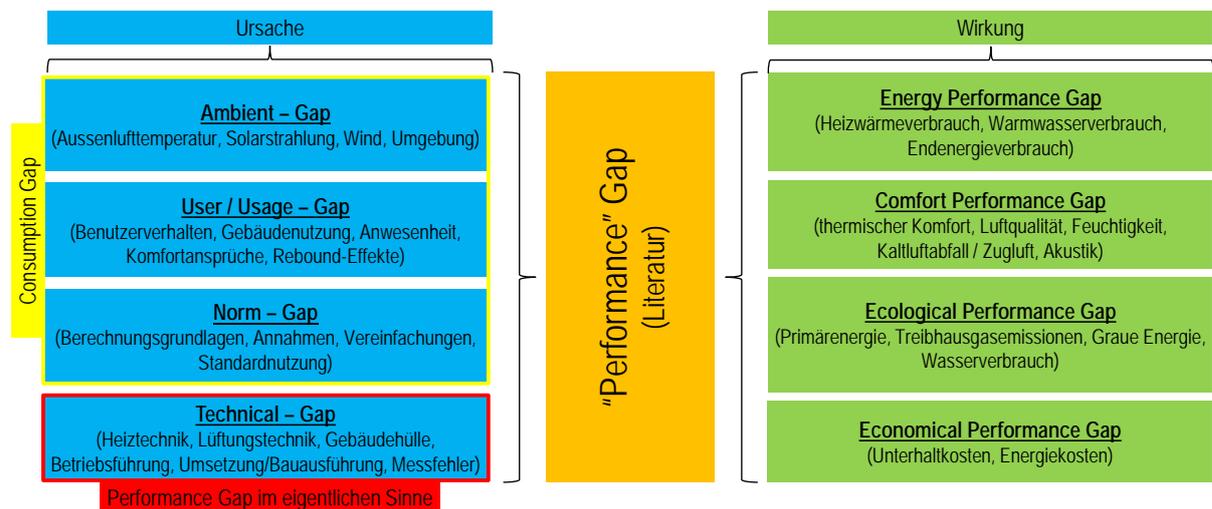




Schlussbericht 31. August 2018

ImmoGap

Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern





INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 31. August 2018

Ort: Rapperswil

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Gebäude
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

SPF Institut für Solartechnik
Hochschule für Technik Rapperswil HSR
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

econcept AG
Gerechtigkeitsgasse 20, CH-8002 Zürich
www.econcept.ch

3-Plan Haustechnik AG
Albert-Einstein-Strasse 15, CH-8404 Winterthur
www.3-plan.ch

Autoren:

Igor Mojic, SPF Institut für Solartechnik, igor.mojic@spf.ch
Mauro Luzzatto, SPF Institut für Solartechnik, mauro.luzzatto@spf.ch
Michel Haller, SPF Institut für Solartechnik, michel.haller@spf.ch
Meta Lehmann, econcept AG, meta.lehmann@econcept.ch
Michael Benz, 3-Plan Haustechnik AG, michael.benz@3-plan.ch
Stefan van Velsen, 3-Plan Haustechnik AG, stefan.vanVelsen@3-plan.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Rolf Moser, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501469-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Das Projekt ImmoGap geht dem sogenannten Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern nach. Es leistet einen Beitrag dazu den Begriff „Performance Gap“ besser einzuordnen und klarer zu definieren. Dazu wurde in einem ersten Schritt eine Literaturstudie zum Thema durchgeführt. Grundsätzlich versteht man unter dem „Performance Gap“ einen Mehrverbrauch an Heizwärme oder das Überschreiten von Energiekennwerten. Der Begriff „Performance Gap“ suggeriert, dass eine gewünschte Leistung nicht erbracht wird. Dies ist kritisch zu betrachten, da es unterschiedliche Gründe gibt, weshalb ein Gebäude mehr Energie verbraucht als ursprünglich geplant war. Im Projekt wurde der Heizwärmeverbrauch von 65 Mehrfamilienhäuser mit dem Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 (Energienachweis) verglichen. Im Unterschied zu anderen Studien konnte das Projektteam auf Messdaten mit sehr hoher zeitlicher Auflösung zugreifen. Im Schnitt wurde der mit Standardnutzung berechnete Heizwärmebedarf um 44% überschritten. Vier der Gebäude weisen einen Mehrverbrauch zwischen 100% und 115% auf. Detaillierte Untersuchungen mit Simulationen und Messungen zeigen, dass der Mehrverbrauch zum grossen Teil durch das zur Norm abweichende Benutzerverhalten bezüglich Verschattung, Lüftung und Raumtemperatur zu erklären ist. Würde man bereits bei der Bedarfsberechnung ein reales Nutzerverhalten einsetzen, würden die untersuchten Gebäude im Schnitt keinen „Performance Gap“ aufweisen. Ein Vergleich zwischen Heizwärmeverbrauch und Heizwärmebedarf laut Energienachweis (SIA 380/1) ist deshalb als kritisch zu betrachten, da der Energienachweis nicht als Vorhersageinstrument gedacht ist, sondern als Benchmark-Tool für die Behörden. Jedoch fehlen im Moment geeignete Vergleichsinstrumente für einen grösseren Gebäudepool. Auf Grund der Entwicklung in der Architektur (z.B.: grössere Fenster) und der veränderten Lebensgewohnheiten der Bewohner wird empfohlen das Nutzerverhalten vertiefter zu untersuchen.

Résumé

Le projet ImmoGap enquête sur l'écart de performance constaté dans l'habitat collectif. Il contribue à mieux cerner cette notion d'écart de performance et à mieux la définir. Par écart de performance, on entend une surconsommation de chauffage ou plus généralement un dépassement des valeurs énergétiques de référence. Le terme d'écart de performance laisse suggérer qu'une puissance donnée n'est pas fournie à la hauteur attendue. Cependant cette assertion est à considérer avec circonspection étant donné que plusieurs causes peuvent être à l'origine de la surconsommation d'un bâtiment. Les besoins en énergie de chauffage de 65 immeubles collectifs ont été comparés aux besoins selon la norme SIA 380/1 (certification énergétique) dans le cadre de ce projet. Contrairement à d'autres études, les auteurs ont pu accéder à des données de mesure à très haute résolution temporelle. En moyenne, les besoins en énergie de chauffage ont été dépassés de 44% par rapport à une utilisation standard. Quatre des bâtiments accusent une surconsommation variant entre 100 et 115%. Les analyses détaillées montrent que la surconsommation énergétique est en grande partie expliquée par des comportements des usagers concernant l'ombragement, la ventilation et la température des pièces différents de la norme. Les bâtiments considérés ne manifesteraient pas d'écart de performance si l'on prenait en compte le comportement réel des utilisateurs dans le calcul de leurs performances énergétiques. Etant donné que la certification énergétique (SIA 380/1) n'est pas pensée comme un outil de prédiction mais comme un indice de référence pour les autorités, il est critique de comparer les besoins en énergie de chauffage aux valeurs énergétiques de référence. Les outils de comparaison adaptés manquent toutefois pour un plus grand parc de bâtiments. Une analyse plus approfondie du comportement des utilisateurs est préconisée en raison des évolutions architecturales ainsi que des habitudes de vie des habitants.



Summary

The ImmoGap project investigates the so-called performance gap for multifamily buildings. It contributes to a better classification and a clearer definition of the term "performance gap". As a first step, a literature study on this topic was carried out. In principle, the "Performance Gap" is understood as an additional consumption of heat or a failure to meet energy benchmarks. The term "Performance Gap" suggests that a desired service is not provided. This is critical, because there are several reasons why a building consumes more energy than originally planned. In the project, the heating energy consumption of 65 multifamily buildings was compared with the heating demand according to SIA 380/1 (energy certification). In contrast to other studies, the project team was able to access measurement data with a very high time resolution. On average, the heat demand calculated with standard use is exceeded by 44%. Four of the buildings have an additional consumption between 100% and 115%. Detailed investigations with simulations and measurements show that the additional consumption can largely be explained by the user behavior regarding shading, ventilation and room temperature, which deviates from the norm. If the observed user behavior were already used in the demand calculation, the examined buildings on average would not show any "performance gap". A comparison between space heat consumption and space heat demand according to the energy certificate (SIA 380/1) is therefore to be regarded as critical, since the energy certificate is not intended as a predictive instrument but as a benchmark tool for the authorities. However, suitable comparison instruments for a larger pool of buildings are currently lacking. Due to developments in architecture (e.g.: larger windows) and the changed living habits of residents, it is recommended to investigate user behavior in more detail.



Inhalt

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Abkürzungsverzeichnis	7
Überblick	8
1 Einleitung	11
1.1 Ausgangslage	11
1.2 Literaturstudie	11
2 Grundlagen	16
2.1 Einordnung von Endenergie und Nutzenergie.....	16
2.2 Definition und Umgang mit dem Begriff „Performance Gap“	16
2.3 Abgrenzung des Projektes	19
2.4 Projektgliederung.....	20
2.5 Gebäudedaten	20
2.6 Messdatenaufbereitung.....	21
2.7 Klimadaten	22
2.8 Klimakorrektur – Varianten	26
2.9 Messunsicherheit und Fehlerrechnung	35
3 Resultate Phase 1: Grobanalyse des Gebäudepools	37
3.1 Analyse zum Brauchwarmwasser	37
3.2 Heizwärmeverbrauch versus Heizwärmebedarf.....	41
3.3 Vergleich von Messung mit Planung für verschiedene Heizungsparameter	49
3.4 Multilineare Regressionsanalyse	59
4 Resultate Phase 2: Feinanalyse	66
4.1 Mehrjahresanalyse des Performance Gaps	66
4.2 Baugleiche Objekte	69
4.3 Vergleich unterschiedlicher Gebäude.....	80
4.4 Untersuchungen zum Energienachweis.....	88
5 Resultate Phase 3: Simulationsanalyse	95
5.1 SIA 380/1:2009 Heizwärmebedarf.....	95
5.2 Einfluss Gebäudeposition	97
5.3 Einfluss Raumtemperatur	99
5.4 Einfluss Lüftung und Sonnenschutz	102
5.5 Einfluss Heizgrenze	107
6 Schlussfolgerung	109
7 Empfehlungen	114
8 Literaturverzeichnis	117



Anhang A: Fehlerrechnung ATD Methode.....	120
Anhang B: Referenzgebäude MFH	123
Anhang C: Multilineare Regressionsanalyse	131
Anhang D: Ergänzende Resultate.....	135



Abkürzungsverzeichnis

amb	Ambient (Umgebung)
ATD	Akumulierte Temperaturdifferenzen
BT	Basistemperatur
EPG	Energy Performance Gap
EPGF	Energy-Performance-Gap-Faktor
HG	Heizgrenze
HGT	Heizgradtage
JAZ	Jahresarbeitszahl
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Sig.	Signifikanz



Überblick

In dieser Übersicht werden die Kernaussagen aus dem Projekt aufgeführt mit dem Verweis, wo die detaillierten Informationen im Bericht zu finden sind. Mit der Übersicht gelangt der/die eilige Leser/in rasch zu den wichtigsten Informationen. **Wichtig:** Viele Informationen zu den Grundlagen sind im Kapitel 2 beschrieben. Diese können relevant sein, um Grafiken oder Resultate richtig zu interpretieren.

Kernaussagen	Kapitel	Seiten
Der Begriff „Performance Gap“ suggeriert, dass eine gewünschte Leistung nicht erbracht wird. Dies ist kritisch zu betrachten, da es unterschiedliche Gründe gibt, weshalb ein Gebäude mehr Energie verbraucht als ursprünglich geplant war. Im Projekt wurden neue Begriffe und Definitionen vorgeschlagen um den sogenannten „Performance Gap“ präziser zu definieren.	2.2	16-19
Wird der Heizwärmebedarf gemäss Energienachweis nach SIA 380/1 mit dem gemessenen Heizwärmeverbrauch verglichen, um den „Performance Gap“ zu bestimmen, muss zwingend eine vorangehende Klimakorrektur der Messdaten durchgeführt werden. Die Wahl der Methode für die Klimakorrektur kann die Grösse des „Performance Gap“ jedoch stark beeinflussen.	2.8	26-35
Berücksichtigt man eine Sensitivitätsanalyse, respektive eine Messunsicherheit der Aussenlufttemperatur Messung für die Klimakorrektur, kann der ausgewiesene „Performance Gap“ für dasselbe Gebäude um bis zu 37 Prozentpunkte variieren.	2.9	35-37
Wenn immer möglich sollte der „Performance Gap“ auf Stufe Nutzenergie und Endenergie separat betrachtet werden. Rückschlüsse vom Endenergieverbrauch auf den Heizwärmeverbrauch sind fehleranfällig.	2.1	16
Die Untersuchung von 65 Mehrfamilienhäusern zeigt, dass der gemessene und witterungsbereinigte Heizwärmeverbrauch den mit Standardnutzungsbedingungen berechneten Heizwärmebedarf im Schnitt um 44% überschreitet. Vier Gebäude weisen einen Mehrverbrauch zwischen 100% und 115% auf.	3.2	41-49



Kernaussagen	Kapitel	Seiten
<p>Ein grosser Teil des „Performance Gap“ geht auf eine abweichende Nutzung, respektive das von den Normannahmen abweichende Benutzerverhalten zurück. Je besser die Gebäudehülle ist und je tiefer der berechnete Heizwärmebedarf, desto grösser ist der relative Einfluss des Nutzerverhaltens (Effekt in % des Bedarfs). Das Benutzerverhalten kann zwischen 30% und 70% des Mehrverbrauchs ausmachen.</p> <p>Würde man bereits bei der Bedarfsberechnung ein reales Nutzerverhalten berücksichtigen, würden die untersuchten Gebäude im Schnitt keinen „Performance Gap“ aufweisen.</p>	5.3/5.4	99-107
<p>Das von den Normannahmen abweichende Benutzerverhalten führt dazu, dass vor allem der Wärmeverbrauch in der Übergangszeit (Frühling/Herbst) stark ansteigt.</p>	4.2/4.3 5.4	69-88 102-107
<p>Die Simulationen zeigen, dass im Schnitt mit Raumtemperaturen von 23 °C und in der Übergangszeit mit einem offenen Kippfenster pro Wohnung gerechnet werden muss.</p>	5.3/5.4	99-107
<p>Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass bei einer realistischen Wahl der Eingabewerte mit der SIA 380/1 der <u>Jahreswärmebedarf</u> gut prognostiziert werden kann. Dies erfordert jedoch eine intensive Auseinandersetzung mit den Berechnungsgrundlagen der Norm, dem Gebäude und den Nutzenden.</p> <p>Betrachtet man hingegen die Auswertung auf <u>Monatsbasis</u>, ergeben sich grössere Abweichungen. Dies auf Grund des real höheren Wärmeverbrauchs in der Übergangszeit.</p>	4.4 5.4	88-95 102-107
<p>Die Prüfung der Energienachweise von vier Gebäuden, hat gezeigt, dass auf Grund des Ermessensspielraums bei der Eingabe der Gebäudekennzahlen der ausgewiesene Mehrverbrauch an Wärme zwischen +8% und +170% variieren kann.</p>	4.4	88-95



Kernaussagen	Kapitel	Seiten
<p>Mit einer Multivariablen Regressionsanalyse konnten folgende Grössen, die den „Performance Gap“ massgeblich beeinflussen, ermittelt werden:</p> <ul style="list-style-type: none">• <u>Wärmebedarf</u>: je grösser der (im Voraus) berechnete Wärmebedarf ist, umso tiefer fällt der Performance Gap aus.• <u>Unterschreitung des Grenzwertes</u>: je stärker der berechnete Wärmebedarf den gesetzlichen Grenzwert unterschreitet, desto grösser fällt der Performance Gap aus.• <u>Differenz Heizleistung</u>: je grösser die Überdimensionierung der geplanten Heizleistung¹ (Wärmeverteilung) ist, desto geringer fällt der Performance Gap aus.• <u>Heizgrenze</u>: je höher die aus der gemessenen Leistungskennlinie ermittelte Heizgrenze ist, desto grösser ist der Performance Gap.	3.4	59-66
<p>Augenfällig ist die häufige Überdimensionierung der Heizleistung der Wärmeverteilung. Die vom Planer bestellte Heizleistung überschreitet die real benötigte Leistung im Median um 18%, und dies obwohl die Gebäude auf Grund des realen Nutzerverhaltens einen höheren Wärmebedarf aufweisen als geplant.</p>	3.3.2	52-55
<p>Trotz des „Performance Gaps“ sinkt bei neueren Objekten mit einem tieferen berechneten Heizwärmebedarf auch der Heizwärmeverbrauch. Weiter wurde festgestellt, dass bei den Berechnungen des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1-Ausgaben 2001 und 2007 der Grenzwert viel häufiger unterschritten wurde als bei der Berechnung nach der SIA-Ausgabe 2009. Gleichzeitig fällt jedoch auch der Performance Gap bei den Objekten welche mit der SIA-Ausgabe 2009 gemacht wurden deutlich geringer aus. Dies könnte ein Hinweis sein, dass das wirtschaftliche Optimum bezüglich Gebäudehülle erreicht worden ist.</p>	3.2	41-49

¹ Hier entspricht die Heizleistung derjenigen Leistung die vom Planer beim Energie-Contractor bestellt wurde, es handelt sich nicht um die installierte Wärmeerzeugerleistung.



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In der Schweiz verursachen rund 1.6 Mio. Gebäude etwa die Hälfte des schweizweiten Primärenergiebedarfs [1]. Deshalb hat der Gebäudebereich in der Energieforschung und im speziellen die Effizienzsteigerung einen grossen Stellenwert. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass teilweise eine deutliche Differenz zwischen den aus Planwerten abgeleiteten Energieverbräuchen und den im Betrieb gemessenen „realen“ Verbräuchen von Gebäuden besteht. Dies wird mit dem Begriff „Performance-Gap“ bezeichnet. In der vorliegenden Studie „ImmoGap“ soll den Ursachen des Performance-Gap nachgegangen werden. Der Fokus der Studie wird auf die Auswertung von Mehrfamilienhäuser (MFH) gelegt, da hier das grösste Potenzial zur Reduktion von Energieverbrauch erwartet wird [2].

Um die Akzeptanz und Relevanz der Resultate für die Praxis und Forschung sicherzustellen, wurde eine Begleitgruppe mit verschiedenen Experten im Gebäudebereich miteinbezogen. Die Begleitgruppe wurde durch nachfolgende Personen besetzt:

- Christoph Gmür, AWEL Zürich
- Franz Sprecher, AHB Zürich
- Marcel Sturzenegger, AWE St.Gallen
- Christian Erb, Halter AG
- Martin Stalder, Ingenieurbüro Stalder

1.2 Literaturstudie

Die nachfolgende Literaturstudie, die zu Projektbeginn durchgeführt wurde, fasst die Erkenntnisse von anderen Untersuchungen zum Thema Performance Gap zusammen. Es handelt sich dabei nicht um Erkenntnisse aus dieser Studie oder um die Meinung der Autoren.

1.2.1 Der Energy Performance Gap

Der sogenannte Performance Gap im Gebäudebereich beschreibt in der Literatur die Abweichung der Energieverbräuche zwischen Planung und späterem Betrieb. Dabei müssen verschiedene Gaps (Abweichungen) unterschieden werden, zum Beispiel im Bereich des Komforts können Abweichungen beim sommerlichen Wärmeschutz entstehen oder der Luftqualität. Auch wird im Zusammenhang mit dem Performance Gap vereinzelt von Rebound- und Prebound-Effekten gesprochen. Ein Rebound-Effekt ist, wenn Effizienzsteigerungen durch einen Mehrverbrauch oder ein verändertes Nutzerverhalten wieder kompensiert werden. Dies zeigt sich zum Beispiel an den über die letzten Jahrzehnte gestiegenen Ansprüchen an die Raumtemperatur [3], [4]. Der Prebound-Effekt [5] beschreibt im Gebäudebereich den Minderverbrauch von Energie zwischen Norm/Erwartung (Energienachweis) und dem gemessenen Verbrauch gerade bei Altbauten, also somit ein Performance Gap mit negativem Vorzeichen. Aus Sicht der Autoren ist der Rebound- und Prebound-Effekt ein Teil oder respektive eine Ursache für den Performance Gap und somit nicht mit dem Performance Gap gleichzustellen.



Der Fokus der internationalen und nationalen Forschung zum Performance Gap liegt vor allem im Bereich der Heizwärme, des Warmwassers und des Stromverbrauchs, dem sogenannten Energy Performance Gap [6]. Die Abweichungen anderer Aspekte, wie zum Beispiel des thermischen Komforts (Zugerscheinungen) oder der Luftqualität (Lüftungsverhalten), können jedoch einen indirekten Einfluss auf den Energieverbrauch eines Gebäudes haben.

Die Bezeichnung Performance Gap ist kritisch zu betrachten, da dieser Begriff impliziert, dass das Gebäude nicht die Leistung erbringt, welche geplant oder vorgesehen war. Damit entsteht der Eindruck für die Bauherrschaft, dass sie nicht das erhalten hat was sie eigentlich bestellt hat. Dies ist jedoch nicht unbedingt richtig, da eine Abweichung nicht nur vom Bau bzw. der Bauqualität, sondern stark durch den Gebäudebetrieb und das Nutzerverhalten mitbeeinflusst wird. Zudem kann ein Performance Gap auch in den Berechnungen und Annahmen in der Norm seine Ursache haben. Mit dem Begriff Performance Gap wird in der Regel ein Mehrverbrauch von Energie assoziiert. Ein Gap (Abweichung) kann jedoch gerade bei älteren Gebäuden auch einen Minderverbrauch bedeuten.

Wird der Begriff Performance Gap für ein spezifisches Gebäude definiert, so braucht es auch klare Definitionen der Verantwortlichkeiten. Gemäss De Wilde et al. [7] fühlt sich heute niemand verantwortlich für den Performance Gap, weder Bauherr noch Planer noch Betreiber. Selbst wenn letzterer den Energieverbrauch im Auge hat, so wird er mit Ansprüchen der Nutzer konfrontiert (höhere Raumtemperaturen) welche häufig zu einem erhöhten Verbrauch führen. Dies führt meist dazu, dass kaum Massnahmen zu dessen Reduktion umgesetzt werden.

Im vorliegenden Projekt wird der Begriff Energy Performance Gap (EPG) verwendet für die Abweichung des gemessenen witterungsbereinigten Energieverbrauchs eines Gebäudes gegenüber dem in der Planung berechneten Energiebedarf nach SIA 380/1 [8].

1.2.2 Minderverbrauch bei Altbauten

Die Literaturrecherche zeigt, dass der sogenannte Energy Performance Gap stark vom Alter, respektive vom Energiekennwert (berechneter Energiebedarf) des Gebäudes abhängig ist. Diverse internationale wie auch nationale Untersuchungen [4], [9]–[12] zeigen, dass bei älteren, unsanierten Gebäuden bis ca. Baujahr 1990/99 und einem Energiekennwert von mehr als 100-130 kWh/m²a, der Energieverbrauch meist tiefer ist als der berechnete Energiebedarf. Die Überschätzung des Energiebedarfs kann mit 35% bis 200% signifikant sein. Dies ist zum einen positiv, da weniger Energie verbraucht wird als angenommen. Allerdings bedeutet dies für die Gebäudeeigentümer, dass das effektive Reduktionspotenzial bei Sanierungen deutlich geringer ist als das rechnerische Potenzial, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmassnahmen auswirkt. Weiter lässt dieser Umstand vermuten, dass die politischen Reduktionsziele bezüglich den Emissionen mit den angestrebten Sanierungspfaden unrealistisch hoch sind und somit nicht erreicht werden können [5].



Verschiedene Gründe werden in der Literatur für den reduzierten Verbrauch gegenüber dem prognostizierten Bedarf bei unsanierten Altbauten genannt:

- Tiefere Raumtemperatur als die angenommene Standardinnentemperatur (sparsame Bewohner) [3], [5], [7]
- Wesentlich geringere Luftwechselraten im Vergleich zur Berechnung gemäss Norm [5]
- Inhomogene Beheizung: nicht alle Räume werden beheizt oder haben die gleiche Raumlufttemperatureinstellung [4], [13]
- U-Werte sind geringer als angenommen [12], [13]
- zu hoch angenommene Windgeschwindigkeiten (woraus bei fehlender Dämmung signifikant überhöhte Wärmeübergangskoeffizienten resultieren) [13]

Eine weitere Ursache die jedoch in der untersuchten Literatur nicht beschrieben wurde, sind die über Jahre veränderten Rechenverfahren. Diese wurden für Nachweise betreffend Einhaltung von Vorschriften über die Jahre optimiert und weiterentwickelt.

1.2.3 Überhöhter Verbrauch bei Neubauten und energetischen Sanierungen

Ein anderes Bild zeigt sich bei Neubauten und Sanierungen ab ungefähr 2002 mit einem Energiekennwert von unter 100 kWh/m²a. Gerade Passiv- und Niedrigenergiehäuser zeigen oft einen deutlich höheren Verbrauch als bei der Bedarfsrechnung ermittelt [2], [6], [9], [13]–[15]. Bei einer Untersuchung der Wärme- und Wasserkostenabrechnung von 121 Mehrfamilienhäusern (Minergie und MuKE n 2008) im Jahr 2016 zeigte sich, dass ein Drittel der Mehrfamilienhäuser (MFH)-Neubauten einen bis zu 40% höheren Heizenergieverbrauch aufweist, und ein weiteres Drittel bis zu 100% mehr verbraucht als nach Energiestandard erwartet [14]. Dabei sind die Abweichungen je nach Heizungssystem sehr unterschiedlich. Dieser überhöhte Verbrauch von MFH wird durch weitere nationale und internationale Studien bestätigt [2], [16]. In der Literatur werden die nachfolgenden Gründe für einen Mehrverbrauch genannt:

- Höhere Raumtemperaturen als in der Norm angegeben [2]–[4], [6], [9], [12], [16]–[19]
- Überschätzter Kesselwirkungsgrad [2], [6], [11], [18], [20], [21]
- Reell tiefere Belegung und somit kleinerer Personenwärmegewinn [6], [9], [19]
- Fensterlüftung im Winter trotz mechanischer Lüftung [15], [18]
- Ungenügende Luftdichtheitswerte [18], [19]
- Verluste durch Wärmebrücken [6], [18]
- Höherer Warmwasserverbrauch pro Kopf [9]
- Fehlender hydraulischer Abgleich [11]
- „Bio-Feedback“: Fensterlüftung aufgrund von kurzzeitigen Überwärmungssituationen [17]
- Funktions- und Einstellungsprobleme bei Heizung und Warmwasseraufbereitung [2]



In der Studie von Hässig et al. [15] wird ein Zusammenhang zwischen grossem Fensteranteil und unerklärbar hohem Wärmeverbrauch festgestellt.

Je besser die Gebäudehülle, desto höher fallen die prozentualen Abweichungen des Wärmebedarfs aus. Sehr gut gedämmte Gebäude scheinen offensichtlich deutlich sensibler im Betrieb zu sein als Gebäude mit einem schlechteren Dämmstandard [10]. Dies ist naheliegend, da beispielsweise ein offenes Fenster in einem gut gedämmten Gebäude die gleichen absoluten Verluste (kWh) verursacht wie in einem weniger gut gedämmten Gebäude. Selbstverständlich ist daher eine gute Gebäudehülle dennoch vorzuziehen, weil sie in absoluten Zahlen den Energieverbrauch gegenüber einer schlechten Gebäudehülle massgeblich reduziert [6], [7].

Erkenntnisse zum Performance Gap könnten auch einen Einfluss auf die kontrovers geführte Diskussion im Bauwesen bezüglich des anzustrebenden Dämmstandards für zukünftige Bauten haben. Es stellt sich die Frage, ob möglichst viel in die Gebäudehülle investiert werden soll oder ob ein höherer Verbrauch toleriert werden soll, sofern dieser mit erneuerbaren Energiequellen und effizienter Gebäudetechnik gedeckt wird. Bei Neubauten gehen manche deutsche Gebäudefachleute [4] sogar davon aus, dass Heizkennzahlen um 50 kWh/m²a die Regel bleiben werden. Begründet wird dies durch das individuelle Benutzerverhalten, welches durch Sensibilisierungsmassnahmen nur begrenzt gesteuert und verbessert werden kann, so dass bei tieferen Heizkennzahlen immer ein Performance Gap zwischen Bedarf und Verbrauch vorhanden sein wird. Positiver wird das Potenzial durch angepasstes Benutzerverhalten in einer Studie des AHB Zürich [22] eingestuft. Hier geht man von einem nutzerbezogenen Einsparpotenzial für das Raumklima von 20-25% und für den Bereich Warmwasser von 18-30% aus. Der Beweis, dass sich diese Einsparpotenziale tatsächlich realisieren lassen, muss jedoch noch erbracht werden.

Ein immer wieder intensiv diskutiertes Thema bezüglich Energieeinsparungen ist die Komfortlüftung. Eine Studie des AWEL und AHB Zürich [23] zeigt, dass laut Bewohnerbefragungen der Anteil an offenen Kippfenstern in der Nacht unabhängig davon ist ob eine Komfortlüftung eingebaut wurde oder nicht. Dieses Resultat wurde 12 Monate nach der Befragung mit Thermografieaufnahmen bei ähnlichen Klimaverhältnissen überprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass für Bauten mit Komfortlüftung 9% bis 24% der Fenster geöffnet waren, während in Häusern ohne Komfortlüftung zwischen 25% und 40% offene Fenster beobachtet wurden. Dies zeigt, dass das Verhalten der Bewohner, entgegen den Resultaten der Umfrage, doch nicht unabhängig von dieser technischen Einrichtung war.

Im speziellen interessant sind die Untersuchungen und Datenerhebungen bezüglich der gemessenen Raumtemperaturen. Eine Untersuchung [4] von 1.4 Mio. Wohnbauten in Deutschland zeigt, dass in unsanierten Gebäuden (Baujahr vor 1977) die durchschnittliche Raumtemperatur zwischen 18 °C und 19 °C liegt. Dies sind überraschend tiefe Werte. Andererseits steigt die durchschnittliche Raumtemperatur kontinuierlich mit dem Baustandard. Verschiedene Studien [2], [12], [18], [19] haben in Neubauten Raumlufttemperaturen von über 20 °C, sogar bis zu 24 °C gemessen. Dies ist eine deutliche Abweichung zur angenommenen Normtemperatur. Die Krux bei der Raumlufttemperatur liegt darin, dass diese je nach Bedürfnis der Bewohner sehr unterschiedlich ausfällt. Deutlich macht dies eine Auswertung [3] der

Raumlufttemperatur in einem deutschen MFH, für welche in jeder einzelnen Wohnung die Temperatur und der Heizwärmeverbrauch gemessen wurden. In Abbildung 1 wird deutlich, dass eine sehr hohe Varianz im Verbrauch zwischen den einzelnen Wohnungen mit gleichem oder ähnlichem berechnetem Energiebedarf besteht (horizontaler Unterschied zwischen den Messpunkten).

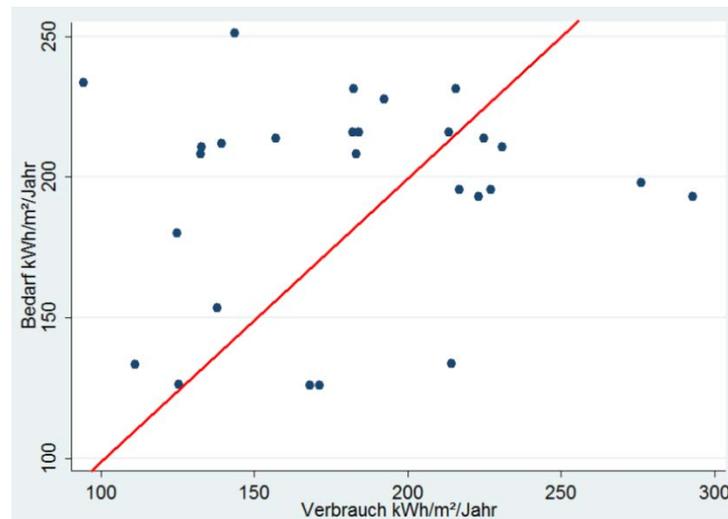


Abbildung 1: Wohnungsvergleich von Bedarf und Verbrauch in einem MFH in Deutschland [3].

Die Literaturrecherche bestätigt die Wichtigkeit der Untersuchung zum Benutzerverhalten. Gill et al. [24] und Majcen [25] gehen davon aus, dass ein Anteil von 50% des Mehrverbrauchs von Energie (Energy Performance Gap) auf das abweichende Benutzerverhalten (zur Norm) zurück zu führen ist. Wir gehen jedoch davon aus, dass noch andere Aspekte dazu beitragen. Auf Grund der Begehungen von 214 Minergie- und MuKEN-2008-Objekten gehen beispielsweise die Autoren/innen von [2] davon aus, dass falsche oder zu konservative Heizungseinstellungen ebenfalls zum Performance Gap beitragen.

Bei der Interpretation der Resultate muss immer auch berücksichtigt werden, ob ein Grenzwert mit Energieträgergewichtung betrachtet wird oder ohne. Zwei grössere Studien [2], [21] belegen die Verfehlung der angestrebten Zertifizierungsgrenzwerte bei Minergie-Bauten. In beiden Studien schneiden fossil beheizte Objekte schlechter ab als solche mit Wärmepumpen.

Die vorliegende Studie soll einen weiteren Beitrag leisten auf dem Weg zur Klärung der Gründe für die Abweichungen der Verbrauchsmessungen von den ursprünglichen Bedarfsberechnungen. Diese Klärung soll die Basis bilden, um mittelfristig den Energy Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern in der Schweiz zu reduzieren.



2 Grundlagen

2.1 Einordnung von Endenergie und Nutzenergie

In vielen Studien zum Performance Gap ist nicht klar, ob sich die Untersuchungen auf die Endenergie oder auf die Nutzenergie beziehen. Deshalb sind die Resultate teilweise zwischen den Studien nicht vergleichbar. Gemessen wird meistens die Endenergie, welche in der Regel einfacher erfassbar ist. Bei der Endenergie handelt es sich um den Verbrauch von Erdgas, Heizöl oder Strom. Im Gegensatz dazu wird die Nutzenergie oft nicht gemessen. Dennoch werden Aussagen zum Performance Gap in Bezug auf den Heizwärmebedarf (Nutzenergie) nach SIA 380/1 [8] gemacht. Dies ist problematisch, da der Nutzungsgrad des Heizungssystems oft nur abgeschätzt werden kann, was die Ergebnisse stark beeinflussen kann.

Ein hoher Performance Gap auf Stufe Nutzenergie bedeutet nicht in jedem Fall, dass das Objekt auch auf Stufe Endenergie einen grossen Performance Gap aufweist. Zum Beispiel kann im Fall einer Wärmepumpe ein erhöhter Heizwärmeverbrauch durch einen kleineren Verbrauch an Warmwasser kompensiert werden. Denn die Wärmepumpe weist im Heizungsbetrieb eine deutlich bessere Jahresarbeitszahl auf als für die Warmwasserbereitstellung.

In dieser Studie erfolgen **alle Betrachtungen auf Stufe Nutzenergie**. Es wurden nur Bauten untersucht, bei denen die Wärmeabgabe mit einem Wärmezähler ausgerüstet ist. Dieser Wärmezähler erfasste in manchen Objekten Warmwasser und Raumheizung, in anderen nur die Raumheizung. Bei der Auswertung der Daten wurden teilweise nur auf Objektdaten zurückgegriffen bei welchen der Raumwärmeverbrauch separat erfasst wurde. Dies ist an den entsprechenden Stellen vermerkt.

2.2 Definition und Umgang mit dem Begriff „Performance Gap“

Die Literaturstudie hat aufgezeigt, dass unter dem Begriff „Performance Gap“ unterschiedliches verstanden wird. Um eine konsistente Nutzung dieses Begriffes zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel eine Unterteilung und Feingliederung des Begriffes vorgeschlagen und im gesamten Projekt verwendet. Um eine breite Akzeptanz der neuen Begriffe und der vorgeschlagenen Unterteilung zu gewährleisten, wurden diese intensiv mit der Begleitgruppe diskutiert.

Generell ist in einem ersten Schritt zu klären auf welche Kennwerte sich die Abweichung (Gap) bezieht. Abbildung 2 stellt verschieden Gaps in den Zusammenhang mit drei Energiekennwerten nach SIA 380/1:2009 (Ziffer 0.3.2 [23]). Zusätzlich wird unterschieden ob die Messwerte witterungsbereinigt sind oder nicht, dies wird in der Abbildung mit zwei unterschiedlichen Balken dargestellt. Nachfolgend werden drei definierte Gaps zwischen Berechnung und Messung beschrieben:

- **Gap A:** Der gemessene und witterungsbereinigte Energiekennwert überschreitet oder unterschreitet den berechneten Wert (Heizwärmebedarf) im *Energienachweis mit Standardnutzung und Standardklima*.

Gap B: Die Berechnung nach SIA 380/1 kann anstatt mit der Standardnutzung und Standardklima (*Energienachweis*) mit zu erwartenden Parametern für die Nutzung und die Klimadaten durchgeführt werden (*Optimierung*). Der **Gap B** beschreibt die Abweichung zwischen dem gemessenen witterungsbereinigten Energieverbrauch und dem laut *Optimierung* vorausberechneten Energiebedarf.

- **Gap C:** Die Berechnungen nach SIA 380/1 werden mit den vor Ort gemessenen Klimadaten und der effektiven Nutzung durchgeführt (*Messwertvergleich*). Diese Berechnung ist nur nachträglich möglich. Der Gap C stellt die Abweichung dar zwischen der Messung ohne Klimakorrektur und der Berechnung nach SIA 380/1 mit den nachträglich bekannten Klimadaten und Nutzung (Benutzerverhalten: Temperatureinstellung etc.).

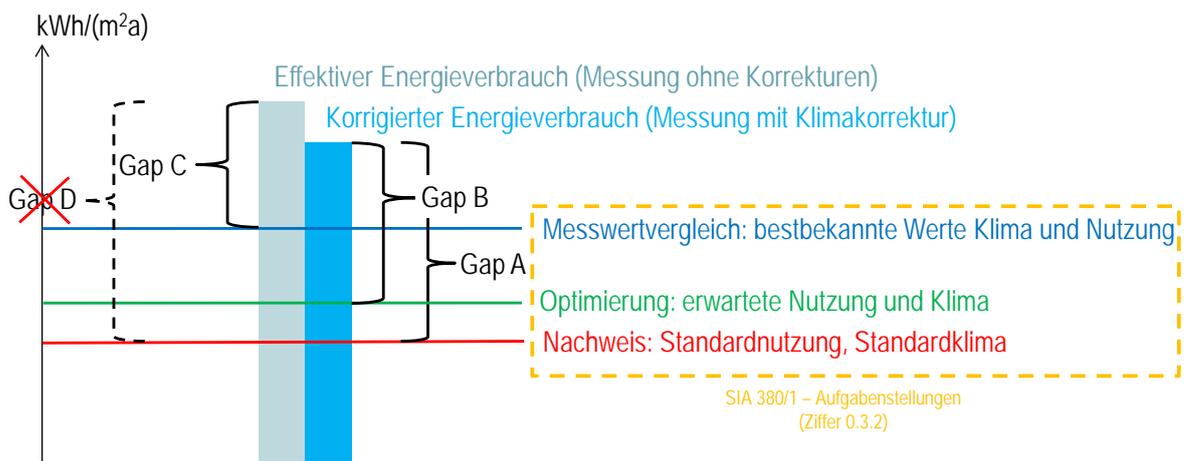


Abbildung 2: Unterschiedliche Definitionen der Abweichung vom berechneten zum realen Energieverbrauch.

Optimal um einen „Performance Gap“ zu bestimmen wäre die Untersuchung des Gap C. Damit erhöht sich die Genauigkeit der Untersuchung, da keine Standardnutzung verwendet wird, welche das reale Benutzerverhalten kaum abbilden kann. Auch können Einflüsse der Klimakorrektur vermieden werden.

Da jedoch in der Realität vor allem Planungswerte vor der Inbetriebnahme des Gebäudes vorhanden sind, wird der „Performance Gap“ mit vorausberechneten Werten verglichen (Gap A und Gap B). Da einerseits in der Praxis häufig genaue Angaben zum Gebäude oder zum Benutzerverhalten (Temperatureinstellung) fehlen oder nicht eingeholt werden, wird meistens der Gap A untersucht. Mit den vorhandenen Berechnungsprogrammen für die SIA 380/1 könnte mit geringem Aufwand der Heizwärmebedarf mit realen Nutzungsdaten und realen Klimadaten neu berechnet, und damit der Gap B bestimmt werden.

Den Gap D, welcher in der Abbildung 2 nur angedeutet ist, wird nicht empfohlen, da ein Vergleich von nicht klimakorrigierten Messwerten aus Sicht der Autoren



keinen Sinn macht. Jedoch ist zu beachten, dass in der Literatur nicht immer klar deklariert ist, ob und wie eine Klimakorrektur durchgeführt worden ist.

Der Begriff „Performance Gap“ wird in der Literatur sehr häufig im Zusammenhang mit dem Mehrverbrauch von Energie verwendet. Der Performance Gap beschreibt jedoch auch die Abweichung bezüglich des erwarteten Komforts oder die Abweichung zwischen Messung und energiepolitischen Grenzwerten wie Primärenergiebedarf oder Treibhausgasemissionen. In Abbildung 3 sind diese Abweichungen unter dem Begriff „Wirkung“ gegliedert, sie können gemessen werden und mit der Erwartung verglichen werden. Die Minimierung oder Beseitigung dieser Abweichungen ist im Interesse der Bauherren, Nutzer, Wärme-Contractor oder der Behörden, da sie ansonsten zu erhöhten Betriebskosten, zu unzufriedenen Nutzern, oder zum Verfehlen politischer Ziele führen können.

Betrachtet man den Performance Gap aus Sicht der Ursachen, kann der Performance Gap weiter unterteilt werden. Dazu ist ein Vorschlag in Abbildung 3 unter der Rubrik „Ursache“ zusammengefasst.

Der **Ambient-Gap** fasst alle Ursachen zusammen welche durch das Klima oder die Umgebung bedingt sind, wie z.B.: Aussenlufttemperatur oder die Verschattung durch Bäume oder andere Gebäude.

Im **User/Usage-Gap** wird die Abweichung vom Nutzerverhalten oder der erwarteten Nutzung des Gebäudes beschrieben. Dieser Bereich kann auch einen Einfluss auf den Technical-Gap haben, da eine erhöhte Heizkurve dazu führen kann, dass zum Beispiel eine Wärmepumpe mit einem schlechteren COP betrieben wird, als in der Planung angenommen.

Der **Norm-Gap** beschreibt die Abweichung zwischen realem Verbrauch und dem berechneten Norm-Bedarf. Hier können falsche Annahmen oder Berechnungsgrundlagen dazu führen, dass mit der Normberechnung die realen Bedingungen nicht abgebildet werden können.

Der **Technical-Gap** beschreibt alle Ursachen die im Zusammenhang mit der Gebäudetechnik oder der Bauphysik auftreten. Dazu gehört auch die Umsetzung und Bauausführung des Gebäudes und der Technik. Als Beispiel kann hier der hydraulische Abgleich genannt werden. Ein weiterer Punkt ist die Betriebsführung, hierzu gehören die Einstellung der Heizkurve oder der Heizgrenze durch den Installateur oder durch den Hauswart.

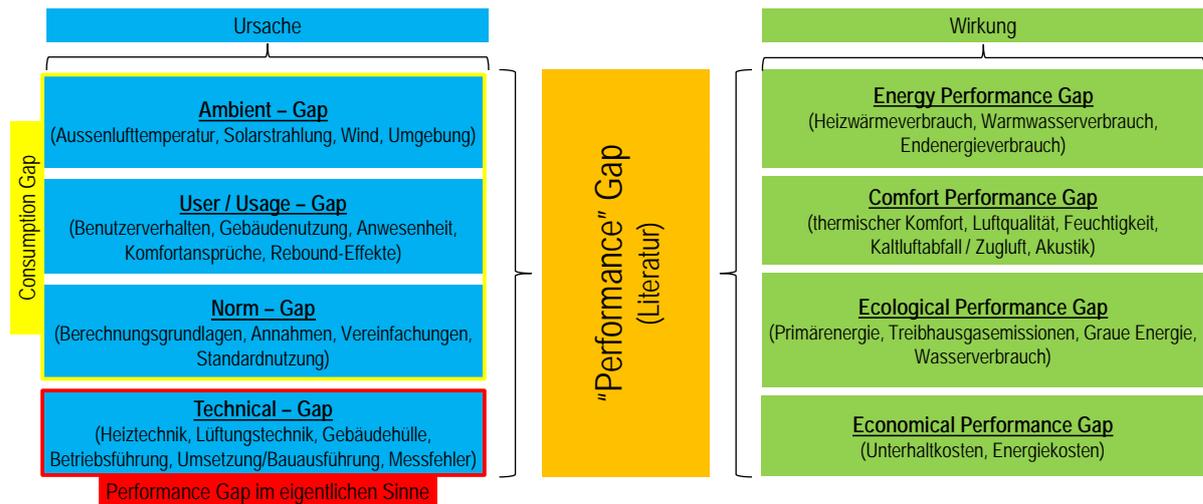


Abbildung 3: Unterteilung und Spezifizierung des Begriffes Performance Gap.

Wie schon im Kapitel 1.2 Literaturstudie beschrieben, ist aus Sicht der Autoren der Begriff „Performance Gap“ nicht geeignet um die gesamte Problematik zu beschreiben und somit ungeeignet als Oberbegriff. Performance Gap impliziert, dass das Gebäude nicht die geplante und erwünschte Leistung erbringt, was jedoch nicht stimmt, wenn die Ursachen für eine Abweichung das Benutzerverhalten oder das Klima sind. Deshalb kann man beim Ambient-, User/Usage- und Norm-Gap eher von einem „Consumption“ Gap ausgehen, da in diesen Fällen nicht die Bauausführung selber ein Problem ist. Aus Sicht der Autoren beschreibt der „Performance Gap“ in der Literatur oft im Grunde den Technical-Gap, da nur in diesem Fall das Gebäude nicht die Leistung liefert die erwartet oder bestellt wurde vom Kunden.

2.3 Abgrenzung des Projektes

Diese Studie konzentriert sich vorwiegend auf die Teilbereiche Technical – Gap, User/Usage-Gap und Energy Performance Gap. Der Ambient-Gap wird insofern berücksichtigt, dass der gemessene Energieverbrauch klimabereinigt mit den Normberechnungen verglichen wird. Folgende Teilbereiche werden aus dem Energy Performance Gap untersucht:

- **Priorität 1:** Unterschied zwischen Bedarf und Verbrauch von Heizwärme (Nutzenergie)
- **Priorität 2:** Unterschied zwischen Bedarf und Verbrauch von Wärme für die Warmwasserbereitstellung

Die Wärmeerzeugung und der Endenergieverbrauch werden bewusst in diesem Projekt nicht betrachtet. Da meistens genaue Messdaten beispielsweise zu Kesselwirkungsgrad etc. fehlen, können Annahmen zur Wärmeerzeugung das Ergebnis an welchem wir interessiert sind verfälschen. Es werden entsprechend auch nur Gebäude ausgewertet, bei denen die Nutzenergie nach Erzeugung und Speicherung gemessen wird.



Es werden ausschliesslich neue oder sanierte Mehrfamilienhäuser ab dem Jahr 2000 berücksichtigt. Der Fokus liegt auf MFHs ab fünf Parteien mit möglichst homogener Nutzung (Wohnen). Jedoch können auch gemischte Nutzungen mitberücksichtigt werden, wie zum Beispiel Verkaufsfläche im Erdgeschoss. Im Projekt werden nur Messdaten verwendet welche mindestens zwei Jahre nach dem Bauende erfasst wurden. Damit soll ein erhöhter Wärmebedarf auf Grund der Bauaustrocknung ausgeschlossen werden.

2.4 Projektgliederung

In einer ersten Phase (Grobanalyse) wurden klimakorrigierte Messdaten zum Wärmeverbrauch mit Berechnungen des Wärmebedarfs gemäss **Energienachweis** (SIA 380/1 [23]) verglichen, was dem Gap A in Abbildung 2 entspricht. In einer zweiten Phase (Feinanalyse) wurden ausgewählte Objekte mit und ohne Energy Performance Gap vertiefter betrachtet und miteinander verglichen. Auf Grund der Erkenntnisse aus Phase eins und zwei wurden in einer dritten Phase (Simulation) mittels Simulationen eines Referenzgebäudes unterschiedliche Einflussgrössen auf den Energiebedarf untersucht.

2.5 Gebäudedaten

Dank der Zusammenarbeit mit verschiedenen Energie-Contracting Unternehmen konnte für die erste Phase (Grobanalyse) von 65 Objekten der Heizwärmeverbrauch ermittelt werden. Der ausgewertete Gebäudepool besteht zu 78% aus nach Minergie zertifizierten Objekten. Der Anteil an zertifizierten Objekten ist so hoch, weil die Beschaffung der Gebäudedaten für Minergieobjekte einfacher war. In dieser Studie wurde kein Vergleich zwischen MuKE n [26] und Minergie-Gebäuden gemacht, da dies einerseits kein Schwerpunkt dieser Arbeit war und andererseits keine Relevanz für das Verständnis der Abweichung erwartet wird. Bei den Objekten handelt es sich um MFH mit Baujahr zwischen 2006 und 2014. Die EBF liegt zwischen 776 m² und 13'600 m². Für fast alle Objekte konnte das Hydraulikschema beschafft werden, in welchem die Vorlauftemperatur und die Heizleistung der Heizgruppe im Auslegungsfall ersichtlich ist.

Bei 10 der untersuchten Objekte handelt es sich um Überbauungen (siehe Tabelle 1), welche mehrere Mehrfamilienhäuser umfassen. Diese wurden als ein Objekt zusammengefasst, weil der Wärmeverbrauch nur für die gesamte Überbauung erhoben wird. Für diese Objekte/Überbauungen wurde die Energiebezugsfläche (EBF) aufsummiert. Parameter wie Gebäudehüllzahl, Fensteranteil und Heizwärmebedarf wurden über einen gewichteten Mittelwert berechnet, die Gewichtung basiert auf der jeweiligen EBF der einzelnen Gebäude.

Aus Gründen des Datenschutzes wurden alle Objekte anonymisiert ausgewertet. Aus dem Bericht sind keine Rückschlüsse auf die einzelnen Gebäude, Bewohner/innen oder Gebäudeeigentümerschaften möglich.



Tabelle 1: Auflistung der ausgewerteten Objekte welche als Gesamtüberbauung betrachtet wurden.

Objekt Nummer	6	7	20	25	37	47	56	57	59	72
Anzahl Häuser	2	2	5	2	4	2	2	2	2	4

Für alle untersuchten Objekte wurden aus dem Minergie-Nachweis oder aus dem behördlichen Energienachweis nachfolgende Parameter ausgelesen:

- EBF
- Gebäudehüllzahl
- Fensteranteil an EBF
- Baujahr
- Heizwärmebedarf mit Standard Luftwechsel
- Heizwärmebedarf mit effektivem Luftwechsel (nur Minergie)
- Heizwärmebedarf Grenzwert
- Brauchwarmwasserbedarf

Je nach Baujahr variiert auch entsprechend die verwendete Ausgabe der SIA 380/1 für die Erstellung des Energienachweises. 23% des Gebäudepols wurde mit der Ausgabe 2001, 31% mit der Ausgabe 2007 und 46% mit der Ausgabe 2009 berechnet. Im Projekt wurde auch berücksichtigt, dass die Ausgabe 2009 sich auf ein anderes Referenzklima bezieht wie die Ausgaben 2001 und 2007. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Klimakorrektur der Messdaten.

2.6 Messdatenaufbereitung

Für alle ausgewerteten Objekte bestand eine Datenauflösung von 2 bis 10 Minuten. Das Brauchwarmwasser (BWW) konnte für 66% der Objekte separat erfasst werden. Die übrigen Objekte hatten einen gemeinsamen Wärmezähler für Heizung und BWW. Auf Grund der Erfahrung der Begleitgruppe, dass der Warmwasserbedarf in der SIA 380/1:2009 [23] überschätzt wird, wurde für 10 Objekte der BWW-Verbrauch genauer untersucht. Die Erkenntnisse daraus (siehe Kapitel 3.1) bestätigen die Vermutung, dass der Bedarf durch SIA 380/1:2009 um etwa 14% überschätzt wird. Auch zeigte sich in der Auswertung, dass der BWW-Verbrauch von Jahr zu Jahr unterschiedlich ausfallen kann. Aus diesem Grund wurde entschieden, für jedes Gebäude den BWW-Bedarf über die Leistungskennlinie zu ermitteln. Details dazu sind im Kapitel 3.1 beschrieben. Vom real gemessenen jährlichen Wärmeverbrauch wurde der so ermittelte BWW-Verbrauch abgezogen, bevor eine Klimakorrektur durchgeführt wurde um den Raumwärmeverbrauch zu ermitteln.

Die Messdaten wurden auf stündliche und tägliche Werte aggregiert. Die Messperiode bezieht sich vorwiegend auf die Jahre 2015 und 2016, jeweils von Februar bis Februar. Die Daten wurden bei der Aufbereitung nach Messfehlern, Ausreissern und Messlücken untersucht und bei Bedarf entsprechend korrigiert². Die Datenverfügbarkeit über alle Objekte und Messparameter war höher als 99%.

² Lineare Interpolation zwischen den Daten (beispielsweise Heizleistung)

Die Klimakorrektur der Messdaten auf das Referenzjahr wird im Kapitel 2.8 beschrieben.

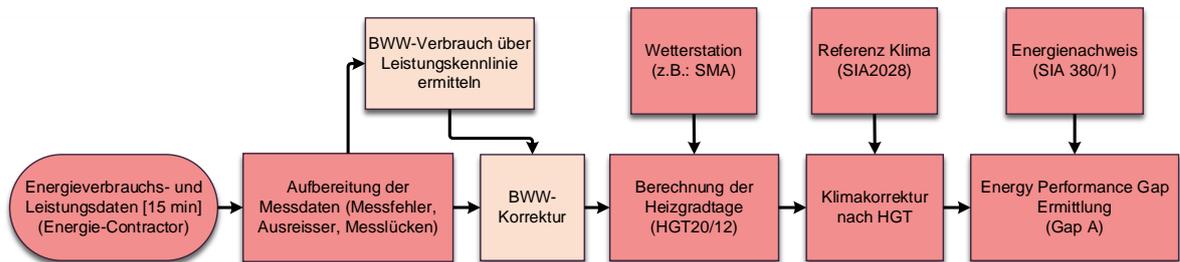


Abbildung 4: Ablaufschema zur angewendeten Messdatenaufbereitung. Die BWW-Korrektur wurde nur durchgeführt wenn der BWW-Verbrauch nicht separat gemessen wurde.

2.7 Klimadaten

Als Referenzklima wurde jeweils die Wetterstation verwendet, die für das jeweilige Gebäude im Energienachweis SIA 380/1 [23] genannt wurde. Nachfolgend sind die verwendeten Klimastationen aufgeführt: Zürich SMA, St.Gallen, Güttingen und Wydnau. Für die Klimakorrektur wurden für das Referenzklima die stündlichen Klimadaten der SIA 2028 [27] verwendet. Werte, die nicht direkt vor Ort gemessen werden wie Globalstrahlung und Sonnenscheindauer, wurden von den entsprechenden Klimastationen bei MeteoSchweiz [28] für die benötigten Messperioden bezogen.

Obwohl die Aussentemperatur, welche für die Regelung der Heizkurve und Heizgrenze verwendet wird, für die meisten Objekt vor Ort gemessen und geloggt wurden, wurde darauf verzichtet, diese für die Analyse zu verwenden. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Temperaturverläufe für eine Winterperiode und eine Sommerperiode beispielhaft für ein Objekt dargestellt. In diesen Abbildungen wird der Temperaturverlauf zwischen der real am Objekt gemessenen Aussentemperatur und der Aussentemperatur an der relevanten Messstation Zürich/Fluntern (SMA) verglichen. Dabei wird deutlich, dass die Temperaturen sich bis zu 3 K unterscheiden. Gerade im Winter weist die gemessene Temperatur am Gebäude höhere Werte auf. Eine Abweichung zwischen Messstation und Vorortmessung kann unterschiedliche Gründe haben:

- Mikroklima wie zum Beispiel an Hanglagen (Thermik) oder Wärmeinsel in Städten
- Infrarotstrahlung durch Abwärme der Hauswand
- Windeinflüsse (Wärmeübergang)
- Temperatursensor ist der kalten Himmelstemperatur frei ausgesetzt
- Temperatursensor wird direkt von der Sonne beschienen

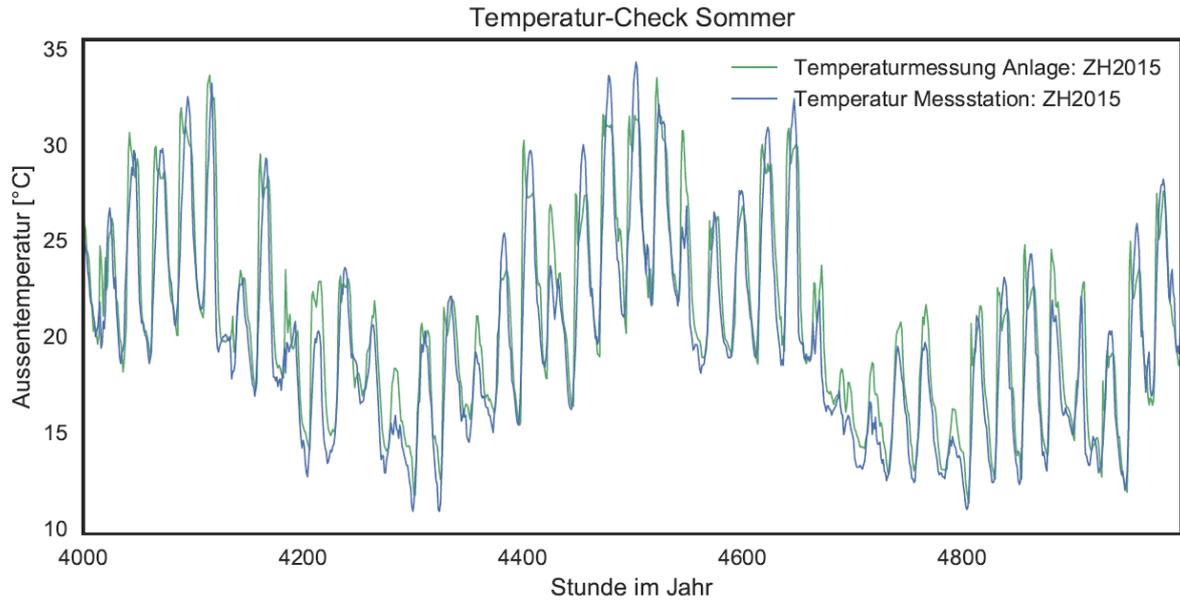


Abbildung 5: Vergleich des Temperaturverlaufs im Sommer von nahegelegener Messstation (Meteostation) und Temperaturmessung am Objekt 19.

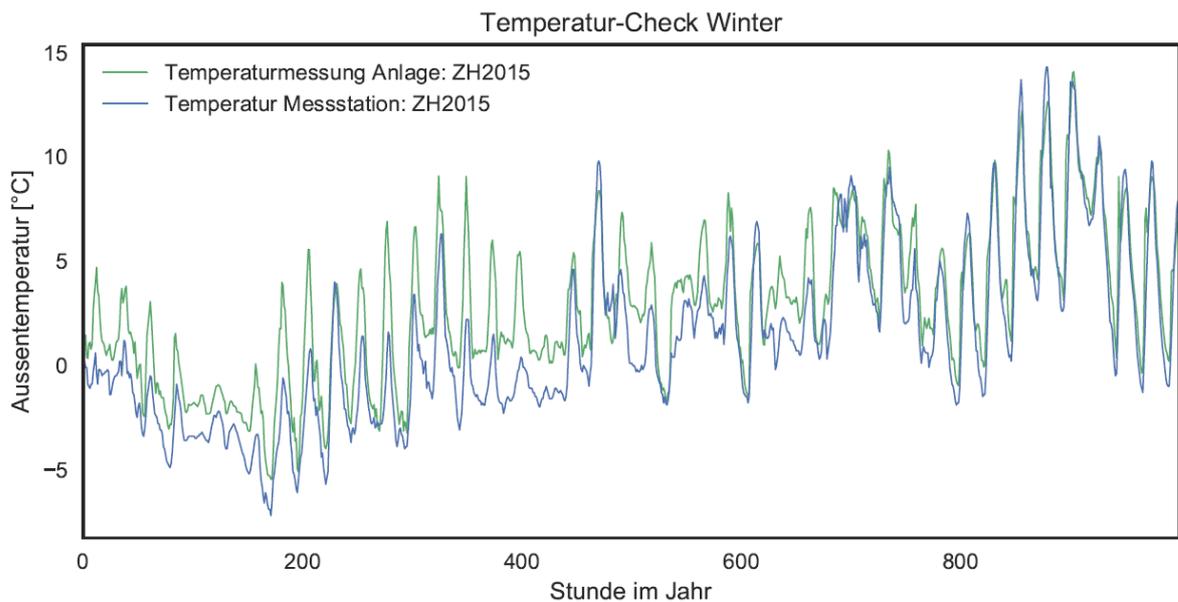


Abbildung 6: Vergleich des Temperaturverlaufs im Winter von nahegelegener Messstation (Meteostation) und Temperaturmessung am Objekt 19.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 ist der Vergleich des Temperaturverlaufs für das Objekt 34 dargestellt. Hier zeigt sich eine noch grössere Differenz zwischen Messstation und Temperaturmessung an der Anlage selber. Grundsätzlich stimmen die Kurven-Verläufe gut überein, jedoch sind die Ausschläge nach oben und unten sehr gross bei den vor Ort gemessenen Temperaturen. Da die Leistungskennlinie (Energiesignatur) eines Gebäudes in der Studie für unterschiedliche Zwecke verwendet wird, wurde untersucht, welchen Einfluss die Wahl des Temperaturprofils auf die Leistungskennlinie hat. In Abbildung 9 findet sich links die Leistungskennlinie basierend auf der Aussentemperatur, die an der Messstation gemessen wurde, und rechts davon die Leistungskennlinie basierend auf der vor

Ort gemessenen Aussenlufttemperatur. Man kann erkennen, dass die Punktwolke weiter rechts zu liegen kommt, wenn die Daten von der Messstation verwendet werden. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Auswertungen, denn die Heizgrenze, respektive Basistemperatur dieses Objektes, variiert je nach Wahl der Aussentemperaturmessung zwischen 16 °C (Aussentemperatur vor Ort) und 16.9 °C (Messstation).

Auf Grund der obigen Analysen wurde in Absprache mit der Begleitgruppe für alle weiteren Berechnungen die gemessene Aussentemperatur der Messstation genommen, welche auch für die Berechnung des Energienachweises verwendet wurde. Dies hat zur Folge, dass das Mikroklima am Objekt nicht ideal abgebildet werden kann und somit eine Ungenauigkeit bei der Berechnung des Energy Performance Gap's in Kauf genommen werden muss. Jedoch wird diese Ungenauigkeit von den Autoren als kleiner eingeschätzt, als wenn die objektspezifischen Temperaturen verwendet werden. Eine Abschätzung der Messunsicherheiten ist im Kapitel 2.9 dokumentiert.

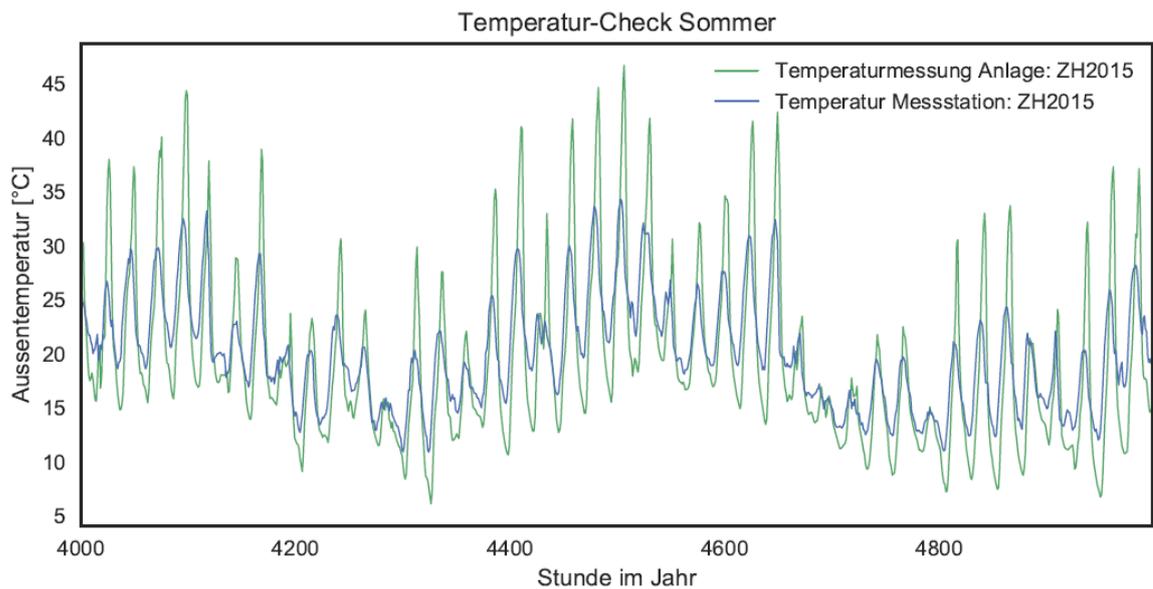


Abbildung 7: Vergleich des Temperaturverlaufs im Sommer von nahegelegener Messstation (Meteostation) und Temperaturmessung am Objekt 34.

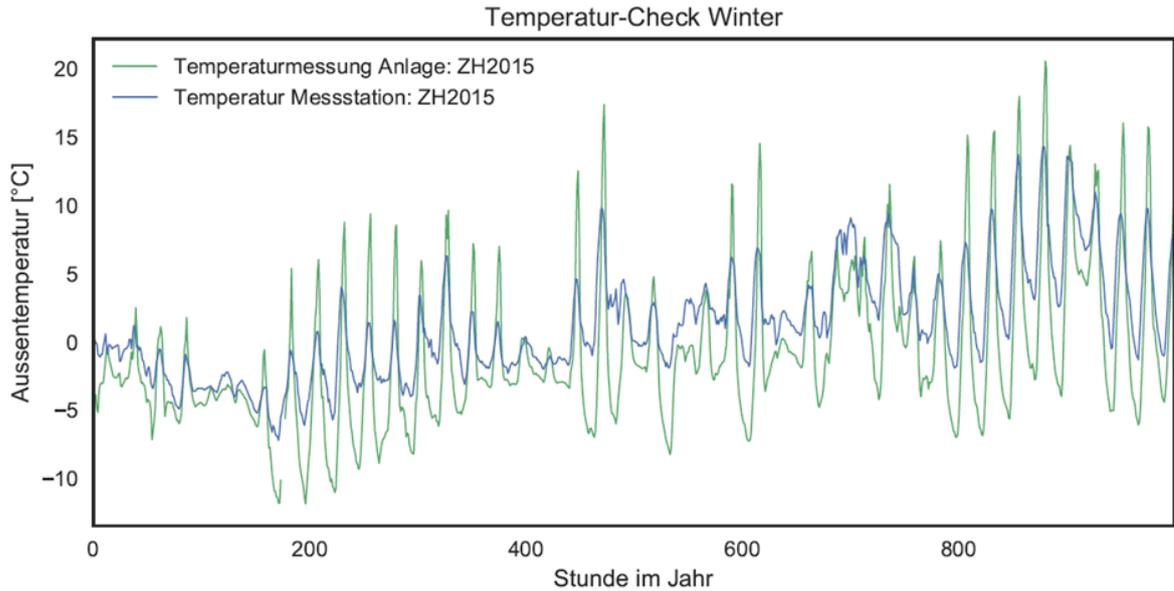


Abbildung 8: Vergleich des Temperaturverlaufs im Winter von nahegelegener Messstation (Meteostation) und Temperaturmessung am Objekt 34.

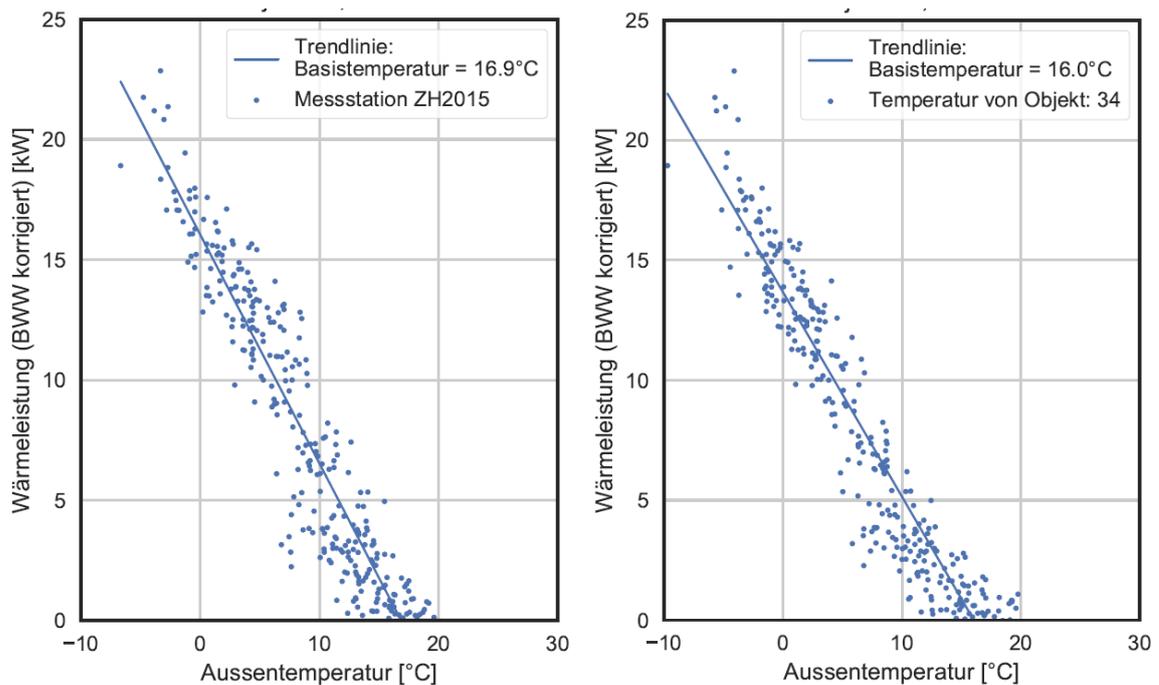


Abbildung 9: Leistungskennlinie (Tagesmittelwert) von Objekt 34 mit gemessener Aussentemperatur der Meteostation (links) und mit vor Ort gemessener Aussentemperatur am Objekt selber (rechts).

Im Projekt wurden für die Auswertungen neben der Aussenlufttemperatur auch die Globalstrahlung und die effektive und relative Sonnenscheindauer verwendet. Die relative Sonnenscheindauer, von Mitternacht bis Mitternacht gerechnet, ist das Verhältnis der effektiven Sonnenscheindauer zur maximal möglichen, wenn keine Wolken die Sonne bedecken würden. Wenn die direkte Solarstrahlung 200 W/m^2 überschreitet, gilt die Strahlungsintensität als Sonnenschein und trägt zur Sonnenscheindauer bei [29].



2.8 Klimakorrektur – Varianten

Um Bedarf (Energienachweis) und Verbrauch (Messung) eines Gebäudes zu vergleichen, bedarf es einer Klimakorrektur des gemessenen Energieverbrauchs. Denn der Energieverbrauch ist vom Wetter und vom Klima, welches von Jahr zu Jahr variiert, abhängig. Dabei wird der gemessene Energieverbrauch auf ein Referenzjahr umgerechnet, welches bei der Berechnung des Energienachweises als Bezugsklima dient. Dabei wird neu von der SIA nicht mehr die Korrektur mit Heizgrenztagen (HGT) empfohlen sondern die Methode der akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) nach SIA 380:2015 [30]. Bei der Anwendung der ATD Methode hat sich im Projekt jedoch gezeigt, dass ein gewisser Spielraum besteht bei der Festlegung der Parameter. Das hat als Folge, dass die Korrektur für die Messdaten eines Objektes unterschiedlich ausfallen kann und somit auch der ermittelte Energy Performance Gap variieren kann. Nachfolgend wird das Verfahren der neuen SIA 380:2015 kurz erläutert, und auf die entsprechenden Parameter hingewiesen.

Im Wesentlichen wird die Klimakorrektur über die Tagesmittelwerte der Aussenlufttemperatur bestimmt. Dabei wird die Differenz zwischen einer Basistemperatur und den Aussenlufttemperaturen gemäss nachfolgender Formel berechnet:

$$\theta_{\Sigma,per} = \sum(\theta_b - \theta_{e,m}), \text{ über alle Tage der Berechnungsperiode mit } (\theta_b - \theta_{e,m}) > 0$$

θ_b Basistemperatur (häufig mit 12 °C angenommen, empfohlener Standardwert)

$\theta_{e,m}$ Tagesmittelwert der Aussentemperatur [°C]

Der Term $\theta_{\Sigma,per}$ entspricht den ATD für die Messperiode, welche in diesem Projekt immer einem ganzen Jahr entspricht. Mit nachfolgender Formel wird der gemessene Energieverbrauch auf das Referenzjahr umgerechnet:

$$E_{H,Ref} = \frac{\theta_{\Sigma,per,Ref}}{\theta_{\Sigma,per}} \cdot E_H$$

$\theta_{\Sigma,per,Ref}$ Akkumulierte Temperaturdifferenz (ATD) basierend auf dem Referenzklima in der Berechnungsperiode [°C]

$\theta_{\Sigma,per}$ Akkumulierte Temperaturdifferenz (ATD) basierend auf den Messtemperaturen in der Berechnungsperiode [°C]

E_H Kumulierter gemessener Energieverbrauchswert der Berechnungsperiode [kWh]

$E_{H,Ref}$ Kumulierter klimakorrigierter Energieverbrauchswert der Berechnungsperiode [kWh]



Beim oben beschriebenen Vorgehen ist nur die Basistemperatur eine frei wählbare Variable. Die SIA 380: 2015 empfiehlt, wenn keine genauen Angaben zum Gebäude bestehen, eine Basistemperatur von 12 °C zu wählen (Variante 1). Wenn jedoch detaillierte Messungen vorhanden sind, kann mit einer Leistungskurve (Energiesignatur) die Basistemperatur bestimmt werden (Variante 2). Eine dritte Variante bietet die Möglichkeit, bei bekannter Gebäudehüllzahl und bekanntem Dämmstandard die Basistemperatur zu berechnen. Um den Einfluss der drei Varianten auf die Basistemperatur und in der Folge auf die Bestimmung des Energy Performance Gap zu prüfen, werden beispielhaft für ein Objekt alle drei Varianten gerechnet und am Schluss miteinander verglichen.

Erste Variante:

Es wird eine fixe **Basistemperatur von 12 °C** angenommen.

Zweite Variante:

In dieser Variante wird die Basistemperatur über die Leistungskennlinie (Energiesignatur) für jedes Objekt separat ermittelt. Dabei wird die mittlere Tageswärmeleistung (P_{th}) der mittleren täglichen Aussenlufttemperatur gegenübergestellt. Dies führt zu einer Punkteschar welche in Abbildung 10 für das Objekt 17 dargestellt ist.

Wenn keine separate Wärmemessung für die Brauchwarmwassererzeugung vorhanden ist, werden die Messpunkte um den Wärmebedarf des Brauchwarmwassers korrigiert. Dabei werden als erstes alle Messpunkte ($P_{th} > 0$) über 20 °C Aussenlufttemperatur aus dem Plot geschnitten, dann der Durchschnittswert der abgeschnittenen Punkte bestimmt, und dieser Wert von der Wärmeleistung der übrigen Messpunkte abgezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass über 20 °C in der Regel nur noch Wärme für das Brauchwarmwasser bereitgestellt wird. Wie im Kapitel 2.7 beschrieben, wird auch in diesem Fall die Aussenlufttemperatur der nächstgelegenen Klimastation verwendet.

Nach der Datenaufbereitung wird die Basistemperatur mittels einer Regressionsgeraden ermittelt. Die Basistemperatur entspricht dem Wert auf der x-Achse (Wärmeleistung = 0), bei welchem die Regressionsgerade diese schneidet. Im Fall des Objektes 17 erhält man so eine **Basistemperatur von 19 °C** für die Bestimmung nach Variante 2. Dieser Wert ist 7 K höher als beim Vorgehen nach Variante 1.

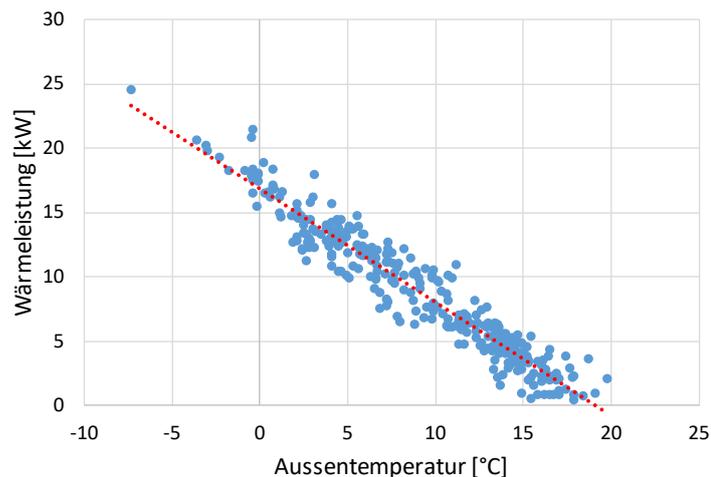


Abbildung 10: Energiesignatur mit gemittelten Tageswerten für das Objekt 17 für die Messperiode 2014 mit separater BWW-Erfassung.

Dritte Variante:

Die Basistemperatur kann laut SIA 380:2015 (G.3.4) [30] auch mit folgender Formel angenähert werden, in welcher A_{th}/A_E der Gebäudehüllzahl und θ_i dem Sollwert der Raumtemperatur entspricht:

$$\theta_b = A_{th}/A_E \cdot 2.5^\circ\text{C} + \theta_{b,0} + 0.8 \cdot (\theta_i - 20^\circ\text{C})$$

Der Basistemperaturbeiwert $\theta_{b,0}$ wurde vereinfacht nach der Norm mittels einer linearen Interpolation wie in Abbildung 11 dargestellt, bestimmt. Dabei entsprechen die einzelnen Werte in der Abbildung dem Dämmstandard des Gebäudes. Das Wärmedämmniveau bezieht sich auf den Einzelbauteil-Grenzwert der SIA 380/1 Ausgabe 2009 [8].

Zu beachten ist, dass bei dieser Berechnung eine erhöhte Innentemperatur zu höheren Werten für die Basistemperatur führt. Dies ist implizit auch bei der Berechnung nach Variante 2 anzunehmen, jedoch nicht bei der Berechnung nach Variante 1.

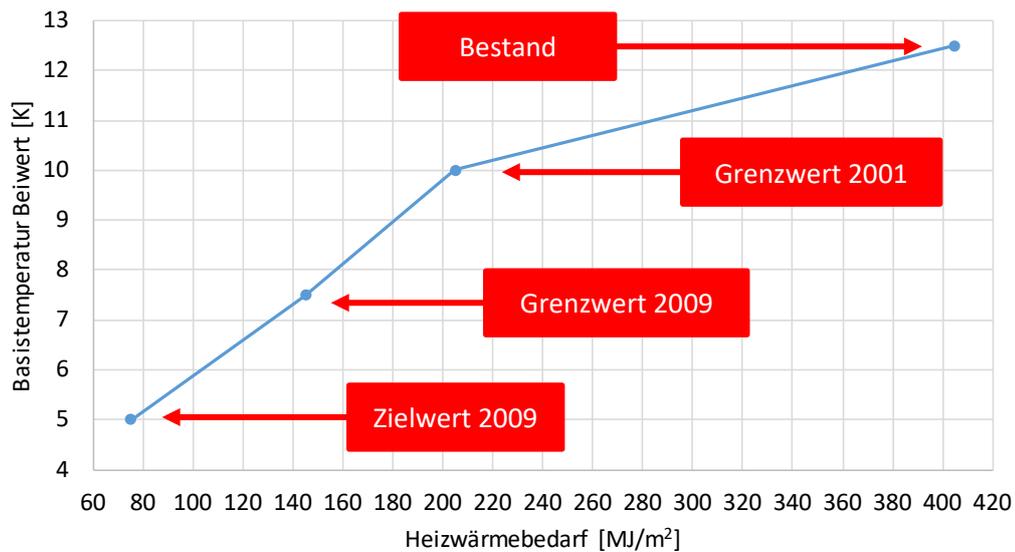


Abbildung 11: Bestimmung des Basistemperaturbeiwertes über den Gebäudedämmstandard nach SIA 380, diese Abbildung stellt die Tabelle im Abschnitt G.3.4 der SIA 380 grafisch dar.

Für das Gebäude 17 ergibt sich bei einer Gebäudehüllzahl von 1.26, einer Standard-Innentemperatur von 21 °C und einem Basistemperaturbeiwert von ungefähr 6.5 K (Heizwärmebedarf 120 MJ/m² laut Energienachweis) eine abgerundete **Basistemperatur von 10 °C**.

Schlussfolgerung:

Der Vergleich der drei Varianten zur Ermittlung der Basistemperatur zeigt für ein reales Beispielobjekt eine grosse Differenz zwischen den Varianten. Insbesondere die beiden Berechnungsvarianten 2 und 3 weisen eine Differenz der Basistemperatur von 9 °C aus. Welchen Einfluss dies auf die Klimakorrektur der Messwerte hat, wird nachfolgend dargestellt. In Abbildung 12 ist der berechnete Heizwärmebedarf nach SIA 380/1:2009 dem gemessenen Heizwärmeverbrauch gegenübergestellt. Zusätzlich zum unkorrigierten Messwert ist auch der klimakorrigierte Messwert für drei unterschiedliche Basistemperaturen aufgeführt. Da die Messperiode 2014 wärmer war als das Referenzjahr, wird durch die Klimakorrektur der Messwert erhöht. Dabei zeigt sich, dass die Erhöhung stärker ausfällt, je tiefer die angenommene Basistemperatur ist. Damit wird deutlich, dass die Wahl der Basistemperatur einen direkten Einfluss auf die Ermittlung des Energy Performance Gap hat. Denn dieser wird aus dem Verhältnis von Bedarf (Energienachweis) zu Verbrauch (klimakorrigierter Messwert) gebildet.

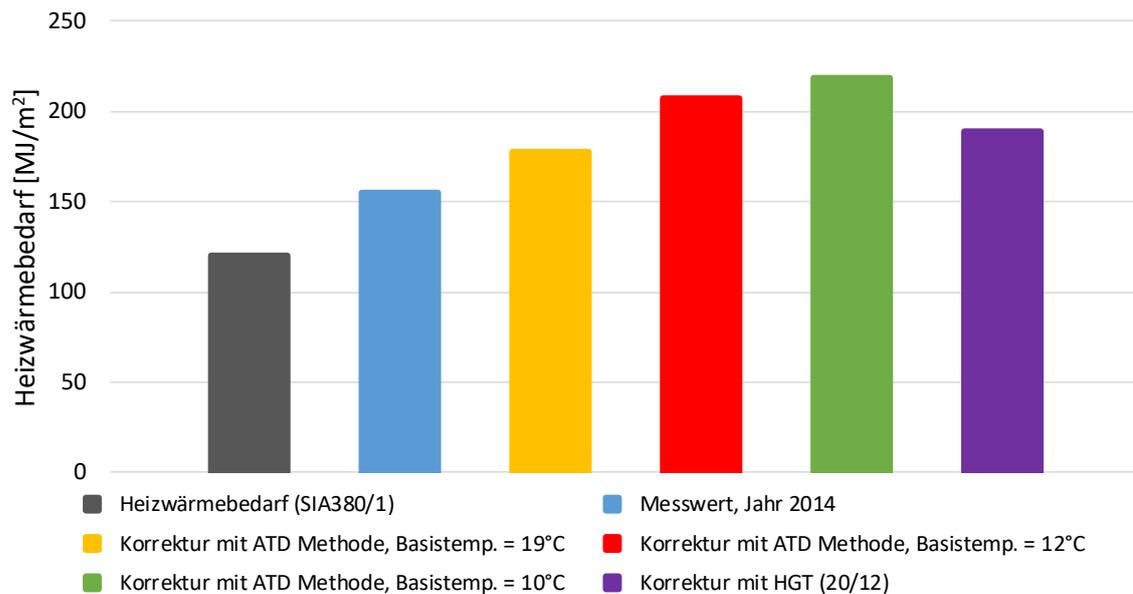


Abbildung 12: Vergleich von Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch mit und ohne Klimakorrektur nach ATD für das Gebäude 17 mit unterschiedlich ermittelten Basistemperaturen (T_b).

Wenn man die Energiesignatur des Gebäudes betrachtet (Abbildung 10), kann man davon ausgehen, dass die Heizgrenze und die Heizkurve bei diesem Objekt wahrscheinlich zu hoch eingestellt sind, da man davon ausgehen kann, dass bei Tagesdurchschnittstemperaturen von 17 °C bei einem gut gedämmten Gebäude eine Beheizung nicht mehr notwendig ist. Diese suboptimale Einstellung ist wahrscheinlich eine von mehreren Ursachen für den gegenüber den Bedarfsberechnungen stark überhöhten Heizwärmeverbrauch dieses Gebäudes. Verwendet man die Variante 2 (gelber Balken) für die Ermittlung der Basistemperatur, wird ersichtlich, dass der klimabereinigte Heizwärmeverbrauch deutlich tiefer ist, als bei den anderen Varianten. Dabei ist zu beachten, dass die Variante 2 die Basistemperatur mittels einer Energiesignatur berechnet, welche durch falsch eingestellte Parameter von Heizkurve und Heizgrenze mit beeinflusst wird. Bei diesem Vorgehen ist die ermittelte Basistemperatur nicht unabhängig vom Performance Gap. Aus Sicht der Autoren, wird mit der Bestimmung der Basistemperatur nach Variante 2 nicht nur eine Klimakorrektur vorgenommen, sondern bis zu einem gewissen Grad auch ein Teil des Performance Gap des Gebäudes bereits weggerechnet.

Auf Grund der oben beschriebenen Erkenntnisse wurde die ATD-Methode noch weiter untersucht und über mehrere Messjahre mit der älteren Heizgradtage-Methode (HGT) [31] verglichen. In Abbildung 13 wird der Klimakorrekturfaktor für die Klimastation Zürich (SMA) mit unterschiedlichen Basistemperaturen nach der ATD-Methode und nach der HGT-Methode verglichen. Der Klimakorrekturfaktor wird aus dem Verhältnis zwischen ATD-Referenz und ATD-Messperiode, respektive HGT-Referenz und HGT-Messperiode ermittelt. Wenn der Faktor grösser als eins ist, bedeutet dies, dass der gemessene Heizwärmeverbrauch nach oben korrigiert werden muss, um den Wert für das Referenzklima zu erhalten, weil die Messperiode wärmer war als das Norm-Referenzjahr.

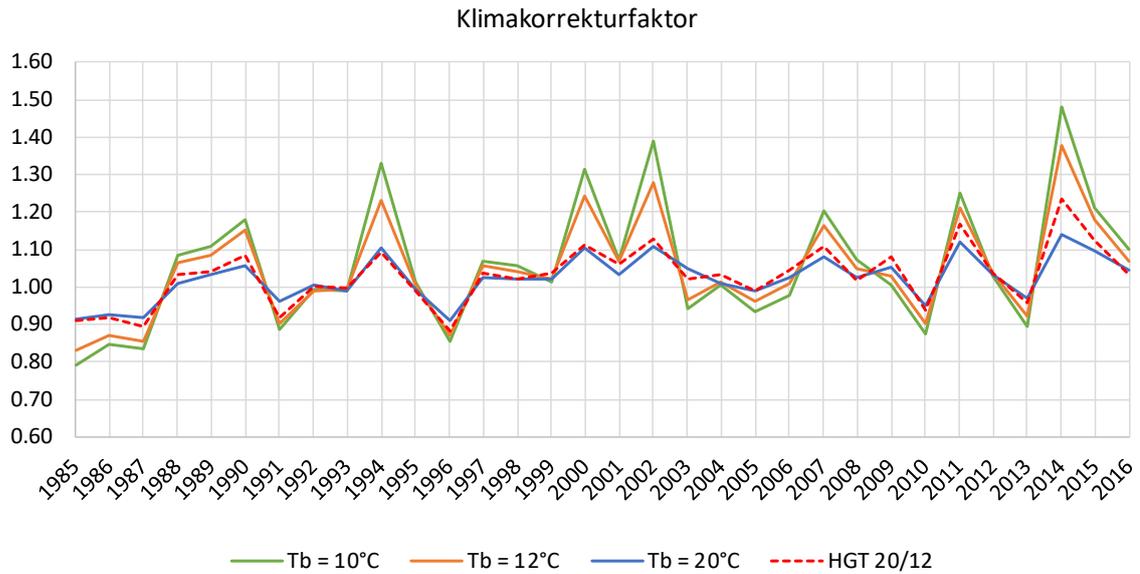


Abbildung 13: Vergleich des Klimakorrekturenfaktors berechnet mit der ATD-Methode und der HGT-Methode für 32 Jahre unter Annahme verschiedener Basistemperaturen (Klimastation Zürich SMA).

Generell kann man feststellen, dass die ATD-Methode den Heizwärmeverbrauch stärker als die HGT-Methode korrigiert, ausgenommen man verwendet eine sehr hohe Basistemperatur von 20 °C.

Die weiter oben beschriebenen Effekte wurden für fünf konkrete Objekte untersucht. Nachfolgend sind in Abbildung 14 bis Abbildung 18 für vier der Gebäude über sechs Jahre der Heizwärmeverbrauch ohne Klimakorrektur und mit unterschiedlicher Klimakorrektur aufgeführt. Das fünfte Gebäude (52) weist eine verkürzte Messperiode von 2012 bis 2016 auf.

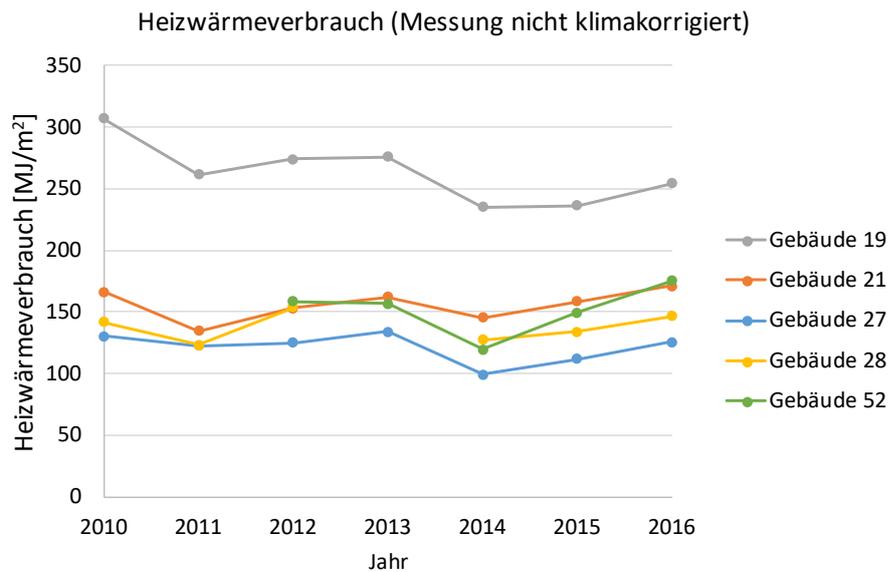


Abbildung 14: Heizwärmeverbrauch für fünf MFH ohne Klimakorrektur.

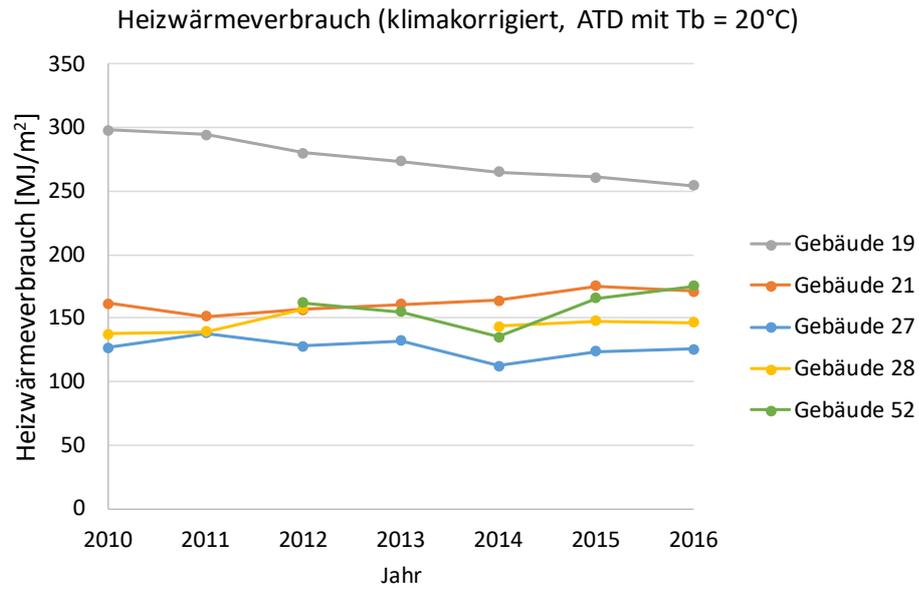


Abbildung 15: Heizwärmeverbrauch für fünf MFH mit ATD Klimakorrektur und einer Basistemperatur von 20°C .

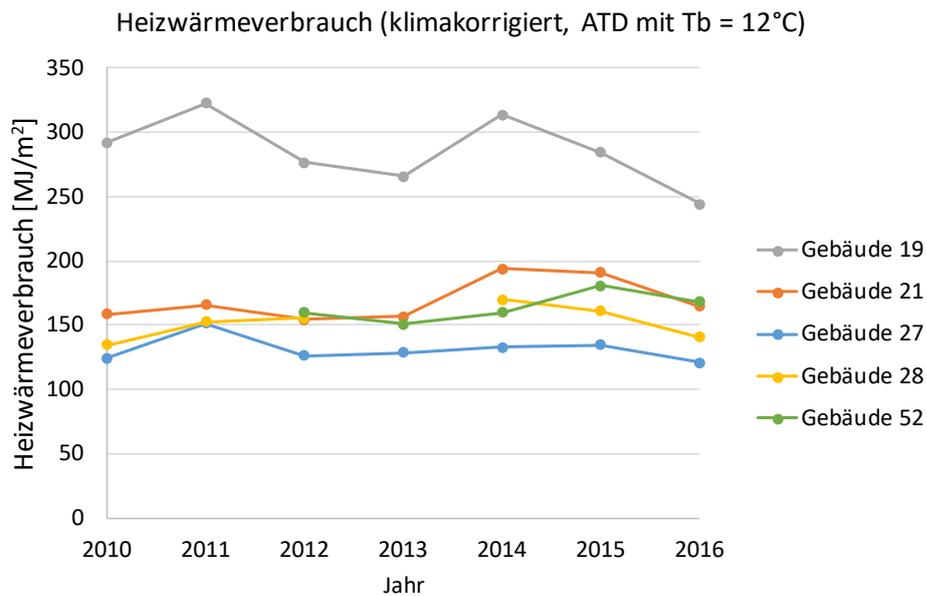


Abbildung 16: Heizwärmeverbrauch für fünf MFH mit ATD Klimakorrektur und einer Basistemperatur von 12°C .

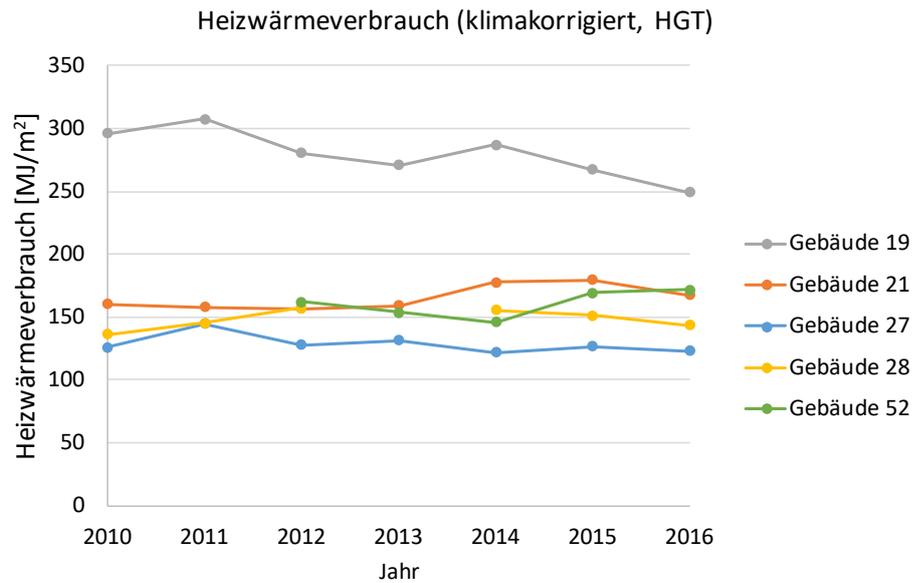


Abbildung 17: Heizwärmeverbrauch für fünf MFH mit HGT (20/12) Klimakorrektur.

Die Abbildung 17 lässt vermuten, dass für die ausgewiesene Messperiode die Klimakorrektur mit der HGT-Methode zu einer gleichmässigeren Korrektur über mehrere Jahre führt gegenüber der ATD-Methode. Dies bestätigt sich, wenn man die Standardabweichung des Heizwärmeverbrauchs für die einzelnen Gebäude für die gesamte Messperiode betrachtet. In der Abbildung 18 ist die Standardabweichung für zwei Klimakorrekturvarianten aufgeführt.

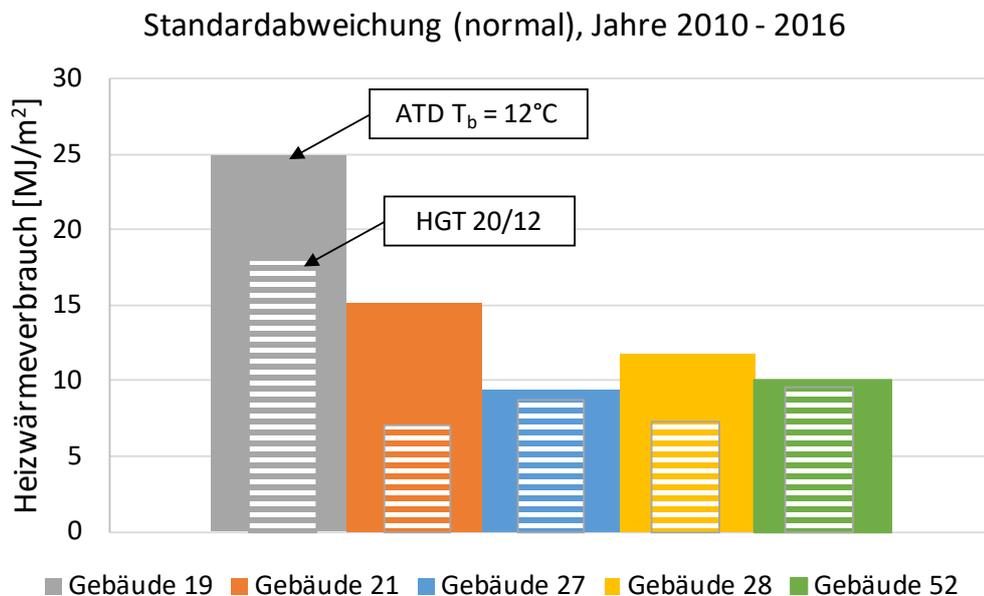


Abbildung 18: Berechnete Standardabweichung des Heizwärmeverbrauchs für die Jahre 2010-2016 mit Klimakorrektur gemäss ATD-Variante 1 und gemäss HGT-Methode (Gebäude 52 verkürzte Messperiode 2012-2016).



Die oben beschriebenen Ergebnisse führten dazu, dass für das vorliegende Projekt alle Klimakorrekturen nach der schon lange in der Praxis verwendeten HGT-Methode [31] durchgeführt wurden, mit Berücksichtigung des Wechsels des Referenzklimas zwischen 2007 und 2009.



2.9 Messunsicherheit und Fehlerrechnung

In diesem Kapitel wird eine Abschätzung der Messunsicherheit beschrieben, welche einen Einfluss auf die Bestimmung des Energy Performance Gap haben kann. Die so genannte "Fehlerrechnung" basiert auf dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ der ISO [32]. Nachfolgend sind in der Tabelle 2 die beiden Grundgleichungen für die Bestimmung des klimakorrigierten Verbrauchs aufgeführt. Zusätzlich zu den Gleichungen werden für jeden Wert die angenommene maximale Abweichung und die berechnete Standardabweichung mit einem Vertrauensintervall von 1σ ($\pm 63\%$) aufgeführt. Auf eine Berücksichtigung möglicher Fehler bei der Berechnung des Bedarfs (Energienachweis) wurde verzichtet, da ansonsten die Fehlerrechnung unverhältnismässig aufwändig würde. In den Berechnungen wurde eine maximale Abweichung von 4% für die Energiemessung und 3 K für die Aussenlufttemperaturmessung angenommen. Die Abweichung zur Energiemessung beruht auf Erfahrungen aus unterschiedlichen Pilot- und Demonstrationsprojekten. Die hohe Abweichung bei der Temperaturmessung gründet auf den Resultaten im Kapitel 2.7 (hohe Differenz zwischen Messstation und Messung vor Ort).

Tabelle 2: Verwendete Werte für die Berechnung der Messunsicherheit des klimakorrigierten Energiemesswertes. Die verwendeten Bezeichnungen stützen sich auf die SIA 380

$E_{H,Ref} = \frac{HGT_{20/12,Ref}}{HGT_{20/12,per}} \cdot E_{H,per}$	Wert	Variable	Maximale Abweichung	Standardabweichung (1σ)
HGT Referenzjahr	$HGT_{20/12,Ref}$	-	-	-
gemessener Energiebedarf	$E_{H,per}$	U_1, u_1	$\pm 4\%$	$\pm 2.3\%$
HGT Messperiode	$HGT_{20/12,per}$	$u_{HGT_{20/12,per}}$	-	$\pm 18.5\%$
$HGT_{20/12,per} = \sum (20^\circ C - \theta_{e,m})$ für $\theta_{e,m} \leq 12^\circ C$				
Tagesmitteltemperatur	$\theta_{e,m}$	U_3, u_3	$\pm 3K$	$\pm 1.73K$

Die maximale Abweichung der einzelnen Terme wurde mit nachfolgender Formel in eine Standardabweichung umgerechnet:

$$u_i = \sqrt{\frac{U_i^2}{3}}$$

Die relative Abweichung für den Nenner $HGT_{20/12,per}$ wurde aus der Division zwischen HGT ohne Messfehler und HGT mit einer Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur berechnet, nachfolgend die Gleichung dazu:

$$u_{\theta_{\Sigma,per}} = \left(1 - \frac{HGT_{20/12,per}}{HGT_{20/12,per} \text{ (mit } \theta_{e,m} \pm 1.73K)} \right) \cdot 100\% = \pm 18.5\%$$



Die gesamte relative Messunsicherheit für $E_{H,Ref}$ für eine Heizgrenze von 12 °C, einer Raumtemperatur von 20 °C und den Temperaturdaten der Messstation Zürich (SMA), wurde für ein Vertrauensintervall von 2σ ($\pm 95\%$) wie folgt berechnet:

$$u_{E_{H,Ref}} = 2 \cdot \sqrt{(u_{\theta_{\Sigma,per}})^2 + (u_1)^2} = 2 \cdot \sqrt{(18.5\%)^2 + (2.3\%)^2} = \pm 37.2 \%$$

Fazit: Die Messunsicherheit ist bei der Bestimmung des Energy Performance Gap bedeutsam. Die relative Abweichung des klimakorrigierten Energieverbrauchs weist eine Unsicherheit von etwa $\pm 37\%$ auf. Die Hauptursache liegt in der Bestimmung der Unsicherheit der HGT der Messperiode, welche wiederum von der Aussentemperaturmessunsicherheit abhängig ist. Damit wird deutlich, dass gerade bei einer Auswertung eines einzelnen Gebäudes die Aussentemperaturmessung vor Ort den ermittelten Energy Performance Gap stark beeinflussen kann.



3 Resultate Phase 1: Grobanalyse des Gebäudepools

In diesem Kapitel werden einzelne Gebäudeparameter über den gesamten Gebäudepool untersucht. Es wird nicht unterschieden zwischen Minergie- oder MuKEEn-Gebäude, denn der allenfalls unterschiedliche Performance Gap bei unterschiedlichem Baustandard stand nicht im Fokus der Studie. Zudem handelt es sich bei allen untersuchten Gebäuden um neuere Gebäude mit Baujahr 2009 oder später. Es kann daher auch bei den MuKEEn-Gebäuden von einem guten Dämmstandard ausgegangen werden.

Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich **für alle Gebäude** auf einen Norm-Heizwärmebedarf welcher bei **Standardluftwechsel** berechnet wurde. Der effektive Luftwechsel, wie er in Minergie-Berechnungen verwendet wird, konnte nicht für alle Gebäude ermittelt werden. Grundsätzlich hat sich in der Auswertung gezeigt (siehe Abbildung 23), dass der Energy Performance Gap mit Berücksichtigung des effektiven Luftwechsels zunimmt. Dies hat nichts mit der Zertifizierung selber zu tun, sondern mit den gewählten Randbedingungen für die Berechnung. Der effektive Luftwechsel ist grundsätzlich tiefer als der Standardluftwechsel, was dazu führt, dass der mit effektiven Luftwechsel berechnete Heizwärmebedarf tiefer ausfällt als der Norm-Heizwärmebedarf und dementsprechend die Differenz zwischen Messung und berechnetem Heizwärmebedarf zunimmt.

Auswertung: Generell wird in den nachfolgenden Auswertungen der Einfluss von Gebäudeparametern wie Gebäudehüllzahl, EBF etc. auf den Energy Performance Gap untersucht. Der Energy Performance Gap wird als Faktor (EPG-Faktor) ausgewiesen, welcher aus der Division zwischen klimakorrigierten Heizwärmeverbrauch (Messung) und Norm-Heizwärmebedarf (Berechnung, Planung) ermittelt wird. Wenn nicht anders vermerkt, bezieht sich die Auswertung auf das Jahr 2015. Für die Klimakorrektur wurde mit der HGT Methode gearbeitet (siehe Kapitel 2.8). Die grafische Auswertung (Plots) beruht immer auf den Daten des gesamten Gebäudepools (n = 65), bei einer Abweichung (zum Beispiel nur Gebäude mit separater Heizwärmeverbrauchsmessung) wird dies in der Abbildungsbeschriftung vermerkt.

Ob eine Korrelation zwischen zwei Parametern vorhanden ist, wird auf Grund von Cohen [33] mittels der Effektstärke bestimmt. Dabei wird die Effektstärke (r) aus der Wurzel des Bestimmtheitsmasses (R^2) berechnet. Dabei entspricht ein r von 0.1 (10%) einem kleinem, r = 0.3 (30%) einem mittleren und r = 0.5 (50%) einem grossen Effekt. Es ist jedoch zu beachten, dass die ausgewiesenen Korrelationen sehr stark davon abhängen wie gross die Datenmenge ist und in welcher Qualität diese vorliegt.

3.1 Analyse zum Brauchwarmwasser

3.1.1 Vergleich mit Standardnutzungsbedingungen

In dieser Studie wurde kein Fokus auf den Brauchwarmwasserverbrauch (BWW) gelegt. Allerdings ist der BWW-Verbrauch bei der Auswertung des Heizwärmeverbrauchs von Bedeutung, wenn keine separate Messung vorhanden



ist. Da der BWW-Verbrauch bei gut gedämmten Gebäuden bis zu 50% des Wärmebedarfs ausmachen kann, ist eine Korrektur für die Analyse des Energy Performance Gap unabdingbar. Es wurden zehn Gebäude mit separater BWW-Messung und Messdaten aus drei Jahren näher untersucht. Von zwei Gebäuden gibt es nur Messdaten für ein Jahr. Es wurden jene Gebäude gewählt, bei denen die Datenqualität am höchsten war. In Abbildung 19 ist die relative Abweichung des gemessenen Verbrauchs zum Normverbrauch ($75 \text{ MJ/m}^2_{(\text{EBF})}$, SIA 380/1:2009 [8]) über drei Jahre dargestellt. Es sind nur die Objekte aufgeführt, die mindestens zwei Messjahre aufweisen. Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen Werte im Gegensatz zu den Normwerten die Wärmeverluste von Leitung, Speicher und Zirkulation mit enthalten. In der Praxis wird jedoch der Normwert von $75 \text{ MJ/m}^2_{(\text{EBF})}$ oft als BWW-Verbrauch mit Verlusten verwendet (Anteil Verluste ca. 30%). In zwei Gebäuden kam für kurze Zeit der elektrische Heizstab im BWW-Speicher zum Einsatz. Allerdings betrug der Anteil an Wärme über den Heizstab lediglich 2%. Sechs Objekte weisen zum Teil einen deutlich tieferen BWW-Verbrauch gegenüber der Norm auf, und dies obwohl die Verluste in der Messung mit berücksichtigt sind. Zwei Objekte von insgesamt zehn weisen einen höheren Verbrauch auf. Der BWW-Verbrauch schwankt von Jahr zu Jahr im Mittel um 7 Prozentpunkte in einem extremen Fall sogar bis zu 17 Prozentpunkte.

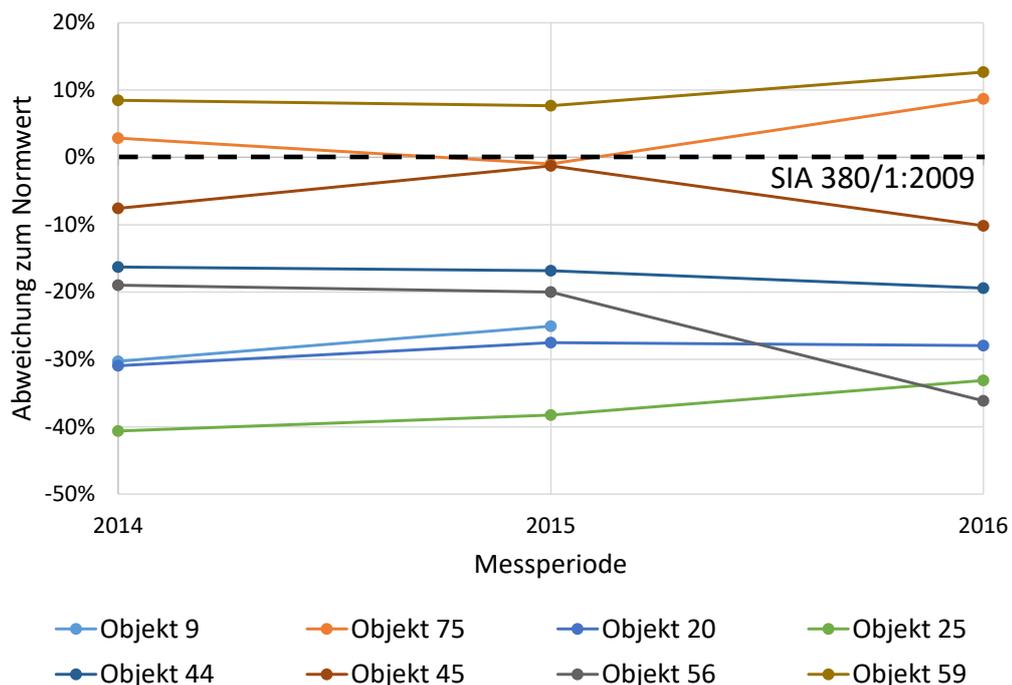


Abbildung 19: Abweichung des BWW-Bedarfs zwischen Messung und Normwerten über drei Messjahre. Vergleich mit SIA 380/1:2009.

3.1.2 Verhältnis Heizwärme zu Wärme für Brauchwarmwasser

In Abbildung 20 ist für sieben Objekte für die Messperiode 2015 das Verhältnis zwischen Heizwärme- und Brauchwarmwasserverbrauch dargestellt (inklusive Wärmeverluste von Speicher etc.). Dabei wird deutlich, dass das Verhältnis nicht bei 3:2 (60% Anteil Heizwärme) zu liegen kommt wie es bei einem neuen MFH zu

erwarten wäre. Der Heizwärmeverbrauch ist weiterhin der dominierende Wärmeverbrauch im Gebäude mit durchschnittlich 72%. Das älteste Gebäude in dieser Auswertung mit Baujahr 2010 ist das Gebäude 9.

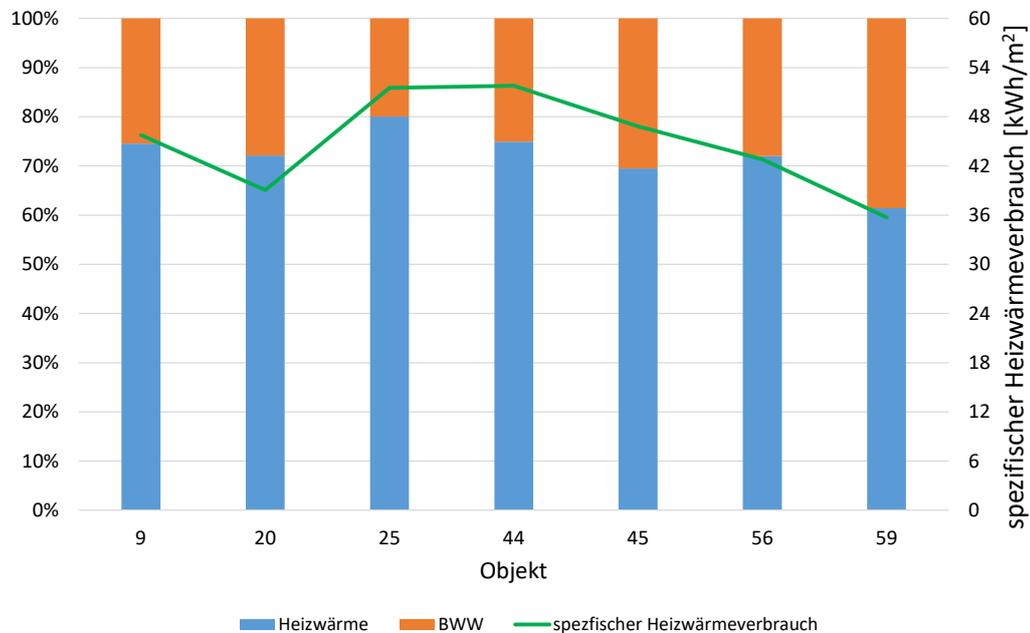


Abbildung 20: Verhältnis von Heizwärme- zu Brauchwarmwasserverbrauch ermittelt für sieben Gebäude (Messperiode 2015).

3.1.3 Korrektur des Heizwärmeverbrauchs

Zu Beginn des Projektes wurde auf Grund der vorgestellten Resultate bei Objekten ohne separate BWW-Messung ein Abzug von $64 \text{ MJ/m}^2_{(\text{EBF})}$ am gemessenen Wärmeverbrauch gemacht. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert von zehn Objekten (siehe Abbildung 19) mit separater BWW-Erfassung über drei Messperioden (2014-2016) inklusive Wärmeverluste von Speicher und Zirkulation.

Da der BWW-Verbrauch von Objekt zu Objekt sehr stark schwankt, wurde entschieden, für jedes der Objekte den BWW-Verbrauch separat aus der Leistungskennlinie zu ermitteln. Das Vorgehen wird nachfolgend beschrieben und in Abbildung 21 beispielhaft dargestellt. In einem ersten Schritt wurde die mittlere Tagesleistung aller Tage mit Aussentemperatur (24 Stunden-Mittel) über 23 °C berechnet. Da davon ausgegangen werden kann, dass an diesen Tagen kein Raumwärmebedarf vorhanden war, wurde diese mittlere Tagesleistung in einem zweiten Schritt auf ein Jahr hochgerechnet. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass alle gewählten Messpunkte ($T_{\text{amb}} > 23 \text{ °C}$) in den Sommermonaten anfallen. Sowohl Sommerferien als auch generell ein Mehrverbrauch von Warmwasser im Winter können dazu führen, dass mit dieser Methode der BWW-Verbrauch eher etwas unterschätzt wird [34]. Auf Grund dieser Tatsache wurde der aus der Leistungskennlinie ermittelte BWW-Verbrauch pauschal um 15% erhöht.

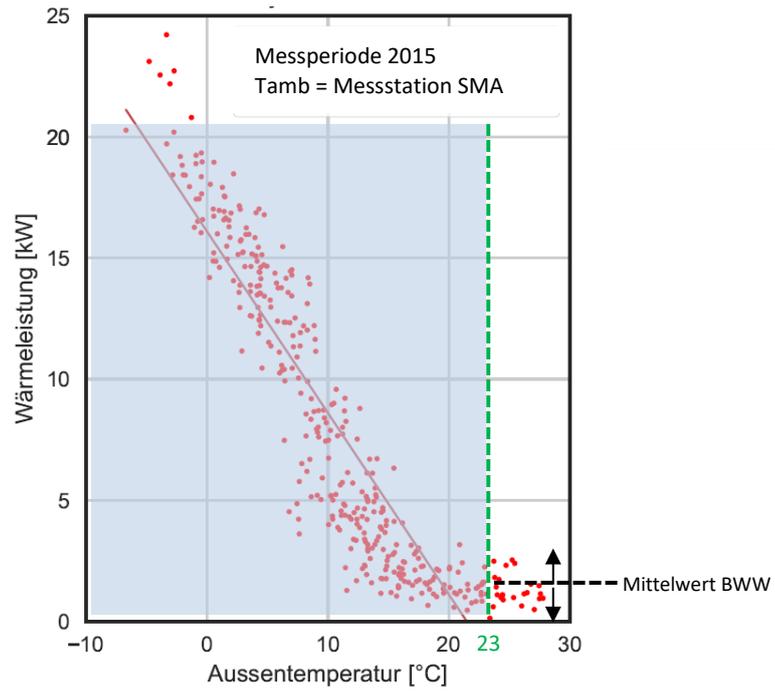


Abbildung 21: Leistungskurve vom Gebäude 34 (Tagesmittelwerte).

3.2 Heizwärmeverbrauch versus Heizwärmebedarf

In Abbildung 22 ist für alle untersuchten Objekte der Energy-Performance-Gap-Faktor dargestellt. Dabei wird zusätzlich unterschieden zwischen Objekten mit separater BWW Messung und Objekten mit kombinierter Messung³.

Vier der insgesamt 65 Objekte weisen einen um 100 - 115% höheren Wärmeverbrauch auf als im Energienachweis berechnet wurde (EPG-Faktor von 2 - 2.15), was dem Gap A entspricht. Drei der Häuser weisen einen geringeren Wärmeverbrauch auf als geplant (bis -6%). Der durchschnittliche EPG-Faktor über alle Objekte beträgt 1.44 (+44%). Bei den Objekte ohne separate BWW Messung liegt der Durchschnitt bei 1.51 (+51%) und mit separater BWW Messung bei 1.4 (+40%).

In Abbildung 23 ist der Energy Performance Gap für alle Objekte dargestellt welche im Energienachweis auch eine Berechnung des Heizwärmebedarfs mit effektivem Luftwechsel aufweisen. Der effektive Luftwechsel berücksichtigt im Gegensatz zum Standardluftwechsel eine Wärmerückgewinnung und unterschiedliche Betriebszeiten der Lüftungsanlage. Dies führt in der Regel zu einem tieferen Heizwärmebedarf gegenüber der Standardberechnung, was auch erklärt wieso der Energy Performance Gap bei der Betrachtung des effektiven Luftwechsels grösser ausfällt. Auf Grund dieser Resultate können keine Aussagen zur Lüftung selber gemacht werden. Aber sie machen deutlich, dass es entscheidend ist, in Untersuchungen zum Performance Gap klar zwischen den beiden Luftwechselarten zu unterscheiden.

In Abbildung 24 ist der Energy Performance Gap über alle Objekte mit Unterscheidung zwischen den verschiedenen Ausgaben der SIA 380/1, die im Energienachweis verwendet wurde, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ausgabe der Norm, welche zur Berechnung verwendet wurde, keinen Einfluss darauf hat, wie hoch die Abweichung zwischen Messung und Berechnung ausfällt.

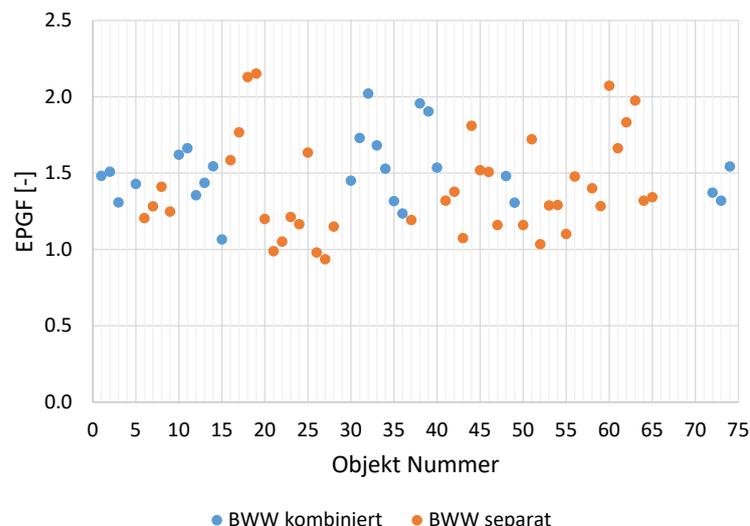


Abbildung 22: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor über alle untersuchten Objekte mit Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung und kombinierter BWW Erfassung für das Jahr 2015 (Standard Luftwechsel).

³ Bei kombinierter Erfassung von Raumwärme und Warmwasser wurde, wie in Kapitel 2.6 und 3.1.3 beschrieben, der pro Objekt abgeschätzte BWW-Verbrauch vom gesamten Energieverbrauch abgezogen.

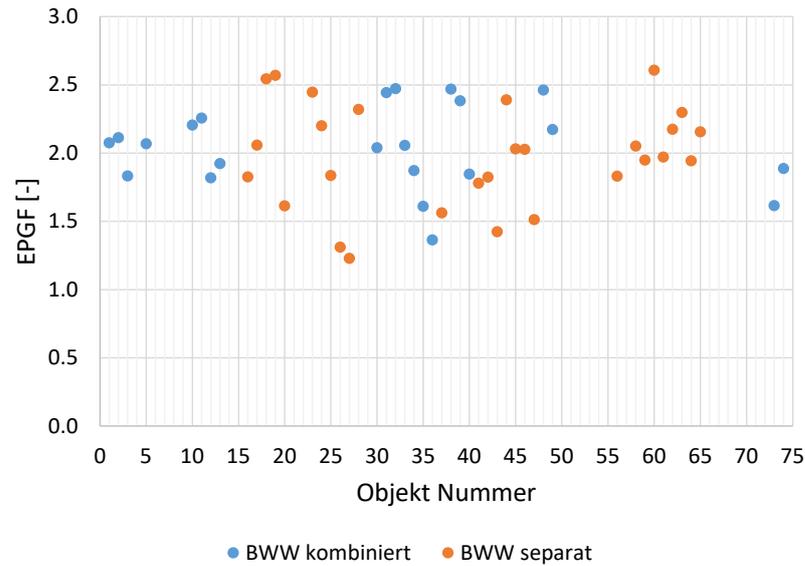


Abbildung 23: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor bezogen **auf den effektiven Luftwechsel** mit Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung und kombinierter BWW Erfassung für das Jahr 2015.

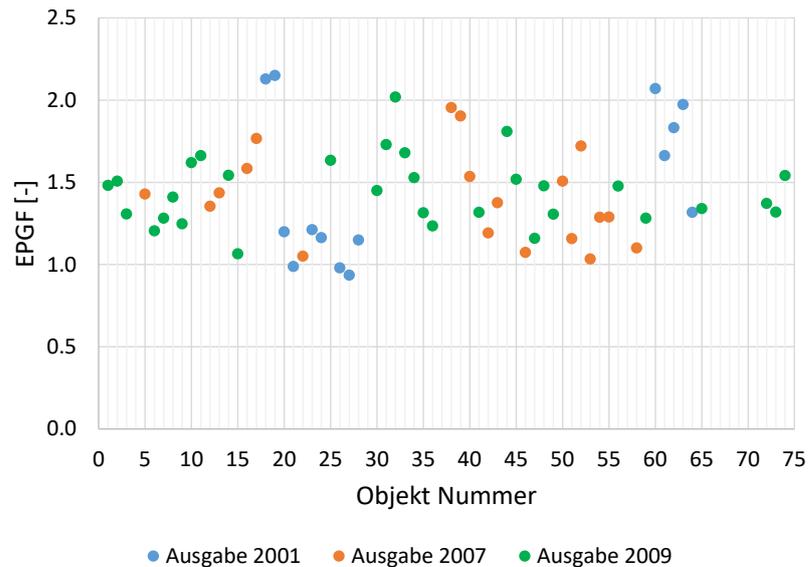


Abbildung 24: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor über alle untersuchten Objekte mit Unterscheidung der verwendeten Ausgabe der SIA 380/1 im Energienachweis (Wechsel des Referenzklimas wurde berücksichtigt).

3.2.1 Relative und absolute Differenzen

Oft wird in der Literatur der Energy Performance Gap nur als relativer Wert angegeben. Dies kann gerade für Objekte mit tiefem Heizwärmebedarf (Minergie-P oder Passivhäuser) zu falschen Schlussfolgerungen führen. Denn ein offenes Kippfenster führt bei guter wie auch bei schlechter Gebäudehülle zum gleichen absoluten Mehrbedarf an Heizwärme. Relativ betrachtet weist jedoch das Gebäude mit sehr guter Gebäudehülle einen massiv höheren Mehrverbrauch aus. In Abbildung 25 ist beispielhaft für ein neueres Gebäude mit einem Heizwärmebedarf



von 15 kWh/m² die Energiebilanz für zwei Fälle aufgeführt. Der Fall 1 stellt die Referenz dar welche einer Standardnutzung entspricht. Erhöht man nun die Lüftungsverluste und Transmissionsverluste um 5 kWh/m² auf Grund realer Nutzung und reduziert gleichzeitig die solaren Wärmeeinträge um 5 kWh/m² (Fall 2), dann erhöht sich der Wärmebedarf um +100%. Betrachtet man dieselbe Situation für ein älteres Gebäude (Abbildung 26) mit einem Heizwärmebedarf von 125 kWh/m² dann erhöht sich der Heizwärmebedarf nur um +14%. In absoluten Zahlen erhöht sich für beide Gebäude der Heizwärmebedarf um 15 kWh/m². Dies macht deutlich, wieso nur relative Unterschiede gerade bei guten Bauten mit Vorsicht zu betrachten sind, da eine falsche Interpretation möglich ist, wie „Gut gedämmte Gebäude überschreiten die Planungswerte viel stärker als ältere Gebäude“.

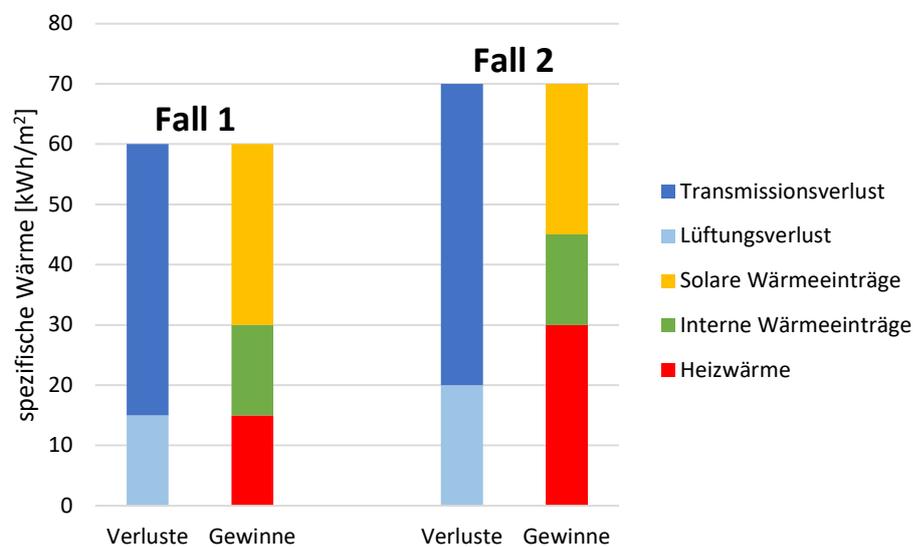


Abbildung 25: Energiebilanz eines neuen Gebäudes. Fall 1: Standardnutzung, Fall 2: erhöhte Wärmeverluste und tiefere solar Gewinne auf Grund von realem Nutzerverhalten.

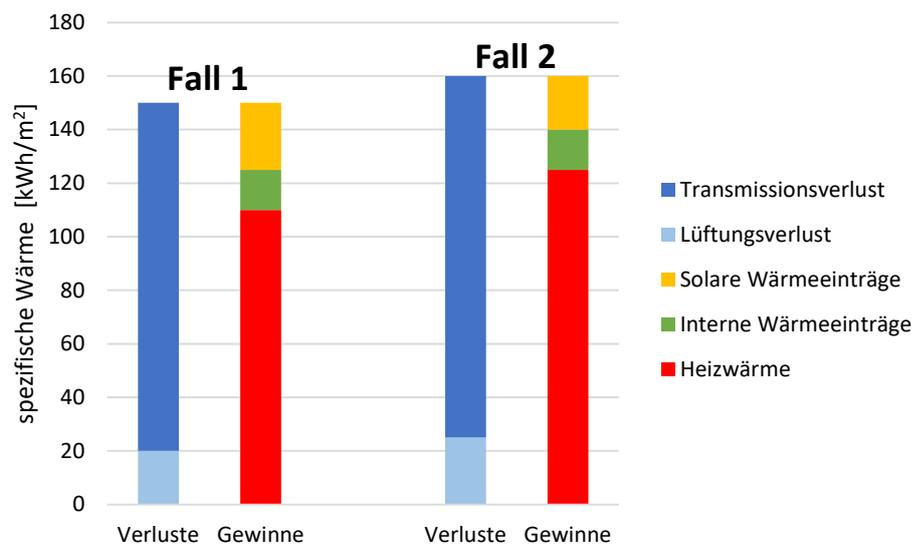


Abbildung 26: Energiebilanz eines älteren Gebäudes. Fall 1: Standardnutzung, Fall 2: erhöhte Wärmeverluste und tiefere solar Gewinne auf Grund von realem Nutzerverhalten.

In der Literatur [10] wird beschrieben, dass mit abnehmendem Heizwärmebedarf der Energy Performance Gap prozentual (relativ) zu nimmt. Dieser Zusammenhang lässt sich in der Abbildung 27 (links) in der Tendenz bestätigen ($R^2 = 0.25$). Die absolute Abweichung zwischen Messung und Planung (Grafik rechts) weist einen deutlich geringeren Zusammenhang zwischen dem berechnetem Heizwärmebedarf und der absoluten Abweichung auf ($R^2 = 0.11$). In Bezug auf die relative Abweichung ist es naheliegend, dass diese mit abnehmenden Heizwärmebedarf zunimmt, wie im oberen Berechnungsbeispiel dargestellt. Interessant ist jedoch, dass auch die absolute Abweichung – in deutlich geringerer Masse – vom Heizwärmebedarf abhängig ist. Der Korrelationskoeffizienten ist relativ tief. Gleichzeitig beeinflussen wenige Datenpunkte mit höherem Heizwärmebedarf das Resultat stark. Weiterer Messdaten vor allem für Objekte mit höherem Heizwärmebedarf, wären nötig um eine klare Aussage machen zu können.

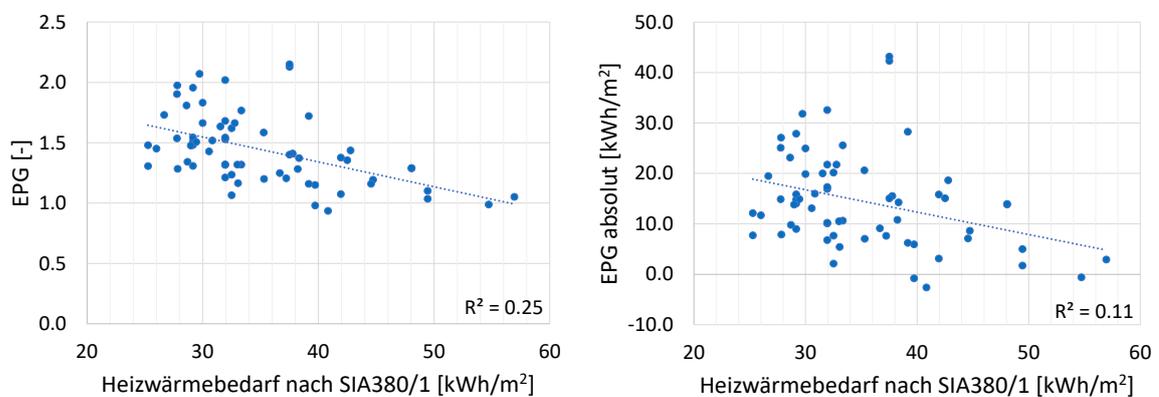


Abbildung 27: Relativer und absoluter Mehr- oder Minderverbrauch in Abhängigkeit der Gebäudehüllenqualität in Form des berechneten Heizwärmebedarfs. Witterungsbereinigte Messdaten aus dem Jahr 2015.

Ein klarer Zusammenhang besteht zwischen dem relativen und dem absoluten Energy Performance Gap (siehe Abbildung 28, links). Je grösser die prozentuale Abweichung ist, desto grösser fällt auch der Mehrverbrauch in absoluten Zahlen aus. Was nicht unbedingt zu erwarten wäre, da bei einer sehr guten Hülle (z.B. Passivhaus) die relative Abweichung bei einem offenen Fenster grösser ausfällt als bei einem Haus mit deutlich schlechterer Gebäudehülle. Die absolute Abweichung jedoch für beide Objekte in etwa gleich sein sollte. Zu berücksichtigen ist, dass im untersuchten Gebäudepool alle Gebäude eine ähnlich gute Gebäudehülle aufweisen. Die Bandbreite des Heizwärmebedarfs liegt zwischen 25 kWh/m² und 57 kWh/m². Es sind somit keine Gebäude mit sehr tiefem (10-15 kWh/m²) und eher hohem (100-150 kWh/m²) Heizwärmebedarf untersucht worden. Eine wichtige und positive Erkenntnis ist, dass trotz dem Energy Performance Gap tendenziell der Heizwärmeverbrauch mit abnehmendem Heizwärmebedarf sinkt, was in der rechten Grafik zu erkennen ist ($R^2 = 0.17$).

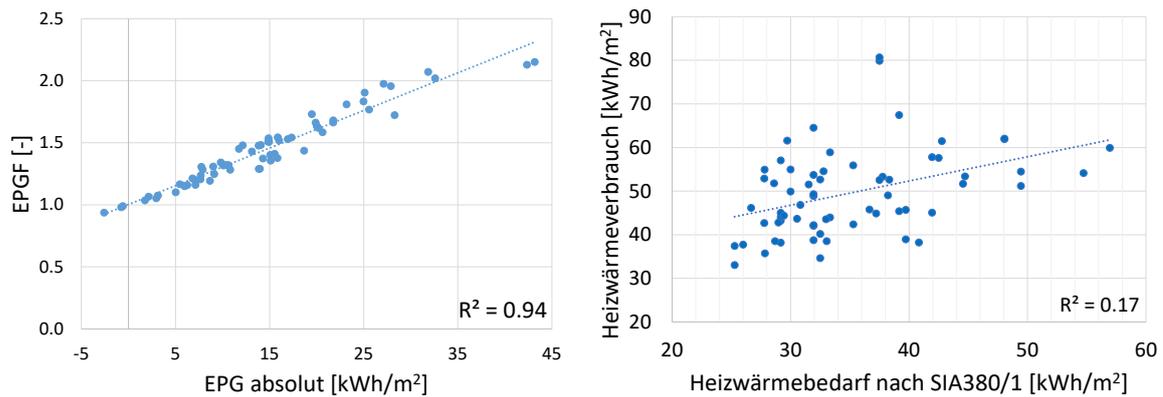


Abbildung 28: Energy-Performance-Gap-Faktor in Abhängigkeit vom absoluten Energy Performance Gap (links) und der gemessene Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit zum berechneten Heizwärmebedarf (rechts).

3.2.2 Grenzwertunterschreitung

Weiter wurde untersucht, ob eine Unterschreitung des gesetzlich vorgeschriebenen Heizwärmebedarfs bei der Berechnung einen Einfluss auf den Energy Performance Gap hat. Eine Unterschreitung des Grenzwertes bedeutet, dass das Gebäude eine bessere thermische Hülle aufweist als eigentlich vom Gesetzgeber verlangt wird. Ein Zusammenhang könnte darauf hindeuten, dass der Energienachweis viel Spielraum zur Optimierung lässt. In Abbildung 29 ist der EPG-Faktor in Abhängigkeit der relativen (links) und absoluten (rechts) Unterschreitung des Grenzwertes dargestellt. Zusätzlich werden die Messpunkte in zwei Gruppen unterteilt in Abhängigkeit der verwendeten Ausgabe der SIA 380/1. Für ältere Bauten, welche mit den SIA Ausgaben 2001 oder 2007 berechnet wurden, gibt es eine Korrelation ($R^2 = 0.37$) zwischen dem Energy Performance Gap und der Unterschreitung des Grenzwertes. Der Energy Performance Gap fällt hier höher aus bei grösserer Unterschreitung des Grenzwertes. Bei den Bauten welche nach SIA 2009 berechnet wurden gibt es diese Korrelation nicht. Auffällig ist auch, dass die Berechnungen nach älteren SIA Ausgaben sowohl relativ wie auch absolut den Grenzwert deutlicher unterschreiten als Berechnungen nach SIA 380/1:2009. Die Grenzwerte für MFH wurden zwischen den Ausgabe 2001 und 2007 nicht verschärft, jedoch wurde der Grenzwert für die Ausgabe 2009 um etwa 30% reduziert gegenüber den vorhergehenden Ausgaben. Diese Verschärfung der Grenzwerte kann teilweise erklären, dass die berechneten Unterschreitungen derselben für die Energienachweise mit Ausgabe 2009 deutlich abgenommen haben (grüne Punkte). Denn eine Unterschreitung des Grenzwertes ist oft auf eine verbesserte Gebäudehülle zurück zu führen, was jedoch bei schon tiefen Grenzwerten dazu führt, dass die Kosten unverhältnismässig ansteigen.

Betrachtet man den Heizwärmebedarf für die Unterschiedlichen Ausgaben in Abbildung 30, so wird ersichtlich, dass einige ältere Gebäude schon die Anforderung der neueren Ausgabe erfüllen. Dabei stellt sich die Frage nach der Ursache für die Unterschreitung des Grenzwertes. Mögliche Gründe können eine ökologische Motivation oder wirtschaftliche Interessen der Bauherrschaft sein. Dass der Spielraum für eine Optimierung der Berechnungen in älteren Ausgaben der SIA grösser war als in der neuen Ausgabe kann ziemlich sicher ausgeschlossen werden, da sich die Berechnungsgrundlagen nicht wesentlich verändert haben. Wie

im Kapitel 4.4 beschrieben, gibt es unterschiedliche Eingabemöglichkeiten bei der Berechnung des Energienachweises, was für dasselbe Gebäude zu unterschiedlichen Resultaten führt. Eine grosse Unterschreitung des Grenzwertes könnte darauf hindeuten, dass der Energienachweis mit bestmöglichen Eingabewerten berechnet wurde, was dazu führen kann, dass die Abweichung dieser Werte zur Realität (Nutzung, Verschattung, EBF etc.) hoch ist, und somit auch der gemessene Energiebedarf von den Berechnungen deutlich abweicht. Weiter ist zu beachten, dass Anpassungen, die im Verlauf der Planungsphase entstehen, nicht immer im Energienachweis nachgeführt werden.

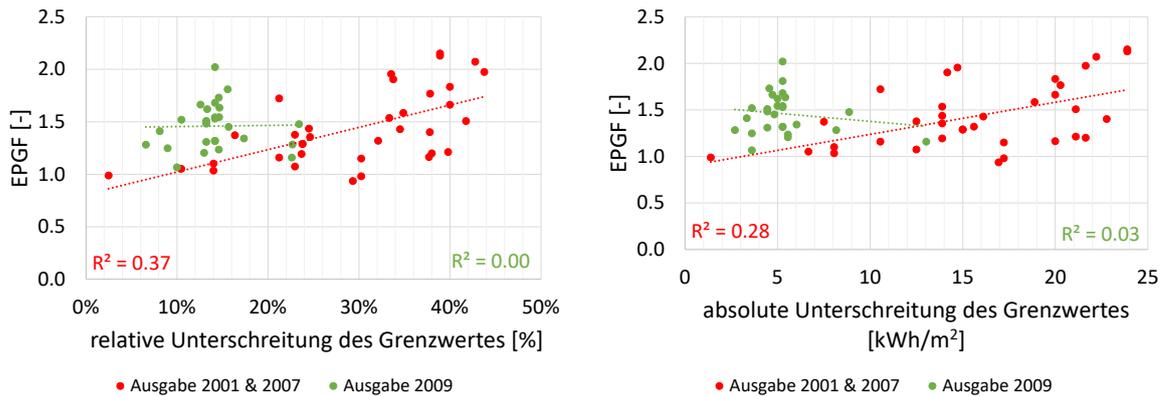


Abbildung 29: Mehr- oder Minderverbrauch in Abhängigkeit der relativen (links) und absoluten (rechts) Unterschreitung des Heizwärmebedarf-Grenzwertes (Energienachweis) mit Unterteilung in Nachweis mit neuerer und mit älterer Ausgabe der SIA.

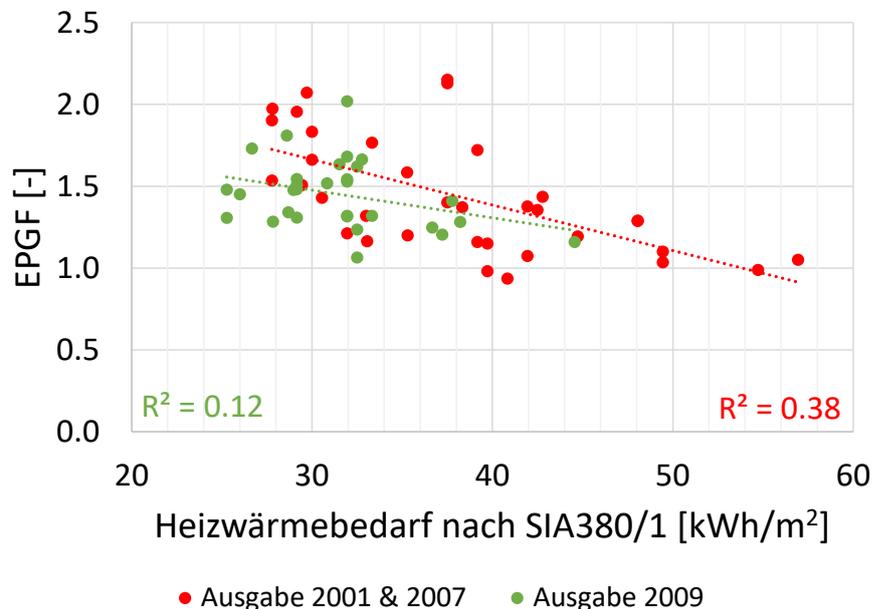


Abbildung 30: Energy Performance Gap in Abhängigkeit des berechneten Heizwärmebedarfs mit Unterteilung der SIA Ausgabe welche für die Berechnung verwendet wurde. Witterungsbereinigte Messdaten aus dem Jahr 2015.

In einigen Studien (z.B.: SVW/ASC [12]) wird der Energy Performance Gap nicht auf den berechneten Heizwärmebedarf bezogen, sondern auf den Grenzwert. Da der Grenzwert höher als der Heizwärmebedarf ist, muss in diesem Fall auch der Energy Performance Gap kleiner ausfallen. In Abbildung 31 ist das Verhältnis zwischen Heizwärmeverbrauch und Grenzwert nach SIA 380/1 für die untersuchten Gebäude dargestellt. Von den 65 untersuchten MFH überschreiten vermeintlich 39 (60%) den gesetzlichen Grenzwert. Auffällig ist jedoch, dass von den Objekten mit separater Messung der Raumheizwärme nur 45% den Grenzwert überschreiten, von den Objekten bei welchen Warmwasser und Raumheizung kombiniert gemessen wurden jedoch 91%. Dies spricht für einen Bias der unbeabsichtigt durch den errechneten Abzug der Wärme für Warmwasser eingefügt worden ist. Im Schnitt über alle Objekte wird der Grenzwert um 10% überschritten, betrachtet man nur die Objekte mit separater BWW-Messung wird der Grenzwert im Schnitt nicht überschritten (+2%).

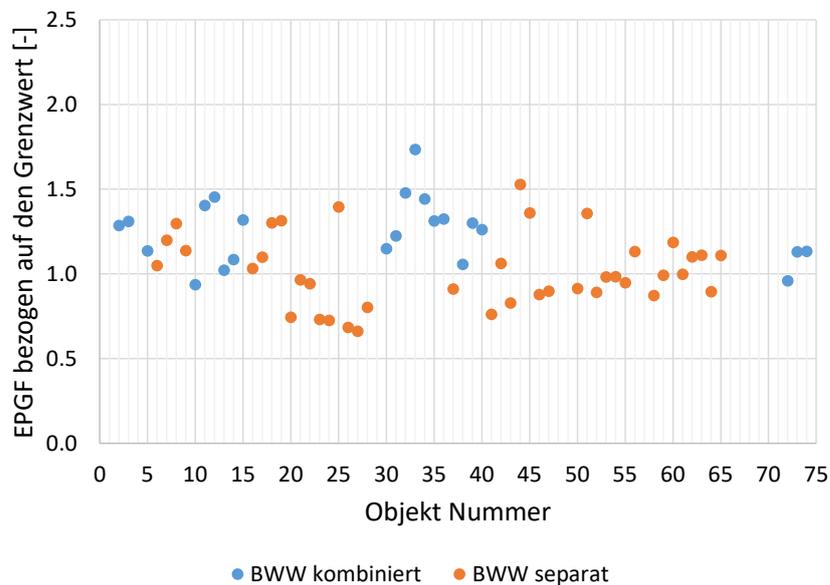


Abbildung 31: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor bezogen auf den Heizwärmebedarfsgrenzwert für alle untersuchten Objekte für die Messperiode 2015.

3.2.3 Einfluss Baujahr

In Abbildung 32 ist der EPG-Faktor in Abhängigkeit vom Baujahr dargestellt. Dabei zeigt sich, dass ein Minder- oder Mehrverbrauch unabhängig ist vom Baujahr und sich somit über die betrachtete Periode von acht Jahren kein Trend feststellen lässt.

Auf Grund der Tatsache, dass die Grenzwerte von Zeit zu Zeit verschärft worden sind (2007 und 2009), kann man davon ausgehen, dass über die Jahre der spezifische Heizwärmebedarf (SIA 380/1 Berechnung) kleiner wird. Dies kann in der Abbildung 33 (links) auch festgestellt werden (Bestimmtheitsmass 0.26). Betrachtet man andererseits die Messdaten (witterungsbereinigt, rechts), dann wird die angestrebte Verringerung des Heizwärmeverbrauchs in Abhängigkeit des Baujahres nur teilweise erreicht ($R^2 = 0.13$). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass eine weitere Anpassung der Heizwärmegrenzwerte in der Realität weit



schwieriger zu erreichen sein wird als auf dem Papier, so lange nicht auch neue, effizientere und kostengünstige Techniken für diese angestrebten Reduktionen zur Verfügung stehen.

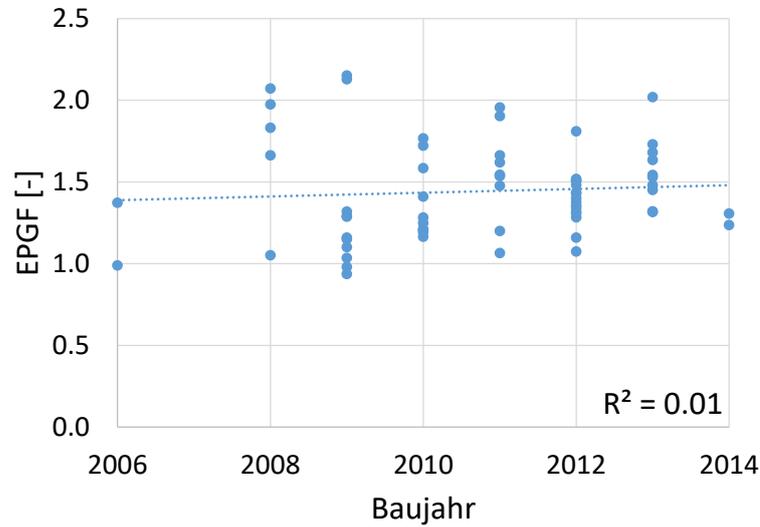


Abbildung 32: Abhängigkeit des EPG-Faktors vom Baujahr.

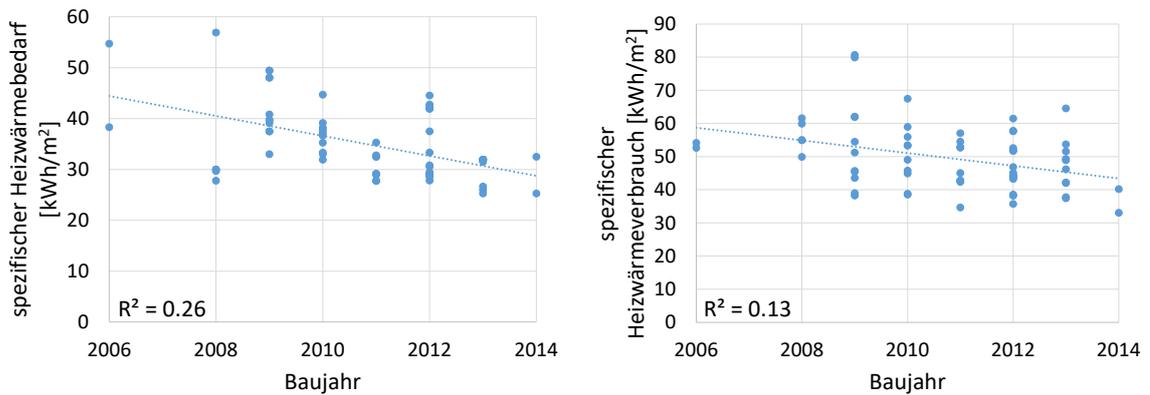


Abbildung 33: Vergleich von berechnetem spezifischen Heizwärmebedarf mit dem gemessenen spezifischen Heizwärmeverbrauch (witterungsbereinigt) in Abhängigkeit des Baujahres.

3.2.4 Einfluss von Fensteranteil und Gebäudehüllzahl

Auf Grund der Resultate von Hässig et. al. [15] wurde vermutet, dass ein grösserer Fensteranteil zu einem höheren Mehrverbrauch führt. Deshalb wurden die Gebäudehüllzahl und der Fensteranteil der hier betrachteten Gebäude auf ihren Einfluss auf den Energy Performance Gap untersucht (Abbildung 34). Die Werte zu Gebäudehüllzahl und Fensteranteil beruhen auf den Angaben im Energienachweis. Für den Fensteranteil konnte kein Zusammenhang zum Energy Performance Gap gefunden werden. Beim zweiten Parameter gibt es einen leichten Trend dazu, dass mit zunehmender Gebäudehüllzahl der Energy Performance Gap abnimmt ($R^2 = 0.1$). Was jedoch auffällt ist, dass es einige Objekte gibt, welche einen Fensteranteil von unter 15% aufweisen. Eine Plausibilitätskontrolle zeigte, dass die meisten dieser Gebäude ein Schrägdach und kleine Fenster haben. In einem Fall wird auch das Untergeschoss als beheizt ausgewiesen. Das hat zur Folge, dass der Fensteranteil bezogen auf die EBF sehr klein ausfällt.

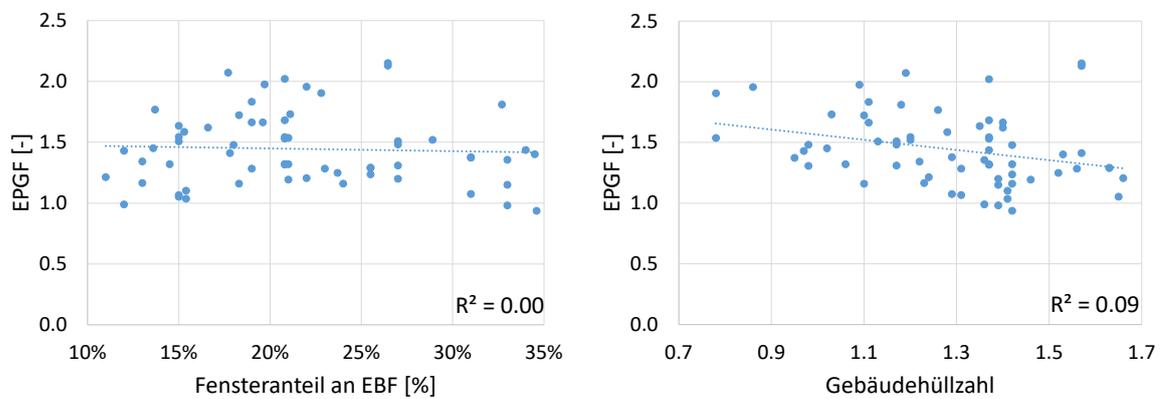


Abbildung 34: Einfluss von Fensteranteil und Gebäudehüllzahl auf den Energy Performance Gap.

3.3 Vergleich von Messung mit Planung für verschiedene Heizungsparameter

3.3.1 Vorlauftemperatur

Dem Projektteam standen zu fast allen Objekten die Heizleistung⁴ und die Vorlauftemperatur für den Auslegungspunkt zur Verfügung (Hydraulikschema). In Abbildung 35 wird die geplante Vorlauftemperatur bei -8 °C mit der gemessenen Vorlauftemperatur verglichen. Die gemessene Vorlauftemperatur wird aus einer quadratischen Interpolation der Messdaten und dem Schnittpunkt bei -8 °C ermittelt. In Abbildung 37 ist dieses Vorgehen beispielhaft für die Objekte 28 und 62 dargestellt.

Die Auswertung zeigt, dass nur wenige Gebäude die geplante Vorlauftemperatur am Auslegungspunkt auch in der Realität einhalten (rote Linie), mehr als die Hälfte der Objekte weist eine tiefere Vorlauftemperatur am Auslegungspunkt auf als geplant (58%). Man kann in der linken Grafik erkennen, dass tiefer geplante Vorlauftemperaturen in der Realität nicht eingehalten werden können, höher

⁴ Bestellte Heizleistung durch den Planer

geplante jedoch in der Regel unterschritten werden. In der rechten Grafik ist der EPG-Faktor in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur dargestellt. Hier lässt sich für die Objekte mit kombinierter Messung von BWW und Heizung kein Zusammenhang finden. Jedoch weisen die Objekte mit separater BWW-Erfassung einen abnehmenden Energy Performance Gap auf, je höher die Vorlauftemperatur ist ($R^2 = 0.26$, starker Effekt). Bei den Objekten mit separater BWW-Messung handelt es sich ausschliesslich um Wärmepumpenheizungen.

In Abbildung 36 wird der Energy Performance Gap in Abhängigkeit der Differenz zwischen geplanter und gemessener Vorlauftemperatur am Auslegungspunkt untersucht. Hier lässt sich bezogen auf die **Nutzenergie** kein Zusammenhang finden.

Diese Resultate lassen darauf schliessen, dass nicht generell die Vorlauftemperatur ein Problem für den erhöhten Mehrbedarf an Heizwärme darstellt. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass eine überhöhte Vorlauftemperatur über die Raumtemperaturregelung abgefangen werden kann. Dadurch wird der Volumenstrom früher reduziert als bei tieferer Vorlauftemperatur und die Wärmeerzeugung bei fehlender Leistungsregelung früher abgeschaltet. Allerdings hat im Fall der Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe die höhere Vorlauftemperatur einen negativen Einfluss auf den **Endenergieverbrauch**. Denn die Jahresarbeitszahl (JAZ) nimmt mit zunehmender Vorlauftemperatur ab und dementsprechend nimmt der Stromverbrauch zu. Die in diesem Projekt gemessenen tiefen Vorlauftemperaturen bei Auslegung können eine Erklärung sein wieso in einigen Studien [2], [14], welche den Energy Performance Gap auf die Endenergie beziehen, Wärmepumpen besser abschneiden als fossile Heizungssysteme. Zu berücksichtigen ist, dass die Heizungssysteme in dieser Studie ausschliesslich Anlagen sind, welche von Energiecontracting-Unternehmen betrieben werden. Diese wiederum sind bestrebt die Anlagen möglichst effizient zu betreiben.

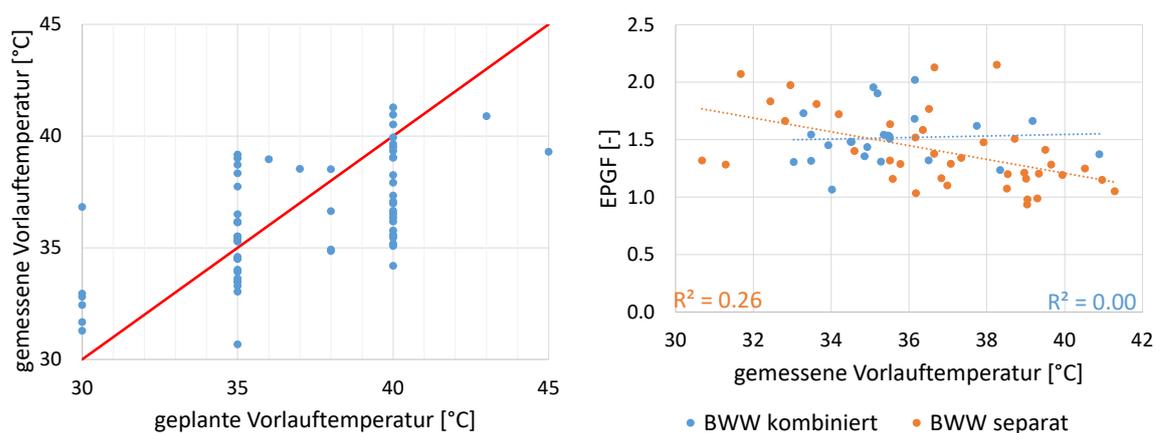


Abbildung 35: Vergleich der geplanten und der gemessenen Vorlauftemperatur am Auslegungspunkt (links) und deren Einfluss auf den EPG-Faktor (rechts). Die rote Linie in der linken Grafik stellt die Übereinstimmung von Planung und Messung dar.

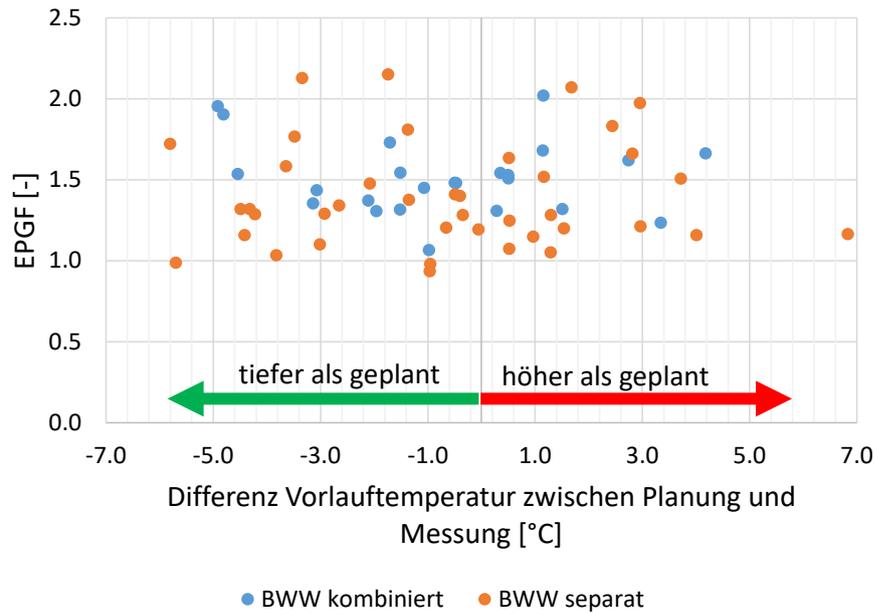


Abbildung 36: Energy-Performance-Gap-Faktor in Abhängigkeit von der Differenz zwischen geplanter Vorlauftemperatur und gemessener Vorlauftemperatur am Auslegungspunkt (-8 °C Aussentemperatur).

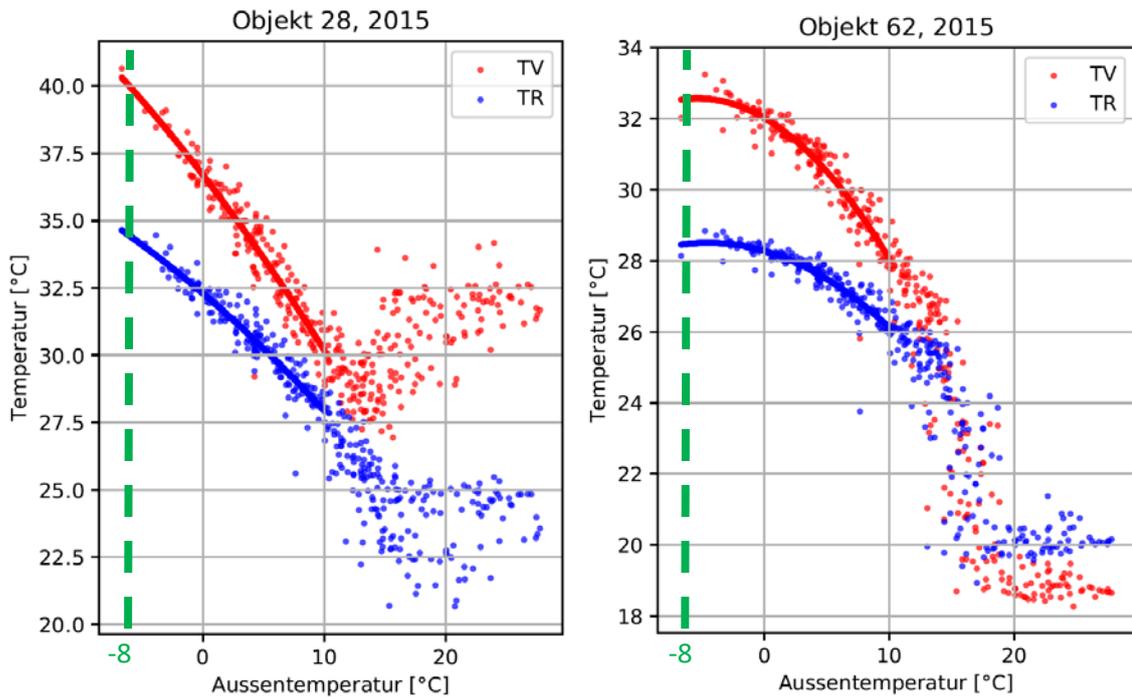


Abbildung 37: Gemessene Vorlauftemperatur (TV) und Rücklauftemperatur (TR) in Abhängigkeit der Aussentemperatur für zwei Gebäude, mit quadratischer Interpolation der Messdaten zur Bestimmung der Auslegungsvorlauftemperatur. Der Schnittpunkt der roten Linie mit der grünen ergibt die Vorlauftemperatur bei -8 °C Aussentemperatur (Tagesmittelwerte).

3.3.2 Heizleistung

Die Leistungskurve nach SIA 384/1:2009 [35], auch bekannt als Energiesignatur, wurde im Projekt für alle Gebäude aus den Messdaten ermittelt. Aus der Leistungskurve kann die Heizgrenze und die Leistung am Auslegungspunkt (-8 °C) ermittelt werden. Da einige Untersuchungsobjekte keine separate BWW-Messung aufwiesen, musste die Leistungskurve für diese Gebäude mit einer BWW-Korrektur versehen werden. Hierfür wurde als erstes die durchschnittliche Wärmeleistung für das BWW ermittelt, indem alle Tages-Leistungsmittelwerte über 20 °C Aussentemperatur (Tagesmittelwert) gemittelt wurden. Anschliessend wurde von den Datenpunkten unter 20 °C Aussentemperatur (Tagesmittelwert) dieser Wert abgezogen. In Abbildung 38 ist beispielhaft für das Objekt 34 die Leistungskurve mit und ohne BWW-Korrektur dargestellt.

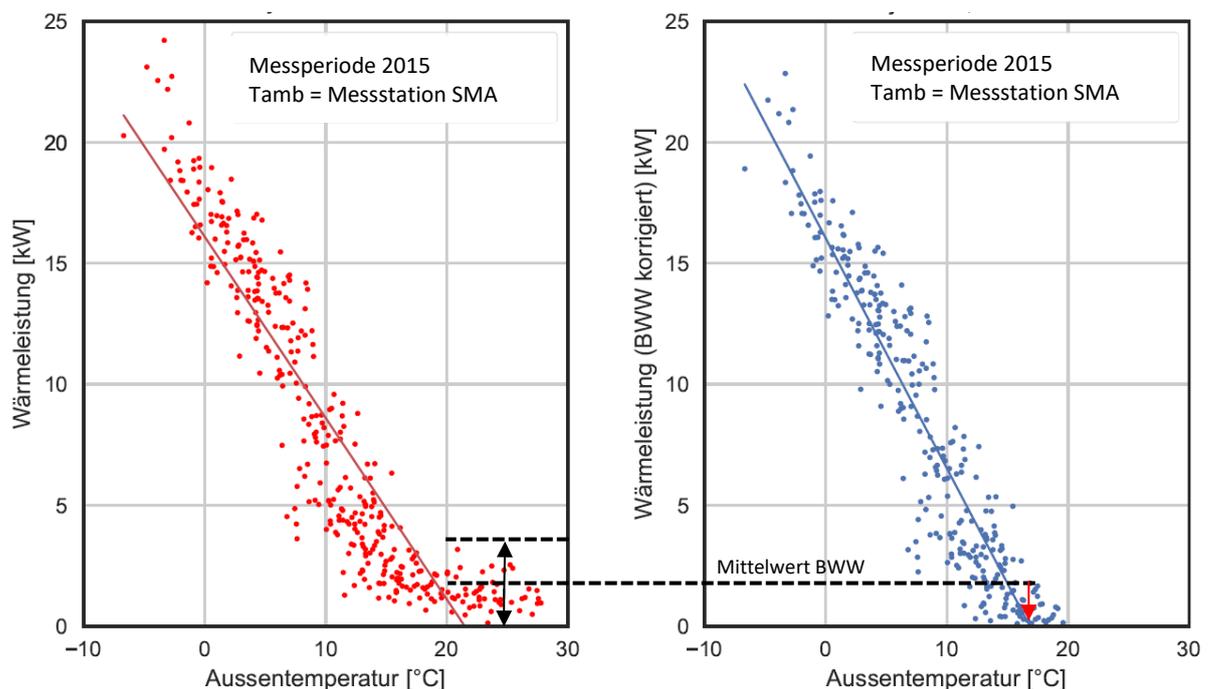


Abbildung 38: Leistungskurve Gebäude 34 links ohne und rechts mit BWW-Korrektur (alle Daten basierend auf Tagesmittelwerte).

In Abbildung 39 wird die aus der Leistungskurve ausgemessene spezifische Heizleistung bei Auslegungsbedingungen mit der geplanten Heizleistung aus dem Hydraulikschema verglichen. Die geplante Heizleistung entspricht der beim Contractor bestellten Leistung, welche vermutlich schon mit einem Sicherheitszuschlag versehen ist. Nur fünf Objekte weisen in der Realität einen höheren Leistungsbedarf auf als in der Planung vorgesehen (maximale Abweichung 11%). Bei der Mehrheit der Objekte liegt der in der Planung vorgesehene Leistungsbedarf (Norm-Heizlastberechnung, SIA 384.201) deutlich höher als der im Betrieb notwendige. Der Median der geplanten Heizleistung übertrifft die benötigte um 19%. Im Extremfall wird die benötigte Leistung um bis zu 61% übertroffen. Erfahrungsgemäss ist davon auszugehen, dass die installierte Heizleistung noch einmal höher ist als die gemäss Planung erforderliche Heizleistung.

In Abbildung 40 wird ersichtlich, dass alle fünf Objekte deren gemessene Heizleistung höher ist als die im Hydraulikschema angegebene (X-Achse negativ) einen Energy Performance Gap von +40% und mehr aufweisen. Natürlicherweise fällt bei einem gegenüber den Erwartungen höherem Leistungsbedarf (bei Auslegung) auch der Energiebedarf höher aus als erwartet.

Abbildung 40 zeigt, dass für Objekte welche gemäss Planung einen deutlich höherem Heizwärmebedarf aufweisen als im Betrieb tatsächlich erforderlich ist, der EPG-Faktor geringer ausfällt als bei knapp berechnetem Planwert. Die Bestimmtheitsmasse von 0.27 und 0.29 lassen darauf schliessen, dass dieser Zusammenhang einem starken Effekt [33] entspricht.

Interessant ist der Zusammenhang zwischen Heizwärmeverbrauch und der relativen Überdimensionierung der Heizleistung, welcher in Abbildung 41 dargestellt ist. Für Objekte mit separater BWW-Messung kann tendenziell davon ausgegangen werden, dass der Heizwärmeverbrauch mit zunehmender Überdimensionierung der Heizleistung abnimmt. Wieso dieser Zusammenhang bei Objekten mit kombinierter BWW-Messung deutlich geringer ist, konnte nicht ermittelt werden. Hier könnte die Unsicherheit bei der Ermittlung des BWW-Verbrauchs eine Rolle spielen.

Eine klare Abhängigkeit kann in Abbildung 42 zwischen Heizleistung und Heizwärmeverbrauch erkannt werden. Mit steigendem spezifischem Wärmeverbrauch steigt auch die benötigte spezifische Heizleistung. Dies ist auf die direkte Abhängigkeit zwischen Heizwärmebedarf und Heizleistungsbedarf mit dem Dämmstandard des Gebäudes zurück zu führen. Jedoch scheint diese lineare Abhängigkeit bei der Auslegung der Heizleistung in der Praxis nicht berücksichtigt zu werden wie in der Grafik (grüne Datenpunkte) ersichtlich ist.

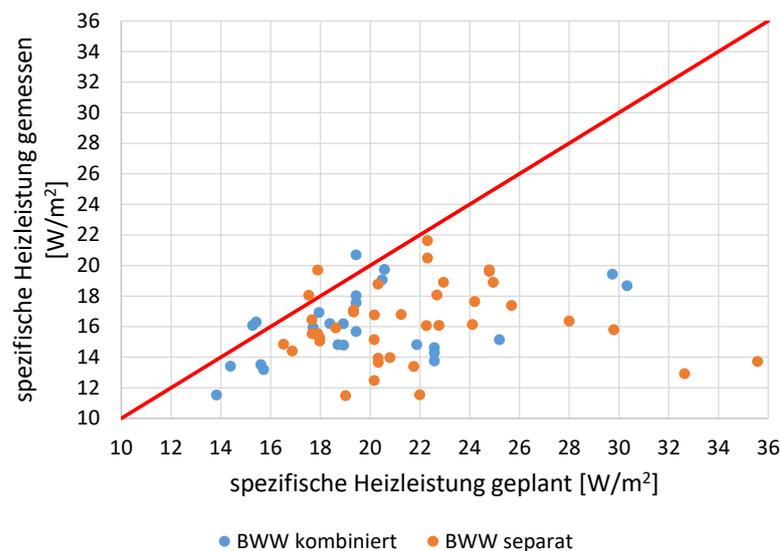


Abbildung 39: Vergleich zwischen der geplanten und der gemessenen spezifischen Heizleistung der Wärmeverteilung mit Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung und kombinierter BWW Erfassung für das Jahr 2015.

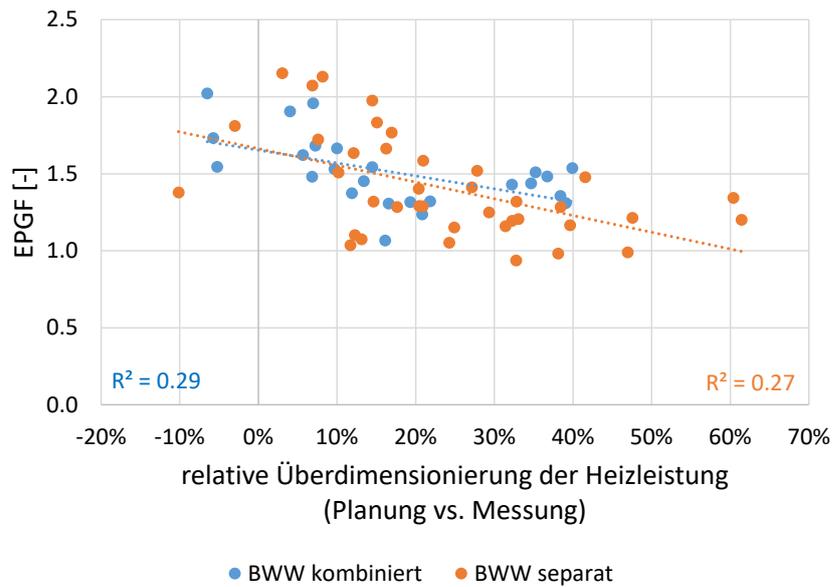


Abbildung 40: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor in Abhängigkeit der relativen Differenz zwischen Heizleistung gemäss Planung und gemessener Heizleistung: $(P_{Planung} - P_{Messung}) / P_{Planung}$. Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung und kombinierter BWW Erfassung für das Jahr 2015.

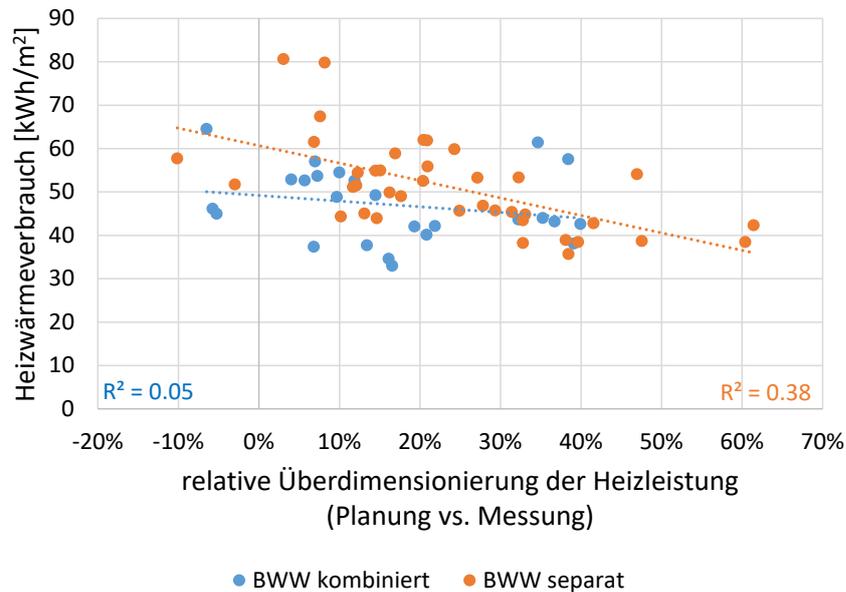


Abbildung 41: Witterungsbereinigter Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der relativen Differenz zwischen Heizleistung gemäss Planung und gemessener Heizleistung: $(P_{Planung} - P_{Messung}) / P_{Planung}$. Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung und kombinierter BWW Erfassung für das Jahr 2015.

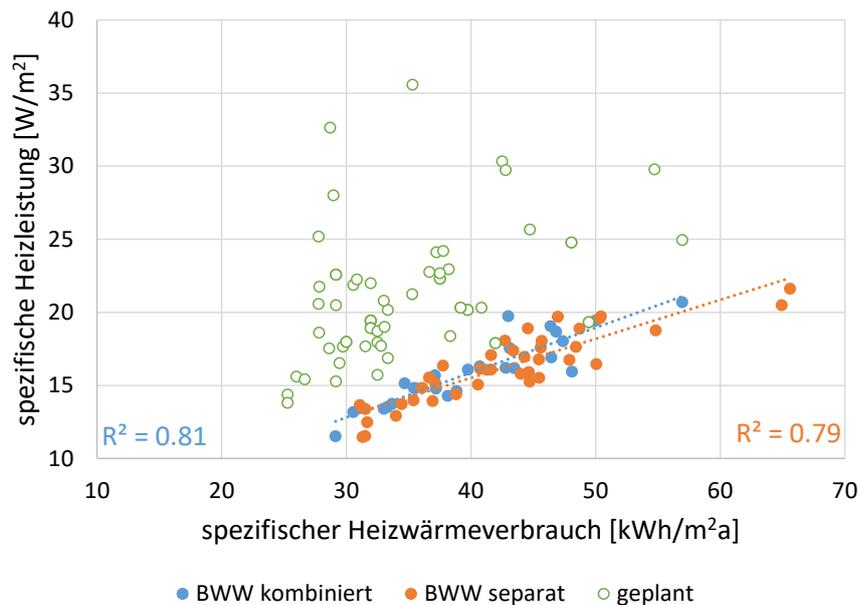


Abbildung 42: Gemessene spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des Heizwärmeverbrauchs mit Unterscheidung zwischen Objekten mit separater BWW Erfassung, kombinierter BWW Erfassung und geplanten Werten (*geplant*) für das Jahr 2015.

3.3.3 Heizgrenze

Neben der Vorlauftemperatur kann auch die Heizgrenze am Heizungsregler individuell eingestellt werden. Deshalb wird nachfolgend der Einfluss der Heizgrenze auf den Energy Performance Gap untersucht. Die Heizgrenze wurde im Projekt mittels der Leistungskennlinie ermittelt. Weitere Details zur Heizgrenzen-Bestimmung sind im Kapitel 2.7 und 3.3.2 beschrieben. Es ist zu berücksichtigen, dass die so ermittelte Heizgrenze nicht direkt der am Regler eingestellten Heizgrenze entspricht (siehe Kapitel 5.5). In Abbildung 43 ist der EPG-Faktor in Abhängigkeit von der Heizgrenze dargestellt. Es zeigt sich, dass tendenziell hoch eingestellte Heizgrenzen zu einem höheren Energy Performance Gap führen. Das Bestimmtheitsmass ist mit $R^2 = 0.52$ für einen Einzelparameter hoch. Die Streuung der Messpunkte für die Objekte mit kombinierter BWW-Erfassung ist jedoch gross, was auf eine Verzerrung der Werte durch die BWW-Korrektur hinweisen könnte. Überraschend ist, dass keines der Gebäude eine Heizgrenze unter 15.5 °C aufweist. Der Median über alle Objekte liegt bei einer Heizgrenze von 17.3 °C . Sieben der 65 MFH (11%) haben eine Heizgrenze über 19 °C was bedeutet, dass diese Gebäude fast das ganze Jahr über beheizt werden.

Im parallel laufenden Forschungsprojekt „WP-GAP – Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpe – die Rolle der Betreiber“ von Lemon Consult, econcept und Energie Zukunft Schweiz (Veröffentlichung im Herbst 2018) wird untersucht, weshalb es zu hohen Heizgrenzen und zu steilen Heizkurven kommt. Ein Grund dafür ist, dass die Beteiligten damit das Risiko von Reklamationen der Bewohner vermindern wollen.

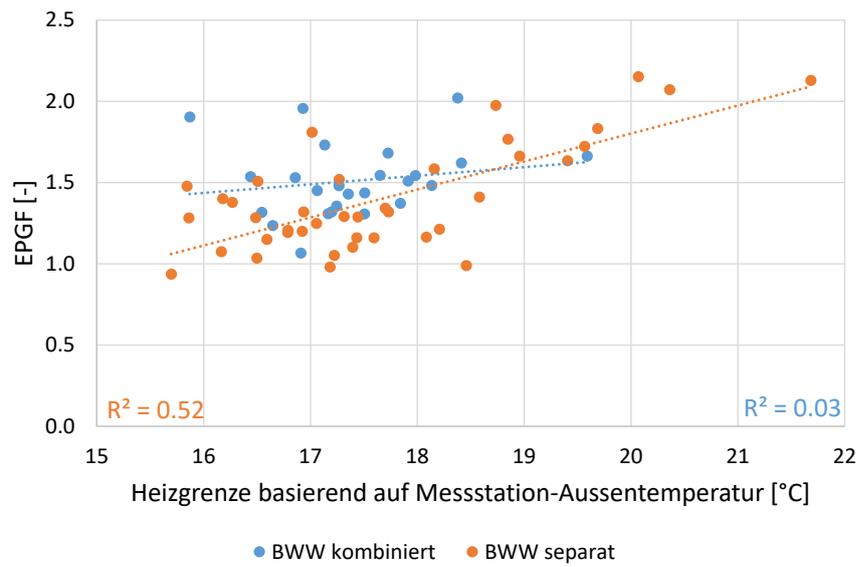


Abbildung 43: Witterungsbereinigter Energy-Performance-Gap-Faktor in Abhängigkeit der aus Messdaten ermittelten Heizgrenze für die Messperiode 2015.

3.3.4 Vollbetriebsstunden

Die hier ausgewiesenen Vollbetriebsstunden werden aus dem real gemessenen Heizwärmeverbrauch und der gemessenen, respektive extrapolierten, Heizleistung (bei $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$) berechnet. Damit entsprechen die hier ausgewiesenen Vollbetriebsstunden einer perfekten Auslegung der Heizleistung. In Realität werden Sicherheitszuschläge, EW-Sperren und Speicherverluste mitberücksichtigt, was dazu führt, dass die Heizleistung grösser ausfällt und damit die Vollbetriebsstunden geringer werden. Bei der Planung von Neubauten haben die Vollbetriebsstunden keine wesentliche Bedeutung, da die Heizleistung in der Regel mit der Norm nach SIA 384.201 berechnet wird. Dabei wird die Leistung ohne Berücksichtigung der internen und externen Gewinne berechnet und liegt somit nur auf Grund der Berechnungsgrundlagen höher als in Realität benötigt. Zwar wird in der Norm darauf hingewiesen, dass eine angemessene Reduktion vorgenommen werden sollte. Für die Herleitung dieser Reduktion werden jedoch keine Berechnungsgrundlagen gegeben, was dazu führt, dass in der Planungspraxis diese Reduktion auch nicht vorgenommen wird. Anders sieht es aus bei einem Ersatz des Wärmeerzeugers, hier stützt man sich häufig auf die theoretischen Vollbetriebsstunden, falls keine Leistungskennlinie aufgezeichnet werden kann.

Laut der Leistungsgarantie – Haustechnik [36] müssten die Vollbetriebsstunden für eine richtig dimensionierte Wärmeerzeugung ohne Warmwasserbereitstellung bei ca. 2'000 h zu liegen kommen. Dabei wird allerdings von einer Raumtemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Heizgrenze von ca. $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgegangen.

In der Praxis sind weder Raumtemperaturen von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch diese tiefe Heizgrenze üblich, was dazu führt, dass mit deutlich höheren Vollbetriebsstunden gerechnet werden muss. Dies wird in Abbildung 44 deutlich, die Vollbetriebsstunden für die gemessenen Objekte liegen zwischen 2200 h und 3200 h. Dabei ist eine klare Korrelation zwischen der gemessenen Heizgrenze und den Vollbetriebsstunden ersichtlich.

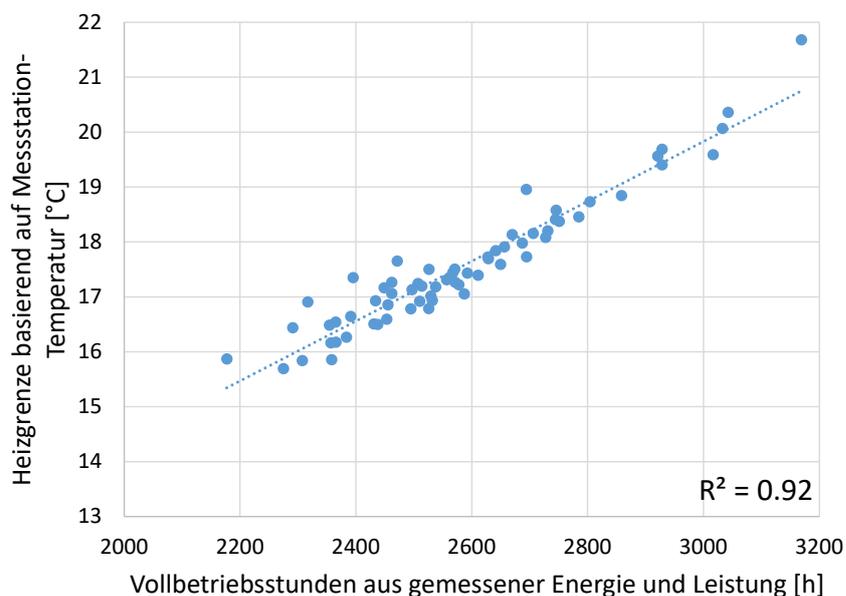


Abbildung 44: Korrelation zwischen Heizgrenze und Vollbetriebsstunden.



Bei gleicher Heizgrenze (z.B. 17 °C) variieren die Vollbetriebsstunden zwischen 2'350 h und 2590 h. Es muss angenommen werden, dass diese Differenz durch unterschiedliche Raumtemperaturen, unterschiedliche interne und externe Wärmegewinne oder durch das Lüftungsverhalten der Nutzer beeinflusst wird. Die Erkenntnis der in der Praxis erreichten Vollbetriebsstunden liefert wertvolle Grundlagen für die Dimensionierung des Leistungsbedarfs der Ersatzwärmeerzeuger bei Sanierung. In erster Linie sollte für einen Ersatz des Wärmeerzeugers wenn möglich eine Leistungskennlinie erstellt werden. Falls dies nicht möglich ist, können die hier vorgestellten Vollbetriebsstunden herangezogen werden.



3.4 Multilineare Regressionsanalyse

Die Auswertung der einzelnen Parameter unabhängig voneinander kann die Ursachen für einen Energy Performance Gap nur ansatzweise erklären. So ist es auch nicht verwunderlich, dass das Bestimmtheitsmass (R^2) für die Korrelation zwischen dem Energy Performance Gap und den in den vorangehenden Kapiteln gezeigten Einzelparameter meist unter 0.5 liegt, und nur in einem Fall (Heizgrenze) höher als 0.5 ist. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Ursache für den Energy Performance Gap nicht durch einen Parameter alleine erklärt werden kann, was auch den Erwartungen entspricht. Deshalb wird nachfolgend eine Multilineare Regressionsanalyse durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden alle zur Verfügung stehenden Parameter (aus Messung und Energienachweis) auf ihre gegenseitige Korrelation untersucht. Dazu wurde die Funktion „Korrelation“ im Excel Add-In „Analysis ToolPack“ verwendet. In Abbildung 45 ist die Korrelation (r-Wert, entspricht der Wurzel von R^2) zwischen den einzelnen Parametern in Prozent angegeben. Um eine Multikollinearität zu vermeiden, wurden für die lineare Regressionsanalyse nur die Parameter weiterverwendet, die nach Cohen [33] eine schwache (10%) bis mittlere (30%) Abhängigkeit aufweisen. Es handelt sich um folgende Parameter:

- Berechneter Wärmebedarf in MJ/m^2
- Relative Unterschreitung des Heizwärmebedarfs zum Grenzwert
- Heizgrenze gemessen, Aussenlufttemperatur aus Wetterstation
- Relative Differenz zwischen gemessener und geplanter Vorlauftemperatur
- Relative Differenz zwischen gemessener und geplanter Heizleistung
- Fensteranteil an der EBF in %

Im zweiten Schritt wurde die multilineare Regressionsanalyse mit dem IBM SPSS Statistic Programm (Version 25) für die oben genannten Parameter (unabhängige Variablen) ausgeführt. Die abhängige Variable entspricht dem relativen Mehrverbrauch an Heizwärme gegenüber dem berechneten Heizwärmebedarf (EPG) in Prozent. Die Tabelle 3 fasst die wichtigsten Resultate für die Analyse des gesamten Datensatzes zusammen. Detailliertere Informationen sind im Anhang C beschrieben. Die multilineare Regressionsanalyse zeigt, dass der Energy Performance Gap signifikant vom berechneten Wärmebedarf, von der Unterschreitung des Grenzwertes, der Heizgrenze und der Differenz der Heizleistung zwischen Planung und Messung beeinflusst wird. Die Variablen „Differenz Vorlauftemperatur“ und „Fensteranteil“ weisen beide einen p-Wert höher als 0.05 auf (entspricht Sig.robust, rot markierte Werte). Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass diese Parameter einen Einfluss haben, die Marke von 95% nicht überschreitet. Da die BWW-Korrektur (Brauchwarmwasser-Korrektur) für Objekte ohne separate BWW-Messung mit einer Ungenauigkeit verbunden ist, wurde auch eine multilineare Regressionsanalyse nur mit den Daten der Objekte mit separater BWW-Messung durchgeführt. Auch diese Resultate sind im Anhang C beschrieben (Tabelle 31). Die Auswertung zeigt, dass ein besseres Modell ($R^2_{\text{adj}} = 0.78$) erstellt werden kann, wenn nur Daten mit separater BWW-Erfassung berücksichtigt werden. Dennoch werden für die finale Auswertung die Messdaten von allen Objekten verwendet, da in Realität häufig keine separate BWW-Messung vorhanden ist.



	EBF	spezifischer Wärmeverbrauch	SIA Grenzwert	spezifischer Wärmebedarf	Unterschreitung des Grenzwertes ($H_G - H_B$)	Heizgrenze gemessen (Temp. Wetterstation)	Heizgrenze gemessen (Temp. vor Ort)	Differenz Vorlauftemperatur (Planung vs. Messung)	Differenz Heizleistung (Planung vs. Messung)	Anteil Fenster an EBF	Gebäude- hüllzahl	Baujahr	SIA Ausgabe
EBF	100%												
spezifischer Wärmeverbrauch	-5%	100%											
SIA Grenzwert	9%	46%	100%										
spezifischer Wärmebedarf	9%	34%	72%	100%									
Unterschreitung des Grenzwertes ($H_G - H_B$)	1%	22%	54%	-20%	100%								
Heizgrenze gemessen (Temp. Wetterstation)	-5%	62%	12%	-6%	21%	100%							
Heizgrenze gemessen (Temp. vor Ort)	1%	53%	37%	4%	46%	74%	100%						
Differenz Vorlauftemperatur (Planung vs. Messung)	-3%	-22%	-18%	-26%	5%	11%	-5%	100%					
Differenz Heizleistung (Planung vs. Messung)	15%	-50%	6%	10%	-2%	-22%	-1%	3%	100%				
Anteil Fenster an EBF	18%	3%	16%	7%	9%	-25%	-9%	0%	-3%	100%			
Gebäudehüllzahl	-11%	23%	36%	56%	-24%	4%	-9%	13%	10%	12%	100%		
Baujahr	-28%	-36%	-63%	-54%	-26%	-30%	-52%	16%	-15%	6%	-6%	100%	
SIA Ausgabe	-24%	-24%	-61%	-22%	-60%	-32%	-52%	-10%	-16%	-16%	10%	73%	100%

Abbildung 45: Korrelationsanalyse aller Gebäudekennwerte mit dem Excel Analysis ToolPack. Nach Cohen [33] entspricht ein Korrelationswert von $\pm 10\%$ einem schwachen Effekt, $\pm 30\%$ einem mittleren Effekt und $\pm 50\%$ entspricht einem starken Effekt.



Auf Grund der oben vorgestellten Resultate wurde eine zweite Analyse ohne die beiden Variablen mit hohem p-Wert (Fensteranteil und Differenz Vorlauftemperatur) durchgeführt. Die Resultate sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Die Auswertung zeigt, dass:

- Bei einer Zunahme des berechneten Wärmebedarfs um 1 MJ/m² der Energy Performance Gap um 0.5 Prozentpunkte abnimmt,
- für jeden Prozentpunkt, um welchen der berechnete Wärmebedarf den Grenzwert unterschreitet, der Energy Performance Gap um 0.5°Prozentpunkte zunimmt,
- bei einer Erhöhung der gemessenen Heizgrenze um 1 °C sich der Energy Performance Gap um 11 Prozentpunkte erhöht, und
- eine Überdimensionierung der geplanten Heizleistung (Wärmeverteilung) um 1 Prozentpunkt den Energy Performance Gap um 0.8 Prozentpunkte reduziert

Betrachtet man die standardisierten Koeffizienten (β), kann man abschätzen wie stark der jeweilige Einfluss der Variablen auf den Energy Performance Gap ist. Die Variablen „Wärmebedarf“, „Heizgrenze“ und „Differenz Heizleistung“ weisen einen ähnlich grossen Einfluss auf ($\beta = -0.43, 0.44, -0.40$), deutlich geringer ist der Einfluss der Variable „Unterschreitung Grenzwert“ ($\beta = 0.17$). Durch die vier unabhängigen Variablen kann 77% der Streuung des Energy Performance Gap erklärt werden, was nach Cohen [33] einem starken Effekt entspricht.

Tabelle 3: Resultate der multilinenaren Regressionsanalyse für alle ausgewählten Variablen
(B=Regressionskoeffizient, β =standardisierte Koeffizienten, T=Regressionskoeffizienten, Sig.=Signifikanz oder p-Wert).

Variable	B	Std.-Fehler	β	T	Sig.	Sig. robust ⁵
Konstante (Intercept)	-0.950	0.342		-2.779	0.008	0.014
Wärmebedarf	-0.006	0.001	-0.479	-7.159	0.000	0.000
Unterschreitung Grenzwert	0.425	0.178	0.158	2.392	0.020	0.036
Heizgrenze	0.120	0.017	0.482	6.953	0.000	0.000
Differenz Vorlauftemperatur	-0.633	0.270	-0.154	-2.341	0.023	0.058
Differenz Heizleistung	-0.766	0.129	-0.384	-5.913	0.000	0.000
Fensteranteil	0.342	0.332	0.068	1.030	0.308	0.342
R = 0.895						
R ² = 0.8						
Korrigiertes R ² = 0.777						
Standardabweichung = 0.145						
N = 58						

⁵ Sig. robust entspricht der Berechnung mit Standardfehlern die robust gegenüber einer Heteroskedastizität sind [37].



Tabelle 4: Resultate der multilinenen Regressionsanalyse ohne die Variablen „Fensteranteil“ und „Differenz Vorlauftemperatur“ (B=Regressionskoeffizient, β =Standardisierte Koeffizienten, T=Regressionskoeffizienten, Sig.=Signifikanz oder p-Wert).

Variable	B	Std.-Fehler	β	T	Sig.	Sig.-Robust	VIF
Konstante (Intercept)	-0.768	0.319		-2.409	0.020	0.046	
Wärmebedarf	-0.005	0.001	-0.431	-6.477	0.000	0.000	1.051
Unterschreitung Grenzwert	0.460	0.182	0.171	2.526	0.015	0.030	1.089
Heizgrenze	0.110	0.017	0.443	6.499	0.000	0.000	1.100
Differenz Heizleistung	-0.805	0.133	-0.404	-6.045	0.000	0.000	1.059
R = 0.881							
R ² = 0.776							
Korrigiertes R ² = 0.759							
Standardabweichung = 0.15							
N = 58							

In Abbildung 46 ist der Vergleich der Modellvorhersage mit dem real gemessenen Energy Performance Gap dargestellt. Die Modellvorhersage bezieht sich auf die Variablen aus Tabelle 4. Dabei wird ersichtlich, dass mit dem Modell tiefe Energy Performance Gaps eher überschätzt und die hohen EPG's (50%+) eher unterschätzt werden (unterschiedliche Neigung von roter und schwarzer Linie).

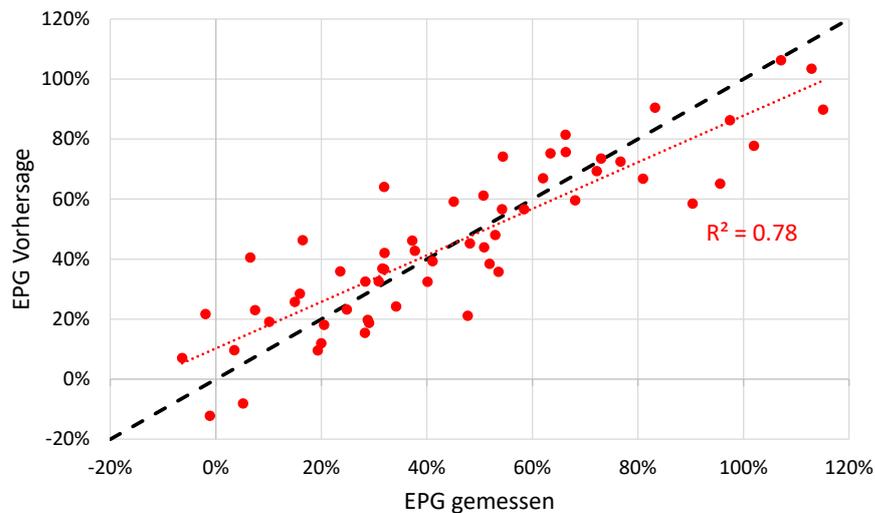


Abbildung 46: Vergleich zwischen gemessenem und auf Grund des multilinenen Regressionsmodells (reduzierte Variablenmenge) vorhergesagtem Energy Performance Gap.

Überraschend ist, dass in der multilinenen Regressionsanalyse nur zwei Einflussparameter auf Messdaten beruhen und die anderen beiden direkt von der Planung, respektive von der Berechnung im Energienachweis abhängig sind (Wärmebedarf und Unterschreitung Grenzwert). Nachfolgend wird auf die einzelnen Parameter genauer eingegangen.

Wärmebedarf und Unterschreitung Grenzwert:

Wie in der Abbildung 47 ersichtlich, weisen ältere Gebäude (SIA Ausgabe 2001 und 2007) mit abnehmendem geplantem Heizwärmebedarf eine zunehmende Unterschreitung des gesetzlich geforderten Heizwärmebedarfs auf (Grenzwert). Der Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Grenzwertunterschreitung ohne Unterscheidung der SIA Ausgaben zeigt sich auch in der Korrelationsanalyse⁶ in Abbildung 45 mit einem Wert von 20%, was einer mittleren Korrelation entspricht.

Da sich die Berechnungsgrundlagen zwischen den Ausgaben nicht wesentlich geändert haben, stellt sich die Frage wieso in den älteren Ausgaben der Grenzwert bei der Berechnung zum Teil massiv unterschritten wird. Mögliche Gründe sind:

- Der Bauherr war früher eher bereit für die Gebäudehülle mehr zu investieren um einen tieferen Energiebedarf zu erzielen.
- Da vorwiegend Minergie zertifizierte Objekte betrachtet werden spielen die Reduktionsfaktoren bezüglich maximalem Heizwärmebedarf eine Rolle, jedoch würde dies nur eine Unterschreitung von maximal 20% erklären.
- Die Gebäudekennwerte wurden früher optimistischer gewählt als heute mit der neuen SIA.

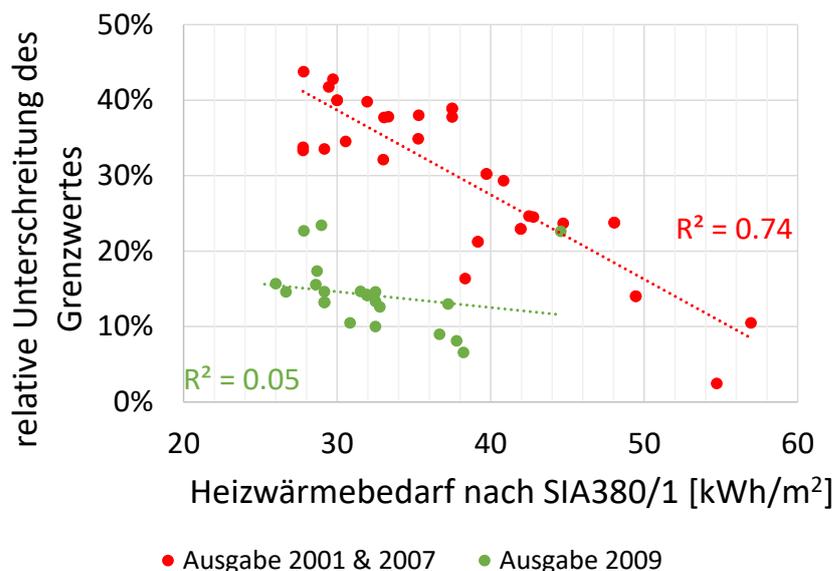


Abbildung 47: Relative Unterschreitung des Heizwärmegrenzwertes in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1 für unterschiedliche Ausgaben.

Der grosse Einfluss des berechneten Wärmebedarfs auf den Energy Performance Gap bestätigt, dass die gewählten Parameter im Energienachweis eine wichtige Rolle spielen. Der Einfluss der gewählten Gebäudeparameter im Energienachweis wird im Kapitel 4.4 vertiefter betrachtet.

⁶ Eine Multikollinearität kann jedoch auf Grund der tiefen Varianzinflationsfaktoren (VIF) der beiden Variablen (1.051 und 1.089) mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden



Heizgrenze:

Dass eine hohe Heizgrenze zu einem Mehrverbrauch führt, ist naheliegend. Die Abhängigkeit ist jedoch nicht einfach zu interpretieren, da Faktoren wie Raumtemperaturregelung, Raumsolltemperatur etc. einen Einfluss auf die Höhe des Mehrverbrauchs haben. Die Heizgrenze kann dennoch einen grossen Teil des Energy Performance Gap erklären und ist somit eine wichtige Grösse, die aus den Messdaten relativ einfach bestimmt werden kann. Üblicherweise geht man jedoch davon aus, dass Raum- oder Wohnungsthermostaten die Auswirkung einer zu hoch eingestellten Heizgrenze stark eindämmen sollten. Warum dies hier offensichtlich nicht wirksam geschieht, bleibt eine offene Frage.

Bekannt ist das Problem, dass Bewohner vor allem bei einem Wetterumschwung (Kaltfront im Sommer, Frühling oder Herbst) über zu kalte Temperaturen in den Wohnungen klagen. Dies ist auch leicht nachvollziehbar, denn die meisten Heizkurven und Heizgrenzen werden aus den Aussentemperaturwerten der bereits vergangenen 24 h berechnet. Die dann gefahrene Vorlauftemperatur wirkt sich jedoch auf Grund der Trägheit der thermischen Gebäudemasse insbesondere bei Fussbodenheizung erst nach Stunden auf die Raumtemperatur aus. Dadurch sind die Raumtemperaturen nach einem Temperatursturz naturgemäss erst einmal zu tief. Eine antizipierende Regelung der Vorlauftemperaturen und Heizgrenzen, welche die Wetterprognose für die kommenden Stunden sowie die Verzögerung des Wärmeeintrages durch die Trägheit des Systems berücksichtigt, könnte hier durchaus zu einer besseren Regelqualität führen und somit zu weniger Klagen. Damit besteht die Hoffnung, dass der Komfort auch bei niedriger eingestellter Heizkurve und Heizgrenze besser erreicht werden kann als mit der heute üblichen Regelungsmethode welche nur die Vergangenheit berücksichtigt.

Überdimensionierung der Heizleistung der Wärmeabgabe:

Interessant ist der Zusammenhang, dass eine Überdimensionierung der Heizleistung zu einer Abnahme des Energy Performance Gap führt. Zu beachten ist, dass hier die Leistung der Wärmeabgabe/Wärmeverteilung gemeint ist, und nicht die Wärmeerzeugerleistung, welche in der Regel höher ausfällt als die berechnete Heizleistung der Wärmeabgabe.

Eine Vermutung ist, dass die Überdimensionierung der Wärmeverteilung dazu führt, dass mehr Heizungsrohre in der Bodenheizung verbaut werden (kleinerer Verlegeabstand) was dazu führt, dass der gleiche Wärmeeintrag mit geringeren Vorlauftemperaturen erreicht werden kann.

Weiter ist bei einer Überdimensionierung der Durchfluss höher bei gleich bleibender Vorlauftemperatur, was dazu beitragen kann, einen fehlenden hydraulischen Abgleich zu kompensieren. Dies führt wiederum zu tieferen Sollraumtemperaturen durch den Benutzer, da alle Räume gleichmässig beheizt werden.

Um eine abschliessende Aussage zu machen, müssten die Raumtemperaturen in den Wohnungen gemessen werden, damit die oben beschriebenen Thesen überprüft werden könnten.



Fehlende Parameter/Variablen:

Da „nur“ 76% der Varianz ($R^2 = 0.76$) des Energy Performance Gap mit dem verwendeten Modell erklärt werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass weitere erklärende Parameter im Modell fehlen. Ein relevanter Faktor, der in dieser Studie nicht erfasst werden konnte, ist die effektive Raumtemperatur. Wie die Simulationen und SIA 380/1 Berechnungen zeigen (Kapitel 5.1), erhöht sich der Heizwärmebedarf um bis zu 12% bei einer Erhöhung der Raumtemperatur um 1 °C. Damit liesse sich wohl ein grosser Teil des Energy Performance Gap erklären, denn die Raumtemperaturen weichen in Realität oft deutlich von den Standardwerten ab (siehe Kapitel 5.3). Weitere wichtige Einflüsse, die nicht berücksichtigt werden konnten, sind das Lüftungs- und Verschattungsverhalten der Bewohner/innen. Im Gegensatz zur Raumtemperatur werden diese Einflüsse auch in Zukunft kaum von einem Monitoring erfasst werden können, da der Aufwand dafür sehr gross ist.



4 Resultate Phase 2: Feinanalyse

4.1 Mehrjahresanalyse des Performance Gaps

Für neun Objekte wurde der Energy Performance Gap über mehrere Jahre betrachtet. Diese Gebäude weisen eine separate BWW Messung auf. In Abbildung 48 ist der Energy Performance Gap witterungsbereinigt zwischen 2010 und 2016 dargestellt. Für sechs Objekte wird die Messung ab 2012 dargestellt, dies weil eine Zeitspanne von zwei Jahren für die Bauaustrocknung berücksichtigt wurde. In Tabelle 5 sind einige ausgewählte Gebäudeparameter für die untersuchten Objekte zusammengefasst.

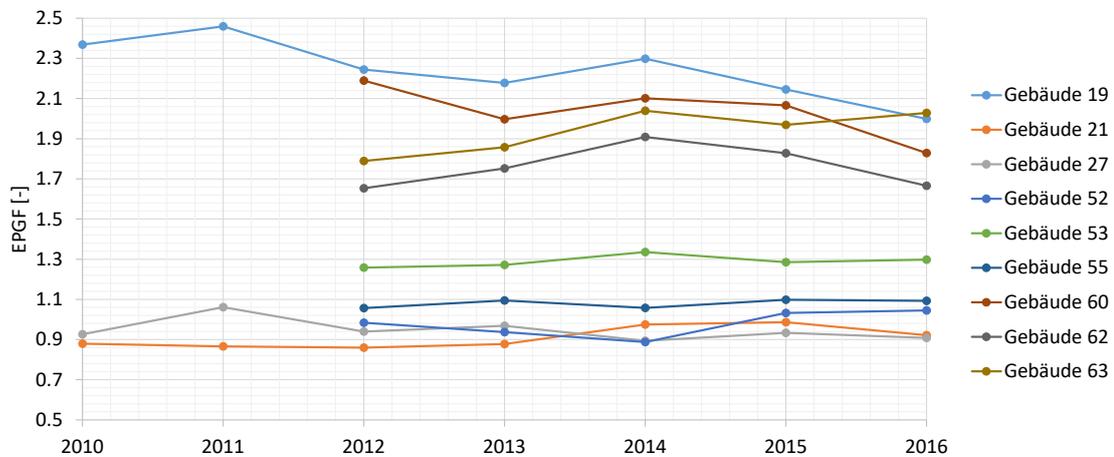


Abbildung 48: Verlauf des witterungsbereinigten Energy-Performance-Gap-Faktors für neun Gebäude über mehrere Jahre.

Tabelle 5: Ausgewählte Gebäudeparameter der ausgewerteten Objekte.

Gebäude	19	21	27	52	53	55	60	62	63
Heizwärmebedarf [kWh/m ²] (Energienachweis)	37.5	54.7	40.8	49.4	48.1	49.4	29.7	30.0	27.8
Heizgrenze (aus Messung) [°C]	20.1	18.5	15.7	16.5	17.4	17.4	20.4	19.7	18.7
Fensteranteil auf EBF bezogen	26%	12%	35%	15%	26%	15%	18%	19%	20%
EBF [m ²]	1076	2820	1240	776	1573	776	1415	1836	1773
Heizwärmeverbrauch [kWh/m ²] (Witt. bereinigt)	80.7	54.1	38.2	51.2	61.9	54.5	61.6	55.0	54.9
EPGF - Energy Performance Gap Faktor (Jahr 2015)	2.2	1.0	0.9	1.0	1.3	1.1	2.1	1.8	2.0
Standardabweichung EPGF (absolut über alle Jahre)	14.1%	5.0%	5.2%	6.0%	2.6%	1.9%	12.1%	9.7%	9.8%

In erster Linie fällt auf, dass der Energy Performance Gap einer Schwankung über die Jahre ausgesetzt ist. Das Gebäude 19, welches den höchsten Energy Performance Gap und hohe Jahresschwankungen aufweist, zeigt tendenziell eine



Verringerung des Performance Gap über die Jahre. Eine Erklärung dafür könnte eine durchgeführte Betriebsoptimierung sein. Grundsätzlich würde man erwarten, dass auf Grund der Klimakorrektur nur geringe Schwankungen zu sehen sind.

Die Verläufe der Kurven in Abbildung 48 lassen darauf schliessen, dass Objekte mit höherem Performance Gap (19, 60, 62, 63) stärkere Schwankungen über die Jahre aufweisen als jene mit tieferem Performance Gap. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 49 (links) erhärtet. Die Abbildung zeigt die absolute Standardabweichung des Energy Performance Gap über die Jahre in Abhängigkeit des Energy Performance Gaps der Messperiode 2015. Der rechte Plot zeigt den Zusammenhang zwischen Standardabweichung und der aus den Messdaten ermittelten Heizgrenze. Mit zunehmender Heizgrenze werden auch die Jahresschwankungen des Energy Performance Gap grösser.

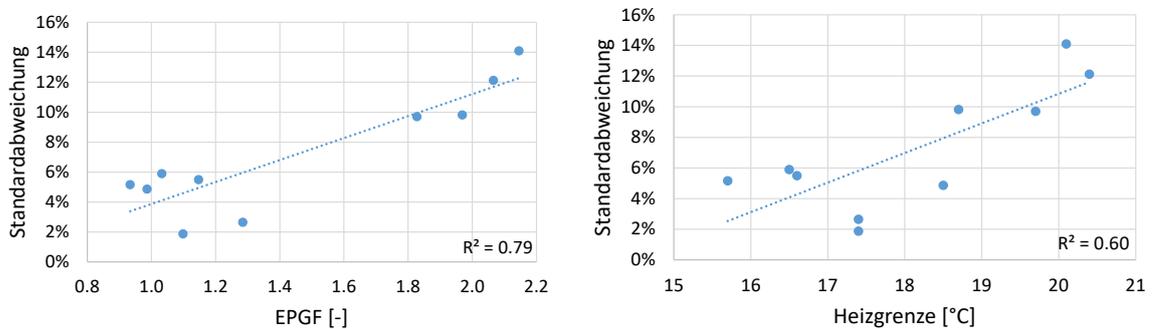


Abbildung 49: Absolute Standardabweichung des Energy Performance Gap über mehrere Jahre in Prozent in Abhängigkeit des EPGF im Jahr 2015 und der aus Messwerten ermittelte Heizgrenze.

Diese Resultate bestätigen die Vermutung, dass die Heizgrenze einen Einfluss auf den Energy Performance Gap hat. Andererseits konnte auch festgestellt werden, dass die Heizgrenze einen Einfluss auf die Klimakorrektur hat, welche wiederum die Auswertung zum Energy Performance Gap beeinflusst. Dies wird in Abbildung 50 noch einmal verdeutlicht. Im Diagramm ist der Klimakorrekturfaktor in Abhängigkeit der ermittelten Heizgrenze für unterschiedliche Jahre dargestellt. Standardmässig wird für die Klimakorrektur die Heizgrenze von 12 °C gewählt um die Heizgradtage zu berechnen. Je wärmer ein Messjahr ist (2011, 2014, 2015) desto grösser sind auch die Schwankungen in Abhängigkeit der gewählten Heizgrenze.

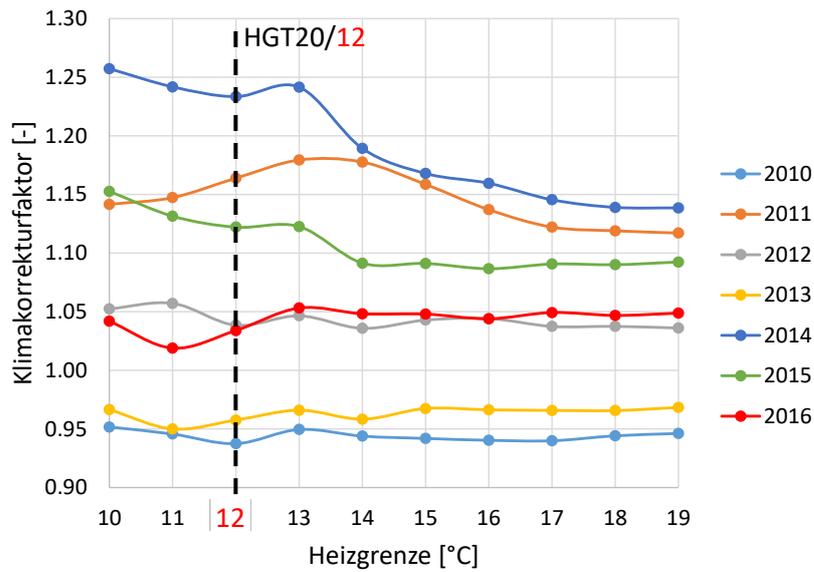


Abbildung 50: Einfluss der gewählten Heizgrenze auf den Klimakorrekturenfaktor basierend auf der HGT-Methode [31], für unterschiedliche Jahresklimadaten der Wetterstation SMA.

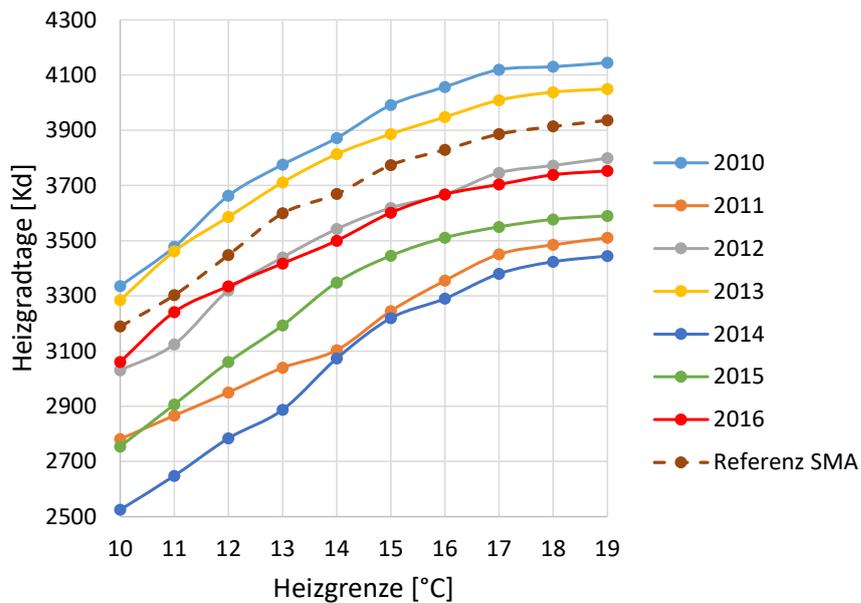


Abbildung 51: Heizgradtage für unterschiedliche Jahre in Abhängigkeit der gewählten Heizgrenze für die Wetterstation SMA.

Auf Grund der Jahresabhängigkeit des Energy Performance Gaps gerade für Gebäude mit hohem Energy Performance Gap (Abbildung 48) und den Erkenntnissen aus dem Kapitel 2.8, wurden vier Gebäude detaillierter untersucht. Diese Ergebnisse sind im Anhang D aufgeführt.

4.2 Baugleiche Objekte

4.2.1 Überbauung 1

Interessant sind für die Feinanalyse baugleiche Objekte mit unterschiedlichem Energy Performance Gap. Ein Beispiel dafür ist eine Überbauung aus sieben MFH, welche aus den Objekten 32-35, 73 und 74 besteht. Für eines der MFH konnten keine Messdaten beschafft werden.

Für alle Gebäude wurde derselbe Energienachweis verwendet, da alle Gebäudeparameter wie Gebäudehüllzahl, Fensteranteil, Dämmstandard etc. für alle Objekt gleich sind. Der einzige Unterschied, welcher interessanterweise im Energienachweis nicht berücksichtigt wurde, ist die Gebäudeausrichtung. Diese ist in Abbildung 52 schematisch dargestellt. Die Abbildung enthält auch den Energy-Performance-Gap-Faktor pro Objekt. Betrachtet man die äussere Gebäudereihe, fällt auf, dass der Energy Performance Gap mit zunehmender Drehung der Gebäude zunimmt. Das Objekt 73 stellt in Bezug auf die Ausrichtung und den Energy Performance Gap eine Ausnahme dar. In der Tabelle 6 sind die wichtigsten Gebäudekennwerte zusammengefasst. Je dunkler die Markierung in der Tabelle, desto grösser ist der auf Grund dieses Parameters vermutete Energy Performance Gap.

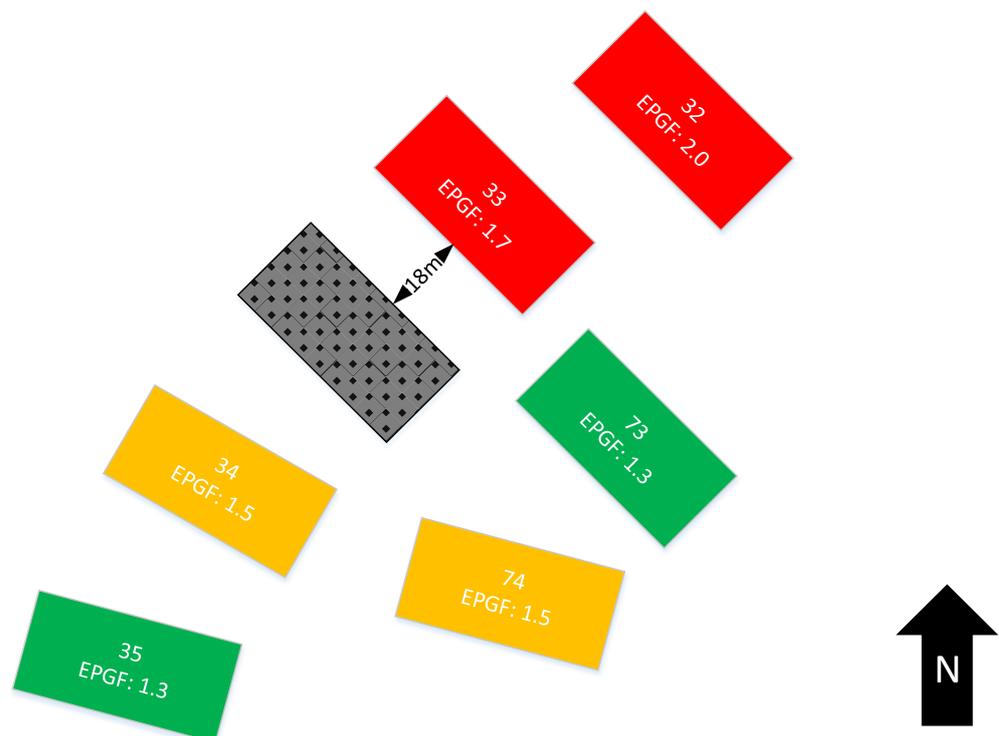


Abbildung 52: Schematische Darstellung einer Überbauung mit baugleichen Objekten und unterschiedlichem Energy Performance Gap.



Tabelle 6: Gebäudekennwerte von sechs baugleichen Objekten. Markiert sind Werte die einen höheren Energy Performance Gap begünstigen müssten
(je dunkler desto stärker der Effekt)

Gebäude	32	33	34	35	73	74
EPGF - Energy Performance Gap Faktor (Jahr 2015)	2.02	1.68	1.53	1.32	1.32	1.54
Heizgrenze (aus Messung) [°C]	18.4	17.7	16.9	16.5	17.2	18.0
Ausrichtung [°] (0° = Süden)	45.7	45.7	29.6	14.6	45.7	14.6
Vorlauftemperatur bei -8°C (Messung) [°C]	36.2	36.1	35.5	33.5	36.5	35.4
Spez. Heizleistung bei -8°C (Messung) [W/m ²]	20.7	18.0	17.6	15.7	14.8	16.2
Max. Durchfluss im Heizkreis [m ³ /h]	2.6	2.3	2.3	1.8	2.3	2.0
Stromverbrauch [kWh/m ²]	18.4	17.2	15.7	21.1	14.8	23.5
Berechneter BWW Verbrauch (keine separate Messung) [kWh/m ²]	6.7	8.1	9.6	8.0	6.3	6.7

Die Resultate lassen vermuten, dass die Gebäudeorientierung einen Einfluss auf den gemessenen Mehrverbrauch hat. Simulationen mit dem Referenzgebäude zeigen (siehe Kapitel 5.2), dass der Unterschied der Gebäudeorientierung (45°) etwa 2-5% des Energy Performance Gap ausmachen kann. Im Energienachweis wurde keine Verschattung der Nachbargebäude berücksichtigt. Die Simulationen zeigen, dass die Verschattung bei einem Abstand von 23 m etwa 1.5% des Energy Performance Gap ausmachen kann (siehe Kapitel 5.2). Beide Faktoren weisen somit einen relativ geringen Einfluss auf den Wärmeverbrauch auf. Sie erklären den grossen Unterschied zwischen den Objekten nicht. Zudem weist Objekt 73 einen Energy-Performance-Gap-Faktor aus, der deutlich tiefer ist als für andere der sechs Objekte mit ähnlicher Abweichung der Orientierung und der Gebäudeverschattung (zum Beispiel Objekt 33).

Auffallend ist, dass der Stromverbrauch nicht mit dem Energy Performance Gap korreliert. Man würde erwarten, dass ein tiefer Stromverbrauch auf geringere interne Quellen deutet, was dazu führt, dass der Heizwärmeverbrauch steigt. Vergleicht man die Stromverbrauchsdaten mit den Werten in der SIA 2024, dann entspricht dieser ziemlich gut den Standardwerten. Anders sieht es für den ermittelten BWW-Verbrauch aus. Der BWW-Verbrauch wurde für jedes Objekt gemäss der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Methode aus der Leistungskennlinie rechnerisch ermittelt. Er ist im Schnitt über alle sechs Objekte um ca. 60% tiefer als man auf Grund von Standardwerten erwarten würde. Dies könnte auf eine reduzierte Belegung der Wohnungen zurück zu führen sein, was jedoch nicht mit dem Stromverbrauch zusammen passt.

Betrachtet man die Kennwerte für das Gebäude 73, dann sieht man, dass einige Werte (dunkelrote) für einen grossen Energy Performance Gap sprechen würden,

jedoch im Vergleich zu den anderen Objekten dieser tief ausfällt. Da für dieses Gebäude der BWW-Verbrauch und der Stromverbrauch am tiefsten sind, kann man von einer reduzierten Anzahl Bewohner/innen ausgehen, was auch für einen höheren Energy Performance Gap sprechen würde.

In der Abbildung 55 ist der monatliche Verlauf des Wärmeverbrauchs der Gebäude 32 und 73 dargestellt. Betrachtet man den spezifischen Heizwärmeverbrauch, so wird der Mehrverbrauch vom Gebäude 32 deutlich. Dies sowohl in den Wintermonaten als auch in der Übergangszeit. Die Auswertung der Verteilung des Heizwärmeverbrauchs über die Monate zeigt, dass die beiden Verläufe sehr ähnlich sind. Das bedeutet, dass der Wärmebedarf beider Gebäude im gleichen Ausmass von der Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung abhängig ist. Mit vier Begehungen vor Ort wurde versucht herauszufinden, ob das Verschattungs- und Fensterlüftungsverhalten im konkreten Fall für die unterschiedlichen Verbräuche verantwortlich sein können. An allen vier Wintertagen im Jahr 2018 konnte mit Thermografieaufnahmen kein einziges offenes Fenster detektiert werden. Es wurden Aufnahmen bei Aussenlufttemperaturen von $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, mit maximal einer Aufnahme pro Woche. Die Beobachtungen zur Verschattung wurden an sonnigen Wintertagen zwischen 10.00 Uhr und 15.00 Uhr durchgeführt. In Abbildung 53 ist die Auswertung zusammengefasst. In den Plots wird für jede Fassadenseite der relative Anteil an verschatteten Fenstern angegeben. Für diese Überbauung sind bezüglich den solaren Gewinnen die Südfassade und die Westfassade relevant. Grundsätzlich erkennt man, dass beim Objekt 73 ein grösserer Anteil der Fenster mit Vorhängen verschattet war als beim Objekt 32. Hingegen weist letzteres einen grösseren Verschattungsanteil mit aussen liegenden Jalousien auf, welche die solaren Gewinne stärker reduzieren als Vorhänge im Innenraum. Mit den vier Beobachtungszeitpunkten kann kein extrem unterschiedliches Verhalten bezüglich Verschattung oder offene Fenster in den Wintermonaten bestätigt werden. Allerdings ist mit nur vier Beobachtungen keine repräsentative Beurteilung möglich.

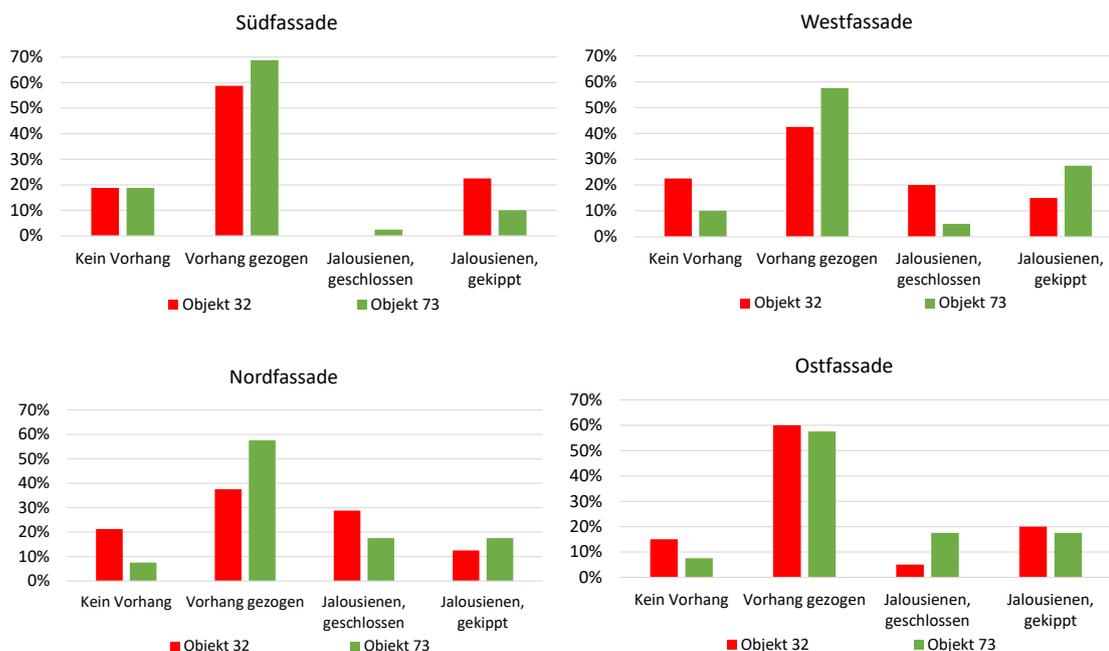


Abbildung 53: Auswertung der Beobachtungen zum Verschattungsverhalten an schönen Wintertagen (Begehung 2018).

Obwohl die Vorlauftemperatur und der maximal gemessene Durchfluss der beiden Objekte fast gleich sind, kann ein grosser Unterschied in der gemessenen spezifischen Heizleistung (bei -8 °C) mit 20.7 W/m^2 für Objekt 32 und 14.8 W/m^2 für Objekt 73 festgestellt werden. Auch die Heizgrenze weist einen Unterschied von 1.2 °C auf (Objekt 32: 18.4 °C , Objekt: 73: 17.2 °C). Deshalb wurde für die beiden Objekte der Volumenstrom im Heizkreis genauer untersucht. In Abbildung 54 wird für beide Objekte ein Histogramm des Durchflusses dargestellt. Auf der X-Achse ist der prozentuale Anteil vom Maximalvolumenstrom in 10er-Schritten dargestellt. Auf der Y-Achse sind die Anzahl Tagesmittelwerte für den entsprechenden relativen Volumenstrom aufgeführt. Vergleicht man beispielsweise für beide Objekte die relativen Volumenströme von 0-10%, dann kann man erkennen, dass an 81 Tagen im Jahr der Volumenstrom beim Objekt 32 bei null lag. Beim Objekt 73 sind es mit 110 Tagen deutlich mehr. Dies könnte auf die tiefere Heizgrenze zurück zu führen sein, oder auf tiefere Raumtemperatursollwerte, was dazu führt, dass die Raumregelung den Durchfluss früher drosselt. Der Einfluss der Heizgrenze kann mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da die monatliche Verteilung des Heizwärmeverbrauchs sehr ähnlich ist für beide Gebäude, siehe dazu Abbildung 55 (oben). Es ist gut möglich, dass die Heizgrenze am Regler in beiden Fällen gleich eingestellt ist, jedoch die Raumtemperaturregelung die hohe Heizgrenze im Fall vom Gebäude 73 kompensiert. Eine hohe Heizgrenze erhöht den Wärmeverbrauch (Nutzenergie), wenn die Komfortansprüche hoch sind (Temperatur) oder das Verschattungs- und Lüftungsverhalten in der Übergangszeit stark von der „Norm“ abweicht (siehe Kapitel 5.5). In diesen Fällen kann die Raumtemperaturregelung nicht eingreifen, da die genannten Effekte zu einem höheren Wärmebedarf führen.

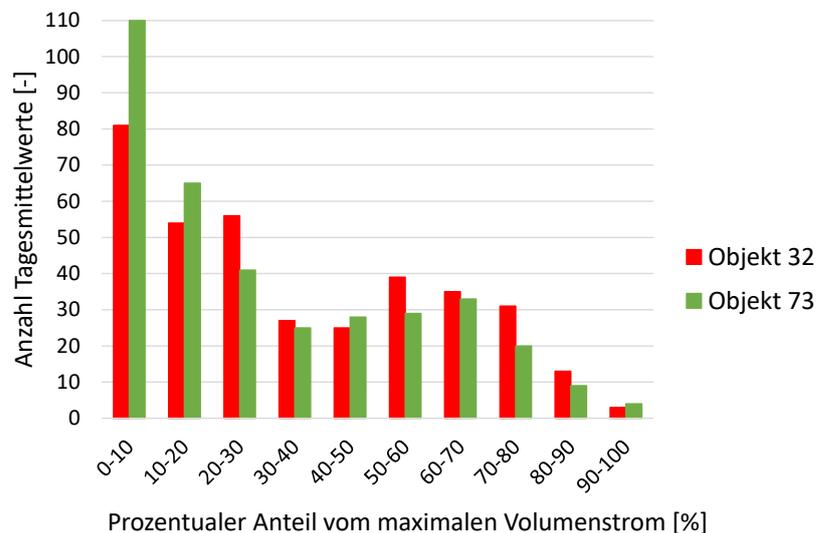


Abbildung 54: Volumenstromhistogramm für die Objekte 32 und 73 (Messperiode 2015).

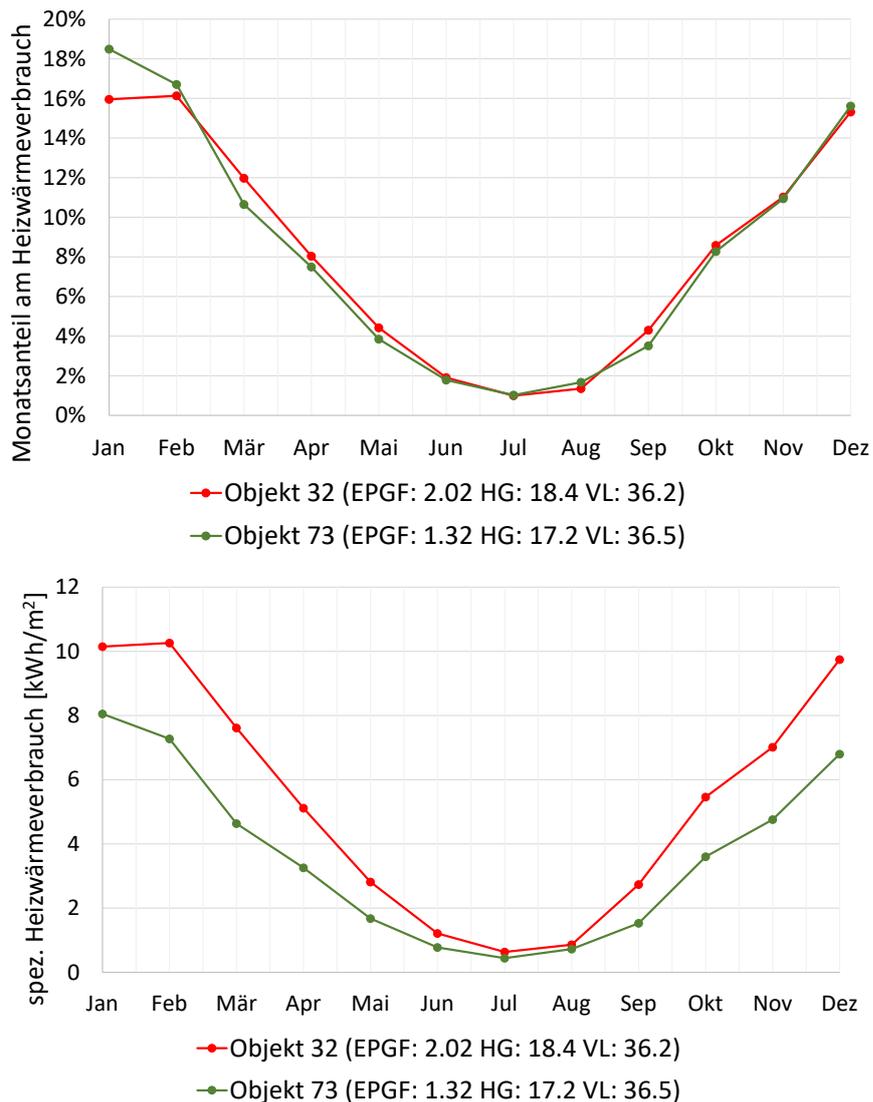


Abbildung 55: Relativer und absoluter Monatswärmeverbrauch von Objekt 32 und 73 im Vergleich (Messperiode 2015).

Fazit: Die Analyse der Messdaten von sechs baugleichen Objekten konnte Unterschiede beim Heizwärmeverbrauch von bis zu 70% nicht abschliessend klären. Es wird vermutet, dass eine höhere Raumtemperatur einen wesentlichen Einfluss auf den erhöhten Wärmeverbrauch hat. Jedes Grad mehr, führt zu einer Erhöhung des Wärmebedarfs um 9-12% (siehe Kapitel 5.1). Damit können jedoch nur etwa 30% des Mehrbedarfs erklärt werden (Annahme: $\Delta T = 3 \text{ K}$). Das Verschattungs- und Lüftungsverhalten wird auf Grund der Beobachtungen nicht als wichtigster Einflussfaktor gesehen, was auch durch den sehr ähnlichen Verlauf des relativen Monatsheizwärmeverbrauchs (Abbildung 55, oben) untermauert wird. Auf Basis des Stromverbrauchs und des ermittelten Warmwasserverbrauchs, die beide sehr ähnlich sind, kann man nicht von grossen Unterschieden bei den internen Gewinnen ausgehen. Damit bleiben Faktoren wie Komfortlüftung (Wirkungsgrad und Luftmengen) sowie bauphysikalische Ursachen als mögliche Begründung für den Mehrverbrauch. Diese Parameter konnten im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht werden.



4.2.2 Überbauung 2

Die zweite Überbauung die genauer untersucht wurde, besteht aus vier sehr ähnlichen Objekten, jedoch mit zum Teil unterschiedlichen Energiebezugsflächen. Die Objekte weisen alle die gleiche Orientierung auf. In Tabelle 7 sind die wichtigsten Gebäudekennwerte aus dem Energienachweis und den Messungen zusammengefasst. Der Mehrverbrauch von 66% bis 107% gegenüber der Bedarfsberechnung im Energienachweis ist relativ hoch. Auffallend ist jedoch bei allen vier Objekten die grosse Unterschreitung des ausgewiesenen Heizwärmebedarfs von 40% - 43% gegenüber des Grenzwertes der SIA 380/1. Würde man den Energy Performance Gap auf Basis des Grenzwertes ermitteln, wäre dieser mit zwischen 0% und 11% sehr gering. Damit ist nicht ausgeschlossen, dass die verwendeten Berechnungsparameter im Energienachweis eher progressiv gewählt wurden, um einen tiefen Heizwärmebedarf zu erreichen. Dies konnte im Projekt nicht überprüft werden, da keine ausreichenden Unterlagen der Objekte zur Verfügung standen.

Tabelle 7: Gebäudekennwerte von ähnlichen Objekten in einer untersuchten Überbauung. Markiert sind Werte die einen höheren Energy Performance Gap begünstigen müssten (je dunkler desto stärker der Effekt).

Gebäude	60	61	62	63
EBF [m ²]	1416	1836	1836	1773
Gebäudehüllzahl	1.2	1.1	1.1	1.1
Fensteranteil an EBF	18%	19%	19%	20%
EPGF - Energy Performance Gap Faktor (Jahr 2015)	2.07	1.66	1.83	1.97
Heizgrenze (aus Messung) [°C]	20.4	19.0	19.7	18.7
Vorlauftemperatur bei -8°C (Messung) [°C]	31.7	32.8	32.4	33.0
Spez. Heizleistung bei -8°C (Messung) [W/m ²]	23.3	27.6	28.0	28.2
Max. Durchfluss im Heizkreis [m ³ /h]	5.6	5.3	5.2	5.8
Stromverbrauch [kWh/m ²]	23.7	22.4	25.8	22.1

Betrachtet man die Gebäudekennwerte des Gebäudes 63 fällt auf, dass alle Werte abgesehen von der Heizgrenze auf einen hohen Energy Performance Gap hinweisen (dunkelrot). Im Fall vom Objekt 61 weisen ebenfalls relativ viele Gebäudekennwerte auf eine grössere Abweichung, dennoch ist es das Gebäude mit dem tiefsten Energy Performance Gap. In Abbildung 56 ist der absolute und relative monatliche Heizwärmeverbrauch für alle vier Objekte aufgeführt. Dabei fällt auf, dass das Objekt 61 einen tieferen Wärmeverbrauch in der Übergangszeit hat, obwohl die Heizgrenze in etwa gleich ist wie beim Objekt 63.

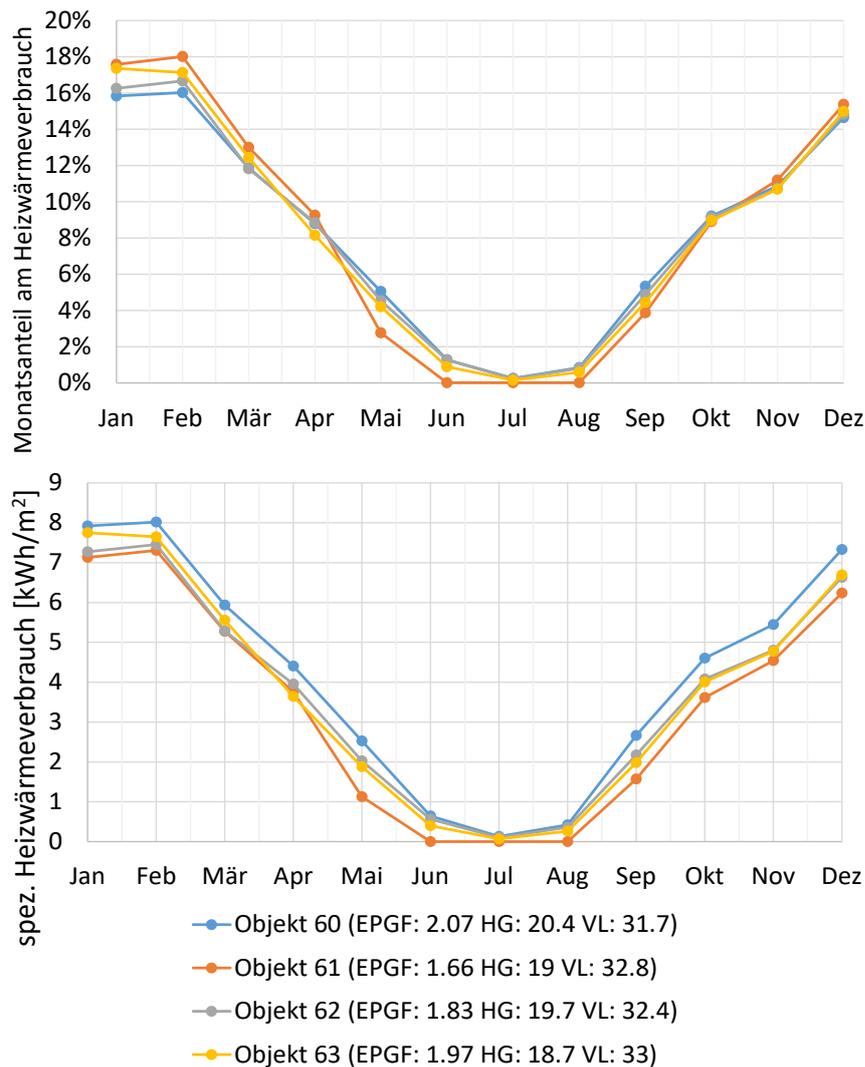


Abbildung 56: Relativer und absoluter Monatswärmeverbrauch der Objekte in Überbauung 2 im Vergleich (Messperiode 2015).

In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind der absolute und der relative spezifische Wärmeverbrauch in Abhängigkeit des Monatsmittelwertes der Aussentemperatur im Vergleich zur Normberechnung (Energienachweis) für die Gebäude 61 und 63 dargestellt. Obwohl das Messjahr 2015 eine höhere monatliche Globalstrahlungssumme aufweist als das Norm-Referenzjahr, ist der Wärmeverbrauch beider Objekte vor allem bei höheren Aussentemperaturen (>5 °C) deutlich grösser als es auf Grund der Normberechnung zu erwarten wäre. Dabei ist der Unterschied zwischen berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch bei Objekt 63 deutlich höher als bei Objekt 61, wobei der Mehrbedarf bei beiden Objekten vor allem in den Übergangsmonaten hoch ist. Bei den kältesten Monaten schneiden sich die Bedarfs- und die Verbrauchskurven beider Objekte.

Mit grosser Wahrscheinlichkeit kann somit ein Fehler in der Gebäudehülle ausgeschlossen werden, denn dies müsste zu einer grösseren Differenz des Wärmeverbrauchs auch im Winter führen. Aus dem gleichen Grund kann auch eine höhere Innentemperatur die beobachteten Kurvenverläufe nicht erklären, es sei

denn, die Innentemperatur ist nur für die Übergangsmonate höher, nicht jedoch für die kalten Monate, oder der dadurch zu erwartende Mehrverbrauch in kalten Monaten wird durch andere Faktoren wie zum Beispiel erhöhte passivsolare Einträge oder geändertes Benutzerverhalten kompensiert.

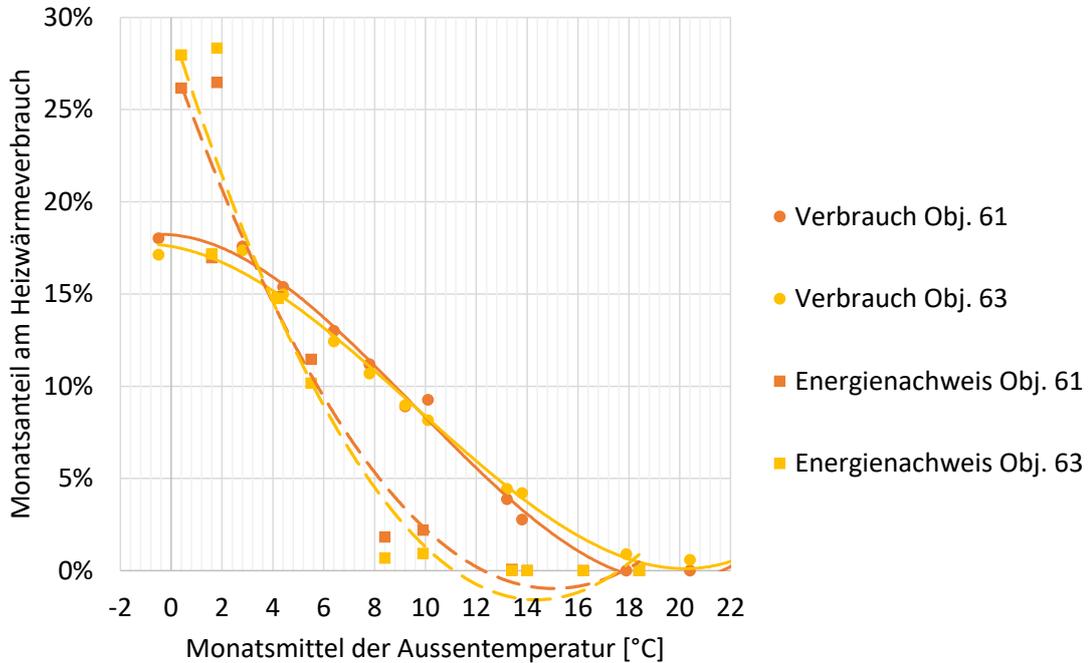


Abbildung 57: Relativer monatlicher Heizwärmeverbrauch (gemessen) und Heizwärmebedarf (berechnet mit Referenzjahr im Energienachweis) in Abhängigkeit vom Monatsmittelwert der Aussentemperatur für die Objekte 61 und 63.

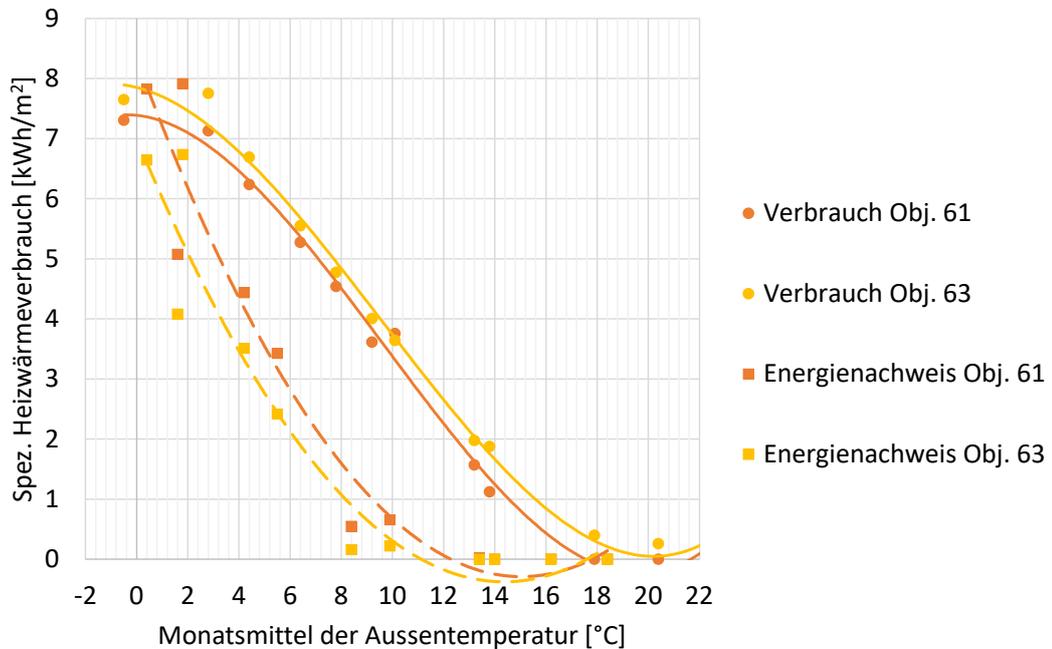


Abbildung 58: Absoluter spezifischer Heizwärmeverbrauch (gemessen) und Heizwärmebedarf (berechnet mit Referenzjahr im Energienachweis) in Abhängigkeit des Monatsmittelwertes der Aussentemperatur für die Objekte 61 und 63.

In Abbildung 59 ist für die Objekte 61 und 63 ein Histogramm des Volumenstroms der Heizwärmeverteilung dargestellt. Die Verteilung der Tagesmittelwerte des relativen Volumenstroms ist deutlich anders ausgeprägt als beispielsweise bei der Untersuchung der Überbauung 1 (siehe Abbildung 54). Ein relevanter Unterschied zwischen den beiden Überbauungen ist, dass erstere mit Fernwärme beheizt wird und die in diesem Abschnitt untersuchte mit einer Wärmepumpe welche das Gebäude jeweils über einen parallel geschalteten Pufferspeicher bedient. Der Volumenstrom wird direkt am Heizkreis gemessen, also nach dem Pufferspeicher.

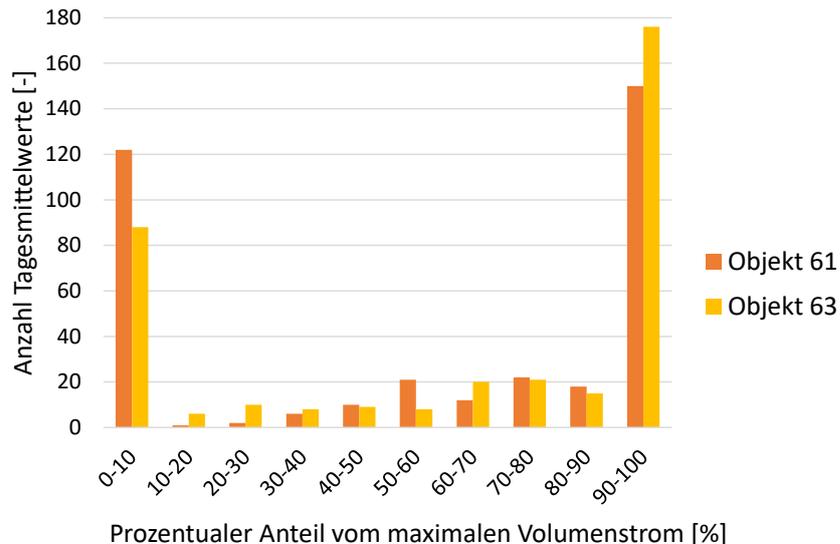


Abbildung 59: Volumenstromhistogramm für die Objekte 61 und 63 (Messperiode 2015).

Überraschend ist die Tatsache, dass es bei beiden Objekten fast nur „alles“ (voller Volumenstrom) oder „nichts“ (kein Volumenstrom) gibt, wobei bei Gebäude 61, welches den geringeren Mehrverbrauch aufweist, ein höherer Anteil Tage ohne Volumenstrom beobachtet werden kann. Auf Grund dieser Beobachtungen würde man erwarten, dass die Heizgrenze bei Objekt 61 tiefer eingestellt ist als bei Objekt 63, was jedoch nicht mit den aus den Messdaten durch Extrapolation bestimmten Heizgrenzen (Tabelle 7) übereinstimmt. Weiter würde man annehmen, dass bei keinem der beiden Objekte Thermostatventile oder eine andere Raumtemperaturreglung den Volumenstrom signifikant beeinflussen. Nach Auskunft des Energiecontracting-Unternehmens ist das Fehlen von Raum- oder Zonentemperaturreglern jedoch unwahrscheinlich. Somit bleibt als Erklärung nur noch, dass aus irgend einem Grund, der hier jedoch nicht ermittelt werden konnte, die Thermostate oder Raumtemperaturregler entweder nicht funktionstüchtig oder so hoch eingestellt sind, dass sie nicht aktiv werden.

In Abbildung 60 sind die Leistungskennlinien der beiden Objekte abgebildet. Dabei fällt auf, dass das Gebäude 61 viel weniger Datenpunkte unterhalb von 5 kW Heizleistung aufweist und keine Datenpunkte oberhalb 18 °C Aussentemperatur zu finden sind. Die reale Heizgrenze liegt bei diesem Gebäude vermutlich tiefer als der in Tabelle 7 deklarierte Wert der auf Grund des Schnittpunktes der Trendlinie mit der X-Achse ermittelt wurde. Deshalb wurde aus den stündlichen Messdaten die maximale Tagesmitteltemperatur ermittelt, bei welcher die Heizkreispumpe in Betrieb geht. Diese Temperatur entspricht der Heizgrenze mit einer höheren Genauigkeit als wenn diese aus dem Leistungsdiagramm ermittelt wird. Die neu ermittelte Heizgrenze für das Objekt 61 beträgt damit 16 °C und für das Objekt 63 beträgt diese 17.4 °C. Dieser Unterschied könnte eine Erklärung für die Differenz in der Verteilung des Volumenstroms und damit auch für das im Vergleich zu Objekt 61 schlechtere Abschneiden von Objekt 63 sein.

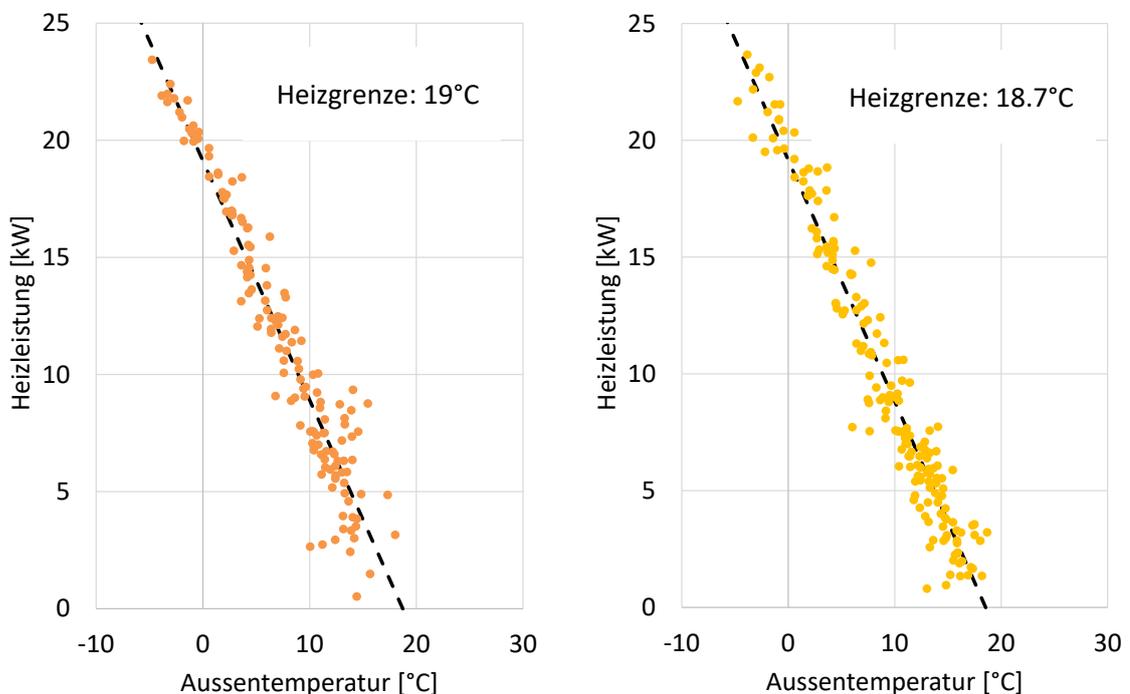


Abbildung 60: Leistungskennlinien der Objekte 61 und 63.

Abbildung 61 zeigt, wie unterschiedlich die Volumenstrom-Histogramme eines Objektes mit Fernwärme (Objekt 32 aus Überbauung 1) und eines Objektes mit Wärmepumpenheizung (Objekt 61) sind. Da in der Regel ein Fernwärmenetz eine höhere Temperatur liefert als von der Heizkurve gefordert, wird die Leistung über den Volumenstrom geregelt (Beimischschaltung Heizkreis). Bei der Wärmepumpenheizung gibt es keine Rücklaufbeimischung. Der Durchfluss kann nur über die Raumregelung gedrosselt werden. Auf Grund fehlender Drehzahlregelung des Kompressors, kann die Vorlauftemperatur nicht exakt der Vorlauf-Solltemperatur entsprechen. Um ein häufiges Takten bei reduzierter Leistungsabnahme zu verhindern sind Pufferspeicher installiert. Dennoch scheinen im Heizkreis keine Volumenstromregler aktiv zu sein.

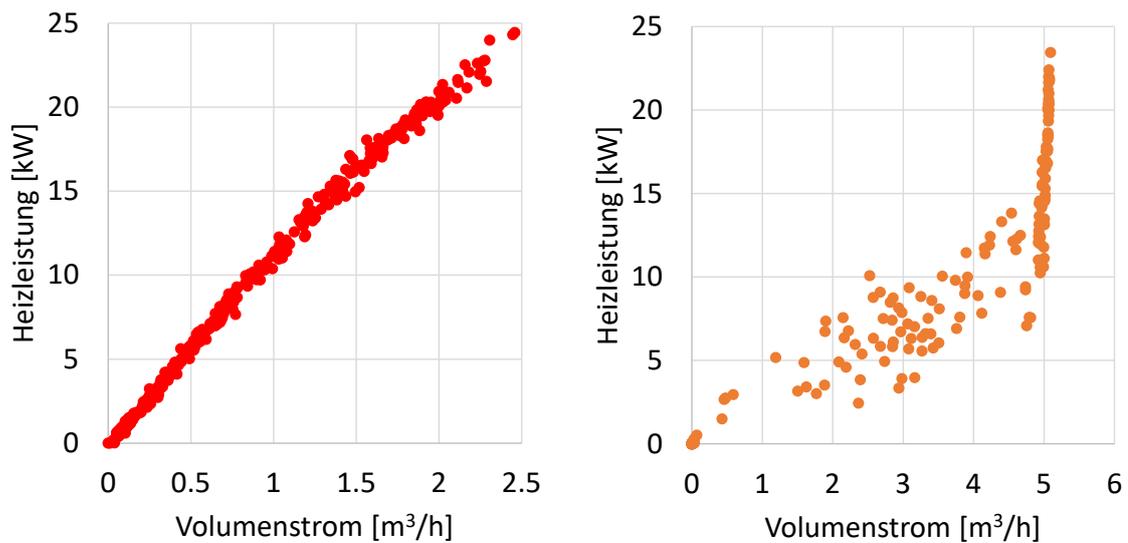


Abbildung 61: Wärmeleistung in Abhängigkeit des Volumenstroms des Heizkreises für das Objekt 32 (links) mit Fernwärmeheizung und für das Objekt 61 (rechts) mit WP-Heizung. Alle Werte entsprechen Tagesmittelwerten.

Fazit: Auch bei dieser Überbauung muss zumindest in den Übergangsmonaten von deutlich höheren Raumtemperaturen ausgegangen werden als dies in den Normberechnungen angenommen wird. Einerseits sind die Heizgrenzen sehr hoch und andererseits könnten die gegenüber der Planung um +3K erhöhten Vorlauftemperaturen ein Indiz dafür sein, dass sich die Bewohner beim Contracting-Unternehmen über zu tiefe Raumtemperaturen beschwert haben. Eine Erhöhung der Vorlauftemperatur von mehr als 2 K hat häufig eine Vertragsänderung zur Folge (Info vom Contractor). Es ist jedoch schwierig zu beurteilen, ob die Temperaturerhöhung eine Folge von Komforteinbussen durch andere Einflussfaktoren ist. Zum Beispiel kann ein fehlender hydraulischer Abgleich oder ein kalter Fussboden bei tiefen Vorlauftemperaturen zu Unbehagen führen, was in der Folge mit erhöhten Vorlauf- und Raumtemperaturen kompensiert wird. **Auffallend ist der deutlich höhere Wärmeverbrauch in der Übergangszeit gegenüber den Normberechnungen, sowie die Tatsache, dass gleichzeitig der Verbrauch in den kältesten Monaten nicht höher ist als die Bedarfsberechnung.** Dies könnte ein Hinweis darauf, dass das Verschattungs- und Lüftungsverhalten im Frühling und Herbst deutlich von den Annahmen abweicht, und deutlich anders ist als in den kältesten Monaten. Es kann vermutet werden, dass in diesen Gebäuden in den Übergangszeiten viel häufiger die Fenster geöffnet sind und eventuell auch der Sonnenschutz aktiviert ist, bei gleichzeitig laufender Raumwärmeverteilung (mehr dazu im Kapitel 5.4).

Ausserdem ist es wahrscheinlich, dass die Berechnung nach SIA 380/1 eher optimistisch ausgeführt worden ist (best mögliche Werte). Die Bedarfsberechnung unterschreitet die Grenzwerte um ca. 40% sehr deutlich. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass die aus der Leistungskennlinie ermittelte Heizgrenze nicht der im Regler eingestellten Heizgrenze entsprechen muss. Dieser Feststellung wird im Kapitel 5.5 nachgegangen.



4.3 Vergleich unterschiedlicher Gebäude

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Objekte miteinander verglichen. Dabei wird vor allem der Durchfluss im Heizkreis und die Heizleistung untersucht mit dem Ziel, mögliche Rückschlüsse auf das Benutzerverhalten zu machen. In der Tabelle 8 sind die wichtigsten Gebäudekennwerte der in diesem Kapitel untersuchten Objekte zusammengefasst. Die sechs Gebäude wurden gewählt, weil sie unterschiedliche Energy Performance Gap aufweisen und deutliche Unterschiede im Volumenstrom des Heizkreises aufweisen. Um gewisse Einflüsse besser zu verstehen wurde auch ein hypothetisches Referenzgebäude in bestimmte Auswertungen miteinbezogen. Das Referenzgebäude wurde auf Grund von Durchschnittswerten aus dem untersuchten Gebäudepool definiert (alle Gebäude) und in einem Simulationsprogramm abgebildet. Mehr dazu ist im Kapitel 5 „Simulationen“ beschrieben.

Tabelle 8: Ausgewählte Gebäudeparameter der untersuchten Objekte, welche alle über eine separate BWW-Messung verfügen.

Gebäude	7	27	51	52	56	60	Referenz
Heizwärmebedarf [kWh/m ²] (Energienachweis)	38.2	40.8	39.2	49.4	29.0	29.7	29.0
Heizgrenze (aus Messung) [°C]	15.9	15.7	19.6	16.5	15.8	20.4	13.6
Fensteranteil auf EBF bezogen	23%	35%	18%	15%	18%	18%	25%
EBF [m ²]	2528	1240	886	776	1893	1415	1205
Heizwärmeverbrauch [kWh/m ²] (Witt. bereinigt)	49.0	38.2	67.4	51.2	42.8	61.6	23.1
EPGF - Energy Performance Gap Faktor (Jahr 2015)	1.3	0.9	1.7	1.0	1.5	2.1	-
Abweichung der Vorlauftemperatur [K] (Messung minus Planung)	-0.3	-1.0	-5.8	-3.8	-2.1	1.7	



4.3.1 Untersuchung zum Volumenstrom des Heizkreises

In einem ersten Schritt wurde der Volumenstrom im Heizkreis der sechs Objekte miteinander verglichen (Tagesmittelwerte). Es handelt sich bei allen Objekten um Wärmepumpenheizungssysteme mit einem parallelen Pufferspeicher, der ausgewertete Volumenstrom ist derjenige nach dem Pufferspeicher (Heizkreis). Alle sechs Objekte haben eine separate BWW-Messung. In der Abbildung 62 und Abbildung 63 werden die Unterschiede zwischen den Gebäuden deutlich. Die Objekte 51 und 60 mit hohem Energy Performance Gap weisen in Bezug auf den Volumenstrom ein ausgeprägtes „alles oder nichts“ Muster auf. An den meisten Tagen war der Volumenstrom entweder Null oder maximal. Die Annahme, dass dies auf fehlende oder nicht aktive (evt. zu hoch eingestellte) Raumthermostate zurückzuführen ist, stimmt überein mit den Resultaten der Simulationen im Kapitel 5.3.

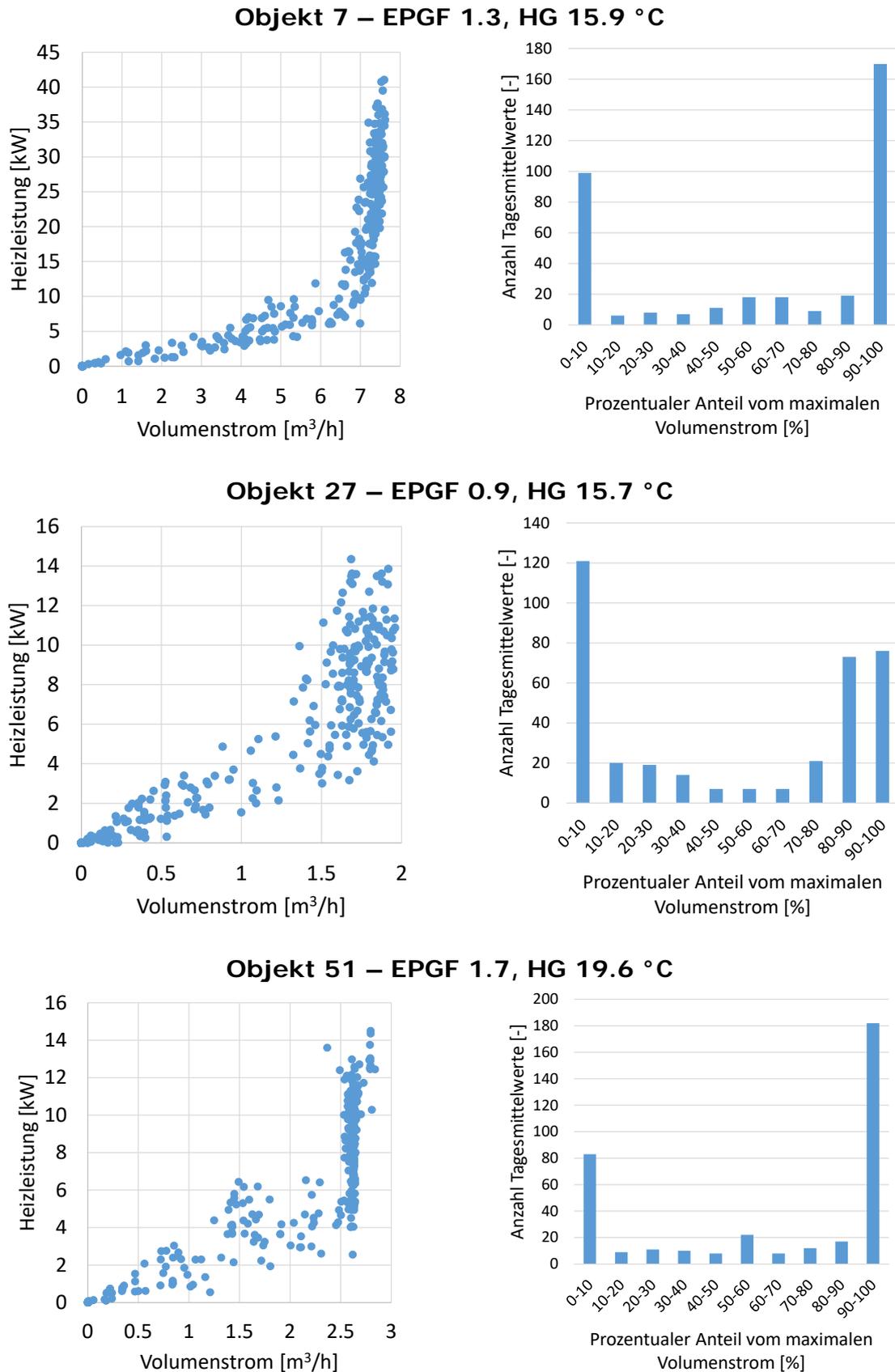


Abbildung 62: links: gemessene Heizwärmeleistung in Abhängigkeit des Volumenstromes für die Objekte 7, 27 und 51. Rechts: Frequenz der Tageswerte des Volumenstroms relativ zum maximalen Volumenstrom (alle Werte entsprechen Tagesmittelwerten).

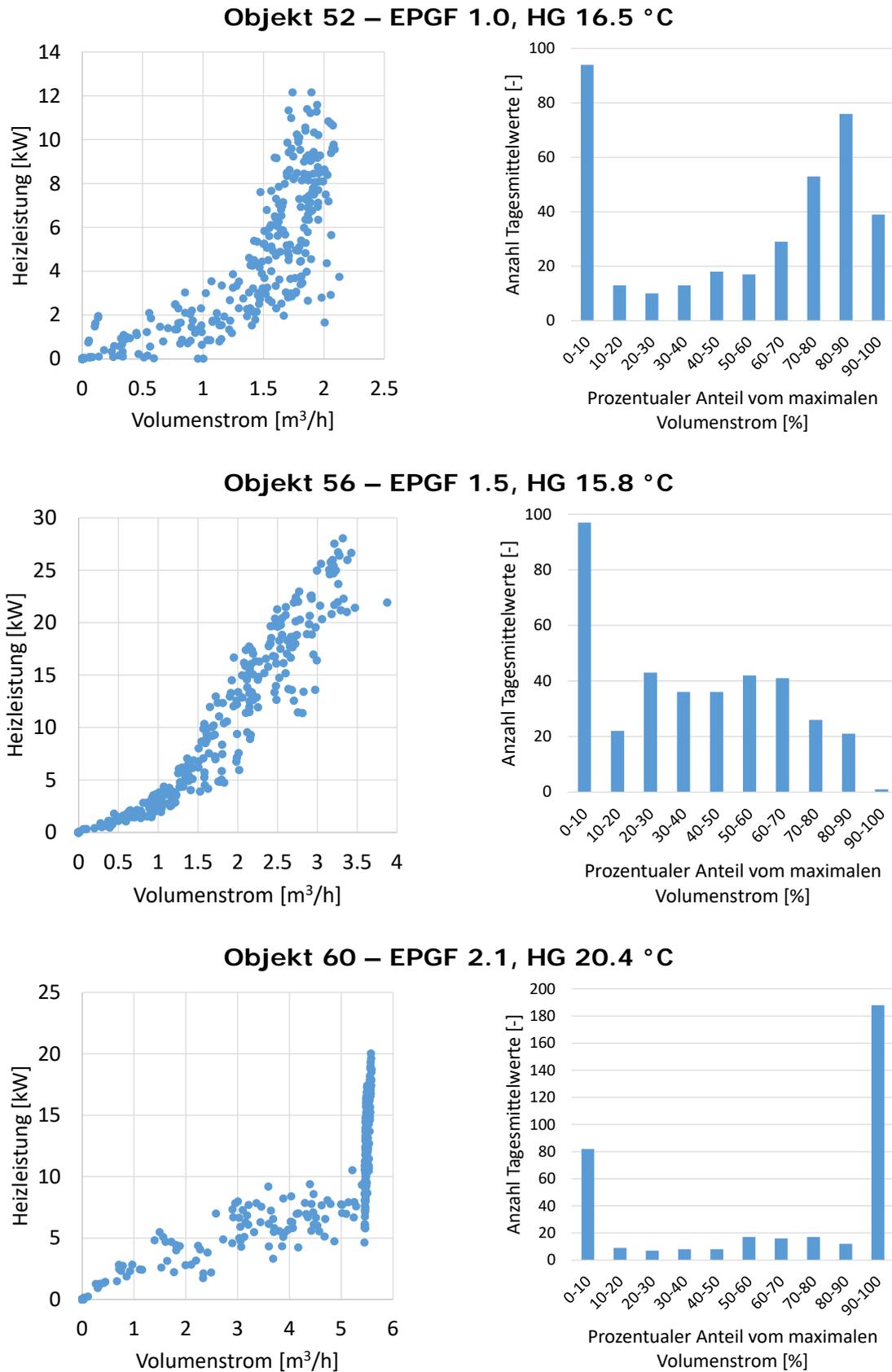


Abbildung 63: links: gemessene Heizwärmeleistung in Abhängigkeit des Volumenstromes für die Objekte 52, 56 und 60. Rechts: Frequenz der Tageswerte des Volumenstroms relativ zum maximalen Volumenstrom (alle Werte entsprechen Tagesmittelwerten).

Wie schon bei der Untersuchung der beiden Überbauungen in den vorangehenden Kapiteln zeigt sich auch bei diesen Objekten, dass der Heizwärmeverbrauch vor allem in der Übergangszeit höher ausfällt als mittels SIA 380/1:2009 Berechnungen zu erwarten wäre. Dazu ist in Abbildung 64 die Energiekennlinie der untersuchten Objekte dargestellt. Es fällt auf, dass die beiden Objekte mit dem höchsten Energy Performance Gap (51 und 60) den geringsten Anteil des Wärmeverbrauchs im Winter aufweisen und erst ab einer Monatsmitteltemperatur von 8 °C höhere Wärmeverbrauchsanteile zeigen. Diese Beobachtung schliesst Fehler oder Abweichungen in der Bausubstanz als erklärende Faktoren für den Energy Performance Gap aus. Denn solche würden zu permanent höheren Wärmeverlustkoeffizienten von Fenstern und Wänden führen.

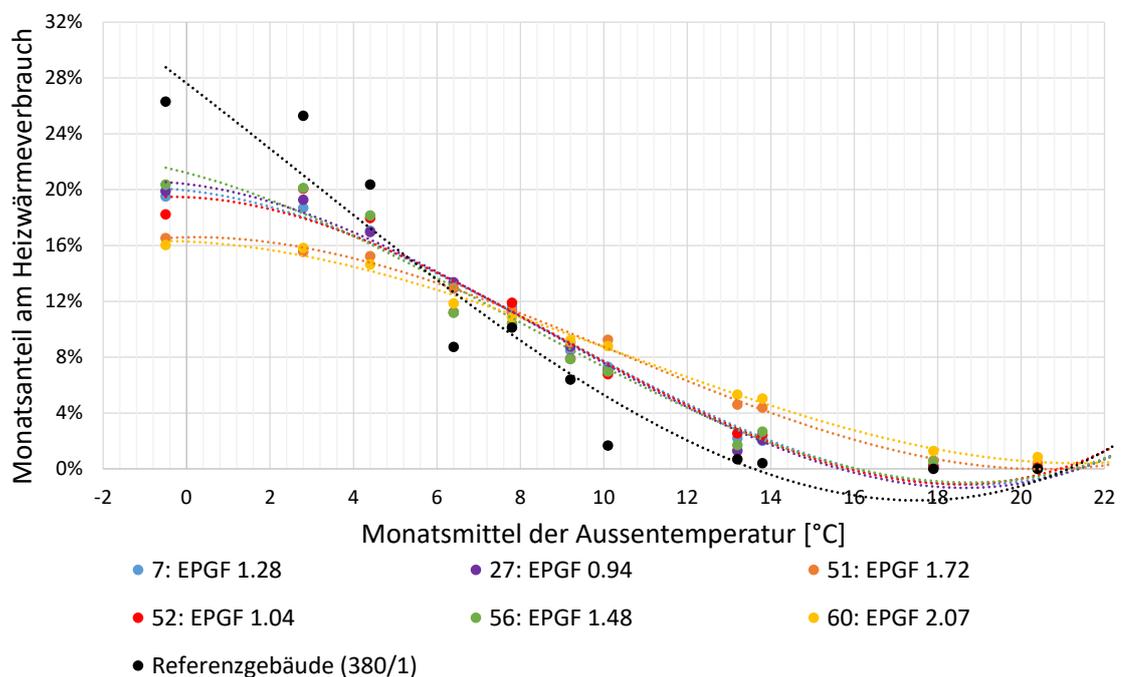


Abbildung 64: Relativer monatlicher Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der Monatsmittelausentemperatur für sechs Objekte mit separater BWW-Messung und für das Referenzgebäude.

Als Begründung für die Unterschiede im Wärmeverbrauch in den Übergangszeiten und im Sommer können hohe Heizgrenzen in Kombination mit zu hoch eingestellten (oder fehlenden) Raumthermostaten sein. Zusätzlich kann das Benutzerverhalten (Fenster öffnen, Verschattung) einen Einfluss haben. Sind sowohl Heizgrenzen als auch Thermostate (Raumsolltemperatur) hoch eingestellt, so wird in der Übergangszeit und teilweise über das ganze Jahr (bei einer Heizgrenze über 19 °C) sinnlos geheizt. Wie Mojic (AWEL-Studie [38]) auf Grund von Simulationen zeigte, bewirkt eine hohe Heizgrenze alleine noch nicht unbedingt einen Mehrverbrauch. Zusätzlich müssen Raumthermostate fehlen oder hoch eingestellt sein. Kommen zusätzlich auch erhöhter Luftwechsel oder erhöhte Verschattung ins Spiel, so steigen auch die Raumtemperaturen in der Übergangszeit nicht übermässig an. Bei richtig eingestellten Thermostatventilen in allen Zonen und bei geschlossenen Fenstern kann die Heizgrenze beliebig hoch sein, ohne dass der Wärmeverbrauch signifikant ansteigt. Bei einer guten



thermischen Hülle, wie beispielsweise beim Referenzgebäude, ergibt sich durch die internen Gewinne (Personen, Geräte) und die solaren Gewinne ein Gleichgewicht zwischen Verlusten und Gewinnen bei einer Aussenlufttemperatur von etwa 14 °C (Tagesmittelwert), was schlussendlich einer „natürlichen“ Heizgrenze entspricht. Da jedoch gerade das Verschattungs- und Lüftungsverhalten sowie die Temperatureinstellung am Raumregler kaum dem idealen Fall entspricht, führt eine erhöhte Heizgrenze zu einem höheren Wärmeverbrauch.

4.3.2 Untersuchung solare Gewinne

Um den Einfluss der solaren Gewinne auf die Heizleistung zu überprüfen, wurde in Abbildung 65 und Abbildung 66 die mittlere Tagesheizleistung in Abhängigkeit von der mittleren Tagestemperatur geplottet. Zusätzlich wurde die Heizleistung differenziert dargestellt für Tage mit wenig, mittel und viel Sonne. Das Kriterium ist die relative Sonnenscheindauer zur absolut möglichen an diesem Tag. Im vorliegenden Fall wird ein Tag mit unter 30% als sonnenarm, mit 30-70% als mittelsonnig und ab 70% als sehr sonniger Tag definiert. Die Definition der Sonnenstunden wird im Kapitel 2.7 beschrieben. Damit der Einfluss der solaren Gewinne erfasst werden kann, muss der Einfluss der Nachtstunden ausgeklammert werden. Sonnige Tage gehen meist einher mit sehr kalten Aussentemperaturen in der Nacht, da ein klarer Nachthimmel deutlich (ca. 10 K) kälter ist als ein bedeckter. Dadurch wird ein durch passiv solare Gewinne verminderter Heizwärmebedarf am Tag unter Umständen durch einen Mehrverbrauch in der Nacht wieder kompensiert. Aus diesem Grund wird zur Ermittlung des Einflusses der Solarstrahlung die mittlere Heizleistung nur für die Zeit zwischen 09.00 Uhr und 18.00 Uhr betrachtet. Grundsätzlich würde man bei gleicher Aussenlufttemperatur erwarten, dass an einem sonnigen Tag weniger Heizleistung benötigt wird als an einem sonnenarmen Tag. Dies wird in den Abbildungen dort bestätigt, wo die jeweiligen Trendlinien unterschiedliche Neigungen aufweisen: flacher bei viel Sonne, steiler bei wenig Sonne.

Diese Situation trifft jedoch nicht für alle sechs untersuchten Objekte zu. Die beiden Objekte 7 und 27 mit dem grössten Fensteranteil (FA) zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Heizleistung von der Solarstrahlung. Bei den anderen Objekten fallen die 30-70% und die >70%-Trendlinien zusammen. An sehr sonnigen Tagen wird nicht weniger Heizleistung benötigt als an mittelsonnigen Tagen. Möglicherweise lassen die Bewohner/innen an mittel- bis sehr sonnigen Tagen den Sonnenschutz herunter oder sie öffnen die Fenster um eine überhöhte Raumtemperatur zu senken. Die letzte Vermutung ist gerade für das Objekt 56 plausibel, da in diesem Fall bei höheren Aussentemperaturen (ab ca. 11 °C) die Heizleistung bei viel Sonnenschein höher ist als bei wenig. Der Einfluss der Verschattung wird im Kapitel 5.4 bezogen auf das Referenzhaus genauer untersucht.

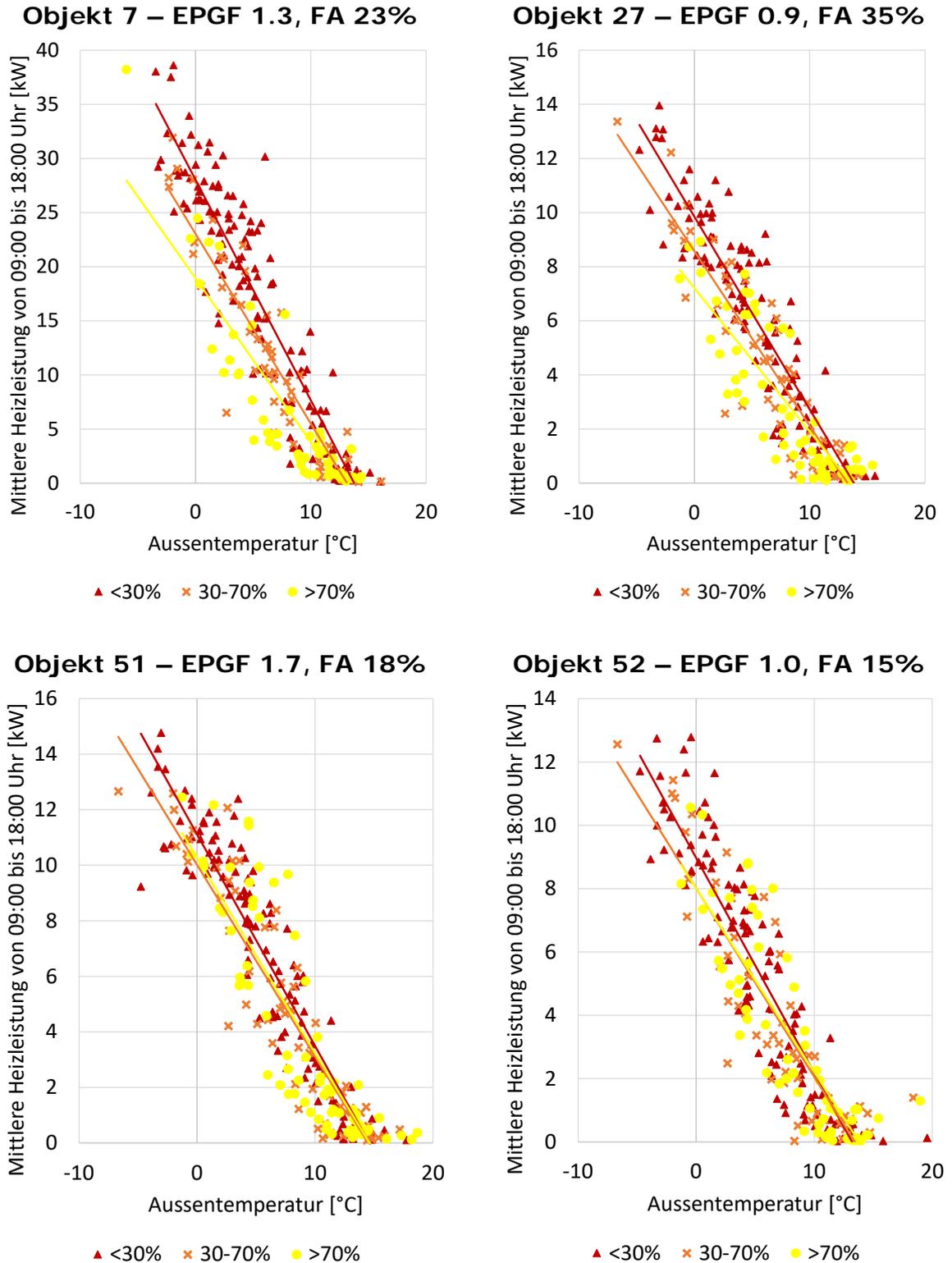


Abbildung 65: Mittlere Heizleistung zwischen 09:00 Uhr und 18:00 Uhr in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Zusätzlich wird unterschieden zwischen hoher (>70%), mittlerer (30-70%) und tiefer (<30%) relativer Sonnenscheindauer, (FA = Fensteranteil an EBF).

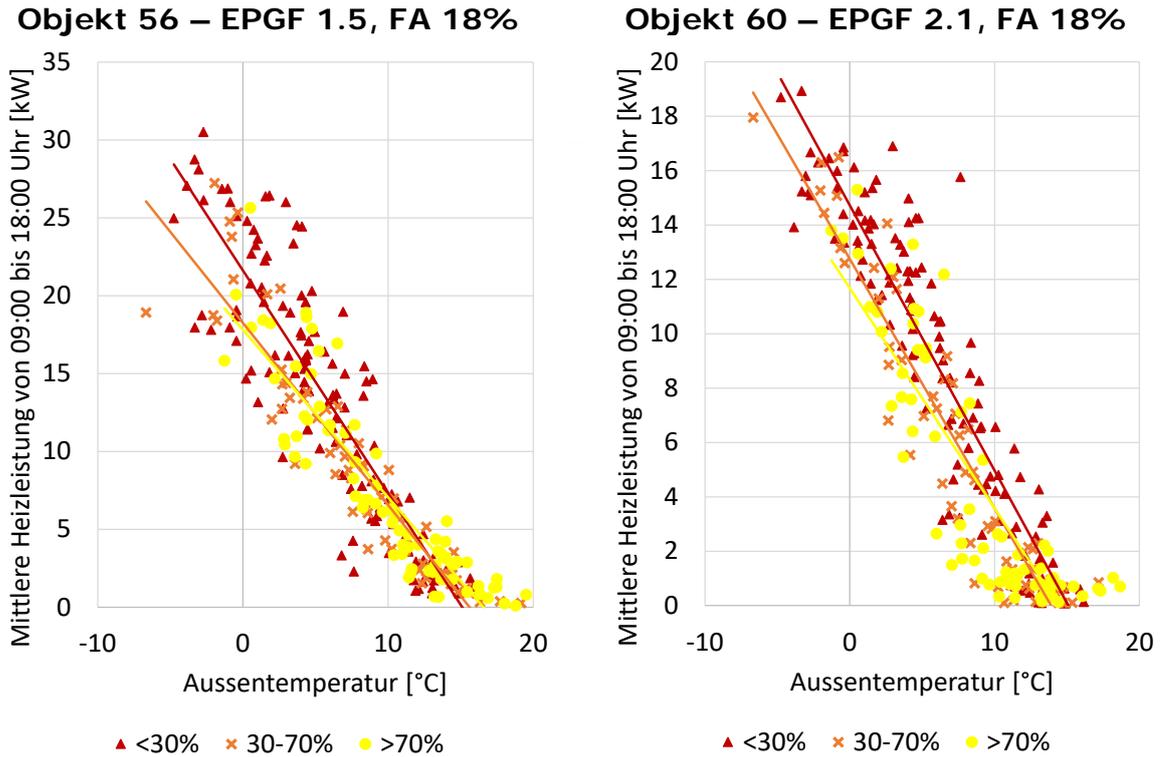


Abbildung 66: Mittlere Heizleistung zwischen 09:00 Uhr und 18:00 Uhr in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Zusätzlich wird unterschieden zwischen hoher (>70%), mittlerer (30-70%) und tiefer (<30%) relativer Sonnenscheindauer, (FA = Fensteranteil an EBF).



4.4 Untersuchungen zum Energienachweis

Für vier ausgewählte Objekte wurde der Energienachweis durch das Ingenieurbüro 3-Plan Haustechnik AG genauer analysiert. Dabei wurde auch ein Augenmerk auf den Spielraum beim Erstellen des Nachweises gelegt. Damit die Analyse unvoreingenommen erfolgt, wurde 3-Plan bewusst nicht über den Energy Performance Gap der betreffenden Objekte informiert. Die Auswahl der Objekte wurde auf Grund der vorhandenen Planungsunterlagen getroffen. Es handelt sich um Objekte, bei denen die Unterlagen und Pläne möglichst vollständig zur Verfügung standen. Die untersuchten Objekte sind in der Tabelle 9 mit dem entsprechenden Energy-Performance-Gap-Faktor zusammengefasst.

Tabelle 9: Auflistung der Objekte für die der Energienachweis genauer analysiert wurde. Die rot markierten Objekte haben alle denselben Energienachweis.

Objekt Nummer	3	18	32	33	34	35	73	74	61
EPGF	1.31	2.13	2.02	1.68	1.53	1.32	1.32	1.54	1.66
SIA 380/1 Ausgabe	2009	2001	2009	2009	2009	2009	2009	2009	2001

Die Angaben in den Energienachweisen waren teilweise sehr knapp, was die Beurteilung erschwert hat. Zwei der vier Nachweise waren grundsätzlich von guter Qualität. Die anderen beiden wiesen Mängel auf, wie zum Beispiel, dass die thermische Gebäudehülle schlecht nachvollziehbar war oder Räume (z. B.: Fitnessraum, Basteln), die gemäss SIA zur beheizten Fläche zählen würden, nicht im Dämmperimeter eingeschlossen wurden.

Gemäss Rückmeldungen aus der Praxis gehe es beim Erstellen des Nachweises auf Grund der Vorgaben von Bauherr und Architekt vorwiegend darum, mit kleinem Aufwand die behördliche Bewilligung zu erhalten. Die Fragestellung nach dem mutmasslichen, effektiv zu erwartenden Heizwärmebedarf, ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Das individuelle Vorgehen des Nachweiserstellers kann zudem die errechneten Werte stark beeinflussen. Oft fällt der errechnete Wärmebedarf tiefer aus, weil der Druck der Auftraggeber, mit möglichst wenig Dämmung auszukommen, in der Praxis recht hoch sei und somit „weiche“ Parameter entsprechend so eingesetzt werden, dass der Nachweis erbracht werden kann. Aus diesem Grund wurde für das Objekt 18 der Energienachweis im Detail untersucht, und es wurden die einzelnen Eingabewerten variiert, um deren Einfluss auf den Heizwärmebedarf zu ermitteln. Dazu wurde das Gebäude approximativ im Nachweistool „KWEN Version S-49“ abgebildet. Grundsätzlich wurde bei allen Nachweisen davon ausgegangen, dass die U-Werte der Bauteile eingehalten werden. Bauteile werden in der Regel wegen der Angst vor Garantieleistungen meist korrekt ausgeführt.



4.4.1 Massgebliche Faktoren

Nachfolgend wird beschrieben, welche Erkenntnisse sich aus der Nachbildung und Variation der Eingabewerte von Objekt 18 ergaben.

Fehlerhafter Auszug von Flächen:

Falsch ausgezogene Flächen der thermischen Hülle und der Energiebezugsfläche (SIA 380/1:2001: EBF0) wirken sich in Folge des relativen Flächenanteils von Fenster zur EBF0 nicht direkt proportional auf den Heizwärmebedarf aus. Eine Variation der EBF0 hat nachfolgende Auswirkung auf den spezifischen Heizwärmebedarf des Objektes 18 (Original EBF0 1'070 m², Q_h = 149 MJ/m²a):

- -10% (EBF0 = 963 m²) führt zu einer Erhöhung von 10.7% (+16 MJ/m²a)
- +10% (EBF0 = 1'177 m²) führt zu einer Senkung von 8.7% (-13 MJ/m²a)

Fehlerhafte Definition der Hülle:

Ungenauigkeiten oder fehlendes Wissen bezüglich der Nutzung der Räume und ihren Anforderungen führen zu einer falschen Definition der Gebäudehülle. So werden zum Beispiel Kellerräume gemäss Erfahrungen aus der Praxis häufig falsch berücksichtigt. Disponible Räume, Bastelräume oder auch Fitnessräume werden oft nicht in die thermische Hülle integriert und fliessen damit nicht in die Energiebezugsfläche mit ein. Wenn diese Räume jedoch beheizt sind, dürften sie ohne Wärmedämmung nicht als solche vermietet werden.

Berechnung des b-Wertes:

Der b-Wert, welcher die Verluste gegen unbeheizt und Erdreich berücksichtigt, kann unterschiedlich berechnet werden (nach SIA-Norm oder nach ISO-Norm). Dieser Faktor ist sehr relevant bei grossen Flächen gegen das Erdreich wie zum Beispiel bei Industrie oder Lagerhallen. Jedoch ist dieser Punkt aus Sicht der Autoren bei mehrgeschossigen Wohnbauten mit kleinen Flächen gegen Erdreich weniger relevant, weshalb auf eine detaillierte Untersuchung verzichtet wurde.

4.4.2 Weiche Faktoren

Gewählter Reduktionsfaktor Regelung:

Regelungszuschläge zur Raumtemperatur (SIA 380/1:2009/2016) oder früher der Reduktionsfaktor Regelung (SIA 380/1:2001), werden teilweise falsch, respektive oft konservativ eingesetzt. Im Fall von Objekt 18 wird im Energienachweis mit dem Reduktionsfaktor Regelung 0 gerechnet. Der Einfluss dieses Faktors auf den Heizwärmebedarf wird nachfolgend aufgezeigt:

- Reduktionsfaktor = 1 führt zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs um 11.4% (+17 MJ/m²a)
- Reduktionsfaktor = 2 führt zu einer Erhöhung um 22.8% (+34 MJ/m²a)

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs beruht auf der Annahme einer idealen Regelung, die in allen Räumen die Raumtemperatur auf die Solltemperatur regelt und rasch auf veränderte Wärmegewinne reagiert. Dies ist jedoch in der Realität,



insbesondere bei Fussbodenheizungen, eher unwahrscheinlich, weshalb ein Reduktionsfaktor von 0 selten zutreffend ist.

Wahl der Wärmespeicherfähigkeit:

In der Ausgabe 2001 der SIA 380/1 konnte die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes zwischen 0.1 MJ/m²K (Ständerbauweise) und 1.0 MJ/m²K (sehr massive Bauweise) gewählt werden. Für das Objekt 18 wurde eine Wärmespeicherfähigkeit von 0.5 MJ/m²K für die Berechnung eingesetzt. Eine Veränderung dieses Wertes beeinflusst den original berechneten Wärmebedarf wie folgt:

- Eine Wärmespeicherfähigkeit von 0.1 MJ/m²K führt zu einer Erhöhung des Wärmebedarfs um 16.8% (+25 MJ/m²a)
- Eine Wärmespeicherfähigkeit von 1.0 MJ/m²K führt zu einer Reduktion des Wärmebedarfs um 2% (-3 MJ/m²a)

Mit Inkrafttreten der SIA 380/1:2009 wurden die Standardwerte angepasst. Für sehr leichte Gebäude gilt für die Wärmespeicherfähigkeit ein Wert von 0.05 MJ/m²K und für schwere Gebäude 0.5 MJ/m²K. Die Werte der aktuellsten Ausgabe (2016) haben sich zur Ausgabe 2009 nicht verändert (abgesehen von geringen Rundungsdifferenzen).

Fenster g-Wert:

Der Gesamtenergiedurchlassgrad für Fenster wird im Energienachweis oft 1:1 aus den technischen Datenblättern übernommen und ohne Abzug eingesetzt. Zum Teil werden auch unüblich hohe g-Werte eingesetzt wie im Fall des Objektes 18: hier wurde ein g-Wert von 0.65 verwendet.

- Verwendet man jedoch einen üblichen und realistischen g-Wert von 0.41, erhöht sich der Wärmebedarf um 26% (+38 MJ/m²a).

Aus Sicht der Autoren müssten jedoch grundsätzlich weitere 10% des g-Wertes abgezogen werden auf Grund von Verschmutzung und wegen des Einfallswinkels. Die Erfahrung von 3-Plan zeigt auch, dass bei grossen Fensteranteilen in der Ausführung aus Angst vor zu hohen solaren Einträgen im Sommer plötzlich Sonnenschutzverglasungen eingesetzt werden, welche einen deutlich tieferen g-Wert aufweisen als geplant. Dies führt dann wiederum zu weniger solaren Einträgen im Winter und in der Übergangszeit, wenn die solaren Gewinne erwünscht wären. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Verschattung, welche zum Teil aus Gründen des Sichtschutzes auch im Heizfall aktiviert ist und den g-Wert somit typisch auf einen Wert von 0.15 reduziert. Parallel zum Projekt ImmoGap wurde von Lemon Consult die Studie SolarGap [39] zum Thema Verschattungsverhalten durchgeführt, welche mehr Informationen zu diesem Thema liefert.



Ermittlung der Verschattungsfaktoren:

Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass oft die Beschattung durch den Horizont, den Überhang und die Seitenblenden ungenügend genau bestimmt oder sogar weggelassen wird. Letzteres war auch beim Objekt 18 für die Südfenster im Obergeschoss der Fall. In der Tabelle 10 sind die Originalwerte aus dem Energienachweis von Objekt 18 und die von 3-Plan erwarteten Verschattungsfaktoren aufgeführt.

Tabelle 10: Vergleich der im Nachweis verwendeten Verschattungsfaktoren und der von 3-Plan erwarteten Werte.

Objekt 18	Original Energienachweis	Plausibilisierung 3-Plan
Fs1 (Horizont)	0.9	0.80
Fs2 (Überhang)	1.0	0.85
Fs3 (Seitenblenden)	1.0	0.95
Fs-Wert (Fs1*Fs2*Fs3)	0.9	0.65

Der Einfluss des Verschattungsfaktors auf den Wärmebedarf des Objektes 18 wird nachfolgend aufgezeigt:

- Verschattungsfaktor = 0.65 erhöht den Wärmebedarf um 18.8% (+28 MJ/m²a) gegenüber den Originalwerten.
- Verschattungsfaktor = 1.0 senkt den Wärmebedarf um 6% (-9 MJ/m²a).

Berücksichtigung der Wärmebrücken:

Die Berücksichtigung der Wärmebrücken (WB) und die Plausibilität der gemachten Annahmen dazu, können von Objekt zu Objekt stark variieren. Früher wurde oft ein pauschaler Wert von 10% vom Heizwärmebedarf eingesetzt. Teilweise wird das immer noch so gemacht, was jedoch nicht der Realität bei Neubauten entspricht. Die Auswertung für das Objekt 18 zeigt, dass widersprüchliche Angaben zu den Wärmebrücken gemacht wurden. Einerseits wird die Sockellänge nur mit 3.6 m angegeben, was gemäss Planausmessungen viel zu wenig ist. Andererseits erscheinen die Wärmeverluste aller WB mit 14% des Heizwärmebedarfs jedoch plausibel. Aus diesem Grund wurde nur eine Variante ohne WB gerechnet und keine mit höheren WB-Verlusten.

- Falls die WB nicht berücksichtigt werden, reduziert sich der Wärmebedarf um 6.7% (-10 MJ/m²a).



Berücksichtigung von beheizten Bauteilen:

Generell wird in der SIA 380/1 ein Temperaturzuschlag auf die Raumtemperatur bei Bauteilheizungen (z.B.: Fussbodenheizung) und Heizkörpern vor Fenstern verlangt. Dies wird im Energienachweis oft vergessen, in keinem Untersuchten Nachweis wurde dieser Temperaturzuschlag berechnet. Um den Einfluss aufzuzeigen wurde dieser Wert für das Objekt 18 berechnet und eingesetzt:

- Ein Temperaturzuschlag von 3.75 K^7 erhöht den Wärmebedarf um 1.3% ($2 \text{ MJ/m}^2\text{a}$). *Annahme: Fläche gegen unbeheizt: 350 m^2 , Vorlauftemperatur der Bodenheizung: 35 °C .*

Dieser Zuschlag hat auf Grund der heutigen, tiefen Vorlauftemperaturen und guten U-Werten keinen grossen Einfluss auf die Wärmebedarfsberechnung. Dies könnte auch ein Grund sein, wieso der Zuschlag nicht konsequent angewendet wird. Bei grösseren Gebäuden, insbesondere Hallen mit grossen Flächen gegen Erdreich oder unbeheizt, mit höheren Vorlauftemperaturen und höheren U-Werten, kann ein grösserer Verlust und somit eine grössere Abweichung zustande kommen.

4.4.3 Extrembetrachtung

Für das Objekt 18 wurde zudem der Wärmebedarf mit einer Minimal- und einer Maximalvariante aller Parameter berechnet. Folgende Berechnungsparameter wurden berücksichtigt: EBF0, Wärmespeicherfähigkeit, g-Wert, Verschattung, Reduktionsfaktor Regelung, Transmissionsverluste WB und beheizte Bauteile. Eine detaillierte Aufschlüsselung der verwendeten Werte ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Minimalvariante: Berücksichtigt man für alle Parameter möglichst optimale Werte, dann reduziert sich der berechnete Wärmebedarf um **21.5%** ($-32 \text{ MJ/m}^2\text{a}$). **EPGF neu: 2.71**

Maximalvariante: Wählt man bei der Erstellung des Nachweises Werte auf der sicheren Seite, so erhöht sich der berechnete Wärmebedarf um **96.6%** ($+144 \text{ MJ/m}^2\text{a}$). **EPGF neu: 1.08**

Damit wird deutlich, dass je nach Auftraggeberschaft und Verfasser/in des Energienachweises der ausgewiesene Wärmebedarf für dasselbe Objekt sehr stark variieren kann. Da der ermittelte Energy Performance Gap proportional zum Wärmebedarf steht, schlägt diese Variation 1:1 auf diesen durch.

⁷ Bei Fussbodenheizungen: Temperaturzuschlag = $(T_{\text{vl}} - 20 \text{ °C})/4$



Tabelle 11: Verwendete Gebäudeparameter für die unterschiedlichen Energienachweisvarianten für das Objekt 18.

	Original Energienachweis	Minimalvariante ($Q_{h,min}$)	Maximalvariante ($Q_{h,max}$)
Verschattung [-]	0.9	1.0	0.65
Wärmebrücken [MJ/m ² a]	14.3	0	14.3
EBF [m ²]	1070	1177	963
Beheizte Bauteile	Nein	Nein	Ja (35°)
Wärmespeicherfähigkeit [MJ/m ² K]	0.5	1.0	0.1
g-Wert	0.65	0.65	0.5
Fensteranteil an EBF	0.31	0.28	0.35
Reduktionsfaktor Regelung	0	0	2
Wärmebedarf [MJ/m ²]	149	117	293
EPGF	2.13	2.71	1.08

4.4.4 Fazit

Der Energienachweis von Gebäude 18 zeigt eindeutig, dass die Annahmen so getroffen wurden, dass ein möglichst tiefer Heizwärmebedarf resultiert. Eine Anpassung der Berechnung nach der Ausführung gibt es nicht. Dies bedeutet, dass Veränderungen von der ersten Berechnung (Bauprojekt) bis zur effektiven Ausführung nicht berücksichtigt werden. Weiter wäre der Heizwärmebedarf deutlich höher, wenn übliche Standardannahmen getroffen worden wären. Dabei wären abweichende effektive Nutzungsdaten (z. B.: höhere Raumtemperaturen, offene Balkontüren in der Übergangszeit etc.) noch nicht berücksichtigt. Dies wird im Energienachweis nicht verlangt. Bereits auf Basis der Analyse des Energienachweises muss deshalb ein höherer gemessener Energieverbrauch in der effektiven Nutzung erwartet werden. Berücksichtigt man diesen Sachverhalt, dann relativiert sich der EPG-Faktor von 2.13 für das Objekt 18. Wenn der Energienachweis mit konservativen Werten gemäss der obigen Maximalvariante erstellt worden wäre, würde der EPG-Faktor 1.08 betragen und das Objekt nur 8% Mehrverbrauch an Wärme gegenüber den Berechnungen ausweisen.

Die Auswertung zum behördlichen Energienachweis macht deutlich, dass dieser für die Bestimmung des Energy Performance Gap nicht sinnvoll ist (Gap A). Denn Erfahrungen zeigen, dass der Druck durch die Auftraggeberschaft (Architekt/in, Bauherrschaft) gross sein kann, den Wärmebedarf gemäss Nachweis möglichst gering auszuweisen. Das führt dazu, dass bei der Berechnung alle Werte so optimistisch gewählt werden, dass die Vorgaben gemäss Norm oder Gesetz gerade noch erfüllt sind. Zudem soll der Energienachweis per Definition mit Standardnutzungsbedingungen erstellt werden. Diese entsprechen heute aber nicht mehr der Realität der effektiven Nutzungsbedingungen. Dies gilt insbesondere für die Raumlufttemperatur (siehe Kapitel 5.3). Der mit



Standardbedingungen ermittelte Wärmebedarf gemäss Energienachweis führt aus diesen Gründen nachvollziehbar fast immer zu einem Energy Performance Gap.

Grundsätzlich zeigt die Erfahrung von 3-Plan, dass das Rechenverfahren/die Methode der SIA 380/1 für Standardgebäude mit angemessenem Glasanteil bis zu 30% in Bezug auf die EBF gut mit der Realität übereinstimmen. Dazu müssen jedoch die Gebäudeparameter und Nutzungsdaten objektiv und nicht einseitig bestimmt werden.

In der SIA 380/1:2016 wird in Kapitel 3.2.7 empfohlen, bei Gebäuden mit geringem Heizwärmebedarf, bei welchen die Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Energieverbrauch geprüft werden soll, eine Berechnung nach SIA 382/2 durchzuführen. In der Aufgabenstellung der Norm SIA 380/1 wird zudem klar unterschieden zwischen den Anwendungen "Optimierung", "Nachweis" und "Messwertvergleich" (SIA 380/1:2016 Kapitel 0.3.2). Nur beim Nachweis sind die Standardwerte zu verwenden. Für die Optimierung und den Messwertvergleich sind die nach Kenntnis der Planenden am besten zutreffenden Werte zu verwenden.

Schon in der SIA 380/1:2001 wurde die Präzisierung gemacht, dass in folgenden Fällen eine Fehlerrechnung auf Grund der Ungenauigkeiten der Eingabedaten durchzuführen sei: Bei einem Gebäude, bei welchem der Energieverbrauch vorhergesagt werden soll, und bei einem bestehendem Gebäude, bei welchem der berechnete Heizenergiebedarf mit dem gemessenen Verbrauch verglichen werden soll und bei welchen die genutzten Wärmegewinne in der Jahressumme mehr als die Hälfte der Wärmeverluste ausmachen. **Jedoch entfällt diese geforderte Fehlerrechnung beim Erstellen von Nachweisen.**

Somit müsste für das Beispiel mit dem Objekt 18 ein Vergleich des Verbrauchs mit dem Bedarf nicht mit dem Energienachweis erfolgen, sondern mit einer Neuberechnung, die eine Fehlerrechnung mitberücksichtigt. Eine solche Fehlerrechnung wird jedoch in der Praxis selten durchgeführt.



5 Resultate Phase 3: Simulationsanalyse

Dem Projektteam standen ausserordentlich gute Messdaten zur Analyse des Energy Performance Gap zur Verfügung. Jedoch ist die Aussagekraft von Messdaten begrenzt, da zum Beispiel Parameter wie Raumtemperatur oder Fensteröffnung im Rahmen des Projekts nicht erfasst werden konnten. Der Einfluss von Raumtemperatur und Fensterlüftung kann damit nicht quantifiziert werden. Ergänzend können Aussagen gemacht werden auf Grund von dynamischen Jahressimulationen, da in diesen einzelne Parameter isoliert betrachtet werden können. Deshalb wurde im Projekt ein drei geschossiges Referenz-Mehrfamilienhaus definiert, welches auf den Durchschnittswerten der untersuchten 65 MFH basiert. Die wichtigsten Kennwerte sind in der Tabelle 12 zusammengefasst. Detaillierte Angaben sind im Anhang B zu finden. Der berechnete Heizwärmebedarf fällt um etwa 15% tiefer aus als der Durchschnitt des Gebäudepools. Damit lassen sich auch Aussagen zu neueren Objekten machen.

Tabelle 12: Die wichtigsten Kennwerte des Referenz-Mehrfamilienhauses.

Heizwärmebedarf (SIA 380/1)	EBF	Gebäudehüllzahl	Fensteranteil an EBF	Lüftung
104.8 MJ/m ² a (29 kWh/m ² a)	1'205 m ²	1.3	25.1%	Komfortlüftung

Für die dynamischen Simulationen wurde IDA ICE v.4.8 und für die Berechnung nach SIA 380/1 Lesosai 2018 verwendet.

5.1 SIA 380/1:2009 Heizwärmebedarf

Zum Vergleich der eingesetzten Berechnungsprogramme wurde für das Referenzgebäude der Heizwärmebedarf nach der Norm SIA 380/1:2009 in beiden Programmen berechnet. Der Heizwärmebedarf wird gemäss SIA-Norm für eine Raumtemperatur von 20 °C, ohne Lüftung und mit einem Infiltrations-Aussenvolumenstrom durch die thermische Gebäudehülle von 0.7 m³/(m²h) berechnet. Der Vergleich der Simulationsprogramme mit Jahres- und Monatsbilanz wurde in Tabelle 13 sowie Abbildung 67 zusammengefasst.

Tabelle 13 Vergleich des Heizwärmebedarfs, berechnet mit den Simulationsprogrammen IDA ICE und Lesosai nach Norm SIA 380/1:2009

	IDA ICE	Lesosai	Differenz
Heizwärmebedarf [MJ/(m ² a)]	91.1	104.8	+15.0%

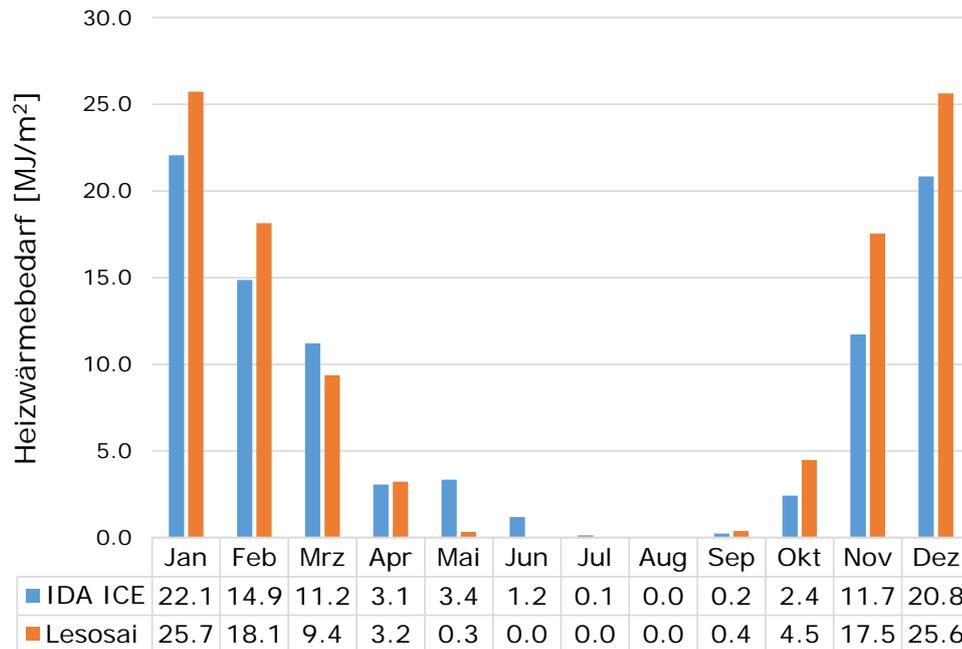


Abbildung 67 Monatsbilanz des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1, mit den Simulationstools IDA ICE und Lesosai berechnet.

Gemäss Norm SIA 380/1:2009 liegt der Grenzwert des Heizwärmebedarfs für das Referenzgebäude in Zürich (SMA) bei 127 MJ/(m²a). Dieser Wert wurde vom Referenzgebäude mit 91.1 MJ/(m²a), respektive 104.8 MJ/(m²a) in den jeweiligen Simulationsprogrammen IDA ICE und Lesosai deutlich unterschritten (siehe Tabelle 13). Das Resultat der Lesosai Berechnung liegt mit 104.8 MJ/(m²a), 15% über dem dynamisch Simulationsresultat von IDA ICE. Gemäss Abbildung 67 ist die Differenz bei den eingesetzten Simulationsprogrammen auf die Wintermonate November – Februar zurückzuführen. In diesen Monaten berechnet Lesosai einen um 17.4 MJ/(m²a) höheren Heizwärmebedarf als IDA ICE.

Fazit: Damit wird deutlich, dass bereits auf Grund der Wahl des Berechnungsverfahrens (dynamisch oder statisch, respektive IDA ICE oder Lesosai) ein Unterschied für den berechneten Wärmebedarf von 15% entstehen kann. Der Energy Performance Gap wäre somit grösser bei einem Vergleich des Heizwärmeverbrauchs mit dem Heizwärmebedarf der mittels IDA ICE dynamisch berechnet wurde.

Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den Untersuchungen mit den beiden Programmen dargestellt. Für die Untersuchungen wurde im IDA ICE Modell die Nutzungsart der Wohnflächen nach Vorgaben des Merkblattes SIA 2024 angepasst. D. h. die Verkehrsflächen wurden in der Simulation nicht mehr beheizt und die Raumtemperatur wurde auf 21 °C erhöht. Zusätzlich wurde eine mechanische Lüftung mit einer Wärmerückgewinnung von $\eta = 80\%$ integriert. Die im IDA ICE Modell verwendeten Luftvolumenströme sind im Anhang B aufgelistet. In Lesosai wurden die Einstellungen zur Berechnung des Heizwärmebedarfes nach SIA 380/1:2009 für die weiteren Untersuchungen beibehalten. Es wurden nur auf Grund der Einflussfaktoren (Ausrichtung, Verschattung) Änderungen vorgenommen, ansonsten wurde weiterhin ohne mechanische Lüftung und mit einer Raumtemperatur von 20 °C gerechnet.



5.2 Einfluss Gebäudeposition

In den folgenden Unterkapiteln wird der Einfluss der Verschattung durch umgebende Objekte sowie der Gebäudeausrichtung auf den Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes näher untersucht. Dies auf Grund der Erkenntnisse im Kapitel 4.2.1, in welchem festgestellt worden ist, dass für unterschiedliche Gebäudeausrichtungen derselbe Energienachweis verwendet wurde.

5.2.1 Verschattung durch Objekte

Die Veränderung des Heizwärmebedarfs bei Verschattung der Südfassade durch ein Nachbargebäude wurde mit zwei unterschiedlichen Abständen untersucht. Dazu wurde eine intransparente Ebene mit identischer Aussenabmessung, wie das Referenzgebäude, mit dem Abstand 11.5 m und dem Abstand 23 m vor dem Mehrfamilienhaus platziert. In Tabelle 14 ist die Veränderung des Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit vom Abstand der Verschattungsebene für beide Simulationsprogramme aufgelistet.

Tabelle 14 Einfluss der Verschattung durch ein baugleiches Nachbargebäude auf den Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes

Abstand zum Referenzgebäude	Heizwärmebedarf [MJ/m ²]	
	IDA ICE	Lesosai
Keine Nachbargebäude	82.2	104.8
23 m	83.5 +1.5 %	106.1 +1.3 %
11.5 m	85.3 +3.8 %	111.6 +6.1 %

Bei einem Abstand von 23 m zu einem baugleichen Nachbargebäude ist der Einfluss auf den Heizwärmebedarf bei der Energiebedarfsplanung praktisch vernachlässigbar. Die beiden Simulationsprogramme IDA ICE und Lesosai errechneten für dieses Szenario einen ähnlichen Anstieg des Heizwärmebedarfs von 1.5% resp. 1.3%. Wird der Abstand zum Nachbargebäude auf 11.5 m reduziert, so steigt der Heizwärmebedarf im Vergleich zur Variante ohne Verschattung um 3.8% in IDA ICE, resp. 6.1% in Lesosai. Liegt der Energiebedarf in der Planung sehr nahe beim Heizwärmebedarfs-Grenzwert ($Q_{H,ii}$), kann der Einfluss eines Nachbargebäudes mit einer Entfernung von nur 11 m entscheidend dafür sein, ob mit den Berechnungen im Energienachweises der geforderte Grenzwert eingehalten wird. Bei Gesprächen mit Fachleuten die schon seit Jahren Energienachweise erstellen, hat sich herausgestellt, dass in den wenigsten Fällen die Verschattung durch Nachbargebäude im Energienachweis berücksichtigt wird.



5.2.2 Gebäudeausrichtung

Neben der Verschattung wurde mit den Simulationen auch der Einfluss der Gebäudeausrichtung auf den Heizwärmebedarf untersucht. Die Ausrichtung des Gebäudes ist ein Faktor, der sehr genau betrachtet werden muss. Denn die Ausrichtung beeinflusst nicht nur den Energiebedarf sondern auch den Komfort (sommerlicher Wärmeschutz). Der Heizwärmebedarf wurde für den Winkelbereich 0° - 315° in 45° Schritten berechnet. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Einfluss der Gebäudeausrichtung auf den Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes

Orientierung		Heizwärmebedarf [MJ/m ²]			
		IDA ICE		Lesosai	
0°	S	82.2		104.8	
45°	SW	83.4	+1.5 %	110.1	+5.1%
90°	W	84.3	+2.6 %	111.6	+6.5%
135°	NW	86.2	+4.8 %	112.3	+7.2%
180°	N	86.6	+5.3 %	109.9	+4.9%
225°	NO	85.7	+4.3 %	110.0	+5.0%
270°	O	84.0	+2.1 %	106.6	+1.7%
315°	SO	82.8	+0.7 %	107.3	+2.4%

Beim Referenzgebäude stieg der Energiebedarf auf Grund der Drehung von Süden nach Norden mit Lesosai um maximal 7.2% bei 135°. Im Simulationsprogramm IDA ICE stieg der Heizwärmebedarf bei zunehmender Rotation bis 180° um 5.3% an, danach ging der Bedarf wieder entsprechend zurück. Für die Berechnung in Lesosai wurde das ganze Gebäude und nicht jedes einzelne Bauteil im Tool rotiert. Gemäss Programmdokumentation von Lesosai müssen die Resultate der Gebäuderotation mit Sorgfalt betrachtet werden. Beide Programme ergeben prozentual einen ähnlichen Anstieg des Heizwärmebedarfs bei der Rotation des Referenzgebäudes, aber nur IDA ICE hat das Maximum, entsprechend den Erwartungen, bei 180°.



5.3 Einfluss Raumtemperatur

Die Innentemperatur des Gebäudes ist für den Energieverbrauch von entscheidender Bedeutung. Das Merkblatt SIA 2024 rechnet in Mehrfamilienhäusern mit einer Raumtemperatur von 21 °C. Allerdings ist aus der Literaturrecherche bekannt, dass die Raumtemperaturen in der Regel höher sind. Das Projektteam hatte die Gelegenheit, parallel zum vorliegenden Projekt ein Mehrfamilienhaus⁸ mit 26 Wohnungen bezüglich Raumtemperaturen im Detail auszuwerten. Diese Auswertung bestätigen die gegenüber den Standardbedingungen gemäss SIA 2024 überhöhten Raumtemperaturen. Die Bewohner/innen können über ein Raumthermostat mittels eines Drehknopfes die Temperatur zwischen 18 °C und 25 °C variieren. In Abbildung 68 sind diese gewünschten Raumtemperaturen der Bewohner/innen für alle 26 Wohnungen in einem Histogramm dargestellt. Die gewünschte Raumtemperatur wird gerade für die hohen Temperaturen in der Regel auch erreicht (Vergleich Soll- und Istwert). Zu Beginn bei Wohnungsbezug im Monat September war standardmässig bei allen Reglern 18° C eingestellt. Die Auswertung für den Monat Januar zeigt, dass 50% der Wohnungen eine Raumsolltemperatur von 24° C oder mehr aufweisen, die Durchschnittstemperatur beträgt 23° C. Es ist somit naheliegend, dass dieses Gebäude einen deutlich höheren Wärmeverbrauch aufweist als mit Standardbedingungen berechnet.

In der Literatur gibt es unterschiedliche Angaben dazu, um wieviel Prozent der Heizwärmebedarf bei einer Erhöhung der Raumtemperatur um ein Grad steigt. Aus diesem Grund wurde für das Referenzgebäude der Einfluss der Raumtemperatur auf den Heizwärmebedarf analysiert. In der Tabelle 16 sind die Resultate für die beiden verwendeten Softwaretools zusammengefasst. Ein um 1°K (Kelvin) höherer Raumtemperatur-Sollwert führt zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs von durchschnittlich +14% in IDA ICE resp. +12% in Lesosai. Bei einer Raumtemperaturerhöhung von 21 °C auf 24 °C steigt der Energiebedarf entsprechend um +43.1% in IDA ICE resp. um +36.6% in Lesosai. Der Anstieg des Heizwärmebedarfs ist jedoch nicht linear. Je höher die Ausgangsraumtemperatur ausfällt, desto stärker steigt der Heizwärmebedarf mit einem zusätzlichen Grad.

⁸ Das hier untersuchte MFH gehört nicht zum Gebäudepool welcher für die Energy Performance Gap Untersuchung verwendet wurde

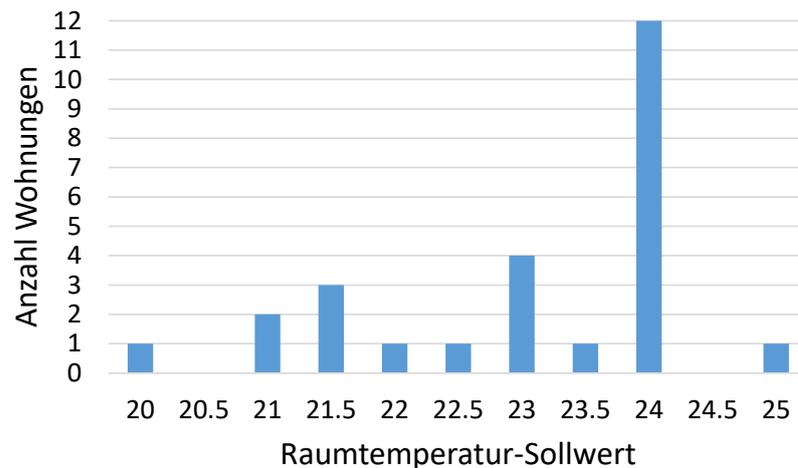


Abbildung 68: Histogramm der Raumsolltemperatur für ein neues MFH mit 26 Wohnungen, ermittelt im Monat Januar.

Tabelle 16 Einfluss auf den Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes bei unterschiedlichen Raumtemperaturen

Raumtemperatur	Heizwärmebedarf [MJ/m ²]			
	IDA ICE		Lesosai (SIA 380/1:2009)	
21 °C	82.2		117.4	
22 °C	93.4	+13.6 %	131.1	+11.6 %
23 °C	105.0	+27.7 %	145.5	+23.9 %
24 °C	117.6	+43.1 %	160.4	+36.6 %

Im Kapitel 4.3 wurde für sechs unterschiedliche Gebäude aufgezeigt, dass die Verteilung des Volumenstroms des Heizkreises von Objekt zu Objekt stark variiert. Mit den Simulationen wurde die Hypothese getestet, dass die gewünschte Raumtemperatur einen Einfluss darauf hat. Die Resultate der dynamischen Jahressimulation für das Referenzgebäude stützen diese Hypothese. In Abbildung 69 ist für das Referenzgebäude die Heizleistung in Abhängigkeit des Volumenstromes dargestellt sowie ein Histogramm des Volumenstroms. Das Referenzgebäude weist eine Referenzraumregelung mit einer Schalthysterese von 1 K und einer Raumsolltemperatur von 21 °C auf. Man kann erkennen, dass der Volumenstrom linear mit der Heizleistung ansteigt und es kaum Tage mit maximalem Volumenstrom (90-100%) gibt.

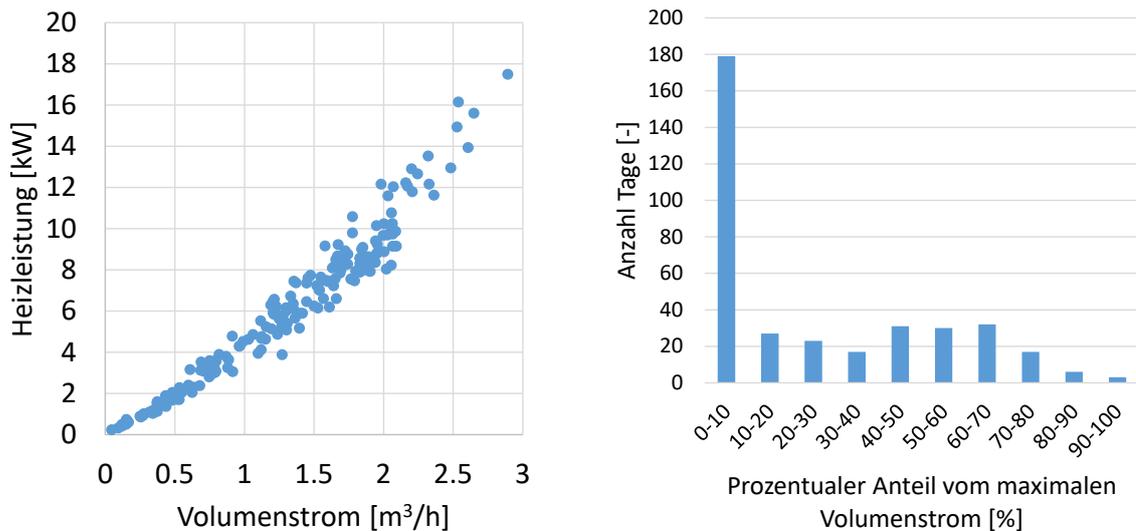


Abbildung 69: Auswertung des Volumenstroms für das Referenzgebäude mit einer Raumsolltemperatur von 21 °C (Tagesmittelwerte).

Wenn man dieselbe Simulation jedoch mit einem Raumsolltemperaturwert von 23 °C ausführt, verändert sich das Bild des Volumenstroms. In Abbildung 70 ist zu erkennen, dass der Volumenstrom deutlich häufiger maximal ausfällt. Zudem ist die Abhängigkeit zwischen Heizleistung und Volumenstrom nicht mehr linear. Dies kann damit begründet werden, dass bei einer höheren Raumsolltemperatur die Raumregelung weniger oft schliesst und häufiger ganz offen steht, da die internen und solaren Wärmegewinne relativ gesehen, weniger beitragen können um die Verluste zu kompensieren. Die Transmissionsverluste steigen auf Grund der höheren Temperaturdifferenz zu Aussen mit zunehmender Raumtemperatur.

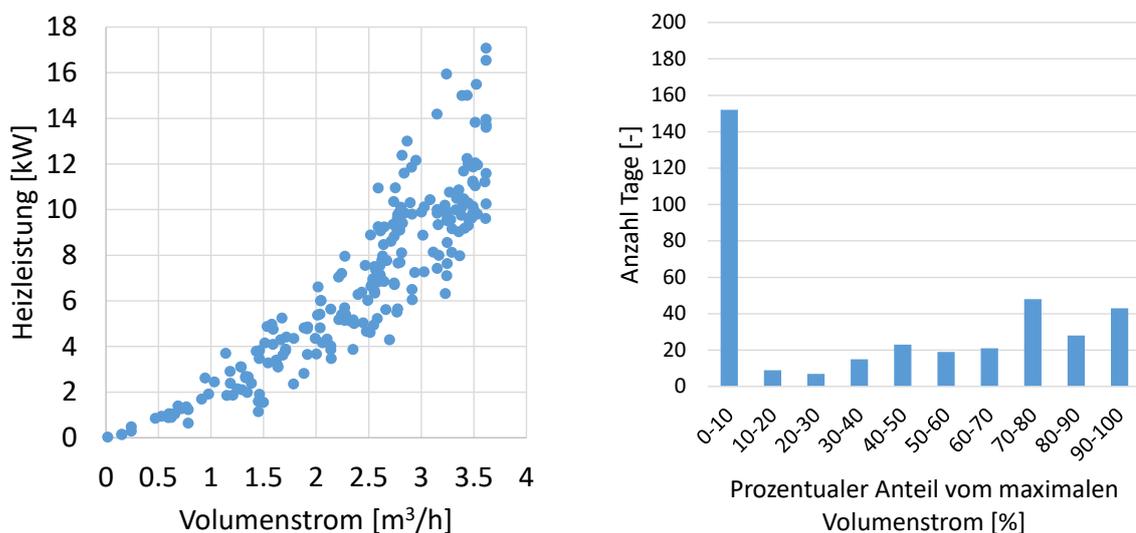


Abbildung 70: Auswertung des Volumenstroms für das Referenzgebäude mit einer Raumsolltemperatur von 23 °C.

5.4 Einfluss Lüftung und Sonnenschutz

Mit den Simulationen wurde auch untersucht, inwiefern die Anwendung des Sonnenschutzes und das Lüftungsverhalten der Benutzer den Heizwärmeverbrauch beeinflussen. In der SIA 380/1:2016 (Kapitel 3.5.6.2, S.42) werden die solaren Gewinne ab einer Übertemperatur im Raum von 4 K reduziert. Der Wärmeeintrag wird über den Sonnenschutz oder über die Lüftung reduziert. Ansonsten wird angenommen, dass der Sonnenschutz geöffnet ist. Für die dynamischen Simulationen wurden zwei unterschiedliche Regelungsvarianten für den Sonnenschutz definiert:

- Ideale Verschattung: anlehnend an die SIA 380/1:2016: ab einer Raumtemperatur von 25 °C und einer Einstrahlung von 200 W/m² auf die entsprechende Fassade, wird der g-Wert der Fenster auf 0.06 reduziert.
- Wahrscheinliche Verschattung: anlehnend an die SIA 180: ab einer Raumtemperatur von 20.5 °C und einer Einstrahlung von 200 W/m² auf die entsprechende Fassade, wird der g-Wert der Fenster auf 0.06 reduziert.

In Abbildung 71 sind für die beiden Regelungsarten Volumenstromhistogramme aufgeführt. Grundsätzlich weist die linke Grafik mit der „idealen Verschattung“ deutlich mehr Tage auf, an denen kein Durchfluss vorhanden ist. Dies überrascht nicht, da der Heizwärmeverbrauch bei einer „idealen“ Verschattung deutlich geringer ausfällt (-38%) gegenüber der „wahrscheinlichen Verschattung“. Die „wahrscheinliche Verschattung“ weist eine deutliche Steigerung der Häufigkeit des relativen Volumenstroms im Bereich zwischen 70-80% und 90-100% auf. In Abbildung 72 ist für beide Verschattungsfälle die Heizleistung in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur dargestellt. Zusätzlich wird unterschieden ob es ein sonniger (>70%), mittel sonniger (30-70%) oder ein eher bewölkter Tag (<30%) ist. Die Prozentangaben beziehen sich auf die relativen Sonnenstunden zu den absolut möglichen an diesem Tag.

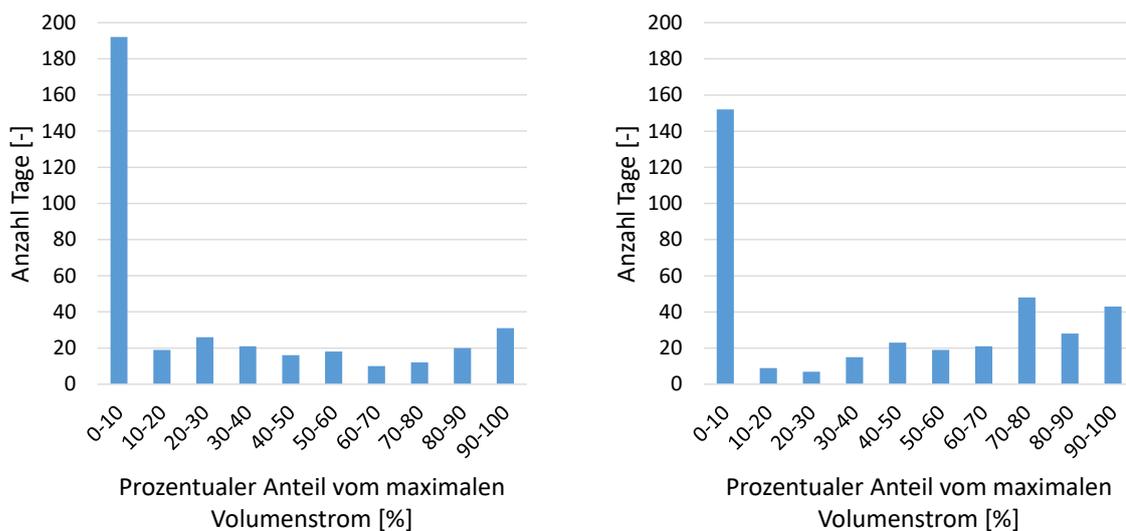


Abbildung 71: Histogramm des Tages-Durchschnitts des Volumenstroms, links mit „idealer Verschattung“ und rechts mit „wahrscheinlicher Verschattung“.

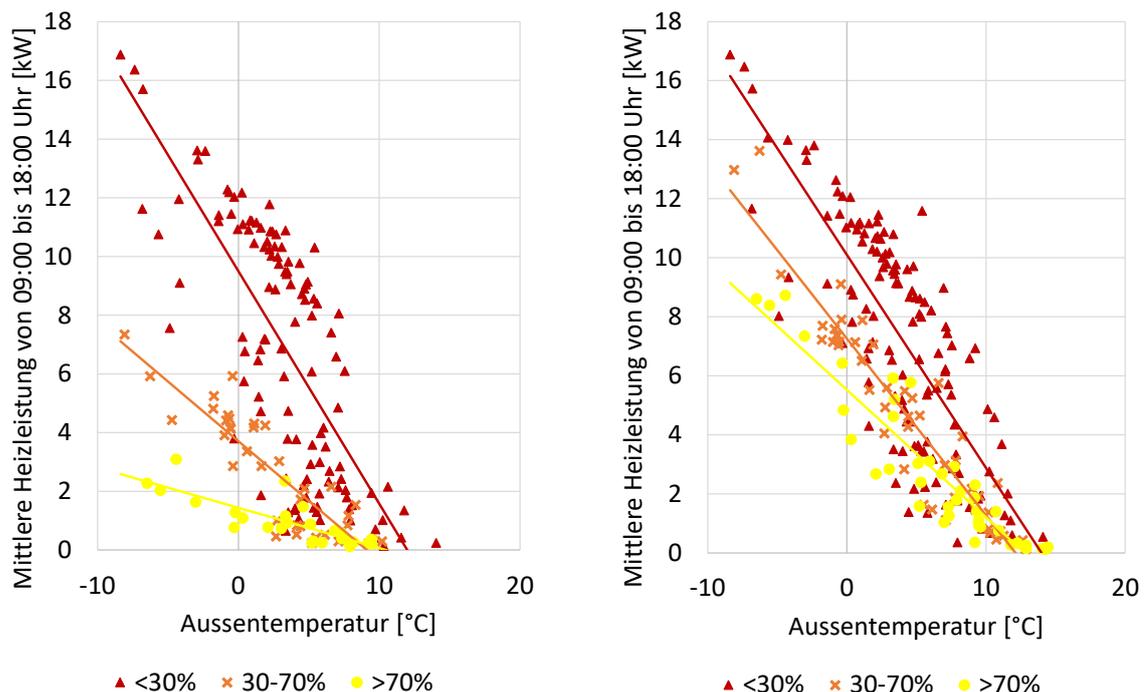


Abbildung 72: Mittlere Tagesheizleistung in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur. Links mit „idealer Verschattung“ und rechts mit „wahrscheinlicher Verschattung“ mit zusätzlicher Unterscheidung von sonnigen (>70%), mittel sonnigen (30-70%) und eher bewölkten (<30%) Tagen (bezogen auf die relativen Sonnenstunden).

Zusätzlich zum Sonnenschutz wurde untersucht, wie sich ein trotz Komfortlüftung offenes Kippfenster auf den Heizwärmeverbrauch und den Durchfluss auswirkt. Es wurde ein offenes Kippfenster pro Wohnung simuliert. Das Kippfenster ist in der Nacht von Anfang März bis Ende September geöffnet. Der Heizwärmeverbrauch des gesamten Gebäudes erhöht sich durch die offenen Kippfenster um 28%. In Abbildung 73 ist die Analyse des Volumenstroms im Heizkreis für den Fall, dass keine Fenster geöffnet sind, und in Abbildung 74 ist der Fall mit offenen Kippfenstern dargestellt. Für beide Fälle wurde die „wahrscheinliche Verschattung“ verwendet. Der Einfluss der offenen Kippfenster auf den Durchfluss ist deutlich zu erkennen. Durch die offenen Fenster erhöht sich die Anzahl Tage mit hohem Volumenstrom im Heizkreis deutlich, jedoch bleibt die Verteilung zwischen dem minimalen und maximalen Durchfluss ähnlich. Vergleicht man die Grafiken welche die Heizleistung in Abhängigkeit des Volumenstroms miteinander zeigen, dann ähneln jene mit Verschattung nach SIA 180 und zusätzlich offenen Fenstern am ehesten den real untersuchten Objekten mit hohem Energy Performance Gap (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63).

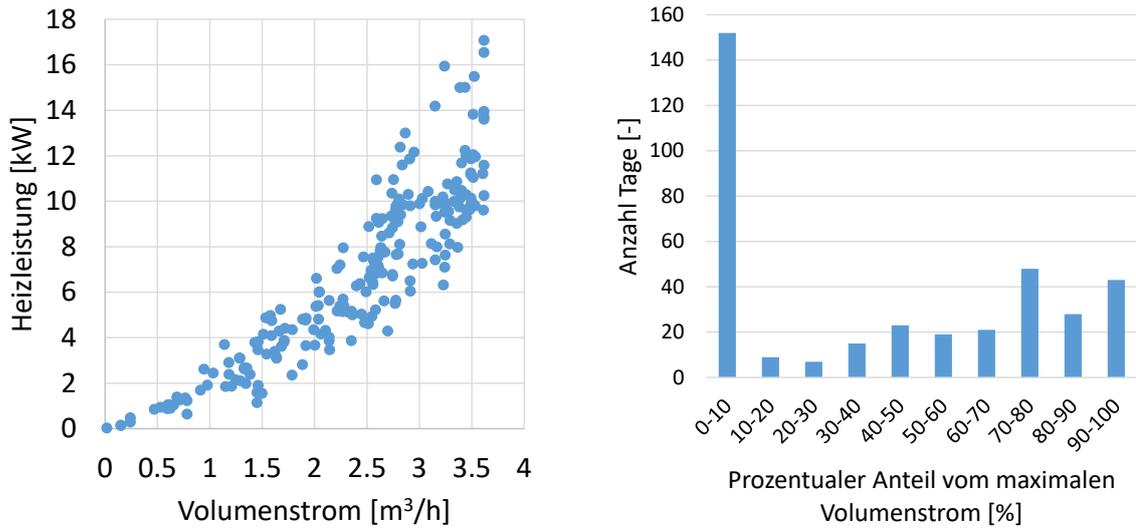


Abbildung 73: Volumenstrom im Heizkreis und Heizleistung für den Fall Verschattung nach SIA 180 („wahrscheinliche Verschattung“) ohne Fensterlüftung.

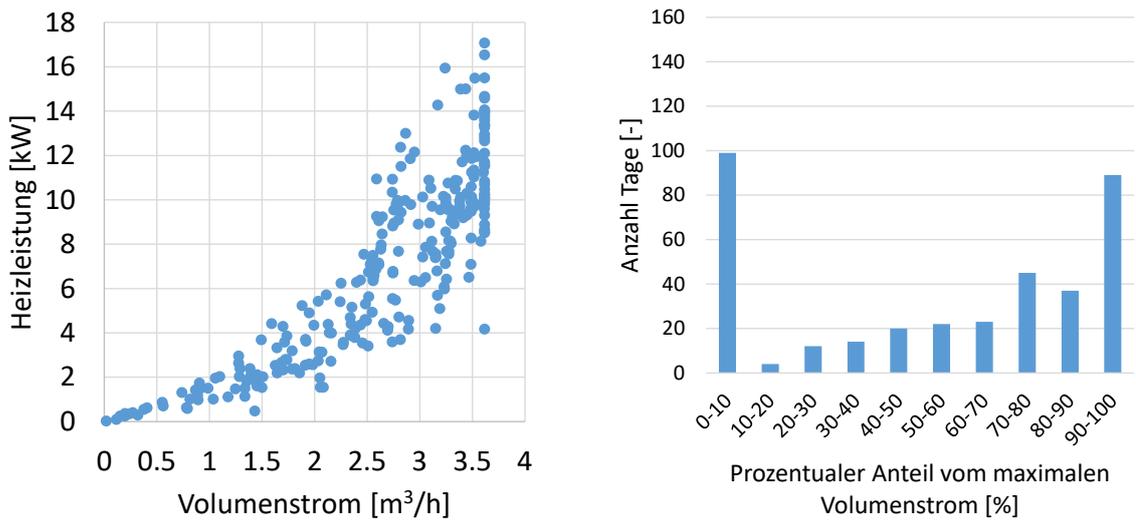


Abbildung 74: Volumenstrom im Heizkreis und Heizleistung für den Fall Verschattung nach SIA 180 („wahrscheinliche Verschattung“) und in jeder Wohnung ein Kippfenster offen.



Die vorangehenden Ergebnisse zeigen, dass die Simulationen mit offenen Kippfenstern, höheren Raumtemperaturen und die Regelung mit häufiger geschlossenem Sonnenschutz nach SIA 180 besser den real gemessenen Resultaten entsprechen als die Standardberechnungen. Feldmessungen mit hohem Performance Gap werden am besten getroffen, wenn man alle drei Eigenschaften kombiniert. In Abbildung 75 ist die Energiekennlinie für das Referenzgebäude mit idealem Benutzerverhalten (Standardbedingungen, $T_{\text{raum}} = 21 \text{ °C}$) und einem realistischen Benutzerverhalten dargestellt ($T_{\text{raum}} = 23 \text{ °C}$). Die orange Trendlinie entspricht in etwa der SIA 380/1-Berechnung, welche einen ähnlichen Verlauf aufweist wie im Energienachweis der in dieser Studie untersuchten Objekte (z.B.: Überbauung 2, Abbildung 57). Die blaue Trendlinie weist einen deutlich höheren Anteil am Wärmeverbrauch in der Übergangszeit (8-14 °C Monatsmitteltemperatur) gegenüber dem idealen Verlauf auf. Dies entspricht auch den Messergebnissen der real untersuchten Objekte. In Abbildung 76 ist der spezifische Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Monatsmitteltemperatur dargestellt. Der Wärmebedarf im Winter ist geringfügig tiefer im Fall der „idealen“ Simulation, da das Verschattungsverhalten und die tieferen Raumtemperaturen gegenüber der „realistischen“ Simulation auch im Winter einen Einfluss auf die Verluste und solaren Gewinne haben.

Mit diesem Vergleich lässt sich abschätzen, wie stark das Benutzerverhalten am Energy Performance Gap beteiligt ist. Der Heizwärmebedarf im „idealen Fall“ beträgt mit IDA ICE berechnet $21.5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und mit dem „realen Benutzerverhalten“ $38.3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Dies entspricht einem Mehrverbrauch von 78%. Vergleicht man den Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 mit Lesosai (Standardbedingungen) berechnet von $29 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ mit der IDA ICE Simulation „realistisches Benutzerverhalten“, ergibt sich auf Grund des Benutzerverhaltens eine tiefere Differenz von 32%. Diese kleinere Differenz ist dadurch begründet, dass die IDA ICE Simulationen auch einen tieferen Wärmebedarf im Winter aufweisen, als die Berechnungen mit Lesosai (siehe Abbildung 76).

Ein häufig gesenkter Sonnenschutz kann dadurch begründet sein, dass sich die Bewohner/innen von den Blicken der Nachbarn/innen schützen wollen, oder aber weil die Sonne blendet. Höhere Raumtemperaturen sind nicht immer gewollt, sondern können auch eine Folge von Komforteinbussen sein, welche beispielsweise durch fehlendem hydraulischem Abgleich der Wärmeabgabe oder anderweitig verursachten kalten Oberflächen hervorgerufen werden. Auch Probleme bei der Einstellung der optimalen Raumtemperaturen, respektive Unzulänglichkeiten bei der Vorlauftemperatur- oder Heizgrenzenregelung, können dazu führen, dass die Raumsollwerte eher hoch eingestellt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unzufriedenheit bei kalten Raumtemperaturen mit höher eingestellten Sollwerten beantwortet wird, einzelne Tage mit höheren Temperaturen als tatsächlich erwünscht jedoch nicht unbedingt zu einer Reduktion der Sollwerte sondern unter Umständen zu offenen Fenstern führen.

Bei den Simulationen handelt es sich um ein Referenzgebäude, welches bezüglich der Gebäudeparameter dem Durchschnitt aller untersuchten Objekte entspricht. Die ermittelten Effekte von veränderten Parametern gehen zwar wahrscheinlich bei allen Gebäuden in dieselbe Richtung. Je nach konkretem Objekt wird die Grösse der Werte jedoch etwas anders ausfallen. Zudem dürfte das Nutzerverhalten beispielsweise bei einem Passivhaus einen viel grösseren relativen Effekt auf den



Heizwärmeverbrauch haben. Dennoch wird ein Passivhaus einen geringeren Verbrauch aufweisen gegenüber dem Referenzgebäude, weil die bessere thermische Hülle eines Passivhauses in Kombination mit einer effizienten Komfortlüftung im Winter zu deutlich geringeren Transmissions- und Infiltrationsverlusten führt.

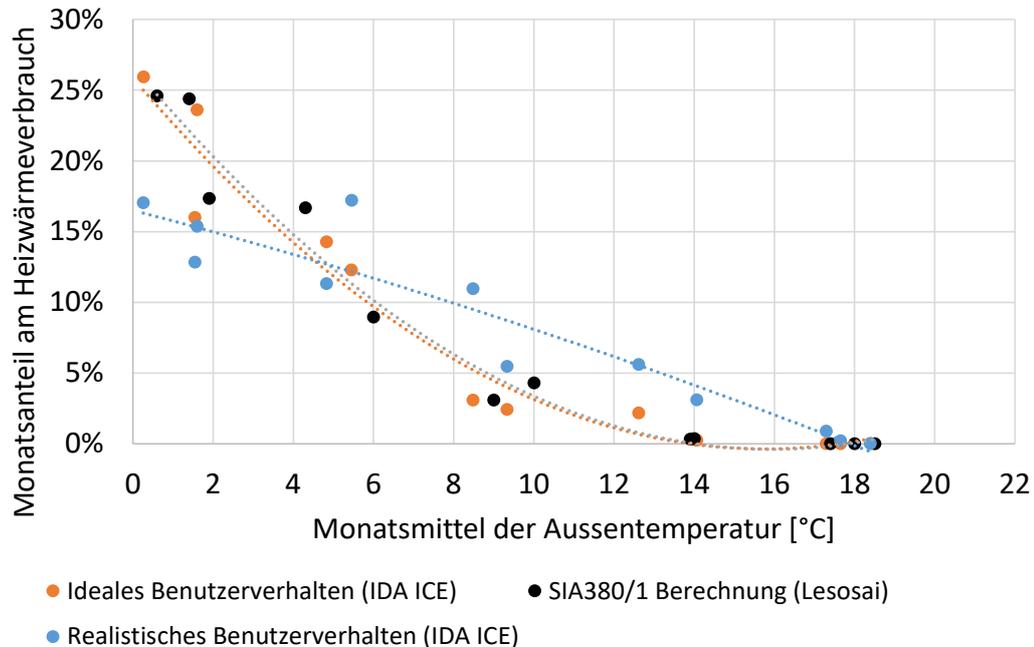


Abbildung 75: Energiekennlinie des Referenzgebäudes für ein realistisches Nutzerverhalten ($T_R=23\text{ }^\circ\text{C}$, Kippfenster geöffnet, Sonnenschutz häufig aktiviert) und ein ideales Nutzerverhalten ($T_R=21\text{ }^\circ\text{C}$, keine offenen Fenster, Sonnenschutz selten aktiviert).

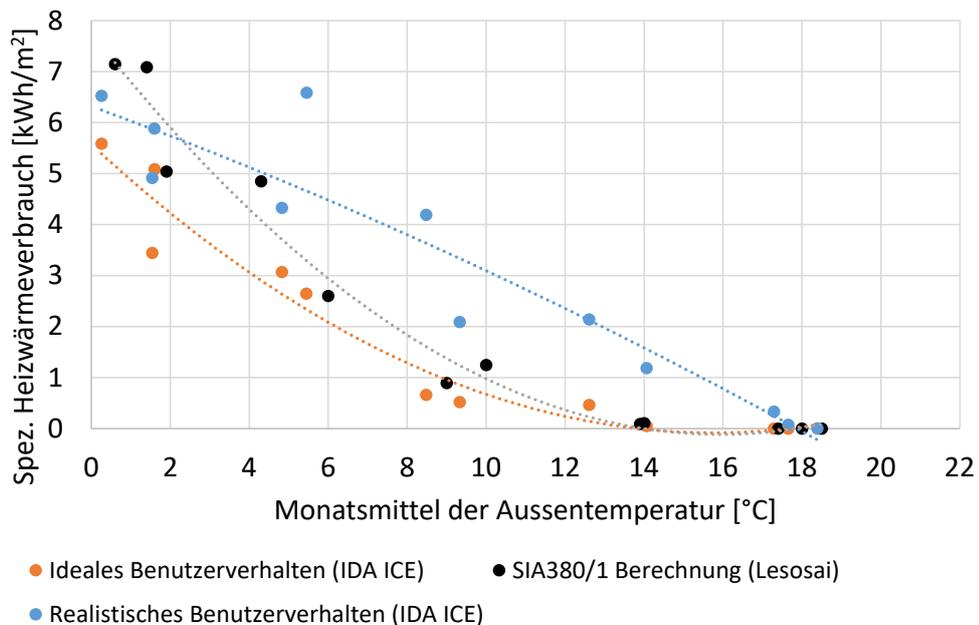


Abbildung 76: Spezifischer Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit des Monatsmittelwertes der Aussentemperatur des Referenzgebäudes für ein realistisches Nutzerverhalten ($T_R=23\text{ }^\circ\text{C}$, Kippfenster geöffnet, Sonnenschutz häufig aktiviert) und ein ideales Nutzerverhalten ($T_R=21\text{ }^\circ\text{C}$, keine offenen Fenster, Sonnenschutz selten aktiviert).

5.5 Einfluss Heizgrenze

Im nachfolgenden Kapitel wird der Einfluss der Heizgrenze genauer untersucht. Auf Grund der Auswertung der Messdaten konnte eine starke Korrelation zwischen der Heizgrenze und dem Energy Performance Gap festgestellt werden. Im vorliegenden Projekt wurde die Heizgrenze aus den Messdaten bestimmt und nicht an den Steuerungen abgelesen. Deshalb kann es sein, dass die ermittelten Heizgrenzen nicht den Reglereinstellungen entsprechen, sondern einem Kennwert, der durch den Energy Performance Gap selbst beeinflusst ist. In Abbildung 77 ist die Leistungskennlinie des Referenzgebäudes mit „idealem“ Sonnenschutz und ohne offenen Fenstern mit einer „technischen“ Heizgrenze von 15 °C dargestellt, die technische Heizgrenze entspricht der Einstellung am Regler. Um die Wärmekapazität eines Gebäudes zu berücksichtigen, wurde nicht die aktuelle Aussenlufttemperatur verwendet, sondern ein gleitendes (historisches) 24 Stundenmittel. Legt man eine Trendlinie durch die Tageswerte, dann erhält man eine „natürliche“ Heizgrenze von 11.5 °C. Da im idealen Gebäude die Verluste und Gewinne (Personen, Geräte, Solar etc.) sich schon bei tieferen Tagesmitteltemperaturen (11.5 °C) ausgleichen und somit kein Wärmebedarf vorhanden ist, fällt die „natürliche“ Heizgrenze tiefer aus als im Regler eingestellt. Dies bedingt, dass eine Raumtemperaturregelung vorhanden ist, welche den Wärmeinput durch die Heizung bedarfsgerecht reguliert.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Auswertung der Leistungskennlinie für das Referenzgebäude mit dem „wahrscheinlichem“ Benutzerverhalten in Abbildung 78. Die Heizgrenze, bestimmt durch die Trendlinie, ist mit 17.1 °C deutlich höher als die im Regler eingestellten 15 °C. Durch die Tatsache, dass im Diagramm die mittlere Tagesmitteltemperatur zwischen 00.00 Uhr und 24.00 Uhr dargestellt wird und die Heizgrenze sich auf das gleitende Mittel der letzten 24 Stunden bezieht, ist es möglich, dass eine Heizleistung über 15 °C Aussentemperatur ausgewiesen wird. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn am Vortag eher kalte Temperaturen vorherrschten und der darauffolgende Tag deutlich wärmer ist.

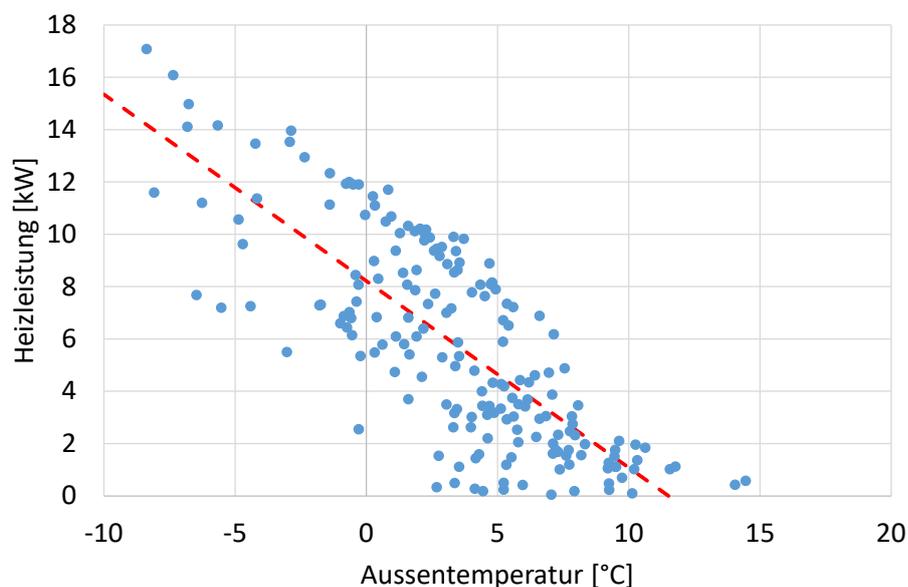


Abbildung 77: Leistungskennlinie basierend auf Tagesmittelwerten des Referenzgebäudes mit „idealem Benutzerverhalten“ und einer Heizgrenze von 15 °C (Reglereinstellung).

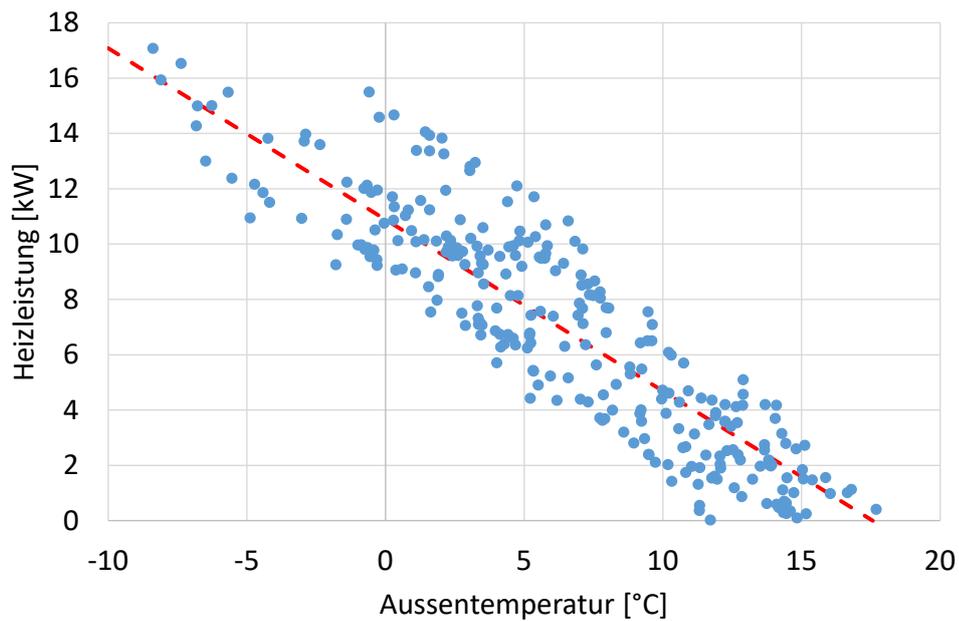


Abbildung 78: Leistungskennlinie basierend auf Tagesmittelwerten des Referenzgebäudes mit „wahrscheinlichem Nutzerverhalten“ und einer Heizgrenze von 15 °C (Reglereinstellung).

Damit wird deutlich, dass die über die Leistungskennlinie bestimmte Heizgrenze nicht unbedingt derjenigen im Regler entsprechen muss. Damit ist die **aus Messungen ermittelte Heizgrenze** nicht zwingend als Ursache des Energy Performance Gap zu betrachten, sondern sie kann ebenso gut ein Resultat davon sein, respektive ein Indikator dafür, wie stark das reale Nutzerverhalten vom Standardbenutzerverhalten der SIA 380/1 abweicht. Gleichwohl kann auch eine zu hohe Heizgrenze **im Regler** eine Ursache für den Energy Performance Gap sein.



6 Schlussfolgerung

In Gesprächen mit unterschiedlichen Fachexperten aus dem Gebäudebereich wird schnell klar, dass viele bereits eine vorgefertigte Meinung über die Ursachen des Performance Gap haben. Im Projekt ImmoGap wurde versucht, möglichst offen dem Thema „Performance Gap“ zu begegnen und den Gründen für den mutmasslichen Mehrverbrauch im Bereich der Mehrfamilienhäuser nach zu gehen.

Definition Performance Gap

Obwohl das Thema „Performance Gap“ schon seit einigen Jahren diskutiert wird, gibt es keine einheitliche Definition dafür. Von Studie zu Studie werden unterschiedliche Begriffe und Berechnungsmethoden für den „Performance Gap“ verwendet. Dies macht einen Vergleich verschiedener Studien sehr schwierig. Deshalb wurde in diesem Projekt klare Definitionen für den „Performance Gap“ vorgeschlagen sowie Grundlagen für dessen Ermittlung (Gap A-C). In der vorliegenden Studie bezieht sich der „Performance Gap“ immer auf die Nutzenergie der Raumwärme (Heizwärme ab Heizkreisverteiler) und nicht auf die Endenergie (z. B. Strom). Würde man die Endenergie betrachten, so könnten Effekte wie die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe oder der Wirkungsgrad des Heizkessels, Rückschlüsse auf den Heizwärmeverbrauch der Gebäude erschweren.

Witterungs- bereinigung

Um den Wärmeverbrauch mit dem Standardreferenzjahr vergleichbar zu machen, **müssen die Messwerte, welche unter anderen Witterungseinflüssen entstanden sind, auf das Standardreferenzjahr umgerechnet oder korrigiert werden.** Eine Korrektur mit der neueren ATD-Methode führte zu vielen offenen Fragen und Unklarheiten. Insbesondere war nach Anwendung der ATD-Methode am Ende nicht klar, ob mit diesem Verfahren nicht auch der Effekt einer höheren Raumtemperatur und andere Einflüsse die nichts mit dem Klima zu tun haben herauskorrigiert wurden. Deshalb wurde im Verlauf des Projekts auf die HGT-Methode gewechselt. Die Klimakorrektur hat einen direkten Einfluss auf die Bestimmung des „Performance Gaps“. Allein die Wahl der Klimakorrektur führt zu unterschiedlichen Ergebnissen, und die Ergebnisse sind nicht für alle betrachteten Messjahre identisch. Hierzu sind weitere Untersuchungen nötig, um allenfalls eine Klimakorrektur zu entwickeln, welche auch bei Messungen über mehrere Jahre immer zu mehr oder weniger demselben Ergebnis führt. Dies ist jedoch kein Grund auf eine Klimakorrektur ganz zu verzichten. Denn dies würde zu ganz falschen Ergebnissen führen.



**Standard vs.
reale Nutzung**

Um den „Performance Gap“ zu ermitteln, wurde der witterungsbereinigte Heizwärmeverbrauch mit dem berechneten Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 gemäss Energienachweis mit Standardbedingungen verglichen. Dieser Vergleich wird sehr häufig auch in anderen Studien verwendet. Die Schwierigkeit bei diesem Vergleich ist, dass **das Benutzerverhalten in der Berechnung des behördlichen Nachweises nicht der Realität entspricht**. Ein Energienachweis nach SIA 380/1 hat primär zum Ziel, den gesetzlichen geforderten wärmetechnischen Standard nachzuweisen. Deshalb wird in der Norm selber schon darauf hingewiesen, dass eine Vorhersage vom mutmasslichen Heizwärmeverbrauch nicht mit den Standardbedingungen durchgeführt werden sollte, sondern mit objektspezifischen realen Einstellungen und effektiver Nutzung. Dazu bietet die Norm die Option, den Heizwärmebedarf mittels einer „Optimierung/Messwert“-Berechnung durchzuführen. Dies erfordert jedoch eine gewissenhafte Eingabe von Kennwerten und gute Kenntnisse des Berechnungsverfahrens, sowie Kenntnisse der gebauten Konstruktionen und der realen Nutzungsbedingungen des Gebäudes. Eine Ermittlung der realen Nutzungsbedingungen ist jedoch nicht ohne grossen Aufwand möglich. Zum Beispiel ist die Ermittlung des Sonnenschutz- und Lüftungsverhalten in der Praxis sehr aufwändig. Bereits die Beschaffung der Energienachweise ist – wie die Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt zeigen – sehr aufwändig. Eine vollständige Neuberechnung nach „SIA 380/1 - Optimierung/Messwert“ mit realeren Nutzungsbedingungen würde für ein grösseres Portfolio einen kaum vertretbaren Aufwand bedeuten. Deshalb ist für so breite Auswertungen wie im vorliegenden Projekt trotz methodischen Einschränkungen die Ermittlung eines "Performance Gaps" realistischerweise nur im Vergleich zu einem Energienachweis möglich. Zur Ermittlung eines „Performance Gap“ für ein einzelnes Gebäude muss jedoch auf jeden Fall die Berechnung nach SIA 380/1 mit effektiven Konstruktionen und realen Nutzungsbedingungen erfolgen.

Gleichwohl können auch mit einem Vergleich zwischen Heizwärmebedarf gemäss Energienachweis und dem klimabereinigten realen Heizwärmeverbrauch Gebäude identifiziert werden, die einen erhöhten Heizwärmeverbrauch aufweisen. Gründe für diesen erhöhten Wärmeverbrauch können Mängel oder Abweichungen in der Gebäudetechnik, der Gebäudehülle, die Betriebseinstellungen oder das Nutzerverhalten sein.



Verschattung, Lüftung & Raumtemperatur Die Simulationsresultate mit vom Standard abweichendem Sonnenschutz- und Fensterlüftungsverhalten sowie höheren Raumtemperaturen zeigen, dass dieses Nutzerverhalten etwa 30-40 Prozentpunkte vom „Performance Gap“ ausmachen kann. Der untersuchte Gebäudepool von 65 Mehrfamilienhäuser weist im Schnitt mit 44% einen „Performance Gap“ in dieser Höhe auf. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass **für den grössten Teil der Abweichungen nicht eine Mangelhafte Ausführung des Gebäudes oder der Haustechnik verantwortlich ist, sondern das Verhalten der Benutzer, allenfalls in Kombination mit suboptimaler Regelung und Bedienung von Haustechnik durch die Benutzer**. Generell möchten wir darauf hinweisen, dass nicht die Gebäudenutzenden ein „Problem“ des Performance Gaps sind, sondern dass es wichtig ist herauszufinden weshalb sich diese anders Verhalten als angenommen.

Bei Objekten welche einen Mehrverbrauch von 100% oder mehr aufweisen sind jedoch sicher genauere Betrachtungen angezeigt, da die Unterschiede nicht nur durch das Nutzerverhalten erklärt werden können.

Fehlerhafte oder tendenziöse Nachweise Untersuchungen am Beispiel eines Gebäudes mit grossem Performance Gap zeigten, dass für dieses Gebäude sehr optimistische, wenn nicht gar tendenziöse Annahmen für den Energienachweis getroffen wurden. Dadurch wurde letztendlich ein tiefer Bedarf ausgewiesen, welcher den Grenzwert der SIA deutlich unterschritt, jedoch in der Realität um 170% übertroffen wurde (EPG-Faktor 2.7). Für das gleiche Objekt resultiert bei Annahmen, welche ein versierter Planer als „realistisch“ einstufen würde, ein deutlich höherer Bedarf, der von der Realität nur noch um 8% übertroffen wird. In beiden Fällen werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die angenommenen Werte eingehalten.

Einfluss Fensteranteil Es konnte in dieser Studie kein Zusammenhang zwischen Fensteranteil (10-35% der EBF) und dem „Performance Gap“ gefunden werden.

Einfluss der SIA Ausgabe Auffällig ist, dass Gebäude bei denen der Wärmebedarf mit den SIA Ausgaben 2001 und 2007 berechnet wurde, den gesetzlichen Grenzwert deutlich stärker unterschreiten als jene Gebäude bei denen die Ausgabe 2009 angewendet wurde, gleichzeitig jedoch auch einen deutlich höheren Performance Gap ausweisen. Beide Resultate sind hochsignifikant. Erstaunlicherweise hat sich jedoch die Berechnungsmethode zwischen 2007 und 2009 nicht geändert. Der Minergie-Grenzwerte war jedoch 2007 noch deutlich unter dem SIA-Grenzwert, seit 2009 jedoch sind die beiden Grenzwerte fast identisch.

Da die Grenzwerte zwischen den Ausgaben 2007 und 2009 für MFH um 30% verschärft worden sind, könnte dies ein Hinweis



darauf sein, dass das wirtschaftliche Optimum bezüglich der Gebäudehülle erreicht ist. Sehr wenige Bauherren scheinen gewillt zu sein, den Grenzwert mehr als nötig zu unterschreiten. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass heutige Produkte mit hohen Kosten in Zukunft deutlich günstiger werden können, was wiederum dazu führt, dass die Gebäudehülle in einem wirtschaftlichen Rahmen weiter verbessert werden kann (Beispiel aus der Vergangenheit: 3-fach Verglasung).

**Heizgrenzen
und Mehr-
bedarf in der
Übergangszeit**

Die Heizgrenzen der untersuchten Objekte waren generell hoch bis sehr hoch eingestellt (15.7 bis 22 °C, im Median 18.5 °C). Mit der Simulation konnte gezeigt werden, dass die aus der Leistungskennlinie bestimmte Heizgrenze nicht unbedingt der Heizgrenze im Heizungsregler entsprechen muss. Dennoch sind Wärmeeinträge auch an Tagen mit Tagesmittelwerten der Aussentemperatur von 18 °C oder mehr keine Seltenheit. Man würde erwarten, dass die Raumtemperaturregelungen bei hoch eingestellter Heizgrenze den Mehreintrag an Wärme verhindern würden. Dies scheint jedoch gerade in der Übergangszeit nicht der Fall zu sein. Möglicherweise werden an den Raumreglern oft hohe Solltemperaturen eingestellt, oder es werden in den Übergangszeiten vermehrt Fenster geöffnet.

**Einfluss
erhöhte
Solltemperatur**

Die Auswertung von 26 Wohnungen ausserhalb des vorliegenden Projekts hat gezeigt, dass die Hälfte der Wohnungen eine Solltemperatur von 24 °C aufweist.

Es ist jedoch unklar, ob die Bewohner/innen wirklich höhere Raumtemperaturen wollen und deshalb die Heizgrenzen und Raum-Sollwerte hoch eingestellt werden, oder ob mit hoch eingestellten Werten Unzulänglichkeiten der Regelung (Vergangenheitsbasierte Regelung anstatt vorausschauende) oder fehlende hydraulische Abgleiche, eventuell auch fehlende Einzelraumregelungen kaschiert werden.

Berechnungen nach SIA 380/1 und dynamischen Jahres-simulationen zeigen, dass ein um 1°K (Kelvin) höherer Raumtemperatur-Sollwert zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs von durchschnittlich +13% führt.

**Simulation mit
„realistischen“
Annahmen**

Es zeigte sich, dass mit „realistischen“ Annahmen für Verschattung, Fensterlüftung und Soll-Temperaturen nicht nur ein grosser Teil des Energy Performance Gap, sondern auch der vor allem in den Übergangszeiten erhöhte Raumwärmebedarf erklärt werden kann. Demnach ist es wahrscheinlich, dass das reale Verschattungsverhalten eher der SIA 180 entspricht als der SIA 380/1, dass in den Übergangszeiten mindestens ein Fenster geöffnet, respektive gekippt ist, und dass die Raum-Solltemperatur bei ca. 23 °C liegt.



In dieser Studie konnten die Gründe für den „Performance Gap“ nicht restlos geklärt werden. Es konnten jedoch verschiedene Anhaltspunkte und signifikante Korrelationen aufgezeigt werden. Dank der eingehenden Analyse der realen Messdaten in Kombination mit Simulationen kann der Einfluss der Nutzer auf den Heizwärmeverbrauch besser abgeschätzt werden. Die Ergebnisse können helfen, die in Zukunft durch vermehrtes Monitoring (Minergie 2017) erfassten Messdaten gezielter und möglicherweise automatisiert auszuwerten.

Kenntnisse über den effektiven Bedarf im Vergleich zum theoretischen helfen auch beispielsweise bei der richtigen Dimensionierung von Erdsonden. Im untersuchten Gebäudepool entspricht ein hoher relativer Mehrverbrauch auch einem hohen absoluten Mehrverbrauch. Deshalb sind die Resultate auch relevant für gesamtschweizerische Statistiken und Prognosen bezüglich Energieverbrauch und CO₂-Emissionen im Gebäudebereich. Unabhängig davon, wieso die Gebäude mehr Heizwärme benötigen, hat ein Mehrverbrauch an Nutzenergie einen direkten Einfluss auf den Endenergieverbrauch. **Trotz „Performance Gap“ haben Häuser für welche ein geringerer Heizwärmebedarf prognostiziert wurde tendenziell auch einen tieferen Heizwärmeverbrauch.**



7 Empfehlungen

Bestimmung des „Energy Performance Gap“

Wenn für einzelne oder wenige Gebäude der Wärmeverbrauch mit einer Vorhersage verglichen werden soll, so muss eine Berechnung nach SIA 380/1 mit der Option „Optimierung“ durchgeführt werden. In dieser Berechnung werden nicht die Standardnutzungsdaten, wie sie für den behördlichen Energienachweis verwendet werden, sondern bestmöglich den realen Nutzungsbedingungen entsprechende Werte eingesetzt. Dies erfordert eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Gebäude und seiner Nutzung. Optimal ist es, wenn die Berechnungen mit den Klimadaten vor Ort in der entsprechenden Zeitperiode durchgeführt werden. So lassen sich Verzerrungen der Ergebnisse auf Grund von Klimakorrekturen vermeiden. Dies entspricht nach SIA 380/1 dem Messwertvergleich. All dies ist jedoch für den/die Planer/in oder Energieberatende mit Mehraufwand verbunden, der entsprechend von der Bauherrschaft oder der Immobilienverwaltung honoriert, respektive vergütet werden müsste. Derzeit bestehen dafür jedoch kaum Anreize.

Für den Vergleich mit Messwerten wird empfohlen, die nachfolgenden Parameter in der Berechnung nach SIA 380/1 abweichend zu den Standardwerten anzupassen:

- Anpassung der Nutzungsdaten wie Personenanzahl, Geräte etc.
- Korrektur des g-Wertes auf Grund des Sonnenschutzsystems (z. B.: Vorhänge in den Wohnungen), aus Gründen des Sichtschutzes bei nahen Nachbargebäuden, oder auf Grund der Verschattung durch nahe gelegene Nachbarsgebäude
- Korrektur der Innenraumtemperatur, wenn möglich mit der effektiv gemessenen Temperatur oder der eingestellten Temperatur
- Korrektur der Lüftungsverluste auf Grund von vermehrtem Fensterlüften (besonders während der Übergangszeit)

Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass der Jahreswärmebedarf für „normale“ Wohngebäude ziemlich gut berechnet werden kann, wenn die Gebäudeparameter richtig definiert werden. Bei grossem relativem Fensteranteil ($A_w/A_e > 25\%$) wird jedoch eine Fehlerrechnung/Sensitivitätsanalyse empfohlen.

Falls der Energy Performance Gap dennoch auf Basis des Energienachweises ermittelt werden muss, dann sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Es muss immer eine Klimakorrektur durchgeführt werden, da sonst die Messdaten nicht mit dem Referenzjahr vergleichbar sind. Wir empfehlen vorläufig die Verwendung der HGT-Methode, da sich bei der Verwendung der neuen ATD-Methode einige Unklarheiten gezeigt haben.
- Es muss definiert und ausgewiesen werden, ob für den Vergleich der Wärmebedarf mit effektivem oder mit Standardluftwechsel ermittelt wurde.
- Der Heizwärmeverbrauch sollte nur in seltenen Fällen mit dem Heizwärmegrenzwert verglichen werden. Denn es gibt einige Gebäude, bei denen der in der Planung berechnete Heizwärmebedarf den Grenzwert deutlich unterschreitet.
- Es soll explizit zwischen einer Endenergie- und einer Nutzenergiebetrachtung unterschieden werden. Die beiden Betrachtungsweisen führen beim selben Gebäude in Bezug auf einen



Mehrverbrauch nicht immer zu denselben Schlüssen. Der optimale Fall ist, wenn sowohl End- wie Nutzenergie separat erfasst werden. Eine reine Endenergiebetrachtung kann nur bedingt Aufschluss geben über den Heizwärmebedarf eines Gebäudes, solange der Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers nicht bekannt ist.

Anpassung der Norm SIA 380/1

Obwohl bei einer realistischen Wahl der Gebäudeparameter und der Nutzung der ermittelte Jahreswärmebedarf recht gut mit der klimabereinigten Realität überreinstimmt, wäre eine Anpassung bezüglich den Annahmen zum Sonnenschutz und zum Lüftungsverhalten der Nutzer/innen in der Berechnungsmethode nach SIA 380/1 prüfenswert. Hintergrund für diese Empfehlung ist die Beobachtung, dass die monatliche Bilanzierung eine grössere Abweichung zur Realität aufweist als die Jahresbilanz. Der Wärmeverbrauch ist in der Regel in der Übergangszeit deutlich grösser als in den Berechnungen ausgewiesen. Die Simulationen im Rahmen des vorliegenden Projekts lassen vermuten, dass die Bedingung des Sonnenschutzes und das Lüftungsverhalten in Kombination mit hoch eingestellten Heizgrenzen und nicht aktiv eingreifenden Thermostateinstellungen dafür verantwortlich sind.

Aus Sicht der Autoren wäre es interessant, bei der Berechnung des Energienachweises eine Spannbreite des möglichen Wärmebedarfs darzustellen, zum Beispiel in Abhängigkeit der Raum-Solltemperatur sowie des Verhaltens bezüglich Fensterlüftung und Verschattung. Damit könnte ein sogenanntes $Q_{h, \text{Sensitivität}}$ ermittelt werden. Dieses würde einen grossen Teil der auftretenden Differenzen erklären können und wäre damit ein Ansatz für ein transparenteres Nachweisverfahren, welches auch Aussagen zum Einfluss des Nutzerverhaltens macht.



Offene Fragestellungen:

Nachfolgend werden offene Fragestellungen aufgeführt, welchen in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden sollte:

- Die Methode zur Witterungsbereinigung von Messdaten sollte verbessert werden. Die momentane Situation ist nicht befriedigend, da die Klimakorrektur einen direkten Einfluss auf die Bestimmung des Energy Performance Gap hat.
- Weshalb die heutigen Bewohner/innen höhere Raumtemperatur pflegen, ist bisher nicht geklärt. Ist es eine Frage des Komforts, eine Gewöhnung an höhere Raumtemperaturen, die das Gebäude ungefragt bereitstellt, oder der Wunsch nach warmen Füssen? Um mehr über die Hintergründe der höheren Raumtemperaturen herauszufinden, müsste die Analyse von Messdaten (effektiven Raumtemperaturen) mit Bewohnerbefragungen kombiniert werden.
- Das Konzept der Heizgrenze und der Vorlauftemperatur, welche in der Steuerung auf Grund der mittleren Aussentemperatur der letzten 24 Stunden beruht, sollte überdacht werden. Möglicherweise können Heizgrenzen und Vorlauftemperaturen, welche anstatt der Vergangenheit die nahe Zukunft des Aussenklimas berücksichtigen, bessere Resultate erzielen bezüglich Komfort und Wärmeverbrauch. Solche Regelungen stehen am Markt teilweise bereits zur Verfügung.
- Mit dem Ziel des BFE, in Zukunft möglichst alle Gebäude mit einem Energiemonitoring auszurüsten [40], stellt sich die Frage, wie ein „gutes“ von einem „schlechten“ Gebäude unterschieden werden kann, bzw. welches der jeweilige Referenzwert ist. Mit dem Fortschritt in der Digitalisierung des Bauprozesses und bei den Energieberechnungen sollten die benötigten Daten bald digital für Energieberater/innen und eventuell auch für die Behörden zur Verfügung stehen. Beispielsweise sollten die zugelassenen Energienachweistools eine Exportfunktion für die Gebäudeeingabewerte enthalten. Mit diesen Exportdaten könnte später über den Import in ein (allenfalls anderes) Berechnungstool eine Neuberechnung mit realen Nutzungsdaten erfolgen. Damit könnte das Energiemonitoring nicht nur mit dem ursprünglich erstellten Nachweis vergleichen, sondern auch mit einer Bedarfsberechnung, die der realen Nutzungssituation besser entspricht oder Nutzungsänderungen berücksichtigt.
- Die Auswertung der 65 Gebäude bestätigt die Erfahrung aus der Praxis, dass die Wärmeerzeugerleistung in der Regel zu gross dimensioniert wird. Es braucht Ansätze welche zu einer besseren Übereinstimmung zwischen der geplanten und der real benötigten Heizleistung führen. Diese könnten in eine neue Version der SIA 384.201 einfliessen.



8 Literaturverzeichnis

- [1] R. Moser und A. Eckmanns, „Aufruf zur Projekteingabe im Forschungsprogramm ‚Energie in Gebäuden‘“. Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Energie in Gebäuden, 2016.
- [2] W. Reimann u. a., „Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015“, DemoSCOPE AG, econcept AG und Lemon Consult AG im Auftrag des Bundesamts für Energie, Mai 2016.
- [3] K. Grossmann, A. Schaffrin, und C. Smigiel, *Energie und soziale Ungleichheit – Zur gesellschaftlichen Dimension der Energiewende in Deutschland und Europa*, 1. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden, Deutschland, 2017.
- [4] F. Schröder, O. Papert, T. Boegelein, H. Navarro, und B. Mundry, „Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand“, in *Bauphysik, Volume 36(6)*, 2014, S. 309–324.
- [5] R. Scheppelmann und D. Schmidt, „Der Prebound-Effekt: die Schere zwischen errechnetem und tatsächlichem Energieverbrauch“, Leitstelle Klimaschutz, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, 2012.
- [6] J. Khoury, P. Hollmuller, und B. Lachal, „Energy performance gap in building retrofit: characterization and effect on the energy saving potential“, gehalten auf der BRENET 19. Status-Seminar, ETH-Zürich, 2016.
- [7] P. De Wilde und R. Jones, „The building energy performance gap: Up close and personal“, in *Proceedings of the CIBSE ASHRAE Technical Symposium: Moving to a new world of building systems performance*, Dublin, 2014.
- [8] „SIA 380/1: 2009: Thermische Energie im Hochbau“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
- [9] C. Struck u. a., „‚Performance Gap‘ in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und gemessenem Verbrauch in Gebäuden“, gehalten auf der BRENET 18. Status-Seminar, ETH-Zürich, 2014.
- [10] W. Ott u. a., „Erfolgskontrolle 2000-Watt-Gebäude“, Energieforschung Stadt Zürich - Forschungsprojekt FP-2.5 Bericht Nr. 14, 2014.
- [11] D. Wolff, „OPTIMUS – Optimierung von Heizungsanlagen“. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), 2008.
- [12] M. Ménard, „Planung versus Messung - Heizwärmebedarf von Neu- und Umbauten“. Lemon Consult Zürich, 2014.
- [13] C. Hoffmann, A. Geissler, und L. Carisch, „Warum stimmt das nie? – Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnen)“, gehalten auf der BRENET 19. Status-Seminar, ETH-Zürich, 2016.
- [14] B. Schwarz, „Energetische Erfolgskontrolle in Mehrfamilienhaus-Neubauten ab 5 Bezüger - Minergie-Standard und MuKE n 2008“, SVW/ASC – Schweizerischer Verband für Wärme- und Wasserkostenabrechnung, März 2016.
- [15] W. Hässig, S. Wyss, und J. Staubli, „Untersuchung Wärmeverbrauchsdaten von Neubauten“, AWEL - Abteilung Energie Zürich, Okt. 2015.
- [16] D. Selk und T. Gniechwitz, „Unsere neuen Häuser verbrauchen mehr als sie sollten“, Bd. Nr. 238, 1/2010, Kiel: Arbeitsgemeinschaft Zeitgemäßes Bauen e. V.



- [17] F. Schröder, C. Ohlwärter, H. Erhorn, und J. Reiss, „Reale Raumtemperaturen in Mehrfamilienhäusern – Korrelation mit Gebäudeenergiekennzahlen“, *EnEV aktuell*, Bd. Nr. 2, S. 17–19, 2010.
- [18] D. Exner und H. Mahlkecht, „User habits, impact on energy consumption in passive houses – results of a comprehensive long-term measurement“, Project: ENERBUILD - Results 5.4, Juni 2012.
- [19] B. Frei, F. Reichmuth, und H. Huber, „Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser“, Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden REN, Bundesamt für Energie BFE, Nov. 2004.
- [20] I. Bättig, „Minergie: Praxistest bestanden“, *Ostschweizer Energiepraxis*, Okt. 2004.
- [21] S. Lenel, S. Gemperle, J. Bosshard, M. Castrilli, und M. Walther, „Praxistest MINERGIE – Erfahrungen aus Planung, Realisierung und Nutzung von MINERGIE-Bauten“, Konferenz Kantonalen Energiefachstellen (EnFK), Juni 2004.
- [22] M. Gallati und P. Knüsel, „Schlussbericht Nutzerverhalten beim Wohnen. Analyse, Relevanz und Potenzial von Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs“, Gallati Kommunikation und Faktor Journalisten im Auftrag des Amtes für Hochbauten Stadt Zürich, Juni 2011.
- [23] R. Kriesi, „Reales Lüftungsverhalten in Wohnungen - Schlussbericht“. AHB Zürich, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, 2012.
- [24] Z. . Gill, M. . Tierney, I. . Pegg, und N. Allan, „Low energy dwellings: the contribution of behaviours to actual performance“, gehalten auf der Building Research & Information, 2010, Bd. 38:5, S. 491–508.
- [25] D. Majcen, „Predicting energy consumption and savings in the housing stock. A performance gap analysis in the Netherlands“, PhD Thesis, Delft University of Technology - Faculty of Architecture and the Build Environment, Netherlands, 2016.
- [26] „Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014)“. Konferenz kantonaler Energiedirektoren, 09-Jan-2016.
- [27] „SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010.
- [28] „IDAWEB 1.2.1 - MeteoSwiss“. Eidgenössisches Departement des Innern EDI - Bundesamt für Meteorologie und klimatologie MeteoSchweiz, 2017.
- [29] „Räumliche Daten Sonnenschein“, *www.meteoschweiz.admin.ch*, 28-Mai-2018. .
- [30] „SIA380:2015: Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [31] „SIA 381/3: Heizgradtage der Schweiz“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1982.
- [32] „Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement“, Bureau International des Poids et Measures (BIPM), Sep. 2008.
- [33] „Methodenberatung - Multiple Regressionsanalyse“. Universität Zürich, Zürich, 08-Jan-2017.
- [34] M. Y. Haller, R. Dott, J. Ruschenburg, F. Ochs, und J. Bony, „The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38“. International Energy Agency (IEA) is, 07-März-2013.
- [35] „SIA 384/1:2009: Heizungsanlagen in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
- [36] C. Hauri und H. Huber, „Leistungsgarantie Haustechnik“. Bundesamt für Energie und Verein Minergie, Feb-2007.



- [37] A. Daryanto, *Heteroskedasticity Test SPSS - Skript*. Lancaster University Management School, 2018.
- [38] I. Mojic und M. Haller, „Einfluss der Einzelraumregelung auf den Raumwärmebedarf von Niedrigenergiehäusern mit hohem Verglasungsanteil“. AWEL Zürich, Abteilung Energie, 13-Feb-2017.
- [39] L. Carisch, M. Ménard, M. Mühlebach, und M. Talattad, „SolarGap - Auswirkung von Sonnenschutzsystemen auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden“. Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Gebäude und Städte, 11-Mai-2018.
- [40] „Gebäudepark 2050 - Vision des BFE - Factsheet“. Bundesamt für Energie BFE - Sektion Gebäude, 01-Jan-2018.
- [41] „SIA Merkblatt 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik.“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2006.
- [42] „SIA Merkblatt 2023: Lüftung in Wohnbauten“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2008.
- [43] „Wärmebrückenkatalog“. Bundesamt für Energie BFE, 2002.



Anhang A: Fehlerrechnung ATD Methode

In diesem Kapitel wird eine vereinfachte Methode zur Fehlerrechnung beschrieben welche für die Phase 1 angewendet wurde um ungefähr die Grösse der Messunsicherheit zu bestimmen und somit ihren Einfluss auf den Energy Performance Gap abzuschätzen. Die Fehlerrechnung basiert auf der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung [32]. Da der Energy Performance Gap aus dem Verhältnis zwischen Bedarf und Verbrauch berechnet wird, wurden die Gleichungen aus dem Kapitel 2.8 für die Ermittlung des Verbrauchs für die Fehlerrechnung verwendet. Die Bedarfsermittlung (Energienachweis) wurde nicht berücksichtigt in der Fehlerrechnung, da dann die Fehlerrechnung ungleich komplizierter wird und in einem einfachen Verfahren nicht mehr abgehandelt werden kann. Nachfolgend sind in der Tabelle 17 die beiden Grundgleichungen für die Bestimmung des klimakorrigierten Verbrauchs nach der ATD-Methode aufgeführt. Jedoch wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet, da diese schon im Kapitel 2.8 aufgeführt ist. Zusätzlich zu den Gleichungen werden für jeden Wert die angenommene maximale Abweichung und die berechnete Standardabweichung aufgeführt.

Tabelle 17: Verwendete Werte für die Berechnung der Abweichung des klimakorrigierten Energiemesswertes

$E_{H,Ref} = \frac{\theta_{\Sigma,per,Ref}}{\theta_{\Sigma,per}} \cdot E_H$	Wert	Variable	Maximale Abweichung	Standardabweichung (1σ)
ATD _{Ref}	$\theta_{\Sigma,per,Ref}$	-	-	-
gemessener Energiebedarf	E_H	U_1, u_1	$\pm 4\%$	$\pm 2.3\%$
ATD _{Messjahr}	$\theta_{\Sigma,per}$	$u_{\theta_{\Sigma,per}}$	-	$\pm 1.29K$
$\theta_{\Sigma,per} = \sum (\theta_b - \theta_{e,m}) > 0$				
Basistemperatur	θ_b	U_2, u_2	$\pm 1K$	$\pm 0.577K$
Tagesmitteltemperatur	$\theta_{e,m}$	U_3, u_3	$\pm 2K$	$\pm 1.155K$

Die maximale Abweichung der einzelnen Terme wurde mit nachfolgender Formel in eine Standardabweichung umgerechnet:

$$u_i = \sqrt{\frac{U_i^2}{3}}$$

Die absolute Abweichung für den Nenner $\theta_{\Sigma,per}$ wurde wie folgt berechnet:

$$u_{\theta_{\Sigma,per}} = \sqrt{u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{0.577 K^2 + 1.155 K^2} = \pm 1.29 K$$



Die gesamte relative Messunsicherheit für $E_{H,Ref}$ mit einer Basistemperatur von 18 °C und den Temperaturdaten der Messstation Zürich wurde wie folgt berechnet:

$$u_{E_{H,Ref}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\theta_{\Sigma,per}}}{\theta_{\Sigma,per}}\right)^2 + (u_1)^2} = \sqrt{(14.4\%)^2 + (2.3\%)^2} = \pm 14.6 \%$$

In Abbildung 79 ist der relative Fehler der klimakorrigierten Wärmemenge $E_{H,Ref}$ in Abhängigkeit der Basistemperatur dargestellt.

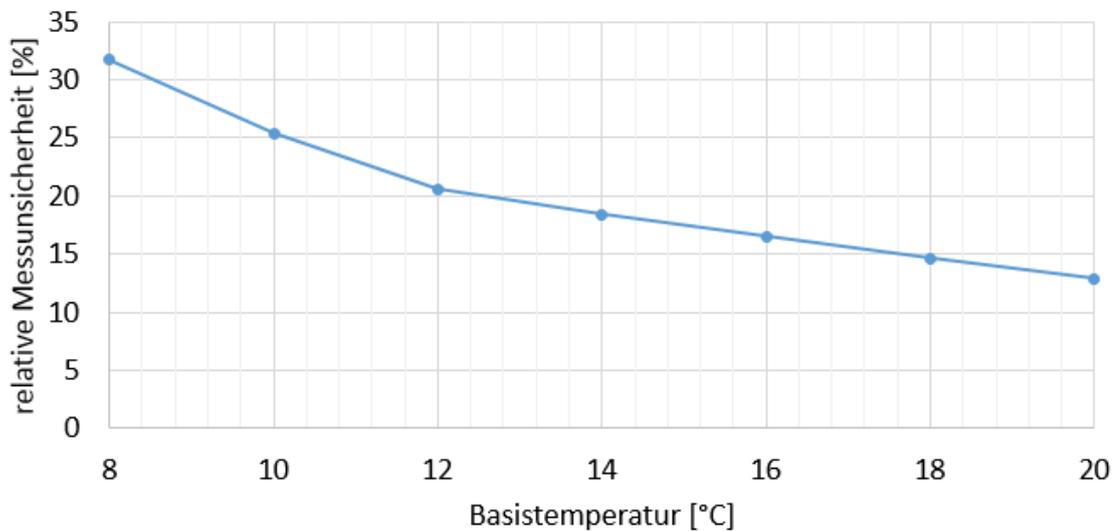


Abbildung 79: Relative Messunsicherheit in Abhängigkeit der gewählten Basistemperatur.

Fazit: Die Berechnungs- und Messunsicherheit ist bei der Bestimmung des Energy Performance Gap nicht zu unterschätzen, da die relative Abweichung des klimakorrigierten Energieverbrauchs zwischen 13% und 32% liegen kann und in diesem Bereich auch der ausgewiesene Energy Performance Gap abweichen kann. Die relative Abweichung nimmt mit besserem Gebäudestandard (abnehmende Basistemperatur) zu, was es schwierig macht, bei sehr gut isolierten Gebäuden die nur eine moderate Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch haben, einen Energy Performance Gap festzustellen.



Einfluss BWW-Ermittlung (Fehlerrechnung, Ergänzung zum Kapitel 3.1):

Weil der BWW-Verbrauch von Jahr zu Jahr Schwankung zwischen 3% und 13% unterliegt (ohne Ausreisser-Objekt 56), wird durch eine fixe Korrektur des Wärmeverbrauchs auch der berechnete Energy Performance Gap beeinflusst. Berücksichtigt man eine Schwankung des BWW-Verbrauchs von $\pm 13\%$ führt dies zu einer Messunsicherheit des Energy Performance Gap, beispielsweise für das Gebäude 25 von $\pm 2.6\%$ (berechnet mit der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung [32]). Somit kann die jährliche Schwankung des BWW-Verbrauchs grundsätzlich vernachlässigt werden, vorausgesetzt, dass der Anteil der Heizwärme am Wärmebedarf mindestens 66% beträgt. Je grösser jedoch der BWW-Anteil wird, desto stärker wirkt sich eine Jahresschwankung des BWW-Verbrauchs auf die Ermittlung des Performance Gap aus. Hat die Heizwärme nur noch einen Anteil von 50%, wirkt sich eine Schwankung von $\pm 13\%$ bereits mit einer Messunsicherheit von $\pm 6\%$ auf den Energy Performance Gap aus.



Anhang B: Referenzgebäude MFH

Gebäudemodell

Als Referenzgebäude für die Simulationsanalyse wurde ein Mehrfamilienhaus (MFH) definiert, das den Durchschnittsplanungswerten der im Projekt untersuchten Objekte entspricht. Das Referenzgebäude besitzt eine Energiebezugsfläche (EBF) von 1'205 m², welche sich auf Verkehrsflächen und drei Wohngeschosse mit insgesamt sechs Wohnungen aufteilt. Weitere Kennzahlen des Referenzgebäudes sind die Gebäudehüllzahl A_{th}/A_E von 1.3 und der Fensteranteil bezogen auf EBF von 25.1 %. In Abbildung 80 ist das Erdgeschoss des Referenzgebäudes mit Zoneneinteilung sowie Raum- und Fensterbezeichnung dargestellt. Die beiden Obergeschosse haben einen identischen Grundriss, wie das dargestellte Erdgeschoss. Das Referenzgebäude wurde unterteilt in die Zonen „Wohnen“ (gelb), „WC, Bad, Dusche“ (violett) und „Verkehrsfläche“ (grau). Die Zonen und internen Lasten entsprechen den Vorgaben des Merkblattes SIA 2024 [41]. Das Gebäude wurde, wie die untersuchten Objekte, als Massivbau modelliert und die Gebäudehülle so konzipiert, dass der Heizwärmebedarf dem Minergie-Standard genügt.

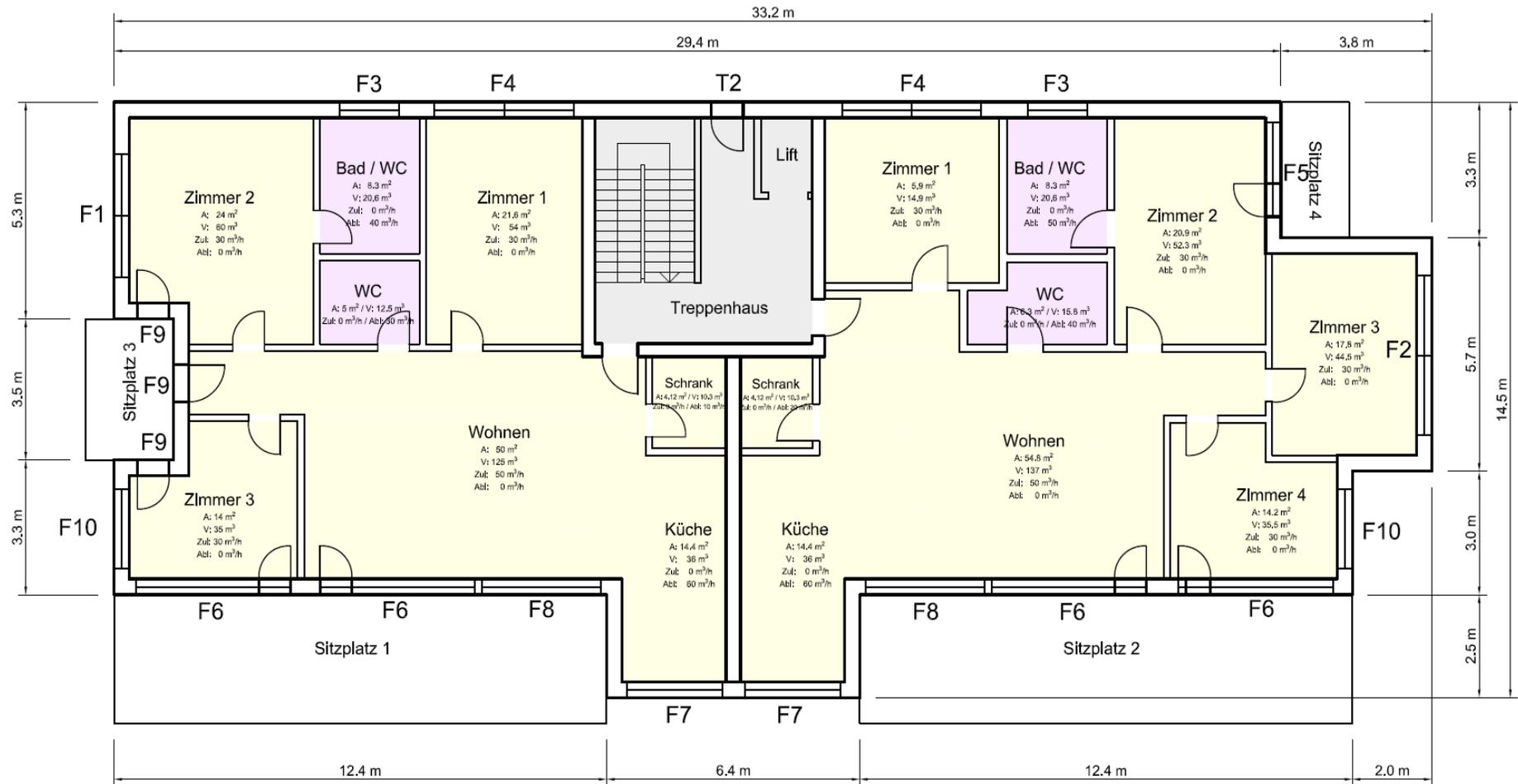


Abbildung 80: Grundriss von den bewohnten Stockwerken des Referenzgebäudes.



Bilder aus IDA ICE vom modellierten Gebäude

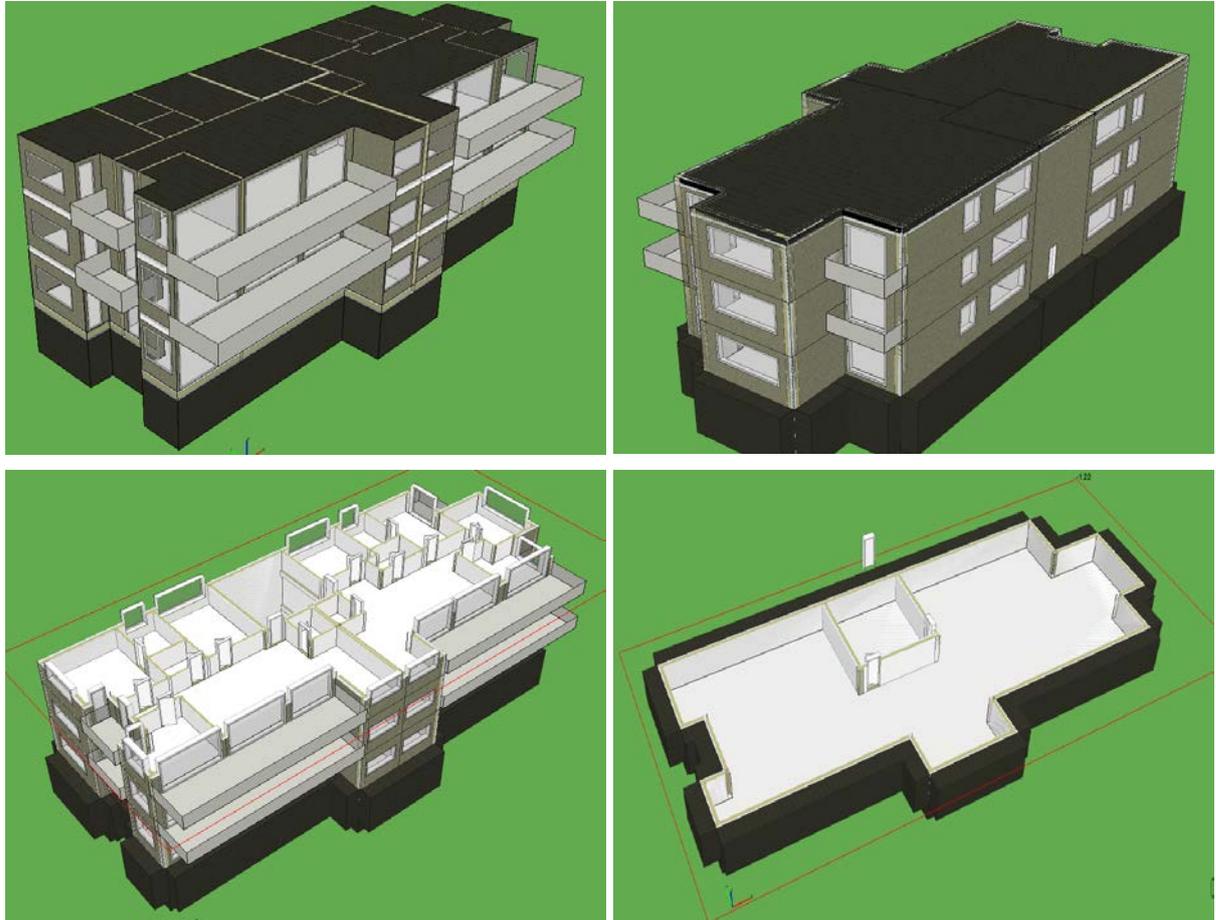


Abbildung 81 Modellansichten im IDA ICE: Süd- und Westfassade (oben links), Nord- und Ostfassade (oben rechts), Schnitt durch 2. OG mit Raumeinteilung (unten links) sowie Schnitt durch Kellergeschoss (unten rechts)

Aufbau der Gebäudehülle

Tabelle 18 und Tabelle 19 fassen die wichtigsten Bauteileigenschaften zusammen, die den Energiebedarf des Gebäudes beeinflussen. Die Bauelemente der Gebäudehülle sind so definiert, dass sie dem allgemeinen Baustandard in der Schweiz entsprechen. In Tabelle 20 bis Tabelle 26 ist der Schichtenaufbau mit den entsprechenden Materialeigenschaften detailliert aufgelistet.



Tabelle 18 Zusammenfassung der Gebäudehüllenbauteile

Bauteil	U-Wert [W/m²K]	Dicke Aufbau [m]
Aussenwand gegen Aussenluft	0.18	0.385
Aussenwand gegen Erdreich	0.37	0.374
Innenwand gegen unbeheizt	0.33	0.325
Boden gegen unbeheizt	0.20	0.470
Boden gegen Erdreich	0.27	0.430
Dach	0.18	0.412
Zwischendecke	0.64	0.350

Tabelle 19 Fenster des Referenzgebäudes

Bezeichnung	g	U_g	A_F	Rahmen- anteil	U-Wert Rahmen	U_F
	-	W/m ² K	m ²	-	W/m ² K	W/m ² K
F1	0.45	0.7	3.6	0.16	1.3	0.93
F2	0.45	0.7	3.1	0.17	1.3	0.88
F3	0.45	0.7	2.4	0.20	1.3	1.00
F4	0.45	0.7	5.6	0.12	1.3	0.89
F5	0.45	0.7	5.3	0.14	1.3	0.90
F6	0.45	0.7	9	0.10	1.3	0.85
F7	0.45	0.7	2.4	0.15	1.3	0.90
F8	0.45	0.7	6.9	0.12	1.3	0.95
F9	0.45	0.7	2.1	0.18	1.3	0.89

Tabelle 20 Aufbau Aussenwand gegen Aussenluft mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Innenputz	0.01	1400	0.7	0.25	0.014
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
Lambda White 031	0.016	16	0.031	0.39	5.161
Aussenputz	0.015	1800	0.87	0.306	0.017
U-Wert	0.18 W/m²K				



Tabelle 21 Aufbau Aussenwand gegen Erdreich mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Innenputz	0.01	1400	0.7	0.25	0.014
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
XPS 300	0.08	30	0.035	0.389	2.286
U-Wert	0.37 W/m²K				

Tabelle 22 Aufbau Innenwand gegen unbeheizt mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Innenputz	0.01	1400	0.7	0.25	0.014
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
EPS 15	0.01	15	0.038	0.39	2.632
Aussenputz	0.015	1800	0.87	0.306	0.017
U-Wert	0.33 W/m²K				

Tabelle 23 Aufbau Boden gegen unbeheizt mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Zementstrich	0.07	2000	1.4	0.236	0.05
PE-Abdeckfolie	0.02	920	0.22	-	0.001
EPS 30	0.02	30	0.033	0.39	0.606
EPS-T	0.02	13.5	0.039	0.39	0.0513
PE-Abdeckfolie	0.02	920	0.22	-	0.001
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
Lambda Fassade 030	0.01	18	0.03	0.39	3.333
Innenputz	0.01	1400	0.7	0.25	0.014
U-Wert	0.20 W/m²K				



Tabelle 24 Aufbau Boden gegen Erdreich mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Zementstrich	0.07	2000	1.4	0.236	0.05
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
XPS 500	0.12	34	0.035	0.389	3.429
U-Wert	0.27 W/m²K				

Tabelle 25 Aufbau Dach mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Stahlbeton (CEN)	0.25	2400	1.8	0.306	0.139
BIKUPLAN LL	0.0038	1236	0.17	0.5	0.022
PUR	0.1	30	0.02	0.39	5.0
BIKUPLAN LL	0.0038	1236	0.17	0.5	0.022
BIKUTOP LL	0.0042	1095	0.17	0.5	0.025
Rundkies	0.05	2000	2.0	0.292	0.025
U-Wert	0.18 W/m²K				

Tabelle 26 Aufbau Zwischendecke mit Schichtdicken und Materialeigenschaften

Material	Dicke	Dichte	Lambda	Cp	R-Wert
	m	kg/m ³	W/mK	Wh/kgK	m ² K/W
Zementstrich	0.07	2000	1.4	0.236	0.05
PE-Abdeckfolie	0.02	920	0.22	-	0.001
EPS 30	0.02	30	0.033	0.39	0.606
EPS-T	0.02	13.5	0.039	0.39	0.0513
PE-Abdeckfolie	0.02	920	0.22	-	0.001
Stahlbeton (CEN)	0.2	2400	1.8	0.306	0.111
U-Wert	0.64 W/m²K				



Mechanische Lüftung

Die Luftmengen wurden auf Basis des Merkblattes SIA 2023 [42] definiert, welche auch den Minergie-Standards entspricht. Zusätzlich wurde in der Simulationsanalyse mit IDA ICE neben der mechanischen Lüftung ein Infiltrationsvolumenstrom von $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ gemäss Merkblatt SIA 2024 [41] berücksichtigt. In der Tabelle 27 und Tabelle 28 sind die Zuluft- und Abluftvolumenströme pro Zone aufgeführt.

Tabelle 27 Zuluft- und Abluftmenge Wohnung West

Raum	Abluft [m^3/h]	Zuluft [m^3/h]
Zimmer 1	0	30
Bad/WC	40	0
WC	30	0
Zimmer 2	0	30
Zimmer 3	0	30
Wohnung	0	50
Küche	60	0
Schrank	10	0
Total:	140	140

Tabelle 28 Zuluft- und Abluftmenge Wohnung Ost

Raum	Abluft [m^3/h]	Zuluft [m^3/h]
Zimmer 1	0	30
Bad/WC	50	0
Zimmer 2	0	30
Zimmer 3	0	30
WC	40	0
Wohnung	0	50
Schrank	20	0
Küche	60	0
Zimmer 4	0	30
Total:	170	170

Einstellungen der Wärmebrücken

Die gewählten Wärmebrücken für das Referenzgebäude sind in Abbildung 82 aufgeführt. Die beiden Wärmebrückentypen 2.2-U1 und 2.2-U2 aus dem Wärmebrücken katalog [43] wurden auf Grund fehlender Einstellmöglichkeiten in IDA ICE, gemäss Tabelle 29 als pauschale Verluste für die Wohnungen im Erdgeschoss berücksichtigt.

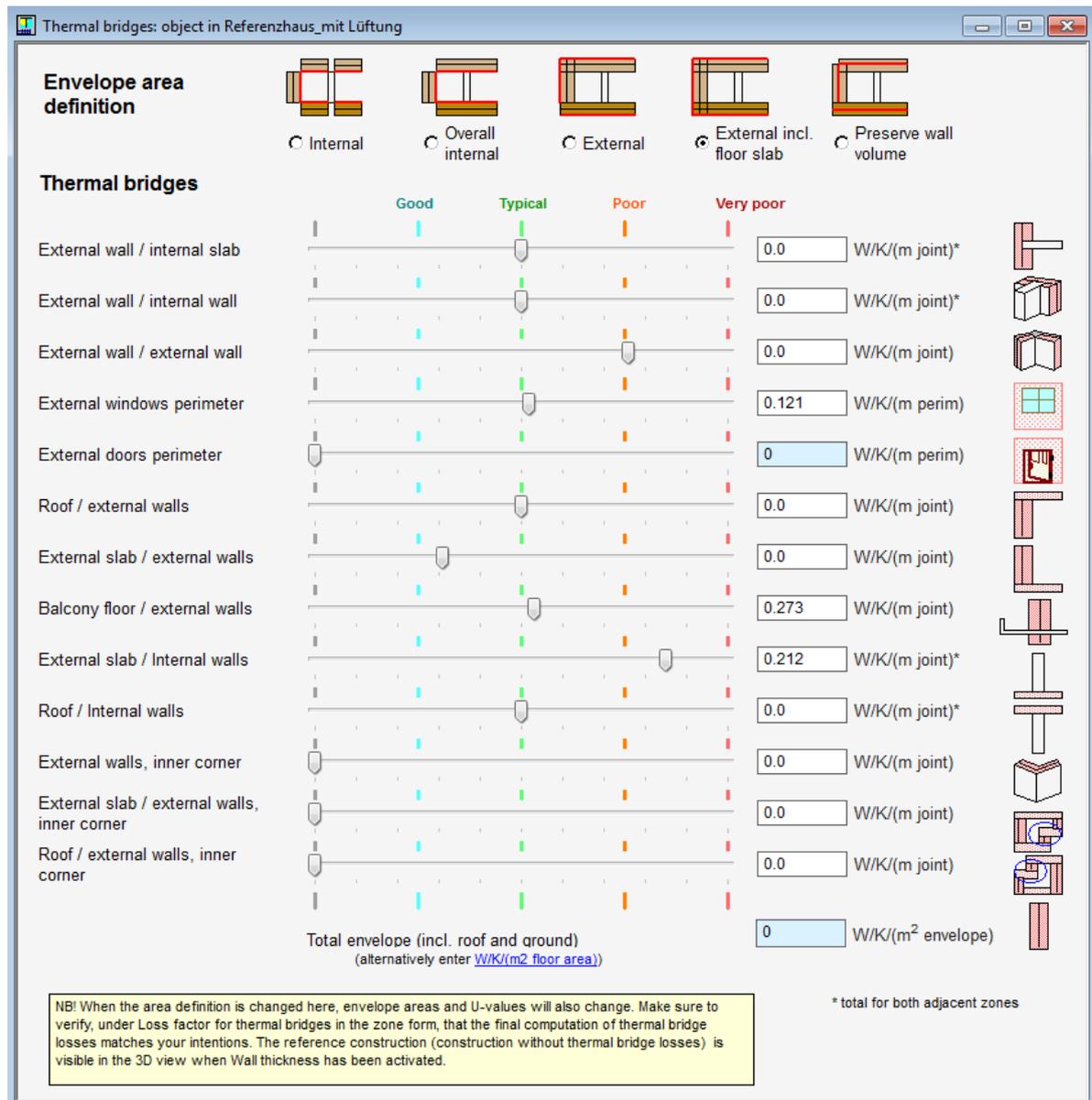


Abbildung 82: Ausschnitt aus IDA ICE mit den gewählten Wärmebrücken.

Tabelle 29 Zusätzliche Wärmebrücke zwischen Unter- und Erdgeschoss

Raum	Wohnung Ost [W/K]	Wohnung West [W/K]
Zusatzverlust	5.17	7.45



Anhang C: Multilineare Regressionsanalyse

Nachfolgend werden weitere Plausibilitätstests und Resultate zur multilinenen Regressionsanalyse aufgeführt. Die Abbildung 83 und Abbildung 85 zeigen weitere Resultate/Tests für das finale Regressionsmodell mit den Einflussvariablen „Heizgrenze“, „Wärmebedarf“, „Unterschreitung des Grenzwertes“ und „Differenz Heizleistung“. In der Tabelle 30 sind die Resultate des Breusch-Pagan und Könker Test zusammengefasst (Heteroskedasticity) [33], [37].

Tabelle 30: Test der Homoskedastizität des finalen Regressionsmodells

	LM	Sig
Preusch-Pagan	6.885	0.142
Könker	7.048	0.133

Die Tabelle 31 und die Abbildung 86 fassen die Resultate für die multilineare Regressionsanalyse ohne Objekte mit kombinierter BWW-Messung zusammen.

In der Tabelle 32 sind die Resultate zum Regressionsmodell mit dem absoluten Energy Performance Gap (in MJ/m²) als abhängige Variable zusammengefasst.

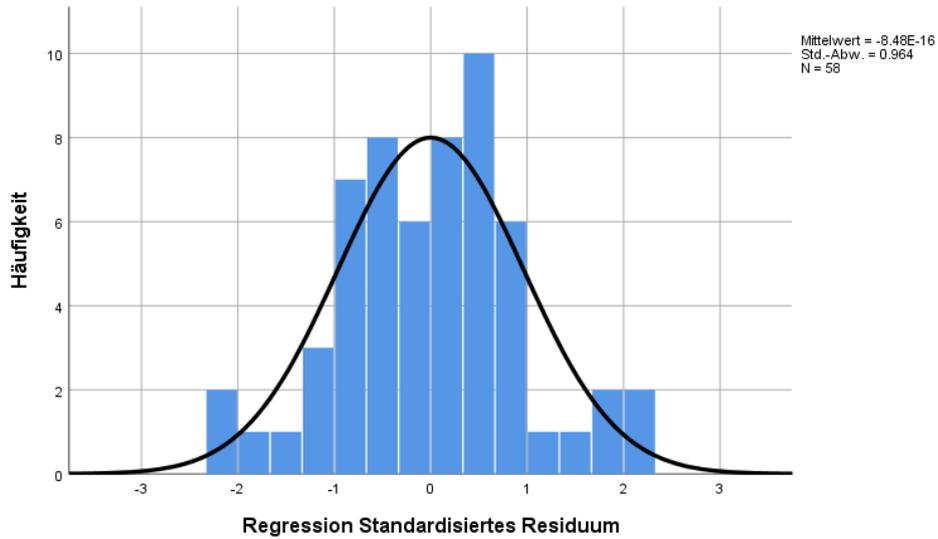


Abbildung 83: Histogramm der standardisierten Residuen für die abhängige Variable „Energy Performance Gap“

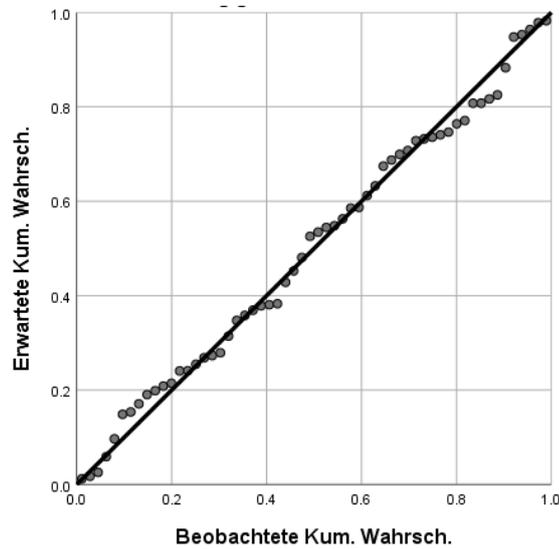


Abbildung 84: P-P-Diagramm vom standardisierten Residuum der abhängigen Variable „Energy Performance Gap“

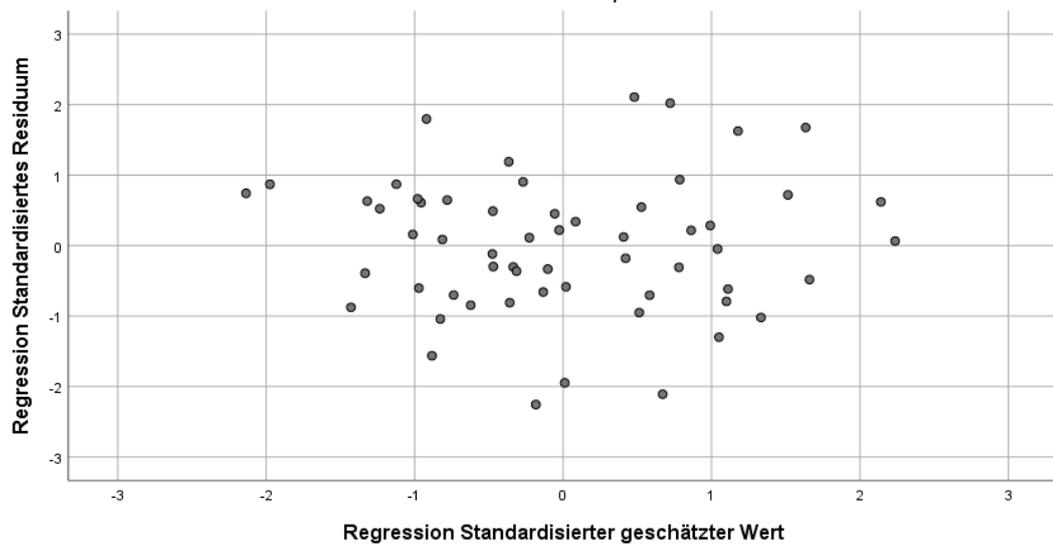


Abbildung 85: Streudiagramm der standardisierten Residuen versus geschätzte Werte des Energy Performance Gap



Tabelle 31: Resultate der multilinenen Regressionsanalyse nur für Objekte mit separater BWW-Messung, alle Variablen mit einem p-Wert von grösser 0.05 wurden entfernt (B=Regressionskoeffizient, β =Standardisierte Koeffizienten, T=Regressionskoeffizienten, Sig.=Signifikanz oder p-Wert).

Variable	B	Std.-Fehler	β	T	Sig.	Sig. Robust
Konstante (Intercept)	-0.938	0.348		-2.691	0.011	0.010
Wärmebedarf	-0.006	0.001	-0.460	-6.748	0.000	0.000
Heizgrenze	0.129	0.017	0.546	7.682	0.000	0.000
Differenz Heizleistung	-0.789	0.150	-0.369	-5.275	0.000	0.000
R = 0.921						
R ² = 0.848						
Korrigiertes R ² = 0.834						
Standard Abweichung = 0.135						
N = 38						
Breusch-Pagan	LM = 1.209	Sig = 0.751				
Könker	LM = 1.424	Sig = 0.700				

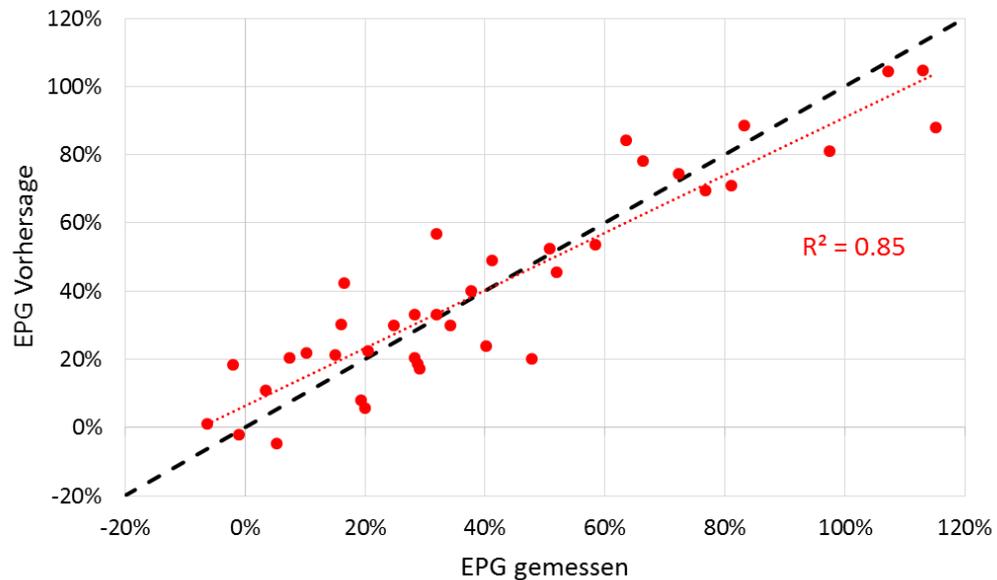


Abbildung 86: Vergleich von gemessenem und dem vorhergesagtem Energy Performance Gap auf Grund des multilinenen Regressionsmodells mit ausschliesslich Messdaten von Objekten mit separater BWW-Messung (reduzierte Variablenmenge).



Tabelle 32: Resultate der multilineareren Regressionsanalyse für alle Objekte. Als abhängige Variable wurde der **absolute** Energy Performance Gap gewählt. Variablen mit einem p-Wert von grösser 0.05 wurden entfernt (B=Regressionskoeffizient, β =Standardisierte Koeffizienten, T=Regressionskoeffizienten, Sig.=Signifikanz oder p-Wert).

Variable	B	Std.-Fehler	β	T	Sig.	Sig. Robust
Konstante (Intercept)	-146.4	39.231		-3.734	0.000	0.005
Wärmebedarf	-0.387	0.099	-0.279	-3.916	0.000	0.000
Heizgrenze	14.51	2.089	0.507	6.948	0.000	0.000
Differenz Heizleistung	-95.67	16.392	-0.418	-5.838	0.000	0.000
Unterschreitung Grenzwert	57.58	22.402	0.187	2.570	0.013	0.025
R = 0.862						
R ² = 0.743						
Korrigiertes R ² = 0.724						
Standard Abweichung = 18.57						
N = 58						



Anhang D: Ergänzende Resultate

Ergänzung zum Kapitel 4.1

In Abbildung 87 ist für die Messperioden 2012, 2013 und 2014 der relative monatliche Heizwärmeverbrauch, sowie der absolute spezifische Heizwärmeverbrauch über ein Jahr dargestellt. Zusätzlich werden die monatlichen Heizgradtage (HGT12/20) der entsprechenden Messperiode und der Energy Performance Gap für die entsprechende Messperiode pro Gebäude ausgewiesen.

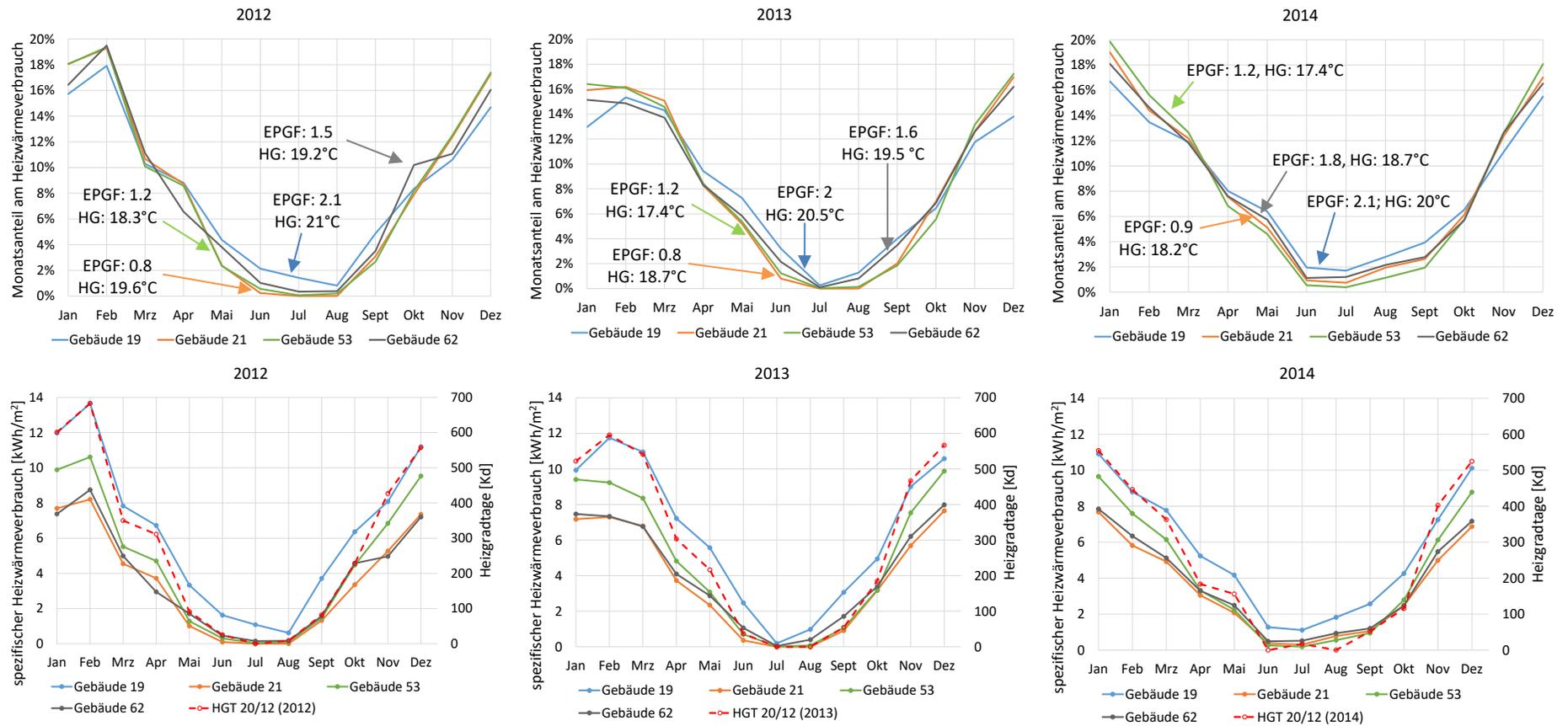


Abbildung 87: Relativer Jahresverlauf des Heizwärmeverbrauchs und absoluter spezifischer Heizwärmeverbrauch über ein Jahr für drei Messperioden (ohne Witterungskorrektur). Zusätzlich wird der witterungsbereinigte Energy-Performance-Gap-Faktor (EPGF) und die Heizgrenze (HG) für das entsprechende Jahr dargestellt.



Die Auswertung der Diagramme in der Abbildung 87 wird nachfolgend zusammengefasst:

- Das Gebäude 19 mit einem EPG-Faktor von 1.15 zeigt über alle Monate hinweg einen erhöhten absoluten Wärmebedarf gegenüber den anderen Objekten, obwohl der berechnete Heizwärmebedarf geringer ist als beispielsweise für das Gebäude 21. Betrachtet man den relativen Vergleich über die Monate, dann wird klar, dass vor allem die Übergangszeit und der Sommer zum überhöhten Wärmeverbrauch führen. Dies kann auf die sehr hohe Heizgrenze von 20.1 °C zurückgeführt werden, die zur Folge hat, dass dieses Gebäude praktisch das ganze Jahr über beheizt wird.
- Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der relative sowie der absolute monatliche Heizwärmeverbrauch dem Verlauf der Heizgradtage für alle drei Jahre entsprechen. Eine Ausnahme bildet das Gebäude 62 im Jahr 2012 mit den Monaten April und November, hier besteht keine Korrelation mit den Heizgradtagen.
- Obwohl die Heizgradtage in allen drei Jahren in den Monaten Juni, Juli und August sehr gering sind und eine kleine Variation zwischen den Jahren aufweisen, sind in diesen Monaten die absoluten Heizwärmeverbräuche der Gebäude von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. In allen drei Jahren betragen zum Beispiel die Heizgradtage im August null, jedoch weisen in gewissen Jahren dennoch einige Gebäude einen Wärmeverbrauch auf.
- Obwohl das Gebäude 53 eine tiefere Heizgrenze aufweist, und somit der Heizwärmeverbrauch in den Sommermonaten tiefer ist als für das Gebäude 21, weist das Gebäude 53 die grössere Abweichung zwischen Messung und Berechnung auf.
- Vergleicht man die Heizgrenze pro Objekte für die unterschiedlichen Jahre, dann wird ersichtlich, dass ein Unterschied von bis zu einem Kelvin möglich ist. Man kann davon ausgehen, dass diese Differenz durch die Messunsicherheit der Energiezähler und der Messung der Aussenlufttemperatur entsteht. Es ist eher unwahrscheinlich, dass die Heizgrenze vor Ort am Heizungsregler verändert wurde.