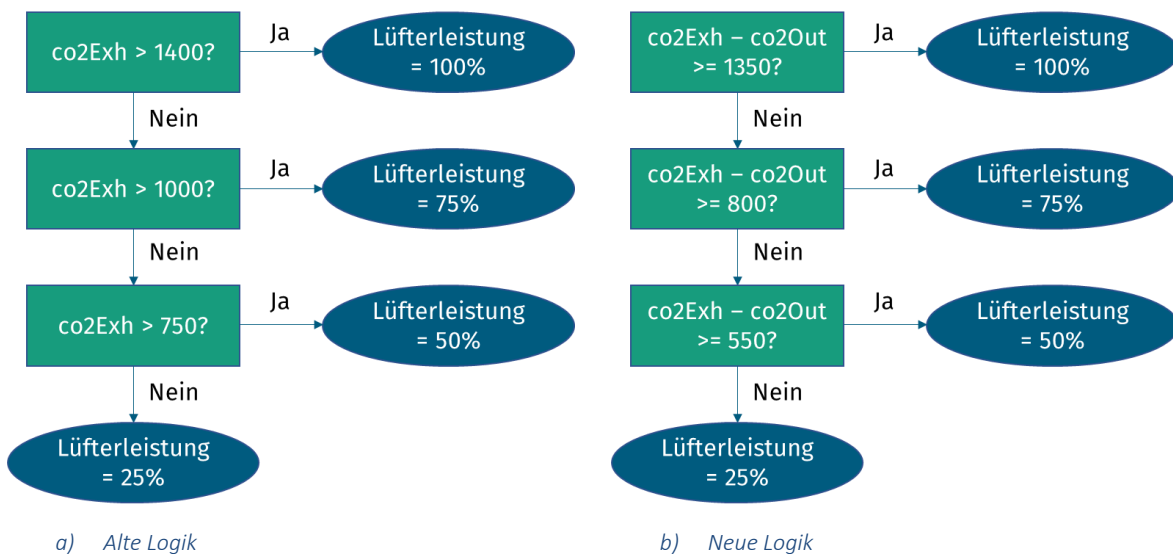


Abbildung 12: Logiken der CO₂-Regelungen im Vergleich

Die Weiterentwicklungen wurden zunächst am Teststand und anschließend im Realbetrieb validiert. Dabei kamen folgende Methoden zum Einsatz:

30. Integrationstests zur Prüfung der Interaktion aller Komponenten
31. Volumenstrommessungen mit Flügelradanemometer
32. Energieverbrauchsmessungen für Lüfter und Regelung

- 33. Temperaturmessungen zur Bestimmung des Wärmerückgewinnungsgrads
- 34. Nutzerbefragungen zur Akzeptanzbewertung

3 Ergebnisse

Die Weiterentwicklung des Systems führte zu signifikanten Verbesserungen in mehreren Bereichen:

Durch die robuste Fehlerbehandlung und die verbesserte Dokumentation konnten Systemausfälle deutlich reduziert werden. Die neue Steuerungslogik verhindert asynchrone Zustände zuverlässig. Fehlerhafte Sensoren führen nicht mehr zum Absturz des Systems, sondern werden erkannt und gemeldet.

Mechanisch bedingten Geräusche konnten stark reduziert werden, dies betrifft aber in erster Linie den Aufbau in Adorf mit mechanischen Klappen die bei den fensterintegrierten Geräten in Kaiserslautern nicht zum Einsatz kommen. Die Rückmeldung der Nutzer zur neuen Steuerung fiel gemischt aus, insbesondere der Wunsch nach einer digitalen / anders gestalteten Anzeige wurde mehrfach geäußert. Dies konnte in der Demonstration in Adorf nicht mehr umgesetzt werden. In Kaiserslautern wurde die Einbindung in das geplante Smart-Home System geprüft, konnte aufgrund fehlender technischer Schnittstellen aber nicht implementiert werden.

Die mittlere Rückwärmzahl des Systems lag bei **95,5 %**. Dieser Wert ist gut vergleichbar mit Gerätedaten von markverfügbaren Pendellüftern, welche noch nicht nach dem neueren Spülluftverfahren bewertet wurden. Es ist aber davon auszugehen, dass auch die hier angegebene Rückwärmzahl gegenüber eines Wärmerückgewinnungsgrades tendenziell eine Überschätzung darstellt [40, S. 142ff.].

4 Erkenntnisse

Folgende Erkenntnisse konnten u.a. aus dem Arbeiten gewonnen werden:

1. **Eine ausreichende Raumlufthqualität kann nur mit Lüftungsgeräten erreicht werden.**
Untersuchungen zeigen, dass eine rein auf (unkontrollierter) Fensterlüftung beruhende Raumlüftung eine ausreichende Raumlufthqualität sowohl beim Neubau als auch in der Sanierung nicht sicherstellen kann.
2. **Gesundheit, Hygiene und Komfort sind die Treiber für den Einsatz von Lüftungsanlagen.**
Kontrollierte Lüftungsanlagen weisen insbesondere bei Einsatz von Wärmerückgewinnungstechniken hohe Effizienzgewinne auf und tragen somit aktiv zur Erreichung der Klimaneutralität von Quartieren bei. Die Treiber für den Einsatz sind aus Kundensicht jedoch vor allem Gesundheit, Hygiene und Komfort. Deshalb sollte bei der Weiterentwicklung der Geräte, der technischen Anforderungen und der Erfolgsmessungen nicht nur auf die Effizienz, sondern auch auf diese Nutzerbedarfe geachtet werden.
3. **Bauteil-integrierte Lüftungssysteme etablieren sich zunehmend bei Gebäudesanierungen.**
Fassaden-integrierte Lüftungssysteme gewinnen als dezentrale Lösung bei Sanierungen von Bestandsgebäuden zunehmend an Bedeutung. Der Einbau von Fensterrahmen-integrierten Lüftungsgeräten im Alten Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier hat die Praxistauglichkeit gezeigt, wobei bezüglich der Steuerung der Geräte noch Optimierungsbedarf vorhanden ist.
4. **Entwicklungsbedarf besteht bezüglich bedarfsabhängiger Regelungen für Lüftungssysteme.**
Für die Planung, Umsetzung und den Betrieb von mechanischen, kontrollierten Lüftungssystemen sind umfangreiche Methoden und Parameter bekannt und in einschlägigen Normen dokumentiert. Marktverfügbare Geräte beschränken sich jedoch häufig auf die Bereitstellung von bestimmten Volumenströmen, eine bedarfsabhängige Regelung ist im Bereich Wohnungslüftung noch die Ausnahme.
5. **Entwicklungsbedarf besteht auch in Bezug auf robuste Komponenten und der Einbindung in die Heizungs- und Kühltechnik.**
Voraussetzung für die Akzeptanz der Lüftungssysteme ist die Wartungsarmut und Langlebigkeit, insbesondere bei dezentralen Komponenten. Deshalb besteht Bedarf für die Weiterentwicklung der Systeme in Bezug auf möglichst robuste Komponenten, die einfach zugänglich und wartbar sind. Weiter besteht Bedarf für die Integration in die Heizungs- und Kühltechnik des Gebäudes, insbesondere auch was die Steuerung und Bedienfreundlichkeit angeht.

5 Literatur

- [1] W. Birmili, A. Daniels, A. M. Scutaru und F. Kuebart, "Die Luft, die wir alle atmen: Zur Arbeit der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK)," *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, Early Access. doi: 10.1007/s00103-023-03815-z.
- [2] Umweltbundesamt (UBA). "Wirkung auf die Gesundheit." Zugriff am: 15. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-die-gesundheit#aussenluft>
- [3] Weltgesundheitsorganisation (WHO), Hg. *Global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide* (Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO). Genf, Schweiz, 2021. Zugriff am: 27. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1371692/retrieve>
- [4] P. Kumar, A. B. Singh, T. Arora, S. Singh und R. Singh, "Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management," *The Science of the total environment*, Early Access. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162163.
- [5] J. Yang *et al.*, "A comprehensive review on indoor air pollutants and their health impacts: priority pollutants and suggested mitigations," *Air Qual Atmos Health*, 2025, doi: 10.1007/s11869-025-01750-3.
- [6] S. Brasche, E. Heinz, T. P. D.-I. Hartmann, W. Richter und W. Bischof, "Vorkommen, Ursachen und gesundheitliche Aspekte von Feuchteschden in Wohnungen," *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, Jg. 46, Nr. 8, S. 683–693, 2003, doi: 10.1007/s00103-003-0647-9.
- [7] H. Salonen, T. Salthammer, E. Castagnoli, M. Täubel und L. Morawska, "Cleaning products: Their chemistry, effects on indoor air quality, and implications for human health," *Environment International*, Early Access. doi: 10.1016/j.envint.2024.108836.
- [8] L. Kempton, D. Daly, G. Kokogiannakis und M. Dewsbury, "A rapid review of the impact of increasing airtightness on indoor air quality," *Journal of Building Engineering*, Jg. 57, 2022, Art. Nr. 104798, doi: 10.1016/j.job.2022.104798.
- [9] Weltgesundheitsorganisation (WHO), Hg. *WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mould*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe, 2009. Zugriff am: 29. Oktober 2021.
- [10] A. R. Fortner, E. D. Fechter-Leggett, Martin, Stephen B., Jr. und D. A. Burns, "Evaluation of Indoor Dampness, Mold, and Ventilation at a College," Centre for Disease Control and Prevention (CDC), Rep. 2022-0077-3422, Jun. 2025. Zugriff am: 15. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2022-0077-3422.pdf>
- [11] A. V. Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin und T. D. Sterling, "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments," *Environmental health perspectives*, Jg. 65, S. 351–361, 1986. doi:

10.1289/ehp.8665351. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1474709/pdf/envhper00436-0331.pdf>

- [12] M. J. Mendell, A. G. Mirer, K. Cheung, M. Tong und J. Douwes, "Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: a review of the epidemiologic evidence," *Environmental health perspectives*, Early Access. doi: 10.1289/ehp.1002410.
- [13] J. Douwes, P. Thorne, N. Pearce und D. Heederik, "Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects," *The Annals of occupational hygiene*, Jg. 47, Nr. 3, S. 187–200, 2003, doi: 10.1093/annhyg/meg032.
- [14] C. Krantz *et al.*, "Cross-sectional study on exhaled nitric oxide in relation to upper airway inflammatory disorders with regard to asthma and perennial sensitization," *Clinical and experimental allergy : journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, Early Access. doi: 10.1111/cea.14019.
- [15] G. Morantes, B. Jones, M. Sherman und C. Molina, "A preliminary assessment of the health impacts of indoor air contaminants determined using the DALY metric," *International Journal of Ventilation*, Jg. 22, Nr. 4, S. 307–316, 2023, doi: 10.1080/14733315.2023.2198800.
- [16] *DIN EN 16798-1:2022-03 Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden –: Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6;*, 16798-1, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Mrz. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-16798-1/349622591>
- [17] L. Cony und J. Laverge, "A Methodology to assess economical impacts of poor IAQ in office buildings from DALY and SBS induced costs," (CLIMA 2022 conference, 2022: CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress), 2022, doi: 10.34641/clima.2022.297.
- [18] J. Gerdey. "VDI-Richtlinien und Normen zu Innenraumluft – Stand Dezember 2024: Erarbeitet von der VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss." Zugriff am: 15. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.vdi.de/fileadmin/user_upload/Flyer_Innenraumluft_2024-12.pdf
- [19] "Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG): GEG," in *Bundesgesetzblatt Teil I*, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV), Hg., Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2020. Zugriff am: 19. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>
- [20] J. Laverge, "Ontwerpstrategieën voor residentiële ventilatie: Design Strategies for Residential Ventilation Systems," Dissertation, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Vakgroep Architectuur en Stedenbouw, Universiteit Gent, Gent, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://biblio.ugent.be/publication/4095357/file/4336640.pdf>

- [21] G. Rojas, A. Greml, R. Pfluger und P. Tappler, "Assessing the "sufficient ventilation" requirement for Austrian buildings: development of a Monte Carlo based spreadsheet calculation to estimate airing intervals and mould risk in window ventilated buildings," *International Journal of Ventilation*, Jg. 22, Nr. 4, S. 336–345, 2023, doi: 10.1080/14733315.2023.2198788.
- [22] E. Anlauff *et al.*, "Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden: Teil II: Wohngebäude," (Empfehlungen des Arbeitskreis Lüftung (AK Lüftung) am Umweltbundesamt), 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fb_anforderungen_an_lueftungskonzeptionen_in_wohngebaeuden_bf.pdf
- [23] *DIN 1946-6:2019-12 Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*, 1946-6, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Dez. 2019.
- [24] Bundesregierung, *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen: HOAI*, 2023. Zugriff am: 16. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/BJNR227600013.html
- [25] *DIN V 18599-6:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung: Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühltssystemen für den Wohnungsbau*, 18599-6, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Sep. 2018.
- [26] *DIN 18017-3:2020-05, Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster_ - Teil_3: Lüftung mit Ventilatoren*, 18017-3, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Mai. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-18017-3/318911402>
- [27] *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6)*, 16798-2, Asociación Española de Normalización (UNE) und European Committee for Standardization (CEN), Madrid, Spain, Mai. 2019.
- [28] D. Khovalyg *et al.*, "Critical review of standards for indoor thermal environment and air quality," *Energy and Buildings*, Jg. 213, 2020, Art. Nr. 109819, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109819.
- [29] *DIN EN ISO 9972:2018-12 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015); Deutsche Fassung EN ISO 9972:2015*, 9972, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), European Committee for Standardization (CEN) und International Organization for Standardization (ISO), Berlin, Dez. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-9972/296830636>
- [30] *DIN EN 16798-3 | 2017-11 Energy performance of buildings – Ventilation for buildings: Part 3: For non-residential buildings*, 16798-3, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) und Committee for Standardization (CEN), Berlin, Nov. 2017.

- [31] J. Soenens und P. Pattijn, "Feasibility study of ventilation system air-tightness," in *32nd AIVC Conference: Towards Optimal Airtightness Performance*, Brussels, BE, Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), Hg., 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aivc.org/sites/default/files/1b3.pdf>
- [32] R. Carrié und V. Leprince, "Impact of ductwork airtightness and conduction losses on heat recovery efficiency," in *6th International BUILDAIR Symposium*, Berlin, GER, 2011.
- [33] V. Leprince, R. Carrié und M. Kapsalaki, "Building and ductwork airtightness requirements in Europe," *REHVA Journal*, June 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2018/RJ3/29-33/29-33_RJ1803_WEB.pdf
- [34] N. Hurel, V. Leprince und M. Lightfoot, "Financial impact of leaky ductwork in buildings: A calculation tool to raise awareness," in *Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings*, Aalborg University, Copenhagen, Denmark, Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC), Hg., 2023, S. 960–969. [Online]. Verfügbar unter: https://www.aivc.org/sites/default/files/130_0.pdf
- [35] *NF DTU 68.3 - Travaux de bâtiment - Installations de ventilation mécanique - Règles de calcul, dimensionnement et mise en oeuvre ; Cahier des clauses techniques types ; Critères généraux de choix des matériaux ; Cahier des clauses administratives spéciales types*, 68.3, Ministère de la Transition Écologique, BATIMENT-VENTILATION.fr, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.batiment-ventilation.fr/normes-regles-art/nf-dtu-683>
- [36] Aerotechnik E. Siegwart GmbH, Hg., "Leitfaden zur Auslegung von Lufttechnischen Anlagen," Friedrichsthal, Apr. 2014. Zugriff am: 23. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.aerotechnik.de/fileadmin/downloads/de/produkte/verschiedenes/Auslegung_von_lufttechnischen_Anlagen.pdf
- [37] A. Mörwald, "Dichtheitsklassen von RLT-Anlagen," Jun. 2022. Zugriff am: 23. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediacenter.wolf.eu/de-de/fachartikel/2022/dichtheitsklassen-von-rlt-anlagen>
- [38] M. Sandberg und M. Sjöberg, "The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms," *Building and Environment*, Jg. 18, Nr. 4, S. 181–197, 1983, doi: 10.1016/0360-1323(83)90026-4.
- [39] E. Mundt, H. M. Mathisen und P. V. Nielsen, *Ventilation effectiveness* (REHVA Guidebook 2). Brussels: Rehva, 2004. Zugriff am: 23. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rehva.eu/eshop/course-detail/no02-ventilation-effectiveness>
- [40] S. Auerswald, "Dezentrale Fassaden-Integrierte Wohnungslüftungsgeräte: Kombinierte Bewertung des erzielten Luftaustausches und der Energieeffizienz," Dissertation, Fraunhofer ISE, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/1e66bdb0-149d-4db7-a72b-76de73b60f6b/download>
- [41] S. Auerswald, A. Wagner und H.-M. Henning, "Proposal of an effort-benefit diagram to compare unit and room air-change rates applied to a literature review," in *Ventilation, IEQ and health in sustainable buildings: PROCEEDINGS*, Copenhagen, DK, International Network for Information on

Ventilation and Energy Performance (INIVE) und Aalborg University, Department of Civil Engineering, Hg., 2023, doi: 10.24406/h-451660.

- [42] *Ventilation in Buildings: DS 447:2021 Mechanical, Natural and Hybrid Ventilation Systems*, 447, Danish Standard (DS), Copenhagen, Dez. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://webshop.ds.dk/standard/M337327/ds-447-2021>
- [43] *Raumluftechnik Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln)*, 3804, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Mrz. 2009.
- [44] E. Skåret und H. M. Mathisen, "Ventilation efficiency," *Environment International*, Jg. 8, 1-6, S. 473–481, 1982, doi: 10.1016/0160-4120(82)90065-4.
- [45] A. Novoselac und J. Prof. Ph.D. Srebric, "Comparison of Air Exchange Efficiency and Contaminant Removal Effectiveness as IAQ Indices," *ASHRAE Transactions*, Jg. 109, Nr. 4663, 2003, Art. Nr. KC-03-4-5. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cae.utexas.edu/prof/novoselac/Publications/Novoselac_ASHRAE_Transactions_2003.pdf
- [46] E. Skåret, "Contaminant removal performance in terms of ventilation effectiveness," *Environment International*, Jg. 12, 1-4, S. 419–427, 1986, doi: 10.1016/0160-4120(86)90057-7.
- [47] *DIN EN ISO 16890-1:2017-08 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik: Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM) (ISO 16890-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16890-1:2016*, 16890-1, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), European Committee for Standardization (CEN) und International Organization for Standardization (ISO), Berlin, Aug. 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-16890-1/254385558>
- [48] *DIN EN 1822-1:2019-10 Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA): Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 1822-1:2019*, 1822-1, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) und European Committee for Standardization (CEN), Berlin, DE, Okt. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-1822-1/297837528>
- [49] *DIN EN ISO 10121-3:2023-10 Methode zur Leistungsermittlung von Medien und Vorrichtungen zur Reinigung der Gasphase für die allgemeine Lüftung -: Teil 3: Klassifizierungssystem für GPACDs für die Behandlung von Außenluft (ISO 10121-3:2022); Deutsche Fassung EN ISO 10121-3:2022*, 10121-3, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), European Committee for Standardization (CEN) und International Organization for Standardization (ISO), Berlin, DE, Okt. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-10121-3/355303568>
- [50] *DIN EN 779:2012-10 Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Bestimmung der Filterleistung; Deutsche Fassung EN 779:2012 [ZURÜCKGEZOGEN]*, 779, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Okt. 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-779/136851927>
- [51] *DIN 18379:2019-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen: Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) — Raumluftechnische Anlagen*, 18379,

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin, DE, Sep. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-18379/310840079>

- [52] VDI 6022 Blatt 1:2018-01 *Raumlufttechnik, Raumluftqualität: Hygieneanforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln) - Blatt 1*, 6022, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf, Jan. 2018.
- [53] M. Kriegel und M. Schaub, "Dimensionierungsfaktoren für Luftleitungen," *HLH*, Jg. 66, Nr. 8, S. 33–36, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/hlh/raumlufttechnik/dimensionierungsfaktoren-fuer-luftleitungen/>
- [54] Ministry of Transport, Building and Housing, Transport, Building and Housing Agency (MoT), *BR 18 Executive order on building regulations 2018: BR18*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://byggningsreglementet.dk/~media/Br/BR-English/BR18_Executive_order_on_building_regulations_2018.pdf
- [55] J. Adolf et al., "Shell HausWÄRME-Studie: Nachhaltige Wärmezeugung für Wohngebäude Fakten, Trends und Perspektiven," Hamburgisches WeltWirtschafts Institut (HWWI), Hamburg, 2011. Zugriff am: 1. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/Studien/Shell_Hauswaerme_Studie.pdf
- [56] F. Coydon, "D2.4 – Performance report on innovative solutions," in *RetroKit: Toolboxes for systemic retrofitting* (Seventh Framework Programme), D'Appolonia et al., Hg. (public deliverable), 2016. Zugriff am: 23. Oktober 2024.
- [57] F. Coydon, "Holistic evaluation of conventional and innovative ventilation systems for the energy retrofit of residential buildings," Dissertation, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg im Breisgau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.
- [58] F. Coydon, K. Schalk und C. Maurer, "D2.3 – Evaluation plan for test procedures," in *RetroKit: Toolboxes for systemic retrofitting* (Seventh Framework Programme), D'Appolonia et al., Hg. (confidential deliverable), 2016.
- [59] C. Bodensteiner, F. Musso, A. Dinkel, F. Coydon, A. Akarcay und F. Liedloff, *Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik "Fenstermaschine"* (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3008). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017. Zugriff am: 28. Juli 2025.
- [60] V. Pungercar et al., *Fenstermaschine II: Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik – Demoprojekt* (Endbericht zum Förderprojekt SWD – 10.08.18.7- 16.46 Oktober 2018) (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3118). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018. Zugriff am: 28. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:164612023X/Fenstermaschine-II-vorgefertigte-Sanierfenster?cHash=34f191f908d0052958e63b1fd215aa23>
- [61] J. Berneiser, S. Auerswald, D. Maier, S. Gözl, N. Carbonare und T. Pflug, "Feeling the breeze? Ventilation practices and occupant requirements for mechanical ventilation in residential buildings," *Energy and Buildings*, Jg. 302, Nr. 113702, 2024. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113702. [Online].

Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823009325?via%3Dihub>

- [62] J. Berneiser, D. Maier, S. Gölz, S. Auerswald und A. Dinkel, "Socio-technical perspectives for mechanical ventilation systems in buildings: predictors of attitude and user satisfaction," *Energy Efficiency*, Jg. 18, Nr. 2, 2025, doi: 10.1007/s12053-025-10300-w.
- [63] F. Coydon, S. Herkel, T. Kuber, J. Pfafferott und S. Himmelsbach, "Energy performance of façade integrated decentralised ventilation systems," *Energy and Buildings*, Jg. 107, S. 172–180, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.015.
- [64] Ventileo UG. "EcoVent_Verso." Zugriff am: 28. März 2022. [Online.] Verfügbar: https://ventileo.de/media/5c/13/ef/1599584505/EcoVent_Verso.jpg
- [65] Beck+Heun GmbH. "AIRFOX® – Dezentrale Lüftung mit Wärmerückgewinnung." Zugriff am: 29. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.beck-heun.de/produktsysteme/lueftungssysteme/airfox-one/>
- [66] Glen Dimplex Thermal Solutions. "DL 50 W2.: Dezentrales Lüftungsgerät." Zugriff am: 29. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.dimplex.eu/sites/g/files/emiiian586/files/media_import/medias/docus/8/Dimplex_DL50WA2_Broschuere_DE.pdf
- [67] SIEGENIA-AUBI KG. "Kompakter Fassadenlüfter mit Wärmerückgewinnung, optimaler Luftleistung und hoher Schalldämmung.: AEROMAT VT WRG und WRG plus." Zugriff am: 29. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.siegenia.com/de/products/ventilation-systems/facade-ventilator/aeromat-vt-system>
- [68] F. Coydon, M. Duran, A. Dinkel und S. Herkel, "Monitoring Results and Optimization of a Façade Integrated Ventilation Concept for Building Retrofit," *International Journal of Ventilation*, Jg. 14, Nr. 4, S. 349–362, 2016. doi: 10.1080/14733315.2016.11684092. [Online]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3199426.pdf
- [69] M. Hengstler, "Brandschutztechnische Untersuchung von Gebäudefassaden mit integrierten Lüftungssystemen," Masterthesis, Hochschule Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2018.
- [70] F. Coydon, A. Dinkel, F. Kagerer und S. Herkel, "Rapid Retrofit Solutions Integrating HVAC into Prefabricated EWIS Systems," in *CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress and 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*, Prague, CZ, Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) und Institut International du Froid International Institute of Refrigeration (IIFIR), Hg., 1. Aufl., 2013.
- [71] N. Olivieri, "D6.5 – Performance and economic assessment of Retrokit system on full scale demonstration buildings," in *RetroKit: Toolboxes for systemic retrofitting* (Seventh Framework Programme), D'Appolonia et al., Hg., 2016. Zugriff am: 29. Juli 2025.

- [72] S. Auerswald, S. Aghili, M. Chaigneau und O. Knospe, "Assisted routing of facade-integrated duct-work," in *14th International BUILDAIR Symposium*, Hannover, DE, Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH (e-u[z]), Hg., 2025.
- [73] A. Dinkel *et al.*, "FIHLS Fassaden integrierte Heizung + Kühlung, Lüftung und Sanitär: Schlussbericht," Freiburg, Projektlaufzeit: 01.07.2016-30.10.2021, 2022, doi: 10.2314/KXP:1852324767.
- [74] S. Auerswald und A. Dinkel, "Fassadensanierung mit integriertem, raumweisem Lüftungssystem: Forschungsprojekt und konkrete Umsetzung bei einem Mehrfamilienhaus," *Klimajournal*, 24. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.klimajournal.com/fassadensanierung-mit-integriertem-raumweisem-lueftungssystem_111438
- [75] D. Maier, "Aufbau und Durchführung einer Mixed-Methods-Studie zu Lüftungsverhalten und Raumklima sowie der Einstellung bezüglich Lüftungssystemen," Master's Thesis, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt, Ingolstadt, 2020. [Online.] Verfügbar unter: https://fhg-primo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1ao8lnn/FHG_ISE_SUNRISEMARCISE8974