



4. Zwischenbericht vom 01.03.2026

Projekt Hobelwerk

Skalierbare Lösungen für den Weg zu Netto-Null



DISCLAIMER / HAFTUNGSAUSSCHLUSS:

Die Angaben im vorliegenden Zwischenbericht haben provisorischen Charakter. Im weiteren Projektverlauf können sich noch relevante Änderungen ergeben. Die Autor/innen haften nicht für Schäden, die durch die Anwendung der vorliegenden Publikation entstehen können.



Datum: 01.03.2026

Ort: Zürich

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Stadtwerk Winterthur, Klimafonds
8403 Winterthur
<https://stadtwerk.winterthur.ch>

Subventionsempfänger/innen:

Baugenossenschaft mehr als wohnen
Hagenholzstrasse. 104b, 8050 Zürich
www.mehralswohnen.ch

Lemon Consult AG
Sumatrastrasse 10, 8006 Zürich
www.lemonconsult.ch

Lignum
Mühlebachstrasse 8, 8008 Zürich
www.lignum.ch

Baubüro in situ
Dornacherstrasse 192, 4018 Basel
www.insitu.ch

Empa
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
www.empa.ch



LEMON • CONSULT •



baubüro in situ ag
Zürich



Materials Science and Technology

Autor/innen:

Philip Haupt, Lemon Consult, haupt@lemonconsult.ch
Philipp Heer, Empa UESL, philipp.heer@empa.ch
Martin Ménard, Low-Tech Lab, menard@lowtechlab.ch
Kerstin Müller, baubüro in situ, k.mueller@insitu.ch
Jules Petit, Lemon Consult, petit@lemonconsult.ch
Franziska Quandt, Zirkular, f.quandt@zirkular.net
Beni Rohrbach, Colabri, br@colabri.ch
Raphael Schär-Sommer, Lemon Consult, schaer@lemonconsult.ch
Hansueli Schmid, Lignum, hansueli.schmid@lignum.ch
Dario Vittani, Zirkular, d.vittani@zirkular.net
Andrea Wieland, mehr als wohnen (bis 2023)



BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, Bundesamt für Energie, +41 58 462 55 97, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502244-01

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



Zusammenfassung

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen, muss der Gebäudepark der Schweiz klimaneutral werden. In diesem Projekt werden dafür vier vielversprechende und skalierbare Ansätze in einer realen Umgebung installiert, erprobt und miteinander verglichen. Die Ansätze sind zwar nicht CO₂-frei, aber sie haben das Potential zu einer deutlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Für die Gebäudeerstellung werden die Ansätze CO₂-optimierter Holzbau sowie Re-Use erprobt. Für die Erstellung und den Betrieb wird eine einfache Abluftanlage, welche aber dank einer CO₂-Regelung einen hohen Komfort ermöglicht, installiert. Auf die Treibhausgasemissionen im Betrieb wirkt auch eine prädiktive Bivalenz-Regelung der Wärmeerzeugung.

Diese vier Lösungen werden mittels einer einheitlichen Methode bezüglich der Lebenszykluskosten sowie der Ökobilanzierung miteinander verglichen. Zudem werden Erhebungen zur Akzeptanz während der Planung sowie unter den Bewohnenden durchgeführt.

Vorläufige Ergebnisse

CO₂-optimierter Holzbau (Haus C)

- **Bewertung der Klimabilanz der Unternehmerangebote**
Die Bewertung der Unternehmerangebote anhand von THG-Emissionen führte zu besseren, CO₂-optimierten Lösungen und zeigt einen neuen Weg für nachhaltige Vergaben auf. Ein Vergleich zeigt grosse Unterschiede zwischen den eingegangenen Angeboten. Preislich günstige Angebote weisen auch die tiefsten Erstellungsemissionen auf (siehe Kap. 2.5).
- **Optimierter Holzbau senkt die Erstellungsemissionen**
Durch den Wechsel von einem Massivbau zu einem Holzbau, konnten in Bezug auf die Lebensdauer und die Energiebezugsfläche von Haus C 1.1 kg/m²a Treibhausgasemissionen eingespart werden. In Zusammenarbeit mit dem beauftragten Holzbauunternehmen wurden drei weitere Optimierungsmassnahmen umgesetzt: ein besonders schlanker Anhydrit-Unterslagsboden, Innenwände ohne Gipsbeplankung und die mehrheitliche Verwendung von Schweizer Holzprodukten. In der Summe führen diese Massnahmen zu einer zusätzlichen Einsparung an Treibhausgasemissionen von 0.5 kg/m²a (siehe Kap. 2.7). Die Erstellungsemissionen liegen, exkl. Gebäudetechnik und zentraler Tiefgarage, bei 5.9 kg/m²a.
- **Mehrkosten von rund 10%**
Die Erstellungskosten pro Energiebezugsfläche von Haus C sind gegenüber einem vergleichbaren Massivbau rund 350 CHF/m² höher. Die zusätzlichen Optimierungsmassnahmen führen zu weiteren Mehrkosten von 24 CHF/m².
- **Hohe Treibhausgas-Vermeidungskosten**
Die aus dem Verhältnis der Investitionskosten zu den Emissionseinsparungen berechneten Treibhausgas-Vermeidungskosten der untersuchten Holzbaumassnahmen liegen im Bereich von 0.8 bis 5.3 CHF/kg. Zum Vergleich: die CO₂-Abgabe auf Brennstoffe liegt in der Schweiz aktuell bei 0.12 CHF/kg.
- **Biogener Kohlenstoff: Chance mit offenen Fragen**
Bei Berücksichtigung der im Holz gebundenen CO₂-Emissionen, sinken die Netto-Erstellungsemissionen von Haus C auf 1.8 kg/m²a. Die Anrechnung des im Holz gebundenen biogenen CO₂ ist allerdings gemäss den im Baubereich geltenden Ökobilanznormen (SIA 390/1) nicht anrechenbar, weil die Permanenz und damit die Klimawirksamkeit der CO₂-Speicherung zurzeit noch unklar sind.
- **Holzbau liefert einen praxisnahen Weg zu Netto-Null**
Die Kombination aus Materialwahl, Optimierung und Lieferkettenmanagement zeigt praxisnah,



wie mehrgeschossige Holzbauten einen wesentlichen Beitrag zur Netto-Null-Zielerreichung leisten können.

Re-Use ohne Sonderstatus (Haus D)

- **Re-Use ist technisch machbar – auch ohne Sonderstatus**
Bei der Planung von Haus D wurde ab dem Vorprojekt die Wiederverwendung von Bauteilen (Re-Use) aus Abbruchobjekten angestrebt. Dabei sollten weder der Kosten- noch der Zeitraumen angepasst werden (ohne Sonderstatus). Von den für die Re-Use-Bauteilsuche angestrebten Materialmengen konnten aufgrund des engen Zeit- und Kostenrahmes allerdings nur ein Teil beschafft werden.
- **Re-Use spart erhebliche Mengen an Treibhausgasen ein**
Die verwendeten Re-Use-Bauteile ermöglichen gegenüber neuen Bauteilen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Bereich von 49 bis 96%. Haus D spart dank Re-Use rund 40 Tonnen CO₂eq, was 0.5 kg/m²a entspricht. Insgesamt liegen die Erstellungsemissionen von Haus D, exkl. Gebäudetechnik und zentraler Tiefgarage, bei 5.2 kg/m²a. Dieser, auch im Vergleich zu dem ebenfalls als Holzmodulbau realisierten Haus C, tiefe Wert, wird neben den Re-Use-Bauteilen vor allem auch durch den Verzicht auf ein Untergeschoss erreicht (siehe Kap. 3.6).
- **Kostenneutralität trotz höherem Planungsaufwand**
Der Einsatz von Re-Use Bauteilen war trotz erheblicher Aufwände für Umplanung, Bauteilsuche, Ausbau, Transport, Lagerung, Aufbereitung und Einbau nahezu kostenneutral. Die Treibhausgasbilanz von Haus D konnte somit dank Re-Use ohne nennenswerte Mehrkosten verbessert werden (siehe Kap. 3.7).
- **Neue Rollen und Prozesse sind notwendig**
Re Use erfordert angepasste Entscheidungs- und Planungsprozesse, schnelle Freigaben sowie eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekt:innen, Bauherrschaft und Re Use Fachplanenden.

CO₂-geregelter Abluftanlagen (Häuser C,D,E)

- **Halber Volumenstrom, deutlich weniger Zugluft**
Der durchschnittlich gemessenen Volumenstrom der im Hobelwerk mit CO₂-geregelter Abluftventilatoren ausgerüsteten Häusern C,D,E liegt bei 0.46 m³/(m²h), bezogen auf die Energiebezugsfläche. Die zentralen Abluftanlagen im Hunziker Areal der Häuser C,D,E,G,H,J,K,L fördern einen rund doppelt so hohen Volumenstrom von 0.95 m³/(m²h). Im Hobelwerk melden entsprechend weniger Bewohnende (12%) störende Zugerscheinungen im Bereich der Ausenluftdurchlässe als im Hunziker Areal (20%).
- **Tiefe Betriebsenergie dank bedarfsgerechter Regelung**
Der Elektrizitätsverbrauch der Abluftventilatoren und der Lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch der Häuser C,D,E sind deutlich tiefer als die entsprechenden Standardwerte der SIA-Normen, siehe Tabelle 23 und Tabelle 24. Der jährliche Elektrizitätsverbrauch der Abluftventilatoren ist vergleichbar bis tiefer als der entsprechende Verbrauch von Zu-/Abluftanlagen, siehe Abbildung 52, rechtes Diagramm.
- **Moderate Investitionskosten im Vergleich zu Zu-/Abluftsystemen**
Die Investitionskosten der CO₂-geregelter Abluftanlagen der Häuser C,D,E sind mit 40 CHF/m² bzw. 5'000 CHF pro Wohnung rund 10% höher als die Investitionskosten der feuchtegeregelter Abluftanlagen der Häuser A,B. Bei Häusern mit Zu-/Abluftanlagen liegen die Investitionskosten inkl. Honoraren und MwSt. typischerweise über 100 CHF/m² bzw. bei rund 12'000 CHF pro Wohnung, siehe Abbildung 53 linkes Diagramm.
- **Geringe Erstellungsemissionen trotz zusätzlicher Sensorik**
Die Erstellungsemissionen sind bei allen untersuchten Lüftungssystemen im Vergleich zu den



energiebedingten Emissionen verhältnismässig gering. Einfache, rein feuchtegeregelte Abluftanlagen verursachen die tiefsten Erstellungsemissionen mit rund $0.21 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$, während die CO_2 -geregelten Abluftanlagen im Hobelwerk bei $0.26 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$ und Zu-/Abluftanlagen im Bereich von $0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$ liegen, siehe Abbildung 54.

- **Hinweis auf weniger Fensterlüftung**

Die beschränkte Anzahl untersuchter Wohnungen in den Häusern A und B sowie die grosse Streuung der Messwerte lassen keine schlüssigen Aussagen bezüglich systembedingter Unterschiede bei den CO_2 -Konzentrationen zu. Der im Durchschnitt tiefere Heizwärmeverbrauch der Häuser C,D,E gegenüber der Häuser A,B könnten ein Indiz dafür sein, dass aufgrund der CO_2 -Regelung in den Häusern C,D,E weniger häufig über Fenster gelüftet wird (siehe Abbildung 52, linkes Diagramm).

- **Starke Streuung der CO_2 -Konzentration**

Die Median-Werte der CO_2 -Konzentration der Häuser C,D,E liegen im selben Bereich wie die auf dem Hunziker Areal in Haus B gemessenen Median-Werte. Haus B verfügt über dezentrale Zu-/Abluftgeräte pro Wohnung. Die Messwerte streuen allerdings stark, weshalb klare Aussagen zu systembedingten Unterschieden nicht möglich sind, siehe Tabelle 19.

- **Kompromiss zwischen Komfort und tiefer Energie- und Emissionsbilanz**

Abschliessend lässt sich festhalten, dass mit CO_2 -geregelten Abluftanlagen eine mittlere bis moderate Raumluftqualität mit geringeren Zuglufterscheinungen gegenüber einer Abluftanlage mit Konstantvolumenstrom erreicht werden kann. Der elektrische Energiebedarf für Ventilatoren und Wärmepumpe zur Kompensation der Lüftungswärmeverluste sowie die Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Energie und Wartung sind vergleichbar bis tiefer als bei einer Zu-/Abluftanlage. Die Investitionskosten sind rund halb so hoch wie bei Zu-/Abluftanlagen.

Prädiktive bivalente Wärmeerzeugung (Häuser A,B und C,D,E)

- **Prädiktive Regelung senkt Energiebezug**

Die prädiktive Regelung der Wärmepumpen führt zu einem reduziertem Elektrizitätsverbrauch (bis -13 % in Haus A), wodurch Betriebskosten und THG-Emissionen sinken. Signifikant verbesserte COP/JAZ-Werte konnten nicht nachgewiesen werden.

- **Weniger Lastspitzen**

Durch die prädiktive Regelung konnten die elektrischen Spitzenleistungen der Wärmepumpen systematisch reduziert werden (z. B. -9 % in Haus A und -9.9 % in Haus B), was Netzan-schlüsse entlastet und Investitionskosten potenziell senkt.

- **Optimierter Bivalentbetrieb reduziert Grund- und Spitzenlastbetrieb**

Da während der Implementierung der Betriebsoptimierung von Haus CDE vom Anlagenbetreiber eine Spitzenlastreduktion und eine generelle Energieeffizienz gewünscht wurde, hat die Betriebsoptimierung das vorhandene Flexibilitätspotential genutzt, um gleichzeitig, den Betrieb der Wärmepumpe (um 4.2%) und des Pelletkessels (um 13.2%) zu reduzieren.

- **Selbstlernende Regelung erfolgreich skalierbar**

Der erfolgreiche Reglertransfer von Haus A nach B zeigt, dass selbstlernende Modelle standortübergreifend funktionieren können - ein starkes Signal für die Skalierbarkeit bei ähnlichen Anlagen.

Kommunikation

Das Pilot- und Demonstrationsprojekt Hobelwerk hat bereits viel Aufmerksamkeit generiert und hat Beiträge zu mehreren Veranstaltungen, Artikeln, Kursen und Fernsehsendungen beige-steuert (siehe Kap. 7.2).



Résumé

Pour atteindre les objectifs climatiques de l'Accord de Paris, le parc immobilier suisse doit parvenir à la neutralité climatique. Dans ce projet, quatre approches prometteuses et potentiellement extensibles sont installées, testées et comparées dans un environnement réel. Bien que ces approches ne soient pas exemptes d'émissions de CO₂, elles présentent un potentiel substantiel de réduction des gaz à effet de serre.

Pour la phase de construction, deux stratégies sont examinées : la construction en bois optimisée du point de vue des émissions de CO₂ ainsi que le réemploi de composants issus de déconstructions. Pour la phase de réalisation et d'exploitation, une installation d'extraction d'air simple, mais régulée en fonction de la concentration de CO₂ — permettant d'assurer un niveau de confort élevé — est mise en œuvre. Les émissions opérationnelles de gaz à effet de serre sont également influencées par une régulation bivalente prédictive de la production de chaleur.

Ces quatre solutions sont évaluées au moyen d'une méthodologie harmonisée portant à la fois sur les coûts du cycle de vie et sur l'analyse du cycle de vie. En outre, des enquêtes relatives à l'acceptation sont menées auprès des parties prenantes de la phase de planification ainsi que parmi les résidents.

Résultats préliminaires

Construction bois optimisée pour le CO₂ (Bâtiment C)

- **Évaluation du bilan climatique des offres des entreprises**
L'évaluation des offres des entreprises sur la base de leurs émissions de gaz à effet de serre a conduit à des solutions améliorées et optimisées en matière de CO₂, ouvrant ainsi une nouvelle voie pour des procédures d'adjudication durables. La comparaison met en évidence de fortes disparités entre les offres reçues ; les propositions les moins coûteuses présentent également les plus faibles émissions de construction (voir chap. 2.5).
- **La construction bois optimisée réduit les émissions de réalisation**
Le passage d'une structure massive à une structure en bois a permis d'économiser 1,1 kg CO₂-éq/m²a pour le bâtiment C, rapporté à la durée de vie et à la surface énergétique de référence. En collaboration avec l'entreprise de construction bois mandatée, trois mesures supplémentaires d'optimisation ont été mises en œuvre : une chape anhydrite particulièrement mince, des parois intérieures sans plaques de plâtre, et l'utilisation majoritaire de produits en bois d'origine suisse. Ensemble, ces mesures conduisent à une réduction additionnelle de 0,5 kg CO₂-éq/m²a (voir chap. 2.7). Les émissions de construction, hors technique du bâtiment et parking souterrain central, s'élèvent à 5,9 kg CO₂-éq/m²a.
- **Surcoûts d'environ 10 %**
Les coûts de réalisation par mètre carré de surface énergétique du bâtiment C dépassent d'environ 350 CHF/m² ceux d'un bâtiment massif comparable. Les mesures d'optimisation entraînent un surcoût supplémentaire de 24 CHF/m².
- **Coûts d'évitement des gaz à effet de serre élevés**
Les coûts d'évitement des gaz à effet de serre, calculés comme le rapport entre les investissements et les émissions évitées, se situent pour les mesures analysées entre 0,8 et 5,3 CHF/kg CO₂-éq. À titre de comparaison, la taxe carbone actuelle sur les combustibles en Suisse est de 0,12 CHF/kg.
- **Carbone biogénique : opportunité et incertitudes**
En prenant en compte le CO₂ biogénique stocké dans le bois, les émissions nettes de réalisation du bâtiment C diminuent à 1,8 kg CO₂-éq/m²a. Toutefois, l'imputation du carbone biogénique stocké est rejetée par des institutions telles que Minergie et la SIA, la permanence du stockage et donc son efficacité climatique restant à ce jour incertaines.



- **La construction bois comme voie pragmatique vers le zéro net**
La combinaison de choix matériels ciblés, de mesures d'optimisation et d'une gestion transparente de la chaîne d'approvisionnement montre de manière concrète comment les bâtiments en bois de plusieurs étages peuvent contribuer de façon significative à l'atteinte des objectifs de neutralité climatique.

Re-Use sans statut particulier (Bâtiment D)

- **Le réemploi est techniquement réalisable – même sans statut particulier**
Lors de la planification du bâtiment D, la réutilisation de composants issus de déconstructions a été envisagée dès la phase de projet préliminaire. Le cadre temporel et financier ne devait pas être ajusté (absence de statut particulier). Toutefois, en raison de ces contraintes strictes, seule une partie des quantités de matériaux visées a pu être obtenue.
- **Le réemploi permet des réductions substantielles des émissions de gaz à effet de serre**
Les éléments réutilisés permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre comprise entre 49 % et 96 % par rapport à des composants neufs. Grâce au réemploi, le bâtiment D économise environ 40 tonnes de CO₂-éq, soit 0,5 kg/m²a. Les émissions de construction, hors technique du bâtiment et parking souterrain central, atteignent 5,2 kg/m²a. Cette valeur faible — également en comparaison avec le bâtiment C construit en modules bois — s'explique notamment par l'absence de sous-sol (voir chap. 3.6), en plus de l'utilisation de composants réemployés.
- **Neutralité des coûts malgré un effort de planification accru**
Malgré les efforts considérables requis pour la replanification, la recherche de composants, leur démontage, transport, stockage, reconditionnement et intégration, l'utilisation d'éléments réemployés s'est révélée pratiquement neutre en termes de coûts. La performance climatique du bâtiment D a ainsi pu être améliorée sans coûts additionnels significatifs (voir chap. 3.7).
- **De nouveaux rôles et processus sont nécessaires**
Le réemploi requiert des processus décisionnels et de planification adaptés, des validations rapides ainsi qu'une collaboration étroite entre architectes, maîtrise d'ouvrage et spécialistes du réemploi.

Systèmes d'extraction d'air régulés par CO₂ (Bâtiments C, D, E)

- **Débit d'air réduit de moitié, nettement moins de courants d'air**
Le débit volumique moyen mesuré dans les bâtiments C, D et E équipés de ventilateurs d'extraction régulés par la concentration de CO₂ atteint 0,46 m³/(m²h), basé sur la surface énergétique de référence. Les installations centrales du quartier Hunziker présentent un débit environ deux fois plus élevé (0,95 m³/(m²h)). En conséquence, seuls 12 % des occupants du Hobelwerk signalent des courants d'air au niveau des entrées d'air, contre 20 % au Hunziker Areal.
- **Faible énergie d'exploitation grâce à une régulation selon les besoins**
La consommation électrique des ventilateurs d'extraction et les pertes thermiques de ventilation des bâtiments C, D et E sont nettement inférieures aux valeurs standard des normes SIA. La consommation annuelle d'électricité pour la ventilation est comparable voire plus faible que celle de systèmes de ventilation mécanique double flux.
- **Coûts d'investissement modérés par rapport aux systèmes à double flux**
Les installations d'extraction régulées par CO₂ entraînent environ 10 % de coûts supplémentaires par rapport aux systèmes d'extraction pilotés par l'humidité (40 CHF/m² ou 5 000 CHF par logement). À titre de comparaison, les systèmes de ventilation double flux dépassent généralement 100 CHF/m² ou 12 000 CHF par logement.
- **Faibles émissions de construction malgré une instrumentation supplémentaire**
Les émissions de construction restent faibles pour l'ensemble des variantes étudiées. Les systèmes d'extraction pilotés par l'humidité présentent les émissions les plus faibles



($\approx 0,21 \text{ kg/m}^2\text{a}$), suivis des systèmes régulés par CO_2 ($\approx 0,26 \text{ kg/m}^2\text{a}$), tandis que les systèmes double flux atteignent env. $0,4 \text{ kg/m}^2\text{a}$.

– **Indices suggérant une réduction de l'aération par ouverture des fenêtres**

Bien que les données des bâtiments A et B ne permettent pas d'établir des différences claires entre systèmes, la consommation moyenne de chaleur plus faible observée dans les bâtiments C, D et E pourrait indiquer une fréquence réduite d'aération par ouverture des fenêtres, induite par la régulation au CO_2 .

– **Forte dispersion des concentrations de CO_2**

Les valeurs médianes de CO_2 dans les bâtiments C, D et E se situent dans le même intervalle que celles observées au Hunziker Areal (bâtiment B). Toutefois, la forte dispersion des mesures ne permet pas d'établir des conclusions robustes quant aux différences systématiques entre systèmes.

– **Un compromis entre confort et performance énergétique**

Il apparaît qu'un système d'extraction régulé par CO_2 permet d'atteindre une qualité d'air intérieure moyenne à modérée, avec moins de courants d'air qu'un système à débit constant. Les besoins électriques des ventilateurs et de la pompe à chaleur, ainsi que les émissions liées à la construction, à l'énergie et à la maintenance, sont comparables voire inférieurs à ceux d'un système double flux, tandis que les coûts d'investissement sont environ deux fois plus faibles.

Production de chaleur bivalente prédictive (Bâtiments A, B, C, D, E)

– **La régulation prédictive réduit la consommation d'énergie**

La commande prédictive des pompes à chaleur réduit la consommation d'électricité (jusqu'à -13% dans le bâtiment A), entraînant une diminution des coûts d'exploitation et des émissions de GES. Une amélioration significative du COP/JAZ n'a toutefois pas pu être démontrée.

– **Moins de pics de charge**

La régulation prédictive réduit systématiquement les puissances électriques maximales des pompes à chaleur (-9% dans le bâtiment A, $-9,9\%$ dans le bâtiment B), ce qui soulage les raccordements électriques et peut réduire les coûts d'infrastructure.

– **Fonctionnement bivalent optimisé : réduction simultanée des charges de base et de pointe**

À la demande de l'exploitant du bâtiment CDE, la stratégie a été optimisée pour réduire simultanément le fonctionnement de la pompe à chaleur ($-4,2\%$) et celui de la chaudière à pellets ($-13,2\%$), en exploitant le potentiel de flexibilité existant.

– **Scalabilité démontrée des modèles auto-apprenants**

Le transfert réussi du régulateur prédictif du bâtiment A au bâtiment B montre que les modèles auto-apprenants peuvent fonctionner efficacement sur plusieurs sites, ce qui constitue un signal fort pour une mise en œuvre à plus grande échelle.

Communication

Le projet pilote et de démonstration Hobelwerk a déjà suscité une large attention et a contribué à de nombreuses manifestations, publications, cours et émissions télévisées (voir chap. 7.2).



Summary

To achieve the climate targets of the Paris Agreement, Switzerland's building stock must become climate neutral. This project investigates four promising and scalable approaches, which are installed, tested, and compared under real-world conditions. While these approaches are not entirely CO₂-free, they exhibit substantial potential for reducing greenhouse gas emissions.

For the construction phase, two strategies are examined: CO₂-optimised timber construction and the reuse of building components. For both construction and operation, a simple exhaust-air ventilation system—equipped with CO₂-based control to ensure a high level of comfort—is implemented. Operational greenhouse gas emissions are further influenced by a predictive, bivalent control strategy for heat generation.

These four solutions are assessed using a harmonised methodology that covers both life-cycle costs and life-cycle assessment. In addition, surveys are conducted to evaluate acceptance among stakeholders during the planning process as well as among building occupants.

Preliminary results

CO₂-Optimised Timber Construction (Building C)

- **Assessment of the climate performance of contractor proposals**
Evaluating contractor proposals based on greenhouse gas (GHG) emissions led to improved, CO₂-optimised solutions and demonstrates a new pathway for sustainable procurement. A comparison reveals substantial differences between the submitted offers, with the lowest-cost proposals also exhibiting the lowest construction-related emissions (see Chapter 2.5).
- **Optimised timber construction reduces embodied emissions**
Switching from a reinforced concrete structure to a timber structure enabled a reduction of 1.1 kg CO₂-eq/m²a in greenhouse gas emissions for Building C, based on its service life and energy reference area. In collaboration with the contracted timber construction company, three additional optimisation measures were implemented: a particularly thin anhydrite screed, interior walls without gypsum cladding, and the predominant use of Swiss timber products. Together, these measures result in an additional savings of 0.5 kg CO₂-eq/m²a (see Chapter 2.7). Total construction-phase emissions, excluding building services and the central underground car park, amount to 5.9 kg CO₂-eq/m²a.
- Additional costs of approximately 10 %
Construction costs per square metre of energy reference area for Building C are around 350 CHF/m² higher than for an equivalent reinforced concrete building. The additional optimisation measures increase costs by a further 24 CHF/m².
- **High greenhouse gas abatement costs**
The greenhouse gas abatement costs—calculated as the ratio of investment costs to avoided emissions—range from 0.8 to 5.3 CHF/kg CO₂-eq for the investigated timber construction measures. For comparison, the current CO₂ levy on fossil fuels in Switzerland is 0.12 CHF/kg.
- **Biogenic carbon: opportunity with open questions**
When accounting for the CO₂ stored in the timber, the net construction emissions of Building C decrease to 1.8 kg CO₂-eq/m²a. However, the allocation of biogenic carbon storage is currently rejected by institutions such as Minergie and the Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), due to unresolved questions regarding long-term permanence and therefore the true climatic effectiveness of carbon storage.



- **Timber construction provides a practical pathway towards net-zero**

The combination of material choices, targeted optimisation measures, and supply-chain management demonstrates in practice how multi-storey timber buildings can make a substantial contribution to achieving net-zero greenhouse gas emissions.

Re-Use without Special Status (Building D)

- **Re-use is technically feasible – even without special regulatory provisions**

During the planning of Building D, the reuse of components originating from deconstruction projects was pursued from the preliminary design stage onward. Neither the cost framework nor the project timeline was to be adjusted (i.e. no special status). However, due to the tight time and cost constraints, only part of the targeted quantities of reusable components could ultimately be procured.

- **Re-use achieves substantial greenhouse gas reductions**

The reused components enable a reduction in greenhouse gas emissions of between 49 % and 96 % compared with new components. Through re-use, Building D avoids approximately 40 tonnes of CO₂-eq, equivalent to 0.5 kg/m²a. Overall construction-phase emissions, excluding building services and the central underground car park, amount to 5.2 kg/m²a. This low value—also in comparison with Building C, likewise realised as a timber-module structure—is explained not only by re-used components but also by the omission of a basement level (see Chapter 3.6).

- **Cost neutrality despite increased planning effort**

Despite considerable additional effort for redesign, component sourcing, dismantling, transport, storage, reconditioning, and installation, the overall cost of using reused components remained nearly cost-neutral. As a result, the greenhouse gas balance of Building D could be improved without significant additional expenditure (see Chapter 3.7).

- **New roles and processes are required**

Re-use demands adapted decision-making and planning processes, rapid approvals, and close collaboration between architects, clients, and re-use specialists.

CO₂-controlled Exhaust Ventilation Systems (Buildings C, D, E)

- **Half the airflow, significantly less draught**

The average measured airflow rate in Buildings C, D and E—equipped with CO₂-controlled exhaust fans—amounts to 0.46 m³/(m²h), based on the energy reference area. The central exhaust systems in the Hunziker Areal buildings C, D, E, G, H, J, K and L show roughly double this airflow (0.95 m³/(m²h)). Accordingly, fewer residents at the Hobelwerk site (12 %) report draught discomfort near the outdoor air inlets compared with the Hunziker Areal (20 %).

- **Low operational energy demand thanks to demand-controlled regulation**

Electricity consumption of the exhaust fans and ventilation-related heating energy demand in Buildings C, D and E are significantly below the corresponding SIA standard values (Tables 23 and 24). Annual electricity consumption of the exhaust fans is comparable to, or lower than, that of supply-and-exhaust systems (see Fig. 51, right diagram).

- **Moderate investment costs compared with supply-and-exhaust systems**

Investment costs for the CO₂-controlled exhaust systems in Buildings C, D and E amount to 40 CHF/m² or 5,000 CHF per dwelling—approximately 10 % higher than moisture-controlled exhaust systems in Buildings A and B. By contrast, supply-and-exhaust systems typically exceed 100 CHF/m² or about 12,000 CHF per dwelling (Fig. 52, left diagram).

- **Low embodied emissions despite additional sensor technology**

Embodied emissions across all ventilation systems analysed are low compared with operational emissions. Simple moisture-controlled exhaust systems cause the lowest emissions



(~0.21 kg/(m²a)), followed by CO₂-controlled systems (~0.26 kg/(m²a)), whereas supply-and-exhaust systems reach approx. 0.4 kg/(m²a) (Fig. 53).

– **Indications of reduced window ventilation**

Due to the limited number of monitored dwellings in Buildings A and B and the high variance in measurements, no definitive system-specific differences in CO₂ concentrations can be established. However, the lower average heating demand observed in Buildings C, D and E compared with Buildings A and B may indicate reduced manual window ventilation as a consequence of CO₂-controlled airflow (see Fig. 51, left diagram).

– **High variability in CO₂ concentrations**

Median CO₂ concentrations in Buildings C, D and E fall within the same range as those measured in Building B at the Hunziker Areal. However, substantial variability prevents robust conclusions regarding system-specific differences (Table 19).

– **A compromise between comfort and low energy/emissions**

Overall, CO₂-controlled exhaust systems achieve medium to moderate indoor air quality with fewer draught-related complaints compared with constant-airflow exhaust systems. Electricity consumption for fans and heat pumps, as well as emissions from construction, operation, and maintenance, are comparable to—or lower than—those of supply-and-exhaust systems. Investment costs are roughly half those of supply-and-exhaust solutions.

Predictive Bivalent Heat Generation (Buildings A, B, C, D, E)

– **Predictive control reduces energy consumption**

Predictive control of heat pumps reduces electricity consumption (up to –13 % in Building A), thereby lowering operating costs and greenhouse gas emissions. No statistically significant improvement in COP/seasonal performance factor could be demonstrated.

– **Fewer peak loads**

Predictive control consistently reduces peak electrical loads of heat pumps (e.g., –9 % in Building A and –9.9 % in Building B), thereby relieving grid connections and potentially reducing infrastructure costs.

– **Optimised bivalent operation lowers both base- and peak-load demand**

During implementation in Buildings C, D and E, the operator prioritised peak-load reduction and general energy efficiency. The optimisation exploited available flexibility to reduce operation of both the heat pump (–4.2 %) and the pellet boiler (–13.2 %).

– **Self-learning control successfully scalable**

The successful transfer of the predictive controller from Building A to Building B shows that self-learning models can function effectively across sites—a strong indicator of scalability for similar systems.

Communication

The Hobelwerk pilot and demonstration project has already attracted considerable attention and has contributed to numerous events, publications, courses, and television programmes (see Chapter 7.2).



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	7
Summary.....	10
Inhaltsverzeichnis.....	13
Abbildungsverzeichnis.....	17
Tabellenverzeichnis.....	22
Abkürzungsverzeichnis.....	23
1 Projektübersicht.....	24
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	24
1.2 Motivation des Projektes.....	24
1.3 Projektstruktur.....	25
1.4 Projektziele.....	28
2 AP1: CO ₂ -optimierter Holzbau.....	31
2.1 Ausgangslage.....	31
2.2 Stand des Marktes.....	31
2.3 Fragestellung und Zielsetzung.....	33
2.4 Vorgehen und Methode.....	33
2.5 Ausschreibung und Auswahlverfahren Holzbauunternehmen.....	33
2.6 Zukünftige Optimierung der Holzbauausschreibung.....	35
2.7 Treibhausgasbilanz des Holzbaus.....	37
2.7.1 Überblick.....	37
2.7.2 Optimierung 1 – Noppenboden.....	38
2.7.3 Optimierung 2 – Innenwände ohne Gipsbeplankung.....	40
2.7.4 Optimierung 3 – Schweizer Holzlieferkette.....	40
2.7.5 Im Holz gespeicherter biogener Kohlenstoff.....	41
2.8 Kostenbilanz des Holzbaus.....	42
2.9 Bewertung der Ergebnisse.....	43
2.10 Weiteres Vorgehen.....	43
3 AP2: Re-Use ohne Sonderstatus.....	45
3.1 Ausgangslage.....	45
3.2 Stand der Forschung.....	45
3.2.1 Überblick zum Stand der Forschung.....	45
3.2.2 Ausgewählte Forschungsprojekte.....	45
3.2.3 Marktnahe Pilot- und Demonstrationsprojekte und Studien.....	47
3.3 Fragestellung und Zielsetzung.....	47
3.4 Vorgehen und Methode.....	49
3.5 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.....	49
3.5.1 Auswahl Top10 Bauteile und Suchaufträge.....	50
3.5.2 Entscheidungsabläufe.....	52



3.5.3	Bauteilsuche - Rückbauobjekte	53
3.5.4	Bauteilsuche - Weitere Materialquellen	55
3.5.5	Erwerbsanträge und Bauteilmonitoring	55
3.5.6	Ausbau / Transport / Lagerung	59
3.5.7	Planung Wiedereinbau	61
3.6	Treibhausgasbilanz der Re-Use Bauteile	62
3.6.1	Eingesparte Treibhausgasemissionen	62
3.6.2	Gespeichertes biogenes CO ₂	63
3.7	Kostenbilanz der Re-Use Bauteile	64
3.7.1	Kosten pro Re-Use Bauteil	64
3.7.2	Honorar für die Re-Use-Planung und Verhältnis zu den Re-Use-Gesamtkosten	66
3.7.3	Treibhausgas-Vermeidungskosten	67
3.7.4	Fazit	68
3.8	Interviews mit Fachspezialistinnen und Bewohnenden	68
3.9	Bewertung der Ergebnisse	68
3.9.1	Gewählte Strategie und Entscheidungen	69
3.9.2	Mengen und Qualität	69
3.9.3	Aussichten	69
3.10	Ausblick	69
4	AP3: CO ₂ -geregelte Abluftanlage	70
4.1	Ausgangslage	70
4.2	Stand der Forschung	70
4.3	Fragestellung und Zielsetzung	71
4.4	Vorgehen	72
4.5	Anlagenbeschrieb	72
4.6	Testanlage	75
4.6.1	Ziele und Aufbau der Testanlage	75
4.6.2	Ergebnisse der Testanlage	76
4.7	Messergebnisse	79
4.7.1	Vorgehen	79
4.7.2	Raumluftqualität im Winterhalbjahr	81
4.8	Abluft-Volumenstrom und Ventilatorenergie	93
4.9	Anzahl nachts geöffneter Fenster	96
4.9.1	Methodik	96
4.9.2	Ergebnisse Thermographie-Aufnahmen	96
4.10	Lebenszykluskosten und Treibhausgasemissionen	99
4.11	Befragung der Bewohnenden	102
4.11.1	Vorgehen	102
4.11.2	Ergebnisse der Befragung	102
4.11.3	Ausblick	106



4.12	Schlussfolgerungen	107
4.13	Ausblick	108
5	AP4: Prädiktive bivalente Wärmeerzeugung	109
5.1	Ausgangslage	109
5.2	Stand der Technik.....	109
5.3	Fragestellung und Zielsetzung.....	111
5.4	Vorgehen und Methode	111
5.5	Datenzugänglichkeit	112
5.6	Reglerentwicklung	113
5.6.1	Wettervorhersage	113
5.6.2	Wärmebedarf.....	113
5.6.3	Modellbildung	113
5.6.4	Datenbedarf.....	113
5.6.5	Treibhausgasfaktoren für elektrische Energie und Pellets.....	114
5.7	Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus A und Haus B.....	115
5.7.1	Betriebsoptimierung Haus A	115
5.7.2	Betriebsoptimierung Haus B	117
5.8	Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus C, D und E	118
5.8.1	Betriebsanalyse	118
5.8.2	Regelverhalten Haus C, D und E.....	119
5.8.3	Einschaltdauer Pelletkessel und Wärmepumpe	120
5.8.4	THG-Emissionsbetrachtung.....	121
5.8.5	Brennstoffvergleich	124
5.9	Variantenvergleich der Lebenszykluskosten und Treibhausgasbilanz.....	125
5.10	Bewertung der Ergebnisse	127
6	AP5: Treibhausgase und Lebenszykluskosten	128
6.1	Ausgangslage.....	128
6.2	Fragestellung und Zielsetzung.....	128
6.3	Vorgehen und Methode	128
6.4	Treibhausgasbilanz.....	128
6.4.1	Vergleich mit den Anforderungen gemäss SIA 390/1	128
6.4.2	Vergleich Ausführungsprojekt mit Bauprojekt	129
6.4.3	Treibhausgasbilanz der Erstellung.....	130
6.4.4	Optimierungspotenzial - Interviews mit Architekten	131
6.5	Lebenszykluskosten	133
6.5.1	Ausgangslage.....	133
6.5.2	Vergleich Lebenszykluskosten	133
6.5.3	Berechnungsverfahren	136
6.5.4	Ergebnisse.....	136
6.6	Bewertung der Ergebnisse	138



6.7	Weiteres Vorgehen	138
7	AP6: Kommunikation und Dissemination	139
7.1	Kommunikationskonzept.....	139
7.2	Veranstaltungen und Publikationen	139
7.3	Nationale und internationale Zusammenarbeit	140
8	Literaturverzeichnis.....	141



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Vorschlag maximal zulässiger Treibhausgasemissionen für die Erstellung von Neubauten zur Einhaltung des 1.5°C Ziels (1.5°C targets) im Vergleich zur aktuellen Klimastrategie der Schweiz (Swiss strategy targets) [2].....	24
Abbildung 2	Projektstruktur mit vier horizontalen (AP1 bis AP4) und zwei transversalen (AP5 und AP6) Arbeitspaketen	25
Abbildung 3	Visualisierung der sieben Häuser A bis F des Areals Hobelwerk (www.hobelwerk-winterthur.ch)	26
Abbildung 4	Umsetzung der Arbeitspakete AP1 (Holzbau) und AP2 (Re-Use) in den Häusern C bzw. D	27
Abbildung 5	Umsetzung des Arbeitspakets AP3 (Abluft) in den Häusern C, D und E; die in den Häusern A und B installierte, feuchtegeregelte Abluftanlagen werden zu Vergleichszwecken ebenfalls untersucht	28
Abbildung 6	Umsetzung des Arbeitspakets AP4 (Bivalenz-Regelung) in den Häusern C, D und E mit einer bivalenten Wärmeerzeugung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe und einem Pellet-Spitzenlastkessel; die in den Häusern A und B installierte monovalente Wärmeerzeugung mit Luft/Wasser Wärmepumpen wird zu Vergleichszwecken ebenfalls untersucht.....	28
Abbildung 7	Berechnete Treibhausgasemissionen pro Holzbauunternehmen.....	35
Abbildung 8	Bewertung der Angebote der Holzbauunternehmer bezüglich Treibhausgasemissionen und Baukosten; markiert ist das zur Ausführung ausgewählte Angebot der Firma Baltensperger (Unternehmer B, Eternit Fassade) ...	35
Abbildung 9	Berechnung der Treibhausgasemissionen von Haus C mit GreenBIM; Quelle: FHNW	36
Abbildung 10	Treibhausgasemissionen der untersuchten Varianten für die Erstellung von Haus C, bezogen auf die Energiebezugsfläche und die Lebensdauer des Gebäudes; Gebäude ohne Gebäudetechnik (BKP 2 exkl. BKP 23, 24 und 25); grün: Haus C wie realisiert; schwarz: im Holz gebundenes CO ₂	37
Abbildung 11	Schnitt und Foto des material- und gewichtsparenden Bodensystems mit Noppenplatte.....	38
Abbildung 12	Treibhausgasemissionen der untersuchten Bodensysteme, bezogen auf die Bauteilfläche; grün: in Haus C verbautestes Bodensystem.....	39
Abbildung 13	Schematische Darstellung der Transportwege	41
Abbildung 14	Treibhausgasemissionen, bezogen auf ein kg der jeweiligen Holzprodukts; Gegenüberstellung Holzprodukt mit Standard-Herkunft (Balken in grau) und Schweizer Produktion (Balken in grün) gemäss Datenbasis KBOB 2016	41
Abbildung 15	Leitdetail Pascal Flammer Architekten zu einem Re-Use Fenster	50
Abbildung 16	Bildschirmfoto Suchauftragsdatenbank, baubüro in situ	51
Abbildung 17	Entscheidungsablauf Suchauftrag bis Ausbau, baubüro in situ AG	52



Abbildung 18	Bauteilminen und besichtigte Rückbauobjekte, baubüro in situ	53
Abbildung 19	ZKB Dübendorf, © Google Maps	54
Abbildung 20	Auszug von Bauteilen aus dem Gebäude der ZKB Dübendorf	55
Abbildung 21	Ablauf von Budgetermittlung zu Erwerbsantrag und Monitoring, baubüro in situ	57
Abbildung 22	(Fortsetzung) Ablauf von Budgetermittlung zu Erwerbsantrag und Monitoring, baubüro in situ.....	58
Abbildung 23	Palettierungsplan Türblätter ZKB Dübendorf, baubüro in situ	61
Abbildung 24	Spezifische Treibhausgasemissionen von neuwertigen Bauteilen (dunkelgrau), Re-Use-Bauteilen (hellgrau) sowie die Einsparung (in grün), bezogen auf die Masse des jeweiligen Bauteils.....	62
Abbildung 25	Absolute Treibhausgasemissionen von neuwertigen Bauteilen (dunkelgrau), Re-Use-Bauteilen (hellgrau) sowie die Einsparung (in grün), bezogen auf die Masse des jeweiligen Bauteils.....	63
Abbildung 26	Treibhausgasemissionen für die Erstellung von Gebäude D (ohne Gebäudetechnik) ohne Berücksichtigung der verwendeten Re-Use Bauteile (V1) und in grün Haus D wie realisiert, in schwarz im Holz gespeichertes biogenes CO ₂	63
Abbildung 27	Prinzipschema der CO ₂ -geregelten Abluftanlagen; hervorgehoben sind die Komponenten, die für den Zweck des P+D-Projekts zusätzlich installiert werden.	73
Abbildung 28	Im Projekt eingesetzter Aussenluftdrucklass Sonoslot der Firma Reson (links); Schnittdarstellung des Abluftventilators Silent ECO-EC von Wernig (rechts)	73
Abbildung 29	Prinzipschema der Raumregulierung.	75
Abbildung 30	Vorschlag für die Visualisierung der Messdaten der Lüftungsregelung im Gebäudeleitsystem	75
Abbildung 31	Aufputz montierter Abluftventilator der Testanlage (links); Schnittdarstellung des Abluftventilators von Wernig (rechts)	76
Abbildung 32	Technische Daten des Abluftventilators gemäss Herstellerangaben; Silent ECO UEC (oben): wie im Projekt ausgeführt; (Silent ECO AEC: entspricht der Aufputz-Ausführung analog der Testanlage).....	76
Abbildung 33	Auswertung der elektrischen Leistungsaufnahme (links); und des Schalldruckpegels in 1 m Abstand (rechts) des Abluftventilators mit Kaltrauchklappe bei unterschiedlichen Volumenströmen	77
Abbildung 34	Auf der Grundlage der Testergebnisse vorgeschlagene Grundeinstellung der CO ₂ -Regelung des Abluftventilators: Regelkurve: X1 = 500 ppm, Y1 = 15%; X2 = 2000 ppm, Y2 = 100%; max. Volumenstrom-Begrenzung: 60%; min. Volumenstrom / Grundlüftung: 15%	78
Abbildung 35	Schlafzimmer Hobelwerk Haus A, Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	81
Abbildung 36	Schlafzimmer Hobelwerk Haus A, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität	82



Abbildung 37	Schlafzimmer Hobelwerk Haus B Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	82
Abbildung 38	Schlafzimmer Hobelwerk Haus B, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität	82
Abbildung 39	Schlafzimmer Hobelwerk Haus C Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	83
Abbildung 40	Schlafzimmer Hobelwerk Haus C, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität	83
Abbildung 41	Schlafzimmer Hobelwerk Haus D Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	84
Abbildung 42	Schlafzimmer Hobelwerk Haus D, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität	84
Abbildung 43	Schlafzimmer Hobelwerk Haus E Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	85
Abbildung 44	Schlafzimmer Hobelwerk Haus E, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität	86
Abbildung 45	Schlafzimmer Hunziker Areal, Heizperiode 2015/2016 - Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	87
Abbildung 46	Schlafzimmer Hunziker Areal, Heizperiode 2015/2016 – Kategorie der Luftqualität; Hinweis: der Farbcode ist nicht deckungsgleich mit dem Datensatz Hobelwerk.....	88
Abbildung 47	Hobelwerk Haus E, Badezimmer, Heizperiode 2015/2016 – Verteilung der CO ₂ -Konzentration.....	92
Abbildung 48	Abuft-Volumenstrom pro Wohnfläche (HNF), im Vergleich zum Hunziker Areal.....	93
Abbildung 49	Verteilung des Elektrizitätsverbrauchs pro Wohnung pro Haus, bezogen auf die Wohnfläche (HNF)	94
Abbildung 50	Verteilung des lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauchs pro Wohnung pro Haus, bezogen auf die Wohnfläche (HNF).....	95
Abbildung 51	Aufnahme mittels Wärmebildkamera (14. Januar 2025)	96
Abbildung 52	Heizwärmeverbrauch sowie Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpen und Ventilatoren.....	99
Abbildung 53	Investitions- und Jahreskosten (Kapital, Energie, Wartung) der Lüftungssysteme pro Energiebezugsfläche.....	100
Abbildung 54	Jährliche Treibhausgasemissionen für Erstellung, Energieverbrauch und Wartung der Lüftungssysteme pro Energiebezugsfläche	101
Abbildung 55	Rückmeldungen zur Frage «Schlafen Sie nachts im Winter mit offenem Fenster» ..	103
Abbildung 56	Rückmeldungen zur Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze störende Zugluft wahr»; Hinweis: im Hunziker Areal lautete die Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze Zugluft wahr»	104



Abbildung 57	Rückmeldungen zur Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze störenden Aussenlärm wahr»	105
Abbildung 58	Rückmeldungen zur Frage «Sind die Lüftungsschlitze über den Fenstern mehrheitlich offen oder geschlossen?»	106
Abbildung 59	Konzeptionelle Anordnung und Integration der Betriebsoptimierung in das Automationssystem Hobelwerk	115
Abbildung 60	Auf dem Flachdach von Haus A aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpe; Wärmeleistung (A-7/W35): 140 kW	115
Abbildung 61:	Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für Haus A	116
Abbildung 62:	Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für Haus B	117
Abbildung 63:	Tagesmittelwerte der thermischen Leistung der Wärmepumpe (grün), des Pelletkessels (orange), sowie deren Summe (violett)	118
Abbildung 64:	Leistungsverlauf von Wärmepumpe und Pelletkessel über 2 Tage	119
Abbildung 65:	Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für die Systemtemperatur der Wärmeverteilung in Haus CDE	119
Abbildung 66:	Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für die Wärmepumpe (links) und den Pelletkessel (rechts) der Wärmeversorgung für Haus CDE	120
Abbildung 67:	Histogramm über die Einschaltdauer des Pelletofens mit Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün).....	120
Abbildung 68:	Resultierte Emissionen normiert auf die Energiebezugsfläche der einzelnen Anlagen	121
Abbildung 69:	Emissionsoptimiertes Szenario bei reduziertem Pelletkesselbetrieb.....	122
Abbildung 70:	Vergleich der entstandenen Emissionen durch den Pelletkessel (dunkel) und die Wärmepumpe (hell), gemessen im Referenzzeitraum (links) und simuliert für das ganze Jahr 2025 (rechts), für den Standardregler (blau) und die Betriebsoptimierung (grün).	123
Abbildung 71:	CO ₂ -eq Einsparungspotential über das Jahr 2025. Orange zeigt das CO ₂ -eq Einsparpotential pro Tag, welches bei tieferen Lufttemperaturen (blau) grösser wird.	123
Abbildung 72:	Vergleich unterschiedlicher Brennstoffe bezüglich CO ₂ -eq und Brennstoffkosten. ..	124
Abbildung 73:	Endenergiebedarf der vier Varianten für die Wärmeerzeugung der Häuser C,D,E...	125
Abbildung 74:	Investitions- und Jahreskosten der vier Wärmeerzeugungsvarianten für die Häuser C,D,E	126
Abbildung 75:	Treibhausgasbilanz der vier Wärmeerzeugungsvarianten für die Häuser C,D,E	126



Abbildung 76: Treibhausgasemissionen der Häuser C, D, E für Erstellung, Betrieb und Mobilität – Vergleich mit den Anforderungen gemäss SIA 390/1 Klimapfad; Zielwert B Wohnen: 15.0 kg/m ² a; Zusatzanforderung B: 11.0 kg/m ² a.....	129
Abbildung 77: Treibhausgasemissionen der Häuser C, D & E für Erstellung, Betrieb und Mobilität – Vergleich Bauprojekt mit Ausführungsprojekt	130
Abbildung 78: Treibhausgasemissionen der Erstellung	131
Abbildung 79: Treibhausgasemissionen der Baumaterialien pro Materialgruppe	131



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Meilensteine des Terminplans	26
Tabelle 2	Flächenkennzahlen der Gebäude des Hobelwerks.....	26
Tabelle 3	Schichtaufbau des Bodensystems mit Noppenplatte im Vergleich mit konventionellen Anhydrit- und Zement-Unterlagsböden	39
Tabelle 4	Anteil Schweizer Herkunft des Holzes für Gebäude C	40
Tabelle 5	Phasen gemäss SSN EN 15804 resp. SIA 2032	41
Tabelle 6	Erstellungskosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten ..	42
Tabelle 7	Erstellungskosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten inkl. im Holz gespeichertes biogenes CO ₂	42
Tabelle 8	Mehrkosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten der in Variante V3 enthaltenen Optimierungsmassnahmen	43
Tabelle 9	Bilanz der gesuchten und gefundenen Mengen an Re-Use-Bauteilen für Haus D sowie zusätzliche Fundstücke..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Tabelle 10	Treibhausgasemissionen absolut und spezifisch (massenbezogen) von neuwertigen Bauteilen, Re-Use-Bauteilen sowie die aus der Differenz resultierende Einsparung ..	62
Tabelle 11	Übersicht über die Bauteile, Anzahl und Bezeichnung.....	64
Tabelle 12	Kosten Re-Use versus Kosten neue Bauteile, pro Kategorie (rot = teurer, grün = günstiger)	65
Tabelle 13	Kosten Re-Use versus Kosten neue Bauteile, pro Einheit	66
Tabelle 14	Mehr-/Minderkosten und eingesparte Treibhausgasemissionen der Re-Use-Bauteile	67
Tabelle 15	Resultierende Treibhausgas-Vermeidungskosten pro Re-Use-Bauteil	68
Tabelle 16	Messergebnisse des Abluftventilators mit Kaltrauch-Rückschlagklappe.....	77
Tabelle 17	Anzahl mobile Raumluftsensoren in Schlafzimmern pro Haus.....	80
Tabelle 18	Klassifizierung der Raumluftqualität (IDA) bezüglich CO ₂ -Konzentration gemäss SIA 382/1:2025	81
Tabelle 19	Medianwerte der CO ₂ -Konzentration der untersuchten Lüftungssysteme; gemessen im Schlafzimmer nachts von 23 bis 07 Uhr.....	89
Tabelle 20	Typische Wohnungsgrundrisse der Häuser C,D,E im Hobelwerk	90
Tabelle 21	Detailanalyse Haus E, rot markierte Wohnungen haben mehr als 5% Werte im Bereich von IDA4, gelb markierte Wohnungen haben mehr als 10% Werte im Bereich von IDA3	91
Tabelle 22	Median-Werte des Abluft-Volumenstroms aller Wohnungen pro Haus	93
Tabelle 23	Median-Werte des Elektrizitätsverbrauchs aller Wohnungen pro Haus	94



Tabelle 24	Median-Werte des lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauchs aller Wohnungen pro Haus.....	95
Tabelle 25	Anteil geöffneter Fenster nachts bei tiefer Aussentemperatur: -5°C	98
Tabelle 26	Lüftungssysteme im Hunziker Areal (HA) und im Hobelwerk (HOB).....	99
Tabelle 27	Untersuchte Varianten der Wärmeerzeugung der Häuser C,D,E.....	125
Tabelle 28	Flächenanteile der Raumnutzungen pro Haus.....	135
Tabelle 29	Unkorrigierte Resultate	136
Tabelle 30	Normierte Resultate mit Kompaktheit A/AE=1.0	136
Tabelle 31	Entwicklung der Erstellungskosten über den Projektverlauf.....	137

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BFE	Bundesamt für Energie
BO	Betriebsoptimierung
CO ₂	Kohlendioxid
EBF	Energiebezugsfläche
EPD	Environmental Product Declaration
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
HSLU	Hochschule Luzern
JAZ	Jahresarbeitszahl
maw	(Baugenossenschaft) mehr als wohnen
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
Netto-Null	Netto-Null Treibhausgasemissionen bis im Jahr 2050
Re-Use	Wiederverwendung gebrauchter Bauteile
THGE	Treibhausgasemissionen
WP	Wärmepumpe



1 Projektübersicht

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Bis 2050 muss der Gebäudepark der Schweiz Netto-Null Treibhausgasemissionen erreichen. Aktuell verursachen alle Bauten der Schweiz in Erstellung und Betrieb mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs und 30% der inländischen CO₂-Emissionen [1]. Während der Betrieb von Neu- und Umbauten heute bereits nahezu klimaneutral möglich ist, werden bei der Erstellung von Neubauten noch grosse Menge Treibhausgase im In- und Ausland verursacht. Gemäss Studien der Hochschule Fribourg und der ETH Zürich [2], liegen die jährlichen Treibhausgasemissionen der Erstellung von Neubauten heute im Durchschnitt bei knapp 12 kg/m² (siehe Abbildung 1). Um das 1.5°C Ziel zu erreichen, soll dieser Wert bereits im Jahr 2025 auf 7 kg/m² und 2030 auch 4 kg/m² reduziert werden. Aktuelle Bestwerte für die Treibhausgasemissionen der Erstellung von Neubauten liegen bei 6 bis 7 kg/m² [3, 4]. Um die Gebäudeerstellung möglichst rasch zu dekarbonisieren, müssen im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten laufend neue Bestwerte angestrebt und die erfolgreichsten Strategien der Baubranche weitervermittelt werden.

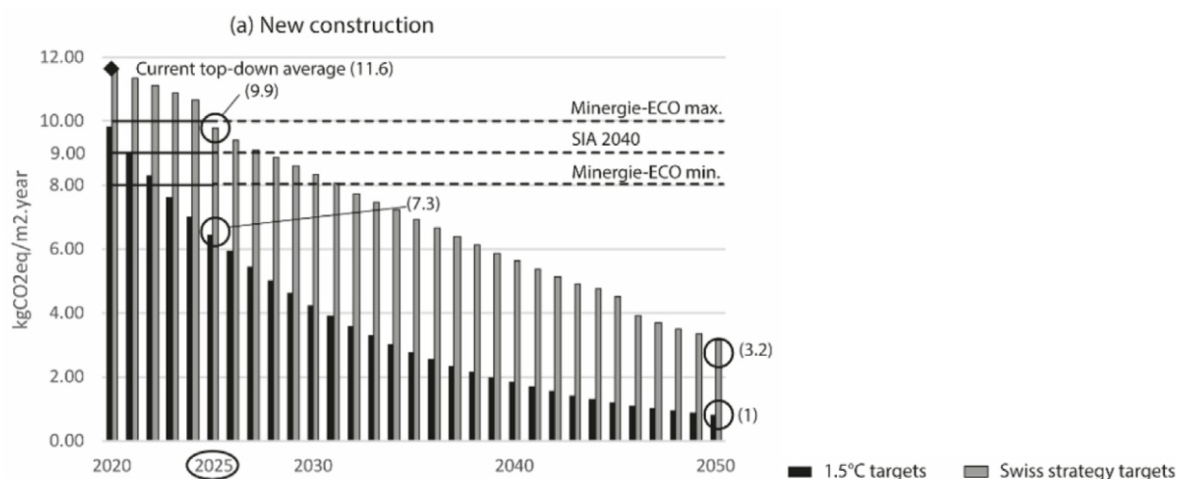


Abbildung 1 Vorschlag maximal zulässiger Treibhausgasemissionen für die Erstellung von Neubauten zur Einhaltung des 1.5°C Ziels (1.5°C targets) im Vergleich zur aktuellen Klimastrategie der Schweiz (Swiss strategy targets) [2]

Mit der beschleunigten Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und Mobilität sowie dezentraler und witterungsabhängiger Energiesysteme spielen Lastspitzen im Stromnetz eine zunehmende Rolle. Entsprechende Flexibilitäten bei den grössten Stromverbrauchern in Kombination mit einem vorausschauenden Lastmanagement sind weitere Schlüsselkomponenten für den Erfolg der Energie- und Klimawende.

Damit die Dekarbonisierung gelingt, müssen die Lösungen sowohl skalierbar als auch kostengünstig sein. Teure und situationspezifische Installationen haben eine geringere Breitenwirkung.

1.2 Motivation des Projektes

Die Baugenossenschaft mehr als wohnen wurde im Jahr 2007 durch über 35 gemeinnützige Wohnbauträger in Zürich als Lern- und Innovationsplattform gegründet. Mit dem 2000 Watt-Leuchtturm-Areal in Zürich-Nord (Hunziker Areal) konnte mehr als wohnen bereits wichtige Impulse für den systemisch nachhaltigen Wohnungsbau generieren. Insbesondere wurden Abluftanlagen sowie eine prädiktive Heizregelung evaluiert [5]. Auf beiden Erfahrungen möchte das neue Projekt aufbauen. Spezifisch



für die systematische Evaluation bezüglich des Komforts und Energieverbrauchs von Abluftanlagen werden direkte Vergleiche zu den Erhebungen auf dem Hunziker Areal gezogen.

Die Baugenossenschaft mehr als wohnen realisiert nun ihr zweites wegweisendes Arealprojekt. Das Hobelwerk, ehemaliges Industriearéal der Kälin & Co. AG, liegt inmitten der Winterthurer Stadtteile Neuhegi, Grüze und Oberwinterthur. Direkt hinter letzterem Bahnhof entlang der Gleise soll auf rund 1.5 Hektaren ein Wohn- und Arbeitsquartier für über 400 Personen in zwei Etappen entstehen. Die Überbauung wird die anspruchsvollen Emissionsziele gemäss SIA-Effizienzpfads Energie unterschreiten.

Gemäss dem Klima- und Innovationsgesetz sollen die CO₂-Emissionen bis 2050 auf Netto-Null gesenkt werden. Dies stellt insbesondere für die Bauwirtschaft eine enorme Herausforderung dar. Mit dem vorliegenden Projekt sollen konkrete und kostengünstige Ansätze zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb von Wohnbauten evaluiert und die Erkenntnisse anderen Bauträgern vermittelt werden.

1.3 Projektstruktur

In diesem Projekt werden verschiedene Ansätze erprobt und auf einer vergleichbaren Ebene untersucht. Zwei davon richten sich an die Erstellungsphase, eines an die Erstellung und den Betrieb und eines primär an die Betriebsphase. Diese Ansätze werden durch einen einheitlichen Vergleichsrahmen analysiert und verglichen. Ebenfalls erfolgen Kommunikation und Dissemination gemeinsam, was es erlaubt, Synergien zu nutzen. Folgendes Diagramm illustriert die Projektstruktur:

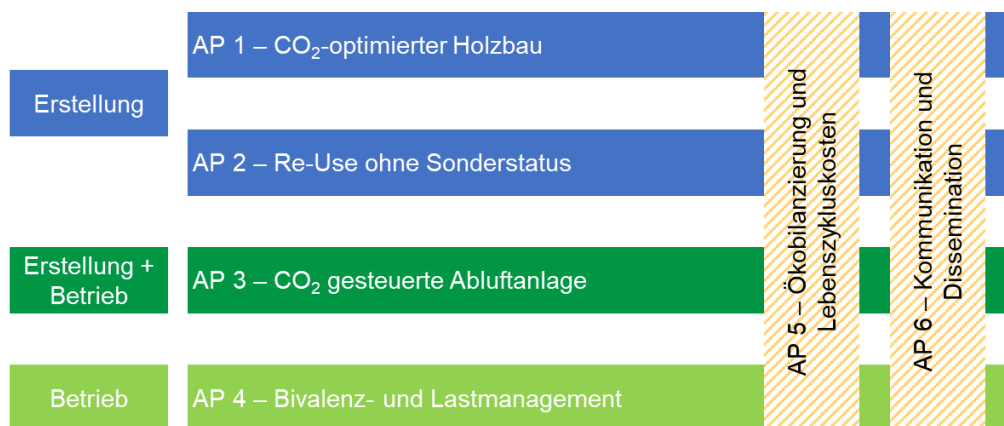


Abbildung 2 Projektstruktur mit vier horizontalen (AP1 bis AP4) und zwei transversalen (AP5 und AP6) Arbeitspaketen

Sämtliche Arbeitspakete (AP) stellen praxisnahe Bausteine dar, um die Emission an Treibhausgasen zu reduzieren. Dafür werden bekannte Ansätze mit innovativen Elementen kombiniert. Somit weisen die Ansätze eine hohe Markt- und Technologiereife aus. Ein Novum ist der systematische Vergleich der verschiedenen Ansätze unter ähnlichen Konditionen, und deren Evaluation und Dokumentation.



Abbildung 3 Visualisierung der sieben Häuser A bis F des Areals Hobelwerk (www.hobelwerk-winterthur.ch)

Tabelle 1 Meilensteine des Terminplans

Start Bauprojekt Häuser A und B	Juni 2019
Start Planung Häuser C, D und E	November 2019
Start BFE-Projekt	Januar 2021
Bezug Häuser A und B	Oktober, Dezember 2021
Start BFE Projekt	November 2021
Start Ausführung Häuser C, D und E	Januar 2022
Bezug Häuser C, D und E	Juli/November 2023
Abschluss BFE-Projekt	Herbst 2026

Tabelle 2 Flächenkennzahlen der Gebäude des Hobelwerks

Haus	Haus Nr	HNF m ²	GF m ²	EBF Wohnen m ²	EBF Gewerbe m ²	EBF Total m ²
A	37a,37b,37c	4'550	6'728	4'633	1'086	5'719
B	39a, 39b	3'590	6'073	4'616	546	5'162
C	41a,41b	2'968	4'412	2'790	753	3'543
D	43	1'813	2'337	1'966	295	2'261
E	45	3'222	4'850	4'465	0	4'465
G*		822	924	0	0	0
Total		16'965	25'324	18'470	2'680	21'150

* Die Hobelwerkhalle (Haus G) ist unbeheizt

Abkürzungen: HNF = Hauptnutzfläche, GF = Geschossfläche, EBF = Energiebezugsfläche

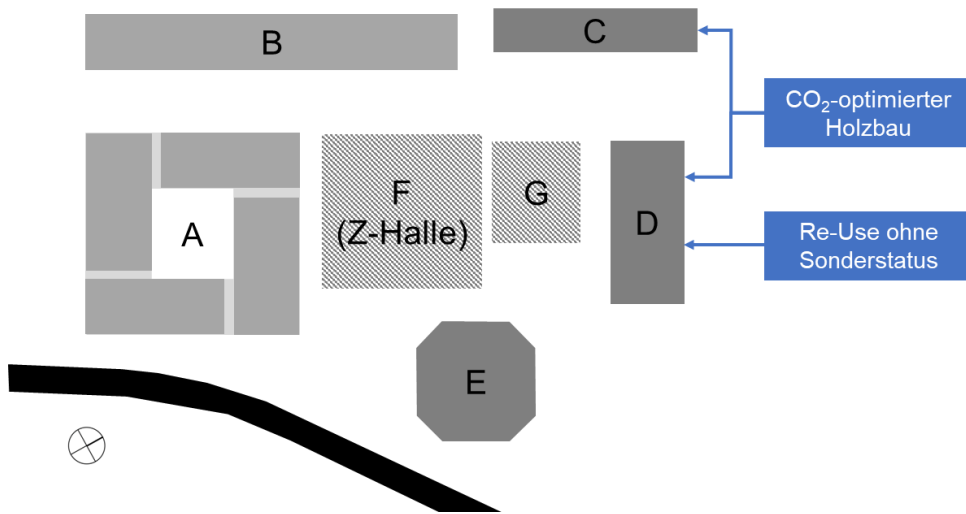


Abbildung 4 Umsetzung der Arbeitspakete AP1 (Holzbau) und AP2 (Re-Use) in den Häusern C bzw. D

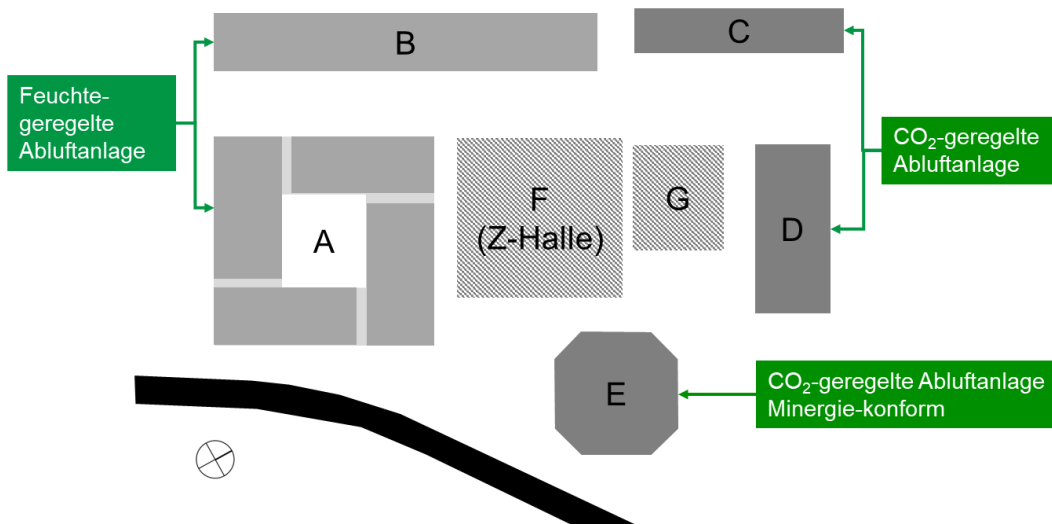




Abbildung 5 Umsetzung des Arbeitspakets AP3 (Abluft) in den Häusern C, D und E; die in den Häusern A und B installierte, feuchtegeregelte Abluftanlagen werden zu Vergleichszwecken ebenfalls untersucht

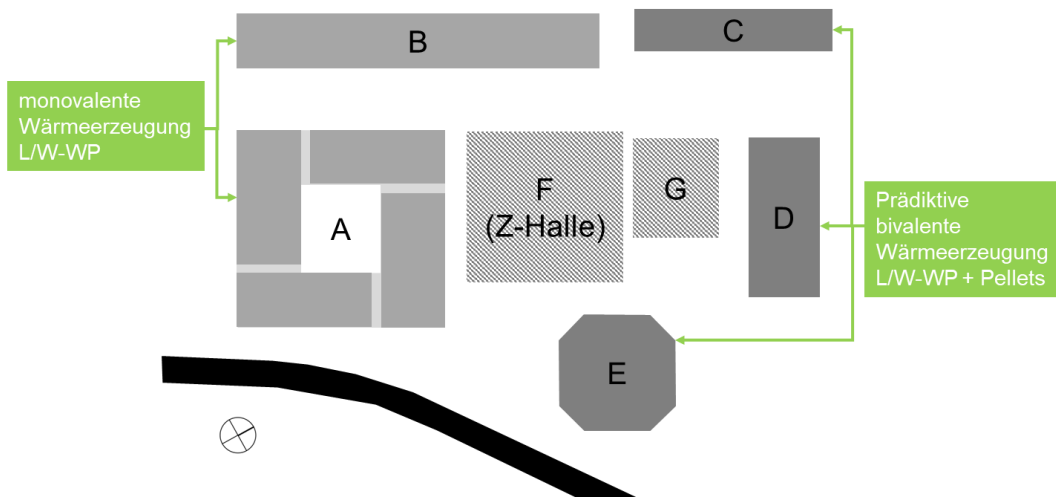


Abbildung 6 Umsetzung des Arbeitspakets AP4 (Bivalenz-Regelung) in den Häusern C, D und E mit einer bivalenten Wärmeerzeugung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe und einem Pellet-Spitzenlastkessel; die in den Häusern A und B installierte monovalente Wärmeerzeugung mit Luft/Wasser Wärmepumpen wird zu Vergleichszwecken ebenfalls untersucht

1.4 Projektziele

Das Hauptziel des Projekts ist die Senkung deutlich unter die aktuellen Bestwerte von Treibhausgasemissionen sowohl in der Erstellung wie auch im Betrieb mit skalierbaren Massnahmen.

Die skalierbaren Massnahmen werden in den folgenden thematisch gegliederten Arbeitspaketen (AP) untersucht. Die Projektziele, Arbeitshypothesen und Messgrössen werden in den entsprechenden Kapiteln zu den einzelnen APs im Detail beschrieben.

AP1 (Holzbau)

Das Ziel von AP1 ist, einen konsequenten Holzbau zu errichten und gleichzeitig eine transparente Lieferkette sicherzustellen. Dies stellt aufgrund der komplexen Zusammenhänge sowie des hohen Zeit- und Kostendrucks eine grosse Herausforderung für die Bauwirtschaft dar.

Umgesetzt wird AP1 im Haus C, ein achtgeschossiges Wohn- und Gewerbehau. Die oberen sechs Stockwerke werden als reiner Holzbau, während die zwei untersten Stockwerke in Beton ausgeführt werden. Dabei werden mittels einer konsequenten Orientierung auf CO₂-arme Baumaterialien (z.B. Dämmung und weitere mineralische Baumaterialien) die Treibhausgasemissionen möglichst reduziert. Damit wird ein Vorzeigeobjekt für ein CO₂-armes, mehrstöckiges Holzhaus geschaffen. Dafür wird ein Fokus auf die Holzlieferkette sowie den innovativen Ersatz von CO₂-intensiven Bauteilen (z.B. Zement, Stahl) und Holzwerkstoffen mit hohem Leimanteil gelegt. Auch das viergeschossige Haus D wird als Holzbau erstellt, wobei hier zusätzlich auf ein Untergeschoss verzichtet wird.

AP2 (Re-Use)

Ziel von AP2 ist zu demonstrieren, dass wiederverwendete Bauteile, wie z.B. Fenster oder Fassadenelement auch in einen regulären Bauprozess integriert werden können. Die Umsetzung erfolgt in Haus



D, wobei es sich um ein viergeschossiges Wohn- und Gewerbehaus in einer Holz-Hybrid-Bauweise handelt. In Haus D soll ein möglichst grosser Anteil an wiederverwendeten Bauteilen eingesetzt werden, ohne Kompromisse beim Komfort und den Kosten zu machen. So sollen die Re-Use-Bauteile nicht zu Nachteilen für die Bewohnenden führen und in Zukunft auch zu keinen Mehrkosten beschaffbar sein. Im Gegensatz zu früheren Re-Use-Vorhaben wird hier ein pragmatischer Ansatz verfolgt, der auch im Rahmen von konventionellen Bauprojekten umsetzbar ist. So kann der Wiederverwendung von Bauteilen auf einer grossen Skala zum Durchbruch verholfen werden. Gleichzeitig wird ausgewiesen, wieviel Treibhausgasemissionen durch diesen pragmatischen Ansatz bei der Erstellung eingespart werden können (Stand Bauteilmonitoring: siehe Anhang 2.1).

AP3 (CO₂-geregelt Abluftanlage)

In AP3 wird ein marktübliches kostengünstiges Lüftungssystem mit einer Neuentwicklung verglichen. Ziel ist zu prüfen, ob eine Abluftanlage, die über die CO₂-Konzentration der Raumluft geregelt wird, einen angemessenen Komfort bei geringem Ressourceneinsatz in Erstellung und Betrieb generieren kann. Während auf dem Hunziker Areal, dem ersten Projekt von mehr als wohnen, der geringe Ressourceneinsatz für ein Abluftsystem ohne bedarfsgerechte Regelung des Volumenstroms bereits gezeigt werden konnte, gibt es bezüglich des Komforts noch Verbesserungsbedarf. In den Häusern A und B werden marktübliche Einzelventilatoren je Nasszelle und in den Reduits verbaut. Die Abluftventilatoren werden über Präsenzschnalter und bei Überschreitung eines Schwellenwerts für die relative Luftfeuchtigkeit aktiviert (Feuchteschutz-Lüftung). In den Häusern C, D und E ist dagegen eine CO₂-Regelung des Abluftvolumenstroms pro Wohnung vorgesehen. Die Aussenluft strömt in allen fünf Häusern über manuell schliessbare Aussenluftdurchlässe nach. Der thermische Komfort kann im Winter und im Sommer zusätzlich durch eine automatische Reduktion des Volumenstroms bei Aussen-temperaturen < 0 °C und > 25°C auf der Grundlage von SIA 382/1 [6], verbessert werden.

Ziel der Feuchte- und CO₂-geregelten Lüftungssysteme ist, einen möglichst ausgewogenen Kompromiss zwischen Ressourcen- und Kosteneinsparungen bei der Erstellung auf der einen Seite und Komfort- und Energieeffizienz sowie tiefe Betriebskosten auf der anderen Seite zu finden. Der Komfort wird sowohl messtechnisch (CO₂-Konzentration, relative Raumluftfeuchte, Raumtemperatur) als auch mittels Umfragen bezüglich der subjektiven Wahrnehmung der Bewohnenden (Luftqualität, thermischer und hygrischer Komfort, Lärmbelastung) quantifiziert.

AP4 (Bivalenz-Regelung)

In AP 4 wird über den Stand der Industrie und den Stand der Technik hinaus, eine Bivalenz-Regelung entwickelt, welche übergreifend die Wärmebereitstellung regelt. Diese Regelung basiert auf einem selbstlernenden Algorithmus. Die selbstlernenden Algorithmen passen sich anhand realer Daten fortlaufend an saisonale Veränderungen oder verändertes Nutzungsverhalten an. Unter anderem wird dafür die Wärmespeicherung des Gebäudes besser ausgenutzt. Zudem werden Wetterdaten und -prognosen für eine selbstlernende Optimierung der Bivalenz-Regelung benutzt. Hauptziel des AP4 ist eine integrative Regelung der Wärmebereitstellung zu entwickeln und damit die realen Anlagen zu betreiben. Das Betriebsverhalten wird mit dem Betrieb aus der ersten Heizperiode sowie der reinen Wärmepumpen-Lösung in Gebäuden A und B verglichen (THG-Emissionen, JAZ, Betriebskosten).

Als Optimierungsgrösse steht die Reduktion der Treibhausgasemissionen der Wärmeerzeugung im Vordergrund. Dabei werden neben der temperaturabhängigen Arbeitszahl der Luft/Wasser-Grundlastwärmepumpe auch zeitabhängige Treibhausgasfaktoren für den Strombezug aus dem Netz berücksichtigt. Im Rahmen einer Szenario-Betrachtung wird der Einfluss unterschiedlicher Brennstoffe für die Spitzenlastabdeckung untersucht und ausgewiesen. Des Weiteren wird die Regelperformance bezüglich Energiebezug aus dem Verteilnetz (sowie deren Leistungsspitzen), Ein-/Ausschaltzyklen der individuellen Heizsysteme und Setpoint-Tracking analysiert und der Einfluss auf Betriebs- und Wartungskosten ausgewiesen.



Zielkonflikte mit einer betriebskostenoptimierten Bivalenz-Regelung werden aufgezeigt. Zudem wird die Dateneffizienz der entwickelten Lösung geprüft, um ein Mass über die minimale benötigte Messdatenmenge für einen effizienten Lernprozess geben zu können. Damit kann ermittelt werden, welche Sensorik für einen möglichst effizienten Betrieb tatsächlich notwendig ist.

AP5 (Treibhausgas- und Lebenszykluskostenanalyse)

AP5 hat zum Ziel, die einzelnen Ansätze vergleichbar zu machen. Das Gesamtprojekt wird mit einem gemeinsamen Analyserahmen und den einheitlichen Kenngrössen (z.B. CHF/gesparte Tonne $\text{CO}_{2\text{eq}}$) evaluiert.

AP6 (Kommunikation und Dissemination)

Die Ergebnisse werden sowohl vor Ort (mittels Führungen, Fachveranstaltungen) als auch schriftlich (via Fachzeitschriften, Newsletter) publiziert. Von Seiten mehr als wohnen wird über einen Newsletter mit knapp 4'000 Adressen auf die Ergebnisse aufmerksam gemacht. Zudem finden auf dem Hunziker und dem Hobelwerk Areal regelmässig Führungen mit etwa 1'000 Besucher*innen pro Jahr statt. Die Resultate werden darüber hinaus an verschiedenen Tagungen, unter anderem der Hauseigenen Innovationsversammlung, präsentiert und bei einschlägigen Fachzeitschriften (z.B. TEC21 und Wohnen) platziert.



2 AP1: CO₂-optimierter Holzbau

2.1 Ausgangslage

Ein grosses Potential, um Gebäude möglichst klimaneutral zu erstellen, liegt beim Holzbau. Durch den im Holz eingelagerten biogene Kohlenstoff wird dieser während der Lebensdauer des Gebäudes der Atmosphäre entzogen und im Gebäudepark der Schweiz zwischengespeichert. Der eingelagerte Kohlenstoff kann auf der Grundlage der neuen Ökobilanzdaten KBOB:2022 [9] separat ausgewiesen werden oder nach SN EN 15804 [10] unter GWP LULUC in der Treibhausgasbilanz angerechnet werden. Durch die Steigerung des Holzbau-Anteils wird die CO₂-Senke im Gebäudepark erhöht, wie eine Studie des Bundeamts für Umwelt aufzeigt [11]. Dies ist eine gute Möglichkeit, um Zeit zu schaffen, bis andere Lösungen für CO₂ neutrales Bauen oder gar den Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre vorhanden sind. Während die Gebäude als Kohlenstoffsенke agieren, können neue Wege für das CO₂-arme Bauen entwickelt werden, was dem Absenkpfad im Gebäudebereich dient [12]. Wichtig im Holzbau ist die konzeptionelle Auslegung der Architektur auf den Holzbau wie die Berücksichtigung von Rastermassen und Standarddimensionen, sowie auch der konstruktive Holzschutz in Form von baulichen Massnahmen, welche garantieren, dass das Holz langfristig immer unter 20 % Holzfeuchtigkeit bleibt und damit nur schwer von biogenen Schädlingen wie Pilzen und Insekten angegriffen werden kann.

Sehr kompakte Holzbauten erreichen bei der Erstellung heute Bestwerte um 6 bis 7 kg/m² Treibhausgasemissionen pro Jahr [3, 4, 13]. Das Hobelwerk geht mit Haus C für die oberen sechs Stockwerke einen Schritt weiter: rohbelassene, weiss lasierte Grobspanplatten ohne zusätzliche Bekleidung, Holzprodukte aus mehrheitlich inländischer Produktion und besonders schlanke Anhydrid-Unterlagsböden sollen noch tiefere Emissionswerte ermöglichen.

In diesem Projekt wurde deshalb ein innovativer Ansatz gewählt, indem in der Projektdefinition der Holzbau festgelegt und zusätzlich die Kosten- und Treibhausgasoptimierung gleich gewichtet wurden. Dadurch können sowohl firmenspezifisches Praxiswissen als auch Erkenntnisse aus der Forschung und Entwicklung zum Einsatz kommen. Die Holzbausysteme werden aufgrund der Projektdefinition zusammen mit den anbietenden Holzbauunternehmungen erarbeitet. Gleichzeitig können von Anfang an die Lösungen gewählt werden, die das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen, und Treibhausgasreduktionen müssen nicht über kostspielige Nachträge erfolgen. In diesem Rahmen wird die jeweilige Holzlieferkette auf deren Treibhausgasintensität überprüft und möglichst Treibhausgas-arme Holzwerkstoffe ausgewählt. Soweit uns bekannt, ist es das erste Mal, dass bereits bei der Vergabe eines Bauprojekts die Treibhausgasemissionen verschiedener Holzbauunternehmer verglichen und sowohl qualitativ als auch quantitativ berücksichtigt wurden. All diese Entscheidungsschritte und Abwägungen wurden dokumentiert. Damit wird der Handlungsspielraum für Architektinnen und Bauherren in Richtung Netto-Null-Treibhausgasemissionen bei der Erstellung von Holzbauten aufgezeigt und erweitert.

2.2 Stand des Marktes

Der Holzbau ist seit 2015 in der Höhe nicht mehr begrenzt und Holz wurde zudem in den VKF-Brandenschutzvorschriften (Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen) als Baustoff normalisiert. Dies bedeutet, dass es nicht mehr darum geht, ob Holz verwendet werden darf, sondern nur noch wie. Planer können Holz somit in allen Bereichen einsetzen, sofern die entsprechenden Anforderungen erfüllt werden. Lignum erstellt seit 1930 technische Papiere, um die Hürden für die Anwendung von Holz in den Bereichen Dauerhaftigkeit, Brandschutz, Schallschutz und Statik zu senken und so den Holzbau zu fördern. Seit 2015 entwickelt Lignum die Plattform www.lignumdata.ch, auf der diese Informationen digital und maschinenlesbar und über API-Schnittstelle zur Verfügung bereitgestellt werden. Dies soll



neue und einfachere Anwendungsmöglichkeiten in der Planung ermöglichen, beispielsweise durch die Integration in BIM-Datenmodelle, bis hin zu Softwarelösungen oder Optimierungen mittels künstlicher Intelligenz.

Die Bereitstellung von Bauholz richtet sich nach dem Markt. Aufgrund der hohen Frankenstärke, der höheren Löhne in der Schweiz sowie der topografischen Lage der Holzernte sind die Herstellungskosten höher als bei importiertem Holz aus dem nahen Ausland. Bauherren, die nicht auf Schweizer Holz bestehen, erhalten daher meist ausländisches Holz oder Schweizer Holz, das im Ausland verarbeitet wurde. 70% des verbauten Holzes wird importiert, und viele Holzwerkstoffe werden in der Schweiz nicht produziert. In anderen Ländern sind solche Transportdistanzen jedoch auch inländisch üblich und es wäre wirtschaftlich unsinnig, bestimmte Holzwerkstoffe in der Schweiz zu produzieren.

Der europäische Markt für Bauholz ist noch nicht gross genug, um durchgehend auch Laubholz, kleinere Durchmesser und Industriequalitäten (Käferholz) oder Wiederverwendung wirtschaftlich konkurrenzfähig und breit einzusetzen. Diese Sortimente werden oft zur staatlich unterstützten Erzeugung von Bio-Energie verwendet. Der volkswirtschaftliche Nutzen der Kaskadennutzung von Holz wäre jedoch höher, aber die individuelle Marge der Marktteilnehmer entscheidet letztlich über den Verwertungsweg der Ressource. Zudem können Sägereien aufgrund begrenzter Kapazitäten die Spitzen in den Erntemengen, verursacht durch Sturm oder Käferholz, nicht jederzeit schnell genug verarbeiten.

Holz ist heute so günstig wie nie zuvor; Rundholzpreise haben dank neuer Erntetechnologien und internationalem Handel die Teuerung nicht mitgemacht und sind über Jahrzehnte stagniert. Ein Effekt davon ist, dass viele Wälder aufgrund der niedrigen Rundholzpreise nicht mehr bewirtschaftet werden und die Bäume natürlich absterben. In Hitze- und Trockenzeiten können daher ganze Bestände ausfallen. Dieser Effekt wird verstärkt durch nach dem Zweiten Weltkrieg angelegte, sortenreine Pflanzungen von standortfremden Nadelhölzern oder nicht standortgerechten Genotypen innerhalb einer Art.

Die aktuellen Herausforderungen der Holzbranche sind:

1. Steigerung der Kaskadennutzung:

Derzeit wird ein überwiegender Teil der geernteten Holzmenge energetisch verwertet und gelangt nicht in den Stoffkreislauf. Das liberale Wirtschaftskonzept führt dazu, dass nicht das volkswirtschaftlich rentabelste, sondern der individuell profitabelste Verwertungsweg gewählt wird.

2. Ressourceneffizienz:

Bei der Verarbeitung entsteht noch viel Verschnitt. Niedrigere Erscheinungsklassen, kleinere Durchmesser und ein Grossteil des Laubholzes gelangen nicht in die stoffliche Verwertung.

3. Berücksichtigung des biogenen Kohlenstoffes:

Es gibt noch nicht genügend Anreize für den Holzbau, sowohl hinsichtlich finanzieller Mittel für die Wald- und Holzwirtschaft, die über die Taxonomie der Finanzprodukte gesteuert werden könnten, als auch hinsichtlich der Holzbauweise, die durch gesetzliche Verpflichtungen und Anreize gefördert werden könnte.

Um diese Elemente künftig integral, transparent und reproduzierbar berücksichtigen zu können, sind Daten erforderlich, die auf Grundlage gemeinsamer digitaler Wörterbücher maschinenlesbar bereitgestellt werden. In der Revision der Europäischen Bauprodukteverordnung ist ein solches Konzept bereits im digitalen Produktpass (DPP) beschrieben. Einfache Anreize für den Holzbau könnten sich über die Berücksichtigung der CO₂-Speicherung im Holz während der Nutzungsdauer im Treibhausgaspotential ergeben. Hierzu müsste die Ökobilanz dynamisch betrachtet werden, insbesondere im Hinblick auf das zu erwartende Entsorgungsszenario von Holz in 60 Jahren. Strategien zu Biogenic Carbon Capture Storage-Technologien (BECCS) könnten eine Möglichkeit sein, verbautes Holz von heute bereits als Teil einer BECCS zu betrachten und den Anteil des Abfallholzes entsprechend zu berechnen.



2.3 Fragestellung und Zielsetzung

Haus C ist ein achtstöckiges Wohn- und Gewerbehau. Die obersten sechs Stockwerke werden als reiner Holzbau ausgeführt, während die zwei untersten Stockwerke und das Untergeschoss aus Statik-, Lärmschutz und Kostengründen konventionell in Beton ausgeführt werden. Dabei werden mittels einer konsequenten Orientierung auf CO₂-arme Baumaterialien (z.B. Dämmung und weitere mineralische Baumaterialien) die Treibhausgasemissionen möglichst reduziert. Damit wird ein Vorzeigebjekt für ein CO₂-armes, mehrstöckiges Holzhaus geschaffen. Dafür wird ein Fokus auf die Holzlieferkette sowie den Einsatz besonders schlanker Holz- und Bodenkonstruktionen gelegt.

Folgende Hypothesen sollen getestet werden:

- Mittels konsequenter Orientierung auf CO₂-armes Bauen in Holzbauweise kann der CO₂-Fussabdruck der Stockwerke in reiner Holzbauweise auf unter 5 kg/m² Energiebezugsfläche gesenkt werden.
- Durch Berücksichtigung etablierter Unternehmenslösungen kann in Zukunft ein reduzierter CO₂-Fussabdruck unter Berücksichtigung der verkürzten Bauzeit praktisch ohne Mehrkosten erreicht werden.
- CO₂-arme Lieferketten für Holzbauteile sind möglich und praktisch kostenneutral, sofern diese eingefordert werden.

2.4 Vorgehen und Methode

Folgende Arbeitsschritte sind vorgesehen oder wurden bereits geleistet (**fett**):

1. **Planung und Evaluation** mit Holzbauingenieur
2. **Planung des Gebäudes** (Raumprogramm, Dimensionen, Erschliessung) mit einem Architektur-Team.
3. **Ausschreibung** an Holzbauunternehmung. Einholen von Vorschlägen zur Reduktion der CO₂-Intensität anhand der Erfahrungen und Methoden der Holzbauer. Berücksichtigen der Treibhausgasemissionen aufgrund der Transportdistanzen und Verarbeitung der Holzwerkstoffe in der Vergabe.
4. **Analyse und Optimierung der Holzlieferkette** und der verwendeten **Holzwerkstoffe**
5. **Integration von innovativen Lösungen** der Holzbauunternehmung
6. **Realisierung des Gebäudes**
7. **Test von GreenBIM** zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen bei zukünftigen Holzbauaus-schreibungen
8. Experteninterviews zum Prozess
9. Evaluation der Nutzenden-Perspektive (insbesondere Bewohnende). Visuelles Monitoring des Gebäudezustandes über die ersten Betriebsjahre.

2.5 Ausschreibung und Auswahlverfahren Holzbauunternehmen

Um die Angebote der Holzbauunternehmen nicht nur bezüglich ihres Preises, sondern auch bezüglich der zu erwartenden Einsparungen an Treibhausgasen beurteilen zu können, musste das Ausschreibungsverfahren in zentralen Punkten weiterentwickelt werden. Dafür wurden die folgenden Hilfsmittel entwickelt und eingesetzt:



- «Teaser Ausschreibung Holzbauunternehmen – CO₂-arme Erstellung und Bauökologie»: In einem einseitigen Dokument (siehe Anhang 1.1) werden die Ziele der Bauherrschaft bezüglich der Reduktion der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und die Erwartungen an die diesbezüglichen Lösungsvorschläge der Holzbauunternehmer beschrieben. Auch werden die wichtigsten Anforderungen an Bauökologie und Ressourceneffizienz aufgelistet. Als Anreiz für die Anbietenden wird der Leuchtturmcharakter und die zu erwartende hohe Sichtbarkeit des Projekts erwähnt.
Der Teaser dient dem Zweck möglichst innovative und bezüglich Klimaschutz engagierte Holzbauunternehmen im Umfeld einer weitgehend ausgelasteten Holzbaubranche für die Teilnahme an einem überdurchschnittlich anspruchsvollen und zeitintensiven Vergabeverfahren zu motivieren. Es wurden Offerten von fünf Unternehmen eingegeben, wobei drei davon zusätzlich eine CO₂-optimierte Unternehmensvariante einreichten.
- «Vergleichskriterien Netto-Null im Holzbau»: Dieses Dokument beschreibt die Kriterien und Verfahren, mit denen die Angebote der Holzbauunternehmen bezüglich der Treibhausgasemissionen bewertet werden (siehe Anhang 1.1).
- «KBOB Holzrechner»: Mit diesem, von der KBOB entwickelten und unter www.treeze.ch zum Download verfügbaren Excel-Tool, deklarierten die anbietenden Holzbauunternehmer die Lieferketten der für das Projekt Hobelwerk eingesetzten Holzwerkstoffe anteilmässig bezüglich Herkunftsländer, Transportdistanzen und Transportmittel. Als Ergebnis werden die Treibhausgasemissionen aus Herstellung, Transport und Entsorgung pro m³ Holzwerkstoff angegeben.
- «Vergleichskennzahlen Holzbau Hobelwerk»: Mit diesem, durch das Projektteam entwickelten Excel-Tool (siehe Anhang 1.1), gaben die Holzbauunternehmen die kalkulierten Materialmengen an Holzwerkstoffen und Wärmedämmstoffen für das Ausschreibungsprojekt und, sofern zusätzlich angeboten, für die CO₂-optimierte Unternehmensvariante an. Die Angaben des ausgewählten Holzbauunternehmens werden im Rahmen der Ausführungsplanung in Detail überprüft.

Aus der Kombination von KBOB-Holzrechner und den Vergleichskennzahlen Holzbau konnten die projektspezifischen Treibhausgasemissionen bereits auf Stufe Ausschreibung abgeschätzt und in den Vergabeentscheid miteinbezogen werden.

Der Vergabeentscheid fiel schliesslich auf den bezüglich Treibhausgasen und Kosten zweitbesten Lösungsvorschlag in Modulbauweise. Entscheidende Gründe dafür waren unter anderem die Nähe der Produktionsanlagen der Firma zum Hobelwerk, die um drei Monate kürzere Fertigstellungszeit, die geringere Witterungsabhängigkeit gegenüber dem Elementbau und die Möglichkeit, Re-Use-Bauteile direkt in den Lagerhallen vom Holzbauunternehmen zwischenzulagern.

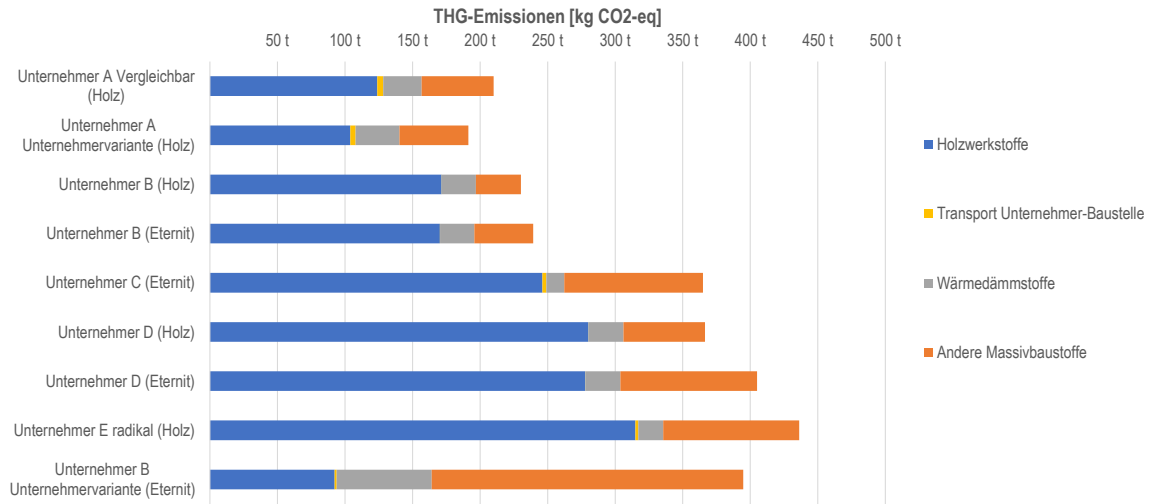


Abbildung 7 Berechnete Treibhausgasemissionen pro Holzbauunternehmen

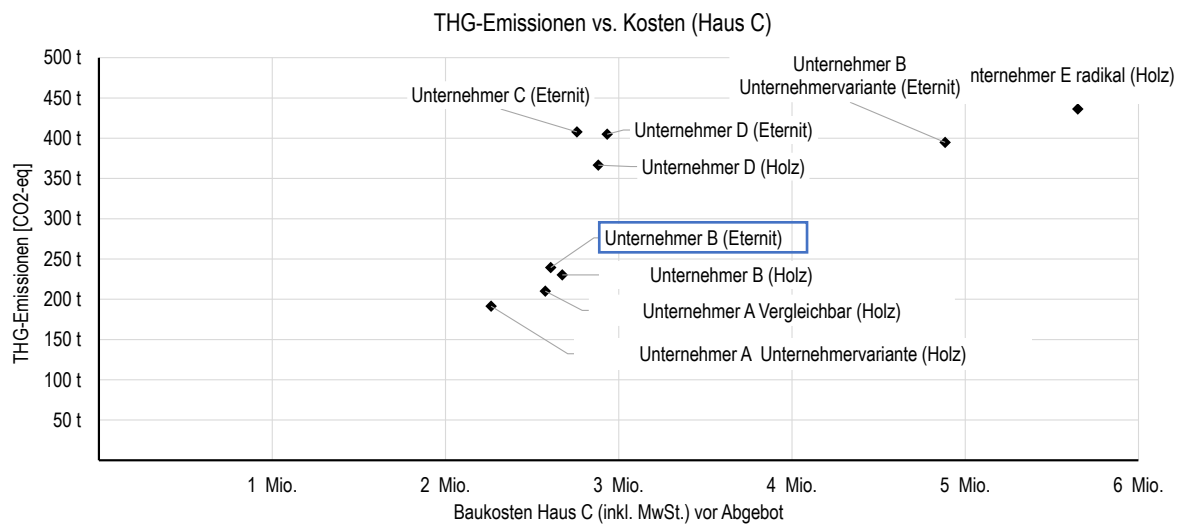


Abbildung 8 Bewertung der Angebote der Holzbauunternehmer bezüglich Treibhausgasemissionen und Baukosten; markiert ist das zur Ausführung ausgewählte Angebot der Firma Baltensperger (Unternehmer B, Eternit Fassade)

2.6 Zukünftige Optimierung der Holzbauausschreibung

Eine klare Projektdefinition und funktionale Ausschreibungen in Gesamtleistungswettbewerben helfen dem Planerteam, ein rundum optimiertes Angebot zu erstellen. In diesem Projekt wurde dies erfolgreich umgesetzt, was zu einem äusserst gelungenen Resultat führte. Allerdings haben sich einige Unternehmer nicht auf die erhöhten Anforderungen eingelassen und standardisierte Bausysteme angeboten. Der Innovationsgrad war auch ohne umfangreiche technische BIM-Lösungen mit vertretbarem Aufwand vergleichbar.



Dennoch hätten integrale BIM-Lösungen oder die einheitliche Verarbeitung der BIM-Modelle mit Tools wie GreenBIM den Vergleich der Treibhausgasemissionen der Unternehmerlösungen verbessert, die Transparenz erhöht und die Qualität des Siegerprojekts weiter gesteigert. Zudem hätten sie entsprechende Entscheidungen schneller und einfacher gemacht. In diesem Fall waren die Angaben trotz klarer Vorgaben nicht direkt vergleichbar, was die Beurteilung erschwerte.

Das Potential zur Beurteilung der Treibhausgasbilanz unterschiedlicher Unternehmerlösungen mit GreenBIM wird im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen Lignum und FHNW geprüft. Die Ergebnisse werden bis Ende Jahr erwartet.

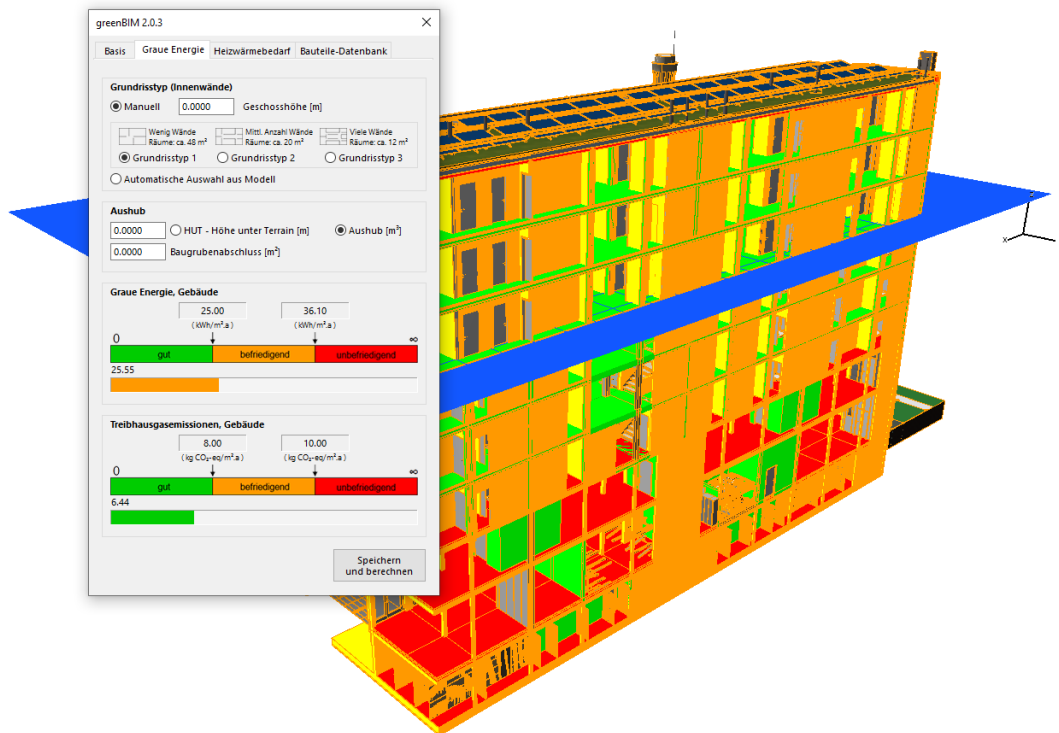


Abbildung 9 Berechnung der Treibhausgasemissionen von Haus C mit GreenBIM; Quelle: FHNW



2.7 Treibhausgasbilanz des Holzbaus

2.7.1 Überblick

Dieses Unterkapitel beleuchtet die Auswirkungen der einzelnen Massnahmen im Bereich des «CO₂-optimierten Holzbaus». Die Treibhausgasemissionen der Erstellung von Haus C werden für folgende vier Varianten ausgewiesen (siehe Abbildung 10):

- Variante V1 Massivbau
Bis zum Vorprojekt war Haus C als Massivbau geplant. Diese Variante entspricht einem architektonisch analogen Gebäude mit einem Tragwerk aus Beton und gemauerten Aussenwänden mit einer hinterlüfteten Eternitfassade.
- Variante V2 Holzbau (UG - 1.OG in Beton)
Diese Variante entspricht dem realisierten Holzbau ohne die zusätzlich umgesetzten Optimierungsmassnahmen.
- **Variante V3 Holzbau optimiert*** (UG - 1.OG in Beton)
Diese Variante entspricht dem realisierten Holzbau inklusive folgender Optimierungsmassnahmen: Noppenboden anstelle eines Anhydritbodens, Verzicht auf eine Gipsbeplankung der Innenwände und die Verwendung von Bauholz, das mehrheitlich aus Schweizer Quellen stammt.
- Variante V4 reiner Holzbau optimiert* (nur UG in Beton)
Im Unterschied zu V3 werden auch das EG und das 1. OG (Aussenwände und Decken) in Holzbauweise erstellt.



Abbildung 10 Treibhausgasemissionen der untersuchten Varianten für die Erstellung von Haus C, bezogen auf die Energiebezugsfläche und die Lebensdauer des Gebäudes; Gebäude ohne Gebäudetechnik (BKP 2 exkl. BKP 23, 24 und 25); grün: Haus C wie realisiert; schwarz: im Holz gebundenes CO₂.

Deutliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen werden mit dem Wechsel von einem Massivbau (V1) mit 7.5 kg/m²a zu einem Holzbau (V2) mit 6.4 kg/m²a erzielt (- 1.1 kg/m²a). Weitere Einsparungen werden durch die drei im Haus C umgesetzten Optimierungsmassnahmen (V3) mit 5.9 kg/m²a erreicht (- 0.5 kg/m²a). Diese Reduktion ergibt sich aus der Summe folgender Optimierungsschritte:



- Noppenboden - 0.09 kg/m²a
- Innenwände ohne Gipsbeplankung - 0.29 kg/m²a
- Schweizer Holzlieferkette - 0.12 kg/m²a

Mit dem reinen Holzbau von Variante V4 könnten gegenüber der tatsächlich realisierten Variante V3 weitere 0.5 kg/m²a eingespart werden.

In Abbildung 10 wird zudem der im Bauholz gespeicherte biogenen Kohlenstoff als negative Treibhausgasemissionen schwarz dargestellt (siehe Ziffer 2.7.5).

2.7.2 Optimierung 1 – Noppenboden

Bei den Nachverhandlungen wurde von der Firma Baltensperger als zusätzliche Option für einen CO₂-optimierten Holzbau das Leichtbau-Bodensystem Becotec EN 23F vorgeschlagen. Bei diesem System mit einer Noppenplatte zur Montage der Bodenheizungsrohre ist der Anhydrit-Fliessestrich im Durchschnitt nur 30 mm dick. Ein konventioneller Anhydrit-Fliessestrich ist dagegen 60 mm, ein Zementestrich 80 mm dick.

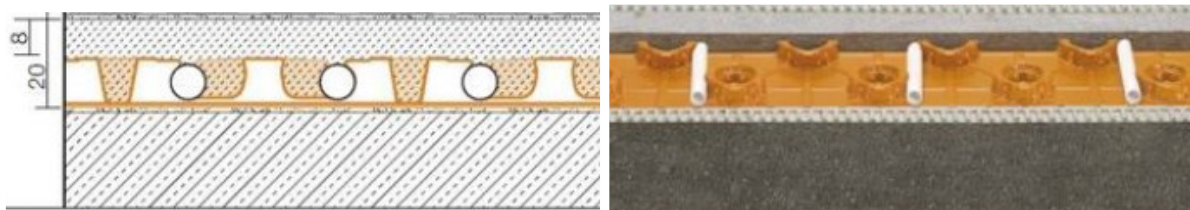


Abbildung 11 Schnitt und Foto des material- und gewichtsparenden Bodensystems mit Noppenplatte

Treibhausgasbilanz der drei Bodensysteme (siehe auch Tabelle 3 und Abbildung 12):

- Reduzierte Treibhausgasemissionen
Das Bodensystem mit Noppenplatte spart gegenüber einem Anhydrit-Unterlagsboden 2.1 kg/m² bzw. 13% Treibhausgasemissionen ein. Gegenüber dem Zementestrich werden 10.2 kg/m² bzw. 42% Treibhausgasemissionen eingespart.
- Reduzierter Bodenaufbau
Der Bodenaufbau des Bodensystems mit Noppenplatte ist gegenüber dem Anhydrit-Unterlagsboden rund 30 mm schlanker.
- Reduziertes Gewicht
Das Gewicht des Bodensystems mit Noppenplatte wird gegenüber dem Anhydrit-Unterlagsboden knapp halbiert.



Tabelle 3 Schichtaufbau des Bodensystems mit Noppenplatte im Vergleich mit konventionellen Anhydrit- und Zement-Unterlagsböden

Schlüter Bekotec-System, gemäss Nachtragsofferte von Baltensperger vom 21.10.2021

Schicht	Material	CO ₂ eq-Faktor kg/kg	Dichte Bereich kg/m ³	Dichte Rechenwert kg/m ³	Schichtdicke mm	Masse kg/m ²	Treibhausgasemissionen kg/m ²
Anhydrit*	Unterlagsboden Anhydrit, 60 mm	0.0867	2'000	2'000	30.4	60.8	5.27
Schlüter Noppenplatte	Polystyrol (PS)	6.68	1'050	1'050	0.5	0.525	3.51
Trittschalldämmung	Steinwolle	1.13	32-160	35	20	0.7	0.79
Wärmedämmung	Polystyrol expandiert (EPS)	7.64	15-40	20	30	0.6	4.58
Total					81	63	14.2

* Anhydrit-Schichtdicke: 35 mm abzüglich 20% Noppen mit 23 mm

Unterlagsboden mit 60 mm Anhydrit

Schicht	Material	CO ₂ eq-Faktor kg/kg	Dichte Bereich kg/m ³	Dichte Rechenwert kg/m ³	Schichtdicke mm	Masse kg/m ²	Treibhausgasemissionen kg/m ²
Anhydrit	Unterlagsboden Anhydrit, 60 mm	0.0867	2'000	2'000	60	120	10.40
PE-Folie	Polyethylenfolie (PE)	5.33	920	920	0.1	0.092	0.49
Trittschalldämmung	Steinwolle	1.13	32-160	35	20	0.7	0.79
Wärmedämmung	Polystyrol expandiert (EPS)	7.64	15-40	20	30	0.6	4.58
Total					110	121	16.3

Unterlagsboden mit 80 mm Zementestrich

Schicht	Material	CO ₂ eq-Faktor kg/kg	Dichte Bereich kg/m ³	Dichte Rechenwert kg/m ³	Schichtdicke mm	Masse kg/m ²	Treibhausgasemissionen kg/m ²
Anhydrit	Unterlagsboden Zement, 85 mm	0.125	1'850	1'850	80	148	18.50
PE-Folie	Polyethylenfolie (PE)	5.33	920	920	0.1	0.092	0.49
Trittschalldämmung	Steinwolle	1.13	32-160	35	20	0.7	0.79
Wärmedämmung	Polystyrol expandiert (EPS)	7.64	15-40	20	30	0.6	4.58
Total					130	149	24.4

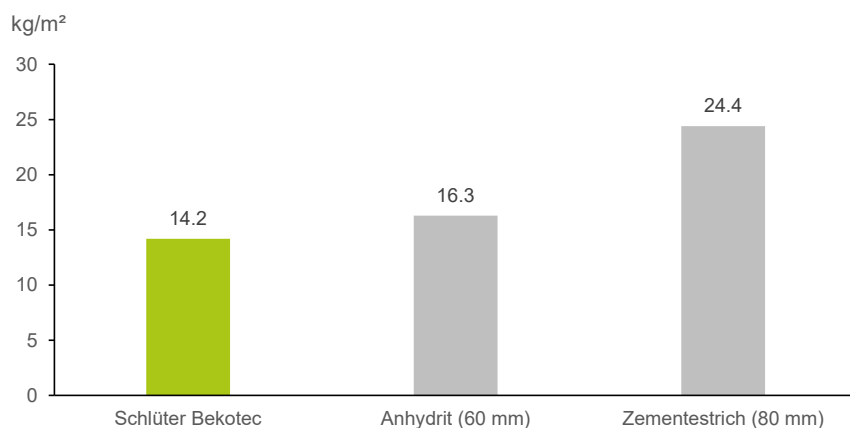


Abbildung 12 Treibhausgasemissionen der untersuchten Bodensysteme, bezogen auf die Bauteilfläche; grün: in Haus C verbautestes Bodensystem



Bezogen auf die Lebensdauer von Haus C führt der Noppenboden zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 0.09 kg/m²a.

Die Bewertung dieser Lösungen kann je nach Gesichtspunkt unterschiedlich ausfallen. Der vom Holzbauunternehmer vorgeschlagene, besonders schlanke Bodenaufbau, bestehend aus Anhydrit und einer Noppenplatte aus Polystyrol, ist hinsichtlich der Trennbarkeit der Materialien am Ende des Lebenszyklus nicht ideal. Bezüglich der Treibhausgasemissionen erzielt diese Variante jedoch aufgrund geringerer Materialmengen gegenüber einem konventionellen Anhydrit-Unterlagsboden bessere Ergebnisse.

2.7.3 Optimierung 2 – Innenwände ohne Gipsbeplankung

Bei den Innenwänden wurden rohe Oberflächen mittels Grobspanplatten geschaffen. Diese wurden direkt mit weisser Farbe gestrichen, was eine gute Optik ohne weiteren Materialeinsatz, ähnlich einer Raufasertapete, ergibt. Hier wäre eine Ausschreibung mit Vorgabe einer zusätzlichen Gipsbeplankung völlig überflüssig gewesen, was das Innovationspotential funktionaler Ausschreibung beispielhaft darstellt.

Der Vergleich zeigt, dass durch diese materialsparende Massnahme die Treibhausgasemissionen um 0.29 kg/m²a gesenkt werden konnten.

2.7.4 Optimierung 3 – Schweizer Holzlieferkette

Auf die Herkunft des Holzes wurde geachtet. Dies unter anderem zur Reduktion der THGE in der Erstellung. Bereits bei der Ausschreibung wurde von den Holzbauunternehmen verlangt, diesen Hebel zu berücksichtigen und auch nachzuweisen.

Es folgt, dass der Grossteil des eingesetzten Holzes auch aus der Schweiz stammt. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass 72% des Holzvolumens Schweizer Ursprung hat.

Tabelle 4 Anteil Schweizer Herkunft des Holzes für Gebäude C

	Einheit	Alle Holzprodu	Schweizer Hol:	Anteil CH
Anzahl	-	16	10	63%
Volumen	m ³	1159	832	72%
Masse	kg	558'950	373'722	67%

Gemäss SIA 2032 wird in der Herstellungsphase zwischen der Rohstoffbereitstellung (A1), dem Transport (A2) sowie der Herstellung (A3) unterschieden (siehe Tabelle 5). Unter dem Transport (A2) fallen der Weg vom Wald zum Sägewerk, dann zur Produktion und gegebenenfalls zum Regionallager an (siehe Abbildung 13). Typischerweise macht der Weg von einer ausländischen Produktion in ein Schweizer Regionallager $\frac{3}{4}$ der Weglänge aus. Erfolgt die Produktion in der Schweiz, entfällt der Transport zum Regionallager und die Transportwege deutlich kürzer. Dieses Potential wird durch Einsatz von Schweizer Holzprodukten umgesetzt. Der Vergleich mit oder ohne Regionallager bzw mit Schweizer Holzprodukten zeigt, eine Reduktion um 14% beim Massivholz und 11% beim Brettschichtholz (siehe Abbildung 14).

Es folgt, dass mit dem erhöhten Einsatz von Schweizer Holzprodukten die Treibhausgasemissionen über die Lebensdauer von Haus C um 0.12 kg/m²a reduziert werden können.



Tabelle 5 Phasen gemäss SSN EN 15804 resp. SIA 2032

Phasen gemäss SN EN 15804	Herstellungsphase		Errichtungsphase		Nutzungsphase								Entsorgungsphase			
	Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung, Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Betrieblicher Energieeinsatz	Betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Bereich Erstellung gemäss SIA 2032	x	x	x	(x)	(x)				x				x	x	x	x



Abbildung 13 Schematische Darstellung der Transportwege

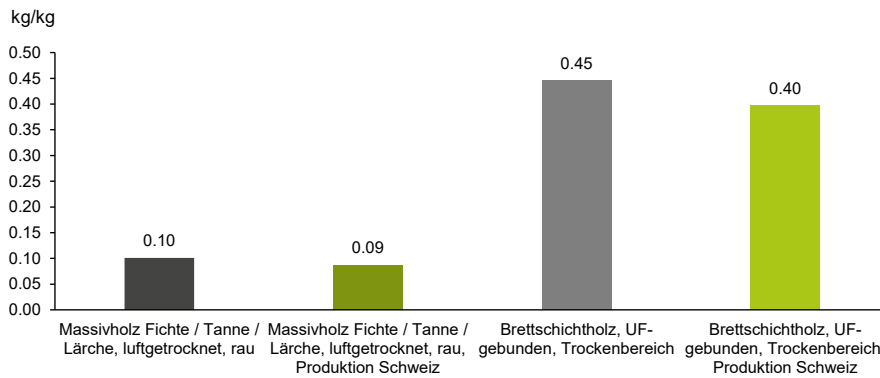


Abbildung 14 Treibhausgasemissionen, bezogen auf ein kg der jeweiligen Holzprodukts; Gegenüberstellung Holzprodukt mit Standard-Herkunft (Balken in grau) und Schweizer Produktion (Balken in grün) gemäss Datenbasis KBOB 2016

2.7.5 Im Holz gespeicherter biogener Kohlenstoff

Im Gebäude C werden rund 550 Tonnen Holz verbaut. Diese binden ca. 240 Tonnen Kohlestoff. Bezogen auf die Energiebezugsfläche und die Lebensdauer des Gebäudes bindet Haus C Treibhausgasemissionen im Umfang von 4.1 kg/m²a (siehe Abbildung 10). Es folgt, dass 80% der für die Baumaterialien (exklusive Gebäudetechnik) verursachten Treibhausgasemissionen im Holz gebunden werden. Bei der Variante V4, bei der auch das EG und 1.OG aus Holz bestehen, sind es 5.1 kg/m²a.



2.8 Kostenbilanz des Holzbaus

Die gemäss Bauabrechnung resultierenden Erstellungskosten der untersuchten Holzbauvarianten von Haus C werden in der folgenden Tabelle 6 den vermiedenen Treibhausgasemissionen gegenübergestellt. Die Erstellungskosten des Massivbaus beruhen auf einer Kostenschätzung mit Stand Vorprojekt, die noch bevor dem Entscheid zur Ausführung eines Holzbaus berechnet wurde.

Tabelle 6 Erstellungskosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten

Variante	Beschreibung	Erstellungskosten	Mehrkosten	Treibhausgas-	Treibhausgas-
		(BKP2)	pro Variante	Einsparung	Vermeidungs-
		CHF/m ²	CHF/m ²	(CO ₂ eq)	kosten
				kg/m ²	CHF/kg
V1	Massivbau	3'334	-	-	-
V2	Holzbau, UG - 1.OG Beton	3'685	351	66	5.30
V3	Holzbau, UG - 1.OG Beton, optimiert*	3'709	24	30	0.80
V4	Holzbau, nur UG Beton, optimiert*	3'836	117	30	3.90

Die Treibhausgas-Vermeidungskosten der untersuchten Holzbau-Varianten liegen im Bereich von 1.1 bis 5.3 CHF/kg CO₂eq. Zum Vergleich: die CO₂-Abgabe auf Brennstoffe liegt in der Schweiz aktuell bei 0.12 CHF/kg oder die Firma Climeworks bietet mit ihrem «direct air capture and storage (DAC+S)» Verfahren Zertifikate an für die Abscheidung und dauerhafte Lagerung von CO₂ aus der Luft für 1.25 CHF/kg.

Tabelle 7 Erstellungskosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten inkl. im Holz gespeichertes biogenes CO₂

Variante	Beschreibung	Erstellungskosten	Mehrkosten	Treibhausgas-	Treibhausgas-
		(BKP2)	pro Variante	Einsparung	Vermeidungs-
		CHF/m ²	CHF/m ²	inkl. gespei-	kosten inkl. ge-
				chertes CO ₂	speichertes CO ₂
				kg/m ²	CHF/kg
V1	Massivbau	3'334	-	-	-
V2	Holzbau, UG - 1.OG Beton	3'685	351	306	1.15
V3	Holzbau, UG - 1.OG Beton, optimiert*	3'709	24	30	0.80
V4	Holzbau, nur UG Beton, optimiert*	3'836	117	87	1.34

Wenn neben den in der Erstellung eingesparten Treibhausgasemissionen auch das im Holz gespeicherte CO₂ angerechnet wird, sinken die Treibhausgas-Vermeidungskosten auf 1.13 bis 1.34 CHF/kg (siehe Tabelle 7).

Die Kosten- und Treibhausgasbilanz der im Rahmen von Variante V3 umgesetzten Holzbau-Optimierungsmassnahmen sind in Tabelle 8 dargestellt. Der Anhydritboden mit Noppenplatte führt zu Mehrkosten von 19 CHF pro m² Unterlagsboden. Bezogen auf die Energiebezugsfläche von Haus C entspricht dies 10 CHF/m². Der Verzicht auf eine Gipsbeplankung der Innenwände ist kostenneutral, da die Einsparungen bei den Gipsarbeiten durch Mehraufwände zum Schleifen und Streichen der ro-



hen ESB-Innenwände kompensiert werden. Die Mehrkosten für die Holzprodukte aus Schweizer Lieferketten werden auf insgesamt 40'000 CHF bzw. 14 CHF/m² geschätzt. Die Einsparungen an Treibhausgasemissionen liegen, bezogen auf die Energiebezugsfläche, je nach Massnahmen im Bereich von 5.4 bis 17.4 kg/m². Daraus resultieren Treibhausgas-Vermeidungskosten von 1.9 CHF/kg für den Anhydritboden mit Noppenplatte bzw. bei 2.0 CHF/kg für die CH-Holzlieferkette. Der Verzicht auf die Gipsbeplankung spart Treibhausgasemission ohne Mehrkosten. In der Summe der drei Optimierungsmassnahmen ergeben sich Treibhausgas-Vermeidungskosten von 0.80 CHF/kg.

Tabelle 8 Mehrkosten pro Energiebezugsfläche und Treibhausgas-Vermeidungskosten der in Variante V3 enthaltenen Optimierungsmassnahmen

Variante	CO ₂ -Optimierungsmassnahmen	Mehrkosten	Treibhausgas-	Treibhausgas-
		pro Variante	Einsparung (CO ₂ eq)	Vermeidungskosten
		CHF/m ²	kg/m ²	CHF/kg
V3.1	Anhydritboden mit Noppenplatte	10	5.4	1.9
V3.2	Innenwände ohne Gipsbeplankung	0	17.4	-
V3.3	CH-Holzlieferkette	14	7.2	2.0
	Total	24	30.0	0.80

2.9 Bewertung der Ergebnisse

Das oben beschriebene Vorgehen verdeutlicht, dass im nachhaltigen Bauen die Baubeteiligten intensiver als üblich miteinbezogen werden müssen und auch die Architekten und Architektinnen lernen müssen, kreativ und flexibel mit aktuell verfügbaren materiellen und immateriellen Ressourcen wie dem Know-how im Team umzugehen.

Eine zentrale Erkenntnis war, dass die Anpassung des Ausschreibungs- und Auswahlverfahrens um die zu erwartenden Einsparungen an Treibhausgasen nicht nur möglich ist, sondern auch den Planungs- und Bauprozess nicht verzögert. Bei der Beurteilung hat sich des Weiteren gezeigt, dass es nicht nur um den Preisvergleich oder den Treibhausgasvergleich geht, sondern eine umfassendere Beurteilung, basierend auf den lokalen (Projekt-)Gegebenheiten notwendig und zielführend ist.

Durch die zusätzliche Berücksichtigung der etablierten Unternehmer-Lösung von Baltensperger und einer gemeinsamen Weiterentwicklung konnte ein Holzbau mit reduziertem CO₂-Fussabdruck realisiert werden. Die Mehrkosten der optimierten Holzbauvariante V3 liegen gegenüber einem Massivbau, bezogen auf die Energiebezugsfläche; bei rund 370 CHF/m². Die Treibhausgas-Vermeidungskosten liegen bei 3.9 CHF/kg.

Des Weiteren hat der Holz-Modulbau auch die Entwicklung der neuen Wohnformen «Micro-Co-Living» wesentlich unterstützt, welche den persönlichen Flächenverbrauch reduziert (22 m² Hauptnutzfläche pro Person bei Doppel-Micro-Wohnung).

2.10 Weiteres Vorgehen

Die Forschungsarbeiten sind im Arbeitspaket AP1 weitgehend abgeschlossen. Das Potential zur Beurteilung der Treibhausgasbilanz unterschiedlicher Unternehmerlösungen bei zukünftigen Holzbauausschreibungen mit GreenBIM wird bis Ende 2024 untersucht. Die Experteninterviews wurden bereits durchgeführt und die Evaluation der Nutzenden-Perspektive (Bewohnende und Betrieb) soll im Frühling 2025 durchgeführt werden.



Die Erstellungskosten des Holzbaus insgesamt und der Optimierungsvarianten werden nach Vorliegen der definitiven Bauabrechnung nochmals überprüft und abschliessend dokumentiert. Die Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten inkl. allfälliger holzbauspezifischer Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten erfolgt im Rahmen des Arbeitspakets AP5.



3 AP2: Re-Use ohne Sonderstatus

3.1 Ausgangslage

In der Schweiz werden jährlich etwa 90% der verwendeten Baumaterialien (13.8 Mio. Tonnen) für Neubauten eingesetzt [15]. Gleichzeitig werden 2.1 Mio. Tonnen an Baumaterialien mit eher kurzer Lebensdauer wie Fassaden oder Fenster freigesetzt [16]. Diese werden heute oft vor dem Ende ihrer Lebensdauer entsorgt, da es sich beispielsweise um Nutzungsänderungen oder den Rückbau temporärer Bauten handelt. Sie können jedoch aufgrund der Prozesse im Neubau nicht in den Bauprozess integriert werden. Es fehlt an Erfahrung mit der Wiederverwendung von Bauteilen. Das schweizweite Potential für solche Prozesse ist noch nicht bekannt und hängt stark von der Erfahrung und der Skalierung der Prozesse ab. Gleichzeitig ist klar, dass das Potential aktuell noch längst nicht ausgeschöpft ist und viele Bauteile vor Ende ihrer Lebensdauer entsorgt werden. Weil mit stark sinkenden Grenzkosten für die Wiederverwendung zu rechnen ist, lassen sich künftig vermutlich auch weitere Bauteilgruppen für die Wiederverwendung erschliessen. Damit lassen sich erhebliche Mengen an Treibhausgasen und grauer Energie einsparen. Die genauen Werte sollen im Rahmen dieses Arbeitspakets ermittelt werden. [17]. Das hier vorgeschlagene Vorgehen ist risikobehaftet, da zu Projektbeginn unklar war, ob a) überhaupt passende Bauteile gefunden werden und b) die Bauteile ästhetischen und regulatorischen Ansprüchen genügen. Selbst wenn kein passendes Bauteil gefunden wird, fällt Aufwand für die Suche, Katalogisierung und Evaluation der Bauteile an.

Anhand von diesem Projekt wird ein Prozess entwickelt und publiziert, welcher die Verantwortlichkeiten, Haftbarkeiten und Entscheidungswege skizziert. Die Ergebnisse fliessen zudem in eine digitale Plattform des Baubüros in situ zur grossmasstäblichen Wiederverwendung von Bauteilen ein. Damit werden die technischen und prozessualen Grundlagen für eine weitergehende Skalierung geschaffen. Mit der Demonstration am Objekt wird zudem der Erfolg manifest und interessierte Bauherrschaften können sich vor Ort von der Praktikabilität überzeugen lassen.

In diesem Projekt wird im Gebäude D exemplarisch gezeigt, wie wiederverwendete Bauteile in einen regulären Bauprozess eingebunden werden können. Dafür wird eine Liste der zehn dafür am besten geeigneten Bauteile erstellt. Diese werden prioritär bis zu einem definierten Datum gesucht. Anschliessend werden noch fehlende Bauteile durch neue Bauteile ersetzt. Dies erfordert eine neue Rollendefinition zwischen Architekten und Architektinnen, Bauteilsuchenden und Bauherrschaften. Zudem stellen sich Fragen bei der Anrechnung der grauen Energie und der Treibhausgasemissionen nach SIA 2032.

3.2 Stand der Forschung

3.2.1 Überblick zum Stand der Forschung

In den letzten Jahren wurden rund um das Thema Wiederverwendung im Baubereich vielseitig ausgerichtete Forschungsprojekte durchgeführt und publiziert. Neben der akademischen Forschung an Schweizer Universitäten und Fachhochschulen förderten auch der Bund und die öffentliche Hand (hauptsächlich vertreten durch Städte wie Zürich oder Basel) sowie Verbände (z.B. SZS) die Forschung rund um Re-Use. Nachfolgend sind einige der wichtigsten abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekte aufgeführt. Die Auswahl fokussiert grösstenteils auf Projekte innerhalb der Schweiz und ist keinesfalls abschliessend.

3.2.2 Ausgewählte Forschungsprojekte



Das Ausmass der Bauabfallproblematik und die Handlungsnotwendigkeit belegt die Studie Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau, welche 2015 durch die Wüest & Partner AG im Auftrag des Bundesamts für Umwelt erstellt wurde [20]. Sie errechnet ein Total an 7.5 Mio. Tonnen Bauabfällen aus dem Hochbau (inkl. Strassenaufbruch und Ausbauasphalt), wovon 4.2 Mio. Tonnen Material auf Abbrüche zurückzuführen sind, Tendenz steigend.

Der Bericht Klimapositives Bauen - Ein Beitrag zum Pariser Absenckpfad [21] nennt die Wiederverwendung sowie das Design-for-Disassembly unter den Hauptmassnahmen, um die politisch geforderte Absenkung der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Vergleichbare Strategiepaper wurden im In- und Ausland von diversen Städten, Landesregierungen und Verbänden veröffentlicht. Beispiele dafür sind die Ressourcenstrategie der Stadt Zürich [22], welche von der Stadt als Materiallager spricht, das Konzept Zirkuläres Bauen von der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen [23] oder die National Strategy for Sustainable Construction vom Ministry of the Interior and Housing des Staates Dänemark [24].

Eine an der EPFL entstandene Studie zum Thema Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion [25] bietet anhand verschiedener Fallstudien und Praxisbeispielen einen breiten Überblick zu aktuellen Möglichkeiten und Potenzialen auf Seiten Gebäudebestand aber auch der Projektplanung von Neubauten in Bezug auf deren zukünftige Rückbaubarkeit, Stichwort Design-for-Disassembly.

Aufgrund der vielfältigen organisatorischen, technischen, normativen und gestalterischen Fragestellungen bietet sich an, anhand gebauter Pionierprojekte einen Erfahrungsschatz aufzubauen und daraus allgemeine Vorgehensweisen und Grundsätze induktiv herzuleiten. Das durch das baubüro in situ geplante und realisierte Projekt Kopfbau 118 in Winterthur wurde durch die ZHAW wissenschaftlich begleitet und lieferte dadurch Grundlagen für eine Vielzahl weiterer Projekte und Forschungsansätze. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung entstand die Publikationen Bauteile wiederverwenden - Ein Kompendium zum zirkulären Bauen [26] welches mit einem breiten, interdisziplinären Blick die Thematik von architekturhistorischer, aber auch der baulich-konstruktiven Seite aufarbeitet und zudem die eingesparten Treibhausgase sowie die Kosteneffizienz bilanziert. Im zeitgleich erschienenen Buch Die Wiederverwendung von Bauteilen von Andreas Abegg und Oliver Streiff [27] werden zudem die öffentlich-rechtlichen sowie die privatrechtlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf das Bauen mit Re-Use Bauteilen beleuchtet. In einer daran anknüpfenden Kooperation von Oliver Streiff und dem baubüro in situ wird aktuell ein von Innosuisse gefördertes Projekt mit dem Titel Wiederverwendung von Bauteilen: Rechtlicher Rahmen bearbeitet [28].

2022 entstand die Studie Regelwerke des Normungs- und technischen Zulassungswesens anhand des Themenkomplexes Recyclingverfahren und Weiter-/Wiederverwendung von Bauprodukten und Baustoffen von Franssen und Nusser [29].

Ebenfalls im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Projekts K118 entstand die Studie Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteile von Kathrin Pfäffli, welche über das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich publiziert wurde [30]. Sie vergleicht verschiedene Ansätze für Bilanzierungsmöglichkeiten und setzt daraus einen methodischen Standard.

Darauf aufbauend ist derzeit das vom BFE geförderte Projekt Reuse-LCA [31] in Bearbeitung. Ziel des Projektes ist u.a., den Kosten / Nutzen von Re-Use besser zu verstehen sowie dessen Nutzen in Kombination mit anderen kohlenstoffreduzierten Strategien im Rahmen der Netto-Null Frage einzuordnen. Federführend in dem Projekt ist die Hochschule HEIG-VD.

In diesem Kontext ist das Paper Embodied Carbon in EU Construction interessant [32]. Unter anderem kommen die Autoren zum Schluss, dass durch Re-Use eine Kostenersparnis möglich ist.



Innerhalb des Empa NEST (Next Evolution in Sustainable Building Technologies) konnte 2021 durch das baubüro in situ die Unit Sprint [33] realisiert werden, welche aus reinen Re-Use und Sekundärmaterialien besteht. In kürzester Zeit wurden Büroräumlichkeiten im Holzelementbau ausgeführt. Innerhalb des Versuchs-Gebäudes werden unter realen Bedingungen die Sekundärbaustoffe getestet und die Funktionalität von ertüchtigten Bauteilen gemessen (z.B. U-Wert Messungen an mit minimal-invasiven Eingriffen energetisch ertüchtigte Fenster). In dem Rahmen entstand eine Forschungsarbeit zur Ökobilanzierung von Gebäuden / Bauteilen, die mehrere Lebenszyklen durchlaufen:

Kakkos, Efstathios: Paving the way towards circularity in the building sector. Empa's Sprint Unit as a beacon of swift and circular construction [34].

3.2.3 Marktnahe Pilot- und Demonstrationsprojekte und Studien

In diesem Kontext kann das BFE Projekt Hobelwerk skalierbare Lösungen für Netto-Null als Weiterführung einer Reihe von Pilotprojekten zwecks Erfahrungsaufbau seitens der Bauherrschaft wie auch der Planenden sowie zur Datenerhebung verstanden werden. Die Vorgehensweise der wissenschaftlichen Praxisbegleitung scheint sich bei Re-Use Projekten zu bewähren und für das Planungs- und Bauwesen anwendbare Ergebnisse zu liefern. Dies zeigt sich in immer vielfältiger entstehenden Pionierprojekten wie dem DomoHabitare in Ste-Croix [35] oder diversen Wettbewerben mit Re-Use als integrale Anforderung oder dem grossen Echo des Basel Pavillon 2022 [36].

In den Städten Zürich und Basel fanden Bauteilkataloge Eingang in Wettbewerbsprogramme, so beim Recyclingzentrum Juch-Areal [37], ausgelöst durch das Amt für Hochbauten Stadt Zürich oder den Wettbewerben Areal Walkeweg [38] und Pilotprojekt Schliengerweg [39] ausgelöst durch Immobilien Basel-Stadt.

Nebst der Forschung an Pionierprojekten wurden auch bauteilspezifische Projekte und Studien durchgeführt. Die darunter bisher umfangreichste stammt aus dem Interreg FCRBE Projekt [40], welches von Belgischen Planungsbüro Rotor geleitet wurde. Kern der Arbeit bildet ein Re-Use Toolkit mit Leitfäden zu verschiedenen Bauteilkategorien sowie einige allgemeine Arbeitshilfen für die Wiederverwendungspraxis.

Spezifisch mit der Wiederverwendung des Werkstoffs Stahl befasst sich die Publikation Re-Use: Wie-der-ver-wen-dung von Stahl-bau-tei-len des Stahlbau Zentrums Schweiz SZS [41].

Das aktuell laufende Projekt FenSanReUse [42] der FHNW in Zusammenarbeit mit Zirkular sowie diversen privatwirtschaftlichen Partnern untersucht energetische Sanierungsmassnahmen an Re-Use Fenstern und erstellt daraus Wegleitungen für Fenstersanierungen an Bauteilen verschiedenen Alters.

Konstruktiver Beton stellt die Wiederverwendung vor besondere Herausforderungen, welche sich jedoch aufgrund hoher THG-Einsparungspotenziale als lohnend erweisen sollten. Die Studie Wiederverwendung Fertigbetonelemente - Rückbau Personelhäuser Triemli [43] beschäftigte sich im Auftrag der Stadt Zürich mit der Thematik.

Ein weiteres Forschungsprojekt zu Beton Wiederverwendung wurde kürzlich auf europäischer Ebene unter dem Namen ReCreate - Deconstruction and reuse instead of demolition and waste [44] publiziert.

Umfangreiche Betrachtungen zum Thema Holzbau finden sich in der im Auftrag des BAFU durch die Primin Jung AG verfassten Studie Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten [45].

3.3 Fragestellung und Zielsetzung



Beim Haus D handelt es sich um ein vierstöckiges Wohn- und Gewerbehaus in einer Holz-Hybrid-Bauweise. Ziel ist zu demonstrieren, dass wiederverwendete Bauteile, wie z.B. Fenster auch in den regulären Bauprozess integriert werden können. Das quantitative Ziel ist einen möglichst grossen Anteil an wiederverwendeten Bauteilen einzusetzen, ohne Kompromissen beim Komfort und den Kosten zu machen. So sollen die Bauteile nicht zu Nachteilen für die Bewohnenden führen und in Zukunft auch zu keinen Mehrkosten beschaffbar sein oder unterhalten werden. So kann der Wiederverwendung von Bauteilen auf einer grossen Skala zum Durchbruch verholfen werden. Gleichzeitig wird ausgewiesen, dass durch diesen Ansatz viel Treibhausgase und graue Energie eingespart werden können. Folgende Hypothesen sollen in diesem Projekt getestet werden:

- Re-Use-Bauteile können mit geeigneten Hilfsmitteln ohne Mehrkosten und Terminverzögerungen in der Erstellung verwendet werden.
- Für die Bewohnenden resultiert bezüglich des Wohnkomforts kein Unterschied zwischen einem Gebäude aus neuen und aus wiederverwendeten Bauteilen.
- Innerhalb der Projektlaufdauer (erste 3 Betriebsjahre) wird kein erhöhter Betriebsaufwand verzeichnet.

Bauteilliste:

Die folgenden zehn Bauteile wurden in die Liste aufgenommen. Die tatsächlich verwendeten Mengen richten sich dabei an dem Angebot, also den gefundenen Mengen. Aufgrund des iterativen Charakters von Bauteilsuche und Planung wurde die Materialauswahl im Laufe der Bauteilsuche angepasst.

- A1. Fassadenverkleidung - Holzschalung mit Nut und Kamm bis zu 940 m² oder Fassadenbleche, bis zu 200 m²
- A2. Fenster - Holz/Metall, Metall oder Kunststoff, bis zu 430 m²
- A3. Aussentüren / Brandschutztüren - Türen mit wärmegeämmten Profilen und Isolierverglasungen, bis zu 20 Stück
- A4. Balkonbrüstungen - Staketengeländer oder Geländersystem mit gebrauchtem Maschendraht oder Gitterrostfüllungen, bis zu 140 m
- A5. Bodenbeläge Aussenbereich - Balkonbeläge mit gebrauchtem Holz, Umgebungsarbeiten mit wiederverwendeten Zementplatten / Natursteinplatten, bis zu 300 m²
- I1. Boden- und Wandbeläge - Linoleum oder Parkett aus Restposten, bis zu 1920 m² + bis zu 900 m² Plattenbeläge in Nasszellen
- I2. Innentüren - Blendrahmen- oder Zargentüren aus Holz / evtl. Stahlzargen, teilw. mit Brandschutzanforderungen EI30, bis zu 74 Stück
- I3. Bäder - Sanitärapparate (ausgenommen WC's), bis zu 36 Stück
- I4. Küchen - Küchen ohne Geräte, aus Rückbauten oder Küchenausstellungen, max 14 Stück
- I5. Wandverkleidungen - Verschnitte und Restposten von Holzbauer, Holzwerkstoffplatten aus Rückbauten, bis zu 2247 m²
- XX. Fundstücke ohne Suchauftrag

Hinweis: das Re-Use-Bauteilmonitoring für alle Gebäude auf dem Areal ist im Anhang 2.1 zu finden.



3.4 Vorgehen und Methode

Folgende Arbeitsschritte sind vorgesehen oder wurden bereits geleistet (**fett**):

1. **Definition der Top Ten**, der zehn am besten für Re-Use geeigneten Bauteile für dieses spezifische Projekt. Die Auswahl beruht auf den bisherigen Erfahrungen des Baubüros in situ in Abstimmung mit Architektin und Bauherrschaft.
 - a. Spezifische Projektunterlagen und -abläufe werden entwickelt und mit den betrieblichen Anforderungen abgestimmt.
 - b. Entwurf von einem Gebäude mit neuen Bauteilen, welches die oben definierten Re-Use-Bauteile aufnehmen kann, aber nicht muss. Neubauteile bilden die Rückfallebene und werden im Planungsprozess parallel bearbeitet. Damit ermöglichen wir, dass wiederverwendete Bauteile in einen regulären Bauprozess eingebunden werden können, ohne für die Bauherrschaft übermässige Risiken zu generieren.
2. **Suche nach Bauteilen**. Bei Eignung **Ausbau, Lagerung und Transport**.
3. **Kostenermittlung je Re-Use Bauteil** sowie der Kosten vergleichbarer Neubauteile
4. **Berechnen von Energienachweis und Treibhausgasemissionen** der gefundenen Re-Use-Bauteile.
5. **Realisierung des Gebäudes**.
6. **Expert*innen-Interviews** mit den Beteiligten zu ihren Erfahrungen.
7. Umfrage zur Wahrnehmung der Bewohnenden.
8. Zusammenfassen der Erfahrungen mit den Prozessen und Rollen und in einem Fact-Sheet.

3.5 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen werden in folgender Chronologie beschrieben:

Definition der Anforderungen und Abläufe

- Auswahl Top10 Bauteile und Suchaufträge
- Entscheidungsabläufe

Bauteilsuche

- Rückbauobjekte
- Weitere Materialquellen
- Ergebnisse je Bauteilkategorie
- Erwerbsanträge und Bauteilemonitoring

Ausbau / Transport / Lagerung

- Exemplarisch Zürcher Kantonalbank, Dübendorf
- Transporte
- Lagermöglichkeiten

Planung Wiedereinbau

- Schnittstellen



- Ausschreibung Wiedereinbau

3.5.1 Auswahl Top10 Bauteile und Suchaufträge

In einer ersten Projektphase wurde das durch Pascal Flammer Architekten (nachfolgend PFA) bereits erarbeitete Vorprojekt nach möglichen Einsatzpotenzialen für wiederverwendete Bauteile untersucht.

Zur klaren Definition der Bauteilsuche wurde eine zehnte Bauteile umfassende Auswahl getroffen. Dabei lag das Augenmerk auf den Kriterien Verfügbarkeit, CO₂-Sparpotenzial, konstruktive Umsetzbarkeit und Sichtbarkeit. Die erarbeitete Auswahl wurde im Projektverlauf anhand der besichtigten Rückbauten und der fortschreitenden und ändernden Planung angepasst.

Für jede Bauteilkategorie wurden die Vergleichskosten zu Erstellung eines gleichwertigen Neubauteils eruiert. Daraus abgeleitet, bildeten die darin enthaltenen Materialkosten den Budgetrahmen für die Bauteilbeschaffung.

Für Bauteile mit Auswirkungen auf die umgebenden Konstruktionsaufbauten wurden durch PFA Leitdetails entwickelt, welche die Rahmenbedingungen für die Bauteilsuche bezüglich Abmessungen, Material und Ausdruck definieren.

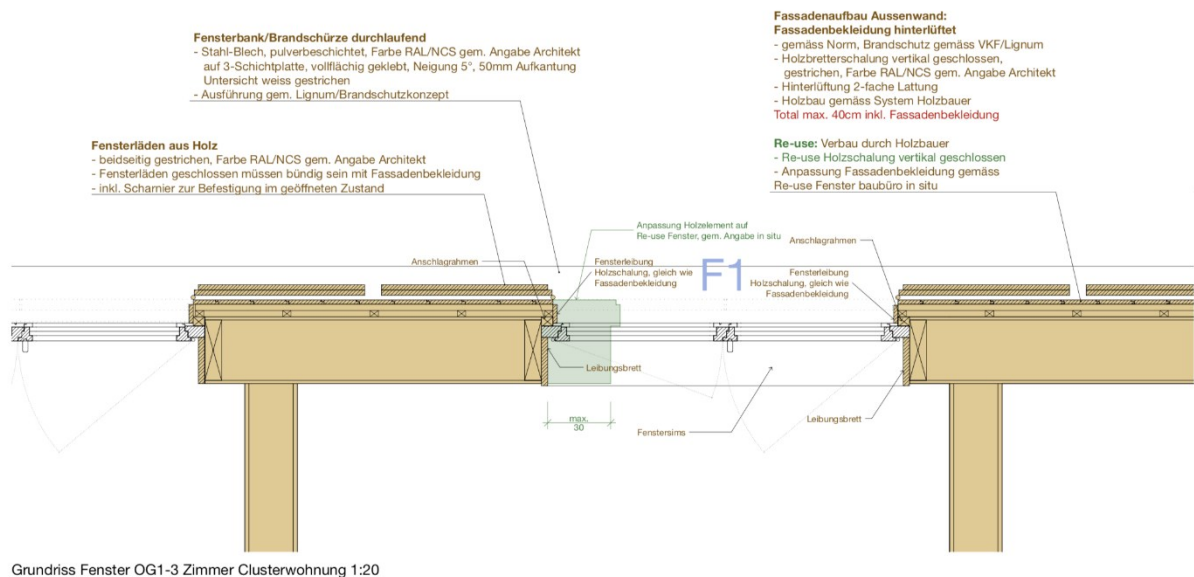


Abbildung 15 Leitdetail Pascal Flammer Architekten zu einem Re-Use Fenster

Die gesammelten Anforderungen von Seiten Bauherrin, Architektur, Bauphysik, Brandschutz und weiteren Parteien resultierten in einem Suchauftrag, welcher den Bauteiljäger*innen über eine eigens dazu erstellte, einfache Datenbankanwendung zur Verfügung gestellt wurde.



Projekt	Bauteilkategorie	Menge	Bauteilname	Abmessungen	weitere Beschreibung
+ gesamt					
- 016_082 - Hobelwerk Haus D - Winterthur	+ Aussentüren gesamt				
	- Fassadenverkleidungen	- 164	- V2 Fassadenverkleidung	-	- Eternit, hinterlüftet, weiss
		- 846	- V1 Fassadenverkleidung	-	- Holz, Holz Vertikal, Nut+Kamm, hinterlüftet, weiss
	- Fenster	- 1	- F12 Verglasung Gemeinschaftsatelier	- Breite: siehe Bem. x Höhe: min -> siehe Bemessung -max: 356	- Holz-Metall Holz-Holz Metall-Metall* Kunststoff Alu eloxiert oder weiss aussen+innen weiss Festverglasung >30 dB Ug-Wert:1.10, Uf-Wert:1.80
		- 3	- F3 Fenster Wohnraum Ost	- Breite:310-330 x Höhe:215-235	- Holz-Metall* Holz-Holz Metall-Metall Kunststoff Alu eloxiert oder weiss aussen+innen weiss Doppeldrehflügel >30 dB Ug-Wert:1.10, Uf-Wert:1.80
			- F3' Fenster Wohnraum Süd	- Breite: 310-330 x Höhe: 235-255	- Holz-Metall* Holz-Holz Metall-Metall Kunststoff Alu eloxiert oder weiss aussen+innen weiss Doppeldrehflügel >30 dB Ug-Wert:1.10, Uf-Wert:1.80

Abbildung 16 Bildschirmfoto Suchauftragsdatenbank, baubüro in situ



3.5.2 Entscheidungsabläufe

Die hier als Materialquellen dienenden Rückbauten folgen jeweils einem eigenständigen und oftmals durch Bewilligungsfristen, Rekurse und allgemeinen Termindruck geprägten Programm. Um das darin enthaltene Materialangebot mit der Terminplanung des Zielprojekts in Einklang zu bringen, sind schnelle Entscheidungswege notwendig. Diese wurden in der ersten Projektphase unter Einbezug aller Planenden erstellt und in einem Diagramm festgehalten. Nach Fertigstellung wurde dieses zusammen mit weiteren Arbeitsgrundlagen im Rahmen eines Workshops besprochen.

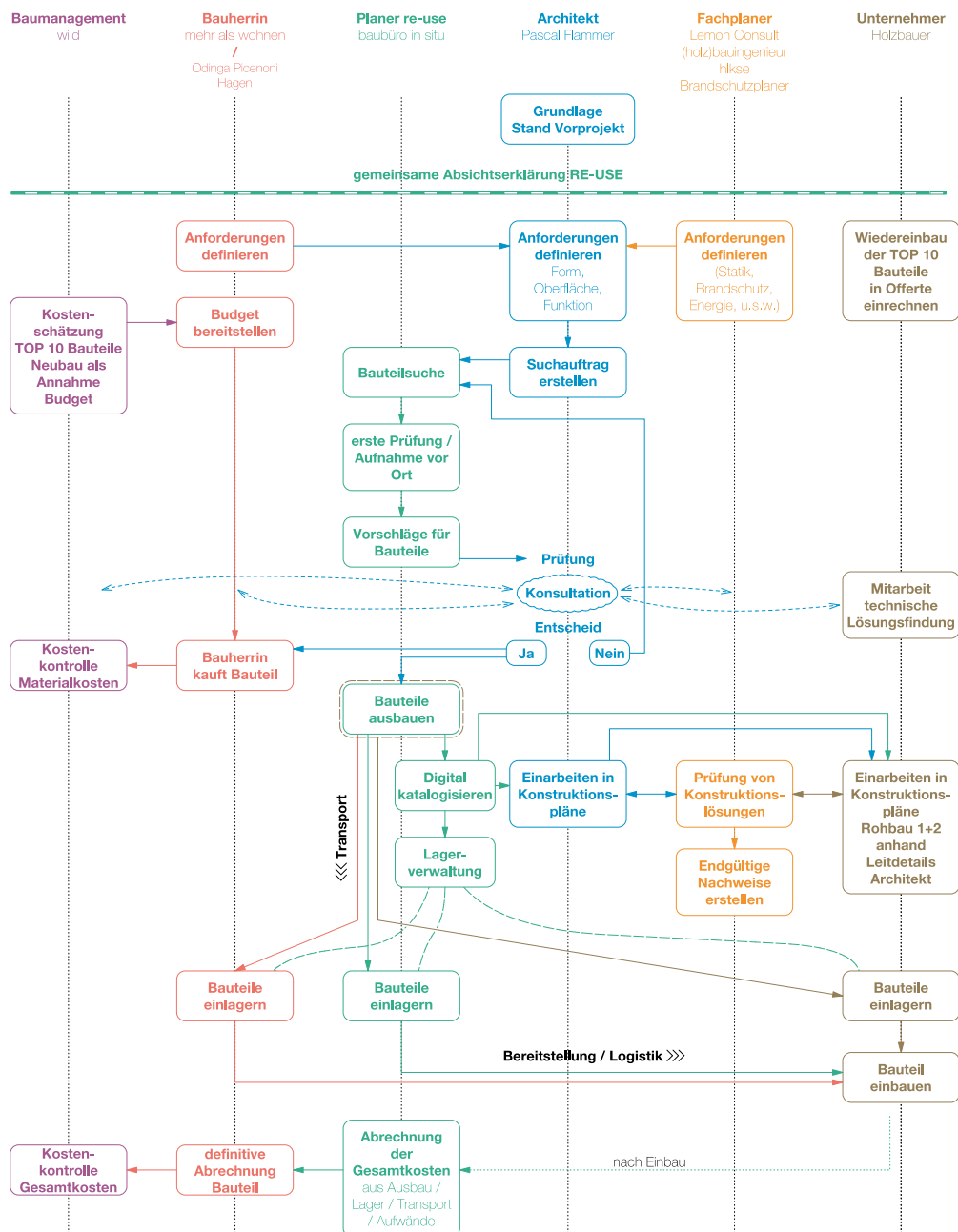


Abbildung 17 Entscheidungsablauf Suchauftrag bis Ausbau, baubüro in situ AG



Im gewählten Modell liegt die Verantwortung für die Definition aller Anforderungen sowie die Konsultation aller Parteien bei vorliegenden Suchergebnissen beim Architekturbüro. Vor Ausbau potenzieller Bauteile ist durch Pascal Flammer Architekten sowie die Bauherrin ein Erwerbsantrag zu unterzeichnen, in welchem die verfügbaren Mengen mit den entsprechenden Kosten abgeschätzt werden. Durch den Freigabeprozess ist gesichert, dass die planerische und gestalterische Übersicht beim Architekten verortet bleibt. Nach erfolgreicher Bauteiljagd pflegt der Architekt die erhaltenen Informationen in das Projekt ein.

Die Bauherrin definiert als Bestellerin die Anforderungen an die zu suchende Bauteile. Nach Freigabe des Erwerbsantrags wird sie entweder durch Kauf oder Schenkung Besitzerin der Bauteile.

Die Rolle der Re-Use-Planenden, wie sie im vorliegenden Falle vom Baubüro in situ eingenommen wurde, gleicht der eines klassischen Fachplanungsbüros. Der Re-Use-Planer*innen unterstützt bei der Definition der Suchaufträge, leitet die Bauteilsuche, beurteilt geeignete Materialien und erstellt gegebenenfalls Erwerbsanträge an Bauherrin und Architekturbüro. Nach deren Freigabe koordiniert er Rückbau, Transport und Einlagerung und erstellt Bauteilpässe zuhanden des Architekten.

Das Baumanagement rechnet Vergleichskosten für die Rückfallebene Neubau. Diese bilden grundsätzlich den Kostenrahmen für die Wiederverwendung.

Weitere Fachplanende sowie die ausführenden Unternehmen unterstützen in der technischen Lösungsfindung, sowie der Prüfung und Bilanzierung von gefundenen Bauteilen.

3.5.3 Bauteilsuche - Rückbauobjekte

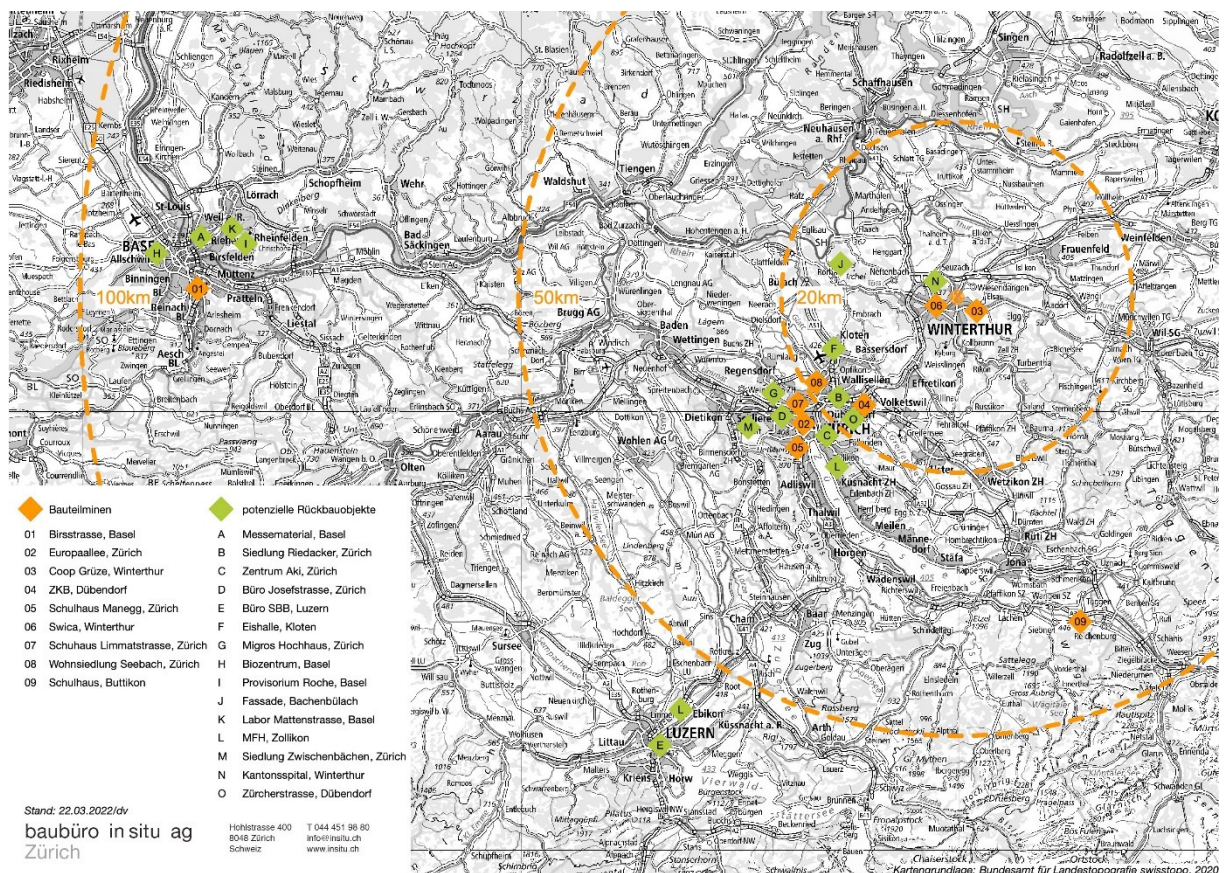


Abbildung 18 Bauteilmijnen und besichtigte Rückbauobjekte, baubüro in situ



Im Zuge der Bauteilsuche führten die Bauteiljäger*innen des Baubüro in situ gegen 30 Rückbaubesichtigungen durch. Bisher wurden aus 9 besichtigten Bauteilminen Material rückgebaut. Trotz gebäudespezifischer Unterschiede wurde grundsätzlich folgendes Vorgehen angestrebt:

- Suche möglicher Bauteilminen über Amtsblatt, GIS und Netzwerk Baubüro in situ
- Kontaktaufnahme mit Eigentümern, Rückbauunternehmen oder Planenden
- Erstbesichtigung mit Fotoauswahl und ersten Massaufnahmen
- Vorbesprechung der Auswahl mit Architekten und Bauherrenvertreterin
- Weitere Abklärungen / Aufnahmen vor Ort
- Rückmeldung des Materialbedarfs an die Eigentümer*innen

Nachfolgend ist ein Rückbaugebäude exemplarisch porträtiert.

Zürcher Kantonalbank, Dübendorf

Das ehemalige Bürogebäude der Zürcher Kantonalbank (ZKB) wurde 1994 fertiggestellt und 2021, gerade mal nach 27 Jahren Nutzungsdauer, rückgebaut. Nachdem die ZKB ihren Geschäftssitz aufgegeben hatte, wurde das Gebäude an die Firma Mettler2Invest verkauft, welche nun auf dem Grundstück eine neue Wohnsiedlung erstellt. Vor dem Rückbau wechselte, wie dies üblich ist, das Gebäude ins Eigentum der Eberhard AG, welche wiederum in Zusammenarbeit mit der Baskarad AG die Abbrucharbeiten ausführte. Mit der Besitzerin wechselte das Eigentum der Bauteile, was jeweils neue Verhandlungen über die Wiederverwendungskonditionen (Kosten /Termine) notwendig macht.



Abbildung 19 ZKB Dübendorf, © Google Maps

Die beiden Häuser wurden als Massivbau erstellt, die Räume praktisch ausschliesslich als Büros genutzt. Sämtliche oberirdischen Geschosse sind mit Doppelböden und heruntergehängten Decken versehen. Die Fassaden sind mit grauem und schwarzem Naturstein verkleidet. Vorhandene Bauteile gibt es meist in hoher Stückzahl und Wiederholung. Aber auch als verhältnismässig junges Gebäude brachte die ZKB Dübendorf einige Überraschungen. Trotz vorgängigen Sondagen zeigten sich beim Rückbau der Natursteinplatten diverse beschädigte Rückseiten, wohl von einer einstigen Änderung an der Aufhängekonstruktion herrührend. Zudem wiesen die stichprobenmässig identischen Türblätter eine grössere Varianz auf, als ursprünglich angenommen.



Abbildung 20 Auszug von Bauteilen aus dem Gebäude der ZKB Dübendorf

3.5.4 Bauteilsuche - Weitere Materialquellen

Nebst den rund 30 besichtigten Rückbauten wurden nachfolgende Materialquellen angefragt und teils für das Projekt hinzugezogen. Bei der Verwendung von Restpostenbeständen von Materialproduktionen handelt es sich streng genommen nicht um Wiederverwendung im Sinne eines zweiten Nutzungszyklus. Gleichwohl wird durch die Substituierung von Neumaterial durch solche Quellen die Bauabfallmenge reduziert, was den Zielen der Kreislaufwirtschaft grundsätzlich entspricht.

- Bauteilbörsen in der Region Zürich und Basel
- Fehlproduktionen von Fensterbauern
- Restpostenbestände von Plattenlegern
- Restpostenbestände der Firma Eternit
- Ausstellungsküchen Küchenbauer

3.5.5 Erwerbsanträge und Bauteilmonitoring

Um in der Personenkonstellation genügend schnelle Entscheide fällen zu können, wurde ein Erwerbsantrag erarbeitet, welcher vor dem Ausbau von Material von je einer Vertretung der Planer- und Bauherrschaftsseite freigegeben werden muss. Darauf aufgeführt sind die geschätzten Beschaffungskosten +/- 15%, die auszubauenden Mengen und allfällige Aufbereitungsarbeiten.

Nach der Demontage wird die effektiv rückgebaute Menge, der Lagerort und die weiterhin gesuchten Mengen in einem Monitoring festgehalten und überprüft.

Aufgrund des iterativen Charakters von Bauteilsuche und Planung wurde die Materialauswahl im Laufe der Bauteilsuche angepasst und erweitert, z.B. um die Bauteile Sonnenschutz (ZA6) und Schiebetüren (ZI6) sowie um weitere «Fundstücke» für weitere Gebäude auf dem Hobelwerk Areal (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)



Tabelle 9 Bilanz der gesuchten und gefundenen Mengen an Re-Use-Bauteilen für Haus D sowie zusätzliche Fundstücke

Top-Ten-Bauteile und Zusatzaufträge		Einheit	gesucht	gefunden	%
A1	Fassadenverkleidung nicht brennbar, Metall	m ²	155	155	100%
	Fassadenverkleidung brennbar, Holz	m ²	940	0	0%
A2	Fenster - Holz/Metall, Metall oder Kunststoff	Stk	96	62	65%
A3	Aussentüren / Brandschutztüre	Stk	22	0	0%
A4	Balkonbrüstungen - Staketengeländer oder Geländersystem	m ²	150	17	11%
A5	Bodenbeläge Aussenbereich - Balkonbeläge mit gebrauchtem Holz	m ²	280	280	100%
I1	Boden- und Wandbeläge - Linoleum oder Parkett aus Restposten	m ²	1'920	446	23%
I2	Innentüren - Blendrahmen- oder Zargentüren aus Holz	Stk	72	64	89%
I3	Bäder - Sanitärapparate (ausgenommen WC's)	Stk	73	41	56%
I4	Küchen - Küchen ohne Geräte, aus Rückbauten oder Ausstellungen	Stk	8	0	0%
I5	Wandverkleidungen - Verschnitte und Restposten	m ²	2'247	0	0%
ZA6	Sonnenschutz	Stk	55	55	100%
ZI6	Schiebetüren	Stk	37	16	43%
Fundstücke					
XXA	Briefkästen	Stk	4	4	
XXB	Gitterrost Schmutzschleuse	Stk	2	2	
XXC	Brüstungselement aus Re-Use Klinker Haus G	m ²	7	7	
XXD	Fenster Nordfassade Haus G	m ²	28	28	
XXE	Holzwerkstoffe, Furnierschichtplatten Haus G	m ²	140	140	
XXF	Aussenbodenbeläge	m ²	80	80	

Eine detaillierte Liste der gesuchten Bauteile inkl. Beschreibung der Entscheidungsprozesse ist im Anhang Kapitel 2.2 wiedergegeben.

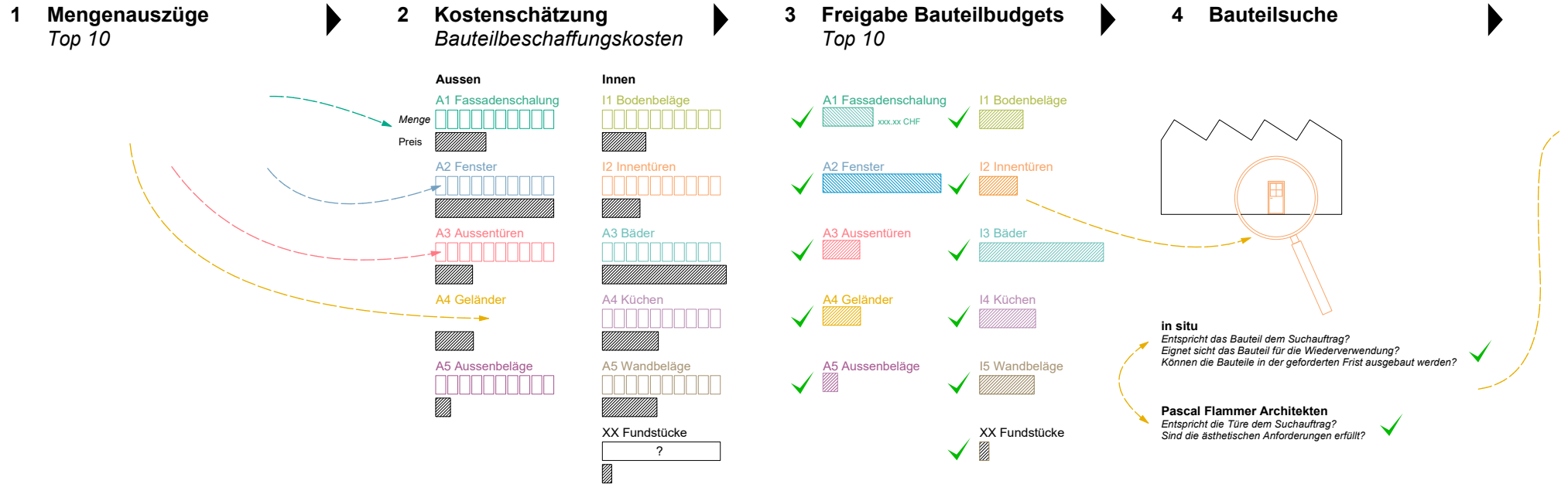


Abbildung 21 Ablauf von Budgetermittlung zu Erwerbsantrag und Monitoring, baubüro in situ

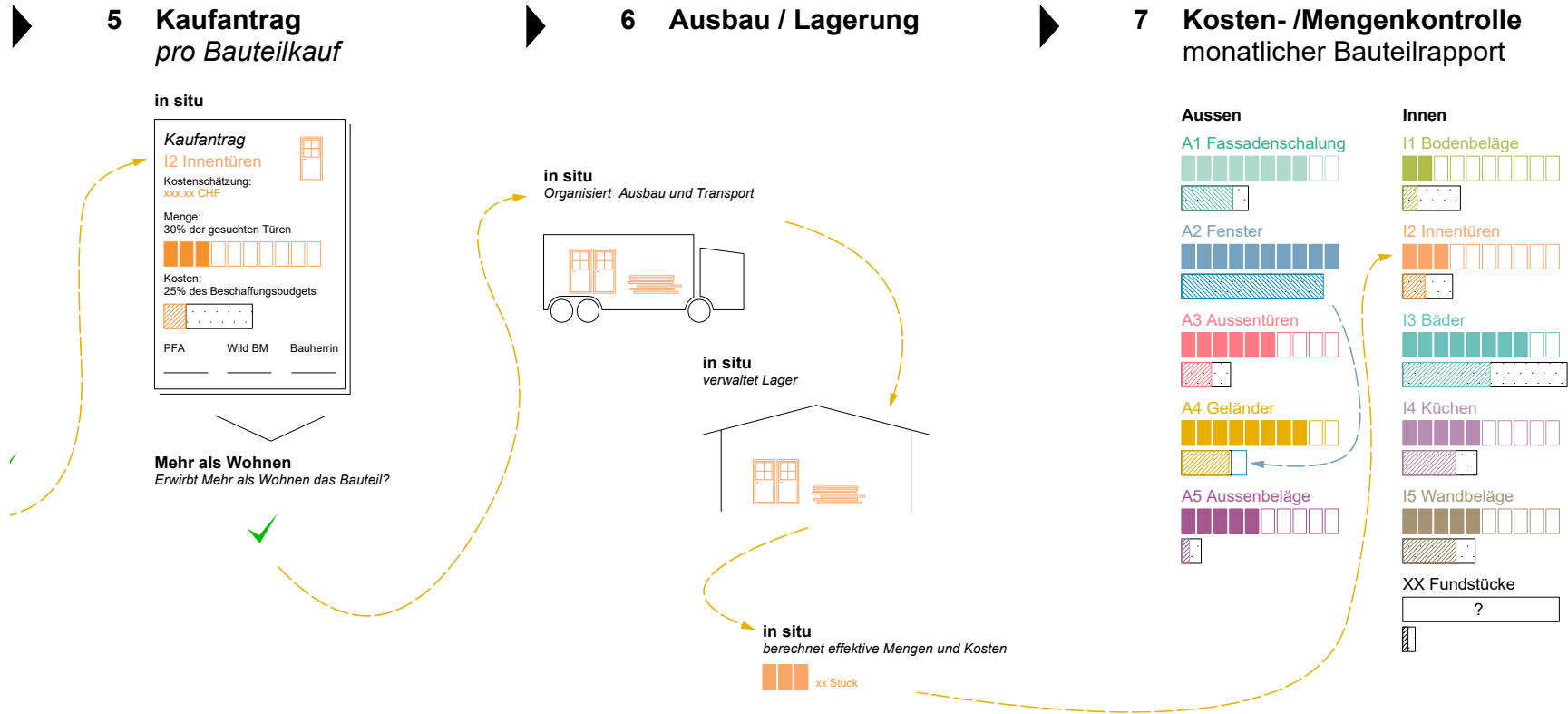


Abbildung 22 (Fortsetzung) Ablauf von Budgetermittlung zu Erwerbsantrag und Monitoring, baubüro in situ



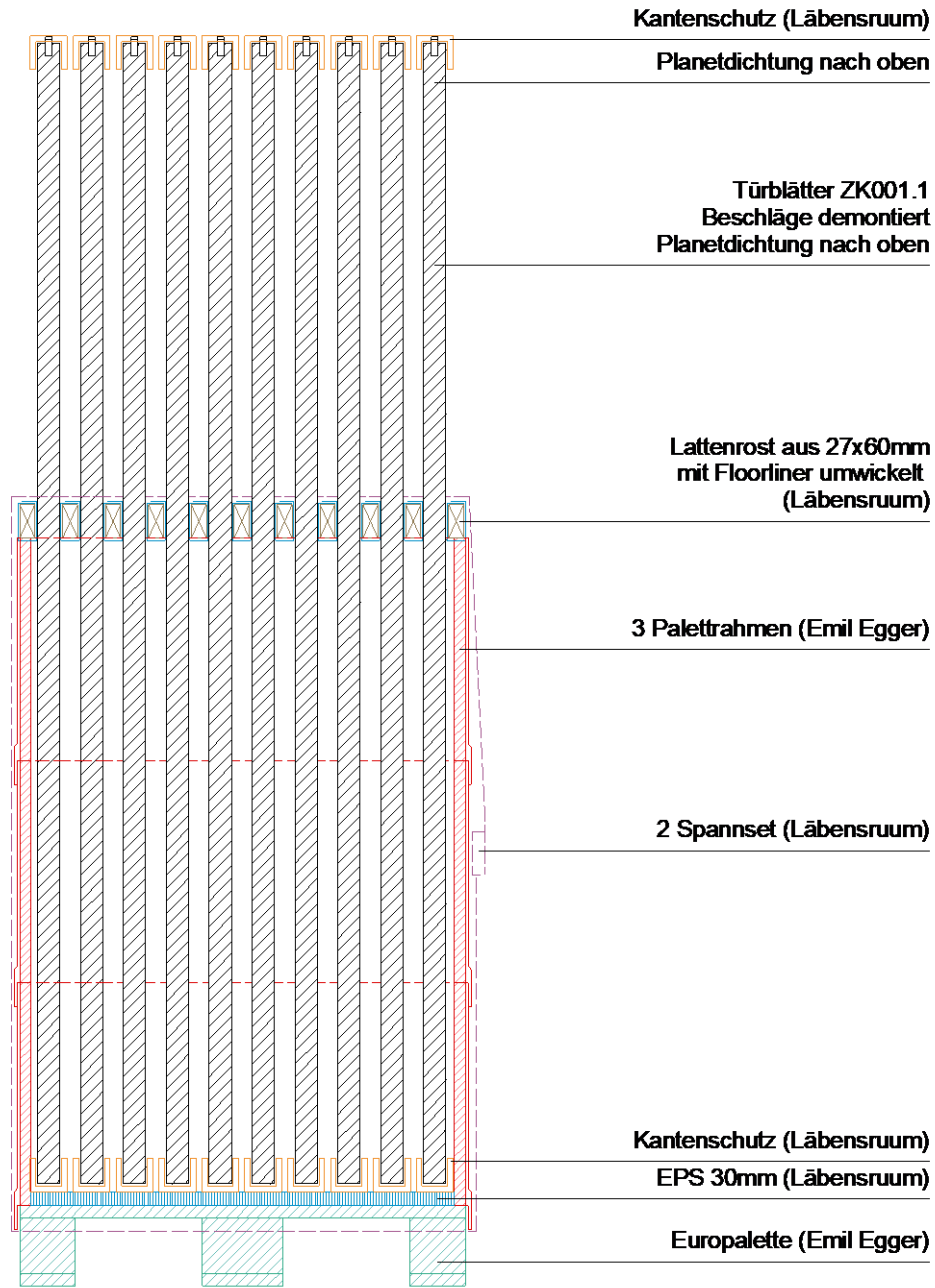
3.5.6 Ausbau / Transport / Lagerung

Verglichen mit einem konventionellen Neubau vergrösserten sich die Planungsleistungen nebst der Bauteilsuche und Beurteilung um die Bereiche Logistik und Transport. Ein effizienter Transport und eine möglichst platz- und damit kostensparende Lagerung, setzt eine geplante Palettierung voraus.

Diese wurde bei komplizierten Bauteilen meist vorgängig gezeichnet. Im Beispiel der Türblätter aus der ZKB Dübendorf wurde entschieden, diese in Palettrahmen stehend zu lagern, um damit Lagerplatz einzusparen und die Bauteile für den Transport optimal zu schützen.

Grösstenteils wurden die Bauteile im Lager von Emil Egger Bassersdorf eingelagert, da sich dieses, verglichen mit einer eigens angemieteten und unterhaltenen Lagerhalle, als deutlich kosteneffizienter erwies. Zudem wurden einige Bauteile direkt auf der Baustelle zwischengelagert. Insbesondere solche, die keine regulierten Klimabedingungen benötigen oder gut gegen die Witterung geschützt werden konnten.

Dabei war zu beachten, dass die Bauteile während des Bauablaufs möglichst nicht bewegt werden müssen, um die Synergie von Baustelle und Lagermöglichkeit effizient nutzen zu können.



ZK001.1

Innentüre ZKB

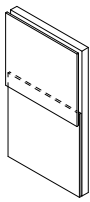
Massstab	1:10
Plangrösse	A4
Gezeichnet	dav
Datum	10.05.2021



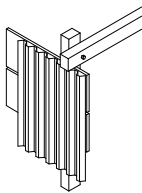
Abbildung 23 Palettierungsplan Türblätter ZKB Dübendorf, baubüro in situ

3.5.7 Planung Wiedereinbau

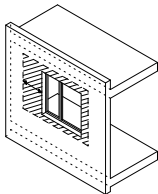
Nach Abgabe der Bauteilpässe, welche nebst den gesammelten Materialinformationen jeweils eine Massaufnahme enthalten, obliegt die Koordination der weiteren Planung dem Architekten. Um diese bereits in einer frühen Phase, in welcher noch keine Suchresultate vorliegen, möglichst ergebnisflexibel zu gestalten, wurden folgende Planungsprinzipien definiert:



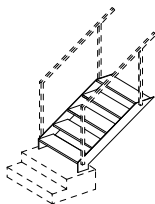
- Zusammenfügen von Baumaterialien additiv und überlappend
- Aufputz Installationen, Systemtrennung
- Schrauben statt kleben, sichtbare Verbindungen



- Lösbare Verbindungen ermöglichen einfache Reparatur und Trennung am Ende der Nutzungsdauer
- Roh- und massive Materialien gebrauchen
- Keine Verbunde machen = entkoppeln
(Gilt im Speziellen für Bauteile mit verschiedenen Nutzungszyklen)



- Spielraum für veränderliche Dimensionen einplanen
- Detaillösungen entstehen anhand von gefundenem Material
- keine strikten Detaillösungen, sondern Systeme mit Flexibilität



- Gebrauchtes anpassen und instand stellen
- kreative Materialverwertung und unorthodoxe Lösungen
- Vorgefundenes zu etwas Neuem arrangieren

Die demontierten Bauteile wurden händisch vermessen und als zweidimensionaler CAD-Plan gezeichnet.



3.6 Treibhausgasbilanz der Re-Use Bauteile

3.6.1 Eingesparte Treibhausgasemissionen

Die Auswirkung der Re-Use Bauteile auf die Treibhausgasbilanz wird in diesem Kapitel beschrieben. In diesem Kontext wurden zehn Bauteile analysiert. Die Einsparung an Treibhausgasemissionen durch Re-Use gegenüber einem neuen Bauteil machen zwischen -49% für den Sonnenschutz aus Aluminium und -96% für die Granitplatten aus (siehe Tabelle 10 und Abbildung 24).

Tabelle 10 Treibhausgasemissionen absolut und spezifisch (massenbezogen) von neuwertigen Bauteilen, Re-Use-Bauteilen sowie die aus der Differenz resultierende Einsparung

Bauteil	Material	Neubauteil		Re-Use		Einsparung			
		kg	kg/kg	kg	kg/kg	kg	%	kg/kg	%
Fassadenverkleidung	Aluminium	3'620	8.4	1'219	2.8	2'401	66%	5.6	-66%
Fenster	Holz / Metall	16'418	5.4	8'290	2.7	8'128	50%	2.7	-50%
Sonnenschutz (shutter)	Aluminium	18'213	14.6	9'307	7.5	8'906	49%	7.1	-49%
Sonnenschutz (blind)	Aluminium	1'140	23.8	571	11.9	569	50%	11.9	-50%
Bodenbelag Balkon	Holz	1'176	0.2	112	0.0	1'064	90%	0.1	-90%
Bodenbelag Balkon	Granit	962	0.2	40	0.0	922	96%	0.2	-96%
Innentüren		12'988	4.3	6'570	2.2	6'417	49%	2.1	-50%
Innenbauteile (exkl Innentüren)	Fliesen	12'953	1.6	6'644	0.8	6'308	49%	0.8	-49%
Aussenbereich - Gitterrost	Metall	5'820	2.6	1'951	2.3	3'869	66%	0.3	-12%
Furniture*	Divers	3'272	3.2	1'584	1.1	1'688	52%	2.1	-66%
		76'563		36'290		40'273	53%		

* Nicht in Systemgrenze SIA 2032

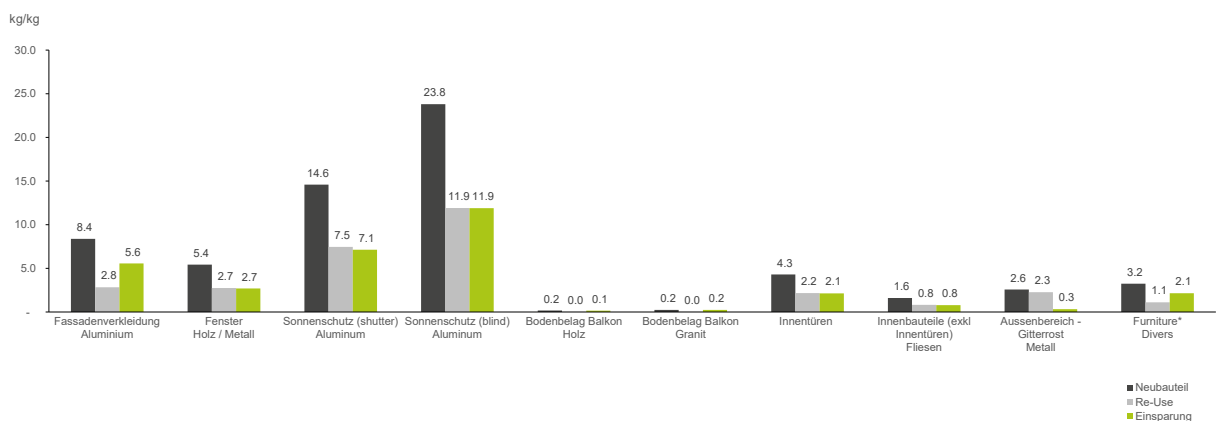


Abbildung 24 Spezifische Treibhausgasemissionen von neuwertigen Bauteilen (dunkelgrau), Re-Use-Bauteilen (hellgrau) sowie die Einsparung (in grün), bezogen auf die Masse des jeweiligen Bauteils

Für die gesamten Einsparungen sind neben der Einsparung pro Bauteil auch die Menge an verwendeten Bauteilen relevant. So spart der Sonnenschutz aus Aluminium (shutter) mit 8.9 Tonnen am meisten Treibhausgasemissionen ein. Gefolgt sind sie von den Fenstern mit 8.1 Tonnen.

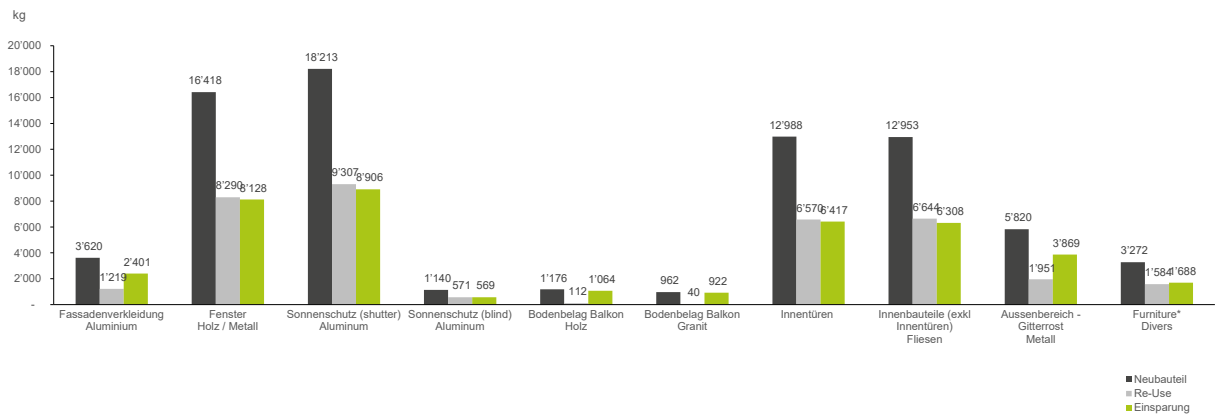


Abbildung 25 Absolute Treibhausgasemissionen von neuwertigen Bauteilen (dunkelgrau), Re-Use-Bauteilen (hellgrau) sowie die Einsparung (in grün), bezogen auf die Masse des jeweiligen Bauteils

Für die Ökobilanzierung nach SIA 2032 sind neu der zehnte Bauteile zu berücksichtigen. Durch diese werden insgesamt 40 Tonnen an Treibhausgasemissionen eingespart. In Bezug auf die Energiebezugsfläche und die Lebensdauer von Haus C entspricht dies einer Einsparung von 0.50 kg/m²a. Bauteile wie Spiegel, Handtuchhalter oder Tafel wurden nicht berücksichtigt. Sie sind nicht Teil der Systemgrenze nach SIA 2032.

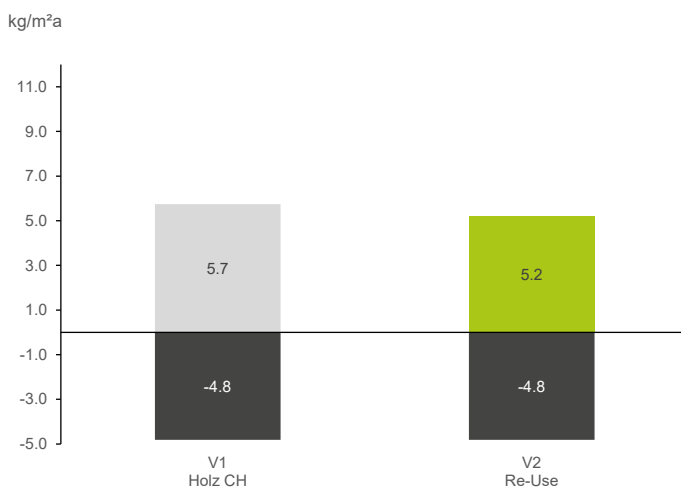


Abbildung 26 Treibhausgasemissionen für die Erstellung von Gebäude D (ohne Gebäudetechnik) ohne Berücksichtigung der verwendeten Re-Use Bauteile (V1) und in grün Haus D wie realisiert, in schwarz im Holz gespeichertes biogenes CO₂

3.6.2 Gespeichertes biogenes CO₂

Haus D ist wie Haus C ein Holzmodulbau. Auch hier wurde das Potential des im Holz gespeicherten biogenen CO₂ berechnet. Im Gebäude D werden rund 445 Tonnen Holz verbaut. Diese binden ca. 180 Tonnen Kohlestoff. Umgerechnet auf die Lebensdauer des Gebäudes und das Treibhausgaspotential bindet der Holzbau wie umgesetzt 4.8 kg/m²a. Es folgt, dass mehr als 90% der für die Herstellung der Baumaterialien verursachten Treibhausgasemissionen im Holz als biogenes CO₂ gebunden sind.



3.7 Kostenbilanz der Re-Use Bauteile

3.7.1 Kosten pro Re-Use Bauteil

Von Seite in situ wurde für jedes Bauteil ein Beschaffungsantrag mit detaillierten Kosten erstellt. Die Kosten der Re-Use Bauteile setzen sich folgendermassen zusammen:

- Kosten Erwerb, bzw. Entschädigung Eigentümerin / Verkäuferin
- Kosten Ausbau und Rüsten
- Transportkosten bis zum Lager
- Lagerkosten
- Logistikkosten in situ

Der Vergabeantrag enthält jeweils ein Bauteilbudget mit einem definierten Mengenpreis, der vom Kostenvoranschlag Neubau abgeleitet wird. Dies wird in den folgenden Aufstellungen mit den effektiv abgerechneten Kosten pro Re-Use Bauteil verglichen, da die Kosten in den Beschaffungsanträgen teilweise signifikant von den abgerechneten Kosten abweichen (siehe Tabelle 11). Diese effektiv abgerechneten Kosten wurden zusätzlich mit dem Honorar der Bauteilsuche anteilmässig gemäss Bauteilkosten ergänzt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 11 Übersicht über die Bauteile, Anzahl und Bezeichnung

Bauteilkategorie	Bauteil-Nr.	Bezeichnung Baubüro in situ	Anzahl	Einheit
A1 Fassadenverkleidung nicht brennbar	GR001	Aluminium Wellblech Grüze	155	m ²
A2 Fenster	EB003	Balkonfenster Eisenbahnergen.	12	Stk.
A2 Fenster	EB004	Zimmerfenster Eisenbahnergen.	48	Stk.
A2 Fenster	MA001	Fenster Schulhaus Manegg	2	Stk.
A4 Balkonbrüstungen	PZ_J_004	Gitterroste Propog	17	m ²
A5 Aussenbodenbeläge	ZK005(D)	Granitplatten	30	m ²
A5 Aussenbodenbeläge	IPE001	IPE Terrassendielen	250	m ²
Z.A. 6 Sonnenschutz	EB005	Fensterläden Eisenbahnergen.	53	Stk.
Z.A. 6 Sonnenschutz	MA002	Storen zu Fenster MA001	2	Stk.
I1 Boden- und Wandbeläge	PG001	Restposten Platten Ganz	446	m ²
I2 Innentüren	ZK001	Türblätter ZKB Dübendorf	63	Stk.
I3 Bäder	EA003	Waschtisch	10	Stk.
I3 Bäder	EA004	Spiegelschrank	15	Stk.
I3 Bäder	KSW 005	Spiegelschrank	14	Stk.
I3 Bäder	EA009	DuschWC mit AP Spülkasten	1	Stk.
I3 Bäder	EA025	Ausguss und Armatur	1	Stk.
I3 Bäder	EA005	Haltegriff WC klappbar	1	Stk.
I3 Bäder	EA006	Haltegriff WC klein	1	Stk.
I3 Bäder	EA007	Handtuchhalter	11	Stk.
I3 Bäder	BH011	Handtuchstangen	23	Stk.
Z.I.6 Schiebetüren	EA001	Schiebetüren Europaallee	15	Stk.
Z.I.6 Schiebetüren	EA001	Schiebetüren Europaallee	1	Stk.
XX. Fundstücke	SB001	Briefkästen Seebach 6er	4	Stk.



Tabelle 12 Kosten Re-Use versus Kosten neue Bauteile, pro Kategorie (rot = teurer, grün = günstiger)

Bezeichnung	Anzahl	Einheit	Gesamtkosten bis Lager Re-Use Bauteil mit Hono- rarkosten (brutto)	Vergleich Material neu
Aluminium Wellblech Grüze	155	m ²	24'309 CHF	9'218 CHF
Balkonfenster Eisenbahnergen.	12	Stk.	12'952 CHF	14'625 CHF
Zimmerfenster Eisenbahnergen.	48	Stk.	45'520 CHF	40'320 CHF
Fenster Schulhaus Manegg	2	Stk.	3'356 CHF	5'076 CHF
Gitterroste Propog	17	m ²	6'524 CHF	1'925 CHF
Granitplatten	30	m ²	2'273 CHF	1'200 CHF
IPE Terrassendielen	250	m ²	9'055 CHF	17'688 CHF
Fensterläden Eisenbahnergen.	53	Stk.	11'753 CHF	21'733 CHF
Storen zu Fenster MA001	2	Stk.	in Fenster Schulhaus Manegg enthalten	
Restposten Platten Ganz	446	m ²	11'312 CHF	16'320 CHF
Türblätter ZKB Dübendorf	63	Stk.	15'714 CHF	25'800 CHF
Waschtisch	10	Stk.	3'882 CHF	3'065 CHF
Spiegelschrank	15	Stk.	5'823 CHF	6'761 CHF
Spiegelschrank	14	Stk.	3'834 CHF	6'310 CHF
DuschWC mit AP Spülkasten	1	Stk.	388 CHF	
Ausguss und Armatur	1	Stk.	388 CHF	185 CHF
Haltegriff WC klappbar	1	Stk.	388 CHF	606 CHF
Haltegriff WC klein	1	Stk.	388 CHF	
Handtuchhalter	11	Stk.	4'270 CHF	336 CHF
Handtuchstangen	23	Stk.	3'973 CHF	702 CHF
Schiebetüren Europaallee	15	Stk.	5'015 CHF	7'845 CHF
Schiebetüren Europaallee	1	Stk.	334 CHF	523 CHF
Briefkästen Seebach 6er	4	Stk.	2'789 CHF	2'200 CHF
Gesamtbilanz			174'242 CHF	182'438 CHF



Tabelle 13 Kosten Re-Use versus Kosten neue Bauteile, pro Einheit

Bezeichnung	Einheit	Gesamtkosten bis Lager Re-Use Bauteil mit Honorarkosten (brutto)	Vergleich Material neu	Abweichung
Aluminium Wellblech Grüze	m ²	156.83 CHF	59 CHF	266%
Balkonfenster Eisenbahnergen.	Stk.	1079 CHF	1219 CHF	89%
Zimmerfenster Eisenbahnergen.	Stk.	948 CHF	840 CHF	113%
Fenster Schulhaus Manegg	Stk.	1678 CHF	2538 CHF	66%
Gitterroste Propog	m ²	384 CHF	110 CHF	349%
Granitplatten	m ²	76 CHF	40 CHF	189%
IPE Terrassendielen	m ²	36 CHF	59 CHF	61%
Fensterläden Eisenbahnergen.	Stk.	222 CHF	453 CHF	49%
Storen zu Fenster MA001	Stk.	in Fenster Schulhaus Manegg enthalten		
Restposten Platten Ganz	m ²	25 CHF	3CHF	833%
Türblätter ZKB Dübendorf	Stk.	249 CHF	404 CHF	62%
Waschtisch	Stk.	388 CHF	306 CHF	127%
Spiegelschrank	Stk.	388 CHF	451 CHF	86%
Spiegelschrank	Stk.	274 CHF	451 CHF	61%
Dusch-WC mit AP Spühlkasten	Stk.	388 CHF		
Ausguss und Armatur	Stk.	388 CHF	185 CHF	210%
Haltegriff WC klappbar	Stk.	388 CHF	606 CHF	64%
Haltegriff WC klein	Stk.	388 CHF		
Handtuchhalter	Stk.	388 CHF	31 CHF	1252%
Handtuchstangen	Stk.	173 CHF	31 CHF	557%
Schiebetüren Europaallee	Stk.	334 CHF	523 CHF	64%
Schiebetüren Europaallee	Stk.	334 CHF	523 CHF	64%
Briefkästen Seebach 6er	Stk.	697 CHF	550 CHF	127%

Bisher zeigt sich, dass komplexe, durch aufwändige Arbeiten hergestellte Bauteile, wie z.B. Fenster, tendenziell kostengünstiger wiederverwendet werden können. Einfache Baustoffe wie Holz, Bleche oder Plattenbeläge sind hingegen eher teurer.

3.7.2 Honorar für die Re-Use-Planung und Verhältnis zu den Re-Use-Gesamtkosten

Bauteiljäger Phase 0

Diese Planungskosten belaufen sich auf insgesamt CHF 62'000.- (inklusive Nebenkosten und Mehrwertsteuer) oder rund ein Drittel der gesamten Bauteilkosten der eingebauten Re-Use Bauteile. Unter diesem Aspekt werden die Einsparungen von rund CHF 8'200.- oder 4.5 % auf die Summe der Re-Use Bauteile zu Mehrkosten im Rahmen von rund CHF 55'000.- oder knapp 30 %.

Im Verhältnis zu den Baukosten des Haus D, rund 8.5 Millionen, machen diese Mehrkosten von CHF 55'000.- einen Anteil von 0.6 % aus. In Anbetracht der Gesamtkosten Re-Use von rund CHF 236'242.- oder 2.8 % der Bausumme, ist die Höhe der Planungskosten doch verhältnismässig hoch. Ob dies von den vielen, nicht realisierten Re-Use Bauteilanträgen herkommt, muss noch untersucht werden.



3.7.3 Treibhausgas-Vermeidungskosten

Als einfacher Indikator sollen die Mehrinvestitionskosten der einzelnen Bauteile den eingesparten Treibhausgasemissionen gegenübergestellt werden. Damit kann der Preis pro Kilogramm eingespartes CO_{2,eq} (Treibhausgas-Vermeidungskosten) in der Erstellung ermittelt und die bezüglich der Kosteneffizienz interessanteren Re-Use-Bauteile eruiert werden.

Tabelle 14 Mehr-/Minderkosten und eingesparte Treibhausgasemissionen der Re-Use-Bauteile

Bezeichnung	Gesamtkosten bis	Vergleich	Differenzkosten	Eingesparte
	Lager Re-Use Bauteil mit Honorarkosten (brutto)	Material neu	Re-Use minus neu	THGE
	CHF	CHF	CHF	kg
Aluminium Wellblech Größe	24'309.00	9'218.00	15'091.00	2'401
Balkonfenster Eisenbahnergen.	12'952.00	14'625.00	-1'673.00	8'128
Zimmerfenster Eisenbahnergen.	45'520.00	40'320.00	5'200.00	
Fenster Schulhaus Manegg	3'356.00	5'076.00	-1'720.00	
Gitterroste Propog	6'524.00	1'925.00	4'599.00	3'869
Granitplatten	2'273.00	1'200.00	1'073.00	922
IPE Terrassendielen	9'055.00	17'688.00	-8'633.00	1'064
Fensterläden Eisenbahnergen.	11'753.00	21'733.00	-9'980.00	8'906
Storen zu Fenster MA001	in Fenster Schulhaus Manegg enthalten			
Restposten Platten Ganz	11'312.00	16'320.00	-5'008.00	6'308
Türblätter ZKB Dübendorf	15'714.00	25'800.00	-10'086.00	6'417
Waschtisch	3'882.00	3'065.00	817.00	
Spiegelschrank	5'823.00	6'761.00	-938.00	
Spiegelschrank	3'834.00	6'310.00	-2'476.00	
DuschWC mit AP Spülkasten	388.00			
Ausguss und Armatur	388.00	185.00	203.00	
Haltegriff WC klappbar	388.00	606.00	-218.00	
Haltegriff WC klein	388.00			
Handtuchhalter	4'270.00	336.00	3'934.00	
Handtuchstangen	3'973.00	702.00	3'271.00	
Schiebetüren Europaallee	5'015.00	7'845.00	-2'830.00	1'019
Schiebetüren Europaallee	334.00	523.00	-189.00	
Briefkästen Seebach 6er	2'789.00	2'200.00	589.00	
Gesamtbilanz	174'242.00	182'438.00	-8'196.00	

Für die vorhandenen Zahlen der Ökobilanzen wird nun der Investitionsbetrag pro Kilogramm eingespartes CO_{2,eq} (Treibhausgas-Vermeidungskosten) berechnet.



Tabelle 15 Resultierende Treibhausgas-Vermeidungskosten pro Re-Use-Bauteil

Bezeichnung	Differenzkosten	Differenzkosten	Eingesparte	Investitions-
	Re-Use minus	Re-Use minus	THG gemäss	kosten pro kg
	neu	neu	Berechnung	gespartes
		gruppiert		CO ₂ eq
	CHF	CHF	kg	CHF/kg
Aluminium Wellblech Grüze	15'091.00	15'091.00	2'401	6.3
Balkonfenster Eisenbahnergen.	-1'673.00	3'527.00	8'128	0.43
Zimmerfenster Eisenbahnergen.	5'200.00			
Gitterroste Propog	4'599.00	4'599.00	3'869	1.19
Granitplatten	1'073.00	1'073.00	922	1.16
IPE Terrassendielen	-8'633.00	-8'633.00	1'064	-7.7
Fensterläden Eisenbahnergen.	-9'980.00	-9'980.00	8'906	-1.12
Restposten Platten Ganz	-5'008.00	-5'008.00	6'308	-0.79
Türblätter ZKB Dübendorf	-10'086.00	-10'086.00	6'417	-1.57
Total	-9'417.00	-9'417.00	38'015	-0.25

3.7.4 Fazit

Die Verwendung von Re-Use Bauteilen resultiert nicht zwingend in Mehrkosten für das Gebäude. Im Gegenteil, es besteht sogar die Möglichkeit von Einsparungen bei Verwendung von Re-Use Bauteilen. Hier sind im Besonderen die teureren Bauteile, wie Fenster oder hochwertige Wand-, bzw. Bodenbeläge zu nennen. Die zuzüglichen Planungskosten sind entsprechend im Verhältnis zur realisierten Re-Use-Quote (Kostenanteil) zu sehen.

3.8 Interviews mit Fachspezialistinnen und Bewohnenden

Beim Haus D auf dem Hobelwerk Areal in Winterthur erprobte die Baugenossenschaft mehr als wohnen zum ersten Mal den Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen in einem ihrer Projekte. Das Projekt wurde als Zusammenarbeit zwischen mehr als wohnen und Topik Partner (Vertretung Auftraggebende) Pascal Flammer Architektur, Zirkular GmbH (Fachplanungsbüro Re-Use), Baltensperger AG (Holzbau) und weiteren Akteuren realisiert. In vier verschiedenen Interviews erzählen die am Bau Beteiligten, welche Herausforderungen für sie entstanden und wie sie diese meisterten. Die vollständigen Interviews mit den Fachspezialistinnen sind in im Anhang 2.3 wiedergegeben.

Die Fachspezialisten-Interviews zeigen deutlich, dass das Bauen mit wiederverwendeten Bauteilen komplexer und zeitaufwendiger ist als konventionelles Bauen. Es erfordert eine frühzeitige Entscheidung für Re-Use, klare Verantwortlichkeiten und eine enge Zusammenarbeit aller am Bau Beteiligten und mit erfahrenen Fachplanenden. Angesprochen wurden auch politische Entscheidungen und Förderinitiativen, um Re-Use finanziell attraktiver zu gestalten und zu verbreiten.

Die Befragung der Bewohnenden erfolgt – zusammen mit der Erhebung weiterer Informationen – im Rahmen eines Online-Fragebogens im Sommer 2024.

3.9 Bewertung der Ergebnisse



3.9.1 Gewählte Strategie und Entscheidungen

Grundsätzlich erwies sich der gewählte Weg für die Planenden und die Bauherrin als lehrreich. Als eines der ersten Wohnbauprojekte mit grossmassstäblich geplanter Wiederverwendung in der Schweiz konnten Erfahrungen mit einigen breit verfügbaren Bauteilgruppen gesammelt werden. Durch eine noch frühere Planung mit wiederverwendeten Bauteilen könnten diese Bauteilgruppen zusätzlich noch um Treibhausgas-intensivere Konstruktionsaufbauten erweitert werden (Tragwerk, Treppen, Innenwandaufbauten).

Für künftige Projekte bleibt es wichtig, dass auch Materialien, welche nicht Teil des definierten Suchauftrags sind, besprochen und geprüft werden. Es ist zu erwarten, dass anhand der fortlaufend gesammelten Erfahrungen bei Demontage und Wiedereinbau, künftig bereits in früheren Projektphasen mehr Planungs- und Kostensicherheit bestehen wird und der Planungsablauf mit Wiederverwendung insgesamt konsistenter werden wird. Solange jedoch die wiederzuverwendenden Bauteile zu Planungsbeginn noch nicht ausgebaut, eingelagert und vermessen sind, wird Planung und Bauteilsuche als iterativer Prozess funktionieren müssen.

Die im Projekt erarbeiteten Abläufe bedürfen jedoch noch weiterer Etablierung im regulären Planungsprozess, wobei sicherlich auch eine stellenweise Normierung hilfreich wäre. Auch scheint es förderlich, das rechtliche und finanzielle Risiko weiter zu minimieren. Förderlich dafür wären Materialbanken (sog. Bauteilhubs) welche unabhängig vom Zielprojekt Material sammeln und dieses mit gegebener Kostensicherheit weiterverkaufen.

3.9.2 Mengen und Qualität

Grundsätzlich konnte im bisherigen Verlauf der Bauteilsuche zu allen der 11 definierten Bauteilkategorien Suchergebnisse vorgelegt werden. Zudem konnten Bauteile von drei weiteren Kategorien ausgebaut werden, welche ursprünglich nicht für die Bauteilsuche vorgesehen waren. Damit wurde das Vorgehen grundsätzlich bestätigt.

Die schweizweit aus dem Rückbau verfügbaren Bauteile werden aktuell durch die Wiederverwendung in Neu- und Umbauprojekten nicht ansatzweise ausgeschöpft. Bei unveränderter Rückbautätigkeit kann mit dem verfügbaren Material auch eine starke Zunahme der Nachfrage nach wiederverwendbaren Bauteilen gedeckt werden. Die benötigte Menge und Qualität der Bauteile können somit voraussichtlich für weitere, grössere Projekte erwartet werden.

3.9.3 Aussichten

Bessere Möglichkeiten für Datenmanagement:

Die Möglichkeit, Material direkt aus Lagern (Bauteilhubs) beschaffen zu können, würde den Prozess bezüglich Planungs- und Kostensicherheit deutlich vereinfachen. Dazu sind auf theoretischer Ebene in einigen Hochschularbeiten Überlegungen gemacht worden. Abgesehen von klassischen Bauteilbörsen, welche sich in erster Linie auf Kleinbauteile wie Lavabos, Küchen, Heizkörper und dergleichen konzentrieren, sind solche Bauteilhubs bisher nicht vorhanden. Gründe dafür könnten finanzielle Unsicherheiten und eine bisher ungewisse (aber subjektiv wachsende) Nachfrage sein.

3.10 Ausblick

Die Forschungsarbeiten sind im Arbeitspaket AP2 weitgehend abgeschlossen. Die Befragung und Evaluation der Nutzenden-Perspektive (Bewohnende) wurde im Sommer 2024, die Befragung der Bewirtschaftung wird im Sommer 2026 durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Schlussbericht.



4 AP3: CO₂-geregelter Abluftanlage

4.1 Ausgangslage

In der Schweiz sind im Wesentlichen drei Typen von Wohnungslüftungsanlagen verbreitet:

1. **Zu-/Abluftanlagen** mit Wärmerückgewinnung, umgangssprachlich als Komfortlüftung bezeichnet. Diese führen vorgewärmte Aussenluft in die Wohn- und Schlafräume und saugen Abluft aus Nassräumen und Küchen ab.
2. **Einfache Abluftanlagen** ohne Dauerbetrieb, umgangssprachlich als Bedarfslüftung bezeichnet. Diese entlüften Nassräume und Kochstellen, während diese benutzt werden. Schlaf- und Wohnzimmer müssen durch die NutzerInnen über Fenster belüftet werden.
3. **Einfache Abluftanlagen mit Dauerbetrieb**. Die Nachströmung der Aussenluft erfolgt in der Regel über Aussenluftdurchlässe (ALD). Dank des permanenten Luftaustauschs ermöglichen diese Anlage auch ohne unterstützende Fensterlüftung die Sicherstellung von Feuchteschutz und Raumluftqualität.

Bisher müssen Abluftanlagen mit Dauerbetrieb zwingend mit einer Wärmerückgewinnung ausgerüstet werden. Die Wärmerückgewinnung erfolgt in der Regel durch eine Abluft-Wärmepumpe für die Warmwassererzeugung. Mit der Umsetzung der neuen Musterverordnung der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014) [49], können einfache Abluftanlagen mit Dauerbetrieb auch ohne Wärmerückgewinnung realisiert werden, sofern der Abluftvolumenstrom anhand von CO₂- oder Feuchtesensoren geregelt wird.

Dank dem bedarfsgeregelten Betrieb soll der durchschnittlich geförderte Abluftvolumenstrom deutlich tiefer liegen als bei Abluftanlagen mit konstantem Dauerbetrieb. Der Strombedarf der Abluftventilatoren und die Lüftungswärmeverluste im Winter sollen dadurch um rund 50% reduziert werden können. Zudem wird eine Verbesserung des thermischen Komforts im Winter erwartet, dank einer höheren relativen Raumluftfeuchtigkeit und weniger Zugluft im Bereich der Aussenluftdurchlässe.

Ob die Bedarfsregelung des Abluftvolumenstroms die erhoffte Steigerung von Energieeffizienz und Komfort in der Praxis tatsächlich erfüllt, ist offen. Auch die Akzeptanz durch die Bewohnenden sowie die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit dieser Lösung sollen untersucht werden.

Im Hobelwerk Areal werden im Rahmen des Arbeitspakets AP3 drei Mehrfamilienhäuser mit insgesamt 150 CO₂-geregelten Abluftventilatoren ausgerüstet, im Betrieb messtechnisch untersucht, die Wirtschaftlichkeit, die Treibhausgasemissionen und die Akzeptanz durch Befragungen der Bewohnenden ausgewertet.

4.2 Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren wurden mehrere Studien im Auftrag des Bundesamts für Energie mit dem Ziel erarbeitet, die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Wohnungslüftungssysteme zu quantifizieren.

Die umfangreiche Studie *Vergleich von Lüftungskonzepten für Wohnbauten* der Hochschule Luzern [50] vergleicht fünf Lüftungskonzepte bezüglich Treibhausgasemissionen und Jahreskosten, darunter auch Abluftanlagen im Dauerbetrieb und Fensterlüftung kombiniert mit Abluftanlagen. Nicht untersucht werden Abluftanlagen mit CO₂-Regelung des Volumenstroms.

Die Studie FENLEG [51] wertet Abluftkonzepte mit unterschiedlichen Aussenluftdurchlässen (Fensterlüftern) in 28, mehrheitlich sanierten, Gebäuden messtechnisch aus. Der Fokus der Studie liegt auf der Schimmelfreiheit. Neben den Zu- und Abluftvolumenströmen im Auslegungsfall werden auch Langzeitmessungen der CO₂-Konzentration der Raumluft, Raumtemperatur und Rauluftfeuchte sowie eine Befragung der Bewohnenden ausgewertet.



In der Studie ABLEG [52] werden die produktspezifischen Abluftsysteme der Firmen Aereco und Trivent messtechnisch untersucht. Beide Systeme arbeiten mit variablem Abluftvolumenstrom. Das System von Trivent arbeitet mit dezentralen Abluftventilatoren in jedem Nassraum. Die Abluftventilatoren können via Feuchtesensoren sowie über eine zeitgesteuerte Stufenschaltung betrieben werden. Eine Spezialität von Aereco ist die selbsttätige Feuchterege lung: Bei tiefer relativer Raumluftfeuchte drosselt ein feuchtesensitives Kunststoffband den Zuluftvolumenstrom durch die Aussenluftdurchlässe.

Die Studie *Abluftanlagen und Einzelraumlüftungen im Vollzug Energie* [53] untersucht zehn Objekte bezüglich Hygiene und Luftmengen vor und nach Filterwartung und Reinigung. Die Messungen beschränken sich auf den Zustand bei Nennvolumenstrom. In der Untersuchung wurde die Raumluftqualität weder gemessen noch durch eine systematische Befragung erfasst.

Im BFE-Leuchtturmprojekt *2000-Watt-Leuchtturm-Areal mehr als wohnen* konnten verschiedene Wohnungslüftungssysteme im Betrieb untersucht und verglichen werden. Die neun Häuser mit Abluftanlagen wiesen dabei einen im Vergleich zu den Planungswerten eher geringen Heizwärme- und Lüftungsstromverbrauch auf. Bei den vier Häusern mit Zu-/Abluftanlagen werden dagegen die Planungswerte deutlich überschritten.

In allen vorgenannten Studien wird auf die Problematik der thermischen Behaglichkeit (Zugerscheinungen) bei Abluftanlagen mit Aussenluftdurchlässen hingewiesen.

Im Rahmen des Arbeitspакtes AP3 wird das Problem der Zugluft mittels einer erweiterten CO₂-Regelung des Abluftvolumenstroms adressiert und gleichzeitig die Energieeffizienz verbessert sowie die Erkenntnisse aus dem Hunziker Areal, dem ersten P+D-Projekt von mehr als wohnen [5], erweitert.

4.3 Fragestellung und Zielsetzung

Es wird eine marktübliche Lösung mit einer Neuentwicklung verglichen. Ziel ist zu prüfen, ob eine Abluftanlage, welche über die CO₂-Konzentration der Raumluft geregelt wird, einen angemessenen thermischen Komfort und eine akzeptable Raumluftqualität bei geringem Ressourceneinsatz sicherstellen kann. Während auf dem Hunziker Areal der geringe Ressourceneinsatz für ein System ohne Regelung über die CO₂-Konzentration der Raumluft bereits gezeigt werden konnte, gab es bezüglich des thermischen Komforts bzw. der Akzeptanz durch die Nutzenden noch Verbesserungsbedarf.

In den Häusern A und B des Hobelwerks wurden marktübliche Einzelventilatoren je Nasszelle sowie in den Reduits verbaut. Die Abluftventilatoren werden über Präsenzscha lter und bei Überschreitung des Schwellenwerts für die relative Luftfeuchtigkeit aktiviert (Feuchteschutz-Lüftung). In den Häusern C, D und E wird dagegen eine CO₂-Regelung des Abluftvolumenstroms pro Wohnung eingesetzt (kontrollierte Lüftung). Die Aussenluft strömt in allen Gebäuden über manuell schliessbare Aussenluftdurchlässe nach.

Der thermische Komfort soll zudem durch eine automatische Reduktion des Volumenstroms bei Aussen temperaturen < 0 °C (geringeres Zugluftisiko, geringere Wärmeverluste) und > 25°C (geringerer Wärmeeintrag) in Anlehnung an SIA 382/1, verbessert werden können.

Im Rahmen des Pilotprojekts sollen folgende Arbeitshypothesen überprüft werden:

- Gegenüber einer reinen Feuchteschutz-Lüftung (Häuser A + B) werden im Durchschnitt tiefere Raumluft-CO₂-Konzentrationen erreicht. Dank der besseren Raumluftqualität müssen die Fenster durch die Bewohnenden seltener geöffnet werden.
- Die Luftqualität ist vergleichbar mit einer mehrstufigen, zeitgesteuerten Zu-/Abluftanlage und die Anzahl geöffneter Fenster im Winter ähnlich (Vergleich mit dem Hunziker Areal, Haus B).



- Eine CO₂-geregelter Abluftanlage mit Einzelventilatoren führt gegenüber einer Abluftanlage mit konstantem Volumenstrom (Hunziker Areal) zu einer deutlichen Reduktion des durchschnittlichen Aussenluftvolumenstroms.
- Aufgrund des reduzierten Aussenluft-Volumenstroms ist der Energieverbrauch für die Luftförderung und die Erwärmung der Aussenluft vergleichbar mit einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.
- Die Investitionskosten einer CO₂-geregelter Abluftanlage mit Einzelventilatoren sind vergleichbar mit jenen einer reinen Feuchteschutz-Lüftung (Häuser A, B) und deutlich tiefer als bei einer Zu-/Abluftanlage.
- Die Erstellung der CO₂-gesteuerten Abluftanlage ist Bezug auf die Treibhausgasemissionen deutlich sparsamer als eine Lösung mit Zu-/ Abluft und Wärmerückgewinnung.

4.4 Vorgehen

Folgende Arbeitsschritte sind vorgesehen, wurden bereits umgesetzt (**fett**) oder sind aktuell in der Umsetzung (kursiv):

1. **Planung der Lüftungsanlage** mit marküblichen Komponenten, inkl. Regelbeschreibung
2. **Programmierung der Volumenstromregelung**
3. **Aufbau einer Versuchsanlage** in einer Testumgebung
4. **Analyse und Optimierung der Testanlage**
5. **Inbetriebnahme** und *Einregulierung* der CO₂-geregelter Abluftanlagen der Häuser C, D, E
6. **Kontinuierliche Messung und Auswertung** der Raumluft-CO₂-Konzentration, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Raumtemperatur, des Volumenstroms der Einzelventilatoren sowie des Heizwärmebedarfs pro Wohnung, in allen Wohnungen der Häuser C, D, E während der ersten zwei Betriebsjahre
7. **Thermographie mehrerer Fassaden im Winter**, um die durchschnittliche Anzahl offener Fenster zu ermitteln
8. **Befragung der Bewohnenden** auf dem Hobelwerk bezüglich des Komforts und der Luftqualität inkl. statistischer Auswertung
9. **Vergleich der Ergebnisse** der Messung und der Befragung der Häuser C, D, E mit denjenigen der Häuser A und B sowie mit den Ergebnissen auf dem Hunziker Areal (vgl. Studie «2000-Watt-Leuchtturm-Areal mehr als wohnen» [5])
10. *Optimierung der Komponenten und Volumenstromregelung* und Überprüfung der Messergebnisse

4.5 Anlagenbeschreibung

Die Pilotanlage besteht, mit Ausnahme der Volumenstromregelung, aus marküblichen Komponenten. Die Volumenstromregelung der Häuser C, D, E erfolgt dynamisch über das Gebäudeleitsystem. Der Sollwert der Raumluft-CO₂-Konzentration kann via einem BUS vom Gebäudeleitsystem mit je Abluftventilator angepasst werden. Der Sensor gibt, basierend auf dem CO₂-Messwert, ein 0 bis 10-V-Signal aus und wirkt auf die Drehzahlregelung des zugehörigen Einzelventilators. Auf diese Weise kann der effektiv geförderte Volumenstrom via Gebäudeleitsystem beeinflusst und an verschiedene Lüftungsregimes angepasst werden. Zudem kann der Volumenstrom bei tiefen Aussentemperaturen < 0 °C und bei hohen Aussentemperaturen > 25 °C reduziert werden. Auch andere Grenz- und



Schwellenwerte sind denkbar und werden im Verlauf des Projekts evaluiert. Dadurch wird gleichzeitig der thermische Komfort und die Wärmeleistungsbilanz im Heiz- und Kühlfall verbessert.

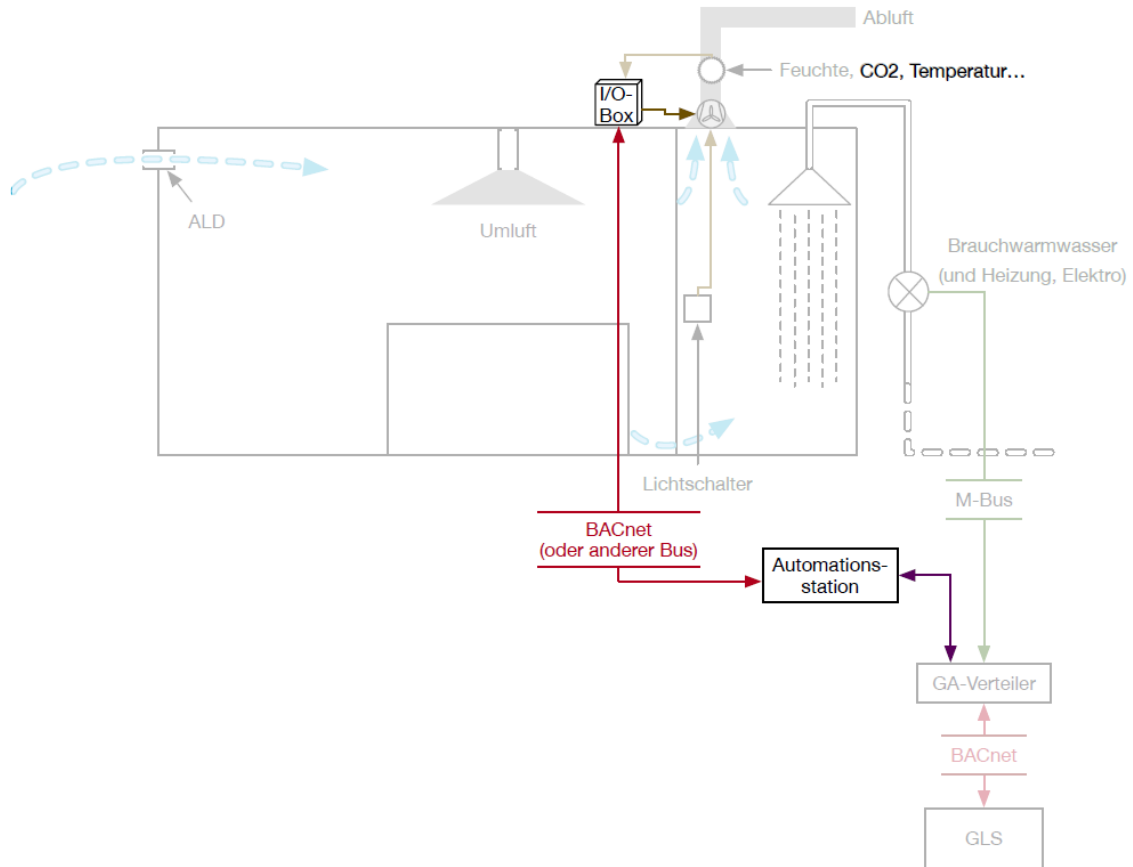


Abbildung 27 Prinzipschema der CO₂-geregelten Abluftanlagen; hervorgehoben sind die Komponenten, die für den Zweck des P+D-Projekts zusätzlich installiert werden.

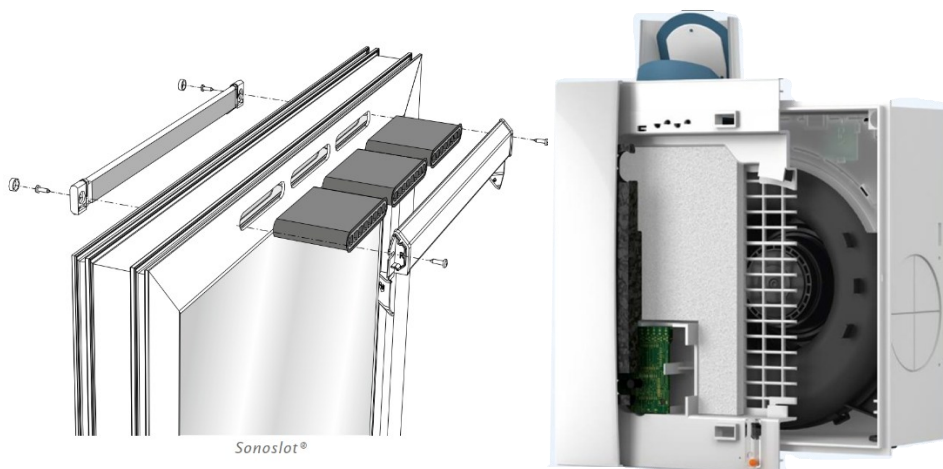


Abbildung 28 Im Projekt eingesetzter Aussenluftdruchlass Sonoslot der Firma Reson (links); Schnittdarstellung des Abluftventilators Silent ECO-EC von Wernig (rechts)

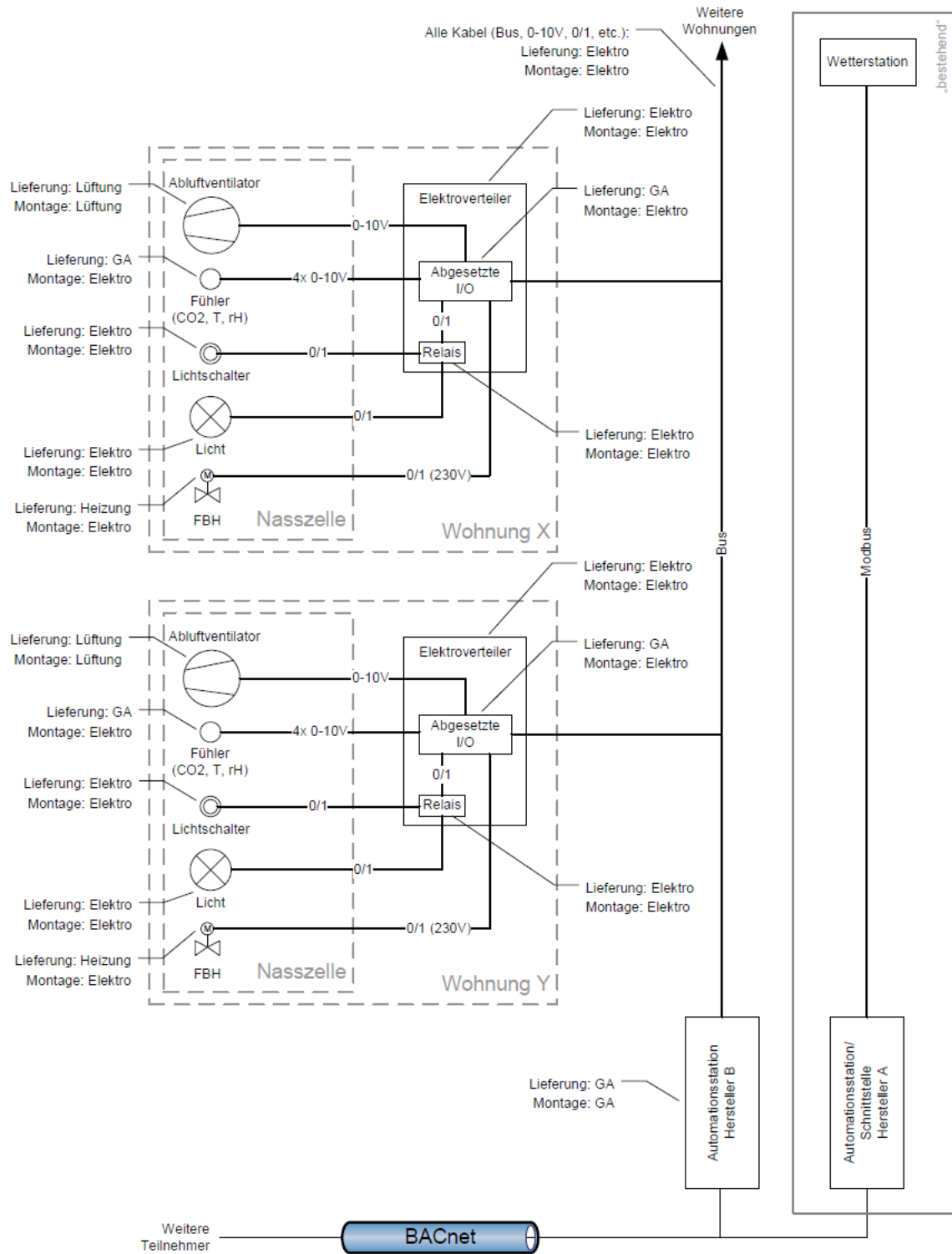




Abbildung 29 Prinzipschema der Raumregulierung.

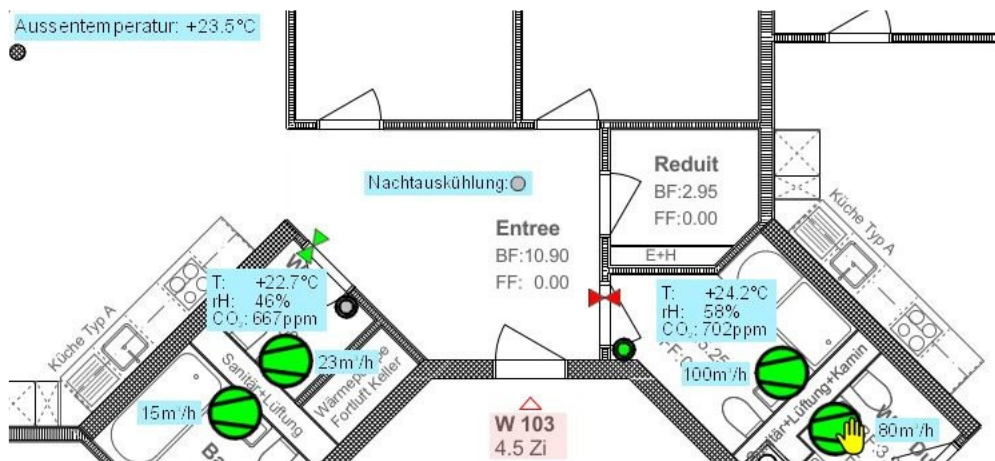


Abbildung 30 Vorschlag für die Visualisierung der Messdaten der Lüftungsregelung im Gebäudeleitsystem

4.6 Testanlage

4.6.1 Ziele und Aufbau der Testanlage

Mit der Testanlage sollen vor Ausführung der Lüftungsanlagen einerseits das Verhalten des Abluftventilators bei unterschiedlichen Volumenströmen erfasst und andererseits die Funktionstüchtigkeit und Zweckmässigkeit der CO₂-Regelung sichergestellt werden. Im Zentrum der Tests stehen folgende Fragen:

- Wie hoch ist die elektrische Leistungsaufnahme des Abluftventilators bei unterschiedlichen Volumenströmen?
- Wie hoch ist der Geräuschpegel des Abluftventilators bei unterschiedlichen Volumenströmen?
- Erfüllt die vorgesehene Regulierung die im Projektbescrieb des Gebäudeautomationsplaners (Pega) definierten Anforderungen sowie die Bedürfnisse des Forschungsprojekts?
- Wie hoch ist die elektrische Leistungsaufnahme der CO₂-Regulierung?

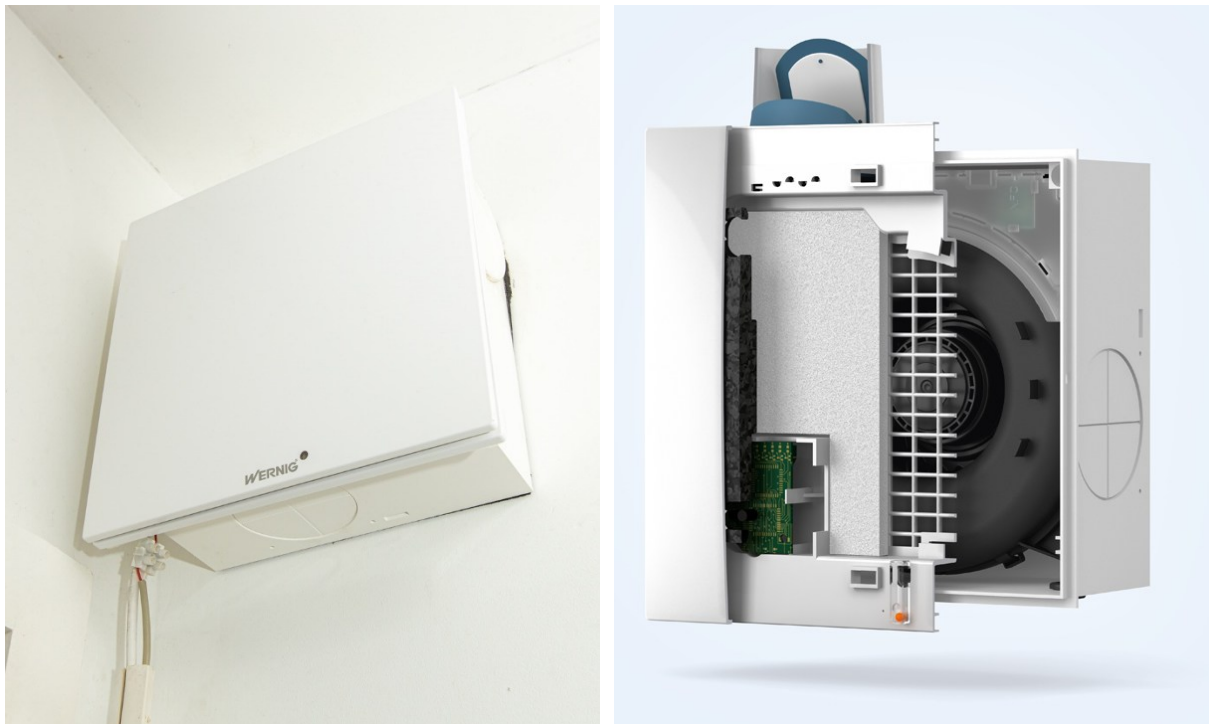


Abbildung 31 Aufputz montierter Abluftventilator der Testanlage (links); Schnittdarstellung des Abluftventilators von Wernig (rechts)

SILENT ECO UEC Ø 80 oben*						
Nennvolumenstrom	15 m ³ /h	20 m ³ /h	30 m ³ /h	40 m ³ /h	60 m ³ /h	100 m ³ /h
Leistungsaufnahme	1,8 W	1,9 W	2,2 W	2,8 W	4,6 W	13,0 W
spez. Leistungsaufn.	0,11 Wh/m ³	0,09 Wh/m ³	0,07 Wh/m ³	0,07 Wh/m ³	0,08 Wh/m ³	0,13 Wh/m ³
Spannung	230 V~, 50 Hz	230 V~, 50 Hz	230 V~, 50 Hz	230 V~, 50 Hz	230 V~, 50 Hz	230 V~, 50 Hz
Schalldruckpegel**	19 dB(A)	19 dB(A)	23 dB(A)	27 dB(A)	33 dB(A)	43 dB(A)

* Daten für SILENT ECO UEC Ø 80 hinten siehe [SILENT ECO AEC](#)
** bezogen auf eine Nachhallzeit von 0,5 s gemäß ÖNORM EN ISO 16032

Abbildung 32 Technische Daten des Abluftventilators gemäss Herstellerangaben; Silent ECO UEC (oben): wie im Projekt ausgeführt; (Silent ECO AEC: entspricht der Aufputz-Ausführung analog der Testanlage)

4.6.2 Ergebnisse der Testanlage

Der Abluftventilator ist serienmässig mit einer Kaltrauch-Rückschlagklappe ausgestattet. Diese verursacht einen zusätzlichen Druckverlust und erhöht dadurch die elektrische Leistungsaufnahme und den Schalldruckpegel der Abluftanlage. Die Kaltrauch-Rückschlagklappe wird im Hobelwerk aus Sicherheitsgründen, z.B. im Brandfall bei gleichzeitigen Stromunterbruch, verbaut.

Beim Betrieb mit Kaltrauch-Rückschlagklappe liegt die Leistungsaufnahme des Abluftventilators je nach Volumenstrom um bis zu 43% über den Werten gemäss Produktdatenblatt (siehe Tabelle 16). Zudem liegt der tatsächlich geförderte Volumenstrom, insbesondere bei Volumenströmen über 40 m³/h, deutlich unter dem Nennvolumenstrom gemäss Datenblatt. In der Folge steigt die spezifische Leistungsaufnahme bei einem Nenn-Volumenstrom von 40 m³/h von 0,07 W/(m³/h) auf 0,10 W/(m³/h), was einem Mehrverbrauch von gut 40% entspricht.

Auch der mit Kaltrauch-Rückschlagklappe gemessene Schalldruckpegel liegt deutlich über den Werten gemäss Produktdatenblatt, insbesondere bei tiefen Volumenströmen (siehe Tabelle 16).



Tabelle 16 Messergebnisse des Abluftventilators mit Kaltrauch-Rückschlagklappe

Regelung Drehzahl	Abluft-Volumenstrom			Leistungsaufnahme			Spez. Leistungsaufnahme			Schalldruckpegel		
	Datenblatt	Messung	%	Datenblatt	Messung	%	Datenblatt	Messung	%	Datenblatt	Messung	%
20	20	20	0	1.9	2.2	16	0.10	0.11	16	19	45	137
30	30	30	0	2.2	2.7	23	0.07	0.09	23	23	48	109
40	40	35	-13	2.8	3.5	25	0.07	0.10	43	27	51	89
50	50	43	-14	3.5	4.8	37	0.07	0.11	59	30	55	83
60	60	49	-18	4.6	6.6	43	0.08	0.13	76	33	58	76
70	70	56	-20	6.0	8.6	43	0.09	0.15	79	36	61	69
80	80	62	-23	8.0	11.1	39	0.10	0.18	79	38	63	66

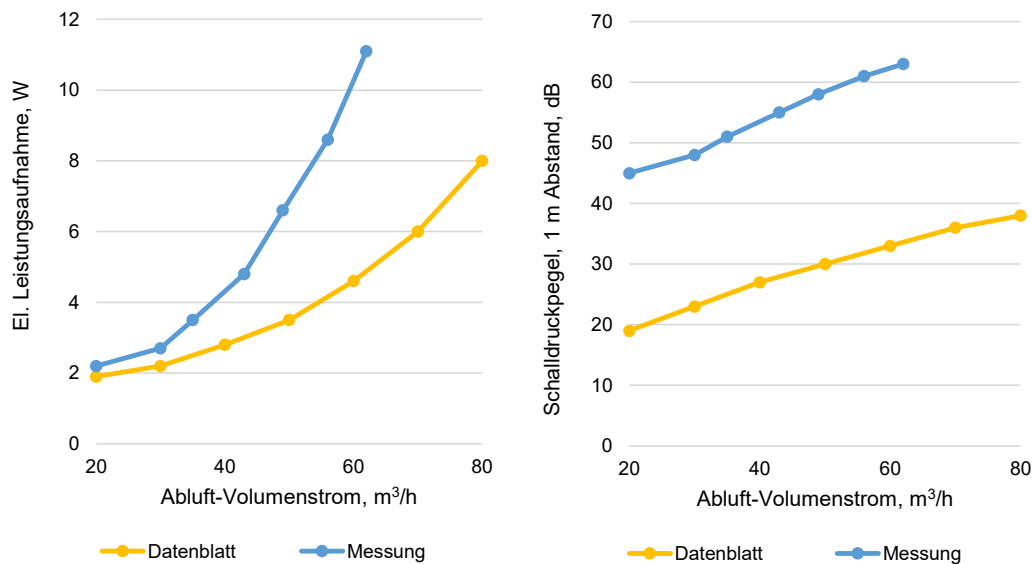


Abbildung 33 Auswertung der elektrischen Leistungsaufnahme (links); und des Schalldruckpegels in 1 m Abstand (rechts) des Abluftventilators mit Kaltrauchklappe bei unterschiedlichen Volumenströmen

Neben der Leistungsaufnahme und dem Schalldruckpegel des Abluftventilators wurde mit der Testanlage auch die vorgesehene Automationslösung für die CO₂-Regulierung und die Nachtauskühlung getestet. Fehlende Funktionen, wie die Möglichkeit zur automatischen Volumenstromreduktion bei tiefen Aussentemperaturen (Reduktion des Zugluftrisikos) und die Vorgabe eines maximalen (Nenn-)Volumenstroms für die Inbetriebnahme, wurden beanstandet und deren Ergänzung mit dem Lieferanten vereinbart.

Die Messergebnisse der Testanlage zeigen, dass der Lüftungsenergiebedarf der vorgesehenen CO₂-geregelten Abluftventilatoren in der Konzeptphase unterschätzt wurde. Der höhere Energiebedarf wird einerseits durch Abweichungen gegenüber den Angaben auf dem Datenblatt und durch den zusätzlichen Energiebedarf der CO₂-Regulierung verursacht. Bei einem mittleren Volumenstrom von 40 m³/h steigt die elektrische Leistungsaufnahme von 2.8 W auf rund 6 W pro Abluftventilator.

Der in der Planungsphase angenommene, auf die Energiebezugsfläche bezogene Stromverbrauch der Abluftanlagen steigt damit voraussichtlich von < 0.3 kWh/m² auf ca. 0.6 kWh/m². Diese vorläufigen Testergebnisse sollen nun unter realen Betriebsbedingungen überprüft werden. Dabei sollen auch Massnahmen zur Reduktion des Lüftungsenergiebedarfs untersucht werden.

Die Akzeptanz des erhöhten Geräuschpegels sowie der variablen Ventilator Drehzahl, soll nach Abschluss des ersten Betriebsjahres durch eine Befragung der Bewohnenden erhoben werden.



Die für die Grundeinstellung bei der Inbetriebnahme der CO₂-Regelung vorgeschlagenen Einstellungen sind aus Abbildung 34 ersichtlich. Im Betrieb können die Einstellungen schrittweise an die spezifischen Bedürfnisse der Bewohnenden sowie, vorübergehend, entsprechend den Anforderungen der Testfälle aus dem Forschungsprojekt angepasst werden.

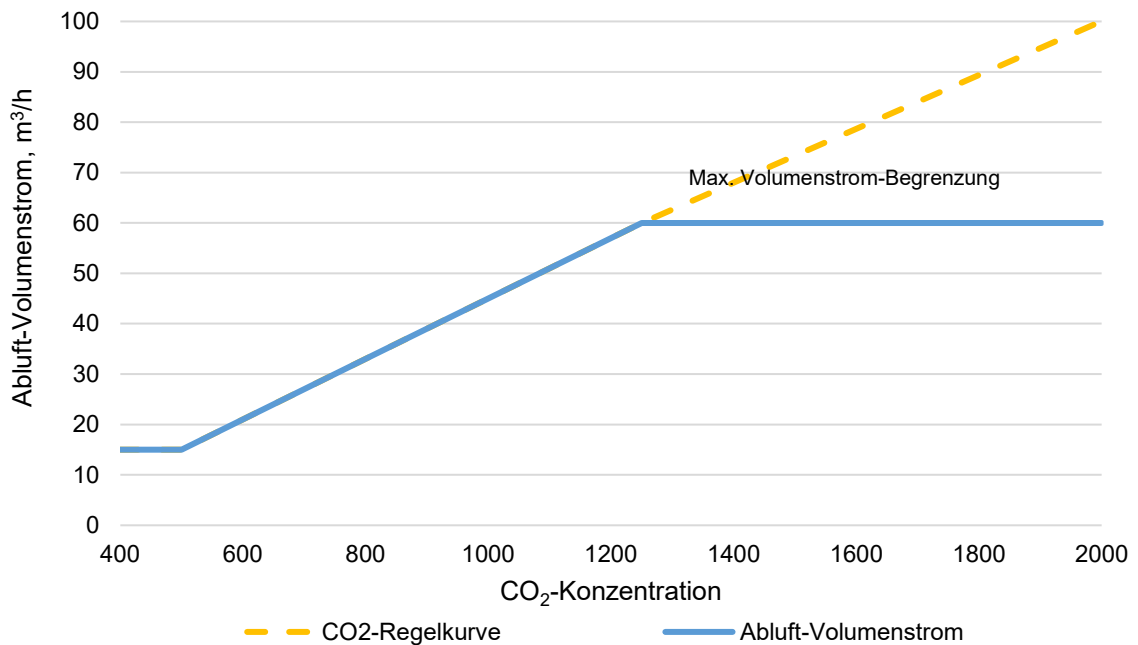


Abbildung 34 Auf der Grundlage der Testergebnisse vorgeschlagene Grundeinstellung der CO₂-Regelung des Abluftventilators: Regelkurve: X1 = 500 ppm, Y1 = 15%; X2 = 2000 ppm, Y2 = 100%; max. Volumenstrom-Begrenzung: 60%; min. Volumenstrom / Grundlüftung: 15%

Für Haus E wird ein Minergie-Zertifikat beantragt, woraus sich für die Inbetriebnahme der Abluftanlagen zusätzliche Anforderungen ergeben. Minergie fordert bei Abluftanlagen unter anderem die Einhaltung einer minimalen Abluftmenge von 30% des Nenn-Volumenstroms. Die Nenn-Volumenströme müssen daher im Rahmen der Inbetriebnahme an den Abluftventilatoren eingestellt sowie bei den Abluftventilatoren und den Aussenluftdurchlässen gemessen und im Luftmengenprotokoll festgehalten werden. Erst danach kann die tatsächlich vorgesehene CO₂-Regelung des Volumenstroms aktiviert werden.



4.7 Messergebnisse

4.7.1 Vorgehen

Die CO₂-geregelten Abluftanlagen der Häuser C, D und E wurden im Jahr 2023 installiert und in Betrieb genommen. Die Auslegung der Lüftungskomponenten von Haus E wurden so angepasst, dass die spezifischen Anforderungen für eine Minergie-Zertifizierung der Abluftanlage erfüllt werden. Die Strangschemata der Lüftungsanlagen der Häuser C, D und E sind im Anhang 3.1 abgebildet.

Die Regulierung der Anlagen ist, inklusive den Anforderungen aus dem P+D-Projekt, im Gebäudeautomation-Projektbeschrieb vom 23.07.2021¹ festgehalten. Die Kommunikation der einzelnen Gebäudeautomations-Verteiler mit den angeschlossenen Anlagen (Lüftungsanlagen, Wärmepumpe, Wetterstation) sowie die Gebäude- und Arealübergreifende Kommunikation erfolgen über BACnet/IP.

Zum Bedienen, Beobachten und Auswerten wird eine Managementebene mit integrierten Energiemanagement-Funktionen auf einem Server verwendet. Die Abluftanlagen sind eigenständig und autonom funktionsfähig.

Folgende Werte werden vom Gebäudeleitsystem aufgezeichnet und können gemeinsam oder ausgewählt in Listen- und/oder Diagrammform pro Wohnung, beziehungsweise Nasszelle oder als Gesamtübersicht abgerufen werden:

- Aussentemperatur, in °C
- CO₂-Konzentration in der Nasszelle, in ppm
- Raumtemperatur in der Nasszelle, in °C
- Raumtemperatur Sollwert, in °C
- Relative Raumluftfeuchte in der Nasszelle, in % r.F.
- Ventilator Drehzahl und daraus abgeleitet Abluftvolumenstrom, in m³/h
- Aktive Präsenzschtaltung, True/False
- Aktive Nachtauskühlung, True/False
- Datum/Zeit

Um die Raumluftkonditionen auch in Schlaf- und Wohnzimmern erfassen zu können, sind zusätzlich mobile Funksensoren (miro Insight von miromico) in ausgewählten Wohnungen installiert. Folgende Messdaten werden via LoraWAN in die Cloud übermittelt, periodisch als csv-Datei zwischengespeichert und in anonymisierter Form ausgewertet:

- CO₂-Konzentration im Schlaf- und Wohnzimmer, in ppm
- Raumlufttemperatur im Schlaf- und Wohnzimmer, in °C
- Relative Raumluftfeuchte im Schlaf- und Wohnzimmer, in % r.F.

Die Planung der Anzahl Sensoren basiert auf 10 Sensoren pro Haus mit Ausnahme von Haus E (Prüfung Minergie-Anforderungen) mit 30 Sensoren.

¹ Dokumentbezeichnung: P2018063-06-02-Projektbeschrieb GA-100



Tabelle 17 Anzahl mobile Raumluftsensoren in Schlafzimmern pro Haus

Haus	Lüftungssystem	Anzahl Wohnungen Total	Anzahl Wohnungen mit Sensoren	Anzahl Schlafzimmer mit Sensoren
A	Abluftanlage mit Feuchteregelung	41	2	3
B	Abluftanlage mit Feuchteregelung	34	4	5
C	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	36	4	6
D	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	12	3	8
E	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	32	12	17

Die Teilnahme an den zusätzlichen mobilen Messungen ist freiwillig. Die Suche nach interessierten Bewohnenden erfolgte über die Partizipationsstelle der Baugenossenschaft mehr als wohnen, über Mund-zu-Mund Information durch bereits involvierte Teilnehmende sowie über die Gruppenchats der einzelnen Häuser. Bei Interesse erfolgt die Installation der mobilen Funksensoren in Schlaf- und Wohnzimmern durch Lemon Consult.

Hinsichtlich der Auswertung muss in zwei Bereiche unterteilt werden. Einerseits können Auswertungen über alle Wohnungen der Häuser A, B, C, D und E gemacht werden. Andererseits können für die Wohnungen in den Häusern C, D und E zusätzliche Auswertungen infolge der festinstallierten Sensoren erfolgen.

Wichtigste Erkenntnis aus allen Wohnungen ist der mechanisch geförderte Abluftvolumenstrom, berechnet basierend auf der gemessenen Ventilator Drehzahl und der im Vorfeld ermittelten Kennlinie (siehe Tabelle 16). Anhand der ermittelten Kennlinie kann auch der elektrische Energieverbrauch der Abluftventilatoren berechnet werden. Ausgewertet werden unter anderem die Unterschiede zwischen der Regelung nach Raumluftfeuchte und der Regelung nach der Luftqualität, wobei für ersteres Annahmen getroffen werden müssen, da nicht alle Parameter gemessen werden können. Weiter kann der lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch basierend auf der Aussentemperatur, der Temperatur in der Nasszelle sowie dem Luftvolumenstrom ermittelt werden. Der lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch kann zudem mit dem je Wohnung bzw. je Haus gemessenen Heizwärmeverbrauch verglichen werden. Letzterer beinhaltet auch die Transmissionsverluste und die durch Fensterlüftung verursachten Wärmeverluste.

Die Parameter Raumluftqualität, Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur werden in Bezug auf die Anzahl Zimmer (oder die Anzahl ALD), Anzahl Bewohnende und allenfalls unter Einbezug der Präsenzschtaltung im Bad in einer statistischen Verteilung bewertet. Die statistische Verteilung der gemessenen Grössen erfolgt inkl. Medianwerte, oberem und unterem Quantil (z.B. 10 % und 90 %), den Höchst- und Tiefstwerten sowie in Bezug auf die Klassen des Innenraumklimas gemäss SIA 382/1:2025.

In den Räumen mit zusätzlichen Sensoren erfolgt die Bewertung der statistischen Verteilung der Raumluftqualität, der Raumlufttemperatur sowie der Raumluftfeuchte im Wohn- und Schlafzimmer im Verhältnis zu den gemessenen Werten in der Nasszelle. In der Bewertung wird zudem die Sensitivität nach Anzahl Zimmern (resp. Anzahl ALD) und Anzahl Bewohnende berücksichtigt.

Für repräsentative Tage und Wohnungen wird eine zeitliche Verlaufskurve der Messpunkte Raumluftqualität, Raumtemperatur und Raumfeuchte über 24-48 Stunden dargestellt.

Weiter soll ein Vergleich zwischen der Regelung nach der Raumluftfeuchte und der Raumlufttemperatur in Sachen Luftqualität, Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur erfolgen. In Sachen Betriebsenergie wäre es wünschenswert, jedoch sind für die Häuser A und B keine Messungen der Betriebsenergie, sondern lediglich Abschätzungen möglich.



Die Leistungskennlinie und Lärmemissionen der Abluftventilatoren wurde durch Messung in zwei Wohnungen gegenüber der Testanlage, siehe Tabelle 16, validiert. Die vor Ort-Messungen haben eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen an der Testanlage ergeben.

4.7.2 Raumlufqualität im Winterhalbjahr

Im Zeitraum Januar bis Juni 2024 konnten die meisten der 25 Wohnungen mit Sensoren ausgerüstet werden. Einzelne Wohnungen sind im Herbst dazugekommen. **Die Auswerteperiode wurde daher auf den Zeitraum Oktober 2024 bis März 2025 gelegt**, da insbesondere das Verhalten im Winter von Interesse ist.

Datenset Hobelwerk Areal

In den nachfolgenden Abbildungen ist die Verteilung der Raumlufqualität für die Periode Oktober 2024-März 2025 dargestellt. Für die Schlafzimmer werden jeweils die Zeiträume von 23 Uhr bis 7 Uhr betrachtet. Für eine detaillierte Betrachtung der Wohnzimmer sowie der Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur wird auf den Anhang 3.2 verwiesen.

Die Boxplots stellen jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil mit dem Medianwert dar. Dazu wird das Minimum und das Maximum dargestellt. Die Bewertung nach IDA 1 bis IDA 4 erfolgt gemäss SIA 382/1:2025 gemäss Tabelle 18.

Tabelle 18 Klassifizierung der Raumlufqualität (IDA) bezüglich CO₂-Konzentration gemäss SIA 382/1:2025

Kategorie		Prozentsatz Unzufriedener	CO ₂ -Konzentration
IDA 1 (CO ₂)	Raumluf mit hoher Luftqualität	<= 17 %	Bis 970 ppm
IDA 2 (CO ₂)	Raumluf mit mittlerer Luftqualität	> 17 % ... <=23 %	970 – 1220 ppm
IDA 3 (CO ₂)	Raumluf mit moderater Luftqualität	> 23% ... <= 34 %	1220 – 1770 ppm
IDA 4 (CO ₂)	Raumluf mit niedriger Luftqualität	> 34%	Ab 1770 ppm

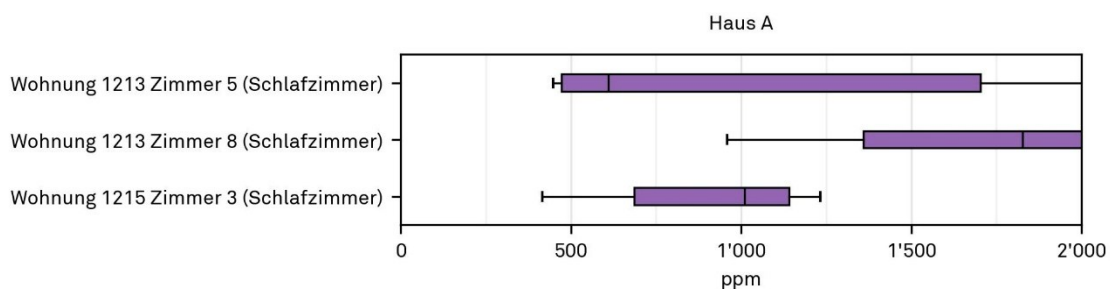


Abbildung 35 Schlafzimmer Hobelwerk Haus A, Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO₂-Konzentration

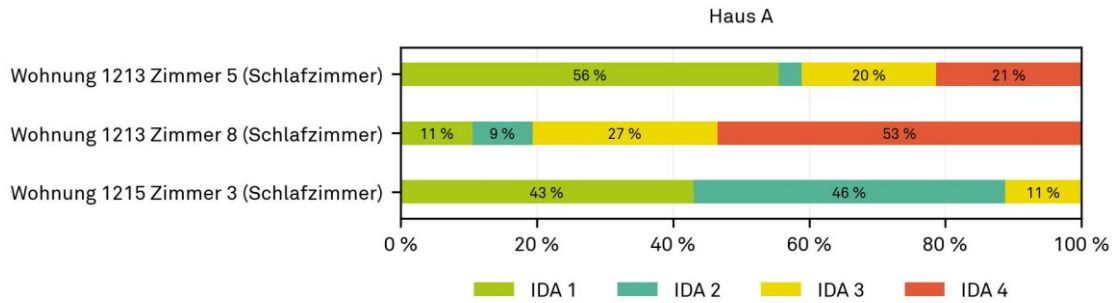


Abbildung 36 Schlafzimmer Hobelwerk Haus A, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität

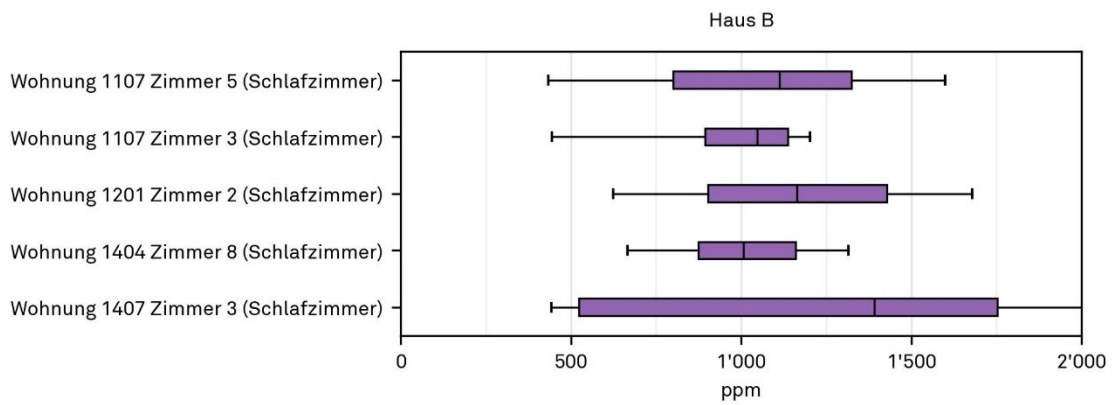


Abbildung 37 Schlafzimmer Hobelwerk Haus B Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO₂-Konzentration

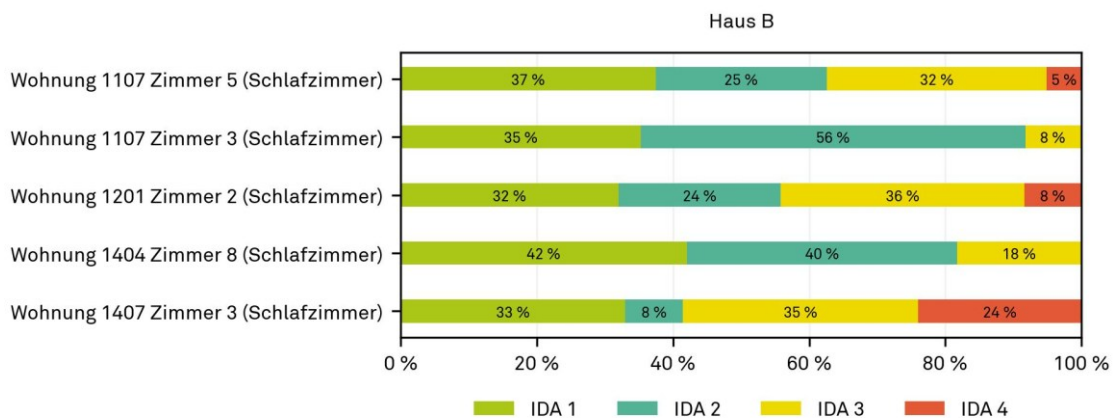


Abbildung 38 Schlafzimmer Hobelwerk Haus B, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität

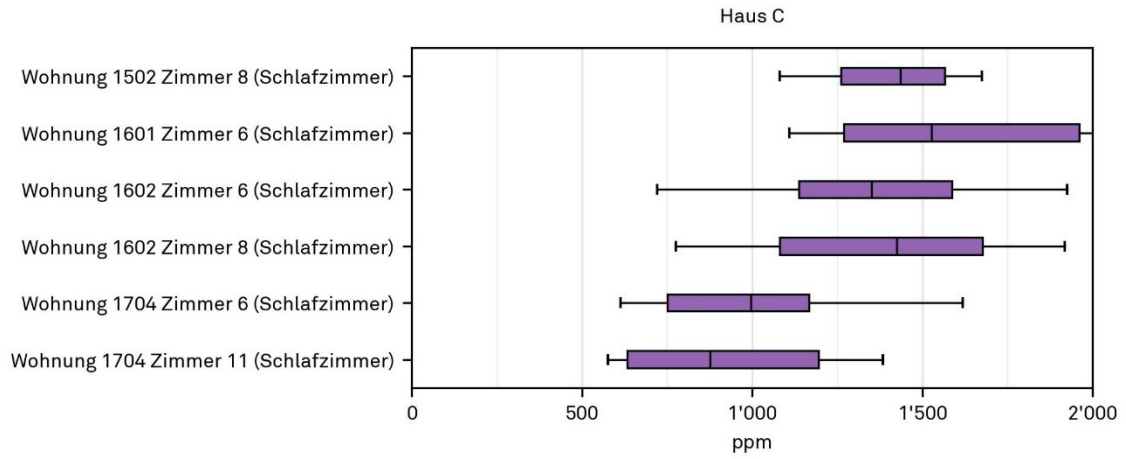


Abbildung 39 Schlafzimmer Hobelwerk Haus C Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO₂-Konzentration

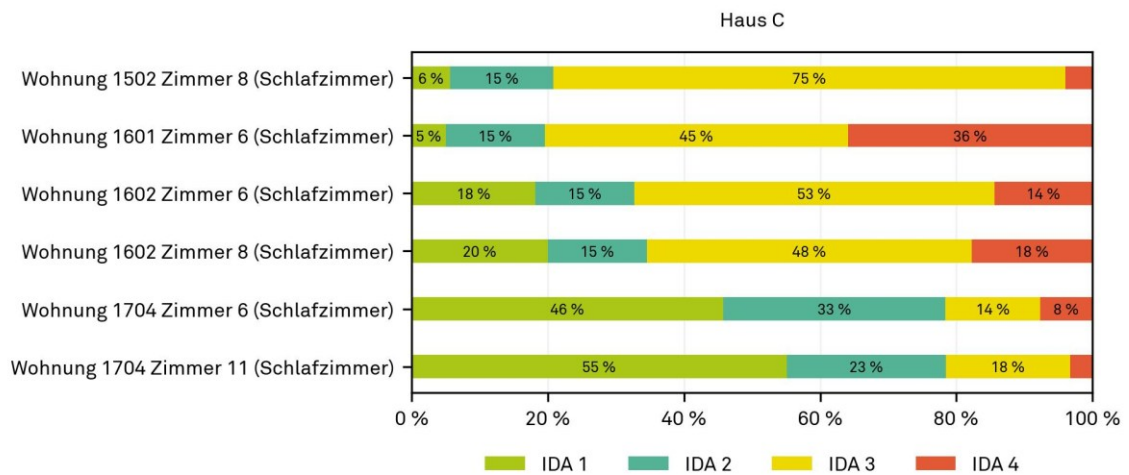


Abbildung 40 Schlafzimmer Hobelwerk Haus C, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität

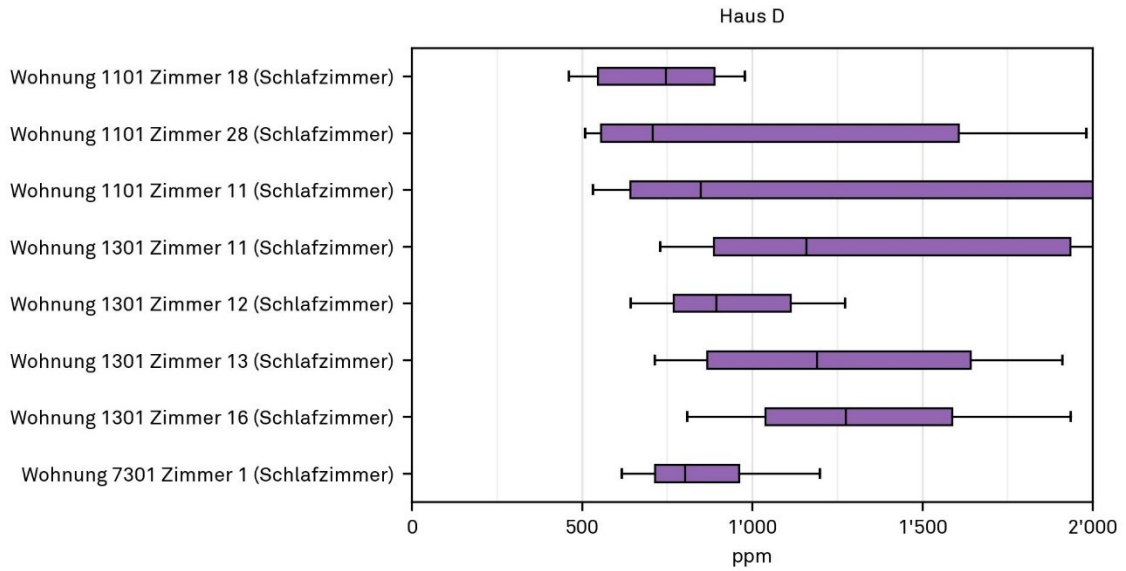


Abbildung 41 Schlafzimmer Hobelwerk Haus D Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO₂-Konzentration

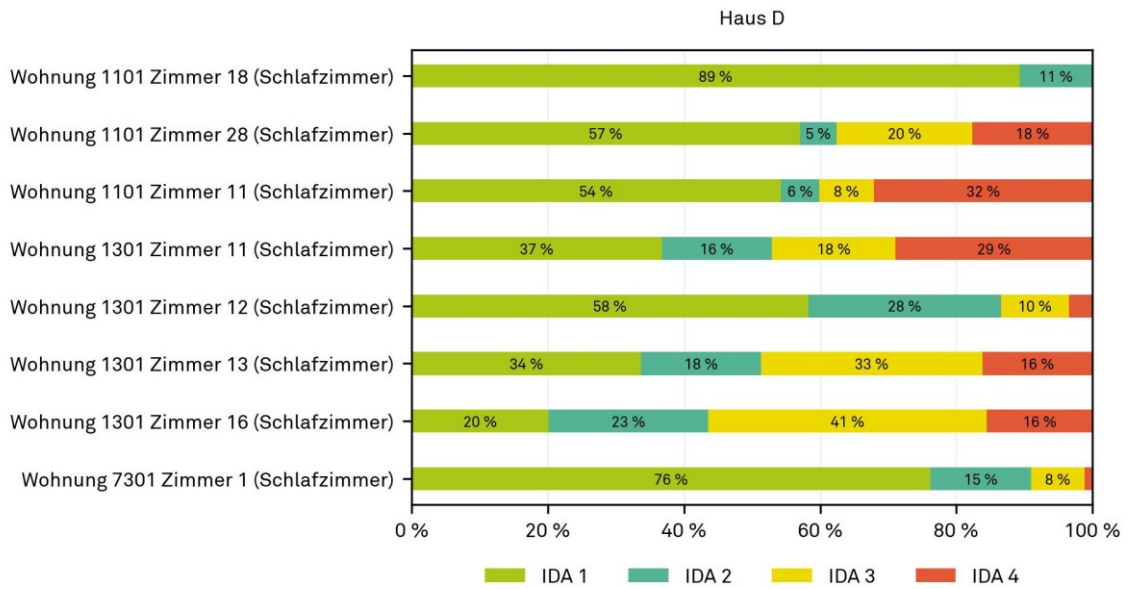


Abbildung 42 Schlafzimmer Hobelwerk Haus D, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität

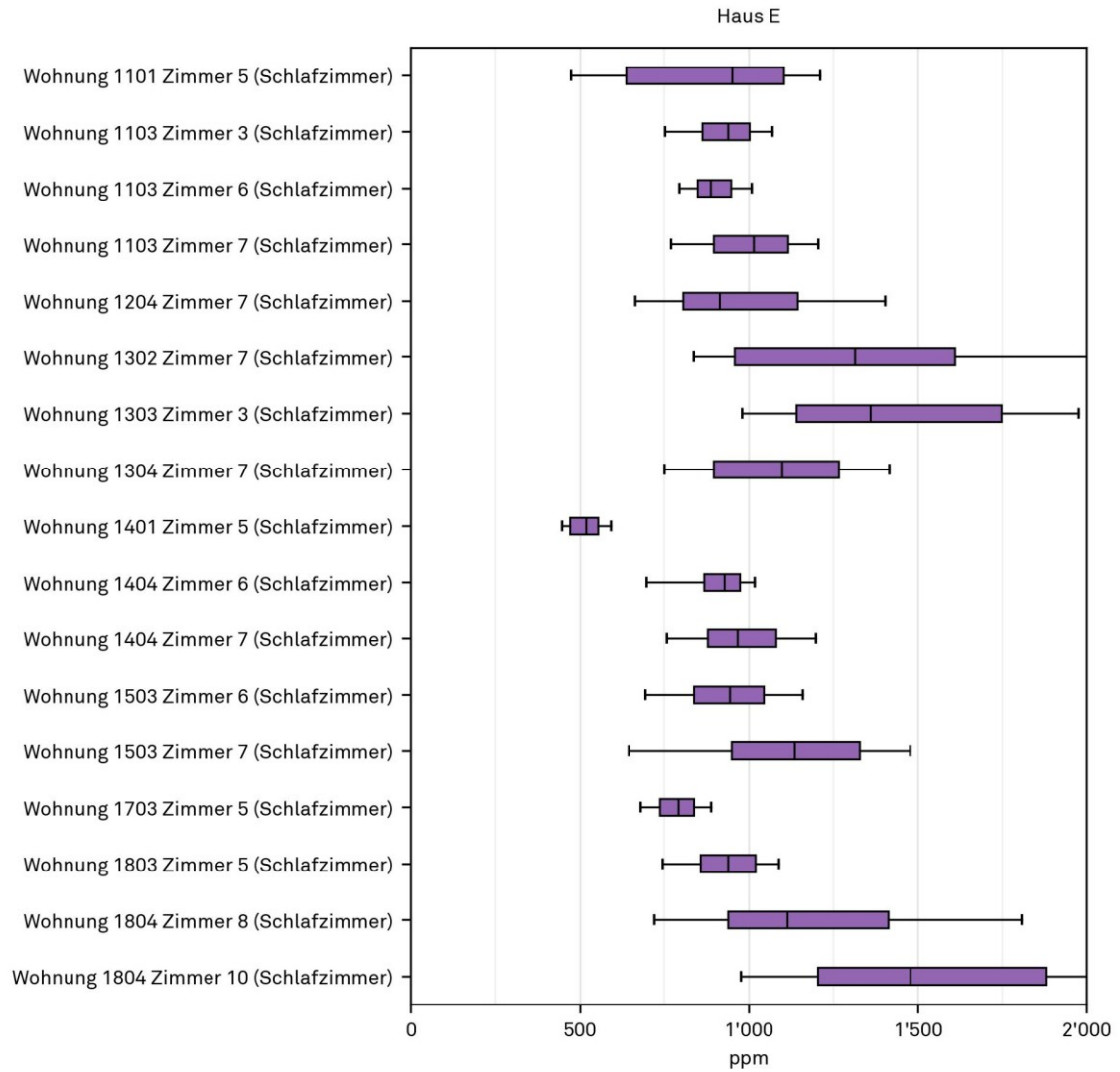


Abbildung 43 Schlafzimmer Hobelwerk Haus E Heizperiode 2024/2025 - Verteilung der CO₂-Konzentration

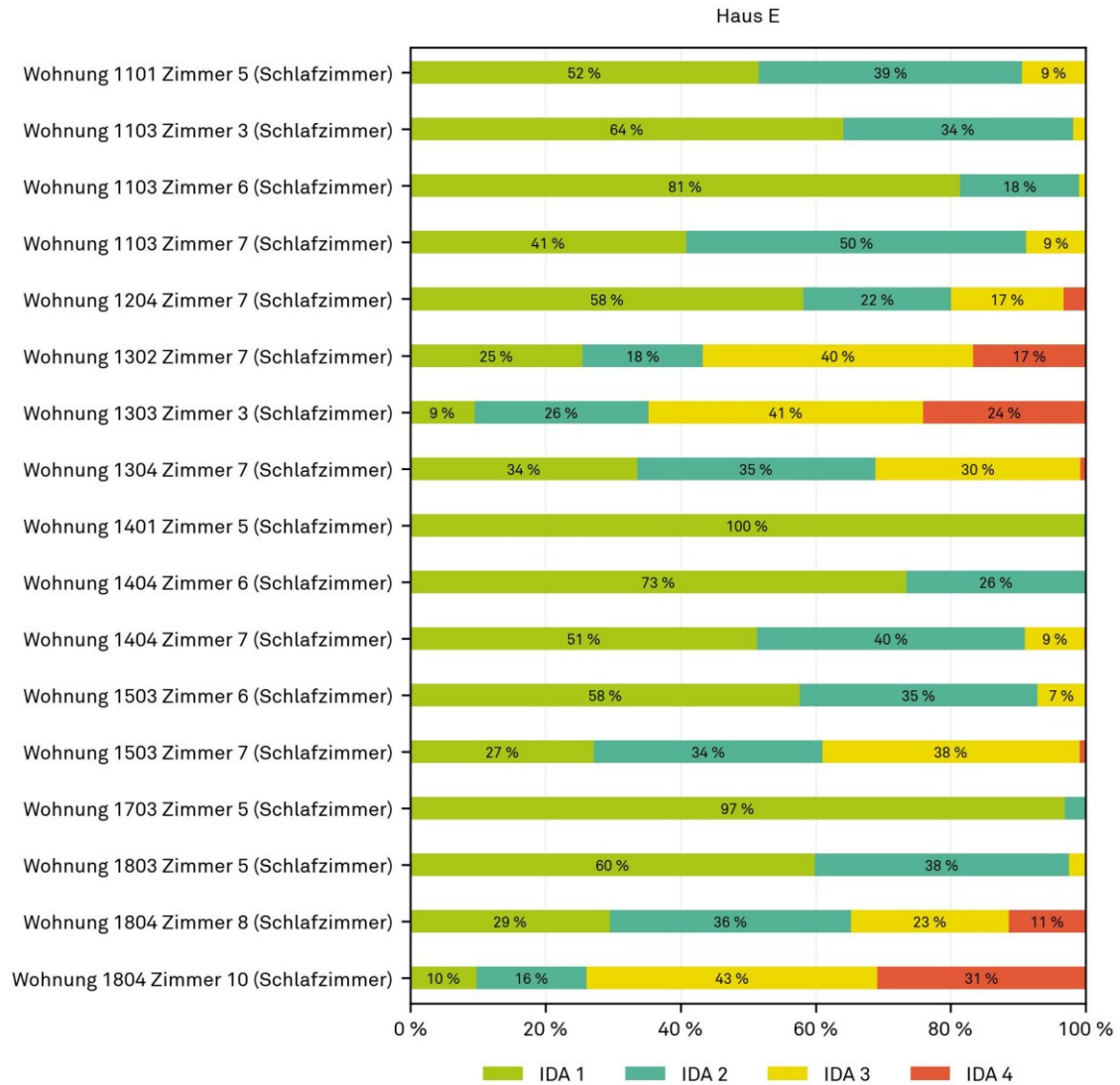


Abbildung 44 Schlafzimmer Hobelwerk Haus E, Heizperiode 2024/2025 – Kategorie der Luftqualität



Datenset Hunziker Areal

Die nachfolgenden Diagramme zeigen Daten der Heizperiode 2015/2016 vom Hunziker Areal.

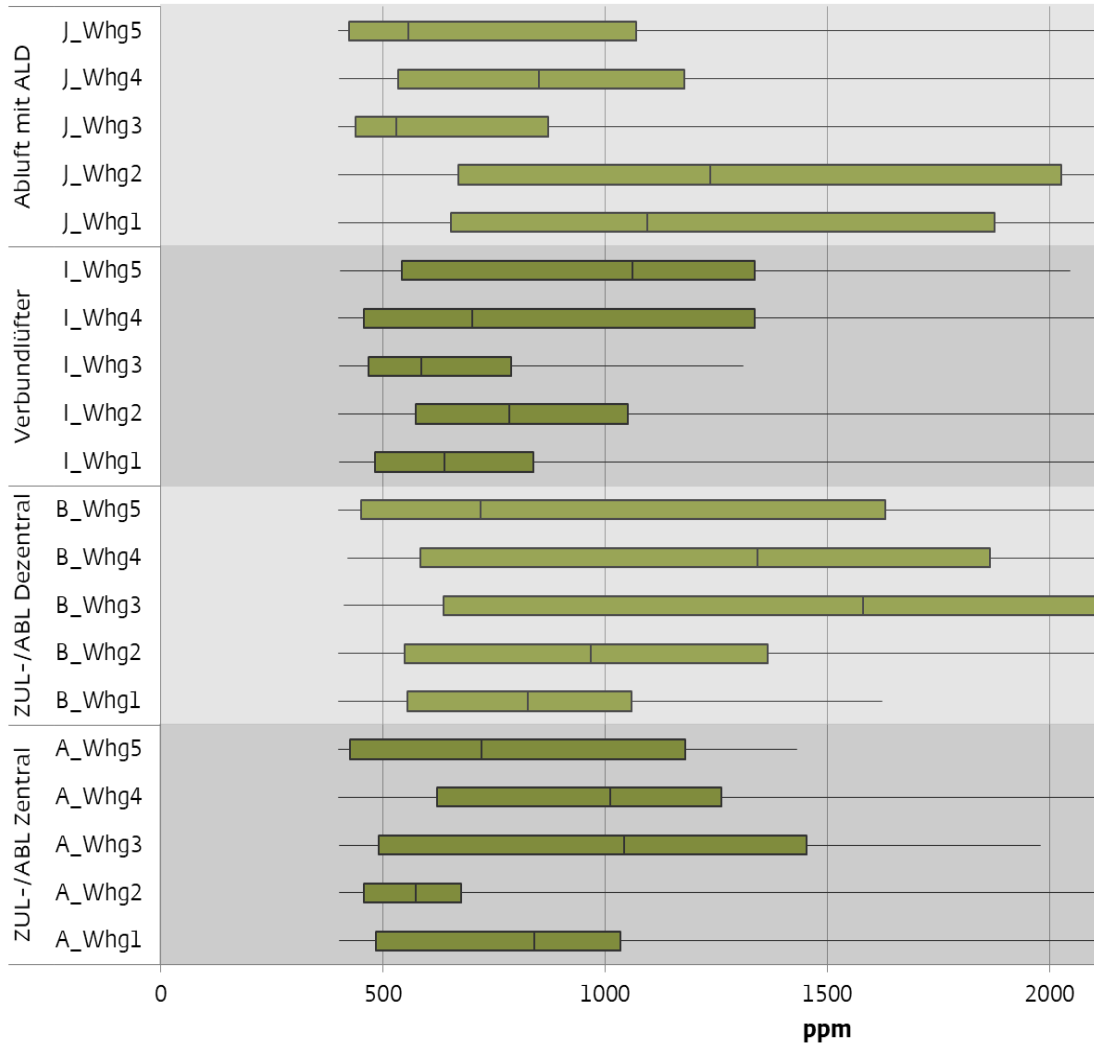


Abbildung 45 Schlafzimmer Hunziker Areal, Heizperiode 2015/2016 - Verteilung der CO₂-Konzentration



Abbildung 46 Schlafzimmer Hunziker Areal, Heizperiode 2015/2016 – Kategorie der Luftqualität;
Hinweis: der Farbcode ist nicht deckungsgleich mit dem Datensatz Hobelwerk



System- und Arealvergleich

Tabelle 19 Medianwerte der CO₂-Konzentration der untersuchten Lüftungssysteme; gemessen im Schlafzimmer nachts von 23 bis 07 Uhr

Haus	Lüftungssystem	Bereich Median (ppm)	Mittlerer Median (ppm)
Hobelwerk Haus A	Abluftanlage mit Feuchteregelung	610-1826	1149
Hobelwerk Haus B	Abluftanlage mit Feuchteregelung	1006-1392	1144
Hobelwerk Haus C	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	877-1528	1269
Hobelwerk Haus D	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	707-1275	952
Hobelwerk Haus E	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	518-1477	1017
Hobelwerk Häuser A,B	Abluftanlage mit Feuchteregelung	610-1826	1146
Hobelwerk Häuser C,D,E	Abluftanlage mit CO ₂ -Regelung	518-1528	1049
Hunziker Areal Häuser C,D,E,G,H,J,K,L,M	Abluft mit ALD Konstantvolumenstrom	529 - 1235	853
Hunziker Areal Haus I	Verbundlüfter	585 - 1061	754
Hunziker Areal Haus B	ZUL-/ABL Dezentral	719 - 1580	1087
Hunziker Areal Häuser A,F	ZUL-/ABL Zentral	573 - 1043	837

In Haus A können zwei von drei Schlafzimmer als nicht repräsentativ betrachtet werden. Der tiefe Medianwert bei hoher Streuung zwischen den 10% und 90% Quantil kann mit einem teilweisen Leerstand erklärt werden.

Die Median-Werte von Haus B liegen am nächsten beieinander.

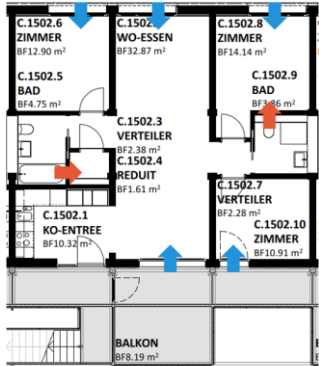
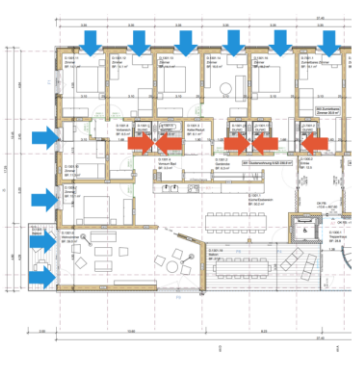

In Haus C wurde aufgrund von Rückmeldungen der Bewohnenden vermutet, dass infolge des Bahnlärms die Aussenluftdurchlässe mehr geschlossen werden als in anderen Häusern. Diese These wird aber in der Befragung (Resultate in Kapitel 0) nicht bestätigt. Bei der statistischen Verteilung der CO₂-Konzentration in den Bädern hat es wie in Haus E Ausreisser, aber nicht im Ausmass wie in Haus E.

In Haus D sind die Resultate in mehreren untersuchten Schlafzimmern aufgrund eines langanhaltenden Fehlers im Gebäudeleitsystem schlechter ausgefallen. Der tiefe Median bei hoher Streuung zwischen den 10% und 90% Quantil könnte auch auf einem teilweisen Leerstand beruhen.



Vergleich der Grundrisse der drei Häuser C,D,E

Tabelle 20 Typische Wohnungsgrundrisse der Häuser C,D,E im Hobelwerk

Haus C	Haus D	Haus E
4.5 Zimmer Wohnung	Cluster Wohnung	4.5 Zimmer Wohnung
		

Detailanalyse Haus E

Interessant sind die Unterschiede im Haus E, welche sich weder durch Aussenlärm noch durch Fehler im Leitsystem erklären lassen. Zum besseren Verständnis wurden einzelne Fragen der Befragung bei allen teilnehmenden Wohnungen noch nachbefragt und in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Dazu ist in Abbildung 47 die Boxplots der statistischen Verteilung der CO₂-Konzentration aller Bäder dargestellt. Es ist feststellbar, dass die Verteilung trotz gleicher Regelung sehr unterschiedlich ist. Mehrere 10% Quantile liegen über 1000 ppm was bei einer funktionierenden Regelung nicht vorkommen sollte. Eine Detailbetrachtung zeigt, dass der Lüfter überproportional oft auf Vollast läuft, was durch den Lichtschalter oder hohe CO₂-Konzentrationen > 2000 ppm ausgelöst werden kann. Die Regelkurve wird grundsätzlich eingehalten, was demnach auf eine technische Ursache in der Lüftung (z.B. zugesetzte Filter) hinweisen könnte.

Weitere mögliche Gründe für die hohe CO₂-Konzentration in den markierten Wohnungen können geschlossene Aussenluftdurchlässe, eine hohe Belegung (z.B. Kinder, die bei den Eltern schlafen) sowie untergeordnet eine geschlossene Schlafzimmertür sein. Weitere Wohnungen mit einem hohen Median der CO₂-Konzentration im Bad sind noch nicht mit mobilen CO₂-Sensoren in den dazugehörigen Schlafzimmern ausgerüstet. Der Ursache der in einzelnen Wohnungen dauerhaft hohen CO₂-Konzentrationen soll im weiteren Projektverlauf nachgegangen werden.



Tabelle 21 Detailanalyse Haus E, rot markierte Wohnungen haben mehr als 5% Werte im Bereich von IDA4, gelb markierte Wohnungen haben mehr als 10% Werte im Bereich von IDA3

Wohnung	Schlafzimmertüre	Lüftungsschlitze	Fenster nachts	Median CO ₂ -Konzentration Bad	Person
1101	Normalerweise offen	Mehrheitlich offen	Keine Aussage	614	2 Erwachsene (EW)
1103	Normalerweise zu	Teils offen	Im Winter geschlossen, Übergangszeit und Sommer offen	884/922	2 EW und 2 Kinder (K)
1204	Keine Rückmeldung			920/518	2 EW und 1 K
1302	Zu	Mehrheitlich geschlossen	Im Winter geschlossen	692/878	1 EW und 2 K
1303	Normalerweise offen	Mehrheitlich geschlossen	Im Winter geschlossen	791/1194	2 EW und 1 K
1304	Keine Rückmeldung			828/715	2 EW und 1 K
1401	Normalerweise zu	Keine Aussage	Fenster zu jeder Jahreszeit immer offen	GLS Fehler	1 EW und 1 K
1404	Normalerweise ein Spalt offen	Geschlossen	Im Winter geschlossen	841/515	2 EW und 1 K
1503	Normalerweise offen	Mehrheitlich offen	Winter geschlossen, Übergangszeit/Sommer häufig offen	680/684	2 EW und 1 K
1703	Normalerweise offen	Teils offen	Winter immer geschlossen	622	1 EW
1803	Normalerweise offen	1 von 2 Schlitze offen	Winter zu	786	1 EW
1804	Normalerweise zu	1 von 2 Schlitzen offen, aber Vorhang davor	Im Winter geschlossen	820/764	2 EW und 2 K

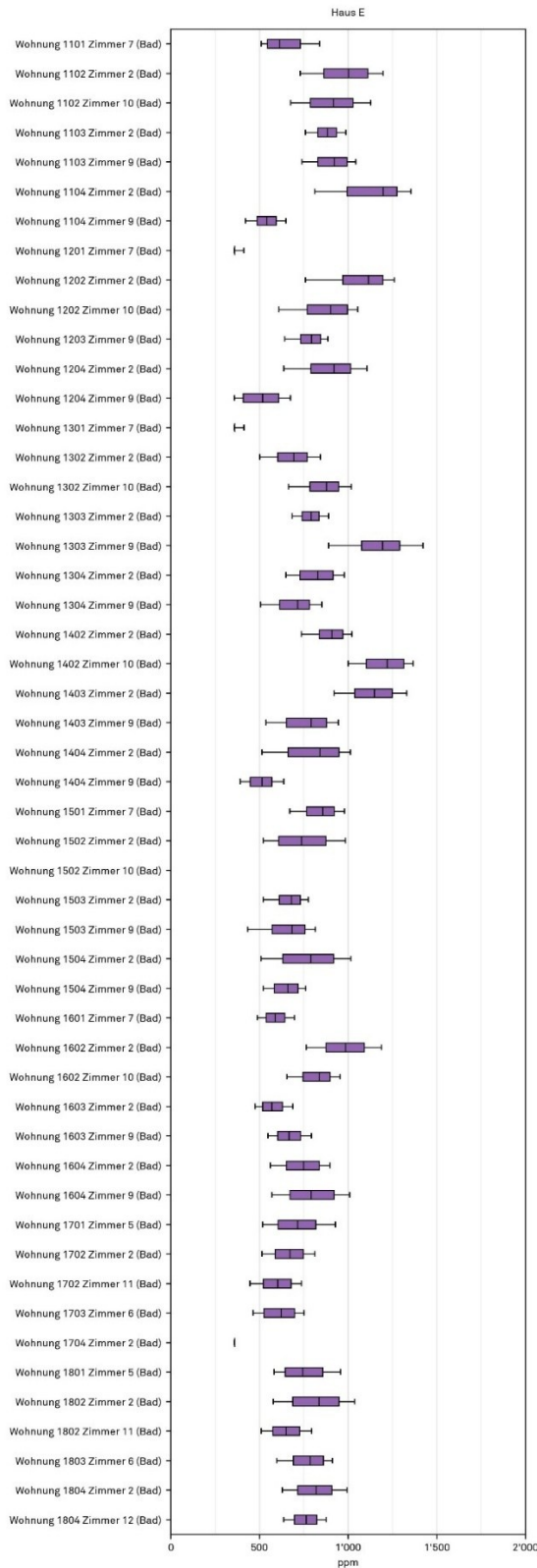


Abbildung 47 Hobelwerk Haus E, Badezimmer, Heizperiode 2015/2016 – Verteilung der CO₂-Konzentration



4.8 Abluft-Volumenstrom und Ventilatorenergie

Der Abluft-Volumenstrom pro Wohnung kann anhand der vom Leitsystem aufgezeichneten 0 – 10 V Stellsignale zur Volumenstromregelung der einzelnen Abluftventilatoren berechnet werden. Die Verteilung der Median-Werte des Abluft-Volumenstroms der einzelnen Wohnungen pro Haus ist in Abbildung 48 im Vergleich zu den Messwerten aus dem Hunziker Areal dargestellt.

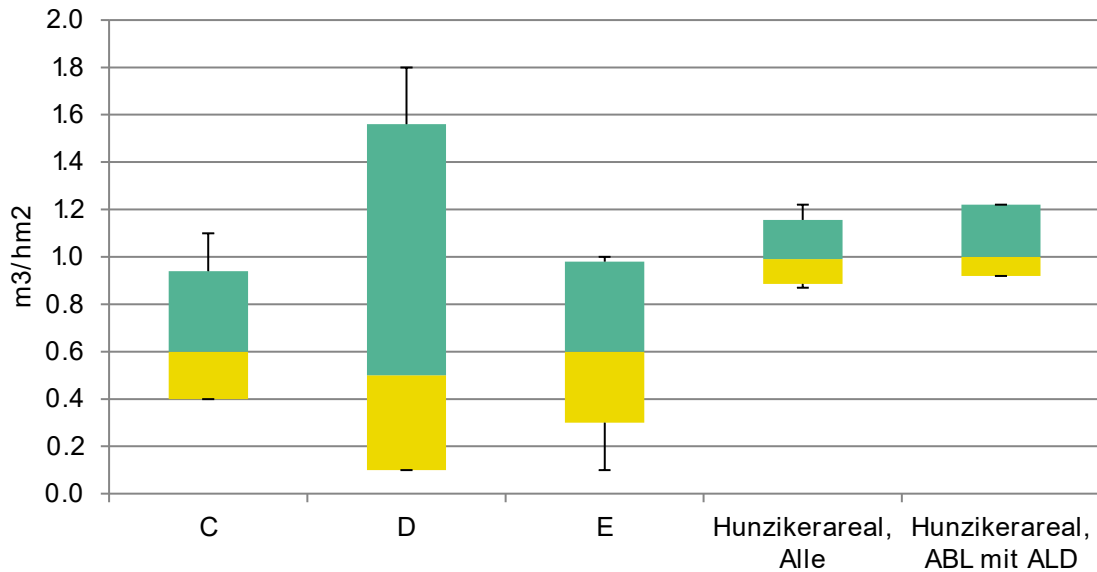


Abbildung 48 Abluft-Volumenstrom pro Wohnfläche (HNF), im Vergleich zum Hunziker Areal

Tabelle 22 Median-Werte des Abluft-Volumenstroms aller Wohnungen pro Haus

Bezeichnung	Median des Abluft-Volumenstrom aller Wohnungen pro Haus	
	bezogen auf die Wohnfläche (HNF), in m³/(hm²)	bezogen auf die Energiebezugsfläche Wohnen (EBF Wohnen), in m³/(hm²)
Haus C	0.60	0.47
Haus D	0.50	0.39
Haus E	0.60	0.43
Mittelwert Häuser C,D,E	0.58	0.43
Hunziker Areal, alle Häuser	0.99	0.93
Hunziker Areal, ABL mit ALD	1.38	0.95
Standardwert SIA 380/1:2016 für Wohngebäude mit Abluftanlagen		0.91

Der Median des Aussenluftvolumenstroms auf dem Hobelwerk Areal liegt 40 bis 50 % unter dem Referenzprojekt Hunziker Areal. Dies führt zu entsprechenden Energieeinsparungen. Auch das 90% Quantil liegt noch unter dem Median des Referenzprojekts. Dies zeigt, dass bei Bedarf der Aussenluftvolumenstrom erhöht wird. Die Ausreisser in Haus D sind durch die Atelierräume zu erklären, welche auch tagsüber belegt sind und dadurch zu einem höheren mittleren Aussenluftvolumenstrom führen.



Das tiefe 10% Quantil dagegen liegt an einer längeren Periode einer inaktiven Regelung. Die Ergebnisse von Haus D sind daher /mit Vorsicht zu interpretieren. Schlussfolgernd kann von bei einer CO₂-Regelung der Abluftventilatoren gegenüber einer Konstantvolumenstromregelung von einem 40 bis 50% tieferen durchschnittlichen Abluft-Volumenstrom ausgegangen werden.

Anhand des stündlich pro Ventilator ermittelten Abluft-Volumenstroms und der Leistungskennlinie des Abluft-Ventilators gemäss Tabelle 16 kann der elektrische Energieverbrauch der Ventilatoren pro Wohnung berechnet werden. Die Verteilung der Median-Werte des Elektrizitätsverbrauchs der einzelnen Wohnungen pro Haus ist in Abbildung 48 dargestellt.

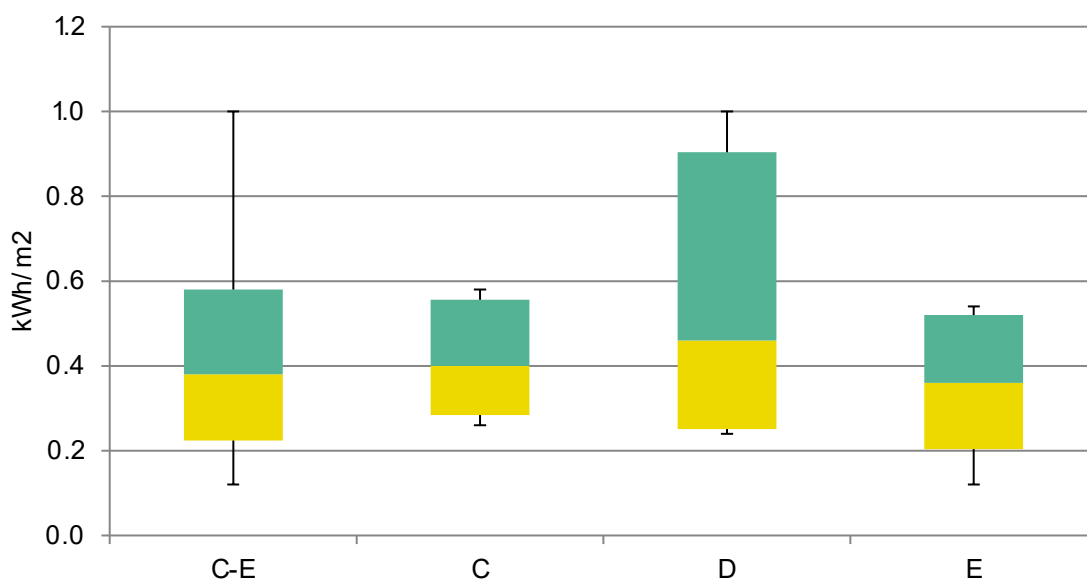


Abbildung 49 Verteilung des Elektrizitätsverbrauchs pro Wohnung pro Haus, bezogen auf die Wohnfläche (HNF)

Tabelle 23 Median-Werte des Elektrizitätsverbrauchs aller Wohnungen pro Haus

Bezeichnung	Elektrizitätsverbrauch der Abluftventilatoren, Median aller Wohnungen pro Haus	
	bezogen auf die Wohnfläche (HNF), in kWh/(m ² a)	bezogen auf die Energiebezugsfläche Wohnen (EBF Wohnen), in kWh/(m ² a)
Haus C	0.40	0.32
Haus D	0.46	0.35
Haus E	0.36	0.26
Mittelwert Häuser C,D,E	0.40	0.30
Hunziker Areal, Abluft mit ALD	1.36	0.95
Standardwert SIA 390/1:2025 * für Wohngebäude mit Abluftanlagen		1.00

* Im Standardwert gemäss SIA 390/1 ist zusätzlich der Elektrizitätsbedarf der Kellerlüftung enthalten

Auch bei dieser Untersuchung sind die Ergebnisse von Haus D mit Vorsicht zu interpretieren und es besteht Bedarf, diese mittels einer erneuten Messung zu überprüfen.



Anhand des stündlich pro Ventilator ermittelten Abluft-Volumenstroms, der gemessenen Ablufttemperatur und der Aussentemperatur kann für das Winterhalbjahr der lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch pro Wohnung berechnet werden. Die Verteilung der Median-Werte des Heizwärmeverbrauchs der einzelnen Wohnungen pro Haus ist in Abbildung 50 dargestellt.

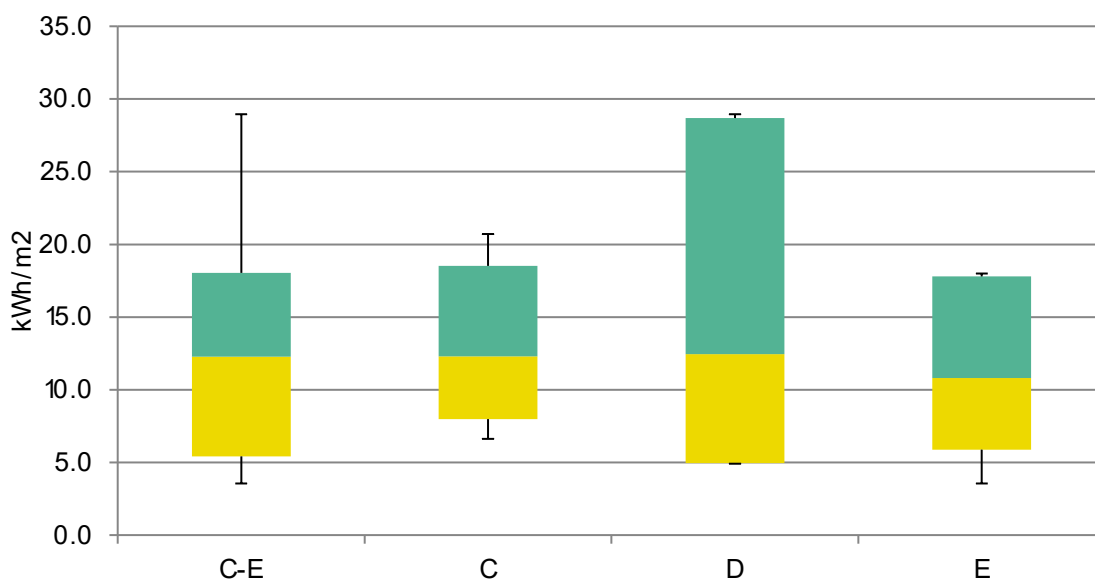


Abbildung 50 Verteilung des lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauchs pro Wohnung pro Haus, bezogen auf die Wohnfläche (HNF)

Tabelle 24 Median-Werte des lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauchs aller Wohnungen pro Haus

Bezeichnung	Lüftungsbedingter Heizwärmeverbrauch, Median aller Wohnung pro Haus	
	bezogen auf die Wohnfläche (HNF), in kWh/(m² a)	bezogen auf die Energiebezugsfläche Wohnen (EBF Wohnen), in kWh/(m² a)
Haus C	12.30	9.7
Haus D	12.46	9.6
Haus E	10.81	7.8
Mittelwert Häuser C,D,E	11.7	8.8

Standardwert SIA 380/1:2016 * für Wohngebäude mit Abluftanlagen

27.3

* Der Standard- Aussenluft-Volumenstrom wird bei Abluftanlagen um 30% erhöht (0.91 statt 0.70 m³/(hm²))

Die Messwerte des lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauchs der Häuser C,D,E liegen bei rund 33% des aus SIA 380/1:2016 abgeleiteten Standardwerts.



4.9 Anzahl nachts geöffneter Fenster

4.9.1 Methodik

Ergänzend zur Messkampagne in den Wohnungen wird mittels Thermographie-Aufnahmen punktuell untersucht, wie viele Fenster in einer besonders kalten Nacht ($< 0^{\circ}\text{C}$) offen sind. Die Aufnahmen wurden am 14. Januar 2025 frühmorgens bei einer Aussentemperatur von -5°C durchgeführt



Abbildung 51 Aufnahme mittels Wärmebildkamera (14. Januar 2025)

4.9.2 Ergebnisse Thermographie-Aufnahmen

Die Auswertung der Thermographie-Aufnahmen ergeben den prozentualen Anteil offener Fenster gemäss



Tabelle 25. Es ist feststellbar, dass die Häuser C und E besser abschneiden als die Häuser A und B. Haus D fällt stark zurück, da in diesem Zeitraum die Sensoren im Bad defekt waren und entsprechend lief die Lüftung nur in einem Minimalbetrieb. Im Vergleich zu den Untersuchungen auf dem Hunziker Areal liegt der gewichtete Mittelwert der Häuser C und E tiefer als der gewichtete Mittelwert aller Häuser auf dem Hunziker Areal sowie aller Häuser mit einer Abluftlüftung auf dem Hunziker Areal.

Im Allgemeinen ist darauf hinzuweisen, dass die vorliegenden Werte gegenüber anderen Studien des Fraunhofer Instituts (2010) mit Werten 9% bei 0 °C und vom AHB (2012) mit Werten von 6.4% für Abluftanlagen um 0°C bereits deutlich tiefer liegen.



Tabelle 25 Anteil geöffneter Fenster nachts bei tiefer Aussentemperatur: -5°C

Gebäude	%-offene Fenster	Bemerkungen
Haus A	1.44	
Haus B	4.69	
Haus C	0.00	
Haus D	12.20	CO ₂ -Sensoren im Bad defekt
Haus E	1.25	
Mittelwert Haus A und Haus B	3.00	
Mittelwert Haus C und Haus E	0.61	
Mittelwert Hunziker Areal (Ta -3.0 °C und Ta -6.4 °C)	0.86	
Mittelwert Hunziker Areal (Ta -3.0 °C und Ta -6.4 °C) bei Gebäuden mit einer Abluftlüftung mit ALD	0.73	
Hunziker Areal, Haus B (Dezentrale Zu/Abluft)	0.47	



4.10 Lebenszykluskosten und Treibhausgasemissionen

Die Investitions- und Lebenszykluskosten sowie die Treibhausgasemissionen der im Hobelwerk verbauten Abluflösungen werden im Folgenden mit den Ergebnissen aus dem Hunziker Areal [5] verglichen. Insgesamt werden die Ergebnisse von fünf Lüftungssystemen untersucht, zwei Systeme mit zentralen bzw. dezentralen Zu-/Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung sowie drei Systeme mit Abluftanlagen mit unterschiedlicher Volumenstromregelung (siehe Tabelle 30).

Tabelle 26 Lüftungssysteme im Hunziker Areal (HA) und im Hobelwerk (HOB)

Lüftungssysteme	Umsetzung Areal / Haus	in Volumenstromregelung	Volumenstrom* m ³ /(m ² h)	Quelle
Zu-/Abluft zentral	HA / A,F,I	konstant	0.88	[5] **
Zu-/Abluft dezentral	HA / B	3-stufig zeitgesteuert	0.80	[5] **
Abluft Dauerbetrieb zentral	HA / C,D,E,G,H,J,K,L	konstant	0.95	[5] **
Abluft Feuchte dezentral	HOB / A,B	GL + Lichtschalter + Feuchtesensor	0.13	geschätzt ***
Abluft CO ₂ dezentral	HOB / C,D,E	GL + Lichtschalter + CO ₂ -Sensor	0.43	siehe Tabelle 22

Abkürzungen: HA = Hunziker Areal; HOB = Hobelwerk; GL = Grundlüftung = 15 m³/h pro Abluftventilator

* durchschnittlicher mechanisch geförderter Volumenstrom pro Energiebezugsfläche

** 2000-Watt Leuchtturmareal mehr als wohnen [5]

*** Annahmen: 163 Abluftventilatoren mit min 15 m³/h + 3 Vollaststunden pro Tag mit 60 m³/h; EBF Wohnen A,B = 9'249 m²

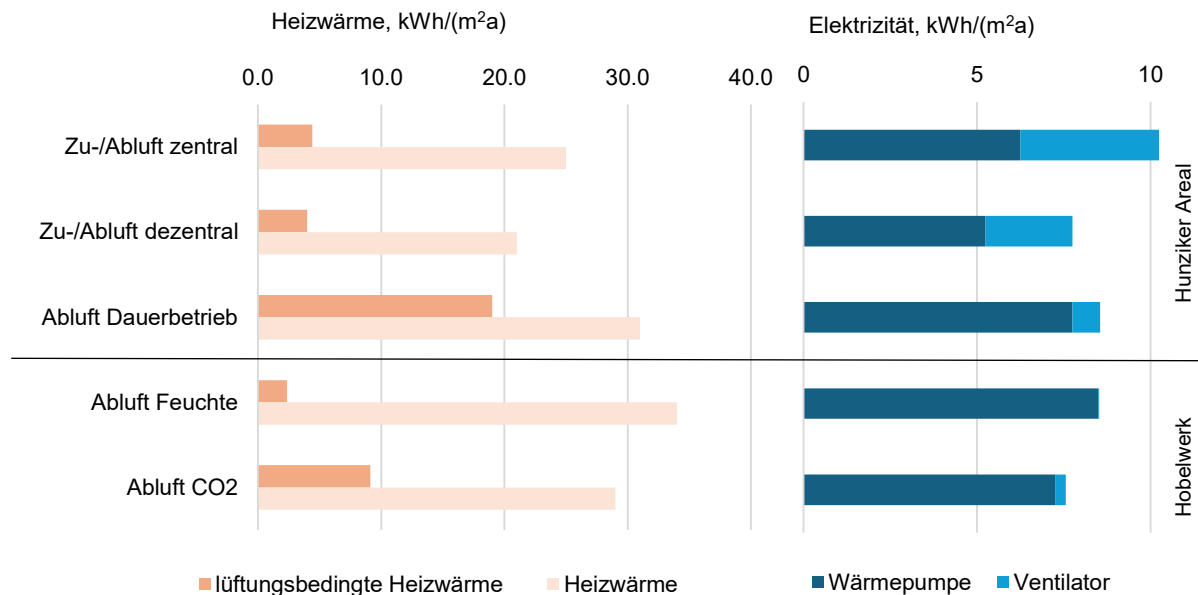


Abbildung 52 Heizwärmeverbrauch sowie Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpen und Ventilatoren

Der im Hobelwerk und Hunziker Areal gemessene Heizwärmeverbrauch der fünf Lüftungssysteme ist in Abbildung 52 abgebildet. Die Gebäudehüllen der Häuser im Hunziker Areal entsprechen im Gegensatz zu jenen im Hobelwerk dem Minergie-P-Standard. Zur Angleichung wird der in der Heizperiode 2023/34 gemessene Heizwärmeverbrauch der drei Lüftungssysteme im Hunziker Areal jeweils um 5



kWh/(m²a) erhöht. Ebenfalls dargestellt ist der «lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch» (siehe Tabelle 24). Dieser entspricht dem von den Lüftungsanlagen geförderten, thermisch wirksamen Aussenluftvolumenstrom unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen Abluft- und Aussenluft. Die Differenz zwischen dem «lüftungsbedingten Heizwärmeverbrauch» und dem gesamten Heizwärmeverbrauch entspricht dem Wärmebedarf zur Kompensation der Wärmeverluste durch Transmission und Fensterlüftung.

Aus dem Heizwärmeverbrauch kann der Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpen abgeschätzt werden, wobei eine für Neubauten typische Jahresarbeitszahl von 4.0 angenommen wird. Im Hunziker Areal liegt die Jahresarbeitszahl im Heizbetrieb gemäss Angabe des Anlagenbetreibers über 5.0. Im Hobelwerk liegt die gemessene Arbeitszahl der drei Luft/Wasser-Wärmepumpen im Heizbetrieb im Bereich von 3.5 bis 3.8.

Die Summe des Elektrizitätsverbrauchs der Wärmepumpen und der Ventilatoren ist ebenfalls in Abbildung 52 dargestellt. Es zeigt sich, dass der tiefere Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpen der beiden Systeme mit Zu-/Abluft und Wärmerückgewinnung durch den höheren Elektrizitätsverbrauch der Ventilatoren kompensiert wird, besonders bei der zentralen Anlage mit konstantem Volumenstrom.

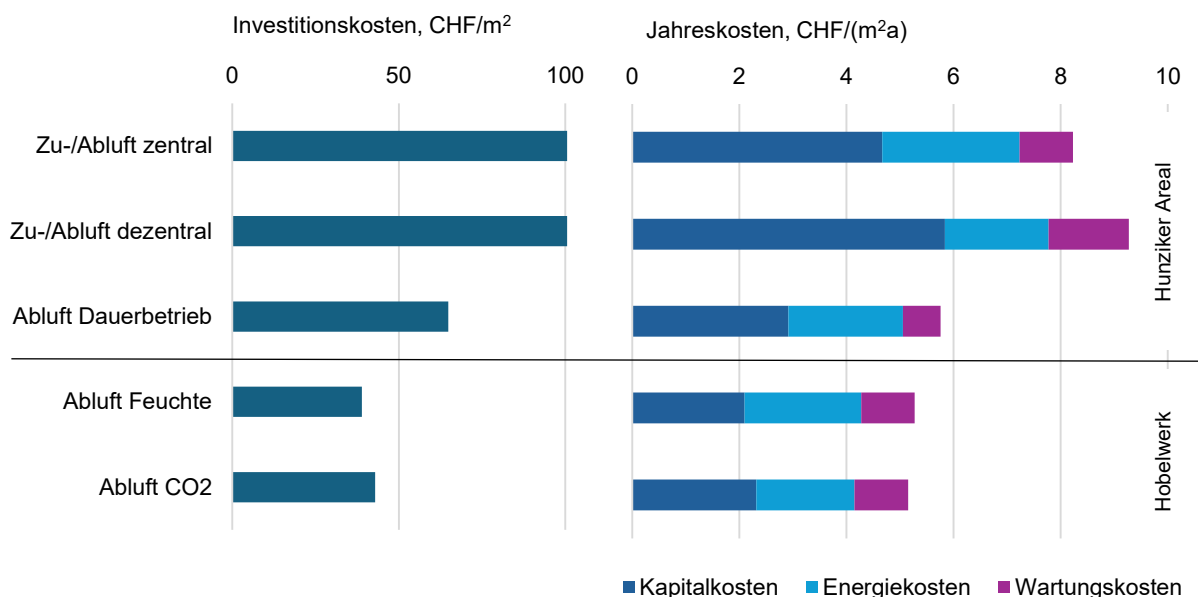


Abbildung 53 Investitions- und Jahreskosten (Kapital, Energie, Wartung) der Lüftungssysteme pro Energiebezugsfläche

Die Investitions- und Jahreskosten der fünf Lüftungssysteme sind in Abbildung 53 dargestellt. Die Investitionskosten der drei Systeme vom Hunziker Areal konnten nicht projektspezifisch ermittelt werden. Die angegebenen Kostenkennzahlen pro Energiebezugsfläche werden daher aus einer Studie der HSLU [50] übernommen. Die Investitionskosten der beiden Abluftlösungen vom Hobelwerk wurden top-down aus der Bauabrechnung (BKP 244 + lüftungsbedingte Gebäudeautomation, inkl. MwSt) sowie bottom-up anhand von Ausschreibungsunterlagen und Unternehmerofferten abgeleitet. Bei allen Lüftungssystemen sind 20% zusätzliche Kosten für Honorare der Architekten und Fachplaner eingerechnet. Aufwände für Steigschächte, Schachtverkleidungen, Abhangdecken und allenfalls durch Lüftungseinlagen erhöhte Deckenstärken sind nicht eingerechnet.



Die jährlichen Kapitalkosten für Amortisation und Verzinsung der Investitionskosten wurden anhand typischer Lebensdauern der aktiven (Ventilatoren und Regelung: 20 Jahre) und der statischen Lüftungskomponenten (30 Jahre) sowie mit einem realen Kapitalzins von 1.5% berechnet.

Die Energiekosten ergeben sich aus dem Elektrizitätsverbrauch gemäss Abbildung 52 und einem Mittelwert von 28 Rp./kWh (inkl. Grund-, Leistungspreis und MwSt). Die Wartungskosten wurden anhand der vorhandenen Serviceverträge und Angaben der Hauswartung zum internen Aufwand abgeschätzt. Die periodische Reinigung der Filter der Abluftventilatoren obliegt den Mietenden. Die Hauswartung kontrolliert bei gelegentlichen Wohnungsbesuchen jeweils den Zustand des Filters der Abluftventilatoren (und der Umlufthaube in der Küche) und veranlasst allenfalls notwendige Massnahmen. Bei Mieterwechsel werden die Filter der Abluftventilatoren gewechselt (Kosten: 5 CHF/Stk).

Die Treibhausgasemissionen für die Erstellung der Lüftungsanlagen, den Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpen und Ventilatoren sowie für die Wartung der Anlagen sind in Abbildung 54 dargestellt. Der Erstellungsemissionen der drei Systeme auf dem Hunziker Areal konnten nicht projektspezifisch ermittelt werden. Die angegebene Werte entsprechen den Angaben aus einer Vergleichsstudie der HSLU von Lüftungskonzepten für Wohnbauten [50]. Die Erstellungsemissionen der beiden Abluftsysteme auf dem Hobelwerk wurden anhand der der Ausschreibungsunterlagen der Gewerke Lüftung und Gebäudeautomation hergeleitet, siehe Anhang 3.4. Erstellungsemissionen für Steigschächte, Schachtverkleidungen, Abhangdecken und gegebenenfalls durch Lüftungseinlagen erhöhte Deckenstärken sind nicht eingerechnet. Die energiebedingten Emissionen ergeben sich aus dem Systembedingten Elektrizitätsbedarf gemäss Abbildung 52 und dem THG-Emissionsfaktor für den Schweizer Verbraucherstrommix gemäss KBOB:2022 von 125 g/kWh. Die Emissionen für die Wartung wurden wiederum auf der HSLU-Studie [50] abgestützt.

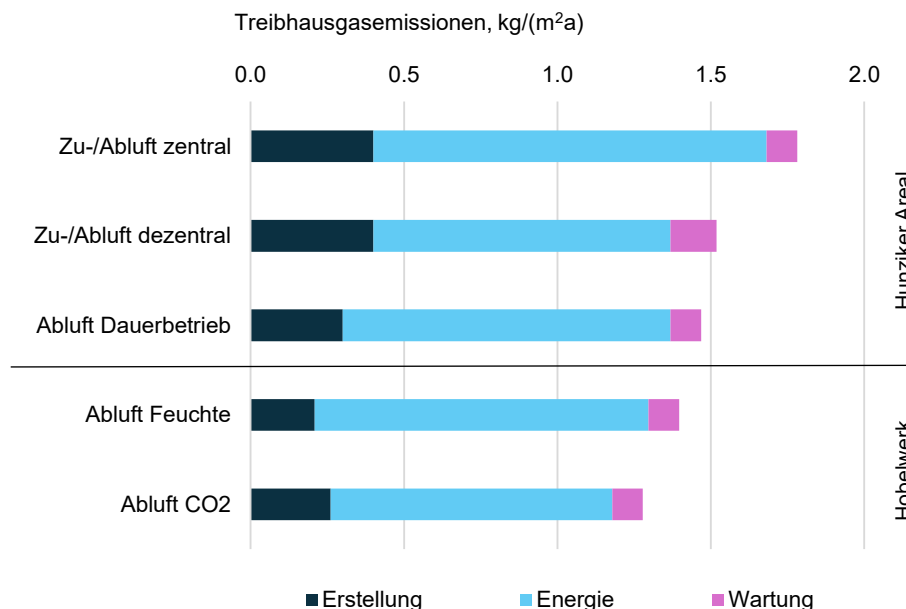


Abbildung 54 Jährliche Treibhausgasemissionen für Erstellung, Energieverbrauch und Wartung der Lüftungssysteme pro Energiebezugsfläche



4.11 Befragung der Bewohnenden

4.11.1 Vorgehen

In den Monaten März und April wurden mittels einer Befragung verschiedene Themenfelder abgefragt. Die Anzahl Rückmeldungen sind im Vergleich zum Hunziker Areal gering und entsprechend mit Vorsicht zu interpretieren. Für die Diskussion der vorliegenden Resultate sind insbesondere die Fragen zu den offenen Fenstern, zur Zugluft und zum störenden Aussenlärm von Relevanz.

Die Befragung erfolgte mittels einem Online-Tool und wurde auf Wunsch auch auf Papier abgegeben. Der vollständige Fragebogen ist im Anhang 3.3 wiedergeben.

4.11.2 Ergebnisse der Befragung

Bei der Befragung bzgl. der offenen Fenster sticht heraus, dass in Haus D im Winter mit 57 % der Antworten angegeben, dass sie das Fenster nachts öffnen. Dabei variiert die Häufigkeit zwischen 1x bis zu 7x in der Woche. Ausschlaggebend dafür scheint die nicht funktionierende Lüftung wie dies im vorangehenden Kapitel bereits beschrieben wurde. Die Resultate der Häuser A, B, C und E unterscheidet sich von der Messung mittels Wärmebildkamera. In der Umfrage geben die Nutzenden einer CO₂-geregelten Abluftanlage an, dass sie die Fenster mehr öffnen als die Nutzenden einer Feuchtigkeits-geregelten Abluftanlage. In der Analyse mittels Wärmebildkamera konnte der umgekehrte Sachverhalt festgestellt werden. Die Werte der Häuser A und B sind im Bereich der Werte, welche die Befragung auf dem Hunziker Areal im Jahr 2017 ergeben hat.

Bei der Befragung bzgl. der Zugluft schneidet die CO₂-geregelte Abluftanlage schlechter ab als die Feuchtigkeits-geregelte Abluftanlage. Dies kann aber auch im Kontext der geringeren geförderten Luftmenge verstanden werden. Gegenüber der Referenzumfrage auf dem Hunziker Areal nehmen in den Häusern C-E leicht weniger Personen Zugluft wahr.

Bei der Befragung bzgl. störendem Aussenlärm über die Aussenluftdurchlässe fällt auf, dass insbesondere die Häuser C und D störenden Aussenlärm wahrnehmen. Aus den Bemerkungen scheint für Haus C die angrenzende Zugstrecke dafür verantwortlich zu sein während für Haus D das angrenzende Logistik-zentrum störend ist. Haus B liegt wie Haus C an der Bahnlinie, nimmt aber deutlich weniger störenden Aussenlärm wahr. Ein Grund dafür kann der Unterschied in der Anordnung der Aussenluftdurchlässe sowie der Zimmer sein. In Haus B ist die Küche sowie ein Zimmer zur Bahnlinie ausgerichtet. Die Aussenluftdurchlässe sind nur an den Fenstern zum Balkon vorzufinden und somit nicht direkt an die Bahnlinie orientiert. In Haus C ist die Küche zum Innenhof liegend und mindestens zwei Zimmer liegen an der Fassade zur Bahnlinie. Die Aussenluftdurchlässe sind direkt zur Bahnlinie orientiert. Im Haus C ist die Wohnnutzung erst ab dem zweiten Stock während im Haus B bereits ab dem ersten Stock eine Wohnnutzung vorliegt.



Schlafen Sie nachts im Winter mit offenen Fenster?

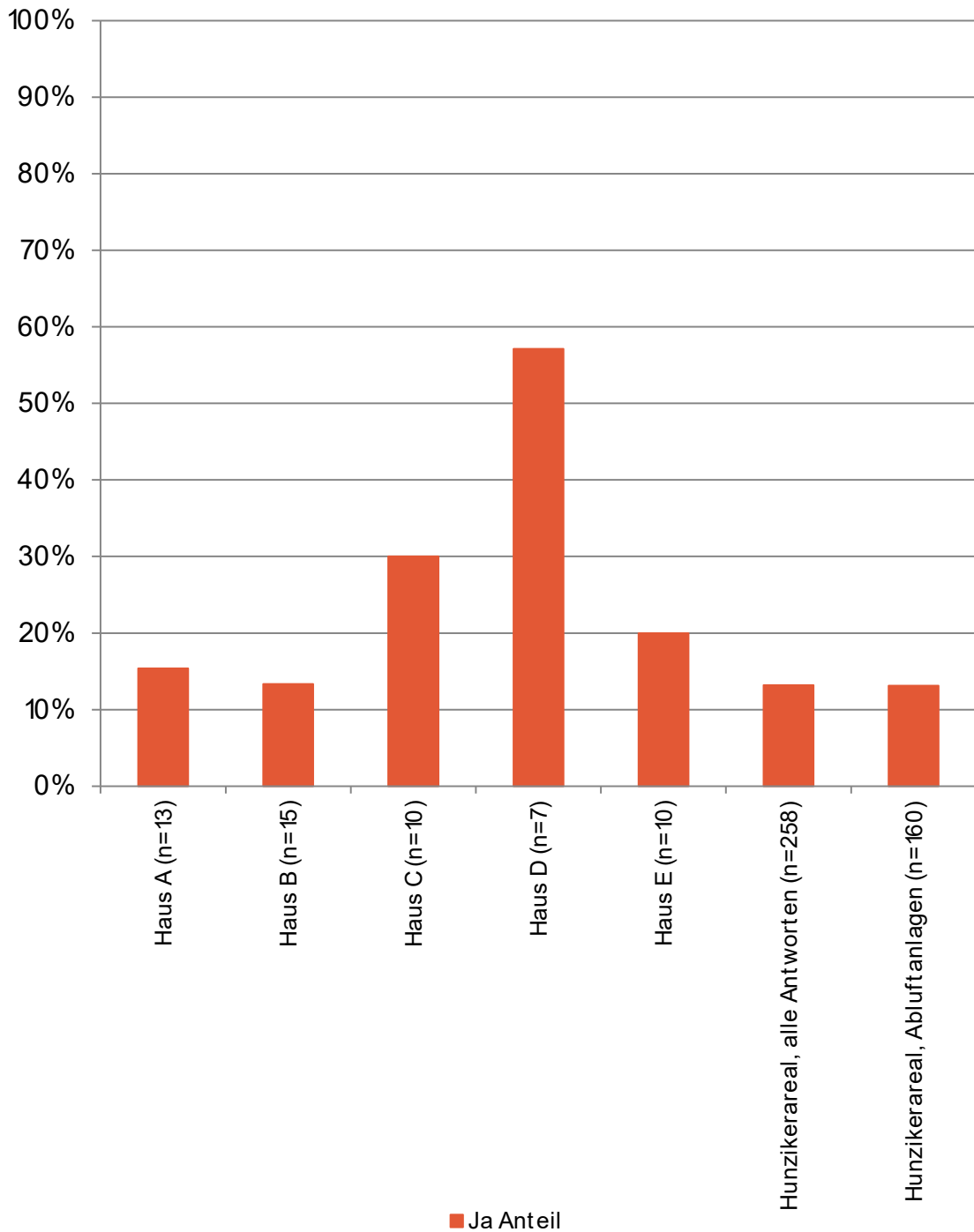


Abbildung 55 Rückmeldungen zur Frage «Schlafen Sie nachts im Winter mit offenem Fenster»



Nehmen Sie Zugluft wahr?

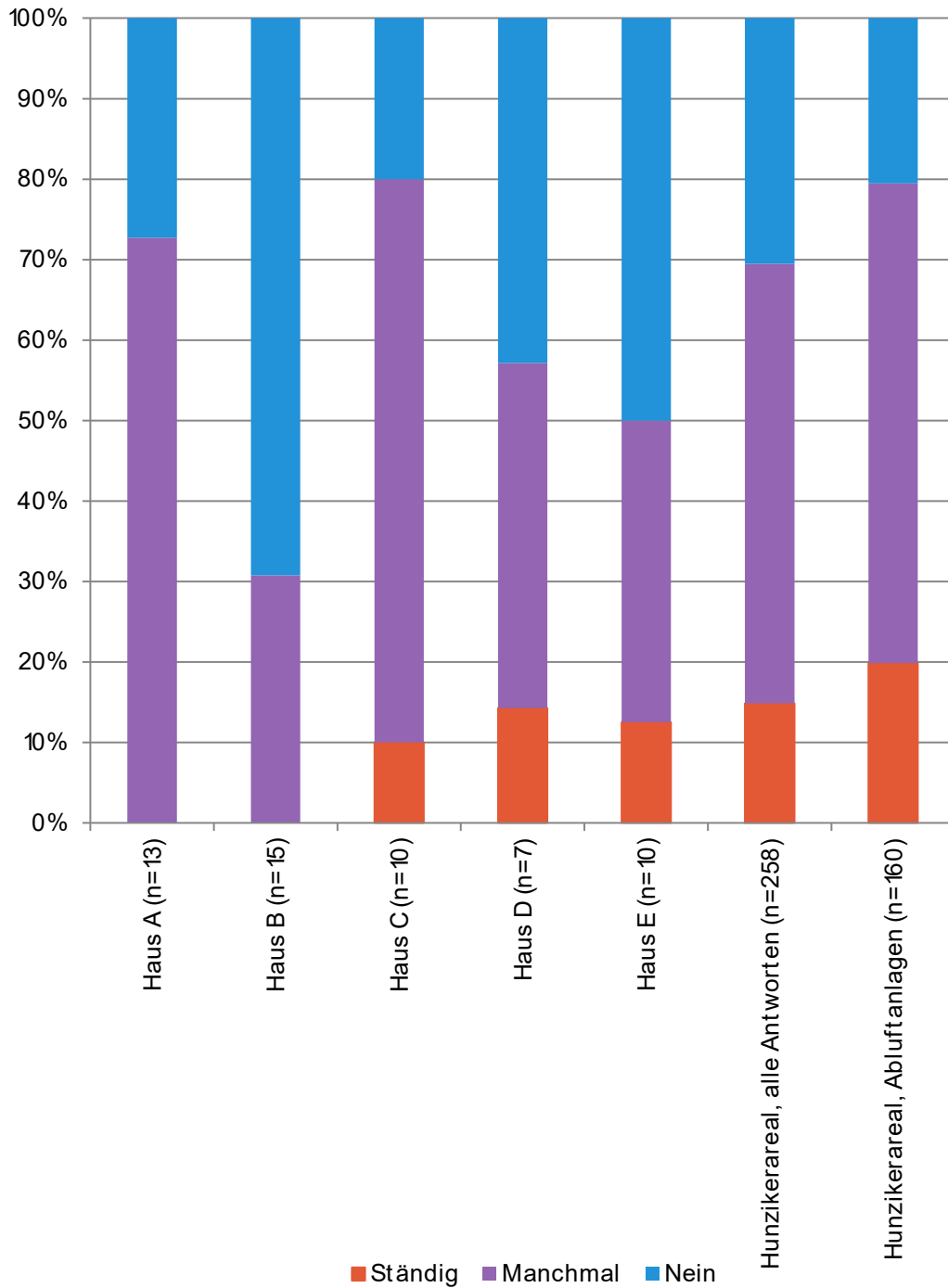


Abbildung 56 Rückmeldungen zur Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze störende Zugluft wahr»; Hinweis: im Hunziker Areal lautete die Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze Zugluft wahr»



Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze störenden Aussenlärm wahr?

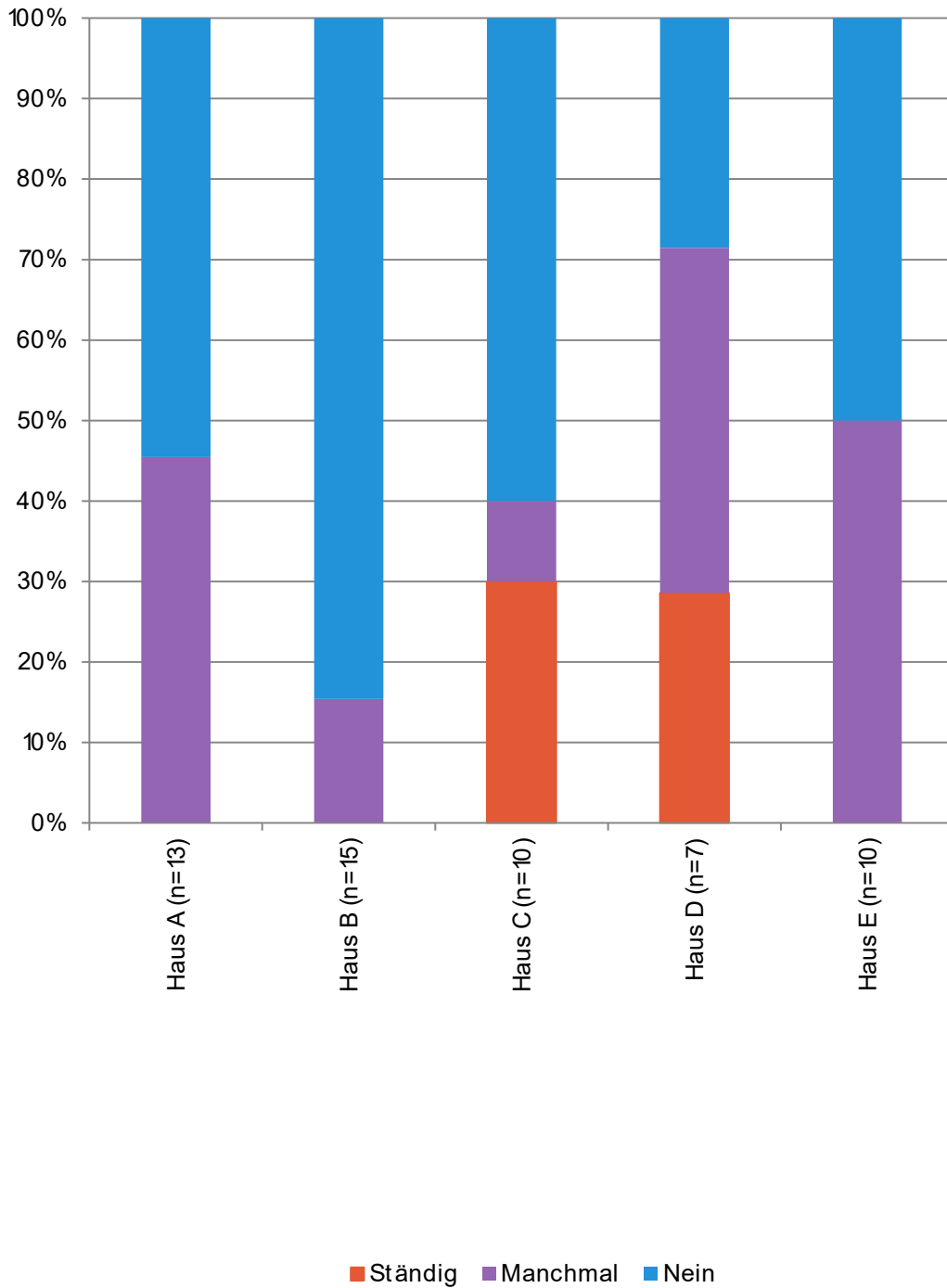


Abbildung 57 Rückmeldungen zur Frage «Nehmen Sie im Bereich der Lüftungsschlitze störenden Aussenlärm wahr»



Sind die Lüftungsschlitze über den Fenstern mehrheitlich offen oder geschlossen?

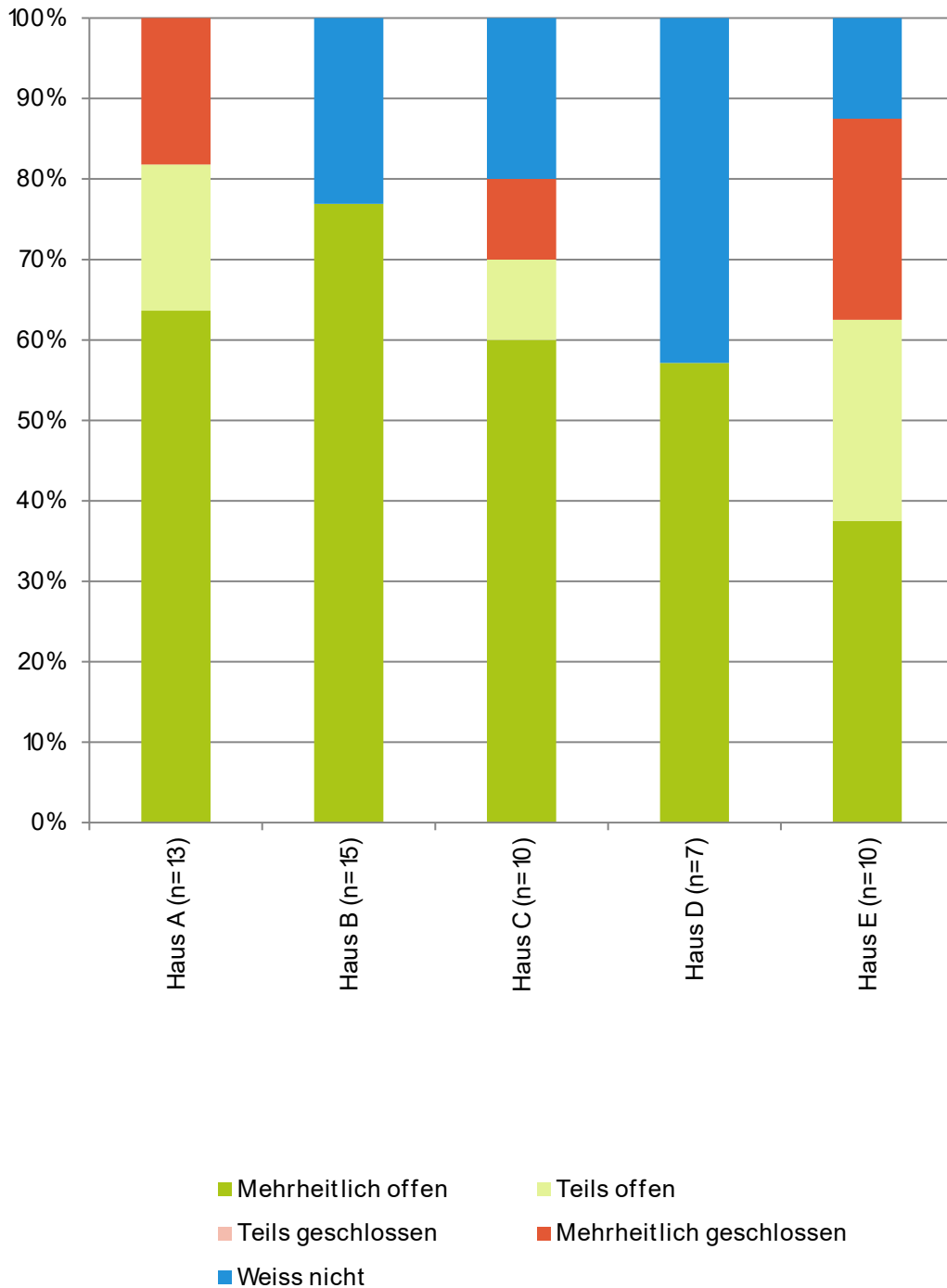


Abbildung 58 Rückmeldungen zur Frage «Sind die Lüftungsschlitze über den Fenstern mehrheitlich offen oder geschlossen?»

4.11.3 Ausblick

Da sich die subjektive Wahrnehmung im Bereich Komfort über die Zeit verändern kann und insbesondere auch saisonale Schwankungen häufig festgestellt werden, sollen die Bewohnenden mindestens



zweimal befragt werden. Durch die erneute komplette Befragung werden auch Veränderungen der Störgrößen besser festgehalten. Die Befragung soll darum im Februar/März 2026 erneut erfolgen. Da die Teilnahmebereitschaft über die Zeit meistens sinkt, wird diese Umfrage unter Umständen gekürzt oder nur als Stichprobe durchgeführt. Die Messkampagne läuft von November 2023 bis Frühling 2026 und somit über nahezu drei Heizperioden, wobei die erste Heizperiode aufgrund der Einregulierungen nicht in die Auswertung einfließen wird.

4.12 Schlussfolgerungen

Die zu Projektbeginn formulierten Arbeitsthese lassen sich aufgrund der bisherigen Ergebnisse wie folgt beantworten:

- **These 1:** Gegenüber einer reinen Feuchteschutz-Lüftung (Häuser A + B) werden im Durchschnitt tiefere Raumluft-CO₂-Konzentrationen erreicht. Dank der besseren Raumluftqualität müssen die Fenster durch die Bewohnenden seltener geöffnet werden.
>> Die beschränkte Anzahl untersuchter Wohnungen in den Häusern A und B sowie die grosse Streuung der Messwerte lassen keine schlüssigen Aussagen bezüglich systembedingter Unterschiede bei den CO₂-Konzentrationen zu. Der im Durchschnitt tiefere Heizwärmeverbrauch der Häuser C,D,E gegenüber der Häuser A,B könnten ein Indiz dafür sein, dass aufgrund der CO₂-Regelung in den Häusern C,D,E weniger häufig über Fenster gelüftet wird (siehe Abbildung 52, linkes Diagramm).
- **These 2:** Die Luftqualität ist vergleichbar mit einer mehrstufigen, zeitgesteuerten Zu-/Abluftanlage und die Anzahl geöffneter Fenster im Winter ähnlich (Vergleich mit dem Hunziker Areal, Haus B).
>> Die Median-Werte der CO₂-Konzentration der Häuser C;D;E liegen tatsächlich im selben Bereich wie die auf dem Hunziker Areal in Haus B gemessenen Median-Werte. Die Messwerte streuen allerdings stark, weshalb stichhaltige Aussagen zu systembedingten Unterschieden nicht möglich sind, siehe Tabelle 19.
- **These 3:** Eine CO₂-geregelter Abluftanlage mit Einzelventilatoren führt gegenüber einer Abluftanlage mit konstantem Volumenstrom (Hunziker Areal) zu einer deutlichen Reduktion des durchschnittlichen Aussenluftvolumenstroms.
>> Der durchschnittlich gemessenen Abluft-Volumenstrom der Häuser C,D,E liegt bezogen auf die Energiebezugsfläche bei 0.46 m³/(m²h). Die zentralen Abluftanlagen im Hunziker Areal der Häuser C,D,E,G,H,J,K,L fördern einen rund doppelt so hohen Abluft-Volumenstrom von 0.95 m³/(m²h). Im Hobelwerk melden entsprechend weniger Bewohnende (12%) störende Zugscheinungen im Bereich der Aussenluftdurchlässe als im Hunziker Areal (20%).
- **These 4:** Aufgrund des reduzierten Aussenluft-Volumenstroms ist der Energieverbrauch für die Luftförderung und die Erwärmung der Aussenluft vergleichbar mit einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.
>> Der Elektrizitätsverbrauch der Abluftventilatoren und der lüftungsbedingte Heizwärmeverbrauch der Häuser C,D,E sind deutlich tiefer als die entsprechenden Standardwerte der SIA-Normen, siehe Tabelle 23 und Tabelle 24. Der jährliche Elektrizitätsverbrauch der Abluftventilatoren ist vergleichbar bis tiefer als der entsprechende Verbrauch von Zu-/Abluftanlagen, siehe Abbildung 52, rechtes Diagramm.
- **These 5:** Die Investitionskosten einer CO₂-geregelter Abluftanlage mit Einzelventilatoren sind rund 10% höher als jene einer reinen Feuchteschutz-Lüftung (Häuser A, B) und deutlich tiefer als bei einer Zu-/Abluftanlage.



>> Die Investitionskosten der CO₂-geregelten Abluftanlagen der Häuser C,D,E sind mit 40 CHF/m² bzw. 5'000 CHF pro Wohnung rund 10% höher als die Investitionskosten der feuchtegeregelten Abluftanlagen der Häuser A,B. Bei Häusern mit Zu-/Abluftanlagen liegen die Investitionskosten inkl. Honoraren und MwSt. typischerweise über 100 CHF/m² bzw. bei rund 12'000 CHF pro Wohnung, siehe Abbildung 53 linkes Diagramm.

- **These 6:** Die Erstellung der CO₂-gesteuerten Abluftanlage ist in Bezug auf die Treibhausgasemissionen deutlich sparsamer als eine Lösung mit Zu-/ Abluft und Wärmerückgewinnung.
>> Die Erstellungsemissionen sind bei allen untersuchten Lüftungssystemen im Vergleich zu den energiebedingten Emissionen verhältnismässig gering. Die tiefsten Erstellungsemissionen verursachen feuchtegeregelte Abluftanlagen mit rund 0.21 kg/(m²a), während die CO₂-geregelte Abluftanlagen im Hobelwerk bei 0.26 kg/(m²a) und Zu-/Abluftanlagen im Bereich von 0.4 kg/(m²a) liegen, siehe Abbildung 54.

Abschliessend lässt sich festhalten, dass mit CO₂-geregelten Abluftanlagen eine mittlere bis moderate Raumluftqualität mit geringeren Zuglufterscheinungen gegenüber einer Abluftanlage mit Konstantvolumenstrom erreicht werden kann. Der elektrische Energiebedarf für Ventilatoren und Wärmepumpe sowie die Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Energie und Wartung sind vergleichbar bis tiefer als bei einer Zu-/Abluftanlage.

4.13 Ausblick

Anhand der bisherigen Messergebnisse können die meisten offenen Forschungsfragen zu CO₂-geregelten Abluftanlagen beantwortet werden. Die grosse Streuung der CO₂-Konzentrationen mit hohen Median-Werten in einzelnen Wohnungen deuten aber auf ein vorhandenes Optimierungspotential hin. Ein Teil der in der Lüftungsregelung implementierten Funktionen, z.B. eine automatische Volumenstromreduktion bei besonders hohen und besonders tiefen Aussentemperaturen oder eine Erhöhung des Volumenstroms zur sommerlichen Nachtauskühlung, konnten aufgrund der Verzögerungen bei der Inbetriebnahme und Mängelbehebung noch nicht getestet werden.

Anhand von technischen Eingriffen (Anpassung der CO₂-Kurve, Aktivierung der Nachtauskühlung, etc.) sowie durch Information der Bewohnenden und punktuelle Überprüfung der Funktion einzelner Komponenten in den betroffenen Wohnungen wird in der Heizperiode 2025/26 eine Verbesserung der Raumluftqualität angestrebt. Die Auswertung der neuen Messdaten soll durch eine zweite Befragung der Bewohnenden ergänzt werden.

In Bezug auf die CO₂-Regelung wird in Zusammenarbeit mit der Empa die Entwicklung einer vereinfachten Lösung ohne Gebäudeleitsystem auf der Basis von kostengünstigen CO₂-Sensoren, Microcontrollern und einer LoRa-WAN-Funkverbindung angestrebt. Gemäss einer ersten Abschätzung sollten die Systemkosten dadurch um rund 1'000 CHF pro Wohnung reduziert werden können.

Die bisherigen Erkenntnisse sollen zunächst noch mit Minergie (Robert Minovsky) abgeglichen und anschliessend über die Bewirtschaftung in den zukünftigen Betrieb des Hobelwerks sowie weiterer Areale von mehr als wohnen (Hunziker Areal und NNO) übertragen werden. Über einen Artikel in der Zeitschrift Wohnen, dem Organ des genossenschaftlichen Wohnungsbaus in der Schweiz, sollen die Ergebnisse anschliessend einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Denkbar ist auch ein Fachartikel, z.B. im TEC21, dem Wochenheft des SIA, sowie in den einschlägigen Fachzeitschriften der Haustechnikbranche (HK Gebäudetechnik etc.).

Der Projektabschluss ist per Ende 2026 vorgesehen.



5 AP4: Prädiktive bivalente Wärmeerzeugung

5.1 Ausgangslage

Luft-Wasser-Wärmepumpen sind verhältnismässig kostengünstig, haben in den vergangenen Jahren einen grossen Entwicklungsschub erlebt und relevante Effizienzgewinne herbeigeführt. Sie weisen aber zwei Problematiken auf, welche in diesem Projekt mithilfe einer prädiktiven Bivalenz-Regelung adressiert werden. Erstens werden Luft-Wasser-Wärmepumpen aus Lärm- und Platzgründen in der Stadt und der Agglomeration für grössere Bauten nur selten eingesetzt. Zweitens belasten solche Systeme das Stromnetz in den Wintermonaten erheblich, gerade dann, wenn der Netzstrom eher CO₂ intensiv ist². Eine bekannte Lösung stellen bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpen dar, bei denen die Spitzenlast durch einen Brennstoff gedeckt wird. Eine typische Anlage wird so dimensioniert, dass das Spitzenlastsystem 50 % des Heizleistungsbedarfs und etwa 20 % bis 25 % des jährlichen Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser abdeckt. Bei einer marktüblichen Bivalenz-Regelung wird das Spitzenlastsystem dazu geschaltet, sobald die Vorlauftemperatur über einen bestimmten Zeitraum, z.B. über 10 Minuten, unter dem Sollwert liegt. Diese Regelung führt zu relativ häufigen Starts des Spitzenlastsystems. Dies oft auch für die Warmwasserproduktion im Sommer, was zu erhöhtem Brennstoffverbrauch, Wartungskosten und, je nach Spitzenlastsystem, hohen CO₂-Emissionen führt.

Zudem führt die Zuschaltung des Spitzenlastsystems meist zu einer Erhöhung der Rücklauftemperatur, wodurch die Arbeitszahl und der Leistungsanteil der Grundlast-Wärmepumpe sinken (bivalent-paralleler Betrieb). Mit einer optimierten Bivalenz-Regelung soll einerseits der Energieanteil der Spitzenlast weiter gesenkt werden und andererseits der Bezug von CO₂-intensivem Netzstrom minimiert werden. Damit kann das Brennstofflager für die Spitzenlast potentiell kleiner dimensioniert werden. Dadurch können graue Energie bei der Erstellung eingespart werden und die Systemkosten sinken. Zudem könnten zukünftig auch neue, synthetische Brennstoffe (Power-to-X) eingesetzt werden, da die relativ hohen Kosten für den erneuerbaren Brennstoff durch den geringeren Verbrauch relativiert werden. Darüber hinaus kann die elektrische Anschlussleistung reduziert werden, was das Stromnetz entlastet und ebenfalls graue Energie einspart. Zudem bleibt, dank einer kleineren Luft/Wasser-Wärmepumpe, mehr Fläche auf dem Dach, welche für die Installation von PV-Modulen verwendet werden kann. Dies führt in der Summe zu tieferen Treibhausgasemissionen im Betrieb und in der Erstellung, und damit zu einer weiteren Annäherung an Netto-Null.

Die Anlage besteht aus zwei Gebäuden (A, B) mit je einer reinen Wärmepumpen-Lösung und drei Gebäuden (C, D, E), welche über eine gemeinsame bivalente Wärmeerzeugung mittels Luft/Wasser-Wärmepumpe und Holzpelletfeuerung verfügen. Alle fünf Gebäude und drei Wärmeerzeugungen sind auf dem Gebäudeleitsystem aufgestalten. Im Rahmen des Arbeitspaktes AP4 wird eine prädiktive Regelung entwickelt und mittels einer Beckhoff-SPS in das Gebäudeleitsystem integriert.

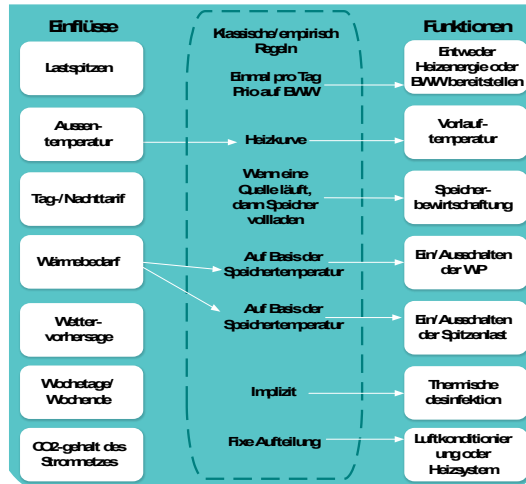
5.2 Stand der Technik

² Rüdüsüli et al. (2019): Impacts of an Increased Substitution of Fossil Energy Carriers with Electricity-Based Technologies on the Swiss Electricity System, <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2399>



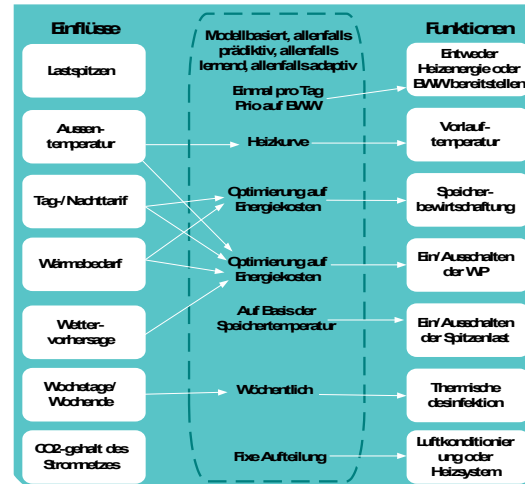
Innovation im Bereich der Heizungsregelungen

Stand der Industrie



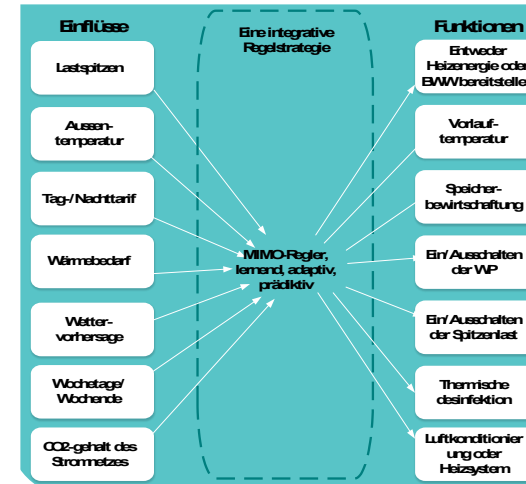
Folgendes Schaubild illustriert den Stand der Industrie. Dieser Stand wird als Referenz hinzugenommen, da er dem Ursprünglich von den Planenden empfohlenen Regelung entspricht. Hysterese-basierte oder PI(D)-basierte Regler, die unterschiedliche Funktionen getrennt und unabhängig voneinander betreiben. Vorlauftemperaturregelung anhand von Heizkurven, welche getrennt von der Speicherbewirtschaftung und getrennt von der Ein-Ausschalt-Logik der Heizung operieren. Die statischen Regelparameter müssen spezifisch für das Gebäude/die Heizung parametrieren. Diese Regler handeln aufgrund von vergangenen Messdaten, nicht prädiktiv.

Stand der Technik



Entwicklungen der letzten Jahre zeigen eine Tendenz zum Datamonitoring mit Energie Monitoring Systemen, damit die Performance der Anlagen von Betriebspersonal empirisch evaluiert werden kann und bei Bedarf Systemintegratoren Anpassungen vornehmen können. In Anwendungen ausserhalb der (Fertigungs-)Industrie werden die einzelnen Funktionen immer noch getrennt voneinander geregelt. Das nachfolgende Schaubild illustriert den Stand der Technik. In der Wärmeverteilung (z.B. Raumtemperaturregelung) werden MPC-basierte oder lernende Algorithmen (beide prädiktiv agierend) entwickelt und in Feldtests implementiert. In der Wärmebereitstellung gibt es MPC basierte Ansätze, lernende Algorithmen werden noch nicht eingesetzt.

In diesem Projekt



Es soll aufbauend auf den BFE-Projekten S-DSM und UC-DPC eine übergreifende, selbstlernende und adaptive Regelung für die Wärmebereitstellung implementiert und um im Betrieb getestet werden. Im Gegensatz zum Stand der Technik soll die übergreifende Regelung mehrere voneinander abhängige Teilsysteme gleichzeitig regeln und ohne Parametrierungsaufwand auskommen. Das obige Schaubild illustriert diesen Ansatz.



5.3 Fragestellung und Zielsetzung

In AP 4 wird über den Stand der Industrie und dem Stand der Technik hinaus, eine Bivalenz-Regelung entwickelt, welche übergreifend die Wärmebereitstellung regelt. Diese Regelung basiert auf einem übergreifenden, selbstlernenden Algorithmus. Die selbstlernenden Algorithmen passen sich anhand realer Daten fortlaufend an saisonale Veränderungen oder verändertes Nutzungsverhalten an. Unter anderem wird dafür die Wärmespeicherung des Gebäudes besser ausgenutzt. Zudem werden Wetterdaten und -prognosen für eine selbstlernende Optimierung der Bivalenz-Regelung benutzt. Hauptziel von AP4 ist, eine integrative Regelung der Wärmebereitstellung zu entwickeln und damit die realen Anlagen zu betreiben. Das Betriebsverhalten wird mit dem Betrieb aus der ersten Heizperiode sowie der reinen Wärmepumpen-Lösung in Gebäuden A und B verglichen (THG-Emissionen, JAZ, Betriebskosten).

Zudem wird die Dateneffizienz der entwickelten Lösung geprüft, um ein Mass über die minimale benötigte Messdatenmenge für einen effizienten Lernprozess geben zu können. Damit kann ermittelt werden, welche Sensorik für einen möglichst effizienten Betrieb tatsächlich notwendig ist. Des Weiteren wird die Regelperformance bezüglich Ein-/Ausschaltzyklen und Setpoint-Tracking durchgeführt, um tiefere Wartungskosten zu erreichen. Folgende Teilziele werden adressiert:

- Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, mittels optimierter Bivalenz-Regelung den Energieanteil der Spitzenlast auf unter 10 % zu reduzieren.
- Der Einfluss einer solchen Regelung auf die Treibhausgas-Intensität vom bezogenen Netzstrom wird quantifiziert. Dies wird mit reinen Wärmepumpen-Lösungen (Haus A und B) verglichen, wobei auch hier mittels prädiktiver Regelung versucht werden soll, die Treibhausgas-Intensität vom bezogenen Netzstrom zu minimieren. Zielkonflikte mit der Reduktion des Energieanteils der Spitzenlast und der Minimierung des Grundlastsystems werden aufgezeigt.
- Es wird mittels Berechnungen gezeigt, dass durch eine entsprechend verkleinerte Elektroinstallation beim Netzanschlusspunkt sowie einem verkleinerten Brennstofflager, Kosten und graue Treibhausgasemissionen eingespart werden können. Zudem wird aufgezeigt, dass neue Technologien (Power-to-X) mit höheren Brennstoffpreisen nur einen geringen Einfluss auf die Betriebskosten haben werden.
- Der Komfort wird über Messungen sowie Umfragen bei den Gebäudenutzenden, sowie den Gebäudebetreibenden erhoben. Dabei wird insbesondere die bivalente Lösung einer reinen Wärmepumpen-Lösung (Haus A und B) gegenübergestellt.

5.4 Vorgehen und Methode

Für diesen Pilot ersetzt die Betriebsoptimierung nicht den Standardregler. Auch im Falle der aktiven Betriebsoptimierung bleibt der Standardregler aktiv. Damit die Betriebsoptimierung auf die Anlage einwirken kann, wurden Offset-Datenpunkte für Sollwerte definiert, die von Fern geschrieben werden können. So bewirtschaftet beispielsweise der Standardregler weiterhin die Wärme in den Pufferspeichern auf eine Soll Ein/Ausschalttemperatur. Die Betriebsoptimierung kann jedoch diese Ein/Ausschalttemperatur maximal $\pm 5^\circ\text{C}$ verändern, und daher ein längeres/kürzeres, resp. früheres/späteres Einschalten der Anlagen herbeiführen. Gemeinsam mit den HLK- und MSRL-Planer wurde eine Liste mit den nötigen Offset-Datenpunkten definiert und implementiert. Ein wichtiges Augenmerk wurde auf die Grenzwerte dieser Offsets gelegt, damit die Anlage keinen Schaden nehmen kann im Falle einer Fehlkommunikation.



Um spezifisch die Themen der Skalierbarkeit betrachten zu können, wurde zusätzliche Unterstützung durch den Klimafonds Winterthur beantragt und gutgeheissen. Im Projekt "Low tech, High intelligence" soll zusätzlich die Wärmepumpen-Automation von Haus A und B optimiert werden und die Transferierbarkeit des Reglers von Haus A auf Haus B untersucht werden.

Folgende Arbeitsschritte wurden umgesetzt:

1. Erstellung der Datenzugänglichkeit und Möglichkeit zur Einflussnahme der Betriebsoptimierung
2. Entwickeln des modellbasierten, prädiktiven und selbstlernenden Reglers mit dem Ziel CO₂-Ausstoss und Kosten zu minimieren.
3. Durchführung und Analyse der Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus A und Haus B.
4. Durchführung und Analyse der Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus C, D und E.
5. Analyse des Energieverbrauchs, der summierten THGE durch den konsumierten Netzstrom, des Energieanteils des Spitzenlastsystems und des Eigenstromanteils im Vergleich zum Referenzbetrieb.

5.5 Datenzugänglichkeit

Seitens der Gebäudeautomationsplanung (GA-Planung), Bauherrenvertretung, Systemlieferanten (Scheco AG und Heim AG) und der Empa wurden mehrere Sitzungen durchgeführt, um Anlagenfunktionalitäten mit den Bedürfnissen des Forschungsprojektes abzustimmen.

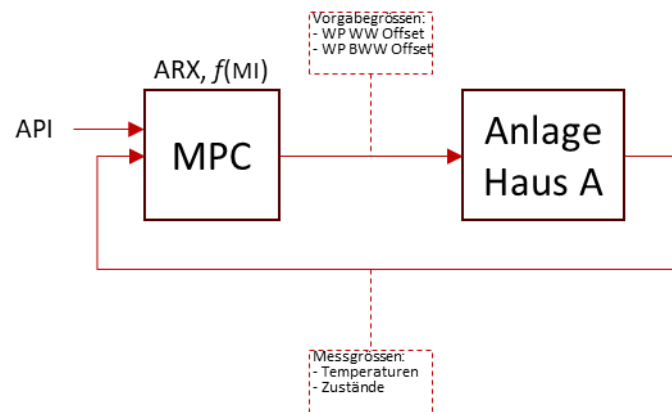
Der Datenzugang zum lokalen Automationssystem (blaue Komponenten in Abbildung 59) wurde sichergestellt. Für Gebäude A und B, welche als erstes in Betrieb genommen wurden, stehen seit dem 16.02.2023 thermische Messungen und ab dem 05.10.2023 elektrische Messungen zur Verfügung. Messdaten der Anlagen für Gebäude C, D und E stehen seit dem 18.12.2023 zur Verfügung. Aufgrund grösserer Lücken und mangelnder Datenqualität können erst Daten ab dem 18.12.2023 für die Modellierung und Reglersynthese verwendet werden.

Da ein regulärer "Stand der Industrie" Betrieb über mindestens ein Jahr als Referenz-Datensatz dienen soll, wurde Wert daraufgelegt, dass die Betriebsoptimierung minimalinvasiv auf den regulären Betrieb einwirken soll, jedoch hinreichend Freiheitsgrade für einen optimierten Betrieb zur Verfügung stehen. So wurden auch Aspekte der Betriebssicherheit adressiert, im Falle eines Kommunikationsausfalls zwischen BO und Anlage oder eines Funktionsausfalls der BO selbst. Durch beidseitige Watchdogs kann die lokale Automation einen Anagenausfall erkennen und auf den regulären Betrieb wechseln.



5.6 Reglerentwicklung

Eine Arbeit zur Reglersynthese auf Basis von Experimenten und Daten des NEST wurde veröffentlicht [56]. Die dort verwendete Lösung zur Raumtemperaturregelung ist nicht eins-zu-eins vergleichbar mit jener im Hobelwerk. Die Method kann aber auch mehrere gekoppelte Teilsysteme abbilden. Dazu wurde aufgrund von Datenpunktlisten und Funktionsbeschrieben der Teilanlagen in Haus A+B, relevante Datenpunkte zum Auslesen, aber auch zum Übersteuern der Anlage definiert. Zusätzlich wurden erste Sitzungen vereinbart, um die Integration und Terminierung der Beckhoff SPS, welche als Gateway zum lokalen System dient, zu koordinieren. Die Liste der Datenpunkten und Prinzipschemas der Wärmeerzeugung sind im Anhang 4 abgebildet.



5.6.1 Wettervorhersage

Gegenüber der Standartregelung benötigt die Betriebsoptimierung zusätzlich eine Wettervorhersage sowie eine Vorhersage des Wärmebedarfs. Die Wettervorhersage kann über APIs, bspw. via MeteoSwiss³ oder accuweather⁴ abgerufen werden. In diesem Projekt wurde die accuweather API verwendet, um ortsspezifisch für Oberwinterthur eine Temperaturvorhersage und Vorhersage der Solarstrahlung für die nächsten 12 Stunden abzurufen. Diese wurde jede Stunde aktualisiert.

5.6.2 Wärmebedarf

Die Vorhersage für Heizwärme und Brauchwarmwasser ist abhängig von der Aussentemperatur, der solaren Einstrahlung sowie der dem Verhalten der Bewohnenden/Nutzenden des Hobelwerks. Dieses Nutzerverhalten kann über Tageszeit und autoregressive⁵ Modellkomponenten abgebildet werden. Basierend auf aktuellen Mess-/Vorhersagewerten, sowie Werten von 1-3 Zeitschritten in der Vergangenheit, werden mittels least squares passende Parameter identifiziert.

5.6.3 Modellbildung

Um die Effizienzen der Wärmepumpen und thermischen Speicher in die Betriebsoptimierung aufzunehmen, wurden COP-Modelle (basierend auf Aussentemperaturen und Systemtemperaturen), sowie Speichertemperaturen trainiert.

5.6.4 Datenbedarf

Der benötigte Datenbedarf für eine genügend genaue Modellbildung und Bedarfsvorhersage ist abhängig vom Vorhersagehorizont und der Modellkomplexität. Basierend auf einer Studie [57] mit Daten aus dem NEST Demonstrator konnte gezeigt werden dass bereits 14 Tage an Daten ausreichen, um verlässliche Resultate zu liefern.

³ <https://github.com/MeteoSwiss/opendata-nwp-demos/tree/main>

⁴ <https://developer.accuweather.com/documentation/core-weather-quick-start>

⁵ Autoregressive Modelle nutzen nicht nur aktuelle Werte zur Schätzung des Bedarfs, sondern haben auch vergangene Heizwärme und Brauchwarmwasserbedarf als Input.



5.6.5 Treibhausgasfaktoren für elektrische Energie und Pellets

Die Berechnungsgrundlage für die Treibhausgas-Bilanz der Wärmeerzeugung orientiert sich an der Methodik, die in [55] erstellt wurde. Für die elektrische Versorgung wird das offene ENTSO-E-Transparenzportal herangezogen, aus dem sämtliche grenzüberschreitenden Stromflüsse, Produktion- und Import-Profile der europäischen Länder seit 2015 extrahiert werden. Diese Rohdaten werden zunächst einem Daten-Pre-Processing unterzogen, bei dem die für das Projektgebiet definierten Länder selektiert, fehlende Werte interpoliert und die Zeitreihen auf das gewünschte Zeitschritt-Intervall – in der Regel 15 Minuten – berechnet werden. Für die Schweiz werden ergänzende nationale Statistiken zu Niederspannung- und Netzeinspeisungen integriert, sodass ein vollständiges Bild des regionalen Strommix-Dynamik entsteht.

Im nächsten Schritt wird das sogenannte Tracking-Modul eingesetzt. Dort werden die normalisierten Anteile jeder Erzeugung-Technologie (z. B. Wasserkraft, Wind, Solar, fossile Kraftwerke) für jeden Zeitschritt ermittelt, indem die zuvor aufbereiteten ENTSO-E-Tabellen zu einer Technologie-Matrix zusammengefasst werden. Das Ergebnis ist ein zeitlich aufgelöster Strommix, der die Anteile der jeweiligen Erzeugungsquellen für das Zielgebiet widerspiegelt und gleichzeitig die bilateralen Austauschflüsse zwischen den Ländern berücksichtigt.

Um die Umweltauswirkungen zu quantifizieren, wird für jede Strom-Erzeugungs-Technologie ein Satz von Lebenszyklus-Impact-Faktoren aus einer LCA-Datenbank zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt über die ENTSO-E-Kategorien den entsprechenden Energieerzeuger. Für jeden Zeitschritt wird die pro-Kilowatt-Stunde-Faktoren mit dem jeweiligen Anteil der Technologie im Strommix ausgewiesen und summiert die Beiträge, sodass für jede betrachtete LCA-Impact-Kategorie (z. B. Treibhaus-Gase, F Feinstaub menschliche Toxizität, Landnutzung) ein temporales Profil entsteht. Im Rahmen des Hobelwerk Projekts verwenden wir CO₂-eq/kWh als Belag für genutzte elektrische Energie aus dem Verteilnetz.

Als CO₂-Belag der verwendeten Pellets, werden KBOB-Werte herangezogen [58].

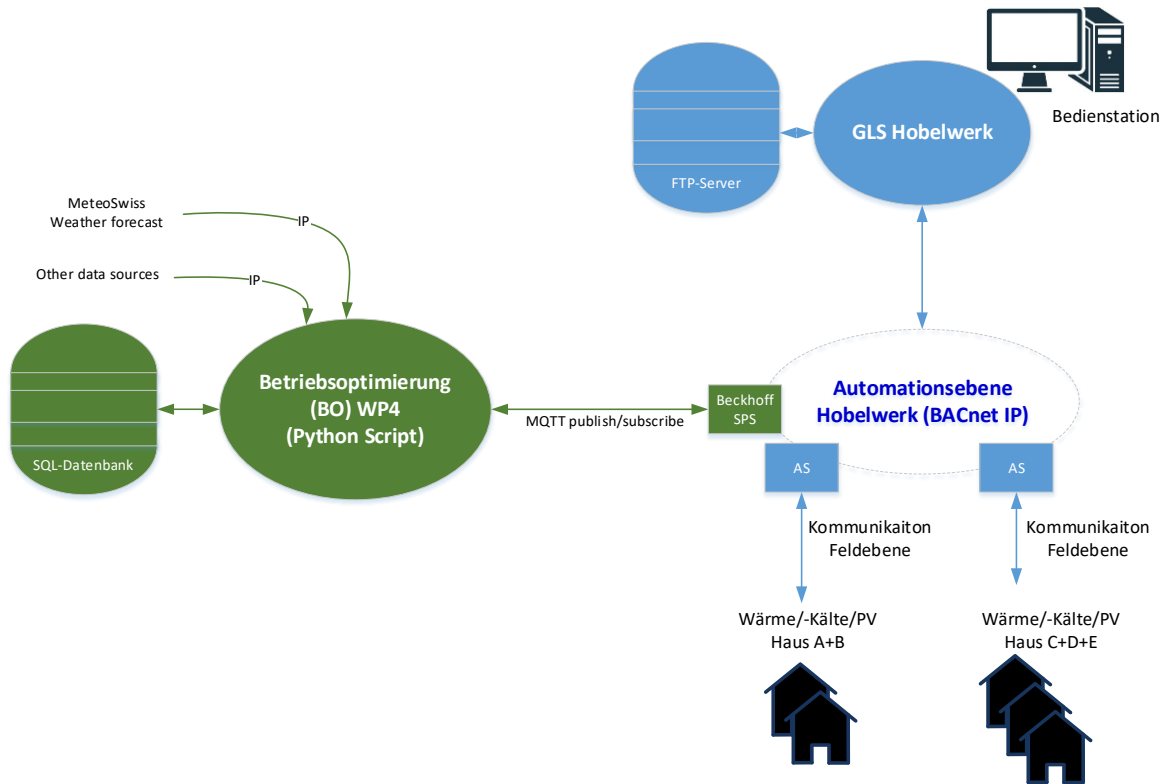


Abbildung 59 Konzeptionelle Anordnung und Integration der Betriebsoptimierung in das Automationssystem HOBELWERK



Abbildung 60 Auf dem Flachdach von Haus A aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpe; Wärmeleistung (A-7/W35): 140 kW

5.7 Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus A und Haus B

5.7.1 Betriebsoptimierung Haus A

Die monovalente Wärme- und Brauchwarmwasserbereitstellung in Haus A wurde für die Betriebsoptimierung, wie in Kapitel 5.6 beschrieben, modelliert. Ziel der Optimierung war es, die elektrische Spitzenleistung zu reduzieren. Da die Wärmepumpe zur Wärmebereitstellung, sowie die Wärmepumpe zur Brauchwarmwasserbereitstellung können modulierend betrieben werden. Gleichermassen besitzen



beide Systeme thermische Speicher. Im Betrieb mit Standardregler, werden die beiden Systeme unabhängig voneinander geführt, durch die Sensoren der jeweiligen Speicher. Durch das Flexibilitätspotential der Speicher besteht eine Möglichkeit den Betrieb der beiden Wärmepumpen zu beeinflussen, damit nicht nur wärmegeführt, sondern die summierte elektrische Leistung der beiden Wärmepumpen reduziert wird, bei gleichzeitiger Bereitstellung der notwendigen Temperaturen.

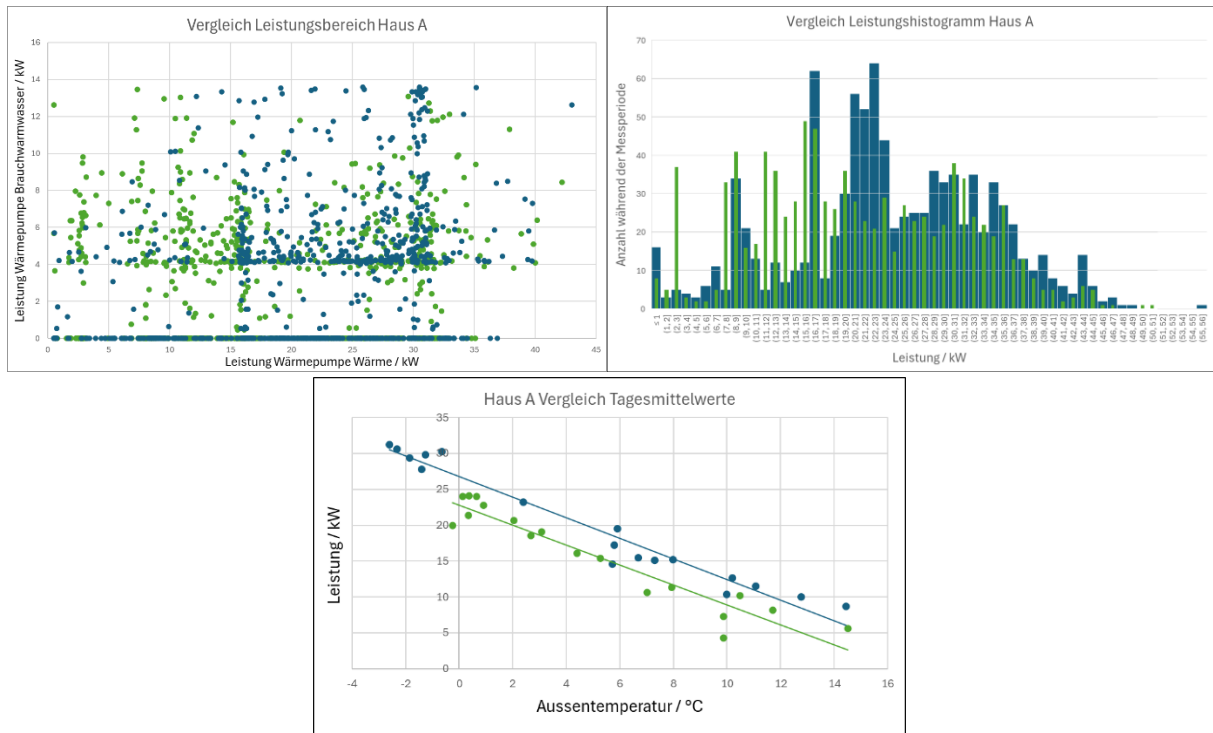


Abbildung 61: Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für Haus A

Das Regelverhalten der Betriebsoptimierung führt zu einem reduzierten gleichzeitigen Betrieb der beiden Wärmepumpen in Haus A. Abbildung 61 (oben rechts) zeigt das Histogramm von 15-Minuten Daten der summierten Leistung der Wärmepumpen. Als Referenzdatensatz für den Standardregler wurde eine Zeitfenster gewählt, welches über dieselbe Messdauer dieselbe mittlere Aussentemperatur hat, was eine Vergleichbarkeit erlaubt. Die maximale Spitzenleistung konnte um 9% reduziert werden und so ein positives Peak-Shaving erzielt werden. Auf Basis dieser Daten konnte die Spitzenleistung um 4.9kW reduziert werden. Generell kann eine breitere Verteilung der Leistungen beobachtet werden. Besonders bei tieferen Leistungsbereichen, zwischen 7 und 19kW können vermehrt Betriebspunkte beobachtet werden. Bezüglich der Energie konnte ebenfalls eine Reduktion festgestellt werden. Über den Versuchszeitraum wurden 13% weniger elektrische Energie benötigt, sowie der mittlere COP (resp. JAZ) um 2,6% verbessert. Im Einheitstarif der lokalen Stadtwerke Winterthur ergibt dies auch eine Reduktion der Betriebskosten von 13%. Betrachtet man die mittleren Leistungen und Aussentemperaturen pro Tag, kann eine nahezu parallel verschobene Leistungskurve gegenüber dem Standardregler beobachtet werden (siehe Abbildung 60: unten).

Für den Temperaturverlauf von 2025 benötigen die beiden Wärmepumpen 109MWh im Standardfall, oder 84.8MWh während der Betriebsoptimierung. Wendet man die Treibhausgasfaktoren auf die Tageswerte an, ergeben sich 9.38tCO₂, resp. 7.51tCO₂.



5.7.2 Betriebsoptimierung Haus B

Der Regler, basierend auf dem identifizierten und trainierten Modell von Haus A, wurde auf Haus B angewandt und wiederum die Performance analysiert. Da die Anordnung der Komponenten und Sensorplatzierung nahezu identisch zu Haus A ist, mussten konnte ein Reglertransfer in Frage kommen. Es wurden lediglich die Leistungsgrenzen der Wärme- und Brauchwarmwasserpumpen angepasst, dass diese sich zwischen Haus A und Haus B unterscheiden.

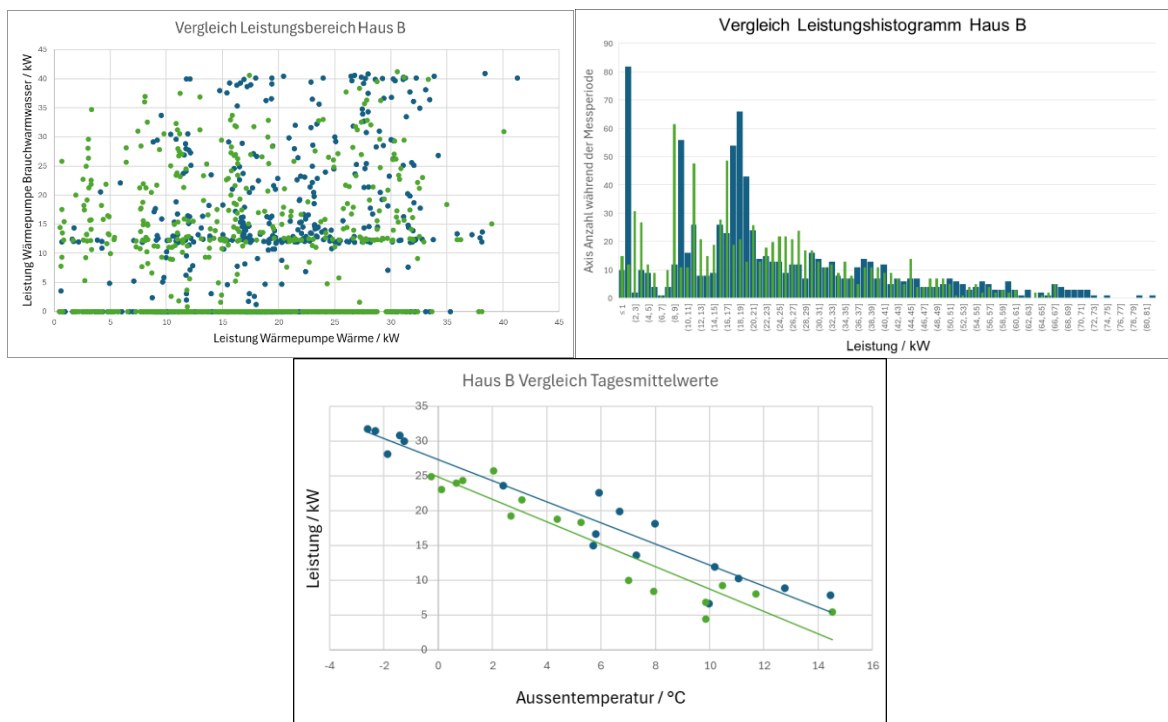


Abbildung 62: Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für Haus B

Ähnlich zu den Beobachtungen zu Haus A können auch hier Reduktionen bei Leistungsspitzen, Energiebezug und CO₂-Emissionen beobachtet werden, verursacht durch ein verbessertes Regelverhalten.

Mit einer Reduktion des Energiebezugs von 6.0% fällt die Reduktion kleiner aus wie bei Haus A. Vor allem kann eine weniger gute Performance bei kälteren Temperaturen (Abbildung 62 rechts) beobachtet werden, wo sich der Verbrauch im Betriebsoptimierungsfall, vermehrt an den Verbrauch mit Standardregler annähert. Da sich die Vorhersage (basierend auf dem gelernten Verhalten von Haus A) von dem tatsächlichen Wärmebedarfsprofil in Haus B unterscheidet, kann der Regler bei tieferen Temperaturen nicht das ganze Optimierungspotential ausschöpfen. Die Spitzenleistung konnte trotzdem um 9.9%, respektive 8.1kW reduziert werden, was wiederum ein positives Peak-Shaving Resultat darstellt. Ein vergleichbares Ergebnis zur Anwendung in Haus A. Auch hier konnte ein tendenziell breiteres Spektrum an Leistungsbereichen beobachtet werden (Abbildung 62 rechts). Der COP (resp. JAZ) der Wärmepumpen bleibt praktisch unverändert zum Standardregelfall mit einer Veränderung von -0.39%.

Wendet man auch hier die Treibhausgasfaktoren auf die Tageswerte an, ergeben sich 8.32tCO₂, resp. 6.76tCO₂, was einer Reduktion von 18.8% entspricht und somit leicht schlechter, wie im Fall von Haus A ausfällt.



5.8 Betriebsoptimierung auf den Anlagen von Haus C, D und E

5.8.1 Betriebsanalyse

Während Heizperioden wird der Pelletkessel zu Spitzenzeiten eingesetzt. Dies vor allem in kälteren Perioden, um die Wärmepumpe zu unterstützen. In der Heizperiode 2024/2025 wurden 14.9% des thermischen Bedarfs (Raumwärme und Brauchwarmwasser) vom Pelletkessel bereitgestellt.

Es kann beobachtet werden, dass die Auslegung der Wärmepumpe (225kW thermisch) ausreichen würde, um den jeweiligen Tagesbedarf zu decken. Dies ebenfalls bei kälteren Temperaturen, als sie im Winter 2024/2025 beobachtet wurden (Abbildung 63). Extrapoliert man den Verbrauch linear würde man bei -8°C mittlerer Tagestemperatur, einen mittleren Verbrauch von 150.8kW erwarten.

Da jedoch die Wärmeproduktion rein bedarfsgesteuert implementiert ist, kann die Wärmepumpe nur auf Bedarf reagieren. Daher wird nicht das ganze Potential der Anlage ausgeschöpft. Eine prädiktive Regelung würde der Wärmepumpe erlauben, künftigen Bedarf zu antizipieren, bereits vorzuproduzieren, und so Engpässe, die den Pelletkessel aktivieren würden, vermeiden.

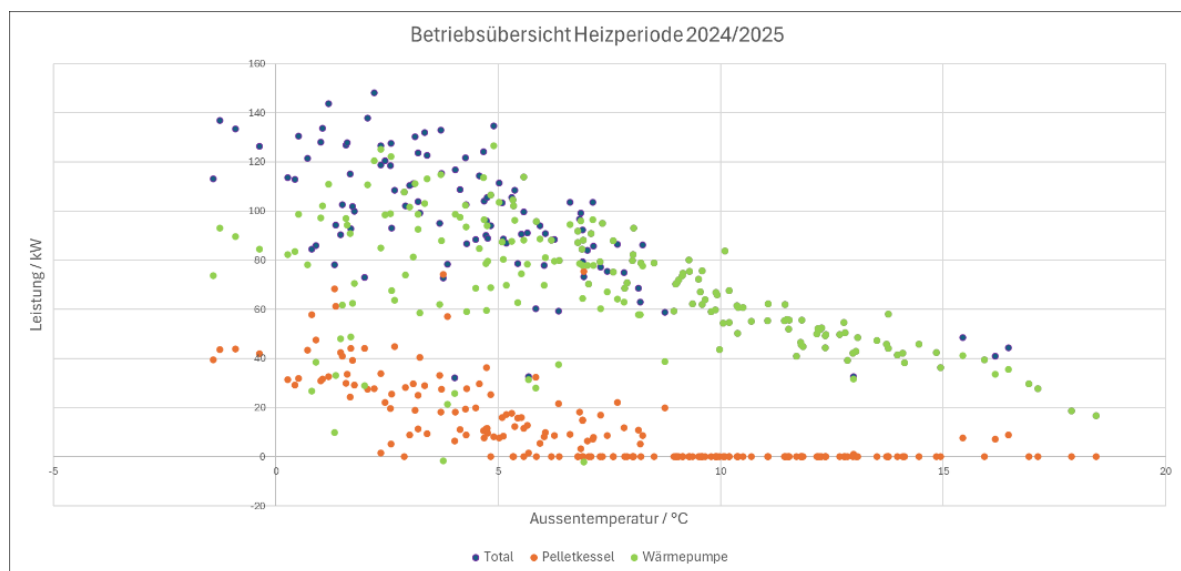


Abbildung 63: Tagesmittelwerte der thermischen Leistung der Wärmepumpe (grün), des Pelletkessels (orange), sowie deren Summe (violett)

Man kann beobachten, dass der gesamte Wärmebedarf gut durch die Anlagen bereitgestellt werden kann. Mit einer Nennleistung im Auslegungspunkt der Wärmepumpe von 225kW, sowie des Pelletkessels von 200kW, würde im Tagesmittel genügend Kapazität zur Verfügung stehen, um den Wärmebedarf auch bei sehr kalten Temperaturen durch lediglich eine der beiden Anlagen zu decken. Das Zuschalten des Spitzenlastsystem kann beobachtet werden, wenn tagesintern der Wärmebedarf die Nennleistung der Wärmepumpe übersteigt, Brauchwarmwasserzwangsladungen für alle drei Gebäude gleichzeitig durchgeführt werden, oder längere Abtauvorgänge bei tiefen Speichertemperaturen auftreten. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt zwei Tage mit Aussentemperaturen um null Grad, während denen das Spitzenlastsystem nach dem Hochfahren der Wärmepumpe auf ihr Maximum unterstützt (grüner Kreis). Davor und danach fährt die Wärmepumpe unter 50% der Nennleistung. Es können auch Fälle beobachtet werden, in denen das Spitzenlastsystem zuschaltet, aber die Wärmepumpe nicht auf 100% läuft (roter Kreis).



Es ist also davon auszugehen, dass ein Flexibilitätspotential vorhanden ist, den Anteil des Spitzenlastsystem weiter zu reduzieren.

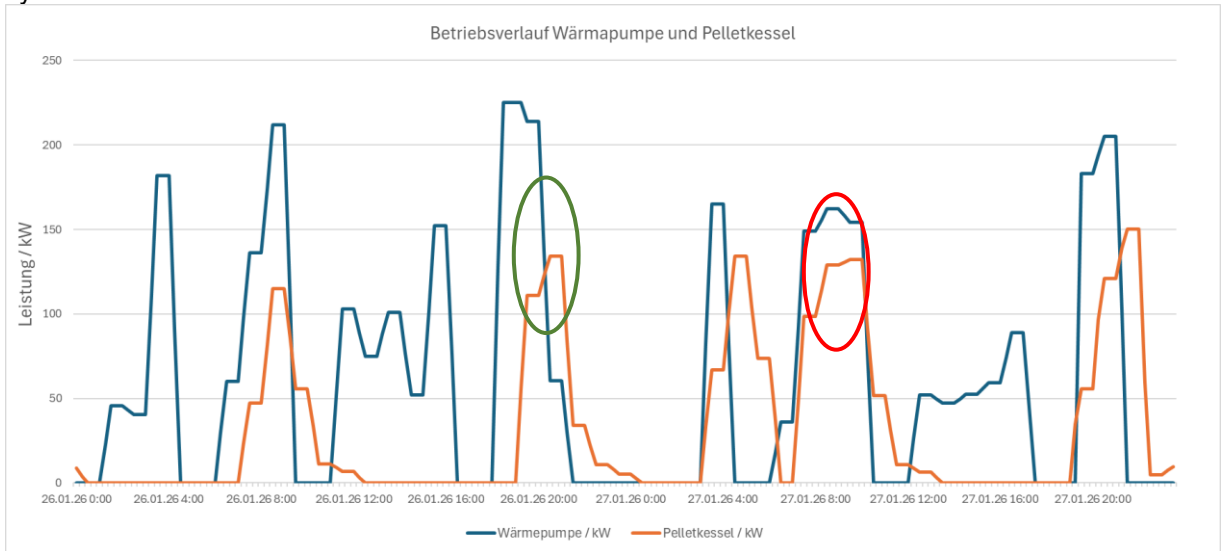


Abbildung 64: Leistungsverlauf von Wärmepumpe und Pelletkessel über 2 Tage

5.8.2 Regelverhalten Haus C, D und E

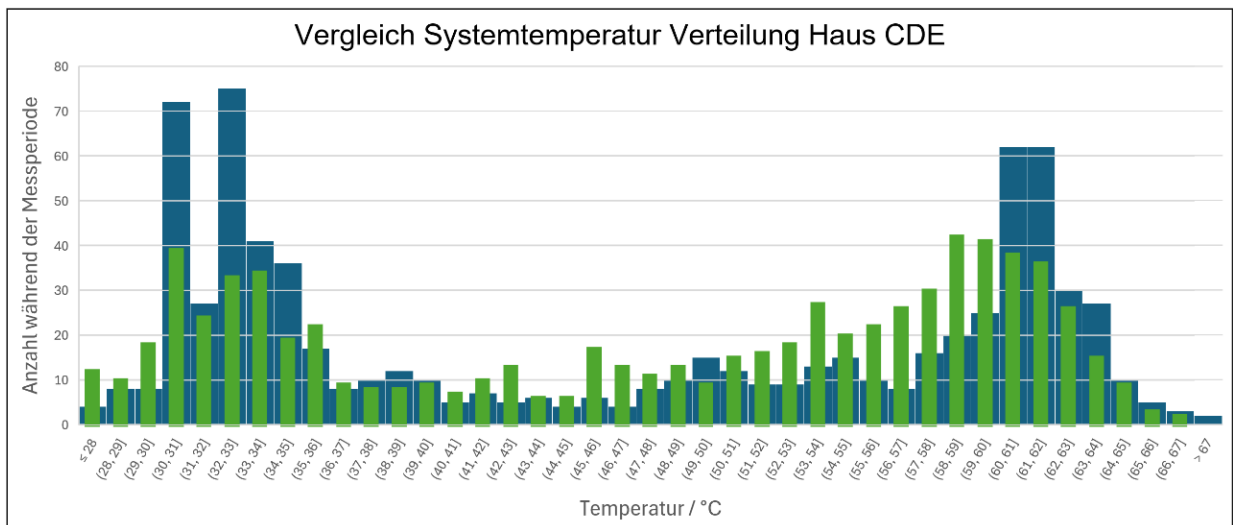


Abbildung 65: Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für die Systemtemperatur der Wärmeverteilung in Haus CDE

Ein Schwerpunkt dieses Arbeitspakets liegt in der Koordination des Spitzenlastsystems (Pelletkessel) und der Wärmepumpenanlage. Es kann der Trend beobachtet werden, dass je kälter die mittlere Tagestemperatur ist, desto mehr Energie wird auch durch das Spitzenlastsystem gedeckt. Abbildung 66 zeigt dazu die mittlere Tagesleistung der beiden Anlagen entsprechend der Tagesmitteltemperatur.

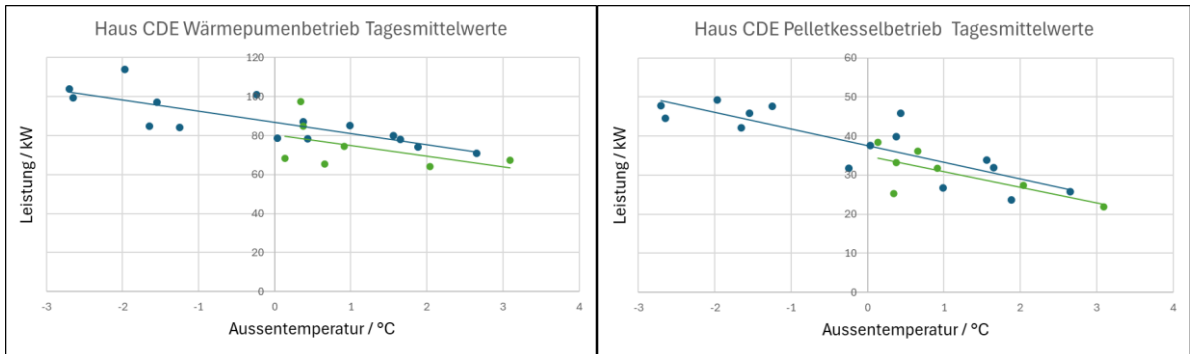


Abbildung 66: Messresultate zwischen Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün) für die Wärmepumpe (links) und den Pelletkessel (rechts) der Wärmeversorgung für Haus CDE

Zusammen mit dem Anlagenbetreiber wurde entschieden, eine generelle Energieeffizienz zusammen mit einer Spitzenlastreduktion zu erzielen mit der Betriebsoptimierung. Dies resultiert in einer Reduktion des Wärmepumpenbetriebs, und des Pelletkessels. Hätte man sich ausschliesslich auf eine Spitzenlastreduktion fokussiert, hätte man einen vermehrten Wärmepumpenbetrieb erwartet. Dadurch wäre der Prozentuale Anteil des Pelletofens mehr reduziert worden. Im ausgewogenen Fall konnte dennoch der Spitzenlast Anteil von 28.8% auf 26.8% reduziert werden. Da die Betriebsoptimierung den Pelletkesselbetrieb reduziert (um 13.2%), aber auch den Wärmepumpenbetrieb (um 4.2%) reduziert, kann die Energieeffizienz über die gesamte Anlage und beide Energieträger gesteigert werden, wie in Abbildung 70 ersichtlich ist.

5.8.3 Einschaltdauer Pelletkessel und Wärmepumpe

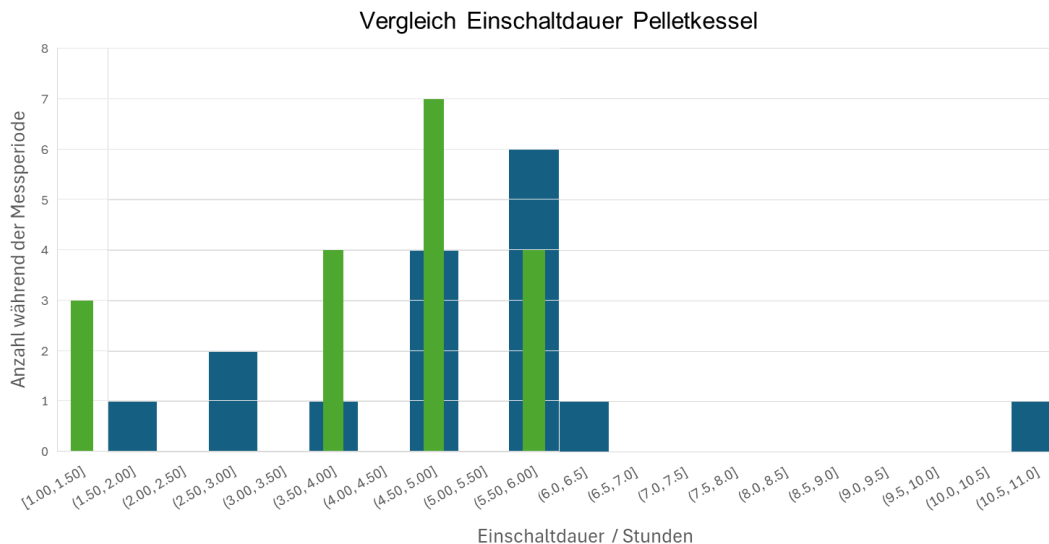


Abbildung 67: Histogramm über die Einschaltdauer des Pelletofens mit Standardregler (blau) und Betriebsoptimierung (grün)

Der Pelletkessel hat eine mittlere Einschaltdauer von 5.3 Stunden unter dem Standardregler. Vergleicht man diese mit der Betriebsoptimierung reduziert sich die Laufzeit auf 4.3 Stunden. Die Anzahl der Ein-/Ausschaltzyklen bleibt nahezu konstant. Es kann eine kleine Reduktion von 2.5% festgestellt werden. Diese kürzeren Einsätze werden durch einen längeren Betrieb der Wärmepumpe kompensiert. Bei aktivierter Betriebsoptimierung kann eine 20.1% längere Laufzeit der Wärmepumpe festge-



stellt werden. Interessanterweise erhöht sich aber die Anzahl Ein-/Ausschaltzyklen nicht, sondern reduziert sich sogar um 7.7%. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt ein Histogramm der Einschaltdauer des Pelletkessels während einer Woche mit gleicher Aussentemperatur.

5.8.4 THG-Emissionsbetrachtung

Vergleicht man die entstandenen THG-Emissionen der einzelnen Anlagen über die Monate der Heizperiode sieht man, dass in den kälteren Monaten, die bivalente Anlage höhere Emissionen aufweist, wie die Anlagen von Haus A und Haus B. Über die gesamte Periode (Oktober 2024 – April 2025) ergeben sich aufsummiert rund 0.185 gCO₂-eq/EBF für Haus A, 0.162 gCO₂-eq/EBF (87.6%) für Haus B und 0.168 gCO₂-eq/EBF (90.7%) für die Anlage in Haus CDE.

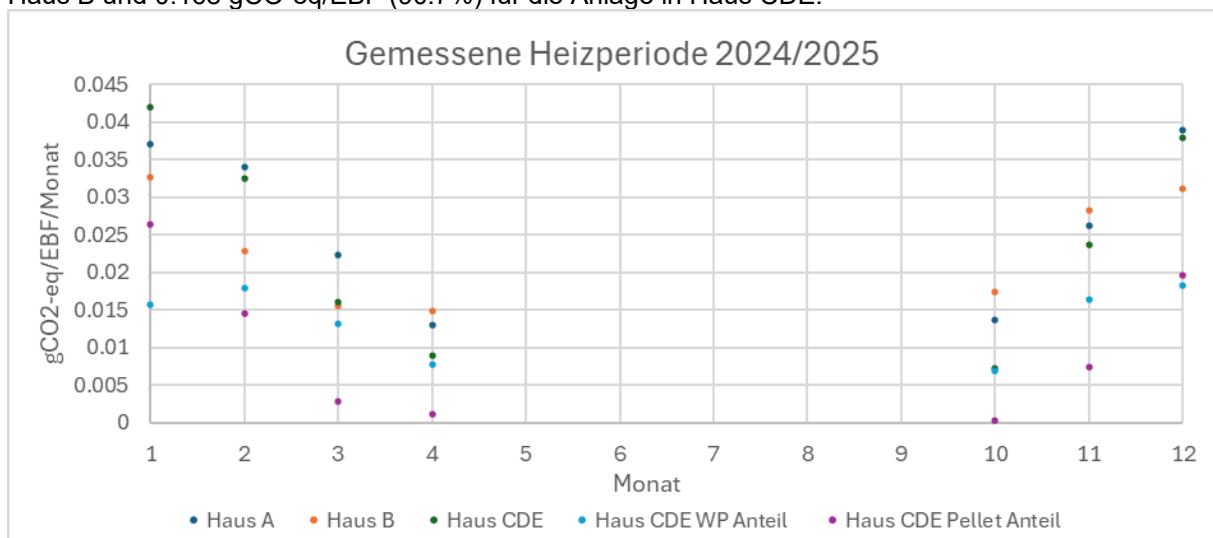


Abbildung 68: Resultierte Emissionen normiert auf die Energiebezugsfläche der einzelnen Anlagen

Ein Was-wäre-wenn Szenario wurde simuliert, um die Emissionsbelastung bei einem Fall bewerten zu können, wo die Pelletkessel-Produktion durch eine zusätzliche Wärmepumpenproduktion ersetzt wird. Es kann beobachtet werden, dass eine Reduzierung der Emissionen resultiert. Durch ein dynamisches Verhalten der Wärmepumpe kann ihre Produktion auf Zeiten tiefer CO₂-Belege im Verteilnetz gelegt werden.

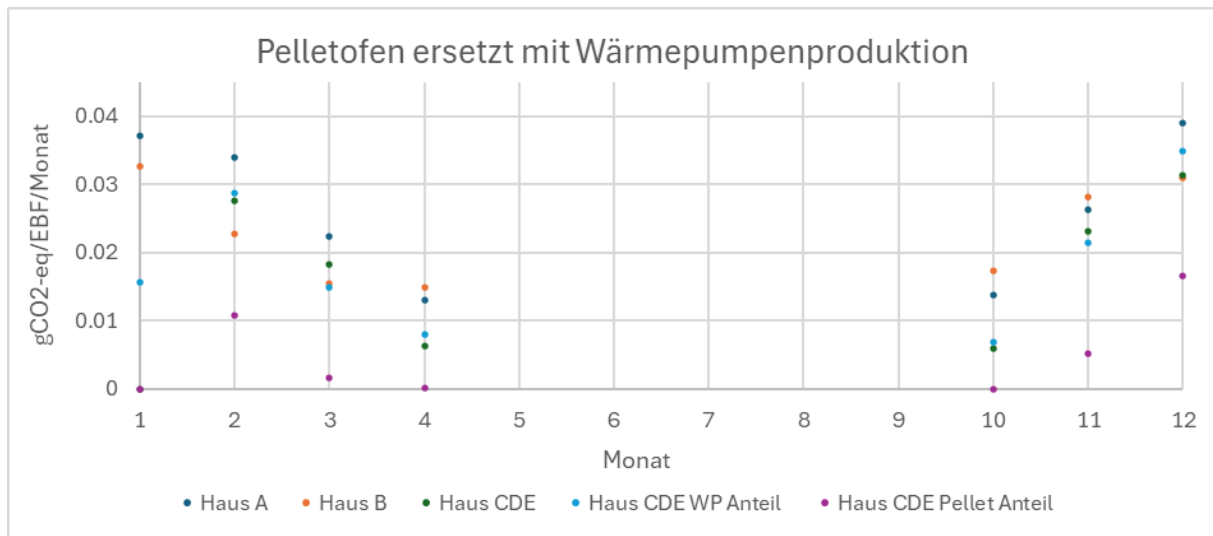


Abbildung 69: Emissionsoptimiertes Szenario bei reduziertem Pelletkesselbetrieb

Die Auswertung der Emissionsdaten zeigt, dass die spezifischen Treibhausgasemissionen je nach Betriebsmodus der Anlage deutlich variieren. Die prädiktive Regelung reduziert den Pelletkesselbetrieb, indem sie Lastspitzen abfängt und den Wärmepumpenanteil erhöht. In den untersuchten Betriebsphasen konnte der Anteil des Pelletkessels im Vergleich zur Standardregelung um mehrere Prozentpunkte gesenkt werden, was entsprechend zu einer Verringerung der resultierenden Emissionen führt. Die vorliegenden Werte verdeutlichen, dass die Emissionsbilanz der Anlagen nicht allein durch die Energieträger, sondern wesentlich durch die zeitliche Betriebsführung bestimmt wird.

Betrachtet man die entsendenden direkten und indirekten Emissionen, die während der Referenzwoche und dem Versuchszeitraum entstanden sind, ergibt sich auch hier eine messbare Veränderung mit aktiver Betriebsoptimierung. Im Referenz Zeitraum mit Standardregler entstanden 468.2kgCO₂-eq, wobei die indirekten Emissionen durch Netzstrom mit 71.7% überwiegen, der Rest wird durch den Verbrauch von Pellets beigetragen (siehe Abbildung 70). Bei aktiver Betriebsoptimierung entstanden 466.4kgCO₂-eq, was einer marginalen Reduktion von unter einem Prozent entspricht. Da der Regler der Betriebsoptimierung primär versucht hat die Spitzenlast zu reduzieren, und nicht totale Emissionen, sieht man keine Verbesserungen. Man kann jedoch den Einfluss der Spitzenlastreduktion erkennen, da sich der Netzstromanteil erhöht - auf 77.6% - und jener der Pellets sich entsprechend verringert.

Betrachtet man ein ganzes Jahr, ergibt sich ein klareres Bild der Einsparungen. Den Temperaturverlauf von 2025 sowie den dabei herrschenden Treibhausgasfaktoren, würde man im Mittel eine Reduktion um 8.15% erwarten, also von 9.7tCO₂ mit Standardregler, zu 8.9tCO₂ mit Betriebsoptimierung.

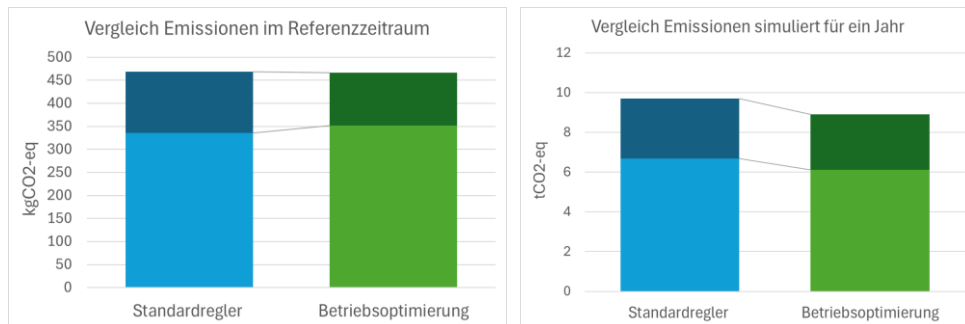


Abbildung 70: Vergleich der entstandenen Emissionen durch den Pelletkessel (dunkel) und die Wärmepumpe (hell), gemessen im Referenzzeitraum (links) und simuliert für das ganze Jahr 2025 (rechts), für den Standardregler (blau) und die Betriebsoptimierung (grün).

Trägt man das Einsparpotential über das Jahr auf (siehe Abbildung 71), sieht man, dass in kälteren Perioden die Betriebsoptimierung stärker Einfluss nehmen kann.

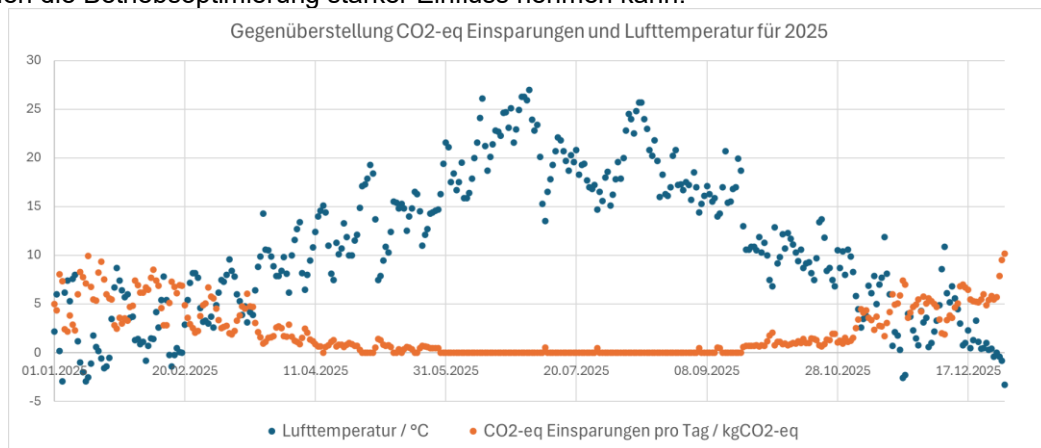


Abbildung 71: CO2-eq Einsparungspotential über das Jahr 2025. Orange zeigt das CO2-eq Einsparpotential pro Tag, welches bei tieferen Lufttemperaturen (blau) grösser wird.



5.8.5 Brennstoffvergleich

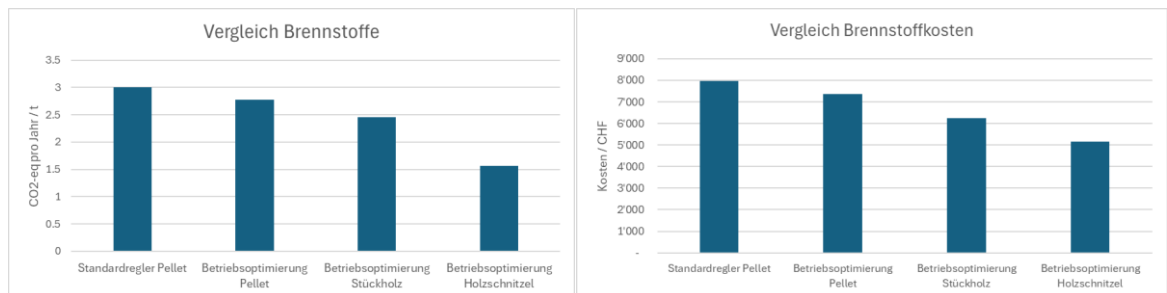


Abbildung 72: Vergleich unterschiedlicher Brennstoffe bezüglich CO2-eq und Brennstoffkosten.

Neben den CO2-äquivalenten Emissionen würden sich auch die Betriebskosten reduzieren; je nach Fall, zwischen 9% bis 47% (siehe Abbildung 72). Es gilt jedoch zu beachten, dass um 60% (Stückholz) oder um 300% (Holzschnitzel) öfters, das Brennstofflager wieder aufgefüllt werden müsste (respektive ein grösseres Lagervolumen bereitgestellt werden). Was den Betriebsaufwand erhöht. Zudem verbrennen Pellets besser, was weniger Feinstaub, CO und VOC freisetzt, als bei einem Einsatz vom Stückholz oder Holzschnitzel.



5.9 Variantenvergleich der Lebenszykluskosten und Treibhausgasbilanz

Die Investitions- und Lebenszykluskosten sowie die Treibhausgasbilanz der Wärmeerzeugung der Häuser C,D,E werden für vier Varianten berechnet (siehe Tabelle 27). Im Unterschied zu Kap. 5.8.4 wird hier entsprechen den geltenden Ökobilanznormen im Baubereich (SIA 390/1) für Elektrizität der durchschnittliche Schweizer Strommix gemäss KBOB:2022 (CH-Verbrauchermix) verwendet.

Die Basisvariante entspricht der tatsächlich umgesetzten Lösung mit einer 225 kW Luft/Wasser-Wärmepumpe und einem 200 kW Pelletkessel. Die Summe der Wärmeleistung der Wärmepumpe und des Pelletkessels entsprechen 150% des Wärmebedarfs der drei Gebäude im Auslegungspunkt. Die realisierte Wärmeerzeugung wurde bewusst mit Redundanzen ausgelegt, um eine gewisse Flexibilität im Anlagenbetrieb zu ermöglichen.

Tabelle 27 Untersuchte Varianten der Wärmeerzeugung der Häuser C,D,E

Lüftungssysteme	Wärmeleistung WP / Pellets kW	Pelletkessel- anteil %	JAZ bzw. Nutzungsgrad Raumheizung / Warmwasser - / -
Luft/Wasser-WP + Pelletkessel	225 / 200	15%	3.8 / 2.2
Luft/Wasser-WP + Pelletkessel, optimiert	200 / 80	2%	5.0 / 3.0
Luft/Wasser-WP monovalent	280	0%	3.8 / 2.2
Pelletkessel monovalent	280	100%	0.85 / 0.85

JAZ = Jahresarbeitszahl

Neben der realisierten Lösung wird eine optimierte Variante mit einer kleineren und effizienteren Luft/Wasser-Wärmepumpe (200 kW) und einem kleineren Pelletkessel (80 kW) betrachten. Zum Vergleich wird zudem je eine monovalente Luft/Wasser-Wärmepumpe, wie in den Häusern A und B vorhanden, sowie ein monovalenter Pelletkessel im Vergleich miteinbezogen.

Bei allen Varianten wird vom gemessenen jährlichen Wärmeverbrauch der Häuser C,D,E für Raumheizung (28 kWh/(m²a) und Warmwasser (18 kWh/(m²a)) ausgegangen. Der aus diesen Annahmen resultierende Endenergiebedarf der Wärmepumpe (Elektrizität) und des Pelletkessels (Pellets) ist in Abbildung 73 dargestellt.

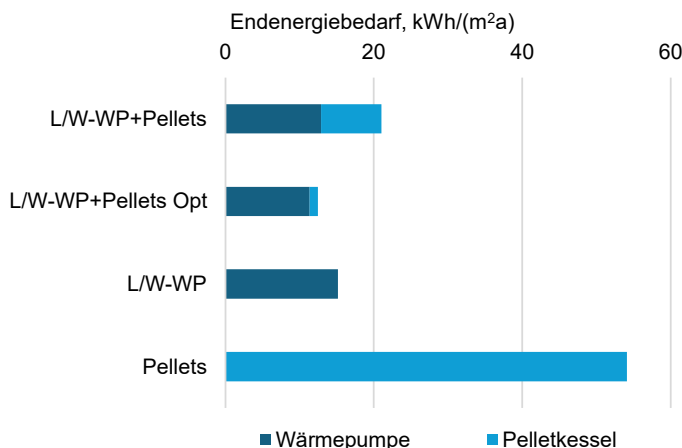


Abbildung 73: Endenergiebedarf der vier Varianten für die Wärmeerzeugung der Häuser C,D,E



Die Investitions- und Jahreskosten der ersten Variante «L/W-WP + Pellets» basieren auf den effektiven Kosten gemäss Bau- und Betriebskostenabrechnung. Die Energiepreise liegen aktuell für Elektrizität bei 28 Rp./kWh und für Pellets bei 9 Rp./kWh. Die Kosten der anderen drei Varianten werden parametrisch auf der Grundlage der Kennzahlen der tatsächlich aufgeführten Variante abgeschätzt. Während bei den Investitionskosten der monovalente Pelletkessel deutlich günstiger ist, liegen die Jahreskosten für Kapital (Amortisation und Verzinsung der Investition), Energie und Wartung in der Summe bei allen vier Varianten nahe beieinander, im Bereich von 6.7 bis 8.5 CHF/(m²a).

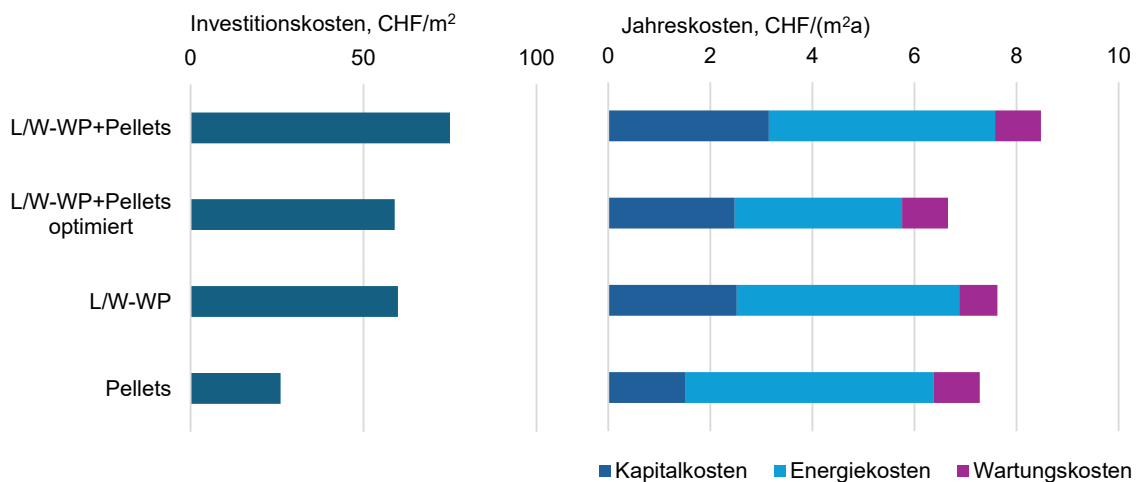


Abbildung 74: Investitions- und Jahreskosten der vier Wärmeerzeugungsvarianten für die Häuser C,D,E

Bezüglich der Treibhausgasbilanz für Erstellung, Betriebsenergie und Wartung der Wärmeerzeugungsanlagen scheiden die beiden Varianten «Luft-WP + Pellets optimiert» und «Pellets (monovalent)» rund 25% besser ab als die beiden anderen Varianten. Gemäss Wärmestrategie des Bundesamts für Energie stehen Pellets und Holz zukünftig nicht oder nur sehr begrenzt für Heizzwecke zur Verfügung, da diese nachwachsenden Brennstoffe zur Erreichung des Netto-Null-Ziels der Schweiz für Hochtemperaturprozesse in der Industrie und Stromerzeugung benötigt werden.

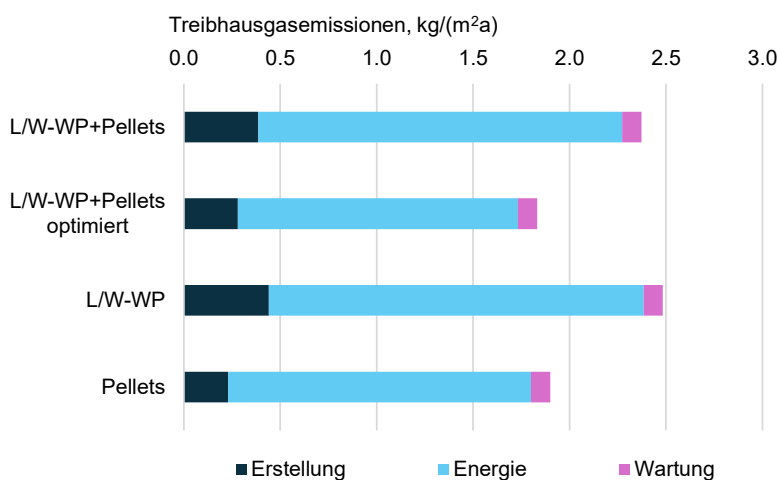


Abbildung 75: Treibhausgasbilanz der vier Wärmeerzeugungsvarianten für die Häuser C,D,E



Für zukünftige Wohnbauprojekte in der Grösse des Hobelwerk Areals rückt somit die Variante «L/W-WP + Pellets optimiert» in den Vordergrund. Dafür muss die Arbeitszahl der Luft/Wasser-Wärmepumpe deutlich verbessert und der Energieanteil des Pelletkessels in einem durchschnittlich milden Winter auf nahezu 0% reduziert werden. Beides, die höhere Arbeitszahl als auch der tiefe Spitzelastanteil ist gemäss Erfahrungen aus anderen bereits realisierten Wohnbauprojekten machbar.

5.10 Bewertung der Ergebnisse

- Die prädiktive Regelung der Wärmepumpen führt zu einem reduziertem Energiebezug (bis -13 % in Haus A), wodurch Betriebskosten und THG-Emissionen sinken. Signifikant verbesserte COP/JAZ-Werte konnten nicht nachgewiesen werden.
- Durch prädiktive Regelung konnten die elektrischen Spitzenleistungen der Wärmepumpen systematisch reduziert werden (z. B. -9 % in Haus A und -9.9 % in Haus B), was Netzanschlüsse entlastet und Investitionskosten potenziell senkt.
- Da während der Implementierung der Betriebsoptimierung von Haus CDE vom Anlagenbetreiber eine Spitzenlastreduktion und eine generelle Energieeffizienzoptimierung gewünscht wurde, hat die Betriebsoptimierung das vorhandene Flexibilitätspotential genutzt, um gleichzeitig, den Betrieb der Wärmepumpe (um 4.2%) und des Pelletkessels (um 13.2%) zu reduzieren.
- Der erfolgreiche Reglertransfer von Haus A nach B zeigt, dass selbstlernende Modelle standortübergreifend funktionieren können - ein starkes Signal für die Skalierbarkeit für ähnliche Anlagen.



6 AP5: Treibhausgase und Lebenszykluskosten

6.1 Ausgangslage

Es ist bisher noch unklar, welche Kosten-/Umweltnutzen die einzelnen, in der Arbeitspaketen AP1 bis AP4 untersuchten, Ansätze haben. Für eine erfolgreiche Skalierung der Massnahmen sind diese Kenntnisse aber unabdingbar. AP5 stellt die verschiedenen Ansätze auf eine vergleichbare Basis und erlaubt damit eine Synthese auf Gebäudeebene.

6.2 Fragestellung und Zielsetzung

AP5 hat zum Ziel, die einzelnen Ansätze vergleichbar zu machen. Das Gesamtprojekt wird mit einem gemeinsamen Analyserahmen und einheitlichen Kenngrössen (z.B. CHF pro eingesparte Tonne CO_{2,eq}) evaluiert.

6.3 Vorgehen und Methode

AP5 umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Berechnung der eingesparten Treibhausgasemissionen und der Mehr- und Minderkosten durch die Innovationen im Holzbau (AP1)
- Berechnung der eingesparten Treibhausgasemissionen und der Mehr- und Minderkosten, auch unter Berücksichtigung der zu erwartenden Restlebensdauer, der Re-Use Bauteile (AP2)
- Auswertung der Materialauszüge um die Treibhausgasemissionen sowie die Investitionskosten für die Erstellung der bedarfsabhängig geregelten Abluftanlagen (AP3) zu ermitteln
- Vergleich der Treibhausgasemissionen der Erstellung der beiden unterschiedlichen Wärmeerzeugungssysteme (monovalent versus bivalent) (AP4)
- Analyse von CO₂-Ausstoss und Kosten der bivalenten Heizungsanlage anhand statistischer Analyse des Brennstoffverbrauchs, der Wärmeproduktion, der Aussentemperatur und weiteren Daten des Gebäudeleitsystems (AP4)
- Identifikation von Synergiepotential und vom abnehmenden Grenznutzen bei der Kombination der einzelnen Ansätze

6.4 Treibhausgasbilanz

6.4.1 Vergleich mit den Anforderungen gemäss SIA 390/1

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen der realisierten Gebäude behandelt. Dabei fliessen die Erkenntnisse der einzelnen Arbeitspakete in die Auswertung ein. Dargestellt werden die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus, bezogen auf die Energiebezugsfläche und die Lebensdauer der einzelnen Bauteile. Die Bilanz umfasst die Emissionen der Gebäudeerstellung, des Betriebs und der durch die Gebäudenutzung induzierten Alltagsmobilität.

Die höchsten Treibhausgasemissionen sind, wie zu erwarten, bei Haus E, dem Massivbau, festzustellen (siehe Abbildung 76). Um rund 10% besser schneidet Haus C ab. Spitzenreiter ist das Haus D welches 15 % besser ist als Haus E. Zum guten Ergebnis tragen bei Haus D der Holzbau, Re-Use-Bauteile sowie der Verzicht auf ein Untergeschoss bei.



Bei allen drei Häusern werden für diesen Zwischenbericht die gleichen Werte auf Ebene Betrieb und Mobilität verwendet. Eine differenzierte Auswertung der Betriebsemissionen erfolgt im nächsten Zwischenbericht.

Die beiden Holzbauten C und D halten sowohl den Zielwert B als auch die Zusatzanforderung B für Wohnbauten gemäss SIA 390/1 ein. Der Massivbau, Haus E, überschreitet die Zusatzanforderung B deutlich, um $1.4 \text{ kg/m}^2\text{a}$ und den Zielwert B knapp, um $0.2 \text{ kg/m}^2\text{a}$.

Dargestellt sind in Abbildung 76 der Zielwert B (jährliche Emissionen Erstellung + Betrieb + Mobilität) und die Zusatzanforderung B (jährliche Emissionen Erstellung + Betrieb) für Wohnbauten. Haus C umfasst auch rund 20% Büroflächen. Der Zielwert B und die Zusatzanforderung B wären daher bei Haus C genau genommen leicht höher.

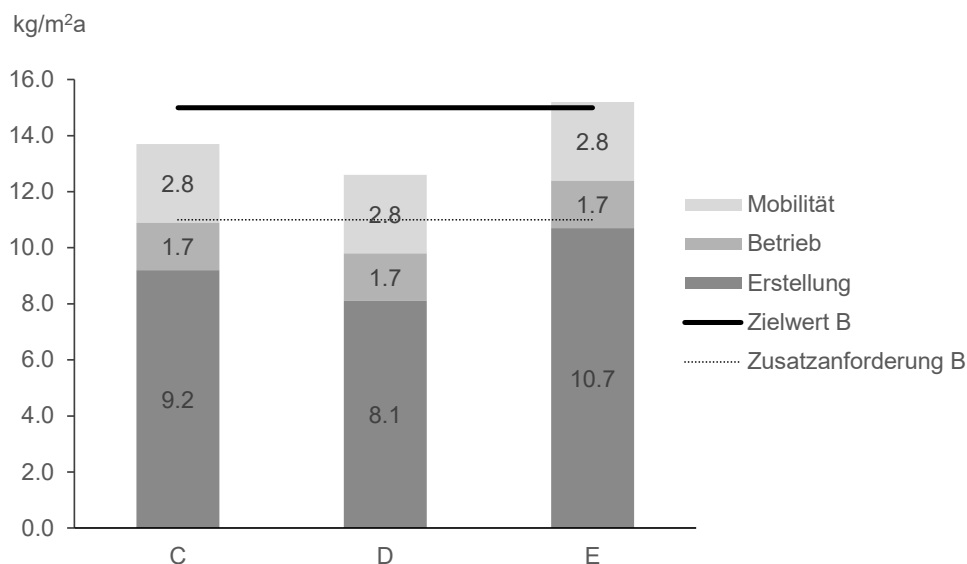


Abbildung 76: Treibhausgasemissionen der Häuser C, D, E für Erstellung, Betrieb und Mobilität – Vergleich mit den Anforderungen gemäss SIA 390/1 Klimapfad; Zielwert B Wohnen: $15.0 \text{ kg/m}^2\text{a}$; Zusatzanforderung B: $11.0 \text{ kg/m}^2\text{a}$

6.4.2 Vergleich Ausführungsprojekt mit Bauprojekt

Auf Stufe Ausführungsprojekt ergeben sich Ökobilanzen, welche über die Detailtiefe der klassischen Nachweisberechnung auf Stufe Baueingabe hinaus gehen. In Abbildung 77 ist ein Vergleich der Ergebnisse auf Stufe Bauprojekt mit den aktuell vorliegenden Ergebnissen der Häuser C, D, E auf Stufe Ausführungsprojekt dargestellt. Die aktuelle Treibhausgasbilanz der drei Häuser ist mit $14.1 \text{ kg/m}^2\text{a}$ gegenüber $15.1 \text{ kg/m}^2\text{a}$ rund $1.0 \text{ kg/m}^2\text{a}$ tiefer als noch auf Stufe Bauprojekt berechnet. Folgendes hat zu den tieferen Werten beigetragen:

- Erstellung: die Materialisierung einzelner Holzbauteile (OSB statt Hartfaserplatte, Vollholz statt Brettschichtholz, Holzfaser statt Steinwolle) und des Laubengangs von Haus C (mehr Stahl, weniger Beton) wurde angepasst.
- Betrieb: der Betriebsenergiebedarf basiert auch beim Ausführungsprojekt noch auf der Baueingabe, die Auswertung des tatsächlichen Betriebsenergieverbrauchs liegt noch nicht vor.
- Mobilität: die tiefe Personenwagen-Verfügbarkeit pro Bewohnende (0.10) wurde auf Stufe Bauprojekt noch nicht korrekt berücksichtigt.

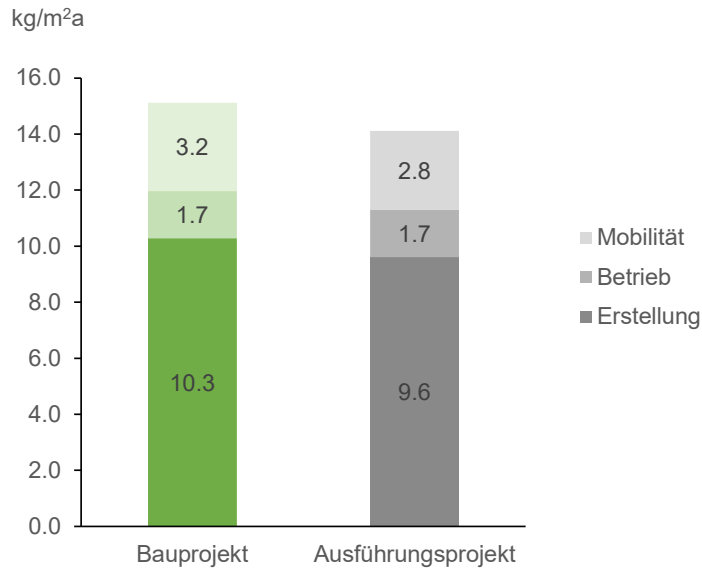


Abbildung 77: Treibhausgasemissionen der Häuser C, D & E für Erstellung, Betrieb und Mobilität – Vergleich Bauprojekt mit Ausführungsprojekt

6.4.3 Treibhausgasbilanz der Erstellung

Auf Ebene Erstellung stellt man fest, dass sich die drei Häuser bezüglich der «Baumaterialien allgemein» und «Haustechnik allgemein» unterscheiden (siehe Abbildung 78). Die Erstellung der Photovoltaikanlage sowie die Erstellung der Tiefgarage hingegen bilden einen «Sockel», der bei allen Gebäuden gleich ist. Grund hierfür ist, dass durch einen Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) alle drei Gebäude gleichermaßen von den auf den Dächern von Haus C und der bestehenden Z-Halle installierten Photovoltaikanlagen profitieren. Weiter nutzen alle Häuser die gemeinsame Tiefgarage, die sich unter den Baufeldern A und B befindet, mit durchschnittlich 0.3 Parkplätzen pro Wohneinheit.

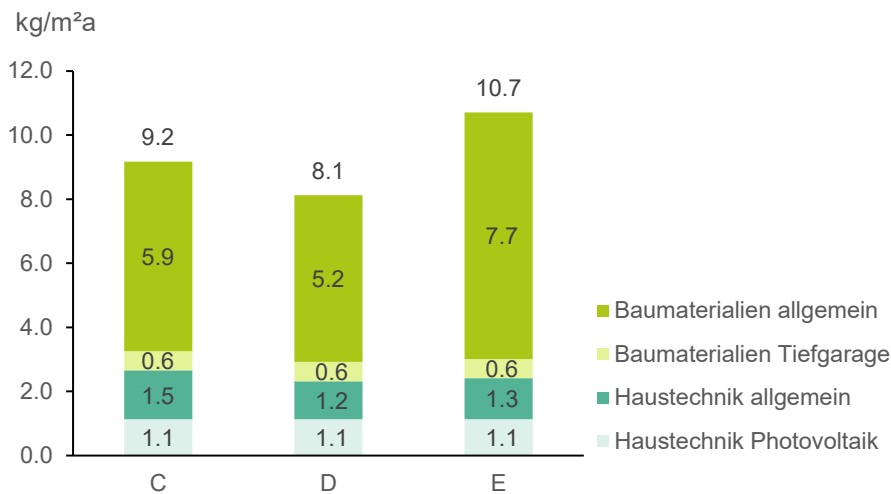




Abbildung 78: Treibhausgasemissionen der Erstellung

Taucht man auf Ebene «Baumaterial allgemein» tiefer ein, lässt sich erkennen, welche Gebäude in Holzbauweise sind. Dabei macht das Holz bis zu einem Drittel der Treibhausgasemissionen aus.

Bei Haus C stammen die meisten Treibhausgasemissionen von Beton (das UG bis 1.OG sind in Beton erstellt), gefolgt von Holz und mineralischen Materialien (Gips, Anhydrit, Mörtel etc.). Zusammen generieren diese Materialien 75% der Treibhausgasemissionen. Im Kapitel 2 «CO₂-optimierter Holzbau» wird auf das Potential eines reinen Holzbaus hingewiesen. Das Metall wird unter anderem für die Stahlstützen des Laubengangs benötigt. Hier fallen insgesamt 75.9 Tonnen an Stahlprofilen an. In den Holzbaumodulen sind zur Aussteifung und zur Erleichterung von Transport und Montage mit dem Pneukan weitere 13.8 Tonnen Baustahl verbaut.

Bei Haus D fallen die tiefen Werte der Fenster auf. Sie sind deutlich tiefer als bei Haus C und Haus E. Grund hierfür ist, dass rund 30% der Fenster aus Re-Use stammen, die rund 50% weniger Treibhausgasemissionen als ein neues Fenster verursachen.

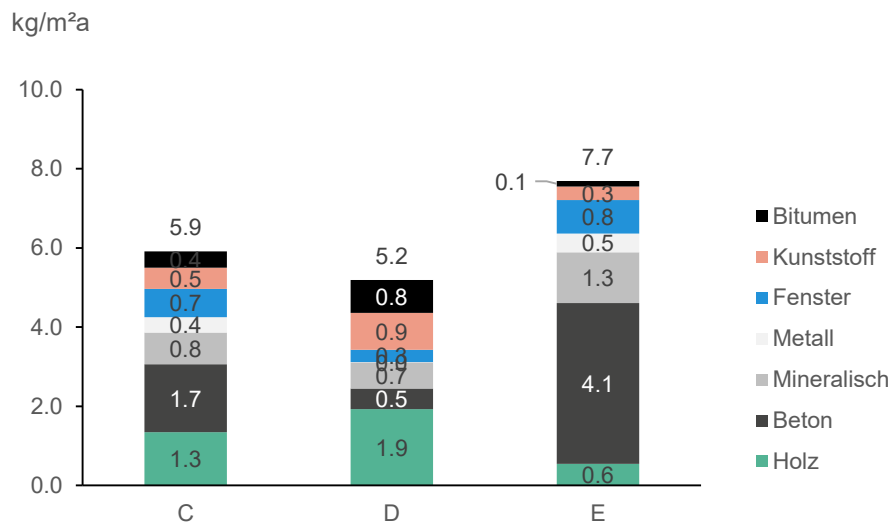


Abbildung 79: Treibhausgasemissionen der Baumaterialien pro Materialgruppe

6.4.4 Optimierungspotenzial - Interviews mit Architekten

Nach einer Analysephase der Erstellungsemissionen mit Fokus Re-Use und Holzbau hat Lemon Consult mit den beteiligten Architekten Gespräche geführt, um mögliche Optimierungen für die Zukunft abzuleiten.

Im Themenbereich Holzbau wurde festgehalten, dass die Nähe der ausführenden Firma ein grosser Vorteil war und verschiedene Anstrengungen unternommen wurden, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Diese Schritte sind im klassischen Massivbau jedoch weniger anspruchsvoll als im Holzbau. Eine Herausforderung im Holzbau sind die Brandschutzvorschriften, welche beispielsweise verhindern, dass die Innenwände aus rohem Holz gefertigt werden können. Zudem musste der Laubengang ebenfalls aus Brandschutzgründen in Stahl/Beton erstellt werden. Ebenso bestanden im Haus C aufgrund der Gewerbenutzungen entsprechende Vorgaben an diese Geschosse, die aus statischen und finanziellen Gründen dazu geführt haben, dass diese Geschosse im Massivbau erstellt wurden.

In den Gesprächen war eine Erkenntnis, dass der Holzbauer frühzeitig im Projekt integriert sein muss, um Fehlplanungen zu vermeiden. Die Holzbauer sind meist an ihre Systeme gebunden und die Architektur sollte darauf abgestimmt werden. Die Projektierung soll in iterativen Schritten erfolgen. Seitens



Lemon Consult wird ergänzt, dass grundsätzlich bei Projekten mit hohen Nachhaltigkeitszielen, die entsprechenden Fachplanenden frühzeitig eingebunden werden müssen. Eine klare Bestellung zu Projektbeginn wird von allen Beteiligten als essenziell wahrgenommen. Dabei müssen auch die Nachhaltigkeitsziele definiert werden.

Weiter haben sich Pauschalangebote als Hindernis für Optimierungen im Prozess erwiesen, da der Holzbauer aufgrund des Pauschalangebots nicht auf teurere Lösungen, die jedoch eine Emissionsreduktion bewirkt hätten, umschwingen möchte. Wichtig ist es zudem, die Optimierungslösungen auch mit entsprechenden Kosten zu hinterlegen, so dass die finanziellen Mittel wirkungsvoll zur Reduktion der Treibhausgasemissionen eingesetzt werden.

Im Themenbereich Re-Use wurde festgehalten, dass im Holzbau gut auf Re-Use Bauteile reagiert werden kann. Wichtig ist jedoch, dass diese Bauteile frühzeitig vorliegen. Diese Verzögerungen haben im vorliegenden Projekt mitunter zu einem eher tiefen Anteil an Re-Use Bauteilen geführt. Sobald klar ist, welche Re-Use Bauteile vorliegen und was noch an Aufwertungen notwendig ist, ist der Umgang mit Re-Use Bauteilen grundsätzlich problemlos. Die teilweise notwendigen Aufwertungen der Bauteile wurden im Projekt unterschätzt.

Gesamthaft wird festgehalten, dass die Ausgangslage im Projekt bereits gut war und darauf aufbauend noch Optimierungen getätigt wurden, welche eine hohe Komplexität aufweisen und entsprechende Fachplanende benötigen. Die richtige Objektwahl und das richtige Design kann demnach bereits einen Grossteil der Emissionsreduktion mit sich bringen. Daraus lässt sich auch ableiten, dass verbindliche Anforderungen an die Treibhausgasemissionen für die Erstellung eingeführt werden sollen. Im Betrieb sind nahezu null Treibhausgasemissionen mit heutigen Mitteln verhältnismässig einfach umzusetzen während in der Erstellung noch eine weitere signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht und daher entsprechende Anreizsysteme geschaffen werden müssen.



6.5 Lebenszykluskosten

6.5.1 Ausgangslage

Gemäss Abschnitt 6.3 lautet die Fragestellung in Bezug auf die Kosten der Re-Use-Bauteile:

Berechnen der Mehrkosten von wiederverwendeten Bauteilen unter Berücksichtigung der Restlebensdauer dieser Bauteile (AP2)

Unter Berücksichtigung, dass unter diesen Voraussetzungen nur das Gebäude D mit Re-Use Bauteilen betrachtet wird und zusätzlich im Kapitel 3.7 ein Investitionskostenvergleich vorliegt, greift dieser Vergleich als Forschungsfrage zu kurz und soll daher erweitert werden. Zusätzlich sind die Anforderungen an die Re-Use-Bauteile so definiert, dass diese die gültigen Normen einhalten müssen, um im Neubau eingesetzt werden dürfen. Somit sind auch die gängigen Abschätzungen der entsprechenden Lebensdauer der einzelnen Re-Use Bauteile analog von Neubauteilen. Abweichende Behauptungen müssten zuerst bewiesen werden.

Unter der Prämisse, dass auf dem Areal drei Gebäude mit unterschiedlichen Massnahmen zur Einsparung von Treibhausgasemissionen realisiert werden, ist es daher relevant, dass alle Massnahmen mittels eines Kostenvergleichs berücksichtigt und verglichen werden. Im Endeffekt hängt auch die Skalierbarkeit der Massnahmen vom Kosten-Nutzen-Verhältnis ab.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Weichen die Lebenszykluskosten der drei unterschiedlichen Herangehensweisen zur Einsparung von Treibhausgasemissionen in der Erstellung signifikant voneinander ab?
- Wie ist das Verhältnis der Lebenszykluskosten im Vergleich zu den Einsparungen der Treibhausgasemissionen Erstellung?

Dazu wird neben der Lebenszykluskostenberechnung noch eine Korrektur anhand der Kompaktheit des Gebäudes durchgeführt. Dies soll dazu beitragen, dass die drei sehr unterschiedlichen Gebäude normiert werden und so auf Ebene der unterschiedlichen Massnahmen vergleichbar werden.

6.5.2 Vergleich Lebenszykluskosten

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten wird das Tool der International Facility Management Association (IFMA) verwendet. Dafür werden die Baukosten von BKP nach eBKP-h umgerechnet.

Anmerkungen zur Umrechnung der Kosten BKP zu eBKP-h

- Kosten Re-Use auf Wandbekleidung, Fenster und Innentüren verteilt.
- "214 Montagebau in Holz" zu 2/3 auf Kostenposition "C" und zu 1/3 auf Kostenposition "E2 Äussere Wandbekleidung" aufgeteilt.
- Kosten "272 Metallbauarbeiten" auf G5.4 Geländer abgebildet.
- "288 Überschuss aus Abrechnungen" und "289 Reserve aus Vergaben" in Nebenleistungen - diese fliessen aber nicht ins IFMA-Tool ein.
- Planungskosten nicht aufgeteilt. Alle unter "Diverse".
- "240 Heizungsinstallationen" hälftig auf "D5.2 Wärmeerzeugung" (Lebensdauer 20 Jahre) und "D5.3 / D5.4 Wärmeverteilung" (Lebensdauer 56 Jahre) aufgeteilt.
- "244 Lüftungstechnische Anlagen" hälftig auf "D7.2 Luftaufbereitung" (Lebensdauer 15 Jahre) und D7.3 [...] Luftverteilung" (Lebensdauer 56 Jahre) aufgeteilt.
- Investitionen Umgebung entsprechend den Geschossflächen auf die Gebäude aufgeteilt.
- Annahme einer Kompaktfassade in Haus E.



Annahmen zur Berechnung der Lebenszykluskosten

- Folgende Zinsfaktoren wurden gewählt:

Preissteigerung (p) Bau (nominal)	0.6 %
-----------------------------------	-------

Preissteigerung (p) Verwaltung und Dienstleistung (nominal)	0.8 %
---	-------

Preissteigerung (p) Ver- und Entsorgung (nominal)	2.0 %
---	-------

Kalkulationsszinssatz (nominal)	1.5 %
---------------------------------	-------

- Betrachtungszeitraum 30 Jahre,
- Mehrwertsteuer-Satz von 8.00 %
- Abschätzung Bewohnerzahlen pro Haus entsprechend folgender Tabelle:

	Zimmer	Nutzer	Bemerkung
Haus C	102	84	Nutzer pro Wohnung = Zimmer - 0.5
Haus D	66	52	1-Zimmer-Wohnung 1 Bewohner / 2-Zimmer-Wohnung 1.5 Bewohner / 8.5-Zimmer-Wohnung 7 Bewohner
Haus E	144	128	Nutzer pro Wohnung = Zimmer - 0.5

- Energiebezugsflächen identisch mit den Grundlagen Ökobilanz
- Flächen pro Nutzung gemäss Tabelle



Tabelle 28 Flächenanteile der Raumnutzungen pro Haus

		Wohnen	Sanitär	Abstell	Büro	Verkauf	Flur	Funktion
Haus C	3'770 m²	2'456 m ²	63 m ²	360 m ²	409 m ²	271 m ²	95 m ²	116 m ²
	UG			291 m ²			95 m ²	116 m ²
	EG		63 m ²	69 m ²		271 m ²		
	1. OG				409 m ²			
	2. OG	409 m ²						
	3. OG	409 m ²						
	4. OG	409 m ²						
	5. OG	409 m ²						
	6. OG	409 m ²						
	7. OG	409 m ²						
Haus D	1'928 m²	1'487 m ²	18 m ²	137 m ²	199 m ²	0 m ²	56 m ²	31 m ²
	EG	167 m ²	18 m ²	89 m ²	199 m ²		20 m ²	15 m ²
	1. OG	440 m ²		16 m ²			12 m ²	5 m ²
	2. OG	440 m ²		16 m ²			12 m ²	5 m ²
	3. OG	440 m ²		16 m ²			12 m ²	5 m ²
Haus E	4'223 m²	3'137 m ²	52 m ²	418 m ²	0 m ²	0 m ²	448 m ²	168 m ²
	UG			280 m ²			62 m ²	113 m ²
	EG	200 m ²	52 m ²	52 m ²			93 m ²	7 m ²
	1. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	2. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	3. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	4. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	5. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	6. OG	366 m ²		12 m ²			38 m ²	6 m ²
	7. OG	369 m ²		8 m ²			32 m ²	6 m ²
	8. OG	369 m ²		8 m ²			32 m ²	6 m ²

Kommentare Flächenzuordnung / Nutzung Gewerbe:

- Generelle Kommentare
 - Kellerabteile sind als NNF 7.3 klassifiziert (Abstell)
 - Gemeinschaftsräume sind als Wohnen klassifiziert
 - WCs / Bäder zählen als Teil der jeweiligen HNF
 - Aufzüge sind als Verkehrsfläche (Flure) klassifiziert.
 - Umgebungsflächen (in Gebäudeinformationen) sind nicht ausgefüllt. Dies hat einen Einfluss auf die Wartungskosten Umgebung. Die Umgebung gilt als generell geteilt.
- Haus C
 - Aussenliegende Lifte sind nicht berücksichtigt
 - Gewerbe Erdgeschoss "Verkaufsräume"
 - Gewerbe 1. Obergeschoss "Bürräume und Besprechungsräume"

Haus D

- Gewerbe Erdgeschoss "Bürräume und Besprechungsräume". Inkl. Ateliers von Ateli-erwohnungen
- Treppenhaus und Lift sind nicht berücksichtigt (ausenliegend)
- Haus E
 - keine spezifischen Annahmen



6.5.3 Berechnungsverfahren

Statische oder dynamische Verfahren

Grundsätzlich werden zwei Gruppen an Methoden unterschieden: die statischen und die dynamischen Verfahren (<https://www.ibau.de/akademie/glossar/lebenszykluskosten/>). Bei statischen Verfahren werden die einzelnen Kosten beziehungsweise Erträge ohne Berücksichtigung ihres Entstehungszeitpunktes aufsummiert. Das macht sie besonders einfach in der Anwendung, aber auch sehr ungenau, weshalb sie selten genutzt werden. Bei dynamischen Verfahren hingegen werden Kosten, die zu einem späteren Zeitpunkt anfallen, über eine Preissteigerungsrate auf den Wert des jeweiligen Zeitpunktes hochgerechnet. Anschließend werden diese Kostenwerte über einen Diskontierungszinssatz auf den Gegenwartswert, den sogenannten Barwert, heruntergerechnet.

Kapitalwertmethode oder Barwertmethode

Die Kapitalwertmethode ist die häufigste Methode zur Berechnung der Lebenszykluskosten. Dabei werden die Barwerte aller Kosten summiert. Fällt der Kapitalwert positiv aus, ist die Investition grundsätzlich wirtschaftlich sinnvoll. Wie hoch der Zinssatz zur Ermittlung der Barwerte angesetzt wird, muss unabhängig von der Investitionsrechnung beziehungsweise der Wirtschaftlichkeitsrechnung festgelegt werden. Meist wird mit Wunschinssätzen oder Vergleichszinssätzen gearbeitet. Das Investitionsrisiko ist im gewählten Zinssatz normalerweise mit eingerechnet. Die Methode eignet sich besonders zum Vergleich der Lebenszykluskosten verschiedener Varianten oder Gebäude.

6.5.4 Ergebnisse

Es werden sowohl die Resultate der dynamischen als auch der statischen Berechnung miteinander verglichen. Bezugsfläche ist die GF nach SIA 416. Nachfolgend sind sowohl die direkten Resultate aus der Lebenszykluskostenberechnung, als auch die auf eine Kompaktheit der Gebäudehüllfläche A_E zur Energiebezugsfläche A_E normierten Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 29 Unkorrigierte Resultate

Haus	Geschossfläche m ²	Kompaktheit A/AE	LCC statisch CHF / m ² .a	LCC dynamisch CHF / m ² .a	Erstellung CHF / m ²
C	4'412	1.0	241	233	2'783
D	2'337	1.2	270	255	3'242
E	4'850	0.8	195	174	2'194

Tabelle 30 Normierte Resultate mit Kompaktheit A/AE=1.0

Haus	Geschossfläche m ²	Kompaktheit A/AE	LCC statisch CHF / m ² .a	LCC dynamisch CHF / m ² .a	Erstellung CHF / m ²
C	4'412	1.0	241	233	2'783
D	2'337	1.0	225	213	2'701
E	4'850	1.0	244	218	2'743



Die Korrektur der Resultate zeigt auf, dass sowohl die Erstellungskosten als auch die Lebenszykluskosten für alle Massnahmen sich bei einem geometrisch vergleichbaren Gebäude kaum unterscheiden. Somit sind die Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen auf Basis der bisherigen Berechnungen in Sachen Kosten sehr nahe beieinander. Eine abschliessende Validierung erfolgt mit Vorliegen der Betriebskosten im nächsten Zwischenbericht. Die Lebenszyklus- und Erstellungskosten hängen stärker von der geometrischen Form, bzw. der Kompaktheit des Gebäudes ab, als von den ergriffenen Massnahmen auf Bauteilebene oder Apparateebene zur Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Erstellungskosten über den Projektverlauf

Die Erstellungskosten wurden über die Zeit jeweils entsprechend dem Projektstand erhoben. Dabei stammen die Referenzkosten aus dem ursprünglichen Projekt, bevor die Planungsänderungen mit den Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen eingepreist wurden.

Tabelle 31 Entwicklung der Erstellungskosten über den Projektverlauf

	KS VP (± 15%) Okt 2020	KV Original 31.10.2021	KV revidiert 30.11.2022	Abschlussprognose 18.08.2023	Abweichung zur KS 2020
Gesamt	33'650'000	32'915'000	33'654'000	33'825'000	0.5 %
Haus C	13'645'000	12'860'000	13'181'000	13'234'000	-3.0 %
Haus D	7'965'000	8'045'000	8'351'000	8'395'000	5.4 %
Haus E	12'040'000	12'010'000	12'122'000	12'196'000	1.3 %

Die Erstellungskosten blieben gemäss obiger Aufstellung somit über das gesamte Projekt mehrheitlich konstant. Die prognostizierten Schlusskosten weichen maximal 5.4 % von der Kostenschätzung aus dem Vorprojekt ab und sind somit innerhalb der Genauigkeit der Kostenschätzung. Zu berücksichtigen ist auch die Teuerung mit einer Steigerung des Baupreisindex vom Oktober 2020 bis Oktober 23 um über 10 %



6.6 Bewertung der Ergebnisse

Dieses Arbeitspaket befindet sich zurzeit noch in der Bearbeitungsphase. Die im vorangehenden Kapitel beispielhaft gezeigten, vorläufigen Resultate, lassen noch keine abschliessende Bewertung zu.

6.7 Weiteres Vorgehen

Die Berechnung der vollständigen Treibhausgasbilanzen der Massnahmen der Arbeitspakete AP1 bis AP4 ist erst nach Bauabschluss inkl. Mängelbereinigung, voraussichtlich ab Ende 2024 möglich. Die Berechnung und kombinierte Auswertung der Lebenszykluskosten erfolgt, sobald die definitive Bauabrechnung der entsprechenden Bauteile und Arbeiten vorliegt.



7 AP6: Kommunikation und Dissemination

7.1 Kommunikationskonzept

Die Projektergebnisse werden sowohl direkt auf dem Hobelwerk Areal (mittels Führungen), über Fachveranstaltungen, Print- und Onlinemedien (via Fachzeitschriften, Newsletter) vermittelt. Von Seiten mehr als wohnen aus wird über einen Newsletter mit fast 4'000 Adressaten periodisch auf die Ergebnisse aufmerksam gemacht. Zudem finden auf dem Hunziker Areal regelmässig Führungen mit etwa 1'000 Besuchenden pro Jahr statt. Die Resultate werden darüber hinaus an verschiedenen Tagungen, unter anderem der hauseigenen Innovationsversammlung, präsentiert und bei einschlägigen Fachzeitschriften (z.B. TEC21, Wohnen) platziert.

Eine weitere Option wäre, analog zum Ausstellungsraum auf dem Hunziker Areal, eine fixe Ausstellung auf dem Hobelwerk zu entwickeln oder aber die Ausstellung vom Hunziker Areal weiter zu entwickeln. Solide und gut aufbereitete Ergebnisse zur Treibhausgas reduzierten Erstellung sowie zum energieeffizienten Betrieb könnten so einem breiten Publikum bekannt gemacht werden.

7.2 Veranstaltungen und Publikationen

Die Ergebnisse werden an Tagungen einem breiteren Publikum präsentiert. Gleichzeitig werden an Führungen auf dem Hunziker Areal sowie im Hobelwerk die Inhalte und Ergebnisse vermittelt.

Durchgeführte Veranstaltungen und Publikationen mit Bezug zum Hobelwerk und dem P+D-Projekt:

- 04.11.2025 Innovationsversammlung mehr als wohnen 2025, Beiträge: «Hobelwerk - Evaluation der Lüftungskonzepte», «nordnordost NNO - Ideen und Fragestellungen», <https://www.mehralswohnen.ch/innovations-und-lernplattform/innovationsversammlung/>
- 28.11.2024 Innovationsversammlung mehr als wohnen 2024, Beiträge: «Bedarfsgeregelte Abluftanlagen», «Selbstlernende bivalente Heizungsregelung», <https://www.mehralswohnen.ch/innovations-und-lernplattform/innovationsversammlung/>
- 21.11.2024 ecobau: zirkuläres Entwerfen und Realisieren, Kurs für Architekt:innen, Fachplanende, Bauleitende, Bauunternehmen, <https://ecobau-zirkulaeres-entwerfen.events.sia.ch/>
- 12.09.2024 Forum Energie Zürich, Energie vor Ort, Hobelwerk Winterthur: «Innovation und Nachhaltigkeit vereint», <https://forumenergie.ch/agenda/veranstaltungen-fez/alle-veranstaltungen-fez/alle-fez/fez-veranstaltungen/energie-vorort/837-hobelwerk-winterthur>
- 21.06.2024 NZZ Format - Nachhaltiges Bauen – Materialien, die den Bausektor revolutionieren könnten - Play SRE, Dok-Film über innovative Rohstoffe im Bauwesen von Gustav Hofer, Interview mit Claudia Thiesen und Jasmin Amann zum Thema Re-Use auf dem Hobelwerk, ab Minute 21:15
- April 2024 Wohnen 4/2024, Liza Papazoglou: «Gebraute Teile, neues Leben», https://www.zeitschrift-wohnen.ch/heft/beitrag/neubau/gebrauchte-teile-neues-leben.html?search_term=gebraucht
- 21.03.2024 Fachtagung Nachhaltiges Bauen 2024, <https://nnbs.ch/nnbs-veranstaltungen/fachtagung-nachhaltiges-bauen/>, mit dem Beitrag Hobelwerk von Dario Vittani und Nadine Koppe – wie Transformation gelingen kann



- 14.11.2023 Innovationsversammlung mehr als wohnen 2023, Philipp Bernhard, Baltensperger: «Hobelwerk – CO₂-optimierter Holzbau», Jules Petit, Lemon Consult: «Die Rolle der Holzprodukte in der Ökobilanzierung», <https://www.mehralswohnen.ch/innovations-und-lernplattform/innovationsversammlung/>
- 22.09.2023 Forum der Schweizer Wohnbaugenossenschaften 2023 zum Thema «Bauen neu denken: Knacknüsse Klima, Kreislauf, Kosten» mit einer Präsentation von Claudia Thiesen.
- August 2023 Ewz Whitepaper «Netto-Null für Immobilien», Best-Practice-Projekt Hobelwerk (S. 30) <https://www.ewz.ch/de/geschaeftskunden/immobilien/whitepaper/whitepaper-netto-null.html>
- 31.10.2022 Innovationsversammlung mehr als wohnen 2022, Anna Haller, Claudia Thiesen: «Stand der zweiten Bauetappe im Hobelwerk», Dario Vittani: «Re-Use Architektur», <https://www.mehralswohnen.ch/innovations-und-lernplattform/innovationsversammlung>
- 03.03.2021 Forum Energie Zürich, Bauen mit minimalen CO₂-Emissionen (online), Jules Petit, Lemon Consult, https://forumenergie.ch/images/fez/anlaesse/fez/events/2021/pdf/01_FEZ_Fo- lien_Event4_Petit_20210302.pdf
- 07.10.2021 Innovationsversammlung mehr als wohnen 2021, Beni Rohrbach, «Ökobilanzierung als Methode für Nachhaltigkeit im Baubereich», treeze, Rolf Frischknecht, «Künstliche Intelligenz für nachhaltige Wohnimmobilien», Empa, Philipp Heer; <https://www.mehralswohnen.ch/innovations-und-lernplattform/innovationsversammlung/>
- 12.11.2021 10. Fachtagung des gemeinnützigen Wohnungsbaus, Stadt Zürich Amt für Hochbauten, mehr als wohnen und wbg Regionalverband Zürich: "Hobelwerk Winterthur: Blau-grün klimaoptimiert" <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/bauen-fuer-2000-watt/veranstaltungen-fachartikel/veranstaltungen.html>
- 25.11.2021: Besichtigung Hobelwerk für alle Genossenschaften aus dem Regionalverband der gemeinnützigen Wohnbauträger Zentralschweiz
- 19.10.2020: Innovationsversammlung mehr als wohnen 2020, «Hobelwerk Re-Use», baubüro insitu, Kerstin Müller: https://www.mehralswohnen.ch/fileadmin/downloads/Innovation/2020_Hobelwerk_Re-Use.pdf

7.3 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Interesse an der konkreten Umsetzung des Netto-Null-Ziels im Gebäudebereich nimmt rasch Fahrt auf. Bereits gab es Interessenbekunden an Erkenntnissen aus dem Hobelwerk von mehreren nationalen und internationalen Forschungsinstitutionen. Es ist daher vorgesehen, einzelne Präsentationen und Schlüsselpublikationen sowie Auszüge aus dem Forschungsbericht auf der Website sowohl auf Deutsch als auch in Englisch zu publizieren.



8 Literaturverzeichnis

- [1] Synthese des NFP-70-Verbundprojekt «Energiearmer Beton», <https://nfp-energie.ch/de/dossiers/193/cards/317>
- [2] Priore, Y., Haber, G., Jusselme, T. (2023), Exploring the gap between carbon-budget-compatible buildings and existing solutions – A Swiss case study, *Energy & Buildings* 278 (2023) 112598, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822007691>
- [3] Projekt Hortus Allschwil, Senn, <https://senn.com/projekt/hortus-allschwil/>
- [4] Freilager Zürich, dokumentiert in SIA D058 (2018), Dokumentation zu SIA 2040
- [5] Mühlebach, M. et al. (2018), 2000-Watt-Leuchtturm-Areal mehr als wohnen, im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE-Vertragsnummer SI/501215-01, Schlussbericht, 11. April 2018
- [6] SIA 382/1 (2014), Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, Ziffer 2.2.6.5
- [7] SIA 2040 (2017), SIA-Effizienzpfad Energie
- [8] Leitkonzept für die 2000-Watt-Gesellschaft (2020), EnergieSchweiz für Gemeinden, https://www.local-energy.swiss/dam/jcr:6717fce1-9586-44d7-9bc2-072308adaf9e/Leitkonzept_2000WG_vOkt2020_lang_de.pdf
- [9] KBOB (2022), Ökobilanzdaten im Baubereich, https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html
- [10] SN EN 15804+A2 (2019), SIA 490.052+A2, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
- [11] BAFU (2007), CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uw-umwelt-wissen/co2-effekte_der_schweizerwald-undholzwirtschaft.pdf.download.pdf/co2-effekte_der_schweizerwald-undholzwirtschaft.pdf
- [12] Hafner et al. (2017), Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau), https://www.ruhr-uni-bochum.de/reb/mam/content/thg_bericht-final.pdf
- [13] Müller et al. (2015), Holzbau vs. Massivbau – Ein Umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS Standard, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/holzbau_vs_massivbaueinumfangvergleichzweierbauweisenimzusa.pdf
- [14] Rüdüsüli et al. (2019), Impacts of an Increased Substitution of Fossil Energy Carriers with Electricity-Based Technologies on the Swiss Electricity System, <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2399>
- [15] Heeren, Hellweg (2018): Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jiec.12739>
- [16] Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau Studie 2015. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/bauabfaelle_in_derschweiz-hochbaustudie2015.pdf
- [17] Forschungsprojekt, Reuse-Ökobilanz: Identifizierung des Potenzials zur Verringerung der Umweltauswirkungen der Wiederverwendung von Materialien bei Schweizer Gebäuden, HEIG-VD, in situ, Pfäffli Architects, 2021 – 2023, im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE)



- [20] Guerra, F., Kast, B., Hiltbrunner, D. (2015), Bauabfälle in der Schweiz, Hochbau Studie 2015, Wüest & Partner AG im Auftrag des Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
- [21] Näf, P., Sacher, P., Dinkel, F., Stettler, C. (2021), Klimapositives Bauen, Ein Beitrag zum Pariser Absenkpfad, Nova Energie AG, Carbotech AG
- [22] Gugerli, H., Rubli, S., Schneider, M. (2009), Ressourcen Strategie «Bauwerk Stadt Zürich», Materialflüsse und Energiebedarf bis 2050, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
- [23] DGNB (2022), Im Fokus – Zirkuläres Bauen
- [24] The Danish Housing and Planning Authority (2021), National Strategy for Sustainable Construction, Ministry of the Interior and Housing - Dänemark
- [25] Küpfer, C., Fivet, C. (2021), Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion, Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche, EPFL
- [26] Stricker, E., et al. (2021), Bauteile wiederverwenden, Ein Kompendium zum zirkulären Bauen, Institut Konstruktives Entwerfen, ZHAW Departement Architektur, Gestaltung und Bauingenieurwesen
- [27] Abegg, A., Streiff, O. (2021), Die Wiederverwendung von Bauteilen, Ein Überblick aus rechtlicher Perspektive
- [28] Streiff, O., mit baubüro in situ, Wiederverwendung von Bauteilen: Rechtlicher Rahmen, mit Förderung von Innosuisse, laufendes Projekt
- [29] Halstenberg, M., Franßen, G. (2022), Regelwerke des Normungs- und technischen Zulassungswesens anhand des Themenkomplexes Recyclingverfahren und Weiter-/Wiederverwendung von Bauprodukten und Baustoffen, Franßen & Nusser Rechtsanwälte PartGmbH, Düsseldorf
- [30] Pfäffli, K. (2020), Graue Energie und Treibhausgasemissionen von wiederverwendeten Bauteilen, Methodik und Berechnung in Varianten am Fallbeispiel Gebäude K118 in Winterthur, Architekturbüro K. Pfäffli, im Auftrag der ZHAW, Institut für Konstruktives Entwerfen
- [31] Lasvaux, S., et al. (2023), Reuse-LCA, HEIG-VD, Büro K. Pfäffli, Zirkular GmbH, im Auftrag des Bundesamt für Energie, laufende Studie
- [32] Embodied Carbon in EU Construction
- [33] Empa NEST (2021), Unit Sprint, <https://www.empa.ch/de/web/nest/sprint> (28.02.2023), Dübendorf
- [34] Kakkos, E., Hischier, R. (2022), Paving the way towards circularity in the building sector, Empa's Sprint Unit as a beacon of swift and circular construction, St. Gallen
- [35] DomoHabitare, <http://domahabitare.ch> (28.02.2023), Ste. Croix 2019
- [36] Basel Pavilion (2022), "Loggia Baseliana" von Isla architects: Marta Colón de Carvajal, Juan Palencia, [https://architekturwochebasel.ch/formate/basel-pavillon/Architekturwoche Basel 2022](https://architekturwochebasel.ch/formate/basel-pavillon/Architekturwoche%20Basel%202022), <https://baselpavillon.store/>
- [37] Wettbewerb Recyclingzentrum Juch-Areal, Amt für Hochbauten Stadt Zürich, <https://juchareal.store/>
- [38] Wettbewerb Areal Walkeweg Nord Basel, Wohnüberbauung Baufelder C+D mit Bauteil-Wiederverwendung (Re-Use), Immobilien Basel-Stadt, <https://bauteile-ibs.ch/>
- [39] Wettbewerb Mehrfamilienhaus mit Kindergarten, "Pilotprojekt Schliengerweg Netto Null 2040", Immobilien Basel-Stadt, <https://bauteile-ibs.ch/>



- [40] Interreg FCRBE Projekt (2021), Leitung: Rotor Brüssel, Interreg FCRBE partnership: Bellastock (FR), the Belgian Building Research Institute / BBRI (BE) , Brussels Environment (BE), the Scientific and Technical Center of Building / CSTB (FR), Confederation of Construction (BE), Rotor (BE), Salvo (UK) and University of Brighton (UK), Belgien 2019-2021
- [41] Bigelow, H., Bärtschi, R., (2022), Re-Use: Wie-der-ver-wen-dung von Stahl-bau-tei-len, Statik – Oberflächenschutz – Qualitätssicherung, Stahlbau Zentrum Schweiz SZS, Zürich
- [42] FenSanReUse (2022), Sanierungsverfahren und ReUse von Fenstern – Materialpass und Wegleitung, Forschungsprojekt an der Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau, Barbara Sintzel, MuttENZ ab 2022
- [43] Pöll, M. (2021), Wiederverwendung Fertigbetonelemente, Rückbau Personalhäuser Triemli, Analyse, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen, Zürich
- [44] Stenberg, E., et al. (2023), ReCreate, Deconstruction and reuse instead of demolition and waste, Germany, Finland, Netherlands, Sweden, 2022-2023.
- [45] Aebischer, Ch. (2022), Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten, Bundesamt für Umwelt BAFU, https://www.pirminjung.ch/files/allgemein/220502_PJ_Rueckbau-Wiederverwendung-Holzbauten.pdf (28.02.2023), Bern
- [49] MuKEn (2014), Musterverordnung der Kantone im Energiebereich, EnDK, https://www.endk.ch/de/ablage/grundhaltung-der-endk/MuKEn2014_d-2018-04-20.pdf
- [50] Huber, H., Settembrini, S., Primas, A., Zuber, S. (2022), Vergleich von Lüftungskonzepten für Wohnbauten, HSLU, EnergieSchweiz, Schlussbericht, 21. Februar 2022 (Rev. A; 28.12.2022)
- [51] Hoffmann, C., et al. (2021), FENLEG: Fensterlüfter in der etappierten Gebäudesanierung – ist der Einsatz erfolgreich?, FHNW, HSLU, im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE-Vertragsnummer: SI/501630-01, Schlussbericht Januar 2021
- [52] Huber, H., Primas, A., Hauri, C., Näf, M. (2018), Abluftanlagen und Einzelraumlüftungen im Vollzug Energie, Untersuchung an 10 Objekten bezüglich Hygiene und Luftmengen vor und nach Filterwartung und Reinigung, HSLU, im Auftrag von EnFK Regionalkonferenz Ostschweiz, Horw, 12. November 2018
- [53] Huber, H., Stünzi, Ch., Siebold, Ch., Kunz, D.-S. (2018), ABLEG - Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung, FHNW, im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE-Vertragsnummer: SI/500954-01, Schlussbericht vom 12.12.2018
- [54] Knecht, K., Sigrist, D. (2018), Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie, Sustainable System Solutions GmbH, im Auftrag der Baugenossenschaft Hagenbrünneli, Dübendorf, 23. November 2018
- [55] François Lédée, Pierryves Padey, Kyriaki Goulouti, Sébastien Lasvaux, Didier Beloin-Saint-Pierre, EcoDynElec: Open Python package to create historical profiles of environmental impacts from regional electricity mixes, *SoftwareX*, Volume 23, 2023, 101485, ISSN 2352-7110, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101485>.
- [56] Yin, M., Cai, H., Gattiglio, A., Khayatian, F., Smith, R. S., & Heer, P. (2024). Data-driven predictive control for demand side management: theoretical and experimental results. *Applied Energy*, 353, 122101 (12 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122101>
- [57] Bünning, F., Huber, B., Schalbetter, A., Aboudonia, A., Hudoba de Badyn, M., Heer, P., Lygeros, J. (2022). Physics-informed linear regression is competitive with two machine learning methods in residential building MPC. *Applied Energy*, 310, 118491 (14 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118491>



[58] Ökobilanzdaten im Baubereich, 2025, <https://www.kbob.admin.ch/de/oekobilanzdaten-im-baubereich>