



Schlussbericht vom 31. August 2023

KliKo

Analyse und Verbesserung der aktuell verwendeten Methoden zur Klimakorrektur von Gebäudeenergiedaten



Quelle: Adobe Stock



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

Datum: 31. August 2023

Ort: Rapperswil

Auftraggeberin:

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

Konferenz Kantonaler Energiedirektoren
Generalsekretariat
Haus der Kantone
Speichergasse 6, 3011 Bern
www.endk.ch

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Direktion
Lindenhofstrasse 21, 8021 Zürich
www.stadt-zuerich.ch/hochbau

Auftragnehmer:

SPF Institut für Solartechnik
OST - Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Hochschule Luzern – Technik und Architektur
Institut für Gebäude und Energie
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw

Autoren:

Igor Bosshard, SPF Institut für Solartechnik, OST, igor.bosshard@ost.ch
Jeremias Schmidli, SPF Institut für Solartechnik, OST, jeremias.schmidli@ost.ch
Olaf Tietje, Kompetenzzentrum für Mathematik und Naturwissenschaften, OST, olaf.tietje@ost.ch
Artem Sotnikov, IGE Institut für Gebäude und Energie, HSLU, artem.sotnikov@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Nadège Vetterlin, nadege.vetterlin@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502022-01

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



Zusammenfassung

Der Verbrauch von Wärme und Kälte in Gebäuden hängt von der Witterung ab, die von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterliegt. Um den Energieverbrauch für die Schweiz, aber auch für einzelne Gebäude untersuchen und vergleichen zu können, müssen die Energieverbrauchsmessungen um den Witterungseinfluss bereinigt werden. Verschiedene Studien haben zum Teil grosse Abweichungen bei den heute gängigen Methoden zur Witterungsbereinigung festgestellt, weshalb diese in der vorliegenden Studie untersucht und neue Methoden entwickelt und getestet wurden. Trotz grossem Aufwand mit dynamischen Gebäudesimulationen konnte keine neue Methode zur Korrektur von Energiemessdaten für Mehrfamilienhäuser entwickelt werden, die in der Praxis mit vertretbarem Aufwand angewendet werden kann und bessere Resultate liefert als die in der SIA 380:2022 beschriebene ATD-Methode mit einer Basistemperatur von 17 °C. Im Projekt wurde auch festgestellt, dass für die Validierung der theoretisch erarbeiteten Methoden eine grosse Anzahl von Messdaten zur Verfügung stehen muss. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Arbeiten zur Korrektur der Klimakälteverbräuche von Verwaltungsgebäuden durchgeführt, da die notwendigen Messdaten dem Projektteam nicht zur Verfügung standen.

Eine gewisse Unsicherheit bei der Klimakorrektur muss wohl in Kauf genommen werden. Dies sollte in Zukunft bei seriösen Analysen berücksichtigt werden und in eine Fehlerrechnung einfließen.

Résumé

La consommation de chauffage et de refroidissement des bâtiments dépend des conditions météorologiques, qui sont soumises à de fortes fluctuations d'une année à l'autre. Pour pouvoir examiner et comparer la consommation d'énergie à l'échelle de la Suisse, mais aussi de chaque bâtiment, les mesures de la consommation d'énergie doivent être corrigées de l'influence des conditions météorologiques. Diverses études ont mis en évidence des écarts importants dans les méthodes actuelles d'ajustement aux conditions météorologiques. C'est pourquoi la présente étude s'est intéressée à ces méthodes et en a développé de nouvelles qu'elle a testées. Malgré de nombreux efforts dans le cadre de simulations dynamiques de bâtiments, il n'a pas été possible de développer une nouvelle méthode de correction des données de mesure de l'énergie pour les logements collectifs qui puisse être appliquée dans la pratique avec un effort raisonnable et qui donne de meilleurs résultats que la méthode ATD décrite dans la norme SIA 380:2022 avec une température de base de 17 °C. Le projet a également montré qu'il fallait disposer d'un grand nombre de données de mesure pour valider les méthodes théoriques développées. C'est pourquoi aucun travail supplémentaire n'a été effectué pour corriger la consommation de refroidissement de la climatisation des bâtiments administratifs, car l'équipe du projet ne disposait pas des données de mesure nécessaires.

Une certaine incertitude dans la correction climatique doit probablement être acceptée. À l'avenir, il conviendra d'en tenir compte dans les analyses sérieuses et de l'inclure dans un calcul d'erreur.



Summary

The consumption of heating and cooling in buildings depends on the weather, which is subject to strong fluctuations from year to year. In order to be able to examine and compare energy consumption for Switzerland, but also for individual buildings, the energy consumption measurements must be adjusted for the influence of the weather. Various studies have found large deviations in the current methods for weather adjustment, which is why these were investigated in the present study and new methods were developed and tested. Despite a great deal of effort with dynamic building simulations, it was not possible to develop a new method for correcting energy measurement data for multi-family dwellings that can be applied in practice with reasonable effort and provides better results than the ATD method described in SIA 380:2022 with a base temperature of 17 °C. It was also determined in the project that a large amount of measurement data must be available for the validation of the theoretically developed methods. For this reason, no further work was carried out to correct the air-conditioning cooling consumption of administrative buildings, as the necessary measurement data was not available to the project team.

A certain uncertainty in the climate correction must probably be accepted. In future, this should be taken into account in serious analyses and included in an error calculation.



Take-home messages

- Die Untersuchungen zeigen, dass die heute gültige Norm SIA 380:2022 für die Witterungsbereinigung von Energiemessdaten weiterhin empfohlen werden kann, wobei insbesondere die Anpassung der Basistemperatur von 12 °C auf 17 °C gegenüber der Vorgängerversion entscheidend ist.
- Überraschend gute Ergebnisse bei der Witterungsbereinigung werden durch die Mittelwertbildung aus drei Messjahren erzielt, sofern keine Extremjahre berücksichtigt werden, da sonst der Fehler sehr gross werden kann. Diese Methode sollte nur für grobe Abschätzungen und mit entsprechender Vorsicht angewendet werden.
- Die Korrektur des Klimakältebedarfs von Verwaltungsgebäuden konnte in diesem Projekt nicht untersucht werden, da nicht genügend Messdaten zur Verfügung standen. Die Untersuchungen zum Heizwärmebedarf von Mehrfamilienhäusern haben gezeigt, dass rein theoretische Berechnungen nicht ausreichen, sondern umfangreiche Messreihen (große Anzahl von Gebäuden und mehrere Betriebsjahre) für die Methoden Entwicklung und Prüfung erforderlich sind.
- Eine gewisse Unsicherheit bei der Klimakorrektur ist aus heutiger Sicht unvermeidbar und sollte bei seriösen Studien in der Fehlerrechnung berücksichtigt werden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage	8
1.2 Motivation und Hintergrund.....	8
1.3 Voruntersuchungen.....	10
2 Vorgehen und Methode	11
2.1 Generelles Vorgehen.....	11
2.2 Bisherige Korrekturverfahren.....	12
2.2.1 HGT-Berechnung.....	12
2.2.2 ATD-Berechnung	13
2.2.3 Vergleich verschiedener Klimakorrekturen.....	13
2.3 Referenz Gebäude.....	14
2.4 Simulationen	14
2.4.1 Parameterstudie.....	15
2.4.2 Simulation für die Jahre 1981-2019.....	18
2.5 Datenauswertung	19
2.5.1 Auswertungsparameter.....	19
2.5.2 Filtern der Simulationsdaten	19
2.5.3 Auswertung der Parameterstudie mittels schrittweiser Regression	19
2.5.4 Wechselwirkungen	21
2.5.5 Jahresauswertung der 39-Jahre Simulation.....	21
2.5.6 Tageswertanalysen	21
2.5.7 Auswertung auf Monatsbasis.....	22
2.6 Validierung mit Messdaten	22
3 Resultate und Diskussion	23
3.1 Auswertung der Parametervariation mittels linearer schrittweiser Regression	23
3.2 Auswertung der Parametervariation mittels schrittweise Regression unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen	24
3.3 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Tagesbasis.....	27
3.4 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Monatsbasis.....	28
3.5 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Jahresbasis.....	32
4 Schlussfolgerungen	36
5 Empfehlungen	37
6 Bibliographie	38



Abkürzungsverzeichnis

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



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Verbrauch von Wärme und Kälte in Gebäuden hängt von der Witterung ab, die von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterliegt. Um den Energieverbrauch für die Schweiz, aber auch für einzelne Gebäude untersuchen und vergleichen zu können, müssen die Energieverbrauchsmessungen um den Witterungseinfluss bereinigt werden. Eine solche Witterungsbereinigung bzw. Klimakorrektur ist insbesondere dann notwendig, wenn Messdaten zum Energieverbrauch eines Gebäudes vorliegen und dieses auf seine Effizienz hin untersucht werden soll. Zum Beispiel, wenn der gemessene Heizwärmeverbrauch gemäss Energienachweis (z.B.: SIA 380/1) mit anderen Jahren verglichen werden soll. Eine Klimabereinigung ist Voraussetzung für die Berechnung des Energy Performance Gap [1]. Bei Betriebsoptimierungen oder bei der Analyse von Pilot- und Demonstrationsprojekten können die erzielten Verbesserungen ohne Klimakorrektur kaum quantifiziert werden. Das BFE (EnergieSchweiz) hat sich zum Ziel gesetzt, in Zukunft die Energieverbrauchswerte möglichst aller Gebäude zu erfassen [2]. Minergie bietet dazu bereits entsprechende Module und eine Auswertung der Daten an (Monitoring+). Vor diesem Hintergrund gewinnt die Witterungsbereinigung der Messdaten an Bedeutung.

In der Schweiz wird seit Jahrzehnten die Heizgradtag-Methode (HGT) für die Witterungsbereinigung von Energiemessdaten verwendet. Diese wurde in der Norm SIA 381/3:1982 [3] beschrieben und seither nicht mehr angepasst. Mit der Einführung der neuen Norm SIA 380:2015 [4] wurde die Methode der akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) auch in der Schweiz als Standard festgelegt. Diese gilt schon in vielen Ländern als Standard und wurde auf Grund der europäischen Norm EN 15927-6:2007 [5] auch in der Schweiz eingeführt.

1.2 Motivation und Hintergrund

Im BFE Projekt ImmoGap [1] wurde festgestellt, dass die heute verwendeten Methoden der Klimakorrektur die Auswertung des sogenannten *Energy Performance Gap* erschweren und zu ungenauen Analysen führt. Die korrigierten Energiedaten eines Gebäudes können je nach Wahl der Klimakorrekturmethode bis zu 23% tiefer oder höher ausfallen. In der Praxis fehlen einfach zugängliche Informationen, welche aufzeigen, worauf bei einer Klimakorrektur zu achten ist und welchen Einfluss diese auf die Ergebnisse haben. So wird deutlich, dass Verbesserungen durch neue Komponenten oder neue Konzepte im Gebäudebereich nicht fair verglichen werden können, da die Unsicherheit der Klimakorrektur grösser sein kann als die eigentliche Effizienzsteigerung. Modelle wie das Energiespar-Contracting, welche von EnergieSchweiz vorangetrieben werden, sind mit einer grossen Unsicherheit behaftet. Dieser wird heute noch viel zu wenig Rechnung getragen, da in der Praxis Informationen dazu fehlen.

Die zurzeit verwendeten Klimakorrekturverfahren sind ein Ergebnis von mehr oder weniger detaillierten Gebäudeberechnung (bottom-up Ansatz). Diese basieren vorwiegend auf Standardberechnungen nach SIA 380/1. In einer Studie von Prognos [3] wurden erstmals auch reale Messdaten von Gebäuden verwendet um Klimakorrekturfaktoren zu überprüfen und neue zu ermitteln, welche zu besseren Ergebnissen führen. Dabei wurden tägliche Einspeisemengen ins Fernwärme- und Gasnetz der Energie Wasser Bern (ewb) und die Gasnetz-Einspeisung der Energie Wasser Luzern (ewl) verwendet. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind:



- GT&S Verfahren [3] bildet den realen Gas- und Wärmeverbrauch (Fernwärme) besser ab als das HGT-Verfahren.
- Werden monatliche Bereinigungs-faktoren betrachtet, schneidet eine parameterbasierte Methode am besten ab. Die parameterbasierte Methode stützt auf einer Regressionsanalyse der gemessenen Gaseinspeisung in das Netz.
- Es zeigen sich Hinweise, dass der Verbrauch in den Wintermonaten tendenziell über- und in den Sommermonaten unterschätzt wird.

Die Studie kommt zum Schluss, dass mit den vorgeschlagenen neuen Methoden (GT&S, parameterbasierte) die Klimakorrektur auf den gesamten Gebäudepark der Schweiz angewendet werden kann und zu besseren Resultaten führt als mit der HGT-Methode. Aus Sicht der Autoren dieses Berichts sind jedoch einige Punkte zu beachten:

- Die Studie verwendet hauptsächlich Gasverbrauchsdaten, was dazu führt, dass vor allem ältere Gebäude in die Auswertung einfließen. Gut gedämmte Gebäude werden heute kaum noch mit Gas beheizt.
- Eine Methode, die für den gesamten Schweizer Gebäudepark gute Ergebnisse liefert, muss nicht automatisch für Einzelgebäude gut sein.

Die Untersuchung von 65 Mehrfamilienhäuser (MFH) hat gezeigt, dass die Verteilung des Heizwärmebedarfs über die Monate eine grosse Differenz zwischen realen Messdaten und den Standardberechnungen (SIA 380/1) aufweist [1]. Dies wird deutlich in Abbildung 1 in welcher der spezifische Heizwärmeverbrauch (links) und der monatliche Anteil am Heizwärmeverbrauch (rechts) in Abhängigkeit der Aussentemperatur (Monatsmittel) dargestellt ist. Der Heizwärmebedarf im Frühling und Herbst ist deutlich höher als dies aus den Normberechnungen resultiert. Zu einem ähnlichen Schluss kommt das AWEL ZH in einer eigenen Untersuchung [4]. Der Hauptgrund dafür ist vermutlich das Nutzerverhalten (Fensteröffnung, Storennutzung) welches zu einem erhöhten Wärmebedarf in der Übergangszeit führt [1,5].

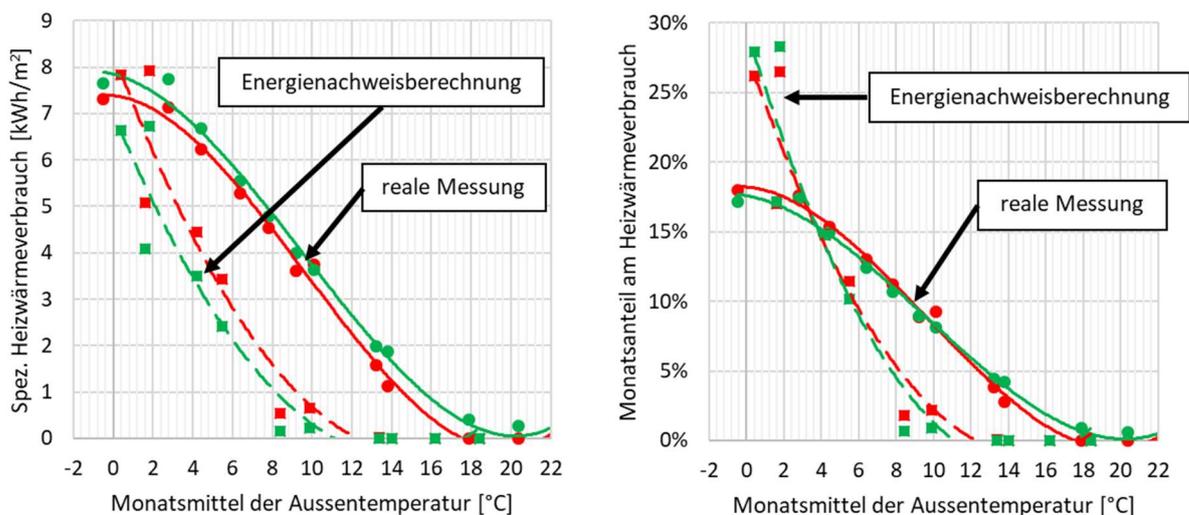


Abbildung 1: Vergleich von real gemessenen und nach Norm berechneten Energiedaten von zwei repräsentativen Gebäuden (rot und grün) Links: Spezifischer Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Rechts: Monatlicher Anteil am Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der Aussentemperatur.



Durch die verbesserte Dämmung der Gebäude reduziert sich die Abhängigkeit des Wärmebedarfs von der Aussentemperatur. Aus diesem und den oben beschriebenen Feststellungen wurde das SPF und das IGE beauftragt, dem Thema der Klimakorrektur vertieft nachzugehen.

1.3 Voruntersuchungen

Im Vorfeld zur hier vorliegenden Studie wurde durch das SPF eine Literaturstudie [6] im Auftrag des BFE durchgeführt. Der Fokus lag auf heute etablierten und noch relativ neuen Methoden zur Witterungsberichtigung des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Ziel der Studie war es, auf nationaler aber auch internationaler Ebene die Aktivitäten zum Thema abzuklären und herauszufinden, ob neue Methoden vorhanden sind, welche die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Erkenntnisse mitberücksichtigen. Die Literaturstudie kann folgendermassen zusammengefasst werden:

- Grundsätzlich verwenden fast alle Länder dieselben beiden Methoden zur Klimakorrektur (ATD und HGT), diese sind im Detail in der vorangehenden Literaturstudie [9] beschrieben. Beide Methoden basieren darauf, dass der Heizwärme- und Kühlbedarf vorwiegend von der Aussentemperatur abhängig ist. Die variablen thermischen Eigenschaften eines Gebäudes werden in beiden Methoden auf einen einzigen Wert reduziert, auf die sogenannte Basistemperatur.
- Diese Vereinfachung wird mehrfach hinterfragt und kritisch beurteilt, jedoch hat sich die Problematik erst mit der immer besser werdenden Gebäudehülle verschärft. Die Grundlagen zur Klimakorrektur sind mehr als 80 Jahre alt und basieren auf Annahmen, die heute für Neubauten nicht mehr aktuell sind:
 - Geringe solare Gewinne (kleiner Fensteranteil)
 - Undichte Gebäudehülle
 - Tiefe Raumtemperaturen
 - Hohe Verluste über Gebäudehülle
 - Fensterlüftung
 - Heizungssysteme vorwiegend Öl- und Gasheizungen
- Die Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von der Aussentemperatur sinkt bei modernen Gebäuden demzufolge. In der Literaturstudie wurden unterschiedliche Ansätze gesichtet, welche diesem Umstand gerecht werden. Einige davon bauen auf einfachen Berechnungen auf, andere wiederum auf komplexen Neuberechnungen oder statistischen Auswertungen.
- Keiner der beschriebenen Ansätze kann für die Schweiz direkt für Normen oder Anwendungen in der Praxis übernommen werden. Jedoch können sie als Ideen oder Grundlagen für die Verbesserung und Erweiterung der heutigen Ansätze dienen.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Generelles Vorgehen

Das Projekt setzt den Schwerpunkt auf Mehrfamilienhäuser ohne Kühlbedarf. Es wird der Ansatz verfolgt, bestehende Methoden möglichst beizubehalten und nur leicht abzuändern. Neue Methoden sollen nur entwickelt und vorgeschlagen werden, falls mit den bestehenden Methoden keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Dabei wird versucht, wie in der Abbildung 2 dargestellt, die Methoden so zu strukturieren, dass diese den unterschiedlichen Anforderungen in der Praxis dienlich sind.

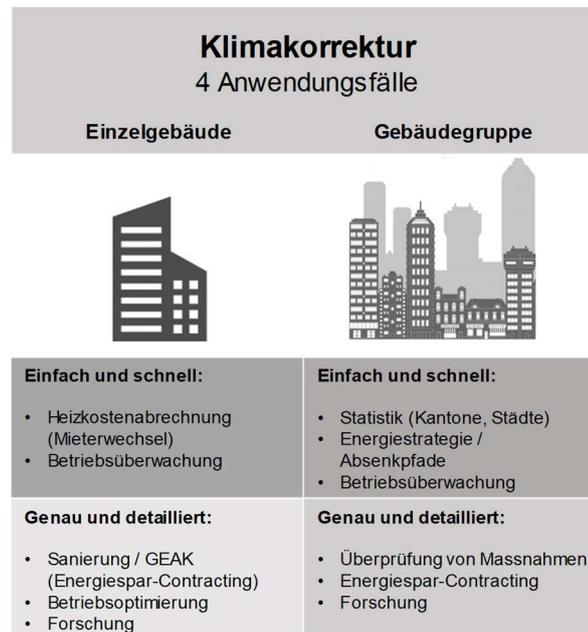


Abbildung 2: Aufteilung der unterschiedlichen Anwendungsfelder für die Klimakorrekturmethode mit den entsprechenden Anforderungen.

Zuerst wird ermittelt, wo die Schwächen der aktuellen Klimakorrekturverfahren liegen, welche Gebäudeeigenschaften am stärksten betroffen sind, und welche Klimaparameter den grössten Einfluss haben. Dies wird anhand dynamischer Jahressimulationen mit detaillierten Gebäudemodellen ermittelt. Der Vorteil von Simulationen ist, dass man bewusst Parameter ausklammern oder integrieren und so diese isoliert untersuchen kann, was mit realen Messungen kaum möglich ist. Im Projekt wird ein Referenz-Mehrfamilienhaus mit unterschiedlichen Klimata von Zürich (Station SMA) simuliert. Dabei werden in einer Parameterstudie verschiedene Werte variiert, um ihren Effekt auf unterschiedliche Klimakorrekturmethoden zu ermitteln.

Durch die Simulationen entsteht ein grosser Datensatz, welcher für die Optimierung und Neuentwicklung der Klimakorrekturverfahren verwendet wird. Die Daten werden als Stunden-, Monats- und Jahresmittelwerte ausgegeben, um auch den Einfluss der Datenauflösung zu berücksichtigen.

Anschliessend werden, wenn möglich, die bestehenden Verfahren so weit optimiert, dass diese den aktuellen Anforderungen an eine Klimakorrektur gerecht werden (entsprechend den Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungsfälle). Falls eine Optimierung nicht ausreicht, soll aufgrund der schon durchgeführten Literaturstudie [6] ein Vorschlag für eine neue Korrekturmethode ausgearbeitet werden. In erster Linie soll ein neues Verfahren



möglichst einfach sein, damit dieses auch in der SIA 380 integriert werden kann. Dies mit dem Ziel, ohne komplexe Softwarelösungen auszukommen. Um auch komplexere Fragestellungen zu lösen, werden Grundlagen erarbeitet, die zu Klimakorrekturverfahren führen, welche in Softwarelösungen zur Anwendung kommen können.

In Abbildung 3 ist der gewählte Prozess für die Analyse der bestehenden Methoden und die Validierung möglicher Anpassungen oder Neuentwicklungen dargestellt. Das Ziel ist es das Referenzgebäude jeweils mit einem kalten und einem warmen Klima zu simulieren und die Simulationsergebnisse einer Witterungsbereinigung zu unterziehen, um möglichst nahe an die Ergebnisse des Standardklimas (normal) zu kommen, respektive eine möglichst geringe Differenz zwischen den Ergebnissen (Heizwärme) der drei Klimata zu erreichen.

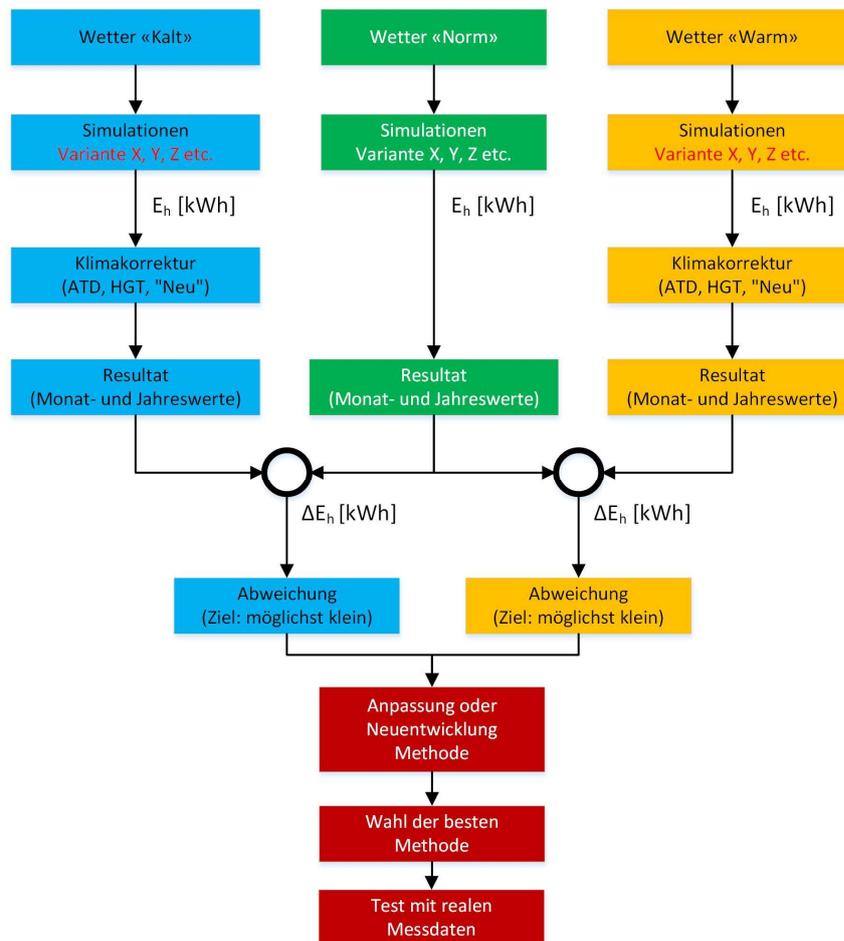


Abbildung 3: Vereinfachtes Prozessdiagramm zum gewählten Vorgehen im Projekt.

2.2 Bisherige Korrekturverfahren

Die SIA-Norm 380:2022 empfiehlt die Methode der Akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD). Früher wurden jedoch die Heizgradtage (HGT) empfohlen. Die beiden Verfahren werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt.

2.2.1 HGT-Berechnung

Die Berechnung der Heizgradtage (HGT) ist in der SIA 381/3:1982 beschrieben. Die Berechnung ist in Gleichung 1 dargestellt:



Gleichung 1:
$$HGT_{i,gr} = \sum(T_i - T_{amb,j}), \quad \text{für } T_{amb,j} < T_{gr}$$

T_i Raumlufttemperatur [°C]

T_{gr} Heizgrenze [°C]

$T_{amb,j}$ Tagesmittelwert der Aussentemperatur [°C]

Mit den HGT kann so der Energieverbrauch einer Messperiode auf eine Referenzperiode umgerechnet werden mit folgender Gleichung:

Gleichung 2:
$$E_{H,Ref} = \frac{HGT_{per,Ref}}{HGT_{per}} \cdot E_H$$

2.2.2 ATD-Berechnung

Die Berechnung der Akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) ist in der SIA 380:2022 Norm beschrieben. Das Vorgehen ist wie folgt:

Gleichung 3:
$$ATD_b = \sum(T_b - T_{amb,j}), \quad \text{für } (T_b - T_{amb,j}) > 0$$

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

$T_{amb,j}$ Tagesmittelwert der Aussentemperatur [°C]

Der Term ATD_{per} entspricht den ATD für die Messperiode. Mit nachfolgender Formel wird der gemessene Energieverbrauch auf das Referenzjahr umgerechnet:

Gleichung 4:
$$E_{H,Ref} = \frac{ATD_{per,Ref}}{ATD_{per}} \cdot E_H$$

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

ATD_{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 380:2022 empfiehlt, wenn keine genauen Angaben zum Gebäude bestehen, eine Basistemperatur von 17 °C zu wählen (Variante 1). In der Vorgänger Version (2015) wurde noch eine Basistemperatur von 12 °C empfohlen. 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.

2.2.3 Vergleich verschiedener Klimakorrekturen

Um Verschiedene Arten der Klimakorrektur miteinander zu vergleichen, wurden Simulationen für vier verschiedene Wetterdatensätze durchgeführt: Einerseits wurden Messdaten eines warmen, mittleren und kalten Jahres verwendet – wie in Abschnitt 2.4 erläutert – und andererseits wurde das *design reference year* (DRY) der SIA [7] verwendet, welches ein typisches Jahr widerspiegeln sollte. Das mittlere Jahr oder das DRY konnten dann als Referenzperiode genutzt werden. So konnte der Energieverbrauch für die Referenzperiode einerseits mit der Simulation bestimmt werden ($E_{Ref,Sim}$) und andererseits mittels



Klimakorrektur ($E_{Ref,Kor}$) für das kalte und das warme Jahr berechnet werden. Um die Genauigkeit der Klimakorrektur zu beurteilen konnte so die Differenz der mittels Simulation bestimmten Energie und der mittels Klimakorrektur bestimmten Energie gebildet werden:

Gleichung 5:
$$\Delta E_{Ref} = E_{Ref,Kor} - E_{Ref,Sim}$$

Damit die Differenzen auch für unterschiedlich effiziente Gebäude miteinander verglichen werden konnten, wurden sie mit der durch die Simulation bestimmten Energie normalisiert wie folgt:

Gleichung 6:
$$\Delta e_{Ref} = \frac{\Delta E_{Ref}}{E_{Ref,Sim}}$$

2.3 Referenz Gebäude

Alle Simulationen basieren auf dem SPF Referenzgebäude. Durch eine ausführliche Parameterstudie wurden dann verschiedene Gebäudeeigenschaften variiert, wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben.

2.4 Simulationen

Dynamische Simulationen wurden mit Hilfe des Simulationstools Trnsys [8] und der am SPF entwickelten Simulationsumgebung Pytrnsys¹ durchgeführt. Das simulierte System enthielt das oben beschriebene Mehrfamilienhaus mit einem idealen Heizsystem.

Für die Parameterstudie wurden verschiedene Parameter zufällig variiert, um deren jeweiligen Einfluss auf die Klimakorrektur zu ermitteln. Das jeweils gleiche Set an zufälligen Simulationen wurde für vier verschiedene Wetterdatensätze für den Standort Zürich SMA durchgeführt. Dabei wurde aus den letzten 40 Jahren ein kaltes Jahr mit tiefer Strahlung, ein mittelwarmes Jahr mit mittlerer Strahlung und ein warmes Jahr mit hohen Strahlungswerten verwendet.

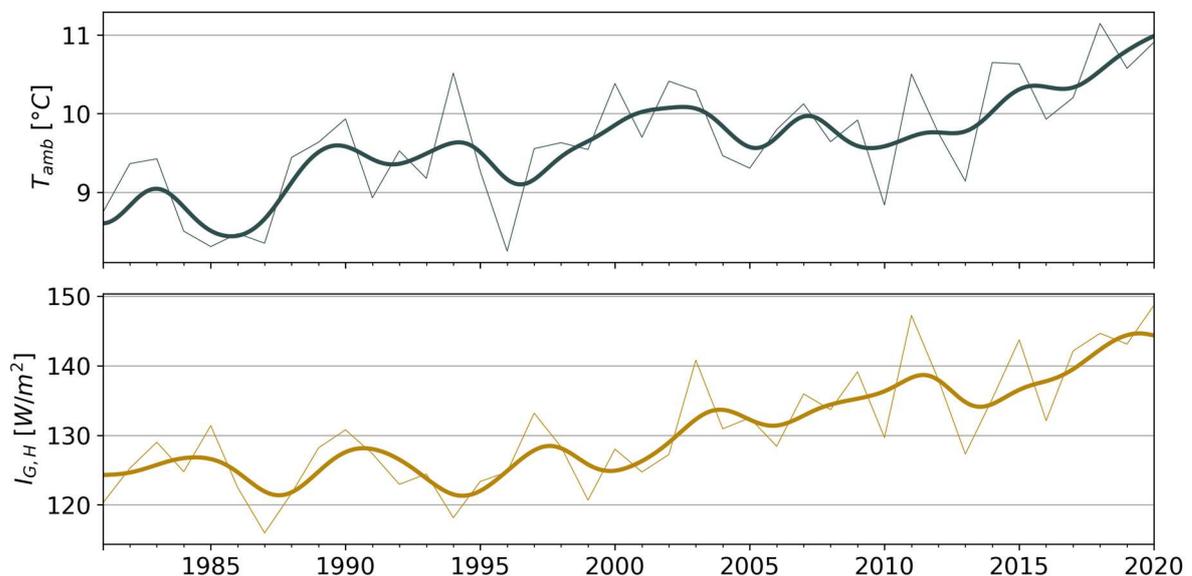


Abbildung 4: Jährliche Durchschnittstemperatur (oben) sowie durchschnittliche Globalstrahlung (unten) für den Standort Zürich SMA der Jahre 1981-2020. Dünne Linie entspricht den Jahreswerten, die dicke Linie entspricht den gleichen Werten mit einem 5-Jahres Gauss-Filter, wodurch die Linien geglättet und somit Trends besser sichtbar werden.

¹ <https://pytrnsys.readthedocs.io/>



Die entsprechenden Wetterdaten sind in Abbildung 4 dargestellt. Für das kalte Jahr mit tiefer Globalstrahlung ($I_{G,H}$) wurde das Jahr 1996 ausgewählt, als Durchschnittsjahr wurde 2004 gewählt, als warmes Jahr mit hoher Strahlung 2020. Zusätzlich zu den 3 gemessenen Jahren, wurde auch das *Design Reference Year* (DRY) der SIA [7] verwendet. Das DRY sollte ein möglichst typisches Jahr darstellen, jedoch beruht es auf alten Daten: Das DRY wurde auf Grund der Jahre 1984-2003 erstellt, in welchen – wie in Abbildung 4 gesehen werden kann – sowohl die Temperatur als auch die Strahlung bedeutend tiefer sind als in den letzten Jahren.

2.4.1 Parameterstudie

Die nachfolgend beschriebenen Parameter wurden für die Parameterstudie variiert. Wenn möglich wurden zwischen fünf und sieben verschiedene Zustände ausgewählt, um etwaige Nichtlinearitäten und Wechselwirkungen miteinzubeziehen.

Dämmstandard

Es wurden vier verschiedene Baustandards analysiert um den Einfluss der Gebäudehülle zu ermitteln: Ein Bestandsgebäude mit einem Referenz-Jahresverbrauch von 150 kWh/m², ein renoviertes Bestandsgebäude mit einem Referenz-Jahresverbrauch von 85 kWh/m², ein Neubau nach MuKE n 2014 [9] mit einem Referenz-Jahresverbrauch von 25 kWh/m², sowie ein Neubau nach Minergie-P Standard [10] mit einem Referenz-Jahresverbrauch von 15 kWh/m². Die vier verschiedenen Gebäudetypen werden im Folgenden mit MFH150, MFH85, MFH25 und MFH15 bezeichnet.

Bausubstanz

Um den Einfluss der thermischen Masse zu untersuchen, wurde zwischen Leichtbau und massiver Bauweise unterschieden. Für den Leichtbau wurde dabei die Dichte der Schichten aus Stahlbeton von 2400 kg/m³ auf 40 kg/m³ und die Dichte der Schichten aus Backstein von 1070 auf 650 heruntersetzt. Im Nachfolgenden wird der Leichtbau mit *leicht* bezeichnet, die konventionelle massive Bauweise mit *schwer*.

Konstante Verschattung (Variation g-Wert)

Aus technischen Gründen konnten die g-Werte der Fenster in den Simulationen nicht direkt variiert werden. Aus diesem Grund wurde eine konstante Verschattung eingeführt welche zwischen 0 (entspricht keiner Verschattung) und 0.5 (entspricht 50% Verschattung) in 0.1 Schritten variiert wurde. Dies entspricht einer indirekten Variation des g-Wertes der Fenster. Als Basis dient ein Fenster mit hohem g-Wert bei welchem der konstante Verschattungswert nach nachfolgender Gleichung dazu gerechnet wurde:

Gleichung 7:
$$g' = g \cdot (1 - c_s)$$

Wobei g dem ursprünglichen g-Wert entspricht, g' dem angepassten g-Wert und c_s der Verschattungskonstante.

Der ursprüngliche G-Wert der Fenster war pro Gebäudetyp konstant, die entsprechenden Werte können in Tabelle 1 abgelesen werden.



Tabelle 1: Basis g-Werte der verschiedenen Gebäudetypen.

Gebäudetyp	g-Wert
MFH150	0.782
MFH85	0.7
MFH25	0.62
MFH15	0.6

Folgende Verschattungskonstanten (c_s) wurden zufällig mit dem Basis g-Wert kombiniert:

0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5.

Sollraumtemperatur

Die Sollraumtemperatur während der Heizungsperiode wurde zwischen 20 °C und 24 °C in 1K Schritten geändert. Mögliche Werte waren somit 20°C, 21°C, 22°C, 23°C und 24°C.

Mechanische Lüftung

Die mechanische Lüftung wurde zwischen 0 m³/hm² und 0.8 m³/hm² in 0.2 m³/hm² Schritten variiert. Damit waren folgende Werte möglich: 0 m³/hm², 0.2 m³/hm², 0.4 m³/hm², 0.6 m³/hm² und 0.8 m³/hm².

Effizienz der Wärmerückgewinnung der mechanischen Lüftung

Die Wärmerückgewinnungseffizienz wurde zwischen 0 und 0.8 in 0.2 Schritten variiert. 0 bedeutet dabei, dass 0% der Wärme aus der Abluft der Zuluft zurückgeführt wird, 0.8 bedeutet entsprechend 80% der Wärme wird der Zuluft zurückgeführt. Folgende Werte waren somit möglich: 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8.

Fensterlüftung

Für die Fensterlüftung wurde zwischen realistischem und idealem Nutzerverhalten unterschieden. Beim idealen Nutzerverhalten werden dabei die Fenster immer als geschlossenen angenommen², beim realen Nutzerverhalten hingegen folgt die Fensteröffnung (f_{win}) einer Kurve in Abhängigkeit der Aussentemperatur wie in der BFE Studie VenTsol [5] beschrieben. Die Formel mit welcher f_{win} berechnet wird ist in Gleichung 8 dargestellt.

Gleichung 8:
$$f_{win} = \frac{a}{1 + e^{-c(T_{amb} - d)}} + b$$

Mit folgenden Konstanten:

$$a = -0.489, b = 0.556, c = -0.268, d = 13.2$$

Interne Gewinne

Die internen Gewinne folgen einem definierten Profil, welches die Anwesenheit von Personen und den Betrieb von Geräten berücksichtigt³. Um den Einfluss der internen Gewinne zu berücksichtigen wurden diese Lastprofile mit einer Konstante multipliziert. Folgende Werte für diese Konstante wurden dabei angenommen: 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4.

² der Luftaustausch wird dabei von der mechanischen Lüftung abgedeckt.

³ Definiert im Bericht zum Referenzgebäude (noch nicht publiziert)



Verschattung

Für die Verschattung wurde zwischen realistischem und idealem Nutzerverhalten unterschieden. Das ideale Nutzerverhalten entspricht dabei der SIA 380/1, bei welchem die Verschattung im Winter aktiviert wird, wenn folgende Zustände eintreffen:

- Die Einstrahlung ist grösser als 200 W/m^2
- Die Raumtemperatur ist grösser als 24 °C

Die Verschattung wird dann wieder deaktiviert, wenn mindestens einer der folgenden Zustände eintritt:

- Die Einstrahlung fällt unter 150 W/m^2 ab
- Die Raumtemperatur ist kleiner als 22 °C

Beim realistische Nutzerverhalten hingegen folgt die Verschattung (f_{shd}) der in der VenTSol [5] Studie beschriebenen Abhängigkeit der Aussentemperatur (T_{amb}) wie in der nachfolgenden Gleichung 9 beschrieben:

Gleichung 9:
$$f_{shd} = 3.14 \cdot 10^{-4} \cdot T_{amb}^2 + 6.79 \cdot 10^{-3} \cdot T_{amb} + 0.671$$

Verschattungsfaktor

Zusätzlich zum Nutzerverhalten wurde die Stärke der Verschattung mittels eines Verschattungsfaktors (f_g) variiert. Während die Verschattung f_{shd} angibt, welcher Anteil der Fenster des Gebäudes verschattet sind, gibt der Verschattungsfaktor f_g an, wie stark diese Verschattung ist und entspricht so verschiedenen Arten der Storen (Lamellen, Markisen, etc.). Ein Wert von 0 entspräche einer perfekten Verschattung, ein Wert von 1 entspräche einer fehlenden Verschattung. f_g konnte folgende Werte annehmen: 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35.

Heizgrenze

Die Heizgrenze beschreibt diejenige Aussentemperatur (24-Stunden Durchschnitt), ab welcher nicht mehr geheizt wird. Für die Simulationen wurden folgende möglichen Werte angenommen: 13 °C , 14 °C , 15 °C , 16 °C , 17 °C , 18 °C , 19 °C .

Anzahl Stockwerke

Es wurden zwei verschiedene Anzahl Stockwerke analysiert: ein Gebäude mit 3 Stockwerken und eines mit 5 Stockwerken. Diese Anzahl Stockwerke hat vor allem einen Einfluss auf die Gebäudehüllzahl (Verhältnis von Gebäudehülle zu Energiebezugsfläche).



Übersicht

Eine Übersicht aller möglicher Parameter ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Übersicht der Parameter welche zufällig variiert wurden.

Parameter	Einheit	Werte
Dämmstandard	kWh/m ²	15, 25, 85, 150
Bausubstanz	-	leicht / schwer
Verschattungskonstante	-	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Sollraumtemperatur	°C	20, 21, 22, 23, 24
Mechanische Lüftung	m ³ /hm ²	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Wärmerückgewinnungseffizienz der mechanischen Lüftung	-	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Fensterlüftung	-	realistisch / ideal
Interne Gewinne	-	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4
Verschattung	-	realistisch / ideal
Verschattungsfaktor	-	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35
Heizgrenze	°C	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Anzahl Stockwerke	-	3, 5

Würde man alle möglichen Kombinationen simulieren, ergäbe dies über 40 Millionen Simulationsvarianten. Da dies aufgrund der Komplexität der Simulationen nicht realistisch ist, wurde die Anzahl Simulationen stark reduziert, indem zufällige Kombinationen ausgewählt wurden. Dafür wurden zwei Sets an Parametervariationen durchgeführt. Ein mittelgrosses Set mit 1'000 Parameterkombinationen und ein grosses Set mit 5'000 Parameterkombinationen. Dies jeweils für die vier verschiedenen Klimata. So wurden insgesamt 24'000 Simulationen durchgeführt. Das mittelgrosse Set wurde für die Datenauswertung und das grosse für das Testen der ermittelten Methoden verwendet.

2.4.2 Simulation für die Jahre 1981-2019

Da bei der Parametervariation auch viele unrealistische Fälle miteinbegriffen waren, wurde in einer weiteren Simulationsstudie vier verschiedene Gebäudestandards (25 kWh/m², 45 kWh/m², 85 kWh/m² und 145 kWh/m²) für eine grössere Auswahl an Klimamessdaten untersucht. Die Definitionen der Gebäudestandards sind im Bericht zum SPF-Referenzgebäude beschrieben (wird noch publiziert). Für die Auswahl der gemessenen Klimadaten wurden die Jahre 1981 bis 2019 gewählt. Im Nachfolgenden wird diese Simulationsdurchführung mit 39-Jahre Simulation bezeichnet. Insgesamt wurden für diese 39-Jahre Simulation $39 \cdot 4 = 156$ verschiedene Kombinationen analysiert.



2.5 Datenauswertung

Dieser Abschnitt beschreibt, wie die Simulationsdaten zur Entwicklung einer neuen Klimakorrektur-Methode verwendet wurden.

2.5.1 Auswertungsparameter

Grundsätzlich wurden für die Auswertung diejenigen Parameter verwendet, welche auch in der Parameterstudie variiert wurden. Die Verschattungskonstante wurde dabei jedoch zum entsprechenden g-Wert umgerechnet. Aus den Wetterdaten wurden ausserdem die Jahresdurchschnittstemperatur, die relative Feuchtigkeit, die Globalstrahlung, die HGT und die ATD bestimmt, welche auch für die Auswertung berücksichtigt wurden. Die durch die Simulationen ermittelte Heizenergie wurde sowohl als Zielvariable, als auch als unabhängige Variable in den Auswertungen miteinbezogen, wie in Abschnitt 2.5.3 genauer beschrieben wird.

2.5.2 Filtern der Simulationsdaten

Aufgrund der zufälligen Parameterkombination wurden auch unrealistische Szenarien simuliert, deshalb wurden die Simulationsdaten im Nachhinein gefiltert. Für das Filtern wurden die Anzahl Tage gezählt, bei denen die durchschnittliche Tagesraumtemperatur einen gewissen Grenzwert nicht erreichen konnte. Dieser Grenzwert wurde in Abhängigkeit der Sollraumtemperatur wie folgt gewählt:

Sollraumtemperatur > 21 °C: Grenzwert = 20.5 °C

Sollraumtemperatur = 21 °C: Grenzwert = 20 °C

Sollraumtemperatur = 20 °C: Grenzwert = 19 °C

Alle Simulationen, bei denen die durchschnittliche Raumtemperatur an mindestens vier Tagen nicht erreicht werden konnte, wurden herausgefiltert, da diese Simulationen als nicht realistisch angesehen werden. So wurde das grosse Set mit 5000 Kombinationen auf 4083 und das mittelgrosse von 1000 auf 823 Kombinationen reduziert.

2.5.3 Auswertung der Parameterstudie mittels schrittweiser Regression

Die Datenauswertung besteht aus zwei Teilen, in denen versucht wird, mittels schrittweiser Regression die folgenden Fragen zu beantworten:

1. Teil: Mit welchem Heizenergiebedarf ist bei einem Haus (also bei gegebener Parameterkombination) bei einem Klimaszenario zu rechnen? Ist gegenüber der Simulation eine statistisch vereinfachte Berechnung möglich und – wenn ja – wie genau ist sie? Welches sind die statistisch relevanten Einflussfaktoren?
2. Teil: Wie kann man den Einfluss des Klimas auf den Heizenergiebedarf abschätzen? Anders gefragt: kann ich ausgehend von einer aktuellen Klimasituation den veränderten Heizenergiebedarf abschätzen, der sich bei einer anderen Klimasituation einstellt?

Im 1. Teil wird eine multiple lineare Regression durchgeführt. Die abhängige Variable ist hier der Heizenergiebedarf. Die möglichen unabhängigen Variablen sind a) die Parameter des Gebäudes und b) die Variablen, die das Klima (Wetter) beschreiben.

Im 2. Teil wird eine multiple nichtlineare Regression durchgeführt. Die abhängige Variable ist hier der Heizenergiebedarf bei einer veränderten Klimasituation. Zu den möglichen unabhängigen Variablen zählt der Heizenergiebedarf der aktuellen Klimasituation und die



Parameter der Wohneinheiten sowie die Änderungen, die sich durch die Unterschiede zwischen der aktuellen Klimasituation und der veränderten Klimasituation ergeben. Der Grund, warum hier mit einer nichtlinearen Regression gerechnet wird, liegt darin, dass Wechselwirkungen erwartet werden – zum Beispiel, dass sich Klimaveränderungen bei unterschiedlichen Geschossflächen möglicherweise verschieden stark auswirken können.

Im 1. Teil werden die tabellierten Ergebnisse der Simulationen direkt für die statistische Analyse verwendet.

Im 2. Teil wird für die nichtlineare Regression die Datengrundlage neu geordnet. Für jede Wohneinheit bzw. Parameterkombination werden die Klimaänderungen aus den Simulationen zugeordnet. Als Klimaänderung wird hier der Unterschied zwischen je zwei der vier Klimaszenarien bezeichnet. Durch die Auswahl von zwei aus vier Klimaszenarien ergeben sich sechs Klimaänderungen, die je in zwei verschiedene Richtungen erfolgen können, so dass wir insgesamt 12 verschiedene Klimaänderungen erhalten:

1. Klimaänderung: von mittel nach kalt
2. Klimaänderung: von DRY nach kalt
3. Klimaänderung: von warm nach kalt
4. Klimaänderung: von DRY nach mittel
5. Klimaänderung: von warm nach mittel
6. Klimaänderung: von warm nach DRY
7. Klimaänderung: von kalt nach mittel
8. Klimaänderung: von kalt nach DRY
9. Klimaänderung: von kalt nach warm
10. Klimaänderung: von mittel nach DRY
11. Klimaänderung: von mittel nach warm
12. Klimaänderung: von DRY nach warm

Bei 823 simulierten Wohneinheiten führt das auf eine Tabelle mit $12 \cdot 823 = 9876$ Einträgen / Zeilen, die für die Regression des neuen Heizenergiebedarfs (Klimaänderung *nach*...) auf den alten Heizenergiebedarf (Klimaänderung *von* ...) sowie die Parameter der Wohneinheiten und die Klimavariablen bzw. deren Änderung zur Verfügung stehen.

Bei multiplen linearen wie (durch Wechselwirkungen) nichtlinearen Regressionsanalysen kann das optimale Modell i.A. nicht direkt bestimmt werden, weil die Auswahl von Einflussgrößen (*explanatory variables*) die Signifikanz und das Bestimmtheitsmass beeinflussen. Die Auswahl von Einflussgrößen erfolgt entweder durch Teilmengenanalyse oder durch schrittweise Regression (Vorwärtseinschluss oder Rückwärtselimination) [11–13]. Wegen der Einfachheit, Transparenz und Kontrollierbarkeit der Zwischenschritte verwenden wir hier die schrittweise Regression durch Vorwärtseinschluss.

Als Gütekriterien, um zu beurteilen welcher Einflussfaktor eingeschlossen wird, stehen dabei das (korrigierte) Bestimmtheitsmass R^2 , die residuale Fehlerquadratsumme σ_r^2 , der F -Wert oder das Akaike-Kriterium AIC zur Verfügung.

Das AIC empfiehlt sich bei der Teilmengenanalyse. Das Bestimmtheitsmass R^2 steigt bei steigender Anzahl von Variablen und muss daher korrigiert werden. Die residuale Fehlerquadratsumme σ_r^2 wird zur Information angegeben.



Gleichung 10:
$$\hat{F} = \frac{RSS_{(p)} - RSS_{(p+1)}}{\frac{RSS_{(p+1)}}{(n-(p+2))}} > F_{in}$$

Der F-Wert wird als statistisches Mass verwendet, um die Signifikanz zu beurteilen und wann die schrittweise Regression abgebrochen wird. (RSS = residual sum of squares, p = Anzahl Variablen, n = Anzahl Messungen, F_{in} = minimaler F-Wert für den Einschluss einer Variablen).

2.5.4 Wechselwirkungen

Wenn vermutet wird, dass eine Einflussgrösse einen Einfluss auf die Zielvariable besitzt, der je nachdem, wie stark eine andere Einflussgrösse ist, unterschiedlich sein kann, dann sollten Wechselwirkungen in die (schrittweise) Regression einbezogen werden. Der Unterschied zwischen einer multiplen linearen Regression und einer multiplen Regression mit Wechselwirkungen lässt sich am besten anhand der folgenden Formeln verdeutlichen:

Lineare Regression mit Zielvariable y , 2 Variablen x_1 und x_2 , der Konstanten c und dem unbekanntem Fehler ε sowie den Regressionskoeffizienten m_1 und m_2 :

Gleichung 11:
$$y = c + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \varepsilon$$

Regression mit Zielvariable y , 2 Variablen x_1 und x_2 , Wechselwirkung $x_1 \cdot x_2$, Konstante c und mit dem unbekanntem Fehler ε sowie den Regressionskoeffizienten m_1 , m_2 und $m_{1,2}$:

Gleichung 12:
$$y = c + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_{1,2} \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon$$

Die Wechselwirkungen werden im Teil 1 nicht verwendet, weil hier ein einfaches statistisches Modell gesucht wird und andernfalls eben die Simulation durchgeführt werden kann. Im Teil 2 kann aber vermutet werden, dass die Auswirkungen von Klimaänderungen je nach Wohnungsbeschaffenheit ändern. Die Wechselwirkungen aller möglichen Variablenkombinationen werden in den Prozess der schrittweisen Regression einbezogen, so dass als jeweils nächste Variable sowohl eine Einflussgrösse als auch eine Wechselwirkung eingeschlossen werden kann – je nachdem was das Gütekriterium am besten erfüllt.

2.5.5 Jahresauswertung der 39-Jahre Simulation

Für die Auswertung der 39-Jahre Simulation wurden alle Jahre miteinander kombiniert, um jeweils von einem Jahr zum anderen zu korrigieren. So ergaben sich aus den 156 Simulationen insgesamt 5928 Kombinationen welche für die Auswertung mittels schrittweiser Regression wie oben beschrieben verwendet werden konnten.

Um auf ein physikalisch sinnvollerer Modell zu kommen, wurde bei dieser Untersuchung die Klimakorrektur selbst ($\Delta Q_H = Q_{H,1} - Q_{H,2}$) geteilt durch die Energiebezugsfläche (EBF) als abhängige Variable gewählt und die Konstante c gleich null gesetzt. So konnte sichergestellt werden, dass bei identischen abhängigen Variablen auch der Heizenergiebedarf bei der Korrektur identisch bleibt.

2.5.6 Tageswertanalysen

Um die Abhängigkeit des Gebäudeenergieverbrauchs von der Temperatur und der Strahlung zu ermitteln, wurden die Ergebnisse der 39-Jahre Simulation auf Tagesbasis ausgewertet. Dabei soll ermittelt werden, wie gross der Einfluss der Tagesdurchschnittstemperatur sowie der Tagesdurchschnittsstrahlung auf den Gebäudeenergieverbrauch ist. Um diesen Einfluss zu ermitteln wurde wieder eine schrittweise Regression – ähnlich wie in Kapitel 2.5.3



beschrieben – durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Subsets von der abhängigen Variable wie auch der unabhängigen Variablen verwendet. Als abhängige Variable wurde der tägliche Heizenergieverbrauch verwendet, wobei die Untersuchung für verschiedene Gebäudestandards durchgeführt wurde. Bei den unabhängigen Variablen wurden folgende Parameter und ihre Wechselwirkungen betrachtet: Tagesdurchschnittstemperatur (T_{amb}), tägliches ATD17, Tagesdurchschnittsstrahlung, Gebäudestandard und Jahresheizenergieverbrauch. Für verschiedene Parameterkombinationen wurde dann jeweils das Bestimmtheitsmass R^2 sowie der *mean absolute error* (MAE) ermittelt, um das Modell zu beurteilen.

2.5.7 Auswertung auf Monatsbasis

Eine offensichtliche Schwäche der ATD- und HGT-Methode ist, dass sie auf Monatsdaten nur begrenzt anwendbar ist, da die akkumulierten Temperaturdifferenzen für warme Monate gleich Null sein können. Dies hat zur Folge, dass bei der Klimakorrektur eine Division durch Null vorkommen kann.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, Klimakorrekturmethode auch auf Monatsbasis zu untersuchen. Das Vorgehen dafür basiert auf der in Abschnitt 2.5.5 beschriebenen Jahresanalyse. Die Monatswerte wurden pro Monat für alle Jahre miteinander kombiniert, wobei aber die unterschiedlichen Monate nicht miteinander kombiniert wurden, sprich Januarwerte wurden immer nur mit Januarwerten aus anderen Jahren kombiniert, nie mit Werten von einem anderen Monat. So ergaben sich bei 156 Simulationen und 12 Monaten 71136 Kombinationen.

2.6 Validierung mit Messdaten

Um die beschriebenen Methoden mit Messdaten zu validieren, wurden Messdaten von 149 Gebäuden im Kanton Zürich verwendet. Für diese Gebäude waren jeweils eine unterschiedliche Anzahl Jahre mit kompletten Messdaten verfügbar. Von den verfügbaren Jahren wurden dann die ersten drei kompletten Jahre gestrichen, um die Auswirkung anfänglicher Betriebsoptimierungen zu minimieren. Bei jedem Gebäude wurden nun alle gewählten Jahre mit der zu untersuchenden Methode auf das *Design Reference Year* (DRY) der SIA [7] korrigiert. Bei einer guten Methode sollten nun die korrigierten Werte alle etwa gleich sein. Um dies zu verifizieren wurde die Standardabweichung aller untersuchten Jahre pro Gebäude ermittelt. Je kleiner also die Standardabweichung, desto genauer ist die Klimakorrektur der gewählten Methode.



3 Resultate und Diskussion

3.1 Auswertung der Parametervariation mittels linearer schrittweiser Regression

Die Simulationsresultate wurden mit Hilfe einer *schrittweisen Regression* ausgewertet, um eine möglichst gute Abschätzung des korrigierten Wärmeverbrauchs zu erzielen.

In einem ersten Schritt wurde dabei eine lineare Regression angenommen mit den Parametern, welche in der Parameterstudie variiert wurden, sowie den Parametern HGT, ATD, Durchschnittstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung, welche aus den Wetterdaten ermittelt wurden. Insgesamt wurden so die folgenden Parameter als unabhängige Variablen ausgewertet:

- Dämmstandard
- Bausubstanz
- G-Wert der Fenster
- Sollraumtemperatur
- Mechanische Lüftung
- Wärmerückgewinnungseffizienz der mechanischen Lüftung
- Fensterlüftung
- Interne Gewinne
- Verschattung
- Verschattungsfaktor
- Heizgrenze
- Anzahl Stockwerke
- HGT
- ATD
- Durchschnittstemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit
- Globalstrahlung



Der Gebäudeenergieverbrauch wurde als Zielvariable gewählt und die unabhängigen Variablen wurden mithilfe der *stepwise regression* gewählt. Folgende sechs Regressoren wurden so schrittweise gefunden:

1. Dämmstandard
2. Anzahl Stockwerke
3. Sollraumtemperatur
4. Fensterlüftung
5. ATD
6. Mechanische Lüftung

Mit diesen sechs Regressoren konnte ein R^2 -Wert von 0.926 erreicht werden. Wird nur der wichtigste Regressor verwendet (Dämmstandard), beträgt der R-Wert noch 0.764.

3.2 Auswertung der Parametervariation mittels schrittweise Regression unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Um eine bessere Abschätzung des Energieverbrauchs zu erreichen, wurden in einem zweiten Schritt Wechselwirkungen, sowie weitere Parameter miteinbezogen.

Insbesondere wurde die Formel konkreter in die Form einer Klimakorrektur gebracht, sprich es wurden der Energieverbrauch des Ausgangsklimas, sowie die ATD des Ausgangs- und des Zielklimas durch ihre Differenz berücksichtigt, wie in Gleichung 13 miteinbezogen.

Gleichung 13:
$$\Delta ATD_b = (ATD_{b,1} - ATD_{b,2})$$

Dabei bezeichnet das Subskript b die Basistemperatur, Subskript 1 das Zielklima und Subskript 2 das Ausgangsklima. Es wurden die Basistemperaturen 12°C und 17°C berücksichtigt.

So haben sich $Q_{H,2}$ sowie die Wechselwirkung $\Delta ATD_{12} \cdot Q_{H,2}$ als wichtigste Regressoren herauskristallisiert.

Die folgende Gleichung hat schliesslich zu den genauesten Ergebnissen geführt:

Gleichung 14:
$$Q_{H,1} = m \cdot Q_{H,2} + m_1 \cdot \Delta ATD_{12} \cdot Q_{H,2} + m_2 \cdot \Delta ATD_{12} \cdot \text{Stockwerke} + m_3 \cdot \Delta ATD_{12} \cdot \text{Dämmstandard} + c$$

Wobei:

$$c = 284.8666 \text{ kWh}$$
$$m = 1.003391$$
$$m_1 = 2.053015 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$$
$$m_2 = 4.610458 \text{ kWh/K}$$
$$m_3 = 0.1672590 \text{ kWh/K}$$

Die so beschriebene Methode zur Klimakorrektur wird nachfolgend als WW3 bezeichnet (da sie drei Wechselwirkungen beinhaltet). Die Abschätzung des Energieverbrauches des Zielklimas ist so dabei relativ genau mit einem R^2 -Wert von 0.999 und einer Standardabweichung von 2660 kWh (2.6 %), wie in Abbildung 5 dargestellt.

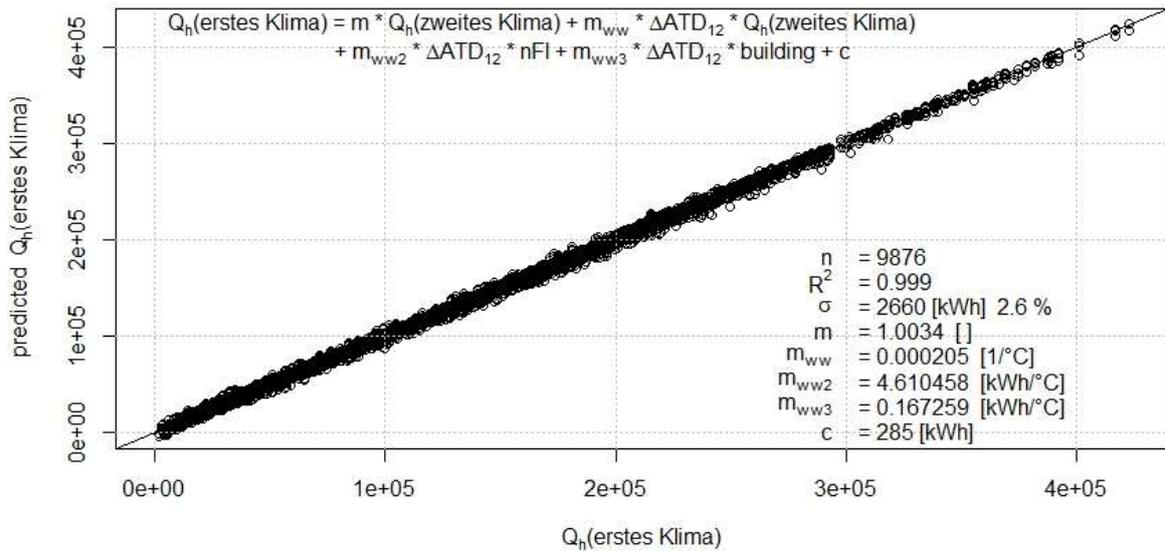


Abbildung 5: Regression WW3 mit Zielverbrauch ($Q_{H,1}$) in Abhängigkeit von Ausgangsverbrauch ($Q_{H,2}$), Differenz der ATD mit Basistemperatur 12 (ΔATD_{12}), Anzahl Stockwerke (nFI) und Dämmstandard ($building$).

Eine einfacher anwendbare Formel, welche nur $Q_{h,2}$ und ΔATD_{12} berücksichtigt ist in Gleichung 15 aufgeführt. Diese Gleichung enthält so nur Parameter, welche schon für die klassische ATD Methode verwendet werden. Die Abschätzung des Energieverbrauches des Zielklimas ist so dabei immer noch relativ genau mit einem R^2 -Wert von 0.998 und einer Standardabweichung von 3485 kWh (3.4 %), wie in Abbildung 5 dargestellt. Diese Gleichung wird nachfolgend als WW1 bezeichnet, da sie nur eine Wechselwirkung beinhaltet.



Gleichung 15: $Q_{H,1} = m \cdot Q_{H,2} + m_1 \cdot \Delta ATD_{12} \cdot Q_{H,2} + m_2 \cdot \Delta ATD_{12}$

Wobei: $c = 457 kWh$

$m = 1.0053$

$m_1 = 3.24 \cdot 10^{-4} 1/K$

$m_2 = 16.4968 kWh/K$

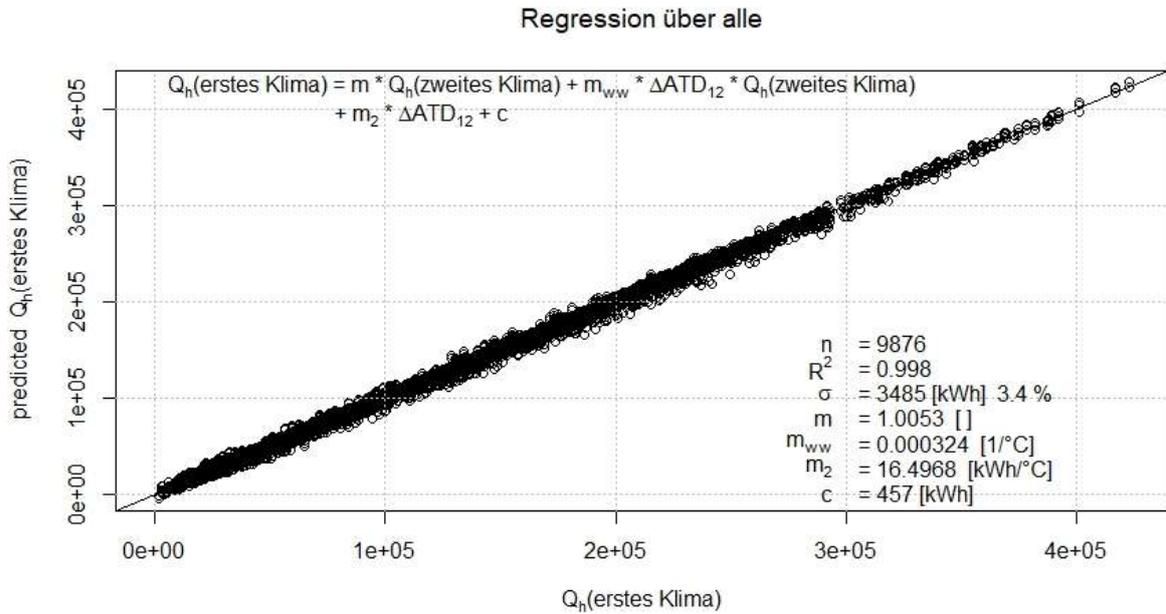


Abbildung 6: Regression WW1 mit Zielverbrauch (QH,1) in Abhängigkeit von Ausgangsverbrauch (QH,2) und Differenz der ATD mit Basistemperatur 12 (ΔATD12).

Wenn die beiden Methoden jedoch auf Messdaten angewandt werden, zeigt sich keine Verbesserung der Klimakorrektur, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Die dazugehörigen Werte sind in Tabelle 3 ersichtlich. Das Hinzunehmen der Anzahl Stockwerke und des Dämmstandards bei WW3 gibt nur eine sehr kleine Verbesserung gegenüber WW1 bei den Messdaten.

Tabelle 3: Durchschnittliche Standardabweichung der ATD Methoden und der auf Parametersimulationen basierenden WW1 und WW3 Methoden.

Methode	Durchschnittliche Standardabweichung [%]
ATD12	5.53
ATD17	4.50
WW1	4.67
WW3	4.62

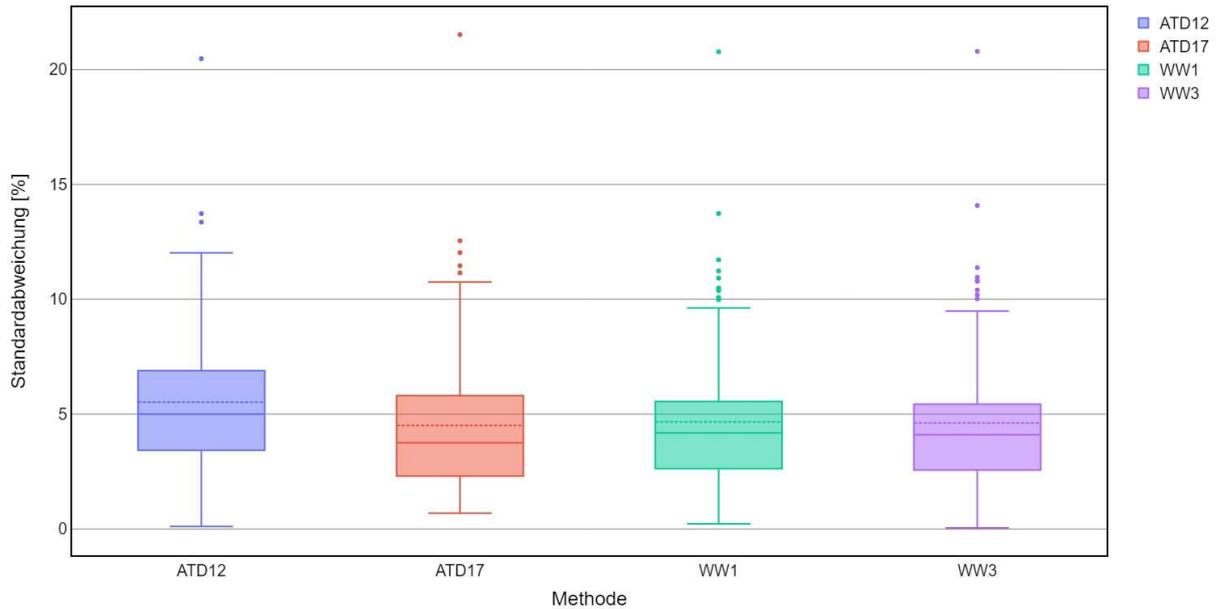


Abbildung 7: Vergleich der verschiedenen der auf den Parametersimulationen basierenden Methoden WW1 und WW3 auf Jahresbasis mit der ATD12 und der ATD17 Methode, wenn auf Messdaten angewandt.

3.3 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Tagesbasis

Die Untersuchung des Einflusses der Temperatur und der Solarstrahlung auf den Heizwärmeverbrauch auf Tagesbasis werden im Folgenden vorgestellt. Tabelle 4 zeigt, welcher Parameter den Gebäudeverbrauch jeweils am besten abschätzt. Für die sparsamen Gebäude (MFH25 und MFH45) korreliert T_{amb} jeweils am stärksten mit dem Tagesheizverbrauch. Diejenigen Gebäude mit höherem Energieverbrauch korrelieren am stärksten mit ATD17. Dieser Unterschied lässt sich wohl mit dem unterschiedlich implementierten Nutzerverhalten erklären, da ja für MFH25 und MFH45 ein realistisches Nutzerverhalten definiert wurde, welches sich vom idealen Nutzerverhalten nach Norm (welches für MFH85 und MFH145 verwendet wurde)⁴ unterscheidet und eine grössere Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur beinhaltet. Wenn man die Betrachtung auf alle Gebäude ausweitet, korreliert die Wechselwirkungsvariable $Q_{H,a} * ATD17$ am stärksten mit dem Tagesheizverbrauch. $Q_{H,a}$ entspricht hierbei dem Jahresheizenergieverbrauch und kann somit den Gebäudetyp am besten abschätzen.

Tabelle 4: Variable, welche am stärksten mit dem Tagesenergieverbrauch des jeweiligen Gebäudes korreliert.

Gebäude	Beste Variable	R ² -Wert	MAE [kWh]
MFH25	T_{amb}	0.911	23.1
MFH45	T_{amb}	0.922	31.7
MFH85	ATD17	0.921	47.3
MFH145	ATD17	0.934	66.7
Alle 4 Gebäude	$Q_{H,a} * ATD17$	0.906	58.0

⁴ Für ältere Gebäude gibt es keine Informationen zum Benutzerverhalten, weshalb das "Norm-Verhalten" verwendet wurde für die Simulationen



Wenn bei der schrittweisen Regression eine zweite Variable hinzugenommen wird, zeigen sich nur kleine Verbesserungen im R^2 -Wert, wie in Tabelle 5 ersichtlich. Die zweite Variable ist beim MFH25 die Globalstrahlung ($I_{G,H}$), bringt aber nur eine sehr kleine Verbesserung von 0.2%. $I_{G,H}$ kommt ausserdem beim MFH85 vor und führt zu einer Erhöhung des R^2 -Wertes von 1.2%. Bei den anderen Gebäuden kommt $I_{G,H}$ nicht an zweiter Stelle bei der schrittweisen Regression, was bedeutet, dass der Einfluss von $I_{G,H}$ auf den Tagesheizverbrauch entsprechend tiefer ist.

Tabelle 5: Top 2 Variablen, welche am stärksten mit dem Tagesenergieverbrauch des jeweiligen Gebäudes korreliert. Die Verbesserung des R^2 -Wertes bezieht sich dabei auf die Untersuchung mit nur einer Variable, wie in Tabelle 4 ersichtlich.

Gebäude	Top 2 Variablen	R^2 -Wert	MAE [kWh]	Verbesserung R^2 -Wert [%]
MFH25	$T_{amb}, I_{G,H}$	0.913	22.2	0.2
MFH45	T_{amb}, T_{amb}^2	0.934	28.0	1.2
MFH85	$ATD17, I_{G,H} * ATD17$	0.933	41.9	1.2
MFH145	$ATD17, ATD17^2$	0.938	62.9	0.4
Alle 4 Gebäude	$Q_{H,a} * ATD17, Q_{H,ref} * ATD17$	0.922	53.0	1.6

Insgesamt scheint der Einfluss von $I_{G,H}$ auf den Heizenergieverbrauch somit eher klein zu sein.

3.4 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Monatsbasis

Um ein Modell zu erstellen, welches die Klimakorrektur auf Monatsbasis berechnet, wurde wieder eine schrittweise Regression verwendet. Im Gegensatz zum in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren wurde nun für die schrittweise Regression jedoch direkt die Heizwärmedifferenz ΔQ_H (also die eigentliche Korrektur des Heizwärmeverbrauchs) als abhängige Variable definiert und auf eine Konstante (c) verzichtet. Zusätzlich wurde der Wärmeverbrauch relativ zur Energiebezugsfläche ausgewertet, damit die Methode unabhängig von der Gebäudegrösse ist ($\Delta q_H = \Delta Q_H / EBF$). Durch diese Änderungen konnte eine physikalisch sinnvollere Gleichung erreicht werden, welche ausserdem robuster sein sollte.

Die aufgrund des höchsten R^2 -Wertes gewählten Variablen werden in Tabelle 6 aufgelistet für die Auswertung der Gebäude MFH25 und MFH45. Die wichtigste Variable dabei ist ΔT_{amb} , $\Delta I_{G,H}$ bringt als zweite Variable eine Erhöhung des R^2 -Wertes um 2.3%. Der Wechselwirkungsparameter der Temperatur mit dem Gebäudereferenzverbrauch $Q_{H,ref} * \Delta T_{amb}$, führt zu einer weiteren Erhöhung um 2.2%, danach haben das hinzunehmen weiterer Variablen keinen grossen Effekt mehr. So bringt die Wechselwirkung $Q_{H,ref} * \Delta I_{G,H}$ nur noch eine minime weitere Erhöhung von 0.1%.

Tabelle 6: Veranschaulichung der schrittweisen Regression zur Bildung eines Modells der Gebäude MFH25 und MFH45, welches die Klimakorrektur auf Monatsbasis abschätzt. Die Verbesserung des R^2 -Wertes bezieht sich dabei auf den jeweils vorhergehenden Schritt mit einer Variable weniger.

Anzahl Variablen	Gewählte Variablen	R^2 -Wert	MAE [kWh/m ²]	Verbesserung R^2 -Wert [%]
1	ΔT_{amb}	0.870	0.300	-
2	$\Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}$	0.893	0.263	2.3
3	$\Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}, Q_{H,ref} * \Delta T_{amb}$	0.915	0.241	2.2
4	$\Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}, Q_{H,ref} * \Delta T_{amb}, Q_{H,ref} * \Delta I_{G,H}$	0.916	0.239	0.1



Die Koeffizienten der entsprechenden Modelle mit 1, 2 und 3 Variablen wird in Tabelle 7 gezeigt. Die Koeffizienten entsprechen dabei den Koeffizienten m_1 bis m_3 in folgender Gleichung:

$$\text{Gleichung 16: } \Delta q_H = m_1 \cdot \Delta T_{\text{amb}} + m_2 \cdot \Delta I_{G,H} + m_3 \cdot Q_{H,\text{ref}} \cdot \Delta T_{\text{amb}}$$

Wobei der zweite und dritte Summand jeweils nur verwendet wird, wenn die entsprechende Variable auch verwendet wurde. Ein negativer Wert für m_i weist auf einen umgekehrt proportionalen Effekt der Variable hin. Dies bedeutet, dass durch erhöhte Umgebungstemperatur oder erhöhte Solarstrahlung entsprechend weniger geheizt werden muss, was zu erwarten war.

Tabelle 7: Koeffizienten der Verschiedenen Modelle zur Berechnung der Klimakorrektur auf Monatsbasis der Gebäude MFH25 und MFH45.

Anzahl Variablen	Gewählte Variablen	m_1	m_2	m_3
1	ΔT_{amb}	-0.399	-	-
2	$\Delta T_{\text{amb}}, \Delta I_{G,H}$	-0.358	-0.0077	-
3	$\Delta T_{\text{amb}}, \Delta I_{G,H}, Q_{H,\text{ref}} \cdot \Delta T_{\text{amb}}$	-0.146	-0.0077	-0.0061

Die Auswertung der verschiedenen so entwickelten Methoden ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wurden die Korrekturmethode auf Messdaten angewandt, um diese Messdaten auf das Normklima zu korrigieren. Die entwickelten Methoden werden anhand der verwendeten Anzahl Variablen (1V bedeutet *eine Variable*) und dem für die Entwicklung verwendeten Gebäudestandard benannt. 1V-MFH25/45 bedeutet also, dass Gleichung 16 mit einer Variable verwendet wurde, welche für die Simulationen mit den Gebäuden MFH25 und MFH45 hergeleitet wurde. Um die Werte miteinander zu vergleichen, wurde die Standardabweichung aller korrigierten Monate pro Gebäude ermittelt. Hier ist anzumerken, dass bei ATD12 und ATD17 eine Division durch 0 vorkommen kann, da in den warmen Monaten die akkumulierten Temperaturdifferenzen der Messdaten zum Teil null sind, während sie im Normjahr grösser Null sind. Die entsprechenden Werte, welche unendlich gross wären, wurden für den Vergleich ignoriert, wodurch die Methoden ATD12 und ATD17 einen gewissen Vorteil in der Auswertung haben. Trotz diesem Vorteil ist die durchschnittliche Standardabweichung (gestrichelte Linie) bei den neu entwickelten Methoden mit 1-3 Variablen geringer als bei den ATD-Methoden, wobei ATD17 nah an die neuen Methoden kommt, jedoch vor allem aufgrund der hohen Ausreisser auffällt. Die Ausreisser bei ATD17 kommen von den extrem hohen Werten bei sehr tiefen akkumulierten Temperaturdifferenzen im Vergleich zum Normjahr (Division durch sehr kleinen Wert resultiert in einer sehr grossen Klimakorrektur). Die durchschnittliche Standardabweichung mit den drei verschiedenen Variablen ist in einem sehr ähnlichen Bereich, wobei die Methode 1V-MFH25/45 mit nur einer Variable (ΔT_{amb}) interessanterweise am besten abschneidet. Die durchschnittliche Standardabweichung beträgt dort 10.7%, im Vergleich zu 10.9% bei 2V und 10.8% bei 3V. ATD17 ist mit 12.1% zwar nicht viel, aber doch klar schlechter als die neuen Methoden und ATD12 mit 23.1% viel schlechter. Dass die Methode mit nur einer Variablen am besten abschneidet, bedeutet wohl, dass das Simulationsmodell den Einfluss der Einstrahlung nicht genügend genau abbilden kann.

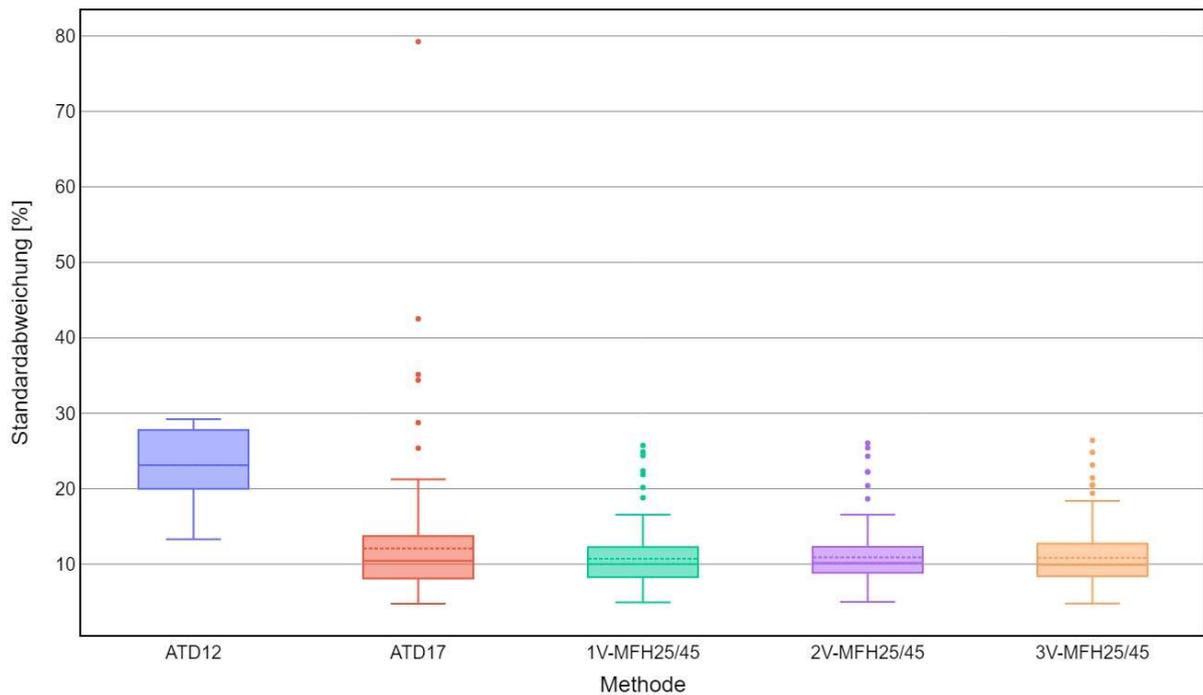


Abbildung 8: Vergleich der verschiedenen Methoden basierend auf den Simulationen für beide Gebäude MFH25 und MFH45 mit 1, 2 oder 3 Variablen auf Monatsbasis mit der ATD12 und der ATD17 Methode, wenn angewandt auf Messdaten.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich mit unterschiedlicher Grundlage (MFH25, MFH45, beide kombiniert). MFH25 ist dabei am besten, da es auch auf der Grundlage des zur Validierung verwendeten Datensatzes entwickelt wurde. Die durchschnittliche Standardabweichung für 1V-MFH25 beträgt nun 10.2% für 1V-MFH45 beträgt sie 11.7%. Die dazugehörigen Regressionskoeffizienten m_1 sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Koeffizienten der Verschiedenen Modelle zur Berechnung der Klimakorrektur auf Monatsbasis der Gebäude MFH25 und MFH45, mit jeweils einer Variablen.

Gebäude Grundlage	Gewählte Variablen	m_1
MFH25	ΔT_{amb}	-0.339
MFH45	ΔT_{amb}	-0.460
MFH25 und MFH45	ΔT_{amb}	-0.399

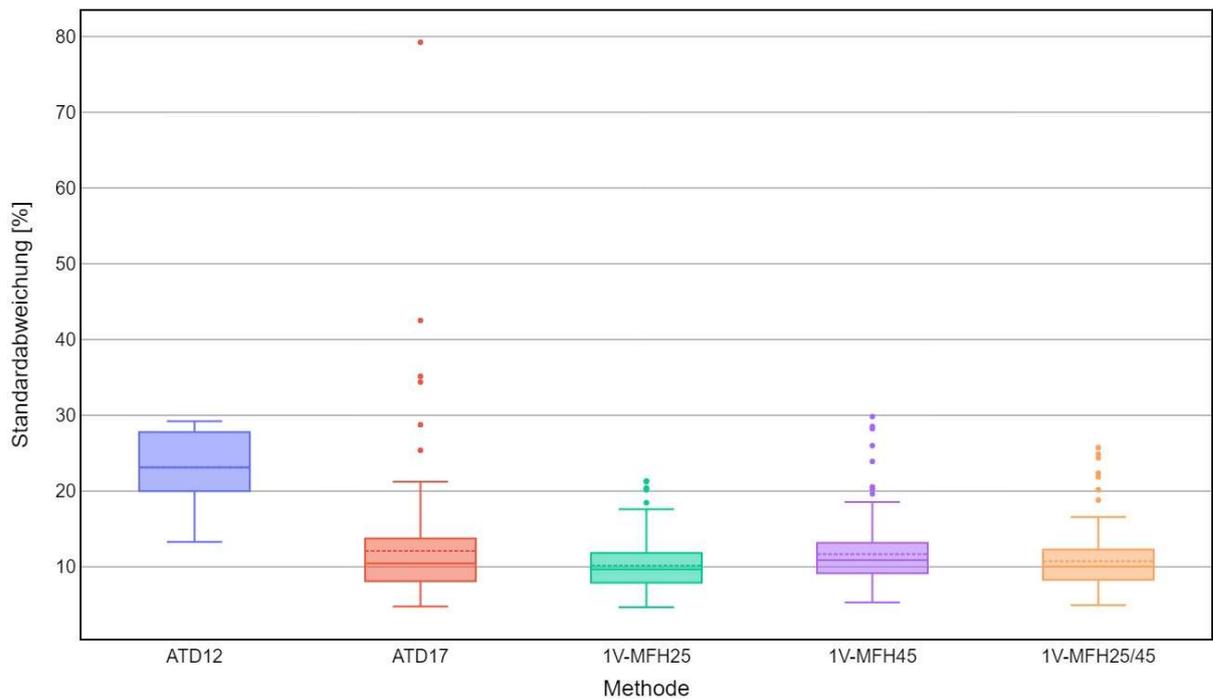


Abbildung 9: Vergleich der Methoden ATD12 und ATD17 mit den neu entwickelten monatlichen Methoden mit einer Variable, mit unterschiedlichen Gebäudekombinationen (nur MFH25, nur MFH45 und beide kombiniert), wenn angewandt auf Messdaten.

Eine weitere häufig verwendete Methode ist die Mittelung über 3 Jahre (3 Years). Diese wird mit den beiden bis jetzt besten Methoden verglichen in Abbildung 10. 3 Years schneidet deutlich besser ab, was jedoch mit Simulationen nur bedingt bestätigt werden konnte. Die 3-Jahres Methode scheint für die verfügbaren Messjahre besonders gut zu funktionieren (dies konnte auch mit Simulationsresultaten bestätigt werden), jedoch wenn andere Zeitabschnitte verwendet werden, schneidet diese Methode schlechter ab. Dieses Verhalten wird genauer im nächsten Abschnitt bezüglich der Auswertung auf Jahresbasis beschrieben.

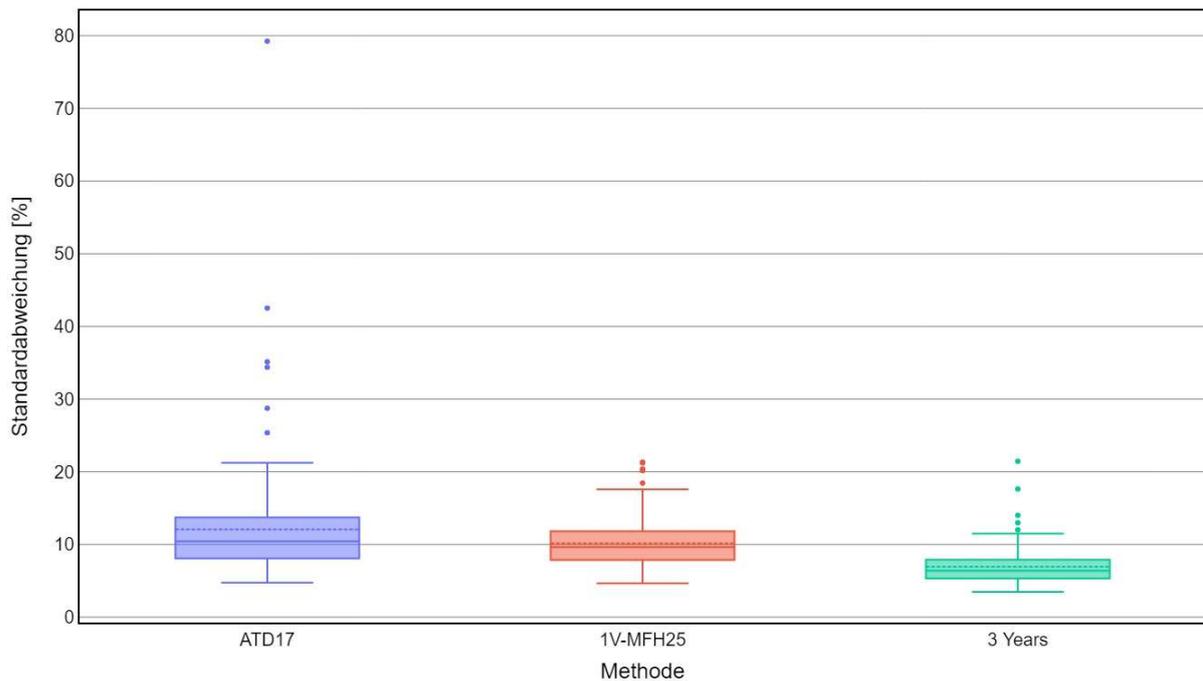


Abbildung 10: Vergleich der Methoden ATD17, 1V-MFH25 und 3 Years, wenn angewandt auf monatliche Messdaten.

3.5 Auswertung der 39-Jahre Simulation auf Jahresbasis

Bei der Erstellung des Modells auf Jahresbasis für die 39-Jahre Simulation mit den Gebäuden MFH25 und MFH45 werden ähnliche Mechanismen ersichtlich wie bei der Monatsevaluation. Die aufgrund des höchsten R^2 -Wertes gewählten Variablen werden in Tabelle 9 aufgelistet für die Auswertung der Gebäude MFH25 und MFH45. Die wichtigste Variable dabei ist $Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}$, dies im Gegensatz zur Monatlichen Auswertung. Die Wahl der drei wichtigsten Koeffizienten fällt gleich aus wie für die Monatsauswertung und das hinzunehmen der vierten Wechselwirkungs-Variable $Q_{H,ref} \cdot \Delta I_{G,H}$ bringt nur noch sehr kleine weitere Verbesserungen.

Tabelle 9: Veranschaulichung der schrittweisen Regression zur Bildung eines Modells der Gebäude MFH25 und MFH45, welches die Klimakorrektur auf Jahresbasis abschätzt. Die Verbesserung des R^2 -Wertes bezieht sich dabei auf den jeweils vorhergehenden Schritt mit einer Variable weniger.

Anzahl Variablen	Gewählte Variablen	R^2 -Wert	MAE [kWh/m ²]	Verbesserung R^2 -Wert [%]
1	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}$	0.946	1.11	-
2	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}$	0.978	0.72	3.2
3	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}, \Delta T_{amb}$	0.981	0.67	2.7
4	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}, \Delta T_{amb}, Q_{H,ref} \cdot \Delta I_{G,H}$	0.981	0.67	0.01

Die Koeffizienten der entsprechenden Modelle mit 1, 2 und 3 Variablen wird in Tabelle 10 gezeigt. Die Koeffizienten entsprechen dabei den Koeffizienten m_1 bis m_3 in folgender Gleichung, welche sich aufgrund der anderen Reihenfolge leicht von der Gleichung auf Monatsbasis (Gleichung 16) unterscheidet:

$$\text{Gleichung 17: } \Delta q_H = m_1 \cdot Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb} + m_2 \cdot \Delta I_{G,H} + m_3 \cdot \Delta T_{amb}$$



Auch hier wird der zweite und dritte Summand jeweils nur verwendet, wenn die entsprechende Variable auch verwendet wurde.

Tabelle 10: Koeffizienten der Verschiedenen Modelle zur Berechnung der Klimakorrektur auf Jahresbasis der Gebäude MFH25 und MFH45.

Anzahl Variablen	Gewählte Variablen	m ₁	m ₂	m ₃
1	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}$	-0.162	-	-
2	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}$	-0.142	-0.117	-
3	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}, \Delta I_{G,H}, \Delta T_{amb}$	-0.112	-0.108	-1.185

Bei einer Variation der Datengrundlage mit jeweils nur einer unabhängigen Variable wurden die in der folgenden Tabelle 11 aufgelisteten Regressionskoeffizienten gefunden. Da der Referenzverbrauch des Gebäudes bei nur einem Gebäude konstant ist, wurde ΔT_{amb} als unabhängige Variable gewählt, womit die Methode folgender Gleichung entspricht:

$$\text{Gleichung 18: } \Delta q_h = m_1 \cdot \Delta T_{amb}$$

Tabelle 11: Koeffizienten der Verschiedenen Modelle zur Berechnung der Klimakorrektur auf Monatsbasis der Gebäude MFH25 und MFH45, mit jeweils einer Variablen.

Gebäude Grundlage	Gewählte Variablen	m ₁
MFH25	ΔT_{amb}	-4.70
MFH45	ΔT_{amb}	-6.93
MFH25 und MFH45	$Q_{H,ref} \cdot \Delta T_{amb}$	-0.162

Die durchschnittliche Standardabweichung der untersuchten Methoden auf Jahresbasis ist in Tabelle 12 aufgelistet. Die beste der neuen Methoden (1V-MFH25) ist dabei nur vernachlässigbar besser als ATD17, die anderen neuen Methoden sind weniger gut darin die Klimakorrektur abzuschätzen, als die ATD17 Methode. Von ATD12 zu ATD17 gibt es jedoch eine deutliche Verbesserung. Im Gegensatz zur Simulationsanalyse schneidet wie auch bei der Monatlichen Untersuchung die 3 Jahres Methode am besten ab (3 Years).

Tabelle 12: Durchschnittliche Standardabweichung der untersuchten Methoden auf Jahresbasis.

Methode	Durchschnittliche Standardabweichung [%]
ATD12	5.53
ATD17	4.50
1V-MFH25/45	4.79
2V-MFH25/45	4.81
3V-MFH25/45	4.80
1V-MFH25	4.49
1V-MFH45	5.15
3 Years	3.83



Die Resultate werden in den folgenden Abbildungen visualisiert. Abbildung 11 zeigt dabei die Untersuchungen für die MFH25 und MFH45 kombiniert mit unterschiedlicher Anzahl Variablen (1V, 2V und 3V). Die Unterschiede sind jedoch eher klein, weshalb im nachfolgenden nur noch die 1V-MFH25/45 weiter aufgeführt wird, welche am wenigsten komplex ist.

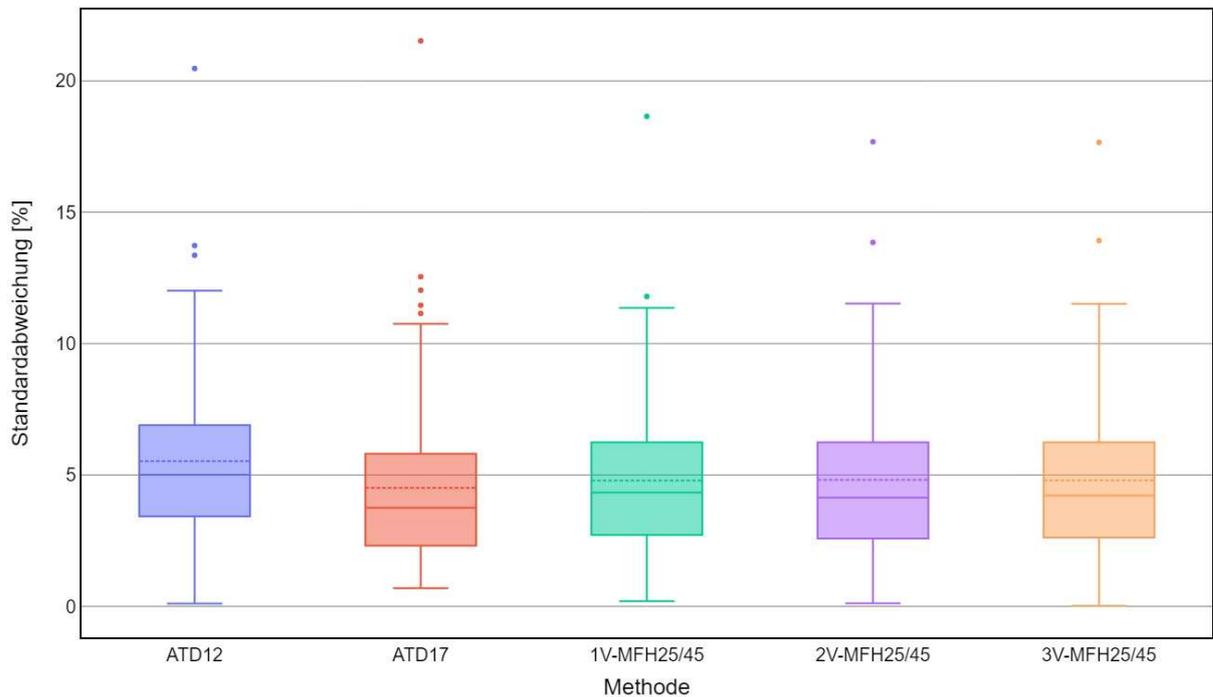


Abbildung 11: Vergleich der verschiedenen Methoden basierend auf den Simulationen für beide Gebäude MFH25 und MFH45 mit 1, 2 oder 3 Variablen auf Jahresbasis mit der ATD12 und der ATD17 Methode, wenn angewandt auf Messdaten.

Ein Vergleich für den Fall, wenn die Gebäude MFH25 und MFH45 auch einzeln betrachtet wurden, ist in Abbildung 12 dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass das MFH25 wie bei den monatlichen Untersuchungen besser abschneidet, da es auch auf der Grundlage des zur Validierung verwendeten Datensatzes entwickelt wurde.

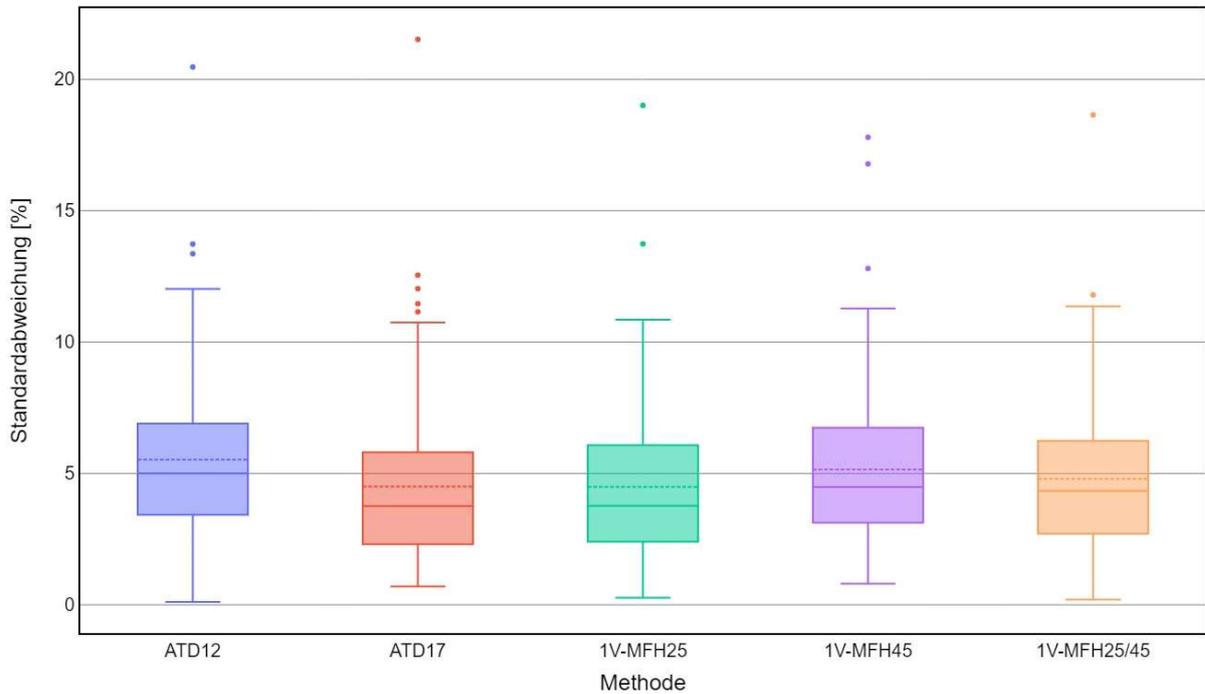


Abbildung 12: Vergleich der Methoden ATD12 und ATD17 mit den neu entwickelten Jahres-Methoden mit einer Variable, mit unterschiedlichen Gebäudekombinationen (nur MFH25, nur MFH45 und beide kombiniert), wenn angewandt auf Messdaten.

Abbildung 13 zeigt schliesslich noch den Vergleich der besten drei Methoden (ATD17, 1V-MFH25 und 3 Years). Dabei ist ersichtlich, dass die 3 Years Methode wie bei den monatlichen Untersuchungen zur kleinsten Standardabweichung führt.

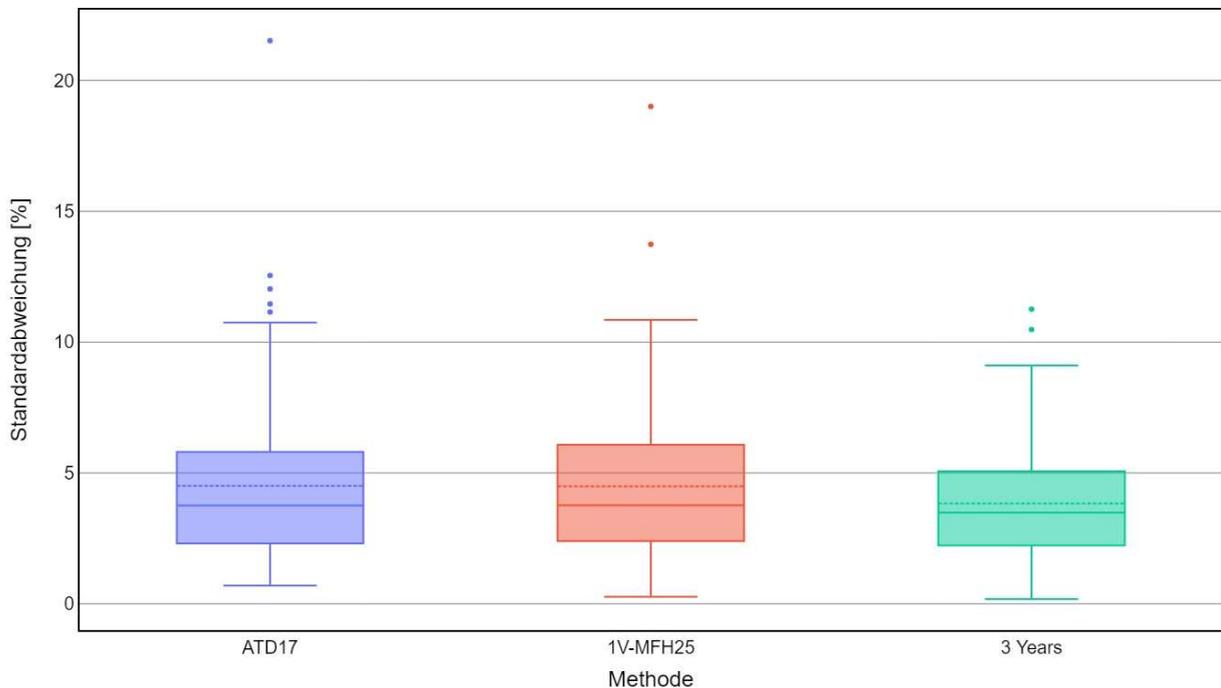


Abbildung 13: Vergleich der Methoden ATD17, 1V-MFH25 und 3 Years, wenn angewandt auf jährliche Messdaten.



Eine Vergleich der verschiedenen Methoden aufgrund von Simulationsdaten ist in Abbildung 14 dargestellt für zwei verschiedene Zeitabschnitte 1983-2000 und 2000-2019. Dabei ist ersichtlich, dass die 3 Years Methode zwar für den neueren Zeitabschnitt zu leicht besseren Resultaten führt als ATD17, beim älteren Zeitabschnitt ist jedoch das Gegenteil der Fall. Die 3 Years Methode muss also mit Vorsicht verwendet werden, grundsätzlich ist sie für eine erste Abschätzung sicher gut geeignet, wenn jedoch die letzten drei Jahre Extremjahre waren, kann die Methode jedoch auch ziemlich daneben liegen. Die 1V-MFH25 Methode ist hier deutlich besser, als wenn auf Messdaten angewandt, da ja die Methode mit dem gleichen Simulationsmodell entwickelt wurde.

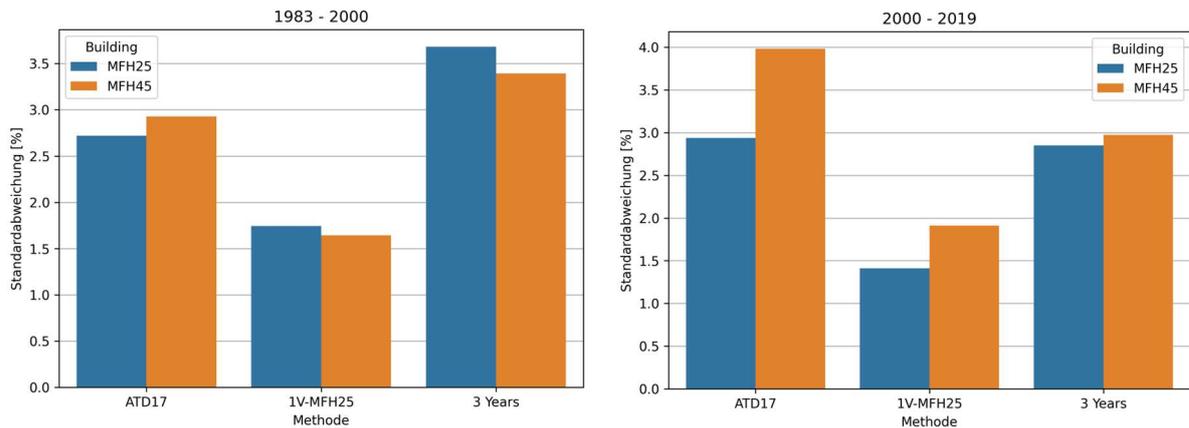


Abbildung 14: Vergleich der Methoden ATD17, 1V-MFH25 und 3 Years, wenn angewandt auf jährliche Simulationsdaten mit MFH25 und MFH45. Links: Jahre 1983-2000 Rechts: Jahre 2000-2019.

4 Schlussfolgerungen

Für die Klimakorrektur von Energiemessdaten wurden verschiedene neue Methoden entwickelt. Die einfache Methode 1V-MFH25, welche die Klimakorrektur anhand der mittleren Aussentemperatur schätzt, zeigt auf Monatebene eine Verbesserung gegenüber der gängigen ATD-Methode. Auf Jahresebene konnte keine der neuen Methoden eine signifikante Verbesserung gegenüber der ATD-Methode mit einer Basistemperatur von 17 °C erreichen. Lediglich die Anzahl der Ausreisser konnte durch die neuen Methoden deutlich reduziert werden, was jedoch eine Umstellung und den damit verbundenen Aufwand nicht rechtfertigt. Die Änderung der Basistemperatur von 12 °C auf 17 °C in der aktuellen SIA 380:2022 hat bereits eine deutliche Verbesserung für die ATD-Methode gebracht.

Auch in Zukunft wird es möglich sein, die ATD-Methode mit einer Basistemperatur von 17 °C für die Korrektur der Monatswerte zu verwenden, jedoch kann dies nicht automatisiert erfolgen, da eine manuelle Korrektur der einzelnen Monate erforderlich ist. Dies, weil sehr kleine Differenzen oder eine Division durch Null zu Problemen und unrealistischen Werten führen. Sollen Monatswerte automatisiert und mit höchstmöglicher Genauigkeit korrigiert werden, kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$Q_{H,1} = [(T_{amb,1} - T_{amb,2}) \cdot -0.399 + q_{H,2}] \cdot EBF,$$

wobei die Aussentemperatur (T_{amb}) der monatlichen Durchschnittstemperatur und $q_{H,2}$ dem gemessenen monatlichen spezifischen Heizwärmeverbrauch entspricht. Die Subskripte 1 und 2 stehen für die beiden zu vergleichenden Jahre. Die Gleichung gilt nur für Gebäude mit einem spezifischen Heizwärmebedarf zwischen 20 kWh/m² und 60 kWh/m². Für Minergie-P-



Gebäude ($< 15 \text{ kWh/m}^2$) oder ältere unsanierte Bestandsgebäude konnte aufgrund fehlender Messdaten keine Validierung durchgeführt werden.

Überraschend gute Ergebnisse erhält man, wenn man den Mittelwert der letzten drei Messjahre bildet. Dies scheint jedoch vor allem für die Klimadaten ab dem Jahr 2000 zu gelten. Die genauen Gründe hierfür sind nicht bekannt, jedoch könnte der deutliche Anstieg der mittleren Aussenlufttemperatur und der Globalstrahlung ab dem Jahr 2000 einen Einfluss haben (siehe Abbildung 4). Beim Mittelwertansatz ist zu beachten, dass Extremjahre schnell zu einer Fehlkorrektur führen und dieser Ansatz daher nur für eine erste Abschätzung verwendet werden sollte.

Die Tatsache, dass die Methodenentwicklung und -validierung mit Simulationen bessere Ergebnisse liefert als die Validierung mit Messdaten wie in der vorliegenden Studie, zeigt, wie wichtig es ist, reale Messdaten zu berücksichtigen. Eine rein rechnerische Methodenentwicklung kann, wie im Beispiel der SIA 380:2015, in der tendenziell zu niedrige Basistemperaturen definiert wurden, kann bei der Anwendung auf reale Daten zu Problemen führen. Für zukünftige Projekte ist es wichtig, dass ein noch grösserer Datensatz an Messdaten zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wurde im Projekt KliKo die Methodenentwicklung zur Korrektur des Klimakälteverbrauchs nicht aufgenommen, da für Bürogebäude nicht genügend Messdaten zur Verfügung standen. Weiter ist zu berücksichtigen, dass auch eine grosse Bandbreite an unterschiedlichen Gebäudetypen (z.B. Dämmstandards) im Datensatz vorhanden ist, um allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

5 Empfehlungen

- Die Methode *1V-MFH25* kann für das Auswerten der Klimakorrektur auf Monatsbasis empfohlen werden. Insbesondere wenn es um die Korrektur warmer Monate geht, ist diese Methode deutlich besser als die ATD-Methode ($T_b = 17 \text{ °C}$).
- Allgemein scheint die ATD-Methode gut zu funktionieren. Es wird deshalb empfohlen diese weiterhin für die Korrektur auf Jahresbasis zu verwenden, wobei aber die Wahl der Basistemperatur sehr entscheidend ist, eine Basistemperatur von 17 °C führt zu viel genaueren Ergebnissen als eine Temperatur von 12 °C .
- Es wird empfohlen, die Studie erst dann fortzusetzen und auf Verwaltungsgebäude auszuweiten (Heizwärme- und Klimakälteverbrauch), wenn ausreichend Messdaten zur Verfügung stehen, um die auf der Grundlage von Simulationen entwickelten Methoden zu validieren.



6 Bibliographie

- [1] Mojic I, Luzzatto M, Haller M, Lehmann M, Benz M, Van Velsen S. ImmoGap – Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2018.
- [2] Factsheet: Gebäudepark 2050 - Vision des BFE. Bern: Bundesamt für Energie BFE; 2017.
- [3] Kemmler A. Temperatur- und Strahlungsabhängigkeit des Energieverbrauchs im Wärmemarkt II - Empirische Analyse von täglichen Gas-Einspeisemengen im Versorgungsgebiet der ewl. Bern: 2010.
- [4] Gmür C. Faktenblatt Energiekennlinien im Kt. Zürich. Zürich: AWEL; 2018.
- [5] Bosshard I, Moser C, Haller M. VenTSol - Erfassung des Benutzerverhaltens bezüglich Lüftung, Verschattung und Raumtemperatur in Abhängigkeit des Aussenklimas. Rapperswil: Bundesamt für Energie BFE; 2021.
- [6] Mojic I, Haller M. KlimaGapLite – Literaturrecherche zu den bestehenden Methoden zur Witterungsbereinigung im Gebäudebereich. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2019.
- [7] SIA. SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik 2010.
- [8] Klein et al SA. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA 2017. <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/> (accessed September 5, 2022).
- [9] Konferenz kantonaler Energiedirektoren, editor. Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE 2014) 2018.
- [10] Anwendungshilfe zu den Gebäudestandards Minergie/Minergie-P/Minergie-A 2019.
- [11] Hedderich J, Sachs L. Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R/. 14., bearb. u. erg. Aufl. Berlin, Heidelberg [ua] 2012.
- [12] Fahrmeir L, Brachinger HW, Hamerle A, Tutz G. Multivariate statistische Verfahren. Walter de Gruyter; 1996.
- [13] Adler J. R in a nutshell: A desktop quick reference. O'Reilly Media, Inc.; 2010.