

Hybride Lüftung – ein guter Kompromiss?

Caroline Hoffmann (1), Viktor Dorer (2), Claudia Hauri (3), Alex Primas (3), Heinrich Huber (3)

Kontaktperson: Caroline Hoffmann, Hofackerstrasse 30, 4132 Muttenz,
Caroline.Hoffmann@fhnw.ch, www.fhnw.ch

(1) Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau;
(2) ehemals Empa Dübendorf; (3) Hochschule Luzern Technik & Architektur, Institut für Gebäudetechnik und Energie

Zusammenfassung

Dieses Projekt fokussiert auf hybride Lüftungen, als Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung, in Wohn- und Bürobauten. Bei heutigen Bestandsbauten ist vermutlich in den meisten Fällen ein hybrides Lüftungssystem im Einsatz. Als hybrides System gilt zum Beispiel die Kombination von Abluftventilatoren in den Nasszellen respektive einer Kochstellenentlüftung mit einer Fensterlüftung in den übrigen Räumen; unabhängig davon, wie die Nachströmung der Ersatzluft gelöst ist. Diese Anlagen sind zwar Teil der Planungsrealität, es existieren aber gleichzeitig keine Planungshilfen oder eine Norm. Ziel des Projektes ist daher, das aktuelle Wissen zu bündeln und Lücken zu identifizieren und zu dokumentieren. Damit wird die Basis für Planungsgrundlagen zur hybriden Lüftung gelegt. Hervorzuheben sind zwei Themenfelder, in denen Erkenntnisse gewonnen und mit Fachexperten aus der Forschung und Praxis im Rahmen von Workshops abgestimmt wurden:

1. Beschrieb hybride Lüftungssysteme mit Relevanz für das Schweizer Bauwesen: Anhand einer umfassenden Literaturrecherche werden neun hybride Lüftungssysteme identifiziert und beschrieben, die für den Grossteil der schweizerischen Wohn- und Bürogebäude eine Relevanz haben. Der bisher unscharfe Begriff der hybriden Lüftung ist nun definiert und abgegrenzt.
2. Identifikation Planungsthemen / Forschungsfragen im Zusammenhang mit hybrider Lüftung: Die im Zusammenhang mit hybrider Lüftung wichtigen Punkte sind erfasst. Aus der Literaturrecherche und den Workshops werden neben systembedingten Stärken und Schwächen auch häufig beobachtete Mängel, mögliche Fehlerquellen und bekannte Verbesserungspotentiale beschrieben. Eine der häufigsten Ursachen für Problemstellungen sind unterschiedlich strenge Anforderungen an natürliche und mechanische Lüftungssysteme. Ein Beispiel hierfür ist die thermische Behaglichkeit im Winter. Eine weitere Problemquelle ist die Exponiertheit von hybriden Lüftungssystemen gegenüber den Aussenbedingungen (Luftbelastung, Lärm, extreme Aussentemperaturen), die sich beispielsweise aus Nachströmöffnungen für die natürlicher Lüftung ergibt. Die Frage der unterschiedlichen Anforderungen ist zugleich auch eine wichtige offene Forschungsfrage.

Das Paper macht Angaben zur Begriffsdefinition «Hybride Lüftung», stellt die gängigsten hybriden Lüftungssysteme vor und gibt Einblicke in die systematische Erfassung der Planungsthemen und Forschungsfragen im Zusammenhang mit hybrider Lüftung.

1. Ausgangslage

Bei der Lüftung von Wohn- und Bürogebäuden besteht heute eine grosse Lücke zwischen den normativ gut geregelten rein mechanischen Systemen und den undefinierten hybriden Systemen. Hybride Lüftungen verstehen sich als eine Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung (Abbildung 1).

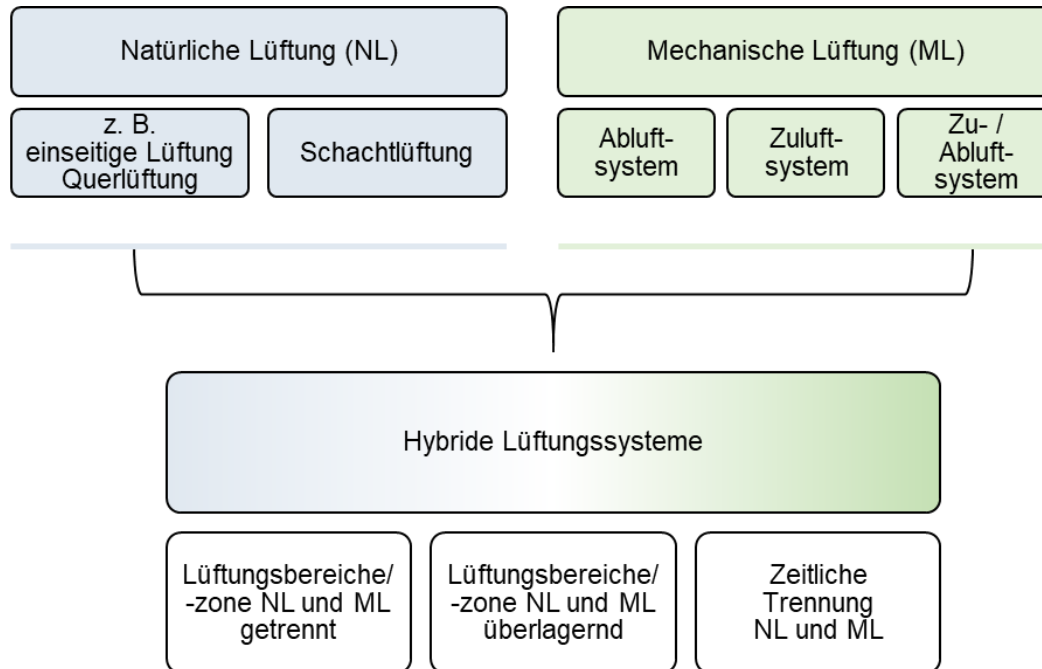


Abbildung 1: Übersicht Lüftungsarten und mögliche Kombinationen (nicht abschliessende Aufstellung)

Bei heutigen Bestandsbauten ist vermutlich in den meisten Fällen ein hybrides Lüftungssystem im Einsatz. Als hybrides System gilt zum Beispiel die Kombination von Abluftventilatoren in den Nasszellen respektive einer Kochstellenentlüftung mit einer Fensterlüftung in den übrigen Räumen; unabhängig davon, wie die Nachströmung der Ersatzluft gelöst ist. Weitere mögliche Varianten sind eine natürliche / mechanische Basislüftung mit einer additiv verstärkten Lüftung, oder eine Schachtlüftung mit Ventilatorunterstützung. Der Begriff der hybriden Lüftung ist bislang nicht scharf definiert.

Vorteile von hybriden Lüftungen sind die niedrigen Investitionskosten, eine – je nach Betriebsweise nutzerunabhängige – Minimallüftung und Platzersparnis durch weniger Lüftungskanäle. Auch bieten diese Systeme einen Kompromiss zwischen dem Wunsch nach einer genügenden Raumlufthygiene und möglichen Vorbehalten gegenüber Zu- und Abluftanlagen. Die Nachteile sind oftmals die fehlende Wärmerückgewinnung, eventuell Komfortprobleme (Zugerscheinungen, Schallschutz gegenüber Aussenlärm), die Abhängigkeit von den Druckverhältnissen an der Gebäudehülle und auch in den einzelnen Zimmern (offene Fenster und Türen). Besonders der geringe Platzbedarf prädestiniert diese Systeme für die Gebäudesanierung.

1.1 Motivation und Ziele

Heute existieren für natürliche und hybride Lüftungssysteme weder Planungshilfen noch Planungsregeln (Normen), die auf die schweizerischen Verhältnisse zugeschnitten sind. Das führt dazu, dass ungeeignete Lösungen realisiert beziehungsweise in der Planung nicht erkannt werden. Die Folge können auf der einen Seite eine ungenügende Raumluftqualität sowie Feuchtschäden und auf der anderen Seite dauernd geöffnete Fenster und bewusst undicht gemachte Fenster oder Gebäudehüllen mit daraus folgenden unnötigen Wärmeverlusten sein.

Nationale und internationale Projekte zeigen, dass hybride Lüftungen ein Teil der Planungsrealität sind. Normative Vorgaben zusammen mit zielführenden Planungshinweisen helfen, die Systeme

zu verbessern und zukünftige Planungsfehler zu vermeiden. Das notwendige Grundlagenwissen ist durch nationale und internationale Forschungsprojekte, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden, grösstenteils gegeben. Allerdings ist das vorhandene Wissen nicht gut erschlossen, Querbezüge sind nicht hergestellt und mögliche Wissenslücken sind nicht klar definiert. Das Projekt bündelt aktuelles Wissen, identifiziert Lücken und legt so die Basis für Planungsgrundlagen zur hybriden Lüftung.

2. Methodik

2.1 Eingrenzung

Das Projekt konzentriert sich auf Wohngebäude und Bürogebäude. Hybride Systeme, die eine aktive (maschinelle) Kühlung oder eine aktive Befeuchtung beinhalten, werden nicht berücksichtigt.

2.2 Literaturrecherche

Für die Literaturrecherche werden über 100 Referenzen berücksichtigt und ausgewertet. Dies sind relevante Artikel aus Fachzeitschriften und «Scientific Journals», Forschungsberichte, Normen und Produktbeschreibungen. Die Suche erfolgt systematisch (z. B. nach Schlagworten) und rückwärts gerichtet (z. B. Durchsicht Literaturverzeichnis zentraler Arbeiten). Inhaltlich umfasst die Recherche zwölf nationale und sieben internationale Forschungsprojekte, Demonstrationsprojekte (neun Wohnbauten, zwölf Bürobauten), Produkte, Komponenten und Normen, die an das Thema angrenzen.

Kriterien für die Berücksichtigung der Literatur sind hauptsächlich die Relevanz für das Thema hybride Lüftung und bei den Demonstrationsprojekten, dass Messungen (1. Priorität) oder Nutzerbefragungen, bzw. Simulationen (2. Priorität) durchgeführt wurden. Aus der gesichteten Literatur werden Planungsthemen gefiltert, die für die hybride Lüftung bedeutsam sind. Dazu zählen Fehlerquellen, Fragestellungen, die noch unbeantwortet sind und sowohl technische als auch normative Lösungsansätze. Weiter werden Definitionen für hybride Lüftungen gesammelt und ausgewertet. Die Normen dienen dazu, den normativen Kontext von hybriden Lüftungen einzugrenzen.

2.3 Praxisbezug

Um sicherzustellen, dass die aus der Literatur abgeleiteten Planungsthemen einen Praxisbezug haben, und um relevante Lücken zu vermeiden, sind zwei Expertenworkshops Bestandteil des Projektes. Ein Workshop wurde im Herbst 2021 durchgeführt, der zweite ist für den Herbst 2022 angesetzt. Die Teilnehmenden sind: Massimo Fiorentini (Empa), Beat Frei (Frei Wüest Expert), Beat Kegel (Kegel Klimasysteme), Martin Meier (einfach gut bauen) und Nadège Vetterli (BFE / Anex Ingenieure AG).

3. Ergebnisse

3.1 Was ist eine hybride Lüftung?

Aus der Literatur werden insgesamt acht Definitionen von hybrider Lüftung mit variierendem Umfang gewonnen. Zwei Quellen verwenden eine sehr eng gefasste Definition für hybride Lüftung, die auf zwei Kriterien (Fensterlüftung und mechanische Lüftung) basiert. Drei Quellen stützen sich auf eine etwas breitere Definition mit drei Kriterien. Drei Quellen verwenden zur Definition vier oder sechs Kriterien, wie z. B. zusätzlich zur Lüftungsart noch die Steuerung / Regelung und natürliche Antriebe. Für die Bearbeitung des Projektes scheint keine der gegebenen Definitionen genügend präzise, um das ganze Spektrum von hybriden Lüftungen abzudecken und abzugrenzen. Die projektspezifische Definition wird nachfolgend gegeben.

Definition hybride Lüftung

Lüftung, die auf natürliche und mechanische Be- und Entlüftung in der gleichen Nutzungseinheit angewiesen ist und in Abhängigkeit von der gegebenen Situation betrieben wird (entweder mit natürlichen oder mechanischen Antriebskräften bzw. einer Kombination dieser Antriebskräfte).

Für die Funktion des Systems sind daher Elemente zur Sicherstellung von natürlicher Lüftung (wie z. B. Fenster, Aussenbauteil-Luftdurchlässe) wie auch der mechanischen Lüftung (z. B. Ventilatoren) erforderlich.

Dabei wird die Art der Kombination in Anlehnung an die Typisierung aus prEN 15665:2022 erweitert und wie folgt unterteilt:

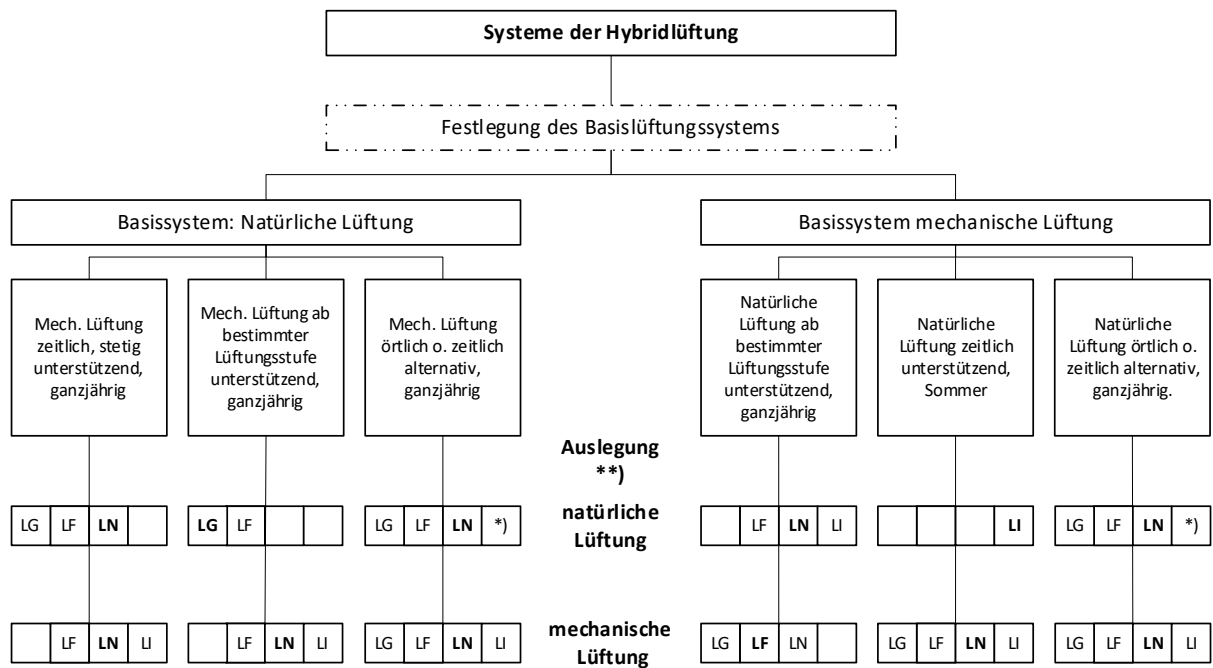
- *alternative natürliche / mechanische Lüftung:*
 - *Kriterium zeitlich definiert (Tag / Nacht; Sommer / Winter)*
 - *Kriterium örtlich definiert (Raumnutzung)*
- *Basissystem natürliche Lüftung; unterstützende mechanische Lüftung:*
 - *Kriterium Lüftungsstufe (z. B. nur Lüftung zum Feuchteschutz durch natürliche Lüftung abgedeckt)*
 - *Kriterium Aussenbedingungen (z. B. wenn natürliche Antriebskräfte zu gering)*
- *Basissystem mechanische Lüftung; unterstützende natürliche Lüftung:*
 - *Kriterium Lüftungsstufe (z. B. Querlüftung als Intensivlüftung)*
 - *Kriterium Aussenbedingungen (z. B. Nachtlüftung)*

Grundsätzlich kann eine hybride Lüftung auch aus einer Kombination dieser Typen bestehen und kann gemeinsam genutzte Komponenten beinhalten. In diesen Fällen ist für die Auslegung das Teilsystem massgebend, welches die höheren Anforderungen an die Komponenten hat.

Zugehörige Definitionen:

- **Natürliche Lüftung (freie Lüftung):** Lüftung mit Förderung der Luft durch Druckunterschiede infolge von Wind oder Dichteunterschieden der Luft zwischen aussen und innen, z. B. Fensterlüftung, Schachtlüftung, Dachaufsatzlüftung und Lüftung durch sonstige Öffnungen (z. B. Aussenbauteil-Luftdurchlässe, RWA Klappen).
- **Mechanische Lüftung (ventilatorgestützte Lüftung):** Lüftung mit ventilatorgestützter Förderung der Luft, z. B. einfache Lüftungsanlage, Abluftanlagen, RWA (Ventilator), aktive Überströmer oder sonstige Systeme mit Ventilatoren.
- **Basissystem:** Als Basissystem wird derjenige Teil der hybriden Lüftung bezeichnet, welcher im Normalbetrieb der Lüftung (Nennbetrieb) den überwiegenden Teil der Lüftung erbringt. Diese Einordnung kann sich z. B. an einen häufig vorkommenden Betriebsfall (Betriebszeit, Aussenbedingungen etc.) anlehnen. Für diesen Fall ist das Basissystem auszulegen. In der Planung wird das Basissystem typischerweise zuerst ausgelegt. Im Fall der alternativen natürlichen / mechanischen Lüftung ist das jeweils aktive System das Basissystem.

Basierend auf obiger Definition wird eine Systematik vorgeschlagen, um hybride Systeme zu charakterisieren (Abbildung 2). Um eine Einordnung für die Planung vorzunehmen, muss die Aufgabe festgelegt werden, welche die beiden Teilsysteme (natürliche Lüftung resp. mechanische Lüftung) übernehmen. Dabei ist zu definieren, welches Teilsystem das Basissystem und welches das unterstützend wirkende System wird. Die Unterstützung kann zeitlich und / oder räumlich begrenzt stattfinden.



Legende:

- LG = Lüftung im Grundbetrieb; Grundlüftung: Reduzierter Lüftungsbetrieb bei Abwesenheit von Personen (in Anlehnung an SIA 382/1)
- LF = Lüftung zum Feuchteschutz: Betrieb einer Lüftung nur gemäss Bemessung auf Feuchtelasten (z.B. Lüftung zur Sicherstellung des Bautenschutzes)
- LN = Lüftung im Normalbetrieb; Normallüftungsbetrieb bzw. Nennlüftung: Betrieb einer Lüftung gemäss Bemessung auf Personenbelegung (z.B. Luftmengen gemäss Raumgrösse, Personenzahl etc.) für mechanische Wohnungslüftungen z.B. nach SIA 382/5
- LI = Lüftung im Intensivbetrieb; Intensivlüftung: Lüftungsbetrieb, welcher nur bei ausnahmsweise starker Belastung oder ausserhalb der Nutzungszeit zur Anwendung kommt. z.B. Nachtauskühlung etc.

*) eine Intensivlüftung ist grundsätzlich in allen Bereichen mit zusätzlicher Fensterlüftung erreichbar (Stosslüftung)

**) mögliche typische Auslegung (könnte im Einzelfall jedoch auch abweichend festgelegt sein);
Für die fett gekennzeichnete Lüftungsstufe wird das System in diesem Fall ausgelegt

Abbildung 2: Charakterisierung von Hybridlüftungssystemen für die Planung

3.2 Welche Systeme von hybriden Lüftungen gibt es?

Um aufzuzeigen, welche Systemarten von hybriden Lüftungen es gibt, werden im Projekt exemplarisch Systeme von hybriden Lüftungen dokumentiert und schematisch dargestellt, sowie häufige Varianten aufgezeigt. Diese Systeme sind:

1. Wohnen: Manuelle Fensterlüftung mit bedarfsgesteuerter Abluftanlage in Bad / WC

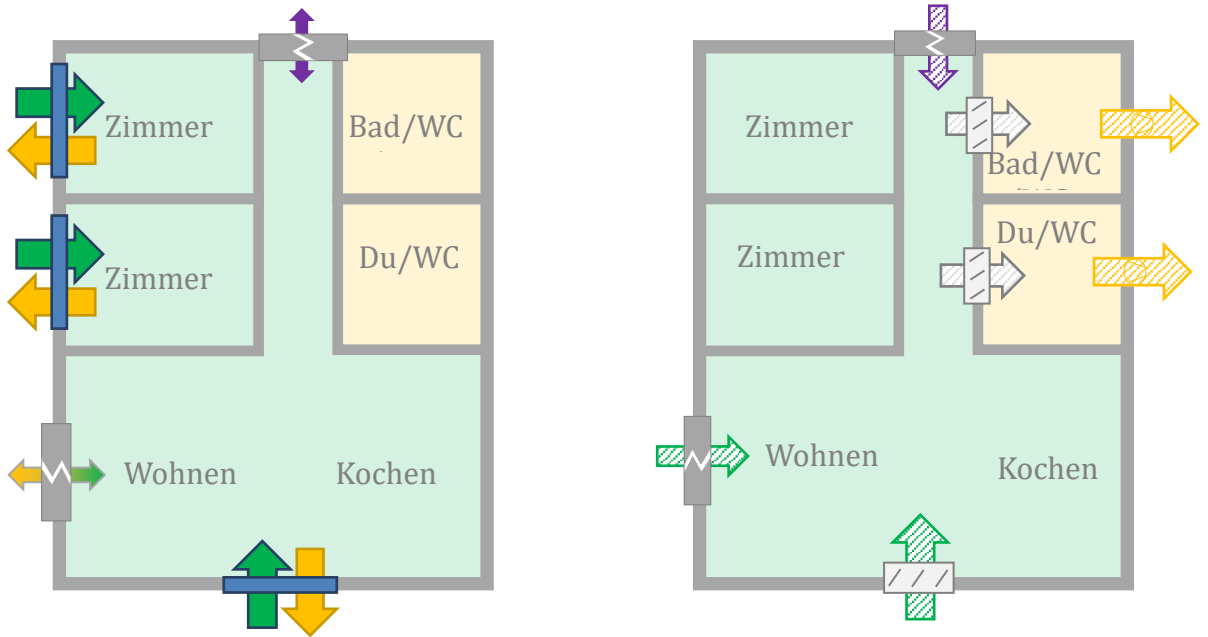


Abbildung 3: Beispiel einer Wohnung mit natürlicher Lüftung der Haupträume (links) und mechanischer Abluft in Bad/Du/WC (rechts). Farbcode: grün = Zuluft / Aussenluft, gelb = Abluft
 Legende:

- Lüftung der Zimmer über Fenster
- Infiltration gefördert durch natürlich erzeugte Druckdifferenz oder Temperaturdifferenz (Aussenluft = grün, Abluft = gelb, Leckageluft = violett)
- Infiltration, Luftstrom passiv gefördert durch mechanisch erzeugte Druckdifferenz zwischen innen und aussen (kein Ventilator im Luftpfad). Grün = Aussenluft, violett = Leckageluft zwischen Nutzungseinheiten
- Aussenbauteil-Luftdurchlass (ALD) mit Luftstrom, passiv gefördert durch mechanisch erzeugte Druckdifferenz zwischen innen und aussen
- Überström-Luftdurchlass (passiv) mit bekannter Strömungsrichtung
- Abluftstrom aktiv gefördert durch mechanisch erzeugte Druckdifferenz mit Ventilator

Die Haupträume (Zimmer, Wohnbereich) werden natürlich belüftet. Bad/Du/WC werden mechanisch entlüftet. Die Ersatzluft strömt frei z. B. über die Fenster, über ALD oder Infiltration nach, wobei die alleinige Luftführung über diesen Pfad nicht den Anforderungen von SIA 382/5 entspricht. Die Kochstelle wird mechanisch entlüftet.

2. Wohnen: Mechanische Lüftung mit ergänzender natürlicher Lüftung für Intensiv- oder (saisonalen) Alternativbetrieb

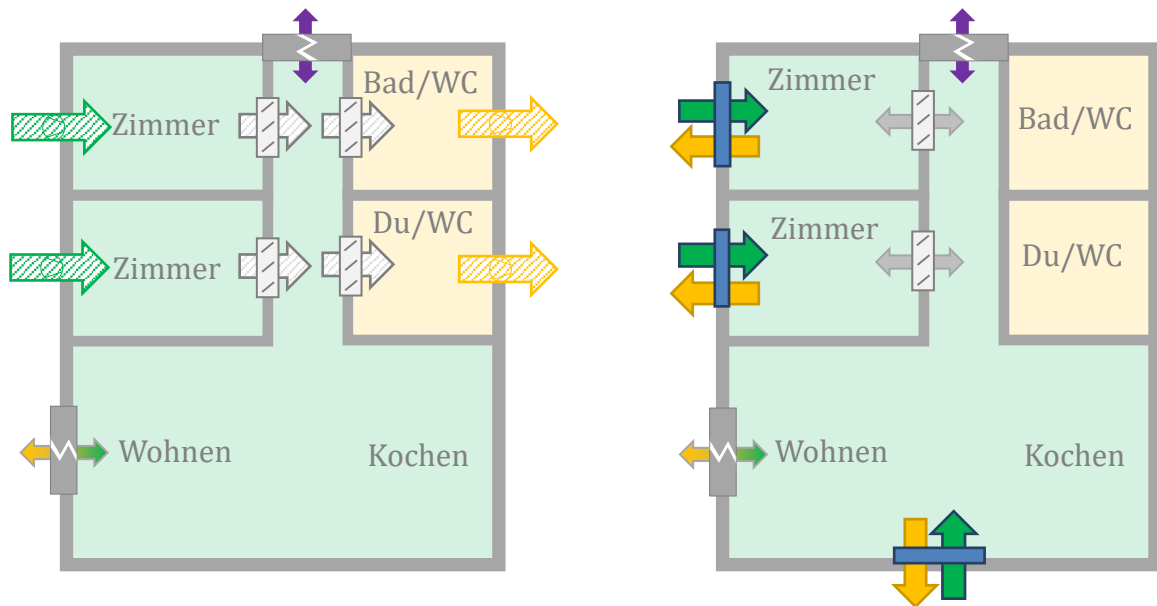


Abbildung 4: Beispiel einer Wohnung mit mechanischer Lüftung (links) mit ergänzender natürlicher Lüftung für Intensiv- oder Alternativbetrieb (rechts). Farbcodierung: grün = Zuluft / Aussenluft, gelb = Abluft. Legende (siehe Abbildung 4).



Aussenluftstrom aktiv gefördert durch mechanisch erzeugte Druckdifferenz mit Ventilator



Überström-Luftdurchlass (passiv) mit unbekannter Strömungsrichtung

Die gesamte Wohnung wird mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgerüstet, die gemäss SIA 382/5 auf den Normallüftungsbetrieb ausgelegt ist. Die Kochstelle wird separat mechanisch entlüftet. Die natürliche Lüftung wird ergänzend oder alternativ zur mechanischen Lüftung eingesetzt um

- im Sinne eines Intensivbetriebs Raumluftbelastungen abzuführen, die höher sind als bei der Auslegung vorausgesetzt wurde, oder
- um hohe thermische Lasten abzuführen, insbesondere bei der sommerlichen Nachauskühlung oder
- um bei ausgeschalteter mechanischer Lüftung (z. B. im Sommer) die geforderte Raumluftqualität und den Feuchteschutz zu gewährleisten.

3. Wohnen: Mischsystem mit parallelem Betrieb von mechanischer und natürlicher Lüftung

4. Wohnen: Mechanische Grundlüftung mit freier Verteilung

5. Wohnen: Natürliche Lüftung mit Fenstern und ALD, sowie unterstützende Abluftanlage

6. Büro allgemein

7. Büro: Mechanische Lüftung mit unterstützender Nachtlüftung im Sommer durch natürliche Lüftung

8. Büro: Verbundlüftung mit aktiven Überströmern, natürliche Lüftung des Verbundbereichs

9. Wohnen / Büro: Abluft mit natürlicher Schachtlüftung und Ventilatorunterstützung

Diese Auflistung ist nicht abschliessend, es existieren diverse weitere Varianten. In der Schweiz kommen vermutlich am häufigsten die Systeme 1 und 2 vor. Daher sind für diese zwei Systeme hier mit Abbildung 3 und Abbildung 4 exemplarisch Schemazeichnungen gezeigt. Für die Darstellung der übrigen Systeme sei auf den Schlussbericht verwiesen. Dort werden für die Systeme auch jeweils mögliche Varianten und die Möglichkeiten einer Wärmerückgewinnung (bei sechs Systemen, Nr. 2, 3, 4, 7, 8, 9) oder einer Abwärmenutzung (bei zwei Systemen, Nr. 1 und 5) aufgezeigt. Nicht alle Systeme entsprechen (z. B. von der Luftführung her) den Anforderungen der derzeit gültigen Schweizer Normen. Dies ist z. B. der Fall, wenn die Ersatzluft für die Abluftanlage durch undefinierte Leckagen in der Gebäudehülle bereitgestellt wird.

3.3 Einblick in den normativen Kontext

Abbildung 5 zeigt wichtige Normen im Zusammenhang mit hybrider Lüftung. Die Normen sind grob thematisch sortiert (mechanische / natürliche und hybride Lüftung), allerdings ist die Abgrenzung nicht ganz streng zu sehen, da z. B. in Normen, die schwerpunktmässig mechanische Lüftung behandeln, auch natürliche Lüftung erwähnt wird. Im europäischen Kontext gibt es bislang keine Norm, die ausschliesslich hybride Lüftung und / oder natürliche Lüftung behandelt. Für die Auslegung der natürlichen Lüftung kann z. B. auf die SN EN 16798-7:2017 und den zugehörigen Technical Report (SNG CEN/TR 16798-8:2017) zurückgegriffen werden. Für den mechanischen Teil der Lüftung sind auf europäischer Ebene SN EN 16798-1:2019, SN EN 16798-3:2017 und SN EN 16798-5-1 / -5-2:2017 (mit den zugehörigen Technical Reports) zutreffend. Es gibt auch einen Entwurf für hybride Lüftung, die Arbeiten dazu sind aber noch nicht offiziell im Arbeitsprogramm der CEN TC 156 aufgenommen. Ab Antragstellung ist gem. CEN Regeln mit rund drei Jahren bis zum Normenentwurf zu rechnen, zuzüglich der Zeit für die Erstellung der nationalen Anhänge.

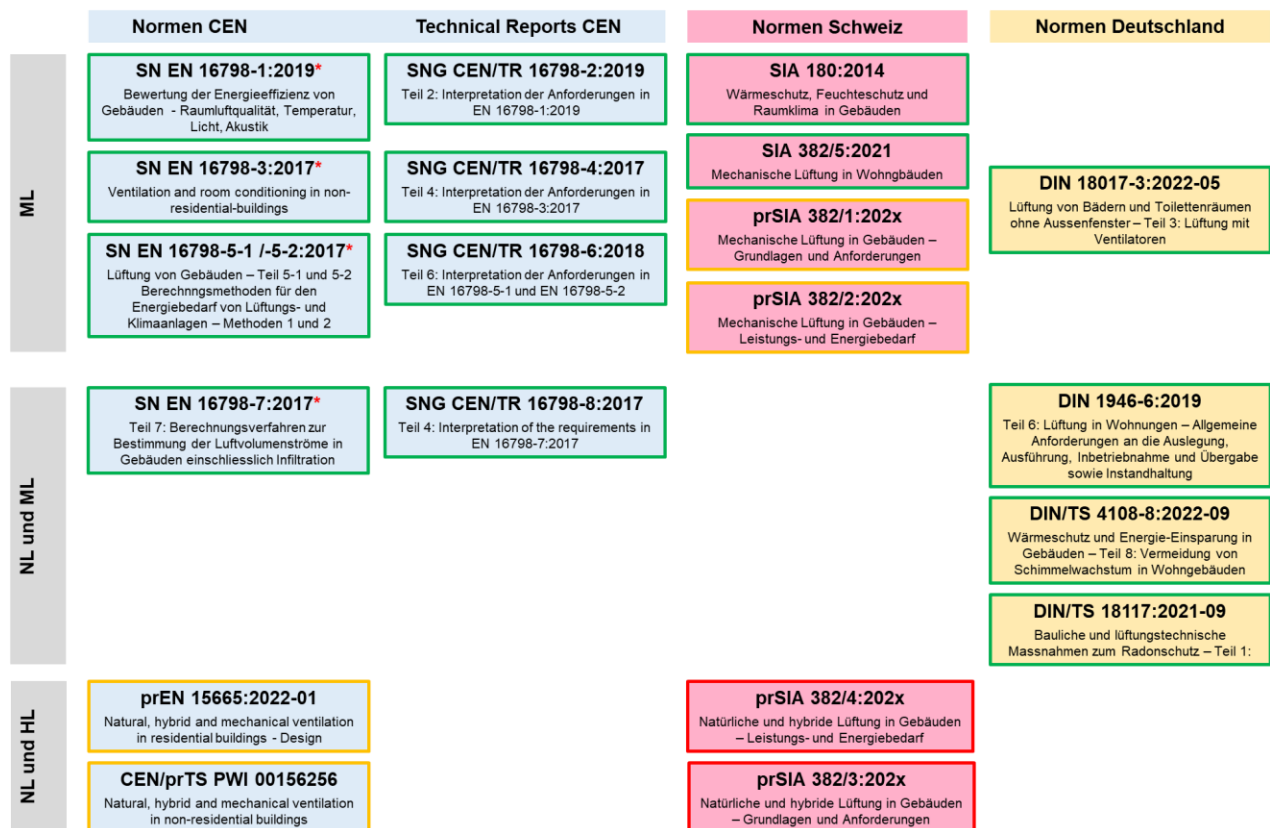


Abbildung 5: Normativer Kontext für eine Norm zur hybriden Lüftung in der Schweiz. Farbcode Flächen: blau = CEN, rosa = Schweiz, hellgelb = Deutschland. Farbcode Rahmen: grün = Norm in Kraft, gelb = Normenprojekt, rot = mögliches (geplantes) Normenprojekt. Roter Stern: Nationale Anhänge sind in Erarbeitung
Quelle: Systematik und Inhalt: Beat Frei (Präsentation anlässlich Treffen Spurguppe SIA 382/3 (22.06.2022))

In Deutschland sind für Wohnungen und wohnähnliche Nutzungen mit innenliegenden Bädern, bzw. Toiletten sowohl DIN 1946-6:2019 als auch DIN 18017-3:2020 zutreffend. DIN 1946-6:2019 ist für das Lüftungskonzept der gesamten Nutzungseinheit massgeblich, DIN 18017-3:2020 definiert die Lüftung innenliegender Bäder bzw. Toiletten. Im DIN-Fachbericht DIN/TS 4108-8:2022-09 geht es um «Schimmelwachstum in Wohngebäuden» und speziell um die Rolle des Nutzers bei der Vermeidung. Zur Umsetzung Lüftungstechnischer Massnahmen wird auf die DIN 1946-6:2019 verwiesen.

In der Schweiz steht SIA 180:2014 [1] in der Hierarchie über den Lüftungsnormen. Für SIA 180:2014 ist eine Revision geplant. Die Lüftungsnormen sind in der Gruppe 382 Gruppe «Raumlufttechnik» eingeordnet. Die schweizerische Mutternorm zur mechanischen Lüftung in Gebäuden SIA 382/1:202x (derzeit gültig: SIA 382/1:2014 [2]) ist in der Überarbeitung. Zur SIA 382/2:202x, die sich ebenfalls mit mechanischer Lüftung befasst, laufen Vorarbeiten. In SIA 382/5:2021 geht es um die mechanische Lüftung von Wohngebäuden. Eine neu zu erstellenden Norm zur hybriden Lüftung würde in die Gruppe Raumlufttechnik voraussichtlich unter den Nummern SIA 382/3 «Natürliche und hybride Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen» und SIA 382/4 «Natürliche und hybride Lüftung in Gebäuden – Leistungs- und Energiebedarf» eingeordnet werden. Ein Planungsleitfaden hätte keinen normativen Charakter.

3.4 Planungsthemen im Zusammenhang mit hybrider Lüftung

Der nachfolgende Abschnitt geht auf die wesentlichen Planungsthemen und möglichen Fehlerquellen ein, die im Kontext von hybriden Lüftungskonzepten auftreten. Da die Themen oftmals in Projekten identifizierte Problemstellungen widerspiegeln, drängt sich die Frage nach den Ursachen, bzw. den Abweichungen hybrider Lüftungssysteme zu rein mechanischen oder natürlichen Lüftungskonzepten auf. Nachfolgend ist eine Auflistung der festgestellten Ursachen mit jeweils zwei Beispielen für resultierende Planungsthemen gegeben.

Nachstehend die Ursachen für Problemstellungen nach Häufigkeit der zuordenbaren Planungsthemen im Projektbericht. Für die Zuordnung wurden die Planungsthemen aus dem Projektbericht thematisch in 20 Gruppen zusammengefasst. Die Zuordnung unten bezieht sich auf diese Gruppen.

1. Unterschiedliche (strenge) Anforderungen an natürliche Lüftung (NL) und mechanische Lüftung (ML), z. B. auch bei der Auslegung von Komponenten wie Fenster, Aussenbauteil-Luftdurchlass (ALD), Fensterlüfter (FL) und Filter. Die Fragestellung, wie hybride Lüftungssysteme (HLS) zukünftig ausgelegt und bewertet werden sollen, muss geklärt werden. Gelten immer die Anforderungen für das System, welches gerade in Betrieb ist? Gelten die Anforderungen für das Basissystem, welches häufiger in Betrieb ist? Gelten Mittelwerte, oder generell weniger strenge Anforderungen für HLS?

Zugeordnete Planungsthemen: 9 von 20

Beispiel 1.1: Die Beurteilung der Raumluftqualität bei variablen Konzentrationen und Luftraten (auch in verschiedenen Zeitmassstäben) ist schwierig, z. B. wegen Wechsel HLS – ML, oder NL [3], [4], [5].

Beispiel 1.2: Bei natürlicher Lüftung sind die resultierenden Luftraten durch Fensterlüftung oft zu niedrig (vorherrschende Differenzdrücke sind häufig zu klein), um den hygienisch erforderlichen Luftwechsel zu decken [6]. Auch können Markisen, Vorhänge etc. u.U. den Luftaustausch behindern [7], [8], [9].

2. Exponiertheit HLS gegenüber Aussenbedingungen. Durch den Anteil an NL und eventuell vorhandene ALD sind HLS unmittelbar an die äussere Umgebung, das Klima, die Luftbelastung und den Lärm angebunden.

Zugeordnete Planungsthemen: 7 von 20

Beispiel 2.1: Es treten Lärmstörungen durch die Öffnungen in der Fassade auf (ALD [10] und FL [11]). Die Anforderungen an die akustische Behaglichkeit von Nachströmöffnungen gegen aussen / innen müssen eingehalten werden.

Beispiel 2.2: Thermische Behaglichkeit Winter: Es treten Zugscheinungen in der Nähe von Nachströmöffnungen auf (ALD und FL); [11], [10], [12]. Thermische Behaglichkeit Sommer und Klimawandel: NL kann nicht immer einen ausreichende sommerliche thermische Behaglichkeit

gewährleisten [13], [14], [15], [16], da die verfügbare Zulufttemperatur höher ist, als die wünschenswerte Zulufttemperatur, und / oder die passive Kühlung durch Nachtlüftung zu wenig effektiv ist (zu kleinen Luftraten, Tropennächte).

3. Einfluss Nutzerverhalten. Dass NL planungsgemäss funktionieren, hängt häufig vom korrekten Nutzerverhalten ab.
Zugeordnete Planungsthemen: 5 von 20
Beispiel 3.1: Das Nutzerverhalten beim Fensteröffnen und -schliessen (im Zusammenhang mit ALD oder FL und einem zentralen Abluftventilator) zeigt, dass die Nutzer Fenster hauptsächlich nach Zeitzyklen öffnen und schliessen [17].
Beispiel 3.2: Nächtliche Auskühlung durch gekippte Bürofenster: Wenn manuell geöffnet, dann erfolgt die Öffnung meist vor Verlassen des Arbeitsplatzes (ab ca. 18 Uhr). Damit gelangt im Hochsommer noch sehr warme Luft in die Räume und verzögert die Auskühlung [18].
4. Zusammenspiel unterschiedlicher Gewerke mit Schnittstellen zur hybriden Lüftung. Hier ist eine Klärung der Zuständigkeiten erforderlich. Fehlerquellen entstehen durch fehlende Kommunikation und Widersprüche.
Zugeordnete Planungsthemen: 3 von 20
Beispiel 4.1: Die Angaben zur Lüftung (z. B. Zuluftelemente wie FL etc.) können, wenn sie in Fachplaner-Plänen eingezeichnet sind, im Planungsprozess und bei der Umsetzung verloren gehen.
Beispiel 4.2: Die Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen Sonnenschutz und Lüftungsfunktionen müssen im Regelkonzept klar festgelegt werden. Entsprechende Prioritäten und Reaktionen (z. B. Sperrung bzw. Funktionsumschaltung) sind festzulegen.
5. Zukünftige Berücksichtigung HLS in Energienachweisen. Derzeit sind HLS nicht standardmässig vorgesehen, was zu einer ungünstigen Bewertung in Energienachweisen führen kann.
Zugeordnete Planungsthemen: 3 von 20
Beispiel 5.1: In Rechenvorschriften zu den Energienachweisen wird den HLS nicht ausreichend Rechnung getragen (z. B. in Lösungen nach MuKE:2014).
Beispiel 5.2: Die Bewertung der Wärmerückgewinnung muss die verschiedenen Typen von HLS (alternativ, unterstützend) behandeln können.
6. Hohe Bedeutung Wartung und Unterhalt
Zugeordnete Planungsthemen: 2 von 20
Beispiel 6.1: Filter bei Abluftanlagen werden nicht immer regelmässig gewechselt [11]: Minderung der Zuluftvolumenströme durch Filterverschmutzung der ALD's um bis zu 60% (im Mittel 17% über 42 untersuchte Elemente) im Vergleich zu neuen Filtern [19].
Beispiel 6.2: Der bestimmungsgemässe Gebrauch von Lüftungskomponenten ist sicherzustellen (werden z. B. die Klappen von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen zusätzlich für die Nachtlüftung verwendet, dann müssen sie für die deutlich höhere Anzahl von Öffnungen/Schliessungen geeignet sein).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Fragestellung der unterschiedlichen Anforderungen an NL und ML und welche Bewertung für HLS daraus resultiert, die häufigste Ursache von Problemstellungen darstellt. Knapp die Hälfte (45 %) der Planungsthemen können hier zugeordnet werden. Nachgeordnet als Ursachen zu nennen sind der grosse Einfluss der Exponiertheit gegenüber den Aussenbedingungen (35 % der Planungsthemen) und der Einfluss des Nutzerverhaltens (25 %).

3.5 Zusammenfassung Vorschläge Lösungsansätze

Im Projekt werden für die aus der Literatur identifizierten Planungsthemen und potenziellen Fehlerquellen Lösungsvorschläge erarbeitet. Entweder sind diese technischer oder organisatorischer Natur oder beinhalten Hinweise auf bestehende Normen oder zukünftige normative Ansätze. Bei den zukünftigen normativen Ansätzen ist die Bearbeitungsebene die Eingrenzung, bei welchem Thema in der Normung welche Anforderung festzulegen ist. Es werden keine Textvorschläge für die zukünftige Normung erstellt. In der nachfolgenden Tabelle 1 finden sich

Lösungsvorschläge für die in Kapitel 3.4 beschriebenen Planungsthemen und möglichen Fehlerquellen. Die Nummer verweist auf das Beispiel.

Bei einigen der gemachten Vorschläge für die zukünftige Normung bestehen Abhängigkeiten zu bereits existierenden Normen. Abstimmung bedarf es bei den Themen «Anforderungen an die Raumluftqualität» (z. B: SIA 382/1) und den «Anforderungen an den Energiebedarf» (z. B. SIA 380/1). Bei den Zu- und Abluftvolumenströmen für die natürliche Lüftung und die Nachtlüftung müssen vorhandene normative Berechnungsansätze (z. B. SIA 180:2014, SN EN 16798-7) und Ansätze aus der Literatur auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft werden. Speziell beim Punkt «thermische Behaglichkeit im Sommer» ist z. B. bei der (geplanten) Revision von SIA 180:2014 zu diskutieren, ob bei der Definition zukünftiger Komfortgrenzen Aspekte der Gesundheit oder der Energieeffizienz verstärkt zu berücksichtigen sind.

Tabelle 1: Normative und weitere Lösungsvorschläge für die in Kapitel 3.4 aufgeführten Planungsthemen. Die Lösungsvorschläge stellen eine Auswahl dar.
Verwendete Abkürzungen: NL = natürliche Lüftung, ML = Mechanische Lüftung, HLS = Hybrides Lüftungssystem, FL = Fensterlüfter, ALD = Aussenbauteil-Luftdurchlass, HK = Heizkörper, RLQ = Raumluftqualität.

Beispiel Nr. / Stichwort	Lösungsvorschlag: vorhandene Normen	Lösungsvorschlag: zukünftiger normativer Ansatz	Lösungsvorschlag: andere
1.1 / Beurteilung RLQ	SIA 382/1:2014 teilt die Raumluft in RAL Klassen auf. Es ist festzulegen, ob ohne besondere Vereinbarung auch für NL und HL Raumluftklasse RAL 3 gilt.	Methodenbeschrieb zur möglichen Beurteilung der RLQ bei variablen Lüftraten und Behandlung von Grenzwert-überschreitungen in [5]. Allgemeiner in [20] und [21].	keine
1.2 / zu tiefe Lüftraten durch Fensterlüftung bei NL	Für die Berechnung der NL stehen diverse Ansätze zur Verfügung: SIA 180:2014 und SIA 382/1:2014, SN EN 15665:2009, SN EN 13465:2004, SN EN 15242:2007, SN EN 16798-7:2017 und DIN 1946-6:2019.	Die Praxistauglichkeit und Eignung der normativen Verfahren zur Anwendung sind zu überprüfen und das tauglichste Verfahren auszusuchen.	a) Im Rahmen der Erstellung des Lüftungskonzeptes müssen die wesentlichen Betriebsfälle für den Luftaustausch innerhalb der Wohnung geklärt werden. b) Zuweisung Lüftungsaufgabe (z. B. Feuchteschutzlüftung) an Komponenten (z. B. FL)
2.1 / Lärmstörungen durch Öffnungen in der Fassade	Schallschutznachweis mit reduziertem Schalldämm-Mass (inkl. ALD und FL) nach SIA 181:2020	Definition maximale Lärmbelastung und minimales Schalldämm-Mass für den Einsatz von Nachströmöffnungen.	ALD und FL mit hohem Schalldämm-Mass (Vorsicht Problematik hoher Druckverlust)
2.2 / Winter: Luftzug nahe bei Nachströmöffnungen, Sommer: thermische Behaglichkeit	Winter: Präzisierung der Aufenthaltszone in SIA 180:2014 Kapitel 2.1.2.4: Abstand zur Fassade für verschiedene Fälle konkret festlegen. Sommer: In den SIA-Normen wird davon ausgegangen, dass die natürliche Lüftung bei Wohnbauten ausreicht.	Winter / Sommer: Klarstellung welche Komfortkriterien bei NL, ML resp. generell für HLS gelten. Sommer: ggf. auch Absenkung der zulässigen maximalen Raumtemperaturen [22].	Auswahl Massnahmen Winter: wandparalleles Ausblasen, Anordnung hinter oder über HK, Wärmeabgabe über HK (nicht Flächenheizungen) Sommer: Dimensionierung der FL/ Fenster etc. entsprechend der ggf. recht unterschiedlichen geforderten Luftmengen für a) RLQ und b) passive Kühlung durch Nachtlüftung.
3.1 / Nutzerverhalten beim Fensteröffnen und -schliessen	keine	Nutzungsvereinbarung (auf Bedeutung hinweisen und Punkte nennen, die projektspezifisch zu klären sind)	Modelle für Nutzerverhalten bezüglich Fensteröffnen (siehe z. B. [23] für Bürosituation; [24] für MFH)
3.2 / Nächtliche Auskühlung durch Bürofenster	keine	Nutzungsvereinbarung (auf Bedeutung hinweisen und Punkte nennen, die projektspezifisch zu klären sind)	Nachtlüftung durch spezifische Fensterlüftung, möglichst durch automatisierte Fenster oder Lüftungslügel [25].

Beispiel Nr. / Stichwort	Lösungsvorschlag: vorhandene Normen	Lösungsvorschlag: zukünftiger normativer Ansatz	Lösungsvorschlag: andere
4.1 / Angaben zur Lüftung in Fachplaner-Plänen	keine	Angaben zur Lüftung (z. B. Zuluftelemente) müssen in die Architektenpläne eingezeichnet werden. In der Submission müssen die Elemente dem entsprechenden Gewerk zugeordnet werden.	keine
4.2 / Schnittstelle Sonnenschutz und Lüftungsfunktionen	Anforderungen an die Schnittstelle zur Ansteuerung der Fensteröffnung und zugehörigen Sensoren / Aktoren werden z. B. in der Normenserie SN EN 50491 beschrieben.	Festlegung von empfohlenen (oder ggf. zulässigen) Regelkonzepten basierend auf EN 16798-1:2019	Es ist ein gewerkeübergreifender Regelbeschrieb erforderlich, der alle in die Regelung involvierten Elemente behandelt. Für die Inbetriebnahme muss darin für die wesentlichen Funktionen ein Vorgehen für Tests beschrieben werden.
5.1 / Berücksichtigung HLS in Energienachweisen	Mögliche Basis: Berechnung gemäss SIA 380/1:2016 Kapitel 3.5.5. (mit entsprechenden Ergänzungen).	Es ist ein klares und einfach durchzuführendes Verfahren für die fachgerechte Energiebedarfsberechnung der Lüftungsverluste von HLS in den Normen festzulegen	keine
5.2 / Die Bewertung Wärmerückgewinnung	Mögliche Basis: Berechnung gemäss SIA 380/1:2016 Kapitel 3.5.5. (mit entsprechenden Ergänzungen).	Es ist ein klares und einfach durchzuführendes Verfahren für die Bestimmung des anzuwendenden Wärmerückgewinnungsgrades der HLS in den Normen festzulegen.	Berechnung und Normierung typischer Fälle mit einigen wenigen (wesentlichen) variablen Parametern. Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens dafür.
6.1 /: Minderung Zuluftvolumenströme durch Filterverschmutzung der ALD's	SWKI VA104-01:2019, Teil 1: Diese Norm fokussiert auf ML und enthält keine spezifischen Ausführungen zu den Spezialitäten bei HL.	Wartung / Wechsel Filter bei ALD vorschreiben.	a) In der Anlagendokumentation ist das empfohlene Wartungsintervall der vorhandenen Filter klar auszuweisen. b) Optisches / akustisches Signal, wenn der höchste zulässige Druckverlust erreicht ist. [26]
6.2 / Bestimmungsgemässer Gebrauch	Richtlinien SWKI (SWKI BT104-01:2021) und prSWKI BT104-02 beziehen sich auf RLT Anlagen (nicht speziell HLS)	keine	In der Anlagendokumentation ist eine spezifisch auf das HLS zugeschnittene Instruktion zum Betrieb zum und Instandhaltung der Anlage erforderlich.

3.6 Zusammenfassung offene Forschungsfragen

Für viele Planungsthemen und Problemstellungen, die im Projektrahmen identifiziert werden, können allgemeine oder normative Lösungsansätze genannt werden. Einige Problemstellungen sind jedoch offene Forschungsfragen, auf die im Rahmen dieses Projektes keine abschliessende Antwort gegeben werden kann. Zur Beantwortung sind ggf. noch Hintergrundinformationen, Abklärungen oder die Validierung bestehender Ansätze notwendig. Diese offenen Fragestellungen können hinsichtlich ihrer Relevanz für die Erstellung einer Norm oder eines Planungsleitfadens priorisiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen Fragen, die zu oder vor Beginn der Normenarbeit beantwortet werden müssen, und Fragen deren Klärung zu einem späteren Zeitpunkt während der Normenarbeit erfolgen kann. Die Unterscheidung ist eher qualitativ zu interpretieren. Die Klärung zu Beginn der Arbeit an der Norm / am Planungsleitfaden wird meist empfohlen, wenn der Inhalt auf den Charakter der Norm einen grossen Einfluss hat (z. B.: Komplexität, Strenge der Anforderungen).

Nachfolgend werden Fragen genannt, die zu einem frühen Zeitpunkt geklärt werden sollten.

- Welche Anforderungen gelten für die «Raumluftqualität», und die «thermische Behaglichkeit im Sommer und Winter» bei hybriden Lüftungssystemen (und damit auch bei natürlichen Lüftungssystemen)? Wie können diese überprüft werden?
- Sollen Fragen des Stack-Effektes und des Windes (Windklassierung und Gebäudeexposition) bei hybriden Lüftungssystemen zukünftig detaillierter berücksichtigt werden?
- Sind die existierenden normativen Berechnungsvorgaben und solche aus der Literatur für die Dimensionierung der NL praxistauglich?
- Wie ist mit den Unsicherheiten durch Klimaeinflüsse und Nutzereingriffe umzugehen?
- Wie können HLS beim Energienachweis berücksichtigt werden?
- Wie kann die Funktion von HLS bei der Abnahme geprüft werden?

4. Diskussion und Fazit

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse eines Forschungsprojektes zu hybriden Lüftungen als Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung vor. In der Praxis sind hybride Lüftungen weit verbreitet. Bis jetzt fehlen in der Schweiz allerdings normativ fassbare Grundlagen für natürliche und hybride Lüftungen. Diese Lücke schliesst das Projekt, indem es die Basis für Planungsgrundlagen oder eine Norm zur hybriden Lüftung legt. Der Beitrag macht Angaben zur Begriffsdefinition «Hybride Lüftung» und stellt die in der Schweiz gängigsten hybriden Lüftungssysteme vor. Bei der systematischen Erfassung der Lüftungssysteme zeigt es sich, dass zwei Systeme im Wohnbau sehr häufig sind: a) manuelle Fensterlüftungen mit bedarfsgesteuerter Abluftanlage in Bad / WC und b) mechanische Lüftungen mit ergänzender natürlicher Lüftung für Intensiv- oder (saisonalen) Alternativbetrieb. Die Angabe zur Häufigkeit basiert allerdings nicht auf Erhebungen, sondern ist eine qualitative Einschätzung der Autoren. Insgesamt gibt es sehr viele Varianten der vorgestellten Systeme.

Die methodische Erfassung von Problemstellungen und Fehlerquellen zeigt, dass die unterschiedlichen Anforderungen an NL und ML und damit zusammenhängend die Auslegung und Bewertung der Lüftung eine häufige Problemursache sind. Für die Normarbeit resultieren zwei wesentliche Fragen: Wie können HLS und hier speziell der Anteil NL, zukünftig dimensioniert werden? Und wie können diese Systeme zukünftig bewertet werden? Bei beiden Themen kann zwischen vorschriftsbezogenen gegenüber leistungsbezogenen Ansätzen (prescriptive versus performance based), bzw. zwischen Einzel- und Systemanforderung unterschieden werden.

Für die Dimensionierung der NL gibt es Vorschläge aus vorhandenen Normen (siehe Tabelle 1, Beispiel Nr. 1.2). Hier ist abzuwägen zwischen dem Wunsch nach simplen Vorgaben oder einem einfachen Berechnungsansatz, die eine breite Anwendung ermöglichen, und möglichst genauen Prognosen zur erwarteten Leistung für eine Expertenanwendung. Es ist zu erwarten, dass die möglichen Berechnungsansätze gemäss SN EN 16798-7:2017 eher eine komplexe Berechnung erfordern. Eine Fallstudie [27] zum Berechnungsansatz gemäss SN EN 16798-7:2017 in Kopplung mit einem thermischen Modell (gem. EN ISO 52016-1) zeigt, dass die Berechnungen von natürlichen Luftströmungen mit Tabellenkalkulationsprogrammen (hier Excel) plausible Resultate bringen, bei einigen Fragen (z. B. Steuerung / Regelung) aber ein iterativer Berechnungsvorgang erforderlich ist. Dies setzt eine thermische Simulation voraus. Sollen zukünftig Angaben zur Berechnungssystematik gemacht werden, muss zwischen diesen beiden berechtigten Ansätzen «breite Anwendung» versus «Expertenanwendung» abgewogen werden.

Als Basis für die Bewertung von HLS, beispielweise im Rahmen der Abnahme, können Momentan- und Langzeitwerte dienen. Auf den ersten Blick scheint eine Langzeitauswertung allerdings sinnvoller. Dies liegt daran, dass HLS durch den Anteil an NL variierende Randbedingungen haben und so eine Auswertung von Momentanwerten nur begrenzt aussagekräftig ist. Eine Langzeitauswertung könnte z. B. bei der RLQ die Anzahl der Überschreitungen in einem vorgegeben Zeitraum beinhalten etc. Nachteilig an einer Langzeitbewertung ist der damit verbundene Aufwand zur Bereitstellung der Daten.

Da es speziell bei einfachen HLS zu erwarten ist, dass die Komponenten für die NL vom Nutzer manuell bedient werden, spielt das Nutzerverhalten eine massgebliche Rolle. Hier scheint den Autoren eine Nutzervereinbarung ein sehr sinnvolles Werkzeug zu sein. In einer Norm, bzw. einer Richtlinie kann auf die Bedeutung einer Nutzungsvereinbarung hingewiesen werden und es können Punkte genannt werden, die in einer Nutzervereinbarung projektspezifisch zu klären sind.

Der Beitrag zeigt, dass mit hybriden Lüftungen bei Wohn- und Bürobauten spezifische Lüftungsaufgaben abgedeckt werden. Die Frage «Ein guter Kompromiss?» kann damit beantwortet werden, dass diese Lüftungen dem Wunsch nach einem sparsamen Technikeinsatz entgegenkommen. Um z. B. Einschränkungen der thermischen Behaglichkeit zu vermeiden und eine korrekte Auslegung zu ermöglichen, bedarf es der sorgfältigen Planung. Die dargestellten Überlegungen mit den vielen zu klärenden und zu berücksichtigenden Themen unterstreichen den Bedarf für eine Norm oder einen Planungsleitfaden zur Unterstützung einer qualifizierten Auslegung und Ausführung von hybriden Lüftungssystemen.

Anhang Abkürzungen

ALD	=	Aussenbauteil-Luftdurchlass
FL	=	Fensterlüfter
HK	=	Heizkörper
HLS	=	Hybrides Lüftungssystem
LF	=	Lüftung zum Feuchteschutz
LG	=	Lüftung im Grundbetrieb
LI	=	Lüftung im Intensivbetrieb
LN	=	Lüftung im Normalbetrieb
ML	=	Mechanische Lüftung
NL	=	Natürliche Lüftung
RLQ	=	Raumluftqualität
RWA	=	Rauch-Wärmeabzug

Literatur

- [1] SIA 180:2014, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2014, pp. 1–72.
- [2] SIA 382/1:2014, *Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2014, pp. 1–82.
- [3] V. Dorer, A. Weber, and A. Pfeiffer, “AIVC TN 59 - Parameters for the design of demand controlled hybrid ventilation systems for residential buildings,” AIVC (Air infiltration and Ventilation Centre), Brussels, 2005.
- [4] V. Dorer and A. Weber, “Parameters for the performance assessment of hybrid ventilation systems - Performance criteria, target levels and design constraints,” 2005.
- [5] prEN 15665:2021-07-23, *Ventilation for buildings — Ventilation systems in residential buildings — Design (preliminary version)*. 2021, pp. 1–60.
- [6] C. Dimitroulopoulou, “Ventilation in European dwellings: A review,” *Build. Environ.*, vol. 47, pp. 109–125, 2012.
- [7] A. A. Argiriou, C. A. Balaras, and S. P. Lykoudis, “Single-sided ventilation of buildings through shaded large openings,” *Energy*, vol. 27, no. 2, pp. 93–115, 2002.
- [8] R. Sagelsdorff, P. Hartmann, and I. Pfiffner, “Luftwechsellmessungen in nicht klimatisierten

- Räumen unter dem Einfluss von Konstruktions-, Klima- und Benutzerparametern,” EMPA, Dübendorf, 1978.
- [9] O. Kah, S. Peper, W. Ebel, B. Kaufmann, W. Feist, and B. Zeno, “Untersuchung zum Aussenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohnen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung - Endbericht IEA SHC Task 37 Subtask C,” Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010.
- [10] H. Huber, C. Stünzi, C. Sibold, and D.-S. Kunz, “ABLEG - Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung,” IEBAu, FHNW (im Auftrag des BFE), Muttenz, 2018.
- [11] C. Hoffmann, A. Geissler, C. Hauri, H. Huber, and A. Primas, “FENLEG: Fensterlüfter in der etappierten Gebäudesanierung - ist der Einsatz erfolgreich?,” Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [12] V. Dorer and A. Pfeiffer, “Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL), Schlussbericht,” Bundesamt für Energie BFE, Dübendorf, 2002.
- [13] P. Artmann, N. Manz, H. Heiselberg, “Passive Cooling of buildings by night-time ventilation,” Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2008.
- [14] N. Artmann, D. Gyalistras, H. Manz, and P. Heiselberg, “Impact of climate warming on passive night cooling potential,” *Build. Res. Inf.*, vol. 36, no. 2, pp. 111–128, 2008.
- [15] P. Heiselberg (ed.), “IEA-EBC Annex 62 Ventilative Cooling Design Guide,” Hybrid Ventilation Centre, Aalborg University, Aalborg, 2018.
- [16] P. O’Sullivan and A. O’Donovan, “IEA-EBC Annex 62 Ventilative Cooling Case Studies,” Aalborg University, Aalborg, 2018.
- [17] T. Osterhage and D. Cali, “Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden,” Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2016.
- [18] U. Eicker, P. Seeberger, H. Fischer, and J. Müller, “Evaluierung Passiv-Bürohaus Lamparter - Endbericht,” Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, 2005.
- [19] A. Primas, H. Huber, C. Hauri, and M. Näf, “Abluftanlagen und Einzelraumlüftungen im Vollzug Energie,” EnFK Regionalkonferenz Ostschweiz, Horw, 2018.
- [20] SNG CEN/TR 16798-2:2019, *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 [...]*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2019, pp. 1–90.
- [21] P. Li *et al.*, “Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring,” *Energy Build.*, vol. 224, p. 110270, 2020.
- [22] M. Koschenz, S. Domingo Irigoyen, M. Ragetti, C. Widmer, and M. Kafadar, “ResCool : Klimaanpassung von Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte,” Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [23] J. C. Salcido, A. A. Raheem, and R. R. A. Issa, “From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 1008–1018, 2016.
- [24] H. Cho, D. Cabrera, S. Sardy, R. Kilchherr, S. Yilmaz, and M. K. Patel, “Evaluation of performance of energy efficient hybrid ventilation system and analysis of occupants’ behavior to control windows,” *Build. Environ.*, vol. 188, no. November 2020, p. 107434, 2021.
- [25] N. Heijmans and P. Wouters, “Pilot study report: PROBE, Limelette, Belgium,” Belgian Building Research Institute, Brussels, 2002.
- [26] E. Heinz, T. Hartmann, and D. Borrmann, *Wohnungslüftung - frei und ventilatorgestützt. Anforderungen, Grundlagen, Massnahmen, Normenanwendung*, 4th ed. Berlin: Beuth

Verlag GmbH, 2021.

[27] G. Zweifel, "Case Study on EN 16798-7 for Natural Ventilation," EPB Center, Rotterdam, 2021.

Der Schlussbericht wird ab März 2023 unter www.aramis.admin.ch runterladbar sein. Suche mit: «HyLue»

Dank

Die Finanzierung des Projektes erfolgt über das Bundesamt für Energie (BFE, Vertragsnummer SI/502192-01).