

## Warum stimmt das nie? - Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnen)

Hoffmann, Caroline (1), Geissler, Achim (1), Carisch, Lara (2)  
Kontaktperson: Hoffmann, Caroline, Institut Energie am Bau (1), Lemon Consult AG (2),  
(1): St. Jakob-Strasse 84, 4132 Muttenz, [caroline.hoffmann@fhnw.ch](mailto:caroline.hoffmann@fhnw.ch), [www.fhnw.ch](http://www.fhnw.ch)

### Zusammenfassung / Abstract

Bei der Energieanalyse von unsanierten Bestandsgebäuden wird typischerweise der Systemnachweis gemäss SIA 380/1 zur energetischen Einordnung des Gebäudes verwendet. Zusätzlich wird der Systemnachweis auch als Prognoseinstrument für den Heizwärmebedarf (Nutzenergie) und die Bewertung möglicher Sanierungsmassnahmen eingesetzt. Liegt das Berechnungsergebnis höher als die Verbrauchswerte, so kann dies dazu führen, dass unkorrekte Prognosen zur Einsparung gemacht werden.

Das vorliegende Paper zeigt auf, dass diese Abweichungen nicht einem einzigen systematischen Fehler zuzuordnen sind. Vielmehr ist es eine Vielzahl von Gründen, die zu den Abweichungen führt. Die Analyse wird anhand von 33 realen Gebäuden durchgeführt und durch eine Literaturrecherche ergänzt.

The calculation method SIA 380/1 is often used in order to assess the energy efficiency of existing buildings. However, quite often the calculated heating demand deviates from available consumption values. This paper shows that the main reason for such deviations is not a single, systematic fault of the underlying calculation procedure. It is demonstrated that there are a number of possible reasons for the deviation. The findings of this paper are based upon consumption data of 33 existing buildings, corresponding demand value calculations as well as a literature study.

## 1. Ausgangslage

Bei der Energieanalyse von unsanierten Bestandsgebäuden wird typischerweise der Systemnachweis gemäss SIA 380/1 [1] zur energetischen Einordnung des Gebäudes verwendet. Zusätzlich wird der Systemnachweis auch als Prognoseinstrument für den Heizwärmebedarf (Nutzenergie) und die Bewertung möglicher Sanierungsmassnahmen eingesetzt. Liegt das Berechnungsergebnis höher als die Verbrauchswerte, so kann dies dazu führen, dass unkorrekte Prognosen zur Einsparung gemacht werden. Planererfahrungen zeigen, dass bei unsanierten Bestandsgebäuden oftmals der berechnete Heizwärmebedarf (HWB) deutlich über dem gemessenen Heizwärmeverbrauch (HWV) liegt. Die Verfasser der SIA 380/1 sind sich dieser möglichen Abweichungen bewusst, so wird in den Abschnitten 0.3.2 und 0.3.8 empfohlen, bei Gebäudeerneuerungen einen Vergleich zwischen Berechnungs- und Messdaten durchzuführen und die Eingabedaten entsprechend anzupassen [1]. Die Beurteilung von Bestandsgebäuden mit dem Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK) erfolgt allerdings immer ohne Berücksichtigung objektspezifischer Nutzungs- oder Klimaeinflüsse.

Die Überschätzung des effektiven Heizenergieverbrauchs von unsanierten Bestandsgebäuden mit Wohnnutzung durch Bedarfsberechnungen ist kein Schweizer Phänomen: es lassen sich viele Studien im Ausland (Länder mit vergleichbaren Wintertemperaturen) finden, die ähnliche Tendenzen beschreiben (z.B. [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]).

Als Gründe werden hauptsächlich zu hohe Luftwechselraten ([3], [6], [4], [7], [8], [9]), Innenraumtemperaturen ([3], [6], [4], [8], [9]), Teilbeheizung der Wohnung ([4], [6], [8], [9]), fehlerhafte Abschätzung der U-Werte ([4], [7], [8], [9]), falsche Einschätzung von Wärmebrücken ([3], [4], [10]), falsche Flächenermittlung ([7], [8], [9]), unberücksichtigte Nachtabsenkung ([8], [9]), falsche Annahme der Verschattung ([8], [9]), falsche Einschätzung anlagentechnischer Daten ([8], [9]), falsche interne Wärmequellen ([8], [9]), Unstimmigkeiten beim Warmwasserverbrauch ([8], [9]) und die Luftdichtheit ([4]) angegeben. Dass die Abweichungen in der Mehrzahl auf Fehleinschätzungen bei der Berechnung des Bedarfs und bei der Bereinigung der Verbrauchswerte zurückgeführt werden können, belegt [11].

In der Literatur werden bei Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) Abweichungen ( $(\text{HWB}-\text{HWV})/\text{HWV}$ ) zwischen 36% [7], 25-41% (Dena Feldversuch zitiert in [12]), 50% [6], 18-105% [5], 36 und 95% [4] und 100% [2] angegeben. Die Werte gelten bei [7], [6], [4] für Endenergie, bei [2] für Primärenergie, bei [5] für Gas und sind bei [12] nicht definiert.

## 2. Vorgehen

### 2.1 Fragestellungen und Gebäude

Bezogen auf die Schweizer Berechnungssystematik ist zu klären, ob bei Bestandsgebäuden die Abweichungen zwischen berechnetem HWB und erfasstem Heizwärme- oder Endenergieverbrauch aufgrund des Berechnungsverfahrens auftreten, oder aufgrund der mangelhaften Berücksichtigung von nutzungsbedingten oder verlustbedingten Einflussfaktoren bedingt sind. Dazu wird eine Liste der möglichen Gründe für die Abweichungen aufgestellt (siehe Abschnitt 3.4). Die Fragen werden anhand von drei Gebäudegruppen beantwortet, für die mit unterschiedlich grossen Messdatenintervallen bzw. Ablesezeiträumen Verbrauchsdaten zur Verfügung stehen. Alle verwendeten Verbrauchsdaten sind bereinigt (Abzug Warmwasser, Wirkungsgrad Wärmeerzeugung, Leitungs-, bzw. Verteilverluste, Klimabereinigung). Bei den Gebäuden konzentrieren wir uns - mit Ausnahme von zwei Gebäuden - auf die Nutzung Wohnen. Die untersuchten Gebäude sind grossteils unsaniert (Ausnahme: teilweise Fensterersatz oder Dämmung von Einzelbauteilen). Ihre Bauweise ist schwer. Die drei Gebäudegruppen sind im Einzelnen:

- Feinanalyse (FA): Für zwei Gebäude (1 x MFH Wohnen, 1 x Büro) liegen detaillierte Messdaten von Mai 2015 (Luftqualität, Verschattung), bzw. Juni 2015 (Stromverbrauch Büro) bis April 2016 vor (z. B. Lufttemperatur innen, Benutzung Sonnenschutz, Luftwechsel, interne Lasten). Die mittleren U-Werte der Gebäude liegen bei 1.44 resp. 1.10 W/m<sup>2</sup>K. Zusätzlich zur Berechnung gem. SIA 380/1 gibt es Simulationsmodelle im Stundenverfahren. Die Gebäude stammen aus den Jahren 1894 (Wohnen) und 1951 (Büro).

- Grobanalyse 1 (GA1): Für 11 Gebäude (8 x MFH Wohnen, 2 x EFH Wohnen und 1 x Mischnutzung) sind monatliche Messdaten/Ablesedaten vorhanden, sowie Bedarfsberechnungen gem. SIA 380/1. Die mittleren U-Werte der Gebäude liegen zwischen minimal 0.66 W/(m<sup>2</sup>K) und maximal 2.5 W/(m<sup>2</sup>K). Der mittlere U-Wert aller Gebäude liegt bei 1.15 W/(m<sup>2</sup>K). Fünf der Gebäude wurden zwischen 1879 und 1935 erbaut, sechs der Gebäude zwischen 1951 und 1975.
- Grobanalyse 2 (GA2): Für 20 Gebäude (5 MFH Wohnen, 15 EFH Wohnen) liegen jährliche Ablesedaten, sowie GEAK Berechnungen vor. Fünf Gebäude wurden vor 1954 erbaut, zwei in den Jahren 1936-1950 und 13 in den Jahren 1951 bis 1988.

Die Verfolgung des realen Nutzerverhaltens in Bezug auf Bedienung Sonnenschutz und Fensteröffnung ist bewusst nicht Schwerpunkt des Projektes, dies betrifft speziell die Gruppen GA1 und GA2. Dafür gelten folgende Begründungen: Auch bei der Untersuchung einer grossen Anzahl von Gebäuden [4] liegt der Messwert unter dem berechneten Wert. Hier sollte sich der Nutzereinfluss statistisch aber ausgleichen. Genauer betrachtet wurde das Nutzerverhalten bei den beiden Gebäuden FA (siehe Abschnitt "Raumtemperatur, Sonnenschutz und interne Wärmeinträge"). Hieraus können Hinweise auf eine realistische Variationsbreite des Nutzerverhaltens gewonnen werden und darauf, wie sich die entsprechenden Parameter auf das Berechnungsergebnis auswirken.

## 2.2 Definitionen

Innerhalb des Projektes wird die Abweichung wie folgt definiert:

$$\text{Abweichung (A)} = \frac{(\text{Heizwärmebedarf (HWB)} - \text{Heizwärmeverbrauch (HWV)})}{\text{HWV}} 100 \text{ [\%]}$$

Da sowohl die Berechnung des HWB als auch die Ermittlung der Verbrauchswerte (Bereinigung) mit Unsicherheiten behaftet sind, werden in dieser Studie nur Abweichungen von  $\geq$ , bzw.  $\leq \pm 15\%$  als "massgebende Abweichung" bewertet.

Abweichend von den Vorgaben der Schweizer Normen wird beim Energieverbrauch und Bedarf immer das Jahr (365 Tage) als Bezugsgrösse angegeben. Da im Text zum Teil unterschiedliche Flächenbezüge existieren, werden die Bezugsflächen - sofern erforderlich - als Indices genannt. Beides ist nicht normgerecht, dient aber der Verständlichkeit.

## 3. Resultate

### 3.3 Verbrauchs- und Bedarfsdaten Gebäude

In Abbildung 1 ist die Abweichung der Gebäude mit den stündlichen Messdaten (FA) und diejenigen mit den monatlichen Messdaten (GA1) dargestellt.

Es wird deutlich, dass von den 13 Gebäuden 6 die Prognose der SIA 380/1 überschreiten. Die Abweichungen liegen für MFH zwischen +49 und +72%. Sehr hohe Überschreitungen weisen die beiden (freistehenden) EFH und das Büro auf: 74 bis 163%. Drei Gebäude, von denen zwei teilsaniert sind und relativ tiefe mittlere (BS\_02: 0.84 W/(m<sup>2</sup>K), RE\_01: 0.66 W/(m<sup>2</sup>K) U-Werte aufweisen, verbrauchen mehr Heizwärme als berechnet (zwischen -18 und -22 %). Bei vier Gebäuden stimmen HWB und HWV hinreichend überein (-9% bis +10%).

Aus der Gruppe mit den jährlichen Daten (GA2) überschreitet die Berechnung den Messwert bei 14 Gebäuden (Abweichung zwischen +17 und +167 %). Bei 6 Gebäuden stimmen HWB und HWV genügend gut überein (-5% bis -14%).

Der HWV (exkl. WW) aus allen 17 EFH (GA1 und GA2) liegt im Mittel bei 96.8 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a), der Mittelwert für die 14 MFH (FA, GA1 und GA2) liegt bei 74.4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a).

Der mittlere Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung für die 11 Wohngebäude (FA, GA1) beträgt 24.1 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a). Dabei wurde bei 5 Gebäuden gemessen, bei den anderen 6 Gebäuden

wurde der Standardwert gem. SIA 380/1 verwendet. Der Mittelwert nur für die gemessenen Gebäude liegt bei 29.4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a), die Einzelwerte weichen stark voneinander ab.

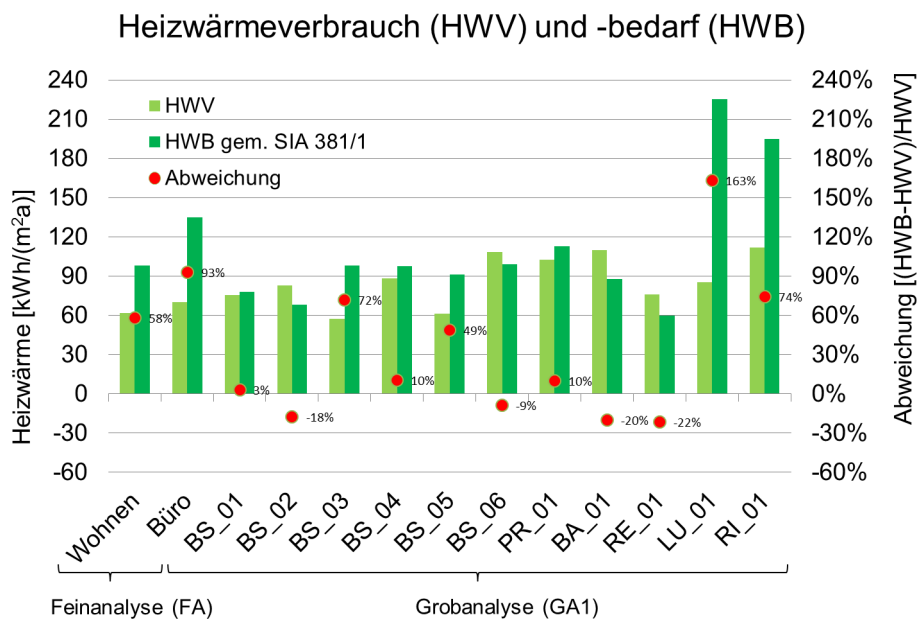


Abbildung 1: HWV und HWB (gem. SIA 380/1) für die beiden Gebäudegruppen FA und GA1. MFH: "Wohnen", BS\_01, BS\_02, BS\_03, BS\_04, BS\_05, PR\_01, BA\_01 und RE\_01. Das Gebäude BS\_06 umfasst eine Mischnutzung mit Verkauf, Büro und Wohnen. EFH: LU\_01 und RI\_01. Flächenbezug: Energiebezugsfläche, EBF, gem. [13]

### 3.4 Gründe für die Abweichung

Tabelle 1 zeigt die möglichen Ursachen für eine Abweichung der realen Verbräuche von der Berechnung SIA 380/1. Es ist auch aufgeführt, ob die Frage anhand von Gebäudedaten oder einer Literaturrecherche beantwortet wird. Im Verlauf der Analyse konnte eine (qualitative) Eingrenzung vorgenommen werden, wie wichtig der jeweilige Faktor für die Abweichung ist. Je wichtiger der Faktor ist, desto dunkler ist in Tabelle 1 die Färbung. Im weiteren Text werden nur die einflussreichen Faktoren behandelt.

**Tabelle 1:** Übersicht zu den untersuchten Fragestellungen und ob diese mittels Feinanalyse, Grobanalyse oder Literaturrecherche beantwortet wurden.  
**Legende:** ↑, ↓ = geringer Einfluss, HWB steigt/sinkt um <4.9%; ↑, ↓ mittlerer Einfluss HWB steigt/sinkt um >5.0 bis <9.9%; ↑↑, ↓↓ = hoher Einfluss, HWB steigt/sinkt um > 10%  
Für die Untersuchung wurde meist die Standardberechnung mit der um den fraglichen Parameter veränderten Variante verglichen.  
Ablesebeispiel "Zu tiefe interne Lasten": Die Tatsache, dass bei Bestandsgebäuden, speziell EFH, die Wärmeeinträge eher zu tief eingeschätzt werden, hat einen geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse und führt dazu, dass der HWB etwas zu hoch ist (und den HWV übersteigt).

		Feinanalyse, stündliche Messdaten	Grobanalyse, monatliche Messdaten, sonstige Messungen	Literaturrecherche
Berechnungs- verfahren	Dynamische Simulation statt Berechnung im Monatsverfahren			↓↑
	Berechnung im Stundenverfahren statt Monatsverfahren	↓		↓↑
	Vergleich SIA 380/1:1988 und SIA 380/1:2009		↑↑↓↓	
	Annahme zu geringe Speichermassen		↓	
Nutzungs- bedingte Einfluss- faktoren	Fehlende Berücksichtigung einer Teilbeheizung	↓↓	↓↓	
	Berücksichtigung der effektiven mittleren Raumtemperatur	↑↑	↑↑	
	Berücksichtigung Nachtabsenkung		↓↓	
	Zu tiefe interne Lasten	↓	↓	
	Berücksichtigung der Lüftungsverluste	↓	↓↓	
	Fehlerhafte solare Wärmeeinträge durch "falsche" Eingabe g-Wert	↑		
	Nutzereinfluss	↑↑		
Verlust- bedingte Einfluss- faktoren	Zu "schlechte" U-Werte für bestehende Bauteile als Eingabe?	↓↓	↓	
	Wärmebrücken zu hoch eingeschätzt		↓↓	
	Zu tiefe Temperaturen für Keller angenommen	↓↓	↓↓	
	Keine Berücksichtigung des lokalen und auf das Messjahr bezogene Klimas	↓↓	↑↑↓↓	
	Vernachlässigung der Solargewinne durch opake Bauteile im Berechnungsverfahren	↓		

### Vergleich dynamische Simulation versus Berechnung im Stundenverfahren und Monatsverfahren

Grundsätzlich kann das thermische Verhalten eines Gebäudes auf drei Arten berechnet werden (Benennung gem. [14]):

- 1) "Ausführliches Simulationsverfahren" z. B. thermische Simulation mit TRNSYS [15], ESP-r [16], IDA ICE [17] oder ähnlichen Programmen
- 2) "Vereinfachtes Stundenverfahren" gem. EN ISO 13790:2008 [18], z. B. Berechnungen gem. SIA 382/2 [19]
- 3) "Quasi-stationäres Monatsbilanzverfahren" gem. EN ISO 13790:2008, z. B. Berechnungen gem. SIA 380/1 [1]

1) und 2) sind dynamische Simulationsverfahren. Am grössten sind vom Berechnungsverfahren her die Abweichungen von 2) und 3) zum ausführlichen Verfahren 1) und hier insbesondere bei den zeitlichen Verläufen. Dies lässt sich einerseits durch die Unterschiede in der Berechnungssystematik erklären und andererseits auch durch die differenzierteren Eingabemöglichkeiten in der thermischen Simulation wie z. B. genauere Modelle für die Bedienung des Sonnenschutzes und die Fensteröffnung.

Nachfolgend wird die Veränderung des HWB auf das Jahresergebnis hin betrachtet. In [20] wird das Monatsbilanzverfahren gem. ISO 13790 mit dem ausführlichen Simulationsverfahren (Programm: TRNSYS) für ein Gebäude verglichen. Der HWB des Monatsbilanzverfahrens liegt 12 % unter der ausführlichen Simulation. In [21] wird ein Vergleich zwischen dem ausführlichen Simulationsverfahren, dem Stundenverfahren und dem Monatsverfahren vorgenommen. Die Abweichungen des HWB der Verfahren bezogen auf die Simulation bleiben bei  $\pm 10\%$ . Ein Vergleich zwischen einer ausführlichen Simulation (HELIOS-XP [22]) und Berechnungen gem. SIA 380/1:2009 zeigt für ein Wohngebäude der Baualtersklasse 1950-1980 an drei Klimastandorten ohne Einsatz eines Sonnenschutzes Abweichungen von bis zu  $\pm 10\%$  [23]. Eigene Untersuchungen zeigen, dass bei zwei Gebäuden (FA) zwischen Monatsverfahren und Stundenverfahren ein Unterschied zwischen -6 und -7% auftritt (Basis des Vergleichs: Monatsverfahren).

### **Version SIA 380/1:1988 verglichen mit SIA 380/1:2009**

Der Vergleich der Normen SIA 380/1:1988 [24] und SIA 380/1:2009 zeigt, dass grosse Differenzen in den folgenden Bereichen liegen:

- **Transmissionsverluste:** In SIA 380/1:2009 werden strengere b-Faktoren verwendet. SIA 380/1:1988 sieht für Kellergeschosse mit ungedämmter Decke eine Temperatur von 12°C vor. Berechnet man die b-Faktoren und die entsprechende Kellertemperatur gem. ISO 13789:2007 [18] für ein typisches Bestands-MFH (PR\_01), so ergeben sich Kellertemperaturen von ca. 8-9°C. Messungen für ein EFH zeigten minimale Temperaturen von ca. 13°C (siehe Abschnitt "Zu tiefe Temperaturen für Keller angenommen"). Wärmebrücken müssen gemäss SIA 380/1:2009 erfasst werden, in SIA 380/1:1988 waren "unvermeidbare" Wärmebrücken über einen Zuschlag auf den U-Wert (damals k-Wert) zu erfassen [25]. Nach dem Stand der Praxis war die Berücksichtigung eines solchen Zuschlags wohl eher nicht die Regel.
- **Solare Gewinne:** Hier sind die Verschattungsfaktoren gem. SIA 380/1:2009 strenger, dies trifft insbesondere auf Südfassaden mit Balkonen zu. Der verwendete Ausnutzungsfaktor ist in SIA 380/1:2009 im Vergleich zur alten Norm anders ermittelt und in Summe höher.

Bezogen auf das Projekt kommt es bei vier untersuchten Gebäuden (GA1) bei Verwendung von SIA 380/1:1988 zu Abweichungen zwischen -12% und +7% (Basis SIA 380/1:2009).

### **Berücksichtigung Teilbeheizung, effektive mittlere Raumtemperatur und Nachtabenkung**

Um den Einfluss der Teilbeheizung, der effektiven mittleren Raumtemperatur sowie der Nachtabenkung auf den HWB zu untersuchen, wurden für die Gebäude der FA und GA1 nachstehend definierte Standardwerte aus der Literatur für die entsprechenden Gebäudetypen (EFH, MFH) und Baualtersklassen eingesetzt [26]. Es zeigt sich, dass alle drei Bereiche einen grossen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben.

- **Teilbeheizung**  
Literatur: Gem. [27] ist davon auszugehen, dass bei Bestandsgebäuden mit einer schlecht gedämmten Hülle das Nichtbeheizen von einzelnen Räumen eine grosse Auswirkung auf den HWB hat. Bei 50% nichtbeheizter Fläche verringert sich der HWB um ca. 20%. Die Wirksamkeit der Teilbeheizung ist von der Wohnfläche abhängig. Gem. [26] wird bei EFH eine Wohnfläche ( $WF$ ) von  $150 \text{ m}^2_{WF}$  angenommen (entspricht gem. [28] ca.  $210 \text{ m}^2_{EBF}$ , für Definitionen siehe Abbildung 5) und von 41% unbeheizter Fläche ausgegangen. Bei MFH wird bei einer  $WF$  von  $50 \text{ m}^2_{WF}$  (ca.  $85 \text{ m}^2_{EBF}$ ) von 9 % unbeheizter Fläche ausgegangen.  
Projekt: Es wurden Minderungsfaktoren gem. [26] verwendet. Bei zwei EFH (GA1) liegt die Senkung zwischen -19 und -21% (nicht beheizte Fläche 43%), bei 2 MFH (GA1) bei -1% (nicht beheizte Fläche: 9%).
- **Mittlere Raumtemperatur:**  
Literatur: Es kann die Tendenz verzeichnet werden, dass bei älteren, unsanierten Wohnbauten (erbaut vor 1977) die mittlere Raumtemperatur tiefer ist, als bei Neubauten (erbaut ab 2002) [29]. Die Medianwerte lagen in beheizten Räumen zwischen 19.2°C und 19.8°C. In [30] werden für 70 Gebäude mit Baujahr ab 2000 Mittelwerte von 20°C angegeben, in [31] werden für ca. 70 Neubauten 21°C angegeben. In 124 Reihenhäusern (Baujahr 70er

Jahre) wurden in den Wohnräumen im Mittel 21°C gemessen (in den Schlafräumen 17°C) [32]. Gemäss [33] steigert jedes Grad mehr Raumtemperatur den Endenergieverbrauch um 6 % (ob hier das Warmwasser herausgerechnet wurde ist unklar). Eine andere Quelle [30] gibt eine Spannweite von 10-20% an. Der absolute Mehrverbrauch wird mit zunehmender energetischer Gebäudequalität immer kleiner, der relative Einfluss nimmt dagegen zu. **Projekt:** Im Rahmen unserer Studie betrug die gemessene Raumtemperatur in den beheizten Räumen bei zwei Gebäuden (FA) im Mittel 21°C (im Büro mit Nachtabsenkung). In den Berechnungen bewirkt eine Temperatursteigerung um 1°K einen Mehrverbrauch zwischen 10 und 12% (1 Gebäude FA, 4 Gebäude GA1). Von der Grössenordnung her deckt sich dies mit der Literatur (siehe oben).

- **Nachtabsenkung**

**Literatur:** Je schlechter die Gebäudehülle gedämmt ist, desto wirksamer ist eine Nachtabsenkung. Den in [26] vorgeschlagenen Faktoren liegt eine Nachtabsenkung der Raumtemperatur auf 15°C während 8 Stunden zu Grunde [27]. Diese Annahmen sind plausibel: für Wohngebäude, die vor 1990 erbaut wurden, empfiehlt [33] eine Absenkttemperatur von 16°C, als Zeitraum für die Absenkung 1 Stunde vor der Nachtruhe bis eine Stunde vor dem Aufstehen.

**Projekt:** Bezogen auf das Projekt bewirkt bei vier Gebäuden (GA1) eine Nachtabsenkung eine Minderung des HWB zwischen -9 und -12%.

Bei einer Kombination der drei Faktoren können sich die Werte teilweise gegenseitig aufheben.

### **Berücksichtigung von Lüftungswärmeverlusten**

Eine Literaturlauswertung zeigt, dass die Messwerte zum Luftwechsel von Wohngebäuden mit Fensterlüftung im Bereich zwischen 0.25 1/h und 0.66 1/h liegen (Messungen aus Literatur: [34], [35], [36], [36], [37], [38], [39], [40], [41]). Die Vorgabe der SIA 380/1:2009 für die Wohnnutzung liegt bei 0.29 1/h (berechnet aus Aussenluftvolumenstrom 0.7 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> h) und Annahme Raumhöhe 2.4 m). Dies ist ein eher tiefer Wert, der im Vergleich zur SIA 380/1:1988 (EFH: 0.4 1/h, MFH 0.6 1/h) reduziert wurde. Die Halbierung des normativen Aussenluftvolumenstroms reduziert den Bedarf zwischen -8 und -15%. Eine Verdoppelung erhöht den Bedarf zwischen +19 und +30% (4 Gebäude, GA1). Bei zwei Gebäuden (FA) liegt der aufgrund Personenpräsenz und CO<sub>2</sub>-Konzentration ermittelte Aussenluftvolumenstrom durch Fensterlüftung und Infiltration im Mittel bei 0.4 und 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h).

### **Raumtemperatur, Sonnenschutz und interne Wärmeeinträge**

Für die zwei Gebäude FA wird die mittlere Raumtemperatur aus den Messungen abgeleitet. Wird die Raumtemperatur um 1 K erhöht, sowie die Betätigung des Sonnenschutzes, die tieferen internen Wärmeeinträge und die Fensterlüftung berücksichtigt, so erhöht sich der HWB im Vergleich zur Berechnung mit Standarddaten zwischen +11 und +13%.

### **Zu "schlechte" U-Werte für bestehende Bauteile als Eingabe**

#### *Äusserer Wärmeübergangskoeffizient*

Tabelle 2 zeigt Mess- und Berechnungsergebnisse für Wärmeübergangskoeffizienten. Dass die normativen Wärmeübergangskoeffizienten sehr "konservativ" sind, zeigen Simulationen, die den Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Anströmwinkel berechnen [42]. Dem normativ vorgesehene Wärmeübergangskoeffizienten von 25 W/(m<sup>2</sup> K) liegt als Annahme eine Windgeschwindigkeit von 4 m/s zu Grunde [43]. Zum Vergleich: die mittlere Windgeschwindigkeit für das DRY Zürich [44] ist während der Heizperiode (15.10 - 15.04.) zu 10% > 6m/s, zu 19% > 3 m/s - < 5.9 m/s und 71% < 3.0 m/s.

Tabelle 2: Übersicht über normative und gemessene, bzw. simulierte Wärmeübergangskoeffizienten  
 Verwendete Abkürzungen;  $h_i$  = Wärmeübergangskoeffizient innen,  $h_e$  = Wärmeübergangskoeffizient aussen,  $v$  = Windgeschwindigkeit

	Quelle [-]	$h_i$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$h_e$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$v$ [m/s]
SN EN ISO 6946:2007	[43]	7.7	25	4
SN EN ISO 6946:2007	[43]	7.7	12.5	1
Messung: 6 Konstruktionen	[45]	5.6	4.0	diverse
Simulation: Anströmwinkel Fassade 0 bis 90°	[42]	-	15-17.5	4

### U-Werte

In der Literatur gibt es wenige vergleichende Veröffentlichungen zwischen Messungen und Berechnungen des U-Wertes. In der in [45] beschriebenen Untersuchung ergaben sich für sechs gemessene Konstruktionen (MW), die mit Typologiewerten (TW) verglichen wurden, Abweichungen zwischen 55 und 75 % ((TW - MW)/ MW).

Im hier vorgestellten Projekt werden die U-Werte von neun Bestands-Konstruktionen gemessen und diese jeweils von zehn GEAK-Experten berechnet (Informationen dazu siehe Text Abbildung 2). Bei sieben Konstruktionen liegen die berechneten U-Werte über den gemessenen. Die Abweichungen der Messwerte von den Mittelwerten aus den Berechnungen (B) liegen zwischen 12 und 111 % ((B - MW)/ MW). Auf 95%-Basis ist die Abweichung zwischen dem Messwert und dem Mittelwert der Berechnung allerdings nur bei zwei U-Werten signifikant. Aus den Messungen lässt sich die Annahme ableiten, dass die U-Werte bei ungedämmten Bestandskonstruktionen eher höher (d. h. schlechter) angenommen werden, als sie es in der Realität sind.

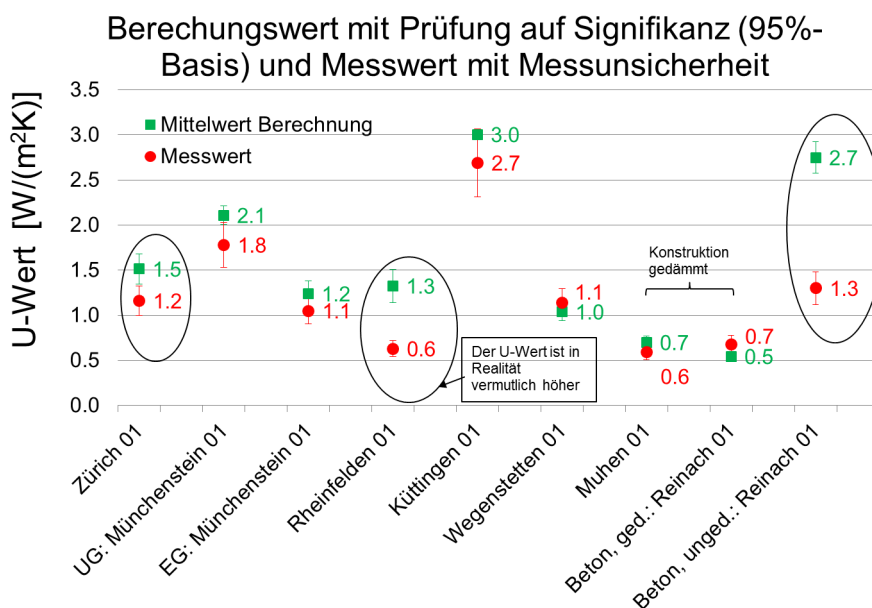


Abbildung 2: Gemessene und berechnete U-Werte von neun Konstruktionen von Bestandsgebäuden. Die U-Werte wurden im Zeitraum Januar – Februar 2016 gemessen. Die Messdauer betrug jeweils mindestens 72 h. Verwendet wurde das U-Wert-KIT gSKIN der Firma GreenTEG. Messunsicherheit: 14% (Auskunft GreenTEG), nach Auffassung der Autoren ist sie eher höher. Die U-Wert Berechnungen wurden von 10 GEAK Experten erstellt, die die Konstruktion kannten (Fotos Situation, Pläne und Angaben Schichtaufbau). Die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe wurde nicht vorgegeben und die Messergebnisse waren den Experten nicht bekannt.

Bei zwei Gebäuden (FA) werden die gemessenen, tieferen U-Werte in die Berechnung eingesetzt. Es ergibt sich eine Reduktion des HWB von -10, bzw. -16%.

Bei der GA1 liegen nur bei einem Objekt Messungen der U-Werte vor. Als Annäherung wird die Anpassung der U-Werte über den Wärmeübergangskoeffizienten aussen ( $h_e$ ) gewählt: Bezogen auf den mittleren U-Wert der 11 Gebäude bringt eine Anpassung von  $h_e$  auf eine

Windgeschwindigkeit von 1.0 m/s (siehe Tabelle 2) eine Verbesserung der U-Werte um 5% im Mittel. Wird also angenommen, dass sich die U-Werte der Gebäudehülle bei allen Gebäuden um 5% verbessern so verringert sich der HWB zwischen -4 und -6%.

### Wärmebrücken zu hoch eingeschätzt?

Aufgrund der schlechter gedämmten thermischen Gebäudehülle fallen bei Altbauten Wärmebrücken in der Regel weniger stark ins Gewicht. In der Literatur wird der Wärmebrückenanteil bei den Transmissionsverlusten von Bestandsgebäuden mit Werten zwischen 10% (Bauten vor 1950) [46], 15 % (Bauten der 80er Jahre) [47] und 20% [48] angegeben. In [49] wird eine Spanne von 10 - 20% für mässige Detailausbildung und 30% für ungünstige Fälle veranschlagt. Für die Gebäude GA1 liegt der Anteil zwischen 3 und 22%. Lässt man die Wärmebrücken in der Berechnung ausser Acht, so ergeben sich um -1 bis -19% tiefere HWB-Werte.

### Zu tiefe Temperaturen für Keller angenommen (b-Werte)

In fünf Kellern wurde im Winter 2015/16 die Kellertemperatur gemessen (Abbildung 3). Die Kellertemperaturen liegen minimal bei 14°C und maximal bei 21°C. Die Aussentemperatur lag in diesem Zeitraum im Wochenmittel zwischen -0.8 und 11.8 °C. Die gem. SN EN ISO 13789 [18] berechneten Kellertemperaturen sind mit 4.2 bis 13.8°C deutlich tiefer. Insgesamt liegen die Messwerte zwischen 2.3 und 5.0 K auseinander. Ohne das Gebäude "Reinach 01" beträgt der Abstand 0.5 K bis 2.5 K. Dies lässt den Schluss zu, dass die Kellertemperaturen der zufällig ausgewählten Gebäude ähnlich sind. Kritisch anzumerken ist allerdings, dass der Messwinter mild war und die Kellertemperatur im März noch sinken kann. In einem weiteren Gebäude wurde in den Wintern 2012 - 2015 zeitweilig gemessen. Im Mittel (pro 2-4 wöchiger Messperiode) betrug die Temperatur im Keller zwischen 13.1 und 19.9 °C. Das entsprechende Mittel der Aussentemperatur lag zwischen 1.4 und 13.8°C. Fasst man alle Messungen zusammen, so liegt die minimale Kellertemperatur bei 13°C. Dies entspricht einem b-Wert von ca. 0.5.

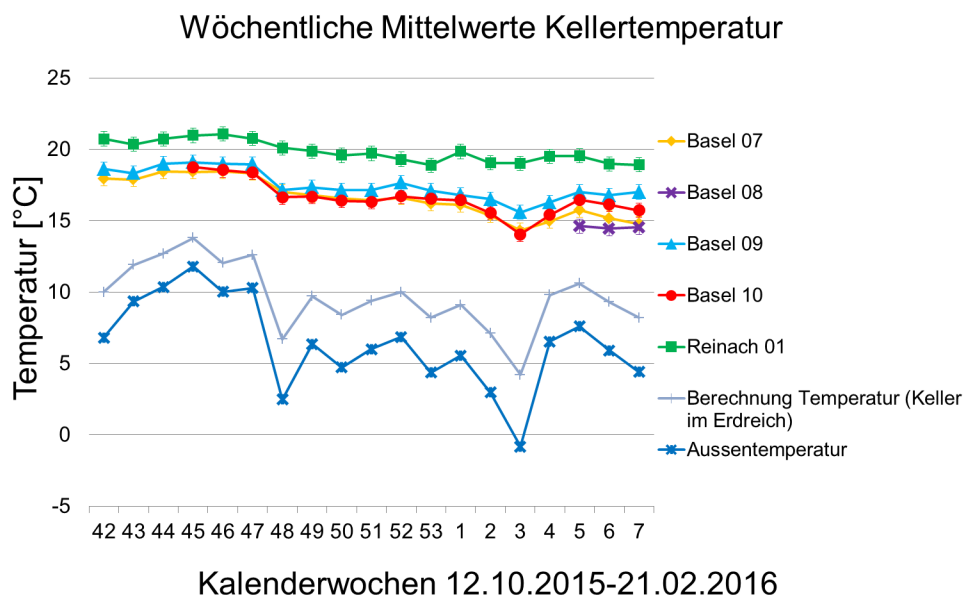


Abbildung 3: Gemessene Kellertemperaturen vom 12.10.-21.02.2016. Messgerät: Testo Logger 175-H2. Messzyklus alle 60 Minuten. Genauigkeit Geräte:  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Die Messungen wurden in fünf Bestandsgebäuden mit ungedämmter Kellerdecke durchgeführt. Das Gebäude Reinach 01 hat einen Heizungskeller, der viel Wärme an die umliegenden Räume abgibt. Gemessen wurde im Raum neben dem Heizungskeller. Berechnung Kellertemperatur für Keller im Erdreich für ein typisches Bestands MFH (PR\_01) gem. SN EN ISO 13798:2007 [18]

Werden bei vier Gebäuden (GA1) die Kellerdecken mit einem b-Faktor von 0.5 beaufschlagt, so ergeben sich Minderungen des HWB zwischen -2 und -12%. Bei den Gebäuden der Feinanalyse beträgt die Reduktion -5 bzw. -10%.

Bei den Gebäuden FA liegt der anhand der gemessenen mittleren Kellertemperatur ermittelte b-Wert der Kellerdecke im Bereich von 0.15 bis 0.25. Die Reduktion des HWB wäre also nochmals höher.

### Keine Berücksichtigung des lokalen und des auf das Messjahr bezogenen Klimas

Messwerte, bzw. abgelesene Werte des Heizwärmeverbrauchs werden immer mit der Einwirkung realer Klimadaten erfasst. Um den temperaturbedingten Mehr- oder Minderverbrauch im Vergleich zu den Standard-Klimadaten berechnen zu können, wird die Heizgradtagsbereinigung angewendet. Diese berücksichtigt allerdings nicht die Strahlung und das lokale Klima (z. B: Hitzeinselphänomen in Städten).

Für die beiden Gebäude der FA wird die Bedarfsberechnung mit den Klimadaten (Station SMA Zürich) für 2015 durchgeführt. Weiter wird berücksichtigt, dass der Standort der beiden Gebäude in Zürich bei autochtonen Wetterlagen eine Temperaturerhöhung gegenüber der Messstation aufweist (vereinfachte Annahme ganzjährig +2°C) [50]. Damit sinkt der HWB um -26, bzw. -47%.

Bei den Gebäuden GA1 werden die realen Klimadaten für drei Gebäude mit Standort Basel für die Jahre 2011/12, 2012/13, 2013/14 (Juli - Juni) verwendet. In Abhängigkeit von dem jeweils betrachteten Jahr sinkt bzw. steigt der HWB im Mittel zwischen -7%, +6% und -17%. Dieses Verhalten lässt sich anhand von den mittleren Aussentemperaturen für die jeweilige Heizperiode (Oktober - April) nachvollziehen. Hier weichen die mittleren Temperaturen von den Standard-Klimadaten um +5%, -7% und +30% ab.

Die Korrektur der Klimadaten bringt eine deutliche Annäherung an den HWV, kann aber nicht die gesamte Abweichung überbrücken.

### 3.5 Angleichung der Berechnung an die Messdaten

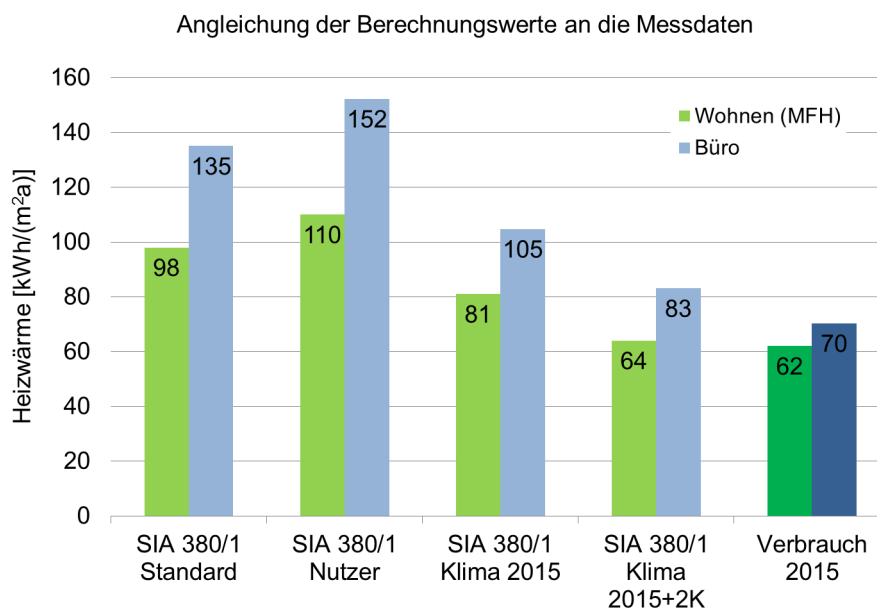


Abbildung 4: Angleichung der Berechnungswerte an die Messdaten Gebäude FA, Rechnung nach SIA 380/1:  
 Verwendete Abkürzungen:  
 "Standard": Berechnung gem. Standardnutzungen SIA 380/1  
 "Nutzer": Durch das Nutzerverhalten bedingte Änderungen der Parameter Raumtemperatur, interne Wärmegevinne, Aussenluftwechsel. Kommentare zum Nutzer Wohngebäude: Raumtemperatur 21°C, Stromverbrauch 77% geringer als Standardeingabe, Aussenluftwechsel 42% tiefer als Standardeingabe, Bedienung Sonnenschutz berücksichtigt (Minderung g-Wert um 0%, da die Klappläden nie geschlossen werden), Personenfläche 62% höher als Standardeingabe  
 Kommentare zum Nutzer Bürogebäude:  
 Nutzer: Raumtemperatur 21°C, Elektroverbrauch 20% höher als Standardeingabe, Aussenluftwechsel 28% tiefer als Standardeingabe, Personenfläche 45% höher als Standardeingabe  
 "Klima 2015": Temperaturen Keller 16°C Winter, Sommer 20°C, gemessene (tiefere) U-Werte verwendet, Klimadaten 2015 für Zürich  
 "Klima 2015+2K": Berücksichtigung tiefere Höhenlage Standort Gebäude und höhere Aussentemperatur (gemessen +2°C gegenüber Klimastation Meteo-Schweiz)

Für den Angleich der Berechnung an die Messdaten sieht SIA 380/1:2009 (Abschnitt 0.3.2) die Verwendung der Klimadaten für die Messperiode und bestbekannte Werte für den Standort vor, sowie bei der Nutzung die bestbekannten Werte für das Objekt.

Abbildung 4 zeigt den Angleich des HWB an die Messdaten für zwei Gebäude (FA). Eine Berücksichtigung des realen Nutzerverhaltens (Variante "Nutzer") bewirkt zunächst ein Ansteigen des HWB zwischen 11 und 13% (SIA 380/1). Massgebend dabei sind höhere Raumtemperaturen und tiefere interne Wärmeeinträge. Erst die Verwendung der Klimadaten für die Messperiode inkl. Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse sowie die Verringerung der Transmissionsverluste (Kellertemperaturen und U-Werte) bewirkt eine massgebende Annäherung an den HWV.

## 4. Diskussion

### 4.1 Einordnung Verbrauch Gebäude

Die meisten Verbrauchswerte in der Literatur werden als Endenergieverbrauch für Heizwärme und Warmwasser angegeben. Daher wird im folgenden Vergleich für die Gebäude des Projektes der HWV inkl. WW auf Stufe Endenergie angegeben. Dieser liegt bei allen 17 EFH im Mittel bei 112.4 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a), der Mittelwert für die 14 MFH liegt bei 93.8 kWh/(m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> a). Abbildung 5 zeigt Vergleichsdaten aus der Literatur.

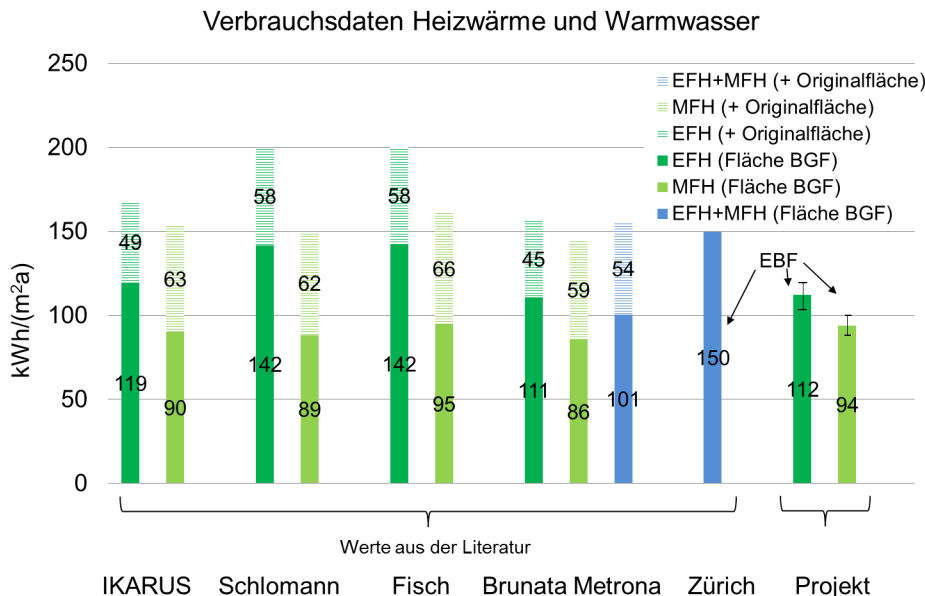


Abbildung 5: Verbrauchskennwerte aus der Literatur für Wohngebäude. Flächenbezug: Die Daten haben unterschiedliche Flächenbezüge. Die Vollfarbe des Balkens zeigt - wenn nicht anders ausgewiesen - jeweils die Daten, welche mit Korrekturfaktoren gem. [28] auf die Bruttogrundfläche, BGF (Definition siehe [28]) umgerechnet wurden. Die BGF entspricht in etwa der Geschossfläche, GF, gem. [13]. Die EBF ist etwas niedriger als die GF. Bemerkungen zur Datenherkunft:  
 "IKARUS" Daten aus [55] (Studie, zitiert in [56]): Daten sind auf der Basis von Annahmen zu den Bauteilen mit bestimmten thermischen Eigenschaften berechnet und abgeglichen. Datenangabe für Baualtersklassen, Angabe hier: flächengewichtetes Mittel alle Gebäude vor 1990. Flächenbezug: Wohnfläche  
 "Schlomann" [57]: Befragungsergebnisse von ca. 20'200 Haushalten. Datenangabe für Baualtersklassen, Angabe hier: flächengewichtetes Mittel alle Gebäude vor 1990. Flächenbezug: Wohnfläche.  
 "Fisch" [58]: Wärmeverbrauchskennzahlen von etwa unsanierten 64'000 Gebäuden aus der Ausstellung von Verbrauchsausweisen der Jahre 2003 bis 2007 ausgewertet worden. Werte bezogen auf Gebäudenutzfläche, umgerechnet auf Wohnfläche gem. [58]  
 "Brunata Metrona" [59]: Insgesamt ca. 240'000 Gebäuden aus Verbrauchsabrechnungen. Angaben gelten für unsanierte Gebäude. Werte EFH und MFH: Mittelwerte aus den Medianen für gas- und ölbefeuerte Gebäude mit einer Wohnfläche <200 m<sup>2</sup> (EFH) und >200-1000m<sup>2</sup> (MFH):  
 "Zürich" [60]: Erhebung Wohngebäude Kanton Zürich, Baujahr vor 1990, Angabe Median, Flächenbezug EBF.

Bezieht man eine Flächenkorrektur (siehe Text zur Abbildung 5) in die Überlegungen mit ein, so zeigen die Daten eine gute Übereinstimmung. Das heisst, die hier ermittelten Verbrauchsdaten liegen im Bereich der Werte aus der Literatur. Einzig der Wert für Zürich weicht ab, d. h. er ist höher.

Der mittlere Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung für die 11 Wohngebäude liegt bei  $24.1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$ . Dieser Wert ist etwas höher als Planungswerte für Bestandsgebäude aus der Literatur. Diese liegen zwischen  $17.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$  [51],  $20.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$  [12] und  $21.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$  [52]. Gemessene Verbräuche aus zwei Projekten liegen bei jeweils  $16.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \text{ a})$  [53], [54]. Bei allen Angaben wurden die Originalwerte gem. [28] flächenkorrigiert.

## 4.2 Einordnung Abweichung Verbrauch und Bedarf Gebäude

Bei der notwendigen Bereinigung der Mess- oder Ablesedaten, die ja oftmals als Gesamtenergieverbrauch Heizung und Warmwasser vorliegen, gibt es Ermessensspielräume und Fehlerquellen (z. B. Abspaltung WW, Wirkungsgrad Kessel, Leitungsverluste, Zirkulationsleitungsverluste usw.). Wir vertreten daher die Meinung, dass eine Übereinstimmung von  $\pm 15\%$  zwischen HWV und HWB hinreichend genau ist.

In der Literatur werden Abweichungen zwischen dem Bedarf und dem Verbrauch von Bestandsgebäuden zwischen  $+18$  und  $+105\%$  angegeben. Im vorliegenden Projekt überschreitet der HWB der Mehrzahl (20 von 33 Gebäuden) den HWV. Der Median des HWB aller 33 Gebäude liegt  $46\%$  über dem HWV. Die Überschreitungen liegen dabei im Bereich zwischen  $+17\%$  und  $+167\%$ . Drei der Gebäude weisen eine negative Abweichung auf (zwischen  $-18\%$  und  $-22\%$ ). Bei 10 der Gebäude stimmen HWB und HWV genügend gut überein ( $-15\% \leq A \leq +15\%$ ). Speziell die Übereinstimmungen (30%) und die Unterschreitungen (9%) der Stichprobe decken sich nicht mit der Erwartungshaltung zu Beginn des Projektes. Folglich ist davon auszugehen, dass es in SIA 380/1 keine massgebliche, systematische Fehlannahme gibt, die alleine für die festzustellenden Abweichungen verantwortlich ist. Vielmehr sind neben möglichen Unschärfen bei der Bereinigung von Messwerten mehrere kleine (auch projektbezogene) Ursachen als Grund für die Abweichungen zu nennen: Klimadaten, Nutzerverhalten und konstruktionsbezogene Rechenwerte.

Die Analyse der möglichen Ursachen für die in diesem Projekt festgestellten Abweichungen auf Basis der beiden mit hohem Detaillierungsgrad untersuchten Gebäude FA zeigt dabei zwei Tendenzen:

1. Die Berücksichtigung des realen Nutzerverhaltens führt primär aufgrund höherer Raumtemperaturen und einer Reduktion der solaren Wärmegewinne durch den Sonnenschutz zu einer Zunahme des berechneten Heizwärmebedarfs und damit bei nicht wärmedämmten Bestandsgebäuden zu einer grösseren Abweichung zum gemessenen Heizwärmeverbrauch.
2. Eine messgestützte Anpassung der b-Werte, U-Werte und der lokalen Aussentemperaturen führen hingegen zu einer Reduktion der Transmissionsverluste und damit zu einer deutlichen Verringerung bzw. Eliminierung der Abweichung.

Da die im Projekt verwendete Stichprobe nicht gross ist, kann eine Übertragung der hier gemachten Aussagen auf einen grossen Gebäudebestand nur mit Zurückhaltung erfolgen.

## 5. Vorgehen beim Abgleich HWV und HWB

Nachfolgend werden Hinweise für die Datenbereinigung gegeben und Vorschläge gemacht, wie vorzugehen ist, wenn der HWB den HWV um mehr als  $15\%$  über- oder unterschreitet.

Achtung: eine entsprechend den Vorschlägen abgeänderte SIA 380/1 Berechnung entspricht nicht mehr den Anforderungen an einen behördlichen Nachweis.

### Hinweise zur Datenbereinigung der Mess- oder Ablesewerte

Bei der Datenbereinigung gilt es folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Wirkungsgrad Wärmeerzeugung  
Informationsquelle: <https://www.minergie.ch/waermeerzeugung.html>

- Ermittlung Verluste Wärmeverteilung ausserhalb der thermischen Hülle  
Informationen [61], Tabelle 2-1, Bericht downloadbar unter: <http://www.iwu.de/downloads/>
- Abspaltung Warmwasserbereitung  
Wenn keine Messwerte vorliegen, so kann gem. SIA 380/1 bei EFH ein Wert von  $13.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$  und bei MFH ein Wert von  $20.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$  angesetzt werden. Da verglichen mit der Literatur (siehe Abschnitt 4.1) der Bedarfswert für EFH niedrig scheint, kann hier ein höherer Wert in Abzug gebracht werden, z. B.  $16.9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$ .
- Heizgradtagsbereinigung  
Tabellen unter: <http://www.hev-schweiz.ch/vermieten/heiz-und-nebenkosten/heizgradtage/>

### HWB überschreitet den HWV

- 1) Verwendung von Klimadaten, die der Messperiode zeitlich entsprechen  
Anmerkung dazu: dies ist derzeit noch aufwändig, da die Monatsdaten selber generiert werden müssen. Mit Hinblick auf die Bedeutung des Gebäudebestands bei der Erreichung der Ziele der 2000-Watt Gesellschaft ist es zukünftig wünschenswert, dass die Klimadaten für die jeweiligen Standorte aus einer Datenbank abrufbar sind, oder schon direkt in den Berechnungsprogrammen SIA 380/1 enthalten sind.
- 2) Falls ein von den Standardwerten abweichendes Nutzerverhalten bekannt ist, ist dieses zu berücksichtigen. Dies beinhaltet auch eine Nachtabsenkung oder nachweisbare Teilbeheizung des Gebäudes.
- 3) Anpassung Transmissionsverluste  
Wenn die Decke zum Keller nicht gedämmt ist, so ist von höheren Kellertemperaturen auszugehen (in Idealfall sollte dies durch eine kurzzeitige Messung überprüft werden). In diesem Fall wird für Keller im Erdreich die Verwendung eines b-Faktors von 0.5 vorgeschlagen. Weiter können die U-Werte mit der entsprechenden Verwendung eines verminderten Wärmeübergangskoeffizienten  $h_e$  etwas "weniger streng" berechnet werden. Zeigt eine Analyse der vorhandenen Wärmebrücken dass der Anteil bei einer Standardberücksichtigung für ein Bestandsgebäude zu hoch ist (z. B. Anteil < 15%), so können diese entsprechend dem planerischen Sachverstand reduziert werden.

### HWB unterschreitet den HWV

- 1) Innentemperatur (messgestützt) anpassen.

## 6. Dank

Das Projekt wird vom Bundesamt für Energie, BFE, unter dem Vertrag a SI/501282-01 gefördert.

Der Dank für die Gebäudemessdaten GA1 geht an folgende Firmen und Personen:  
 BS\_01, BS\_02, BS\_03, BS\_04, BS\_05 und PR\_01: Informationen Gebäude: CPV/CAP  
 Pensionskasse Coop, Messdaten: Rapp Enserv AG  
 BA\_01, BS\_06: pom+ Consulting AG  
 LU\_01: Thomas Marti  
 RI\_01: Beat Rothweiler  
 Der Dank für die Gebäudemessdaten GA2 geht an folgende Person: Christoph Siebold, (IEBau, FHNW)

## 7. Anhang: Literatur

- [1] SIA 380/1:2009 *Thermische Energie im Hochbau*. Schweiz, 2009, pp. 1–60.
- [2] T. Osterhage, D. Cali, R. Streblow, and D. Müller, "Ergebnisse einer energetischen Sanierung: Abweichungen zwischen Energiebedarf und Verbrauch - ist nur der Nutzer schuld?," *Bauphysik*, vol. 37, no. 2, pp. 100–104, 2015.
- [3] H. Erhorn, "Zur Genauigkeit der Bewertungsmethoden von Energieausweisen für bestehende Wohngebäude - Bericht WB 129/2006," Stuttgart, 2006.

- [4] A. Merzkirch, T. Hoos, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, "Wie genau sind unsere Energiepässe," *Bauphysik*, vol. 36, no. 1, pp. 40–43, 2014.
- [5] D. Majcen, L. Itard, and Visscher, "Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications," *Energy Policy*, vol. 54, pp. 125–136, 2013.
- [6] M. Sunikka-Blank and R. Galvin, "Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption," *Build. Res. Inf.*, vol. 40, no. 3, pp. 260–273, 2012.
- [7] N. Raschper, "Warum Verbrauchswerte und Bedarfsberechnungen voneinander abweichen," *Die Wohnungswirtschaft*, vol. 11, pp. 52 – 54, 2010.
- [8] J. Knissel, R. Alles, R. Born, T. Loga, K. Müller, and V. Stercz, "Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspiegeln," Darmstadt, 2006.
- [9] J. Knissel, "Verbrauchs- versus Bedarfskennwerte," in *EnOB:MONITOR-Workshop "Kennwerte" 21-22. März 2013*, 2013.
- [10] T. Loga, M. Grosskloss, and J. Knissel, "Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung –," Darmstadt, 2003.
- [11] G. Hauser, A. Maas, and K. Höttges, "Analyse des Heizenergieverbrauchs von Mehrfamilienhäusern auf der Basis der GEWOS-Erhebung," *DBZ*, vol. 45, no. 3, pp. 155–162, 1997.
- [12] C. Stolte, H. Marcinek, U. Bigalke, and Y. Zeng, "Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizient sanierter Wohngebäude. Begleitforschung zum dena-Modellvorhaben Effizienzhäuser.," Berlin, 2013.
- [13] *SIA 380:2015 Grundlagen für energetische Berechnung von Gebäuden*. 2015.
- [14] *SN EN ISO 13790: Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008)*. 2008.
- [15] S. A. Klein, W. A. Beckmann, J. W. Mitchell, J. A. Duffie, and D. N.A., "TRNSYS - A Transient System Simulation Program," Madison, 2000.
- [16] "ESP-r." <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- [17] "IDA ICE." [www.equa.se](http://www.equa.se), Solna, SE.
- [18] *ISO 13789:2007 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*. 2007.
- [19] *SIA 382/2:2011: Klimatisierte Gebäude - Leistungs- und Energiebedarf*. Schweiz, 2011, pp. 1–40.
- [20] D. L. R. Vollaro, C. Guattari, L. Evangelisti, G. Battista, E. Carnielo, Gori, and Paola, "Building energy performance analysis: A case study," *Energy Build.*, vol. 87, pp. 87–94, 2015.
- [21] M. Graetzl-Michlmair, R. Heimrath, and H. Schranzhofer, "Einflussparameter auf Heizwärmebedarf und Kühlbedarf von Gebäuden in verschiedenen Berechnungsmethoden von EN ISO 13790," *Bauphysik*, vol. 32, no. 5, pp. 296–302, 2010.
- [22] T. Frank, S. Carl, H. Simmler, H. Manz, and B. Binder, "Überarbeitung Programm HELIOS-XP - Schlussbericht," Dübendorf, 2006.
- [23] T. Frank, "Anforderungen an behördentaugliche dynamische Simulationsprogramme - Problemanalyse und exemplarischer Lösungsvorschlag," Dübendorf, 2011.
- [24] *SIA 380/1:1988 Energie im Hochbau*. Schweiz, 1988, pp. 1–81.
- [25] C. U. Brunner and J. Nänni, *SIA D 99:1985 Wärmebrückenkatalog 1 - Neubaudetails*.

- Schweiz, 1985.
- [26] T. Loga and U. Imkeller-Benjes, "Energiebilanz-Toolbox, Arbeitshilfen und Ergänzungen zum Energiepass Heizung/Warmwasser," Darmstadt, 2001.
- [27] T. Loga, C. Kahlert, M. Laidig, and G. Lude, "Räumlich und zeitlich eingeschränkte Beheizung - Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung in stationären Energiebilanzverfahren," Darmstadt, 1999.
- [28] VDI, *VDI 3807-2013: Energieverbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen, Blatt 1*. Deutschland, 2013.
- [29] F. Schröder, O. Papert, T. Boegelein, H. Navarro, and B. Mundry, "Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand," *Bauphysik*, vol. 36, no. 6, pp. 309–324, 2014.
- [30] W. Richter, T. Ender, T. Hartmann, A. Kremonke, B. Oschatz, and J. Seifert, "Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern," Stuttgart, 2003.
- [31] F. Schröder, C. Ohlwärter, H. Erhorn, and J. Reiss, "Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern – Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen," *EnEV aktuell*, no. 2, 2010.
- [32] H. Hend, W. Parijs, and M. Deurinck, "Energy consumption für heating and rebound effects," *Energy Build.*, vol. 42, pp. 105–110, 2010.
- [33] "Der Heizkompass für Hauswartinnen und Hauswarte," Bern, 2012.
- [34] O. Kah, S. Peper, W. Ebel, B. Kaufmann, W. Feist, and B. Zeno, "Untersuchung zum Aussenluftwechsel und zur Luftqualität in sanierten Wohngen mit konventioneller Fensterlüftung und mit kontrollierter Lüftung - Endbericht IEA SHC Task 37 Subtask C," Darmstadt, 2010.
- [35] H. Künzel, *Wohnungslüftung und Raumklima*, 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [36] W. Hässig, A. Primas, D. Gerber, H. Huber, T. Weber, and C. Hauri, "Untersuchung zur Lüftung von sanierten Mehrfamilienhäusern," Zürich, 2005.
- [37] R. Kriesi, "Reales Lüftungsverhalten in Wohnen mit unterschiedlichen Lüftungssystemen - Schlussbericht," Wädenswil, 2012.
- [38] A. Maas, "Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung," Kassel, 1995.
- [39] G. Bekö, J. Toftum, and G. Clausen, "Modeling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behaviour," *Build. Environ.*, vol. 46, pp. 2230–2237, 2011.
- [40] G. Bekö, T. Lund, F. Nors, J. Toftum, and G. Clausen, "Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children," *Build. Environ.*, vol. 45, pp. 2289–2295, 2010.
- [41] Dimitroulopoulou, "Ventilation in European dwellings: A review," *Build. Environ.*, vol. 47, pp. 109–125, 2012.
- [42] M. Mörtel, "Modell zur Bestimmung der Ansaugtemperaturen dezentraler Fassadenlüftungsgeräte," Berlin, 2015.
- [43] *SN EN ISO 6946:2007 Bauteile - Wärmedurchgangswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*. 2007, pp. 1–33.
- [44] *SIA 2028:2010 Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*. Schweiz, 2010.
- [45] T. Hoos, A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, "Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Aussenwänden im Vergleich mit Typologiewerten für den Gebäudebestand," *Bauphysik*, vol. 37, no. 5, pp. 273–276, 2015.

- [46] W. Leuthard, "Wärmebrücken vermeiden - ein Energiesparpotential ausnützen," *Umwelt Aargau*, vol. 23, pp. 21–23, 2004.
- [47] C. U. Brunner and J. Nänni, "Verminderung von Wärmebrücken bei Neubauten. Teil 1: die Bedeutung von Wärmebrücken," *Schweizer Ing. und Archit.*, vol. 107, no. 11, pp. 293–298, 1989.
- [48] C. Richarz and C. Schulz, *Energetische Sanierung - Grundlagen, Details, Beispiele*. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2011.
- [49] Z. Bastian, *EnerPHit Planerhandbuch - Altbauten mit Passivhaus-Komponenten fit für die Zukunft machen*, 1st ed. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2012.
- [50] E. Parlow, D. Scherer, and U. Fehrenbach, "Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ) - Wissenschaftlicher Bericht," Zürich, 2010.
- [51] BMWI und BMUB, *Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte im Wohngebäudebestand Vom 7. April 2015*. Deutschland, 2015.
- [52] H. Erhorn, "Bedarf - Verbrauch. Ein Reizthema ohne Ende oder die Chance für sachliche Energieberatung?," in *"Energieeffizienz bauen!" BAU 2007*, 2007.
- [53] M. Greller, F. Schröder, T. Bögelein, P. Güttler, and V. Hundt, "Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 3: Spezifischer Energieverbrauch für zentrale Warmwasserbereitung und Relation zum Heizenergieverbrauch," *Bauphysik*, vol. 32, no. 3, pp. 154–159, 2010.
- [54] C. Felsmann and J. Schmidt, "Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität - Schlussbericht," Dresden, 2013.
- [55] M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, and M. Hille, "Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden - Szenarioanalysen mit dem IKARUS-Raumwärmemodell 2000," Bremen, 2000.
- [56] S. Klauss, W. Kirchhof, and J. Gissel, "Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten," Kassel, 2009.
- [57] B. Schломann, E. Gruber, W. Eichhammer, and N. Kling, "Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)," Berlin, 2004.
- [58] N. Fisch, L. Altendorf, L. Kühl, T. Wilken, E. Brandt, and T. Gawron, "Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden - Endbericht im Auftrag des im Auftrag des BMVBS/BBR," Braunschweig, 2012.
- [59] F. Schröder, M. Greller, V. Hundt, B. Mundry, and O. Papert, "Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 1: Differenzierte Kennzahlverteilungen nach Energieträger und wärmetechnischem Sanierungsstand," *Bauphysik*, vol. 31, no. 6, pp. 393–402, 2009.
- [60] AWEL (Abteilung Energie), "Energiekennzahl Wohnbauten," Zürich, 2014.
- [61] T. Loga and U. Imkeller-Benjes, "Energiepass Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem," Darmstadt, 1997.