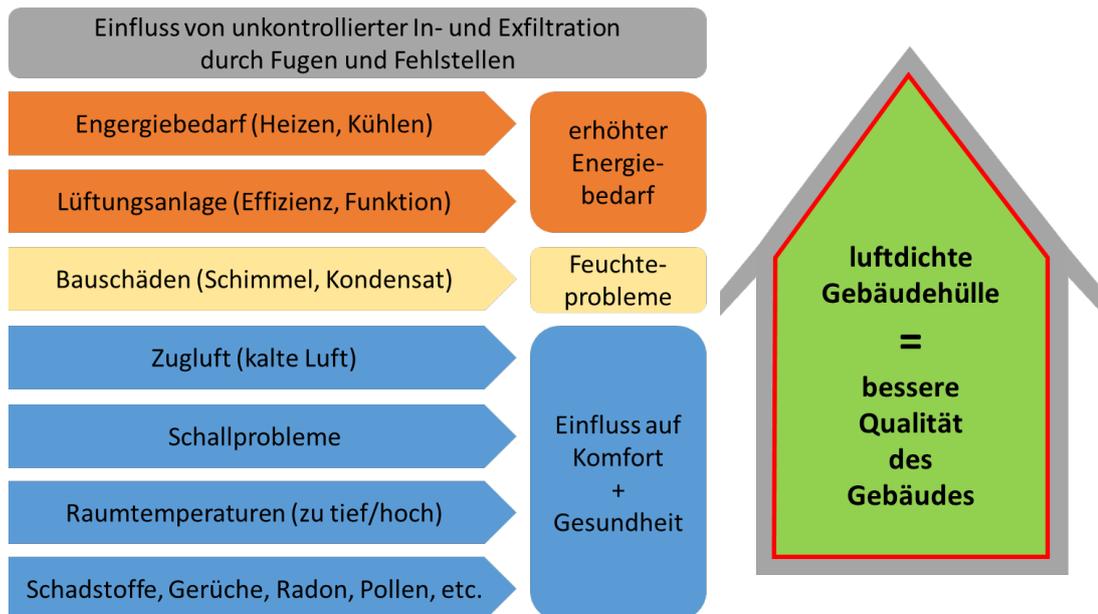




Schlussbericht 2021

Airtight - Luftdichtheit von neuen Gebäuden





Diese Studie wird im Auftrag vom BFE, dem AHB Stadt Zürich, dem AUE Baselland und dem AUE Basel-Stadt erstellt.

Datum: 26. Mai 2021

Auftraggeber

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

BFE-Bereichsleitung:
Andreas Eckmanns,
andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:
Rolf Moser, moser@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501970-01

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

Amt für Umweltschutz und Energie Baselland
Christoph Blattner
Rheinstrasse 29
CH-4410 Liestal

Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt
Abteilung Energie
Marcus Diacon
Hochbergstrasse 158
CH-4019 Basel

Finanziell unterstützt von

Ampack AG
Marco Jäger
Seebleichstrasse 50
CH-9401 Rorschach



Auftragnehmer/in

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

Autor/in

Monika Hall, monika.hall@fhnw.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich die Autorin dieses Berichts verantwortlich.



Dank

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen Personen und Institutionen bedanken, ohne die dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre.

Mein Dank gilt:

- Minergie, AUE Basel-Stadt und AUE Baselland für die Unterstützung bei der Akquisition der Gebäude
- allen Hauseigentümern/innen für die Bereitschaft, an diesem Projekt teilzunehmen
- meinen Kollegen Andreas Witmer und Vincent Gerber, die sämtliche Messungen durchgeführt haben und
- den Teilnehmern/innen des Workshops «Luftdichtheit»

Christian	Stünzi	Minergie Schweiz
Vesna	Dengl	AUE BS
Marco	Jäger	Ampack AG
Uli	Höing	Ampack AG
Michael	Wehrli	theCH
Thomas	Ammann	HEV Schweiz
Roger	Blaser	FHNW
Beda	Bossard	HSLU
Heiri	Huber	HSLU
Gregor	Notter	HSLU
Siegrid	Schmierl	Losinger Marazzi AG
Marc	Münger	Häring AG
Stephan	Kämpfen	EnFK, AG MuKE
Armin	Binz	Binz GmbH
Jörg	Wollnow	SIGA
Andreas	Witmer	FHNW
Monika	Hall	FHNW
Simon	Altwegg	FHNW



Zusammenfassung

Das Projekt besteht aus drei Teilen: Durchführung von Luftdichtheitsmessungen an 28 neuen Einfamilienhäusern, einem Workshop «Luftdichtheit» mit Experten sowie thermischen Gebäudesimulationen gekoppelt mit einer zonalen Strömungssimulation.

1. Messung der Luftdichtheit

Ziel ist es, die Luftdichtheit von neuen Gebäuden zu bestimmen, für die nach Abschluss der Bauphase kein Nachweis der Luftdichtheit gefordert ist. Es wird die Luftdichtheitsqualität von neueren Gebäuden mit einem Blower-Door Test bestimmt. Die Gebäude sind maximal fünf Jahre alt, weisen kein Label Minergie-P/-A auf und wurden ausserhalb dieses Projektes nicht auf Luftdichtheit überprüft. Es werden 15 Standardgebäude (ohne speziellen Fokus auf die Luftdichtheit und ohne Minergie-Zertifikat) und 13 Minergie-Bauten mit Nachweis eines Luftdichtheitskonzepts (Minergie Standard 2017) verglichen.

Die Luftdichtheit der untersuchten Gebäude ist sehr gut. Die ermittelte Luftdichtheit der Gebäude weist eine Spannweite von $q_{a50} = 0.3 - 1.4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ auf. Der Mittelwert beträgt $q_{a50} = 0.8 \pm 0.3 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Alle Gebäude liegen deutlich unter den Anforderungen der SIA 180 für natürliche und mechanische Lüftung. Bis auf ein Gebäude halten alle die Anforderung von Minergie $q_{a50} \leq 1.2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ein. Holz und Hybridbauten sind im Mittel leicht undichter als Massivbauten.

Die häufigsten Leckagen sind Steckdosen, Hebeschiebetüren, Dichtungen der Fensterflügel und Durchdringungen aller Art.

2. Workshop «Luftdichtheit»

Um die Erfahrungen von diversen Praxisakteuren zum Thema Luftdichtheit abzuholen, wird ein Workshop durchgeführt. Der Austausch zwischen den Akteuren identifiziert den Handlungsbedarf zum Thema Luftdichtheit wie folgt:

- Klärung der Verantwortung für die Planung, Ausführung und Abnahme der Luftdichtheit
- Schnittstellenkoordination zwischen den Gewerken
- Thematik muss in der jeweiligen Branchenausbildung stärker verankert werden



3. Simulation der energetischen Auswirkung der Luftdichtheit

Die Auswirkung des Grades der Luftdichtheit auf den Heizwärme- und Klimakältebedarf sowie die resultierenden Raumtemperaturen werden unter Berücksichtigung heutiger und künftiger Klimabedingungen für Zürich Kloten (Normal-/Warmjahr) am Beispiel von Simulationen an einem Einfamilienhaus aufgezeigt.

Die Simulationen an einem Einfamilienhaus zeigen, dass der Heizwärmebedarf mit zunehmender Undichtheit zunimmt. Dies ist eine Folge der grossen Temperaturunterschiede zwischen innen und aussen sowie höheren Windgeschwindigkeiten im Winter. Bei Gebäuden mit einem tiefen Heizwärmebedarf führt die Infiltration durch die Leckagen wie zu erwarten zu einem prozentual höheren Anstieg des Heizwärmebedarfs bei zunehmender Undichtheit als bei Gebäuden mit einem höheren Heizwärmebedarf.

Im Sommer sind die Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen sowie Windgeschwindigkeiten geringer als im Winter, was zu einem geringeren Luftaustausch über die Leckagen führt. Daher hängt der Klimakältebedarf deutlich weniger von der Dichtheit ab, als der Heizwärmebedarf

Die Windexposition spielt im städtischen Umfeld nur eine untergeordnete Rolle.

Grundsätzlich gilt:

- je geringer die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen ist,
- je geringer die Windgeschwindigkeiten sind und
- je weniger Leckagen in der Hauptwindrichtung liegen,

desto geringer ist die Infiltration durch die Leckagen und damit auch der Anstieg des Heizwärme- und Klimakältebedarfs durch Infiltration.

Fazit

Werden die Ergebnisse der Simulationen auf die gemessenen Gebäude angewendet, dann kann abgeleitet werden, dass die gemessenen Gebäude keinen signifikant erhöhten Heizwärmebedarf oder Klimakältebedarf infolge der Leckagen aufweisen werden.

Die tiefen Luftdichtheitswerte der gemessenen Gebäude zeigen, dass bei ihnen die Luftdichtheit kein energetisches Problem darstellt. Für die untersuchten Gebäude kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob infolge der Leckagen im Lauf der Zeit Bauschäden auftreten werden bzw. Zugluft- oder Schallprobleme bestehen.

Die Stichprobe der zufällig ausgewählten 28 neuen Einfamilienhäuser ist zu gering, um eine allgemeine Aussage über die Luftdichtheit von Neubauten machen zu können. Sie gibt jedoch einen Hinweis darauf, dass das Thema im Bauwesen angekommen ist und Gebäude auch ohne Nachweispflicht der Luftdichtheit sehr dicht sein können.

Auch wenn alle neuen Gebäude die hohe Luftdichtheitsqualität aufweisen sollten, ist es wegen des Bauschadenrisikos, der Zugluft- oder Schallprobleme bzw. Schadstoffe weiterhin wichtig, die Luftdichtheit in der Ausbildung, Planung und Ausführung zu thematisieren und die Verantwortung hierfür festzulegen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Inhaltsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Projektziele	8
4 Anforderungen an die Luftdichtheit	10
5 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	12
5.1 Messung der Luftdichtheit	12
5.2 Workshop Luftdichtheit	16
5.3 Simulation der Luftdichtheit	17
6 Fazit	24
7 Referenzen	25
8 Anhang	26
8.1 Messung	26
8.2 Workshop.....	29
8.3 Simulation	32



1 Einleitung

Im Rahmen der Klimadebatte und dem Umstieg von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien steht die Erhöhung der Gebäudeeffizienz im Fokus. In den letzten Jahren wurden daher die Anforderungen an den Heizwärmebedarf deutlich erhöht. Die Reduktion des Heizwärmebedarfs führt zu einem tieferen Heizenergiebedarf und damit zu weniger CO₂-Emissionen. Um dieses Ziel zu erreichen, liegt der wesentliche Fokus auf einem verbesserten Wärmedämmstandard der Gebäudehülle. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle gewinnt mit steigendem Dämmniveau zunehmend an Bedeutung. Bei gut gedämmten Gebäuden können die Lüftungswärmeverluste ca. 40-50 % der gesamten Wärmeverluste betragen. Neben den unkontrolliert erhöhten Wärmeverlusten durch Undichtheiten und dem damit erhöhten Energiebedarf gibt es weitere Gründe, Wert auf eine luftdichte Gebäudehülle zu legen (Bild 1).

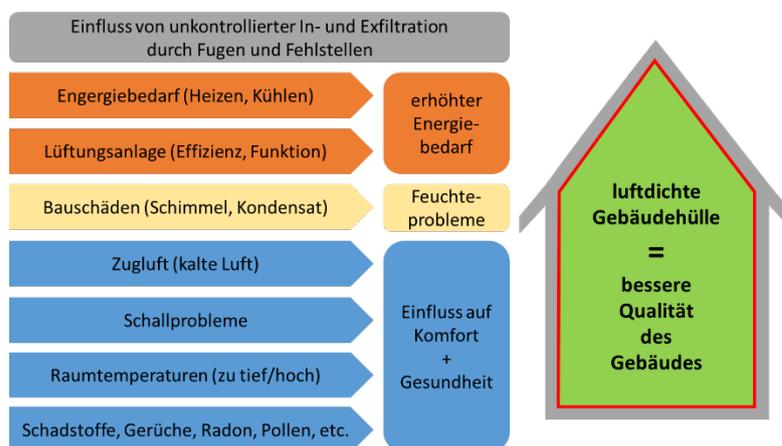


Bild 1 Einfluss von ungewolltem Luftaustausch auf den Energiebedarf, die Feuchteproblematik und den Komfort bzw. die Gesundheit (in Anlehnung an [1]).

Um die Luftdichtheit von Gebäuden zu gewährleisten, stellt SIA 180:2014 [2] entsprechende Anforderungen an die Gebäudehülle. Eine Pflicht zur messtechnischen Überprüfung der Luftdichtheit besteht jedoch nicht. Die MuKE n 2014 [3] verweist zu diesem Thema lediglich auf SIA 180. Nur bei Minergie-P/-A muss die Einhaltung des jeweiligen Grenzwerts durch eine Messung nachgewiesen werden. Um die Qualität der Luftdichtheit für Gebäude ohne Messpflicht zu erhöhen, hat das Label Minergie Standard seit 2017 die Anforderung, dass ein Luftdichtheitskonzept nachzuweisen ist.

Eine Aussage über die Luftdichtheit von nicht überprüften Gebäuden zu machen ist jedoch praktisch unmöglich. Selbst wenn ein Luftdichtheitskonzept vorgelegt wird, ist nicht sichergestellt, dass das Gebäude entsprechend ausgeführt wird.

Daraus ergibt sich die Hypothese, dass nach wie vor eine Grosszahl der Gebäude, die nicht nach Minergie-P/-A gebaut werden, eine weniger gute Qualität der Luftdichtheit aufweisen als wünschenswert und dadurch sowohl einen erhöhten Heizwärmebedarf haben als auch hinsichtlich des künftig wichtiger werdenden Themas Klimakältebedarf nicht optimal für die Zukunft aufgestellt sind.

Das Thema „geöffnete Fenster“ wird in diesem Zusammenhang nicht betrachtet. Durch das Öffnen von Fenstern in der Heizperiode und zunehmend in sehr heissen Sommerphasen entscheidet sich der Nutzer aktiv für einen erhöhten Energiebedarf für Heizen und Kühlen bzw. für Komforteinbussen und ggf. Schimmelprobleme. Bei geschlossenem Fenster muss jedoch die nach Norm geforderte Qualität der Gebäudehülle gegeben sein.



2 Projektziele

Es bestehen Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden, eine gesetzliche oder verordnungstechnische Messpflicht jedoch nicht. Die Luftdichtheit von neuen Gebäuden und deren Einfluss auf den Energiebedarf für Heizung und Raumklimatisierung ist weitgehend unbekannt und soll untersucht werden. Es werden Einfamilienhäuser (EFH) ohne Minergie-Zertifikat und mit Minergie-Zertifikat «Standard 2017» verglichen. Voraussetzung für die Erteilung eines Minergie-Zertifikats «Standard» ist der Nachweis eines Luftdichtheitskonzepts. Zusätzlich werden thermische Gebäudesimulationen gekoppelt mit zonaler Strömungssimulation durchgeführt, um den Einfluss der Luftdichtheit auf den Heizwärmebedarf und die Raumtemperaturen im Sommer zu untersuchen. Ein Workshop zum Thema Luftdichtheit wird durchgeführt.

Das Ziel des Projektes ist es, den aktuell unbekanntem Stand der Luftdichtheit neuer, nicht geprüfter Gebäude zu erfassen und zu dokumentieren. Die gewonnenen Erkenntnisse geben einen Hinweis, ob das Thema Luftdichtheit in der Praxis angekommen ist oder ob zu diesem Thema weiterer Handlungsbedarf in der Umsetzung bzw. an die Anforderungen und ggf. weiterer Forschungsbedarf besteht.

Das Projekt besteht aus drei Arbeitspaketen:

1. Messung der Luftdichtheit von 28 neuen Einfamilienhäusern (Baujahr 2015 und jünger)
2. Workshop Luftdichtheit
3. Simulationen zum Einfluss der Luftdichtheit auf Heizwärme-/Klimakältebedarf und Raumtemperaturen

AP 1: Messung der Luftdichtheit

Es wird die Luftdichtheitsqualität von neueren Gebäuden bestimmt, die kein Label Minergie-P/-A aufweisen und ohne dieses Projekt nicht überprüft werden. Es werden Standardgebäude (ohne speziellen Fokus auf die Luftdichtheit und ohne Minergie-Zertifikat) und Minergie-Bauten mit Nachweis eines Luftdichtheitskonzepts (Minergie Standard 2017) verglichen. Hierzu werden 28 Einfamilienhäuser mit einem Blower-Door Test untersucht:

- 15 Standardgebäude ohne Minergie-Zertifikat, Ziel: Holzbau und Massivbau berücksichtigen (bestehende Gebäude: Alter 1-5 Jahre)
- 13 Gebäude gemäss Minergie Standard 2017 mit Luftdichtheitskonzept, Ziel: Holzbau und Massivbau berücksichtigen (bestehende Gebäude, Baujahr 2017 und jünger)

Dies ist eine erste Studie, um die Relevanz der Luftdichtheit von neuen Gebäuden auszuloten. Es werden absichtlich nur EFH untersucht, da hier die Wahrscheinlichkeit höher ist, genügend Gebäude innerhalb nützlicher Frist zu finden. Die untersuchten Gebäude sollen zwar neu, aber schon fertig gebaut sein, damit durch den Luftdichtheitstest die ursprüngliche Planung/Umsetzung nicht beeinflusst wird.



AP 2: Workshop Luftdichtheit

Um die Erfahrungen von diversen Praxisakteuren zum Thema Luftdichtheit abzuholen, wird ein Workshop durchgeführt. Durch den Austausch zwischen den Akteuren soll ein Konsens zum Thema Luftdichtheit gefunden, ggf. Themen mit Handlungsbedarf identifiziert sowie Vorschläge für Massnahmen sowie ggf. weitere Forschungsfragen erarbeitet werden.

AP 3: Simulation der Luftdichtheit

Die Auswirkung der Luftdichtheit auf den Heizwärme-/Klimakältebedarf und (sommerliche) Raumtemperaturen werden unter Berücksichtigung künftiger Klimabedingungen von Zürich-Kloten (Normal-/Warmjahr) am Beispiel von thermischen Simulationen an einem Einfamilienhaus aufgezeigt.



4 Anforderungen an die Luftdichtheit

Für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle bei 50 Pa gilt der Kennwert q_{a50} (entspricht q_{E50} [4])

$$q_{a50} = \frac{q_{50}}{A_{inf}} \quad \frac{m^3}{(h \ m^2)}$$

q_{50} Volumenstrom durch die Gebäudehülle (Innenmass) bei 50 Pa Druckdifferenz und geschlossenen Lüftungsöffnungen, m^3/h (Mittelwert aus Über-/Unterdruckmessung gemäss SN EN ISO 9972, Verfahren B [4])

A_{inf} Hüllfläche der Messzone, m^2

Die Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden sind in SIA 180 festgelegt (Tabelle 1). Minergie weist eigene Grenzwerte auf (Tabelle 2).

Obwohl bei den untersuchten Gebäuden die Luftdichtheit im Bauprozess nicht messtechnisch nachgewiesen werden musste, besteht grundsätzlich eine Anforderung gemäss SIA 180. Bei Minergie ist die Überprüfung beim Standard Minergie eine Empfehlung.

Tabelle 1 Anforderungen an die Luftdichtheit von Neu- und Umbauten gemäss SIA 180:2014 [2].

	Grenzwert		Zielwert
	für natürliche Lüftung $q_{a50,li}, m^3/(h \ m^2)$	für mechanische Lüftung $q_{a50,li}, m^3/(h \ m^2)$	generell $q_{a50,ta}, m^3/(h \ m^2)$
Neubauten	2.4	1.6	0.6
Umbauten	3.6	2.4	1.2

Tabelle 2 Empfehlung und Grenzwerte für Neubauten gemäss Minergie [5].

	Minergie	Minergie-P	Minergie-A
	Empfehlung $q_{E50}, m^3/(h \ m^2)$	Grenzwert $q_{E50}, m^3/(h \ m^2)$	Grenzwert $q_{E50}, m^3/(h \ m^2)$
Neubauten	≤ 1.2	≤ 0.8	≤ 0.8



Die Behandlung der Messunsicherheit wird aus [5] übernommen. Die möglichen Lagen der Messwerte und deren Unsicherheit in Bezug auf den Grenzwert zeigt Bild 2. Messresultate der Fälle a), b) und c) gelten als «erfüllt». Die Fälle d) und e) gelten als «nicht erfüllt». Diese Vorgehensweise basiert auf [4].

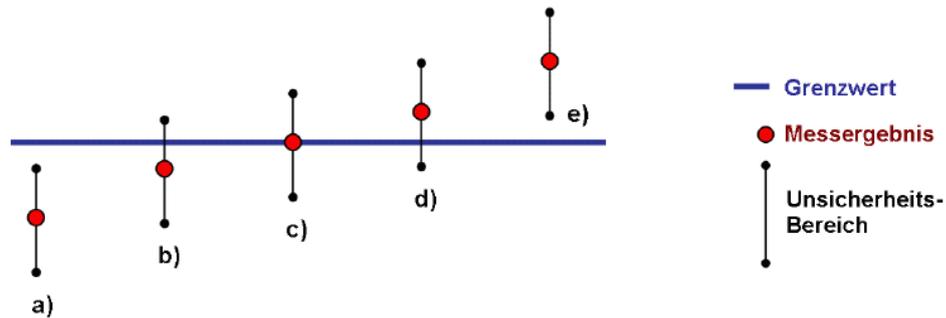


Bild 2 Mögliche Lage der Messwerte und deren Unsicherheiten in Bezug auf den Grenzwert [5].

Die Messunsicherheit wird in [4] wie folgt angegeben: «*Unter windstillen Bedingungen liegt die Gesamtunsicherheit in den meisten Fällen unter $\pm 10\%$. Unter windigen Bedingungen kann die Gesamtunsicherheit $\pm 20\%$ betragen*».

Minergie fordert eine Gesamtunsicherheit von max. $\pm 15\%$. Für die Auswertung werden die Messwerte gerundet, wie es in [5] festgelegt ist:

«*Beispiel: Ein Messwert von $q_{E50} = 0.84 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ergibt gerundet $q_{E50} = 0.8 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, womit der Grenzwert erfüllt ist.*»



5 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

5.1 Messung der Luftdichtheit

Es wird für 28 Einfamilienhäuser die Luftdichtheit geprüft. Hintergrundinformationen zu den Gebäuden sind in Bild 3 zusammengestellt. Die meisten Gebäude

- haben das Baujahr 2018,
- sind in Massivbauweise gebaut,
- haben eine Wärmepumpe,
- verfügen über eine Komfortlüftungsanlage (alle Minergie-Gebäude, 2 Geb. ohne Label) und
- haben eine Energiebezugsfläche bis 300 m² (Basis: alle Minergiegeb., 1 Geb. ohne Label).

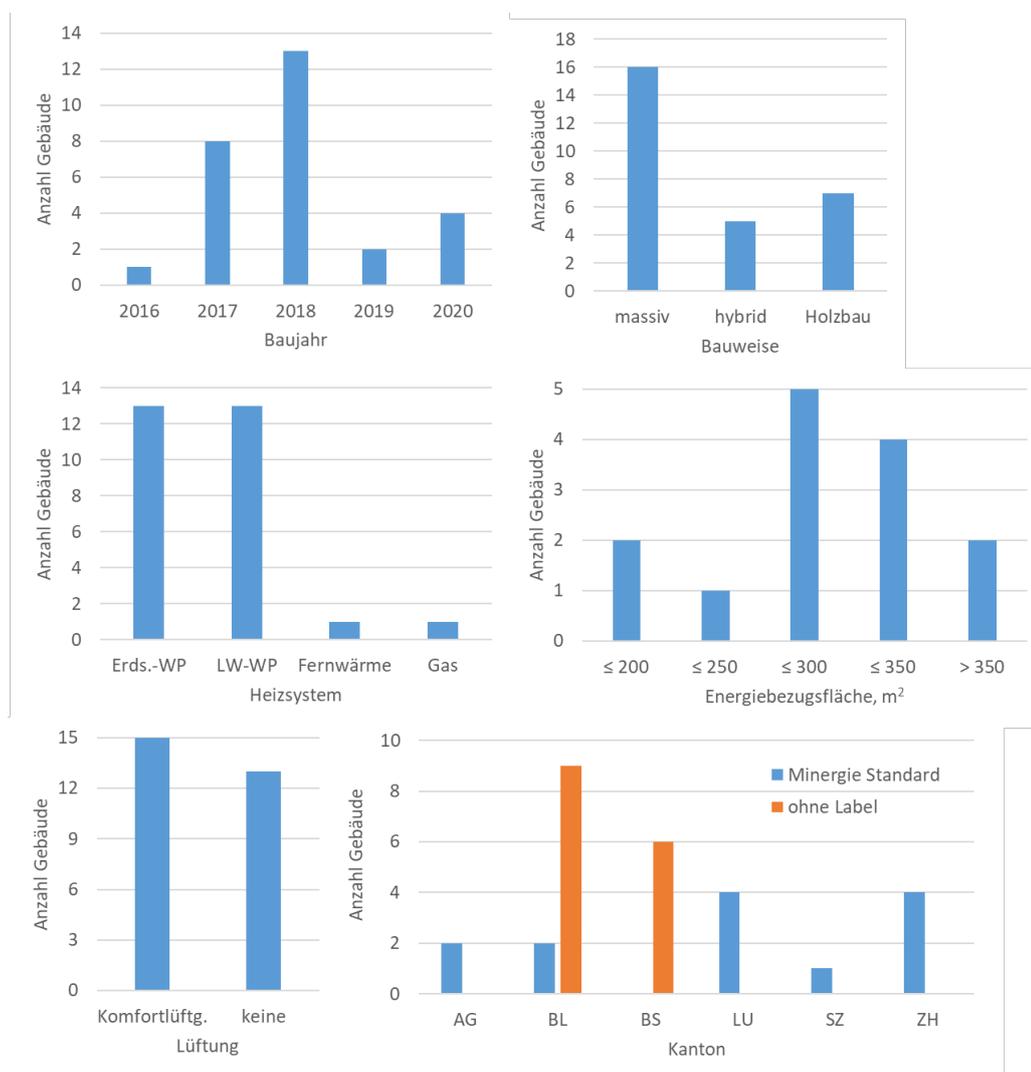


Bild 3 Überblick über alle Messobjekte (Energiebezugsfläche nur für 14 Gebäude).



Alle Messwerte inkl. Einordnung in die Anforderungen nach SIA 180 und Minergie [5] zeigen Bild 4 und Bild 5.

- Alle Gebäude liegen deutlich unter den Anforderungen gemäss SIA 180 für natürliche und mechanische Lüftung (mittel- und dunkelblaue Linie)
- Von allen 28 Gebäuden verfehlt nur ein Gebäude die Anforderungen gemäss Minergie (Standard) (orange Linie)
- Alle Minergie-Gebäude halten die Empfehlung für Minergie Standard ein (orange Linie)
- 50 % der Gebäude halten die Anforderung Minergie-P/A ein (hellorange Linie)
- 36 % der Gebäude halten den Zielwert gemäss SIA 180 ein (hellblaue Linie)

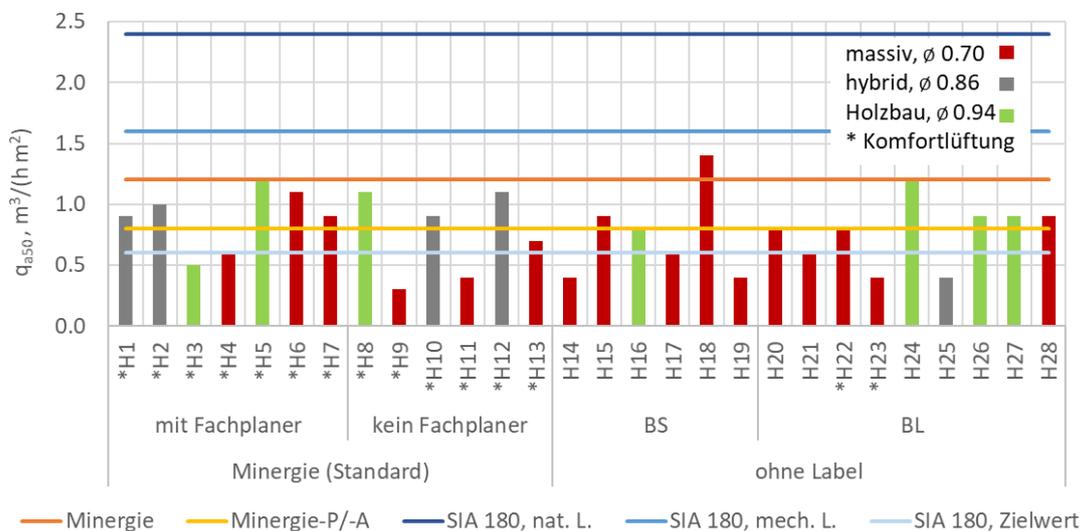


Bild 4 Messergebnisse der 28 Gebäude inkl. Einordnung in die Anforderungen nach SIA 180 (Neubau) und Minergie.

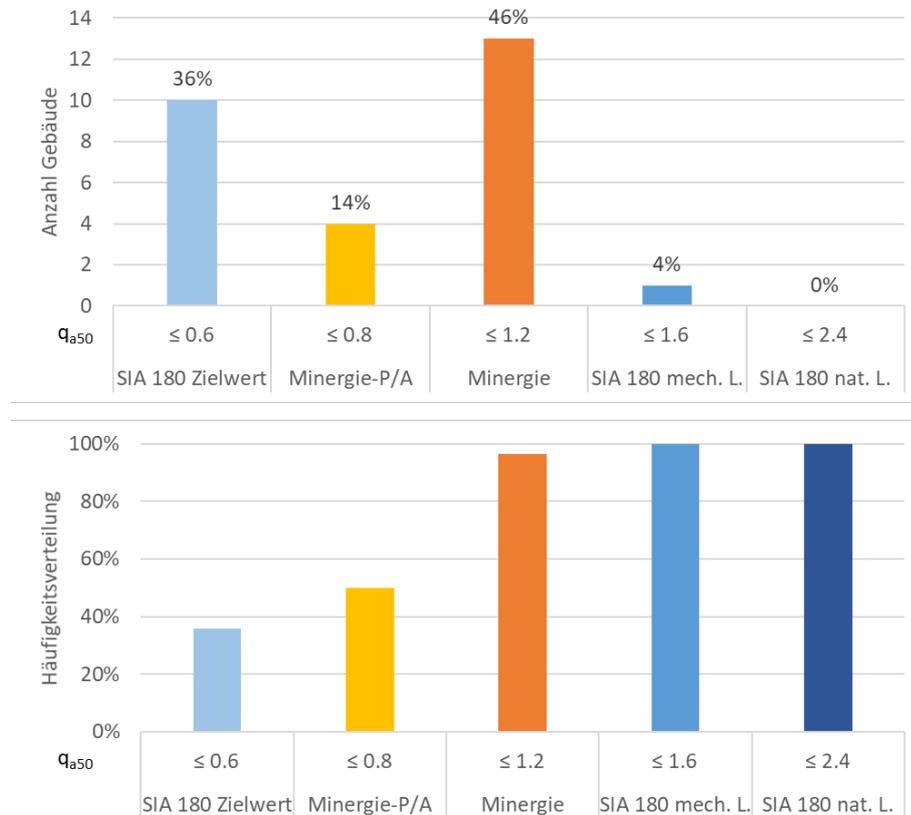


Bild 5 Einhaltung der Anforderungen nach SIA 180 und Minergie (oben/unten: absolute/relative Häufigkeitsverteilung).

Es zeigt sich, dass die untersuchten Gebäude alle sehr dicht sind. Die Spanne reicht von $q_{a50} = 0.3 - 1.4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Im Mittel beträgt $q_{a50} = 0.8 \pm 0.3 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Folgend Punkte können abgeleitet werden

- Es gibt keinen Unterschied zwischen Minergie-Gebäuden mit/ohne Fachplaner.
- Es gibt ebenfalls keinen Unterschied zwischen Minergie-Gebäuden und Gebäuden ohne Label. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Gebäuden ohne Label nicht bekannt ist, ob diese trotzdem von Minergie-Fachpartnern geplant/gebaut wurden.
- Bei diesen Untersuchungen sind die Massivbauten im Mittel dichter als die Holz- und Hybridgebäude. Die Anzahl der betrachteten Holz- und Hybridgebäude ist jedoch deutlich geringer als die der Massivbauten.
- Es zeigt sich, dass die Standardanforderungen der SIA 180 für Neubauten ohne/mit mechanischer Lüftung verschärft werden können.
- Die Anforderungen an Minergie-Standard werden bis auf eine Ausnahme von allen Gebäuden eingehalten.



Die häufigsten Leckagen sind (Anhang 8):

- Steckdosen in Innen- und Aussenwänden
- Anschluss Hebeschiebefenster – Festverglasung
- Durchbrüche gegen aussen z.B. für Elektroverteilung, PV-Anlage, Wärmepumpe (Splitgerät)
- Dichtung der Fensterflügel

Gebäude H8

Obwohl das Gebäude H8 einen $q_{a50} = 1.1 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ aufweist, werden lt. Bauherr die Fenster noch ausgetauscht, da eine grosse Anzahl der Fensterflügel nicht dicht schliesst.

Gebäude H18

Bei dem Gebäude H18 wird eine defekte Absenkichtung einer Kellertüre festgestellt. Die Dichtung hat nicht geschlossen, so dass ein permanenter Spalt von ca. 1 x 80 cm vorhanden ist. Eine zweite Messung mit abgeklebtem Türspalt ergibt einen $q_{a50} = 1.0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ anstatt $q_{a50} = 1.4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Die Dichtung soll nun repariert werden. Je dichter das Gebäude ist, desto grösser ist der Einfluss von einzelnen Leckagen. Die Blower-Door Messung trägt hier zur Qualitätssicherung bei.

Vergleich mit anderen Messungen

In [6] wurden u.a. ebenfalls Einfamilienhäuser untersucht. Die 10 Einfamilienhäuser (ohne Sanierung) weisen im Mittel $q_{a50} = 0.6 \pm 0.2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ bei der Erst- und Zweitmessung auf. Von diesen 10 Einfamilienhäusern sind acht mit Minergie-P und eins als Passivhaus zertifiziert. Der Unterschied zu den in diesem Projekt untersuchten Standardgebäuden mit einem Mittelwert von $q_{a50} = 0.8 \pm 0.3 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ist nicht gross.



5.2 Workshop Luftdichtheit

In dem Workshop Luftdichtheit werden folgende sechs Themen diskutiert:

1. Planung der Luftdichtheit
2. Feuchteschäden/Komforteinbussen durch Leckagen
3. Ausführung der Luftdichtheit vor Ort bzw. in der Fertigung
4. Lüftungsanlagen und Luftdichtheit
5. Luftdichtheitsmessung
6. Norm, Verordnungen, Labels, allg. Informationen, etc.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden (Anhang 8.2):

- Luftdichtheit ist nach wie vor ein Randthema
- Das Bewusstsein muss geschärft werden, da das Gebäude nur dicht wird, wenn alle Gewerke zusammenarbeiten
- Die Verantwortlichkeit für das Luftdichtheitskonzept, die Detailplanung, die Ausführung und die Abnahme muss geklärt werden
- Der Architekt/die Fachplaner müssen mehr in die Pflicht genommen werden. Mit der Anmerkung «ist luftdicht auszuführen», wird die Verantwortung auf die ausführende Firma verschoben.
- Die Schnittstellen der einzelnen Gewerke müssen thematisiert und geklärt werden. Hier passieren Fehler, weil sich keine zuständig fühlt.
- Die Anforderung können eingehalten werden, wenn die Luftdichtheit von Anfang an mitbedacht wird.
- Es gibt Wechselwirkungen zwischen Lüftungsanlagen und der Luftdichtheit.
- Wenn Feuchteschäden auftreten, dann meistens auf Grund von Konvektion, hauptsächlich bei Anschlüssen, Durchdringungen und Schnittstellen zwischen Gewerken.
- Die Luftdichtheit ist kein Thema im Betrieb des Gebäudes (z.B. regelmässig Fenster einstellen, Dichtungen austauschen).

Daraus ergibt sich Handlungsbedarf für:

- Die Klärung der Verantwortung für die Planung, Ausführung und Abnahme der Luftdichtheit
- Die Schnittstellenkoordination zwischen den Gewerken
- Die Thematik muss in der jeweiligen Branchenausbildung stärker verankert werden
- Das Bewusstsein für das Thema ist zu schärfen



5.3 Simulation der Luftdichtheit

Der Einfluss der Luftdichtheit auf den Heizwärme- und Klimakältebedarf wird anhand von einem mit IDA ICE [7] erstellten Simulationsmodell eines EFH untersucht. Das Gebäude ist ein Massivbau. Die U-Werte werden entsprechend eingestellt, dass es den Neu- bzw. Umbaugrenzwert der SIA 380/1:2016 für die Klimastation Zürich-Kloten (Normaljahr) einhält. Detaillierte Angaben zum Gebäude, dem Betrieb und den internen Lasten sind dem Anhang (Kap. 8.3) zu entnehmen.

Das Gebäude wird über eine manuelle Fensterlüftung mit einer dreimaligen Stosslüftung (morgens, mittags, abends) belüftet. Im Warmjahr gibt es zusätzlich eine Nachtlüftung im Sommer. Damit kann sichergestellt werden, dass nur kurzzeitig und nur vereinzelt Temperaturen über 26 °C auftreten.

Für die Windexposition des Gebäudes wird eine halb exponierte Lage in einem städtischen Umfeld (geschlossene Ortschaft) angenommen.

Untersucht werden folgende Fälle

- Variation der Luftdurchlässigkeit: $q_{50} = 0.6, 1.2, 2.4$ und $3.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ (Tabelle 1)
- Heizwärmebedarf: Neu- und Umbaugrenzwert gemäss SIA 380/1:2016
- Verteilung der Leckagen: flächenanteilmässig auf alle Aussenwände («Anteil»), hälftig auf die Süd- und Nordfassade («S+N»)
- Klima: Zürich-Kloten (Normal- und Warmjahr, SIA 2028:2015)

Der absolute Heizwärmebedarf und die Differenz zu dem Heizwärmebedarf mit $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ist in Tabelle 3 für alle Varianten dargestellt. Die prozentualen Abweichungen zeigt Bild 6.

Tabelle 3 Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Bauweise, dem Klima und der Anordnung der Leckagen.

Varianten			Heizwärmebedarf, kWh/(m ² a)				diff. Heizwärmebedarf, kWh/(m ² a)			
Bauweise	Klima	Anordnung Leckage	$q_{50}, \text{m}^3/(\text{h m}^2)$				$q_{50}, \text{m}^3/(\text{h m}^2)$			
			0.6	1.2	2.4	3.6	0.6	1.2	2.4	3.6
Neubau	normal	Anteil	47.2	48.8	51.6	54.1	0	1.6	4.4	6.8
		S+N	47.8	48.6	49.8	50.8	0	0.8	2.1	3.0
	warm	Anteil	30.7	31.8	33.8	35.6	0	1.1	3.1	4.9
		S+N	31.1	31.7	32.6	33.4	0	0.6	1.5	2.3
Umbau	normal	Anteil	69.6	71.2	74.0	76.3	0	1.6	4.3	6.7
		S+N	70.2	71.0	72.2	73.3	0	0.8	2.1	3.1
	warm	Anteil	47.2	48.3	50.4	52.2	0	1.1	3.2	5.0
		S+N	47.6	48.1	49.1	49.9	0	0.6	1.5	2.4

Deutlich ist aus Tabelle 3 und in Bild 6 zu erkennen, dass der Heizwärmebedarf mit zunehmenden q_{50} -Wert ansteigt. Folgende Aussagen können zusammengefasst werden:

- Der prozentuale Anstieg des Heizwärmebedarfs ist für das Warmjahr leicht höher als für das Normaljahr, was darauf beruht, dass Änderungen bei geringen absoluten Zahlen zu grösseren Prozentzahlen führen.
- Die Lokalisierung der Leckagen hat einen grossen Einfluss auf den zusätzlichen Heizwärmebedarf. Der zusätzliche Heizwärmebedarf bei einer flächenanteiligen Verteilung der Leckagen rund um das Gebäude («Anteil») gegenüber der Süd-Nord-Ausrichtung («S+N») ist



deutlich höher. Da die Hauptwindrichtung WSW ist, befinden sich bei den rund um das Gebäude verteilten Leckagen auch Leckagen in der Hauptwindrichtung; diese werden infolge der direkten Anströmung stärker durchströmt. Daher weisen die Varianten «Anteil» höhere Heizwärmebedarfswerte auf, als die Varianten «S+N».

- Bei den Umbauten ist der relative Anstieg des zusätzlichen Heizwärmebedarfs geringer als bei den Neubauten, da die Umbauten insgesamt einen höheren Heizwärmebedarf aufweisen und der zusätzliche Anteil, verursacht durch die Leckagen, dadurch kleiner wird.

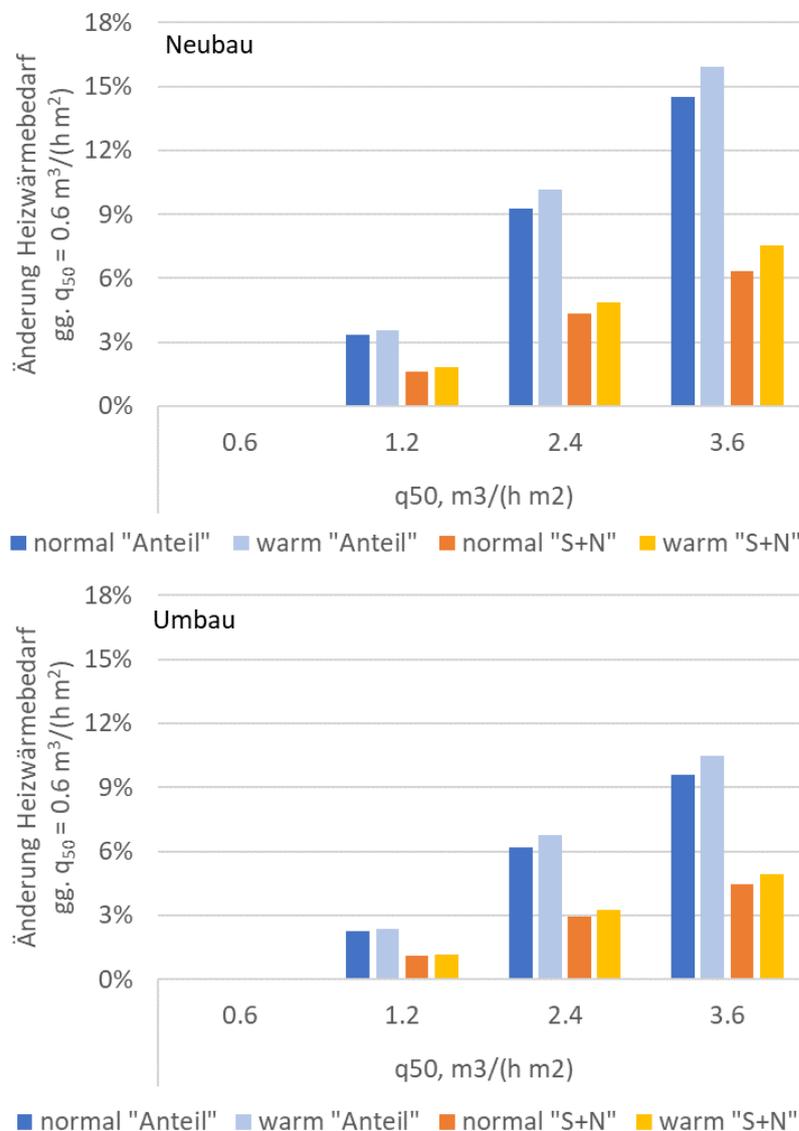


Bild 6 Prozentuale Abweichung des Heizwärmebedarfs gegenüber $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ für Neubauten (oben) und Umbauten (unten). Normaljahr: normal, Warmjahr: warm, Leckageverteilung: «Anteil» und «S+N».



Da die Unterschiede zwischen Normal- und Warmjahr nicht gross sind, wird zur Vereinfachung der Mittelwert gebildet (Bild 7).

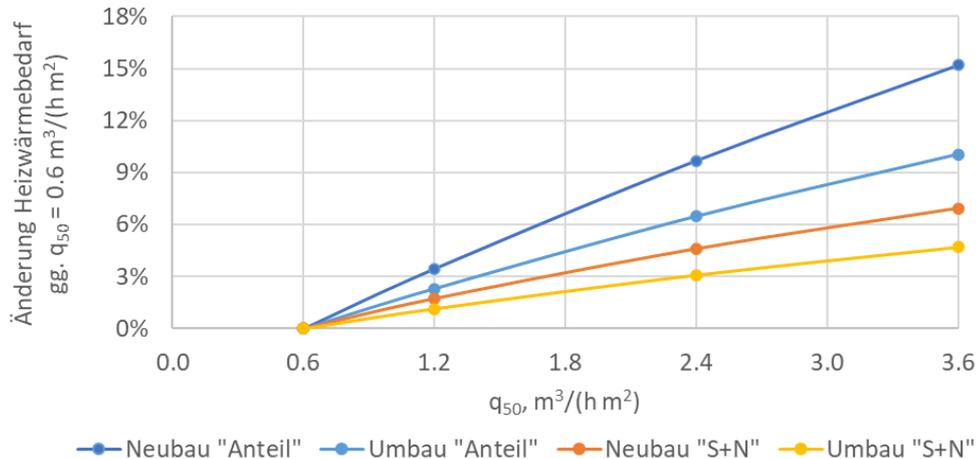


Bild 7 Prozentuale Abweichung des Heizwärmebedarfs gegenüber $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ für Neubauten gemittelt für das Normal- und Warmjahr.

Werden die Ergebnisse auf die gemessenen Gebäude angewendet, dann kann abgeleitet werden, dass die Leckagen keinen grossen Einfluss auf den Heizwärmebedarfs haben. Die gemessenen Gebäude weisen eine $q_{50} \approx 0.3 - 1.2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ auf. Gegenüber $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ gibt es maximal eine Erhöhung um ca. 3%. Nicht dargestellt ist hier, dass ein $q_{50} = 0.3 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ eine Reduktion von 1% des Heizwärmebedarfs gegenüber einem $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ entspricht.

Detailbetrachtung zu Volumenströmen werden am «Zimmer 2» im Obergeschoss durchgeführt (Neubau «Anteil», Normaljahr). Das Zimmer ist Süd und West ausgerichtet und liegt damit fast genau in der Hauptwindrichtung. Untersucht werden der Einfluss

- der Aussenlufttemperaturen,
- der Windgeschwindigkeit und
- der beiden Leckageanordnungen «Anteil» und «S+N».

auf die Durchströmung der Leckagen.

Den Einfluss der Aussenlufttemperatur auf die Volumenströme durch die Summe der Leckagen in der Süd- und Westwand zeigt Bild 8 (oben). Es wird der kälteste und wärmste Tag betrachtet. Beide Tage sind schwachwindig mit einer Hauptwindrichtung zwischen S-WSW (Bild 8, unten).

Die Volumenströme von innen nach aussen durch die Leckagen (hellblau, gelb) sind am kältesten Tag deutlich höher, als am wärmsten Tag. Am kältesten Tag liegt im Schnitt eine Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen von rund 29 K und am wärmsten Tag von knapp -3 K an. Der treibende Temperaturunterschied für den Luftaustausch ist damit am kältesten Tag ca. 10-mal höher als am wärmsten Tag. Sobald das Fenster geöffnet ist, dreht sich die Strömungsrichtung in den Leckagen um.

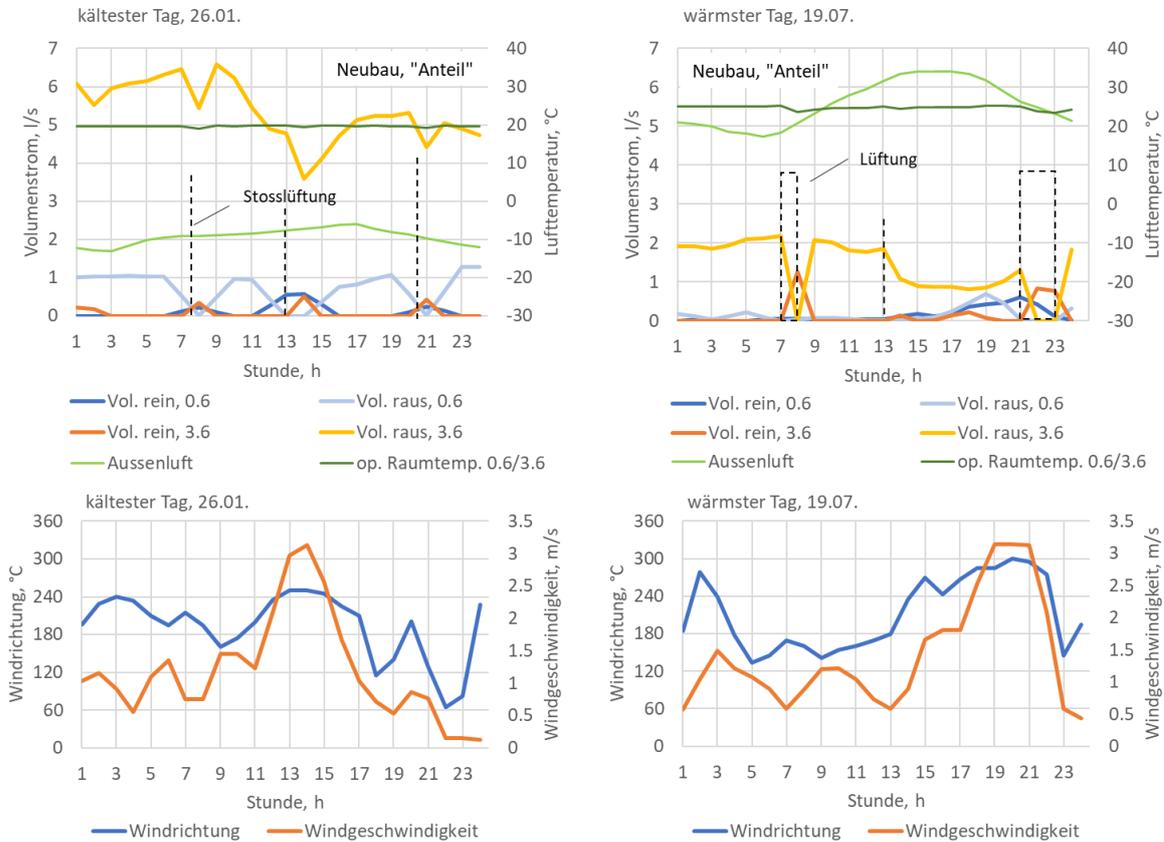


Bild 8 Volumenstromsummen durch die Leckagen in Zimmer 2 (für den kältesten und wärmsten Tag des Normaljahres (oben) und die entsprechenden Windrichtungen und -geschwindigkeiten (unten) und $q_{50} = 0.6/3.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$).

Um die windbedingten Luftvolumenströme durch die Leckagen zu untersuchen, wird vergleichend zum windschwachen Tag (19.07.) ein windiger Tag (11.07.) untersucht (Bild 8, Bild 9). An dem windschwachen Tag werden die Leckagen kaum durchströmt, da auch die Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen gering sind (Bild 8, rechts). Das undichte Gebäude mit $q_{50} = 3.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ weist erwartungsgemäss etwas höhere Volumenströme auf, als das dichte Gebäude mit $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. An dem windigen Tag folgen die Luftvolumenströme dem Windprofil (Bild 9, links). Das undichte Gebäude folgt deutlich, das dichte Gebäude nur in einem sehr geringen Mass. Da der Wind auf die Westfassade ansteht, strömt Luft durch die Leckagen in das Gebäude hinein. Die Zu-/Abluftvolumenströme durch die Leckagen sind unterschiedlich gross, da Zimmer 2 über die Tür mit den anderen Räumen des Gebäudes in Verbindung steht.

Die operative Raumtemperatur unterscheidet sich zwischen dem undichten und dem dichten Gebäude kaum und ist daher hier zusammen dargestellt.

Die rechte Seite von Bild 9 zeigt den Einfluss der Leckageverteilung «S+N» im Vergleich. Da die Windrichtung mit ca. 240° fast WSW ist und sich bei der Leckageverteilung «S+N» keine Leckage auf der Westseite befindet, kann keine Durchströmung auf der Westfassade stattfinden. Der Zuluftstrom bei der Leckageverteilung «S+N» ist daher geringer, als bei der Leckageverteilung «Anteil». Der Zeitpunkt des maximalen Volumenstroms und der maximalen Windgeschwindigkeit stimmen überein.



D.h. wenn sowohl luv- als auch leeseitig Leckagen vorhanden sind, werden diese stärker durchströmt, als wenn nur «parallel» in der Strömung liegende Leckagen vorhanden sind. Dies kann sich im realen Gebäude ggf. als Zugluft unangenehm bemerkbar machen.

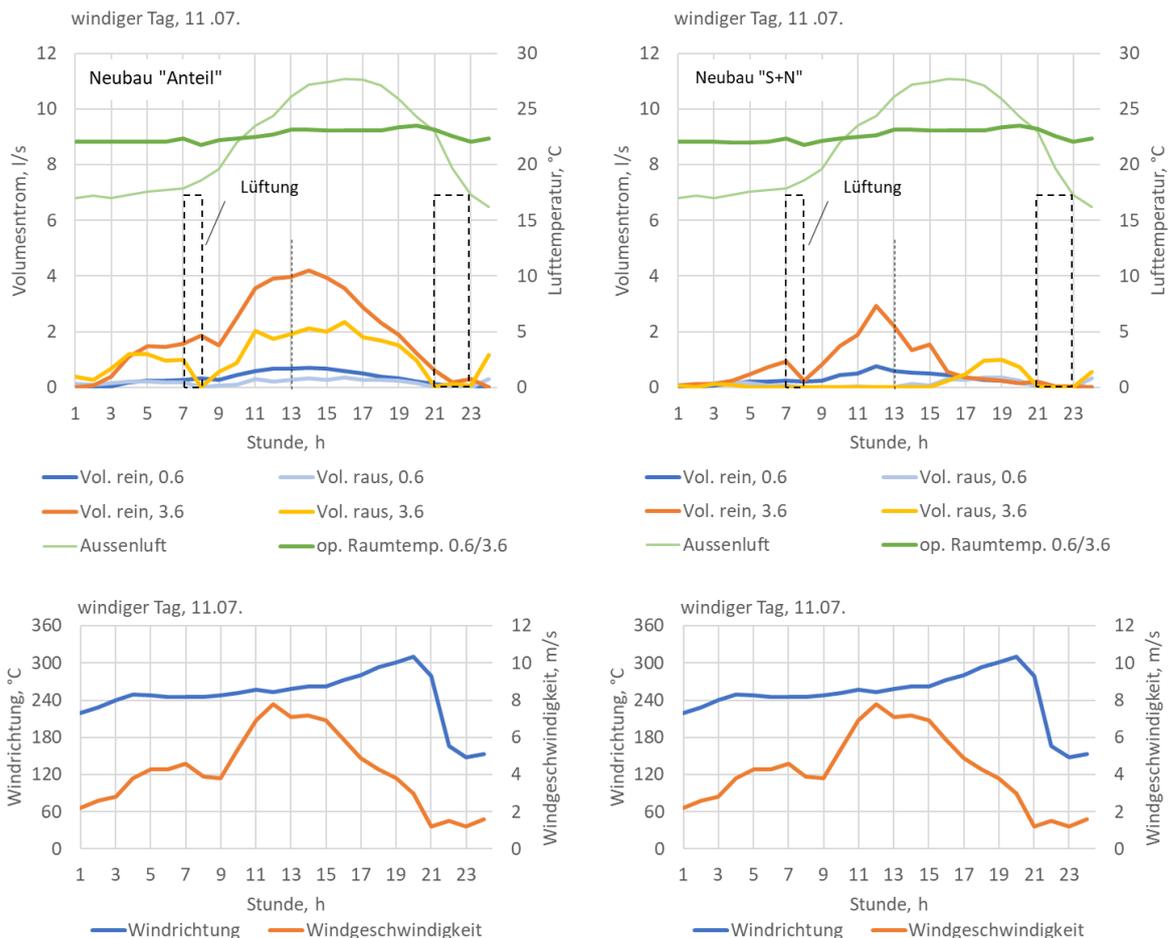


Bild 9 Volumenstromsummen durch die Leckagen in Zimmer 2 für einen windigen Sommertag des Normaljahres (rechts: Neubau «Anteil», links Neubau «S+N») und die entsprechenden Windrichtungen und -geschwindigkeiten (unten).

Neben der Luftdichtheit und der Leckageverteilung hat auch die Windexposition des Gebäudes einen Einfluss auf die Leckagevolumenströme und daher auf den Heizwärmebedarf. In Bild 10 ist die Änderung des Heizwärmebedarfs gegenüber $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ für verschiedene Windexpositionen – geschützt bis sehr exponiert – dargestellt. In dem recht geschützten städtischen Umfeld ist der Einfluss der Windexposition für dichte Gebäude aber nur gering. Je undichter das Gebäude ist, desto grösser wird der Einfluss der Windexposition.

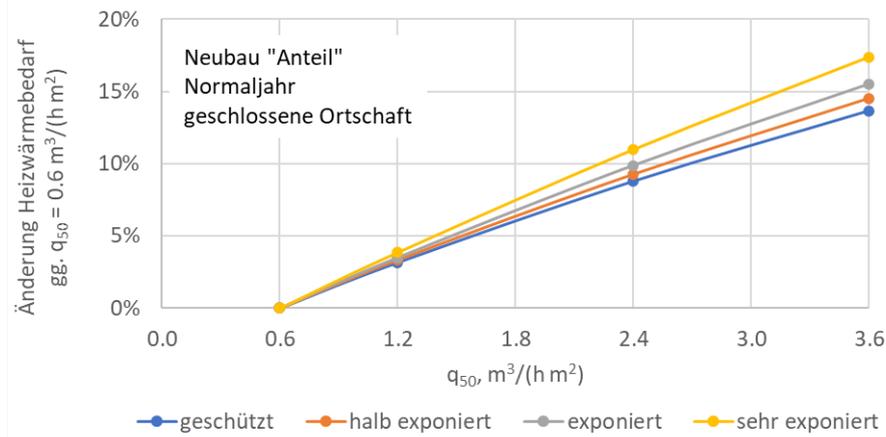


Bild 10 Änderung des Heizwärmebedarfs gegenüber $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ für verschiedene Windexpositionen.

Um den Einfluss der Luftdichtheit auf den Klimakältebedarf zu bestimmen, werden Räume, denen ein Profil gemäss SIA 2024:2015 zugewiesen ist mit einer Komfortlüftungsanlage versehen. Es werden konstante Zu- und Abluftvolumenströme gemäss den Profilen aus SIA 2024:2015 verwendet. Die Zulufttemperatur beträgt konstant 20 °C. Zusätzlich wird eine ideale Kühlung berücksichtigt, die ab einer Raumtemperatur von 26 °C aktiviert ist. Es wird angenommen, dass die Fenster immer geschlossen sind.

Bild 11 zeigt den Heizwärme- und Klimakältebedarf für das Normal- und Warmjahr und der Variante Neubau «Anteil». In beiden Jahren steigt der Heizwärmebedarf mit zunehmender Undichtheit des Gebäudes an, während der Klimakältebedarf fast unabhängig von der Dichtheit ist. Die Prozentzahlen für die Änderungen des Klimakältebedarfs sind in Bild 11 zwar recht hoch, aber das liegt daran, dass die absoluten Zahlen sehr gering sind.

Das gezeigte Verhalten bestätigt die gefundenen Resultate

- Im Winter verursachen grosse Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen sowie höhere Windgeschwindigkeiten hohe Volumenströme durch die Leckagen. Da dies die Heizperiode betrifft, muss die Zuluft entsprechend aufgeheizt werden, was zu einem erhöhten Heizwärmebedarf führt. Die Dichtheit des Gebäudes hat einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf.
- Im Sommer sind die Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen sowie die Windgeschwindigkeiten geringer als im Winter, so dass über die Leckage kaum ein Luftaustausch stattfindet. Daher hängt der Klimakältebedarf nur wenig von der Dichtheit des Gebäudes ab.

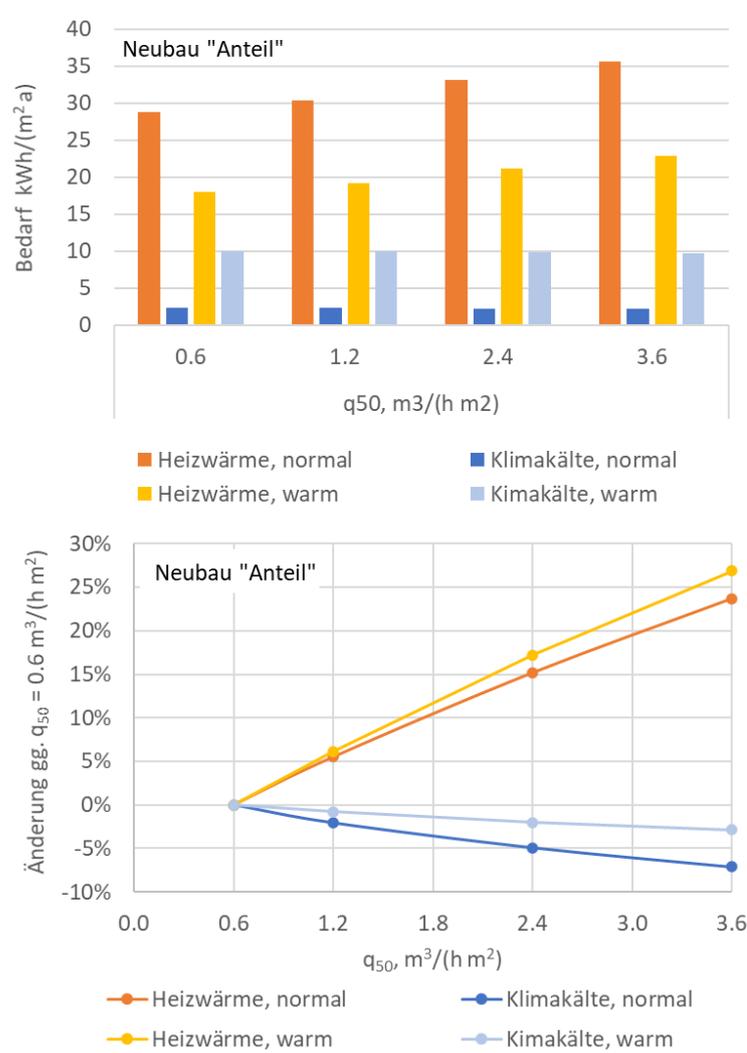


Bild 11 Heizwärme- und Klimakältebedarf für das Normal- und Warmjahr für den Neubau «Anteil» (oben: absolute Werte, unten: relative Abweichung zu $q_{50} = 0.6 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$).



6 Fazit

Messungen

Die Luftdichtheitsmessungen an den 28 Einfamilienhäusern zeigen, dass diese mit einem Mittelwert von $q_{a50} = 0.8 \pm 0.3 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ sehr dicht ist. Der höchste Wert beträgt $q_{a50} = 1.4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, welcher jedoch auf eine nicht schliessende Absenkdichtung zurückzuführen ist. Die häufigsten Leckagen sind Steckdosen, Hebeschiebetüren, Dichtungen der Fensterflügel und Durchdringungen.

Es zeigt sich, dass die Gebäudehülle dicht gebaut wird und damit der energetische Aspekt der Luftdichtheit erreicht ist. Für die untersuchten Gebäuden kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob infolge der Leckagen im Lauf der Zeit Bauschäden auftreten werden bzw. Zugluft- oder Schallprobleme bestehen.

Die Stichprobe der zufällig ausgewählten 28 neuen Einfamilienhäusern ist zu gering, um eine allgemeine Aussage über die Luftdichtheit von Neubauten zutreffen. Sie gibt jedoch einen Hinweis darauf, dass das Thema im Bauwesen angekommen ist und Gebäude auch ohne Nachweispflicht der Luftdichtheit sehr dicht sein können.

Workshop

Die Experten sehen das Thema immer noch als ein Randthema im Bauwesen und empfehlen dies in der Ausbildung und Planung noch stärker zu berücksichtigen. Die Verantwortlichkeit für die Luftdichtheit in der Planung und Ausführung muss geklärt sein. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Schnittstellen von verschiedenen Gewerken gelegt werden.

Simulationen

Die Simulationen zeigen, dass der Heizwärmebedarf mit zunehmender Undichtheit zunimmt. Bei Gebäuden mit einem tiefen Heizwärmebedarf führt die Infiltration durch die Leckagen zu einem prozentual höheren Anstieg des Heizwärmebedarfs bei zunehmender Undichtheit als bei Gebäuden mit einem höheren Heizwärmebedarf.

Bei dichten Gebäuden ist der Heizwärmebedarf unabhängig von grossen Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen sowie vom Wind. Undichte Gebäude weisen gerade im Winter, durch die hohen Temperaturdifferenzen bedingten Volumenstrom durch die Leckagen, einen höheren Heizwärmebedarf auf. Bei Wind wird dies noch unterstützt.

Grundsätzlich gilt:

- je geringer die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen ist
- je geringer die Windgeschwindigkeiten sind und
- je weniger Leckage in der Hauptwindrichtung liegen,

desto geringer die Infiltration durch die Leckagen.

Bei einer manuellen Fensterlüftung haben die Leckagen im Sommer keine Einfluss auf die Raumlufttemperatur. Die Temperaturdifferenzen zwischen innen und aussen sind gering und induzieren dadurch nur einen sehr kleinen Volumenstrom durch die Leckagen.

Der Klimakältebedarf wird durch Leckagen nur wenig beeinflusst, da die Infiltration im Sommer gering ist. Alle Aussagen beziehen sich auf die Klimastation Zürich Kloten.



7 Referenzen

- [1] C. Tanner, "Richtlinie für Luftdurchlässigkeitsmessungen bei Minergie-A/-P und Minergie-Bauten," www.minergie.ch, 2011.
- [2] SIA 180, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. 2014.
- [3] MuKE n 2014, "Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) 2014." EnDK, www.endk.ch.
- [4] SN EN ISO 9972, "Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren." 2018.
- [5] G. Notter and M. Wehrli, "Richtlinie Luftdichtheit bei Minergie-Bauten RiLuMi v2020.1," Herausgeber: Verein Minergie/Thermographie- und Blower-Door Verband Schweiz, 2020.
- [6] B. Bossard and U.-P. Menti, "Luftdurchlässigkeitsmessung: Monantanwert oder langfristiges Qualitätsmerkmal?," HSLU, Stadt Zürich und BFE Schlussbericht SI/400786-01, 2013.
- [7] EQUA Simulation AG, "IDA ICE Version 4.8." www.equa.se/de/ida-ice, 2021.
- [8] K. J. Geissler, "Messergebnisse zur Luftdichtheit von Gebäuden und theoretische Ermittlung der in der Praxis erreichbaren Messgenauigkeit," Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1998.
- [9] Merkblatt SIA 2024, "Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik." 2015.



8 Anhang

8.1 Messung

Tabelle 4 Leckageliste

Nr.	Fenster Einbaurahmen	Dichtung Fensterflügel	Glasereinbau - Fensterrahmen	Hebeschiebefenster - Festteil Fensterdichtung	Durchbrüche	Steckdosen Innen- und Aussenwand	Türen	Wände	Dach	Cheminée, Holzofen
H1				Wohnraum senkrechte Dichtung	Elektroverteilung - aussen	diverse				
H2	Dachfenster/ Futter			Wohnraum senkrechte Dichtung	Elektroverteilung - aussen	diverse				
H3		Schlafzimmer, Bad		Wohnraum senkrechte Dichtung	Technikraum Photovoltaik - aussen					
H4				3 x Wohn- und Dachraum, senkrechte Dichtung						
H5							Haustüre			Holzofentüre undicht
H6		Wohnraum, Küche		Küche	Dampfabzug Abluft	Badzimmer zu Weiterstation				
H7				Wohnraum senkrechte Dichtung		wenige	Türe zur Garage ohne Dichtung unten			
H8	EG Fensteranschluss	viele		Wohnraum senkrechte Dichtung	Elektro, Wärmepumpe (Spilgerät)	diverse	Zutritt Tiefgarage		(Dachfenster)	
H9		Schlafzimmer					UG Türabsenkrichtungen			
H10				Wohnraum senkrechte Dichtung		diverse				
H11				Wohnraum senkrechte Dichtung		wenige				
H12					Technikraum Türrahmen/Futter: Risse in der Wand aussen	diverse		Anschluss UG - Garage, Materialwechsel in Wand		
H13							Haustüre			
H14	i.O	i.O	Dichtung nicht zusammengepresst am Festteil	Burstendichtung ?	WP und PV auf dem Dach gut abgedichtet.	Steckdosen nach aussen	Türe zu Tiefgarage sehr undicht. Keine Einstellmöglichkeit			keine



Nr.	Fenster			Durchbrüche	Steckdosen Innen- und Aussenwand	Türen	Wände	Dach	Cheminée, Holzofen
	Einbaurahme	Dichtung Fensterflügel	Glaseinbau - Fensterrahmen						
H15	teilweise Festver- glasungen		Wohnraum Festverglasung		wenige				
H16					wenige				
H17			Wohnraum Dachraum	Technikraum - Dach	wenige				Cheminée Glastüre undicht
H18					wenige	EG - UG Türabsen- dichtungen zu unbeheizt			
H19					wenige				
H20					wenig (z.T. Verbindung zu Terrasse)	Hauttüre, Ecken unten, Anziehen der Schliesselemente			
H21						(Türschloss prov.)			
H22				L/W-Wärmepumpe nach aussen (Luftführung)					
H23			Rollladen in Nische		Eielerzimmer				Cheminée Glastüre undicht
H24		wenig, nur eine Dichtungsebene gg. Aussen, Feuchteleut geht bis in Rahmen, Kondenzproblem im Rahmenbereich	Scharniere, aber ganz wenig			Hauttüre schlecht eingestellt			
H25		wenig			Wohnzimmer verbindung zu Aussensteck- dosen				
H26		Fenstertüre		Dampfabzug, PV Anlage, Ab-Zuluft LW- WP	wenig				
H27	i.O.	i.O., wenn Leck bei Scharnier		Dampfabzug	Verbindung zu Terrasse (Stören, Licht, Steckdose)	Schlüsselloch Türe zu Keller			
H28	i.O.			Handkurbeln bei Rollladen, undicht und Lichtschalter für Terrasse					Dachfenster (Klappe/Rahmen- Zuluftklappe/ Rauchabzug undicht an Firsplatte



Tabelle 5 Messwerte (* Gebäude mit Komfortlüftungsanlage).

Standard	Haus	q_{50} , $m^3/(h m^2)$
Minergie (Standard)	*H1	0.91
	*H2	1.02
	*H3	0.47
	*H4	0.57
	*H5	1.24
	*H6	1.10
	*H7	0.94
	*H8	1.06
	*H9	0.32
	*H10	0.86
	*H11	0.40
	*H12	1.07
	*H13	0.71
ohne Label	H14	0.43
	H15	0.89
	H16	0.80
	H17	0.61
	H18	1.39
	H19	0.39
	H20	0.80
	H21	0.64
	*H22	0.79
	*H23	0.36
	H24	1.19
	H25	0.38
	H26	0.92
	H27	0.90
	H28	0.88



8.2 Workshop

Diskussion der Plakate

P1 - Planung der Luftdichtheit

- Luftdichtheitskonzept unsexy
- Verantwortung für das Luftdichtheitskonzept liegt grundsätzlich bei dem Architekten, welcher oft die Planung an den Fachplaner ab, ohne dass die Luftdichtheit thematisiert wird
- Oft heisst es in den Plänen «ist luftdicht auszuführen», Detailzeichnungen gibt es aber nicht, d.h. die Ausführung wird an die ausführende Firma abgeben
- Das Luftdichtheitskonzept muss mit der Planung der Gebäudehülle gekoppelt werden (geschlossener Dämmperimeter und geschlossene Luftdichtheitsschicht inkl. Detailplanung)
- Weiterbildung wird wenig von Planern besucht, hauptsächlich von den Ausführenden
- Für das Bewusstsein über Luftdichtheit gibt es grosse Unterschiede unter Gewerken (Holzbau, Fensterbranche deutlich weiter als z.B. Elektriker)
- Luftdichtheit muss in den Kontrollplänen der Bauleitung integriert sein (MQS Bau)
- Fehler passieren zwischen Schnittstellen von Gewerken
- Schnittstelle/Bewusstsein zwischen allen Beteiligten stärken
- Schnittstellenpapier Regelung -> braucht es einen Luftdichtheitsplan?
- Bewusstsein wecken, dass die Luftdichtheit nur gut wird, wenn alle daran denken
- Minergie Nachweis Luftdichtheitskonzept: 70% Checkliste, 30% Grobkonzept (Planunterlagen, Beschrieb der Massnahmen)

P2 - Feuchteschäden / Komforteinbussen durch Leckagen

- Wenn Feuchteschäden, dann meistens auf Grund Konvektion
- 2 Gründe für Feuchteschäden:
 - falsche Nutzung (Luftdichtes Bauen erfordert aktives Lüften vom Nutzer bzw. funktionierendes Lüftungskonzept)
 - Leckagen (hauptsächlich Anschlüsse «Flankenübertragung», Durchdringungen, Übergänge von Gewerken, Hohlräume -> Schnittstellenproblematik)
- Bei undichten Fensterfugen ist das Bauschadensrisiko gering, aber es kann zu Komforteinbussen kommen (Stossstellen Flügel, Glasleisten)
- Bewusste Leckagen wie. Z.B. Zuluftöffnungen bei Abluftanlagen können zu Komforteinbussen führen
- Holzbau sind Auswirkungen grösser, dadurch sind sie vorsichtiger



P3 - Ausführung der Luftdichtheit vor Ort bzw. in der Fertigung

- Typische Leckagen: Installationen, Dampfzug, Lüftungsanlagen, Sanitär, Fensteranschluss, unverputzte Bereiche, interne Leckagen zwischen Wohneinheiten
- Aufwand / Ertrag betrachten
- Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten im Bauprozess
- Bauteilkataloge sind nicht bei den Ausführenden angekommen, Anschlussdetails: z.B. DIN 4108-7
- Grenzwerte nach Norm gut erreichbar, wenn von Anfang an die Luftdichtheit in der Planung berücksichtigt wird
- Ausschreibung muss klar definiert sein (einzelne Anschlüsse), sonst wird es nicht ausgeführt

P4 - Lüftungsanlagen und Luftdichtheit

- Wechselwirkung zwischen Lüftungsanlagen und Luftdichtheit.
 - Einzelraumlüfter/Komfortlüftung reagieren stark auf Undichtheiten (Disbalance)
 - Abluftanlage: Zuluft wird irgendwoher gezogen
 - Lüftungsanlage in Verbindung mit Leckagen können die Radonproblematik über interne Leckagen fördern
 - Kaskadenlüftung wird gestört
- Küchenabzug: Auswirkung durch Unterdruck
- Rauchgas bei Kamin/Öfen
- Merkblatt SIA 2023 (neu SIA 382/5)

P5 - Luftdichtheitsmessung

- Weniger als 1 % der Neubauten werden gemessen, ca. 4'000 Blower-Door Messungen pro Jahr, davon 60-70% Minergie –P/-A und 30-40% Spezialaufgaben
- Zeitpunkt der Messung?
 - Am besten mehrmals während der Bauphase messen
 - Während der Bauphase, da dann noch Möglichkeiten zum Nachbessern, je weiter der Baufortschritt ist, desto schwieriger wird es mit dem Nachbessern
- Wie dicht soll ein Gebäude überhaupt sein?
- Kleine Volumen zu messen ist schwierig
- Anwendung von q_{50} – n_{50} , je nach Gebäudegrösse die eine Kenngrösse besser?
- Einhaltung eines Grenzwertes ist keine Garantie, dass keine Bauschäden auftreten
- Fenster sind öfters undicht, was jedoch durch richtiges Einstellen behoben werden kann



P6 - Norm, Verordnungen, Labels, allg. Informationen, etc.

- Grundlagen stimmen, müssen aber umgesetzt werden
- Konzept ist vorgeschrieben, aber die Verantwortung für die Ausführung fehlt
- Anforderungen können eingehalten werden, wenn die Luftdichtheit von Anfang an mitbedacht wird
- Wie geht Nutzer mit dem Lüften vor? Bedienungsanleitung/Schulung (Vorsicht bei Änderung der Gebäudehülle)
- Ist die Langzeit Lebensdauer der Luftdichtheit gegeben? Hierzu kamen widersprüchliche Aussagen
- Luftdichtheit ist kein Thema im Betrieb des Gebäudes (z.B. regelmässig Fenster einstellen, Dichtungen austauschen).
- Bei Erneuerungen muss ein besonderes Augenmerk auf die Luftdichtheit gelegt werden.
- Anreize für ein luftdichtes Gebäude schaffen: z.B. Fördermittel auch an Qualitätssicherung der Luftdichtheit knüpfen
- Kontrolle der Luftdichtheit ist mangelhaft
- Normung im Ausland ist weiter als in der Schweiz z.B.:
 - Deutschland: reduzierte Lüftungsverluste bei Nachweis einer luftdichten Gebäudehülle
 - Frankreich: Gebäude mit Lüftungsanlage müssen gemessen werden
- Versuchsgebäude am Campus Sursee mit definierten Leckagen zum Üben
- Es ist nicht Zweck von Gesetzen, die Qualitätssicherung des Bauwesens zu übernehmen.

Wünsche

- Die Thematik muss verstärkt in die Ausbildung aller Baubeteiligten aufgenommen werden, nicht nur bei den Handwerkern sondern auch bei Architekten/Planern
- Das allgemeine Bewusstsein für das Thema muss verstärkt werden



8.3 Simulation

Beispielgebäude

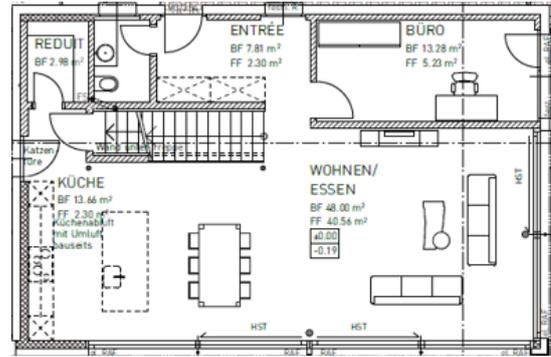
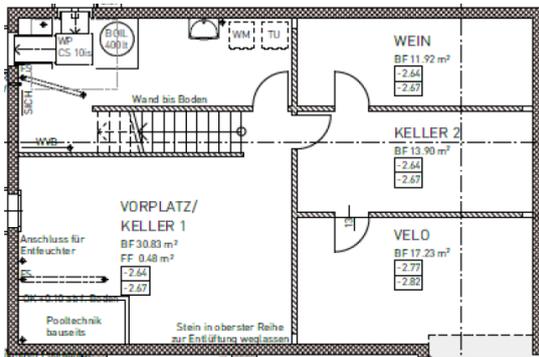


Bild 12 Plan Keller (unbeheizt) und EG

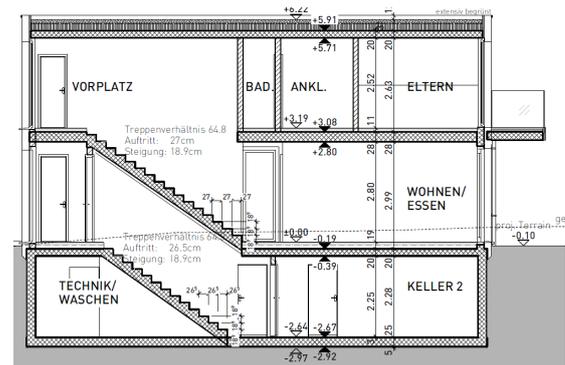
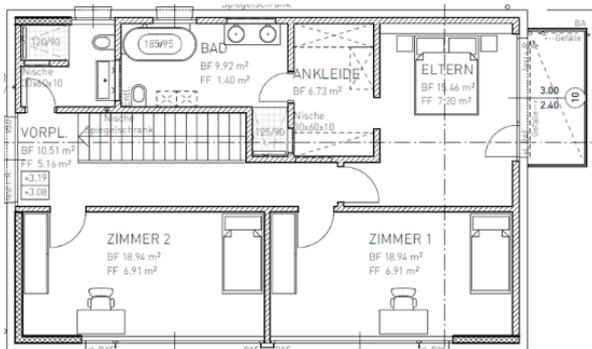


Bild 13 Plan OG und Schnitt



Tabelle 6 Diverse Parameter des Gebäudes.

Beschreibung	Parameter
Energiebezugsfläche, m ²	224
Grenzwert SIA 380/1:2016 Neu-/Umbau, kWh/(m ² a)	58.4/87.6
Projektwert gemäss SIA 380/1:2016 Neu-/Umbau, kWh/(m ² a)	57.7/85.6
Solarstrahlungsgrenzwert für externen Sonnenschutz, W/m ²	120
Fenster, die für die Lüftung geöffnet werden	EG: Wohnen, Büro, WC OG: Schlafen, Zimmer 1+2, Bad, WC
Fensterlüftung Taglüftung: 30% der Fensterfläche Nachlüftung: 10% der Fensterfläche	Normal-/Warmjahr Winter: Jan-Mai und Sep-Dez 7:30-7:40, 13:00-13:10, 20:30-20:40 Uhr Sommer: Juni-Aug 7:00-8:00, 13:00-13:10, 21:00-23:00 Uhr
	Warmjahr zusätzlich Sommer: Juni-Aug 00:00 - 6:00 Uhr Nachtlüftung
Setpoint Heizung	Jan-Mai: ≤ 20°C Jun-Aug: ≤ 16°C Sep-Dez: ≤ 20°C
Komfortlüftungsanlage	Zulufttemperatur: 20°C Wärmerückgewinnung: 80% Konstanter Volumenstrom gemäss SIA 2024:2015 Profile: 1.2 Wohnen EFH und 12.6 WC/Bad/Dusche
Klima SIA 2028:2015	Zürich-Kloten, Normal-/Warmjahr

Tabelle 7 Zusammenfassung der Konstruktionen.

Neubau/Umbau			
Bauteil	Material	Dicke, m	U-Wert, W/(m ² K)
Aussenwand	Aussenputz	0.05	0.24/0.40
	Dämmung EPS	0.15/0.09	
	Beton, 2% armiert	0.2	
Dach	Dämmung EPS	0.15/0.09	0.21/0.35
	Beton, 2% armiert	0.25	
Decke OG	Platten	0.005	0.70
	Zement	0.06	
	Dämmung EPS	0.04	
	Beton, 2% armiert	0.2	
Decke UG Bodenplatte	Platten	0.005	0.18/0.30
	Zement	0.06	
	Dämmung EPS	0.04	
	Beton, 2% armiert	0.2	
Innenwand	Dämmung EPS	0.15/0.08	2.07
	Putz	0.1	
	Modulbacksetin	0.125	
	Putz	0.1	



Tabelle 8 Wärmebrücken für Neu- und Umbau.

Wärmebrücken	Neubau	Umbau
	$\psi, \text{W}/(\text{m K})$	
Fensteranschluss	0.06	0.2
Dach/Aussenwand	0.2	0.3
Sockel	0.3	0.3
Haustüre	0.2	0.2

Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Räume in Keller sind unbeheizt
- Fensterlüftung: Stosslüftung im Winter (3x10min/d), Nachtlüftung im Sommer
- Der aussenliegende Sonnenschutz ist nach Solarstrahlung gesteuert
- Es gibt keine Verschattung durch Nachbargebäude
- Um den Einfluss der Luftdichtheit im Sommer zu untersuchen, wird eine mechanische Kühlung berücksichtigt
- Heizung und Kühlung werden ideal geregelt

Leckagen

IDA ICE bietet eine automatische Verteilung der Leckagen auf die Gebäudehülle an. Die Leckagen werden flächenanteilig der Aussenwandfläche der jeweiligen Zone auf die Aussenwände verteilt. Die Grösse der Einzelleckagen ist dabei abhängig von der Luftdurchlässigkeit (q_{50}). Somit sind die Leckagen rund um das Gebäude verteilt. Bei dem untersuchten Gebäude führt die automatische Leckageverteilung dazu, dass sich je 30% der Gesamtleckagefläche nach Süden bzw. Norden und je 20% nach Osten bzw. Westen orientieren.

Im Programm werden die Leckagen als äquivalente Leckagefläche (ELA) angegeben. Diese ist definiert als eine Leckage in der Gebäudehülle auf der Höhe 1 m über dem Boden, bei 4 Pa und dem Leckagekoeffizient $C = 1$.

Für die Verteilung auf die Süd- und Nordfassade werden die Summen der Leckageflächen je Etage gebildet und dann gleichmässig auf die Süd- und Nordfassade verteilt.

Werden die Leckage automatisch verteilt befinden sie sich in der Mitte der Aussenwand auf eine Höhe von 1 m. Bei der Verteilung der Leckagen auf die Süd- und Nordfassade, werden die Leckagen jeweils mittig der Fenster angeordnet. Somit sie etwas höher als bei der automatischen Anordnung positioniert.



Tabelle 9 Äquivalente Leckageflächen: Verteilung auf die anteiligen Aussenwandflächen gemäss [7], Verteilung der Leckageflächen auf die Süd- und Nordfassade so, dass jede Fassade 50% Leckagefläche erhält.

anteilig an Aussenwandflächen der Zonen		Äquivalente Leckagefläche, m ²			
		q ₅₀ , m ³ /(h m ²)			
		0.6	1.2	2.4	3.6
EG	Reduit	1.74E-04	3.48E-04	6.96E-04	1.04E-03
	WC	7.10E-05	1.42E-04	2.84E-04	4.26E-04
	Wohnen	1.31E-03	2.62E-03	5.24E-03	7.86E-03
	Büro	3.79E-04	7.58E-04	1.52E-03	2.27E-03
Total EG		1.93E-03	3.87E-03	7.74E-03	1.16E-02
OG	Dusche	1.06E-04	2.12E-04	4.24E-04	6.36E-04
	WC	1.51E-04	3.02E-04	6.04E-04	9.06E-04
	Bad	3.28E-04	6.56E-04	1.31E-03	1.97E-03
	Ankleide	1.91E-04	3.82E-04	7.64E-04	1.15E-03
	Schlafen	5.73E-04	1.15E-03	2.29E-03	3.44E-03
	Korridor	2.66E-04	5.32E-04	1.06E-03	1.60E-03
	Zimmer 1	6.47E-04	1.29E-03	2.59E-03	3.88E-03
	Zimmer 2	6.47E-04	1.29E-03	2.59E-03	3.88E-03
Total OG		2.91E-03	5.81E-03	1.16E-02	1.75E-02

Leckageverteilung auf Süd- und Nordfassade		Äquivalente Leckagefläche, m ²			
		q ₅₀ , m ³ /(h m ²)			
		0.6	1.2	2.4	3.6
EG	Wohnen S	4.83E-04	9.66E-04	1.93E-03	2.90E-03
	Wohnen N	4.83E-04	9.66E-04	1.93E-03	2.90E-03
	Büro	4.83E-04	9.66E-04	1.93E-03	2.90E-03
	Total EG	1.93E-03	3.86E-03	7.73E-03	1.16E-02
OG	Zimmer 1 S	7.28E-04	1.46E-03	2.91E-03	4.37E-03
	Zimmer 2 S	7.28E-04	1.46E-03	2.91E-03	4.37E-03
	WC N	7.28E-04	1.46E-03	2.91E-03	4.37E-03
	Bad N	7.28E-04	1.15E-03	2.29E-03	3.44E-03
Total OG		2.91E-03	5.52E-03	1.10E-02	1.65E-02

Türen

Die einzelnen Räume sind mit Türen zum Korridor, Treppen- und Wohnbereich verbunden. Die Türen sind geschlossen, jedoch weisen sie je eine Leckagefläche von 0.01 m² auf, was deutlich grösser ist



als die einzelnen Leckagen. Somit ist die Durchströmung des Gebäudes infolge der Infiltration durch die externen Leckagen nicht behindert.

Winddruckbeiwerte

Als Winddruckbeiwerte werden die von IDA-ICE [7] bereitgestellten Werte für eine geschützte, halb-exponierte und exponierte Lage verwendet (Tabelle 10). Für eine sehr exponierte Lage werden Werte aus [8] übernommen.

Tabelle 10 Winddruckbeiwerte für verschieden exponierte Lagen.

Winddruckbeiwerte, -	Windrichtung relativ zur Fassade, ° (0°: Wind steht auf die Fassade)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
	geschlossene Ortschaft, geschützt [7]							
Nord/Süd	0.06	-0.12	-0.20	-0.38	-0.30	-0.38	-0.20	-0.12
Ost/West	0.20	0.05	-0.25	-0.30	-0.25	-0.30	-0.25	0.05
Dach	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
	geschlossene Ortschaft, halb exponiert [7]							
Nord/Süd	0.25	0.06	-0.35	-0.60	-0.50	-0.60	-0.35	0.06
Ost/West	0.40	0.10	-0.30	-0.35	-0.20	-0.35	-0.30	0.10
Dach	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
	geschlossene Ortschaft, exponiert [7]							
Nord/Süd	0.50	0.25	-0.50	-0.80	-0.70	-0.80	-0.50	0.25
Ost/West	0.70	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35
Dach	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
	geschlossene Ortschaft, sehr exponiert [8]							
Nord/Süd	1.00	0.85	-0.90	-0.82	-0.50	-0.82	-0.90	0.85
Ost/West	1.00	0.65	-0.63	-0.87	-0.75	-0.87	-0.63	0.65
Dach*	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20

*eigene Anpassung

Windprofil

Die Windgeschwindigkeit variiert mit der Höhe. Um Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen zu bestimmen, verwendet IDA-ICE [7] folgende Formel:

$$u(h) = u_{ref} \cdot A_o \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{A_1}$$

mit

$u(h)$ Windgeschwindigkeit in der Höhe h, m/s



u_{ref}	Windgeschwindigkeit in der Höhe h_{ref} (Klimastation), m/s
h	Höhe, m
h_{ref}	Referenzhöhe, i.d.R. 10 m (Klimastation)
A_0	Koeffizient, - (geschlossene Ortschaft: 0.65 [7])
A_1	Koeffizient, - (geschlossene Ortschaft: 0.25 [7])

Die Koeffizienten A_0 und A_1 hängen von der Umgebung des Gebäudes ab. Je offener die Umgebung ist, desto höher sind die Werte. In dieser Studie wird eine «geschlossenen Ortschaft» angenommen.

Interne Lasten

Die internen Standardlasten wurden gemäss SIA 2040:2015 [9] verwendet:

- Profil "1.2 Wohnen EFH": Wohnen (EG), Büro (EG), Treppe (EG), Schlafen (OG), Zimmer 1+2 (OG), Korridor (OG), Ankleide (OG)
- Profil "12.6 WC, Bad, Dusche": WC, Bad, Dusche: WC (EG), WC/Dusche (OG), Bad (OG)

Simulation

Es wird das Simulationsprogramm IDA-IC Version 4.8 verwendet [7]. Es werden 30 Tage Vorlaufzeit berücksichtigt, um das Modell einzuschwingen bevor die Jahressimulation beginnt.



Klima

Es werden das Normal- und Warmjahr für Zürich-Kloten aus SIA 2028:2015 verwendet. Die Jahresmitteltemperatur vom Warmjahr ist um 3.3 K höher als vom Normaljahr. Die Summe der Jahresglobalstrahlung ist im Warmjahr um 11% höher als vom Normaljahr. Die Hauptwindrichtung ist für beide Jahre WSW. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt im Normaljahr 2.4 ± 1.8 m/s und im Warmjahr 2.4 ± 2.1 m/s. Die maximale Windgeschwindigkeit ist im Normaljahr um 0.9 m/s höher als im Warmjahr.

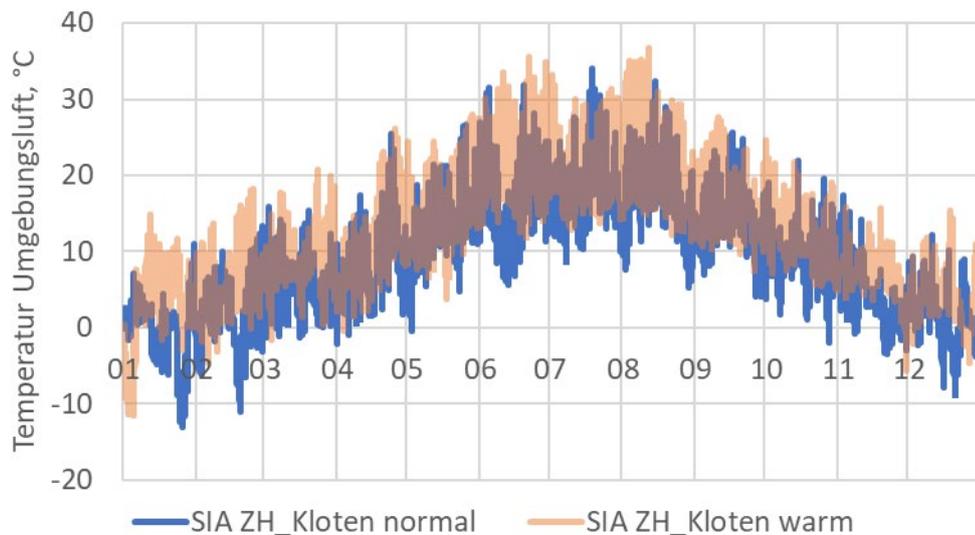


Bild 14 Umgebungslufttemperatur Zürich-Kloten (min/max/mittel: -13.1/-11.5, 34.1/36.8, 9.4/12.7°C)

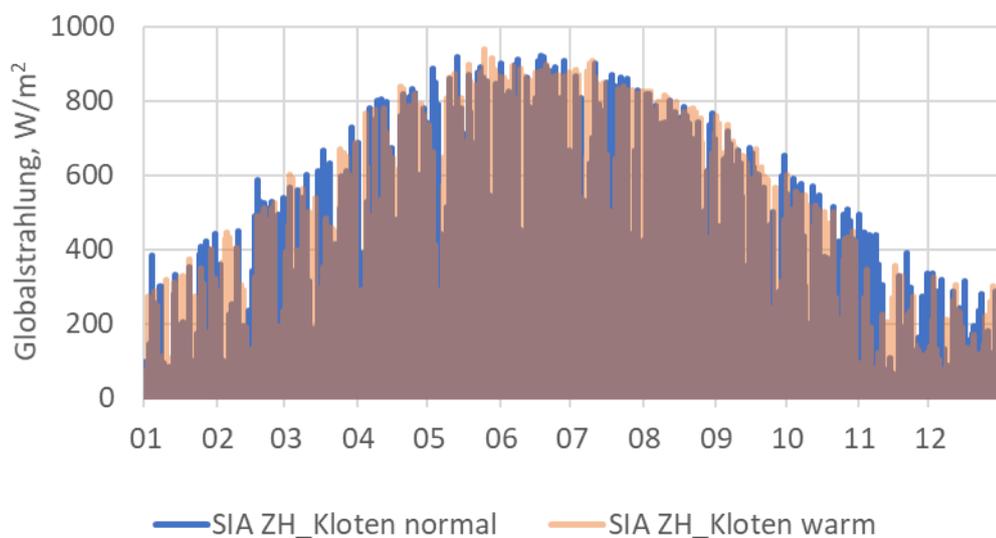


Bild 15 Einstrahlung Zürich-Kloten, Global horizontal (max/mittel: 920/120, 940/140 W/m², Summe: 1'105/1'229 kWh/(m² a)).

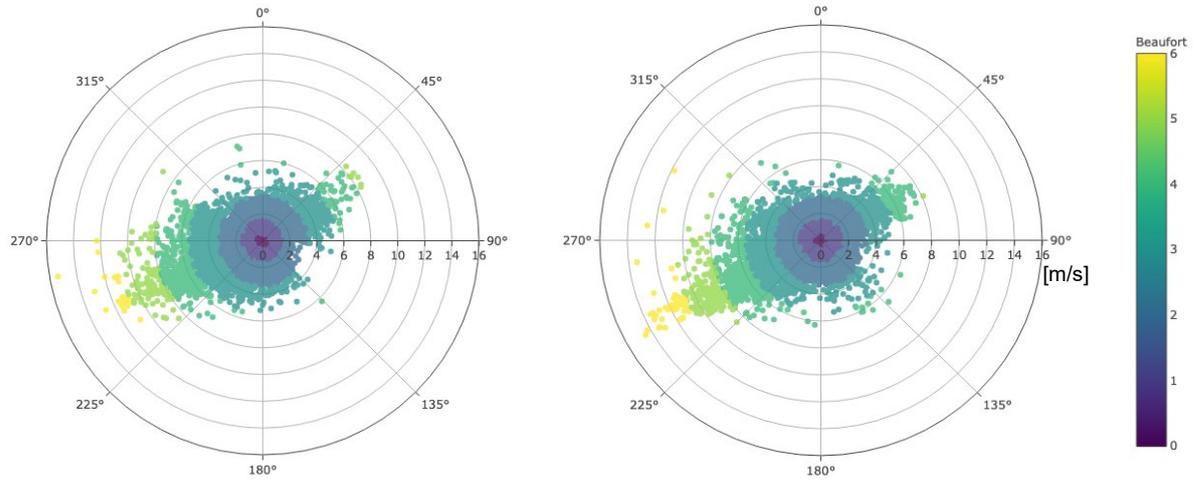


Bild 16 Windprofil (Geschwindigkeit und Richtung, 0° = Nord) Zürich-Kloten: rechts Normaljahr, links Warmjahr

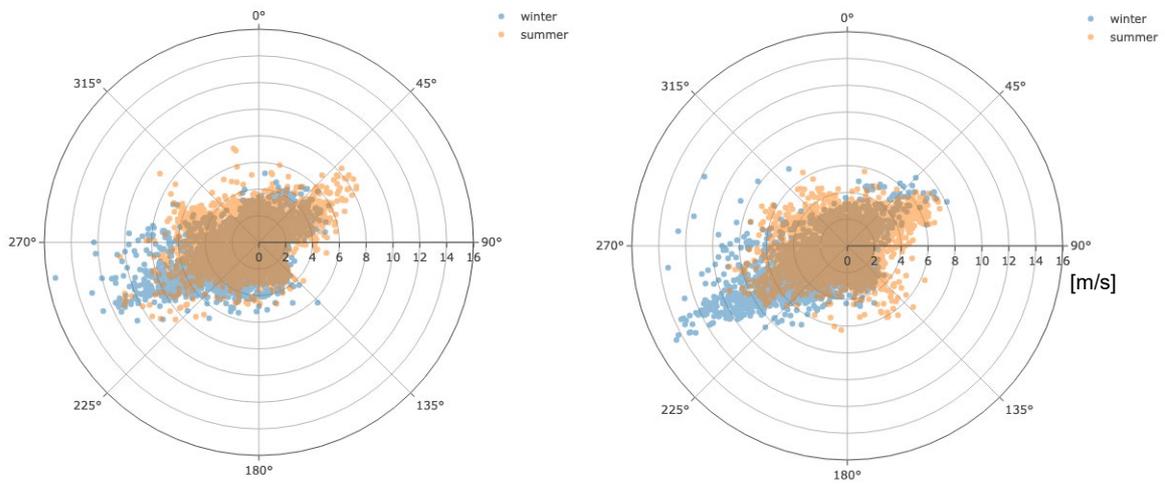


Bild 17 saisonale Windprofile (Geschwindigkeit und Richtung, 0° = Nord) Zürich-Kloten: rechts Normaljahr, links Warmjahr (Winter: 15.10. – 15.03.).