



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

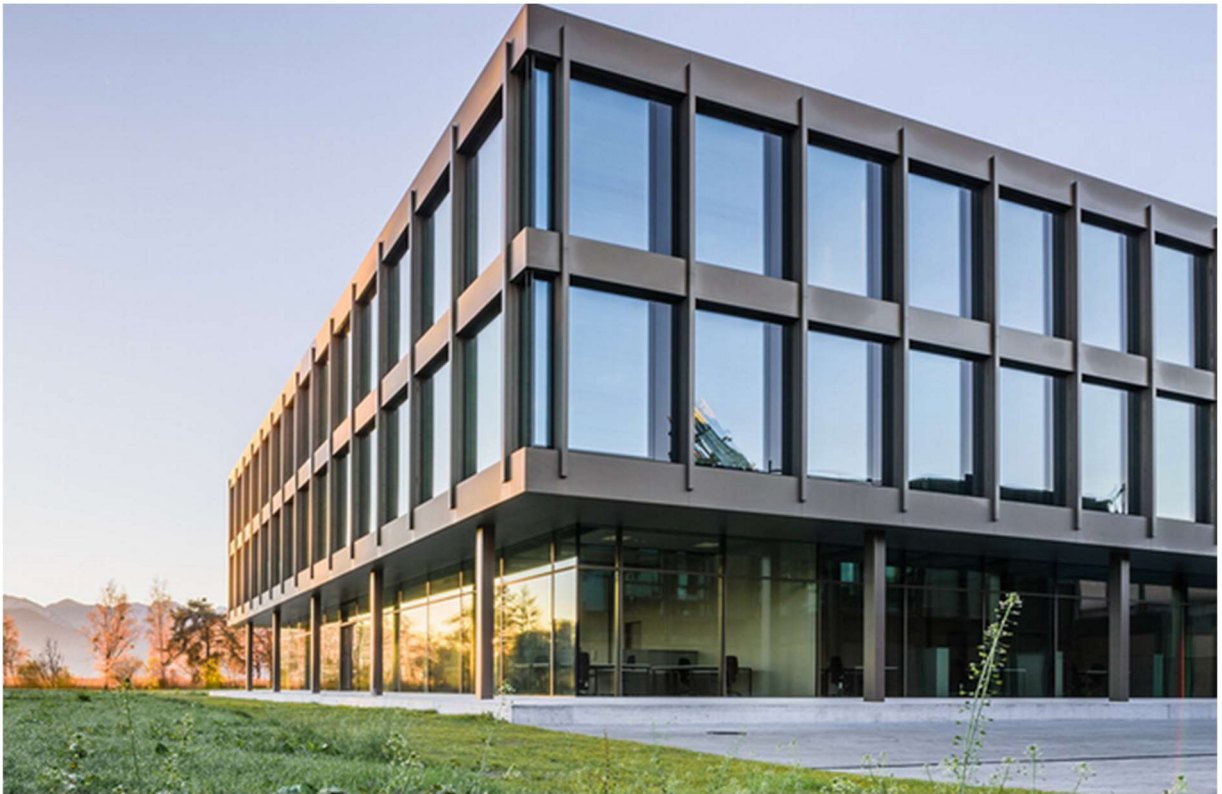
Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30.09.2023

OptiPower

Untersuchung der optimalen Auslegung der
Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn-
und Verwaltungsgebäude



© OST: Forschungsgebäude in Rapperswil-Jona



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**



IET | Institut für
Energietechnik

Datum: 30.09.2023

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

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

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Lindenhofstrasse 21
8001 Zürich
www.stadt-zuerich.ch

Kanton Zürich
Baudirektion – AWEL
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich
www.zh.ch/energie

Kanton Basel-Stadt
Amt für Umwelt und Energie
Spiegelgasse 15, Postfach
4001 Basel
www.aue.bs.ch

Subventionsempfänger/innen:

SPF Institut für Solartechnik & IET Institut für Energietechnik
OST Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil SG
www.spf.ch / www.ost.ch/iet

Autor/in:

Igor Bosshard, SPF, igor.bosshard@ost.ch
Marcel Troxler, SPF, marcel.troxler@ost.ch
Amina Guliyeva, SPF, amina.guliyeva@ost.ch
Krisztina Kelevitz, SPF, krisztina.kelevitz@ost.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@ost.ch
Christoph Meier, IET, christoph.meier@ost.ch
Marc Werro, IET, marc.werro@ost.ch
Carsten Wemhöner, IET, carsten.wemhoener@ost.ch
Ruben Novoa-Herzog, Universität Genf, ruben.novoa@unige.ch
Pierre Hollmüller, Universität Genf, pierre.hollmuller@unige.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch, Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502186-01

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

Zusammenfassung

Erfahrungen aus verschiedenen P&D-Projekten sowie Einschätzungen von Experten lassen vermuten, dass Wärme- und Kälteerzeuger häufig überdimensioniert sind. Dies konnte nun in der vorliegenden Studie «OptiPower» bestätigt werden. Bei den über 600 untersuchten Mehrfamilienhäusern (Neubauten) beträgt die Überdimensionierung der Wärmepumpenanlagen im Median 40%, wobei es Anlagen gibt, die bis zu 80% überdimensioniert sind. Bei den zehn untersuchten Bürogebäuden ist die Situation mit einer Überdimensionierung der Heizleistung zwischen 100 und 300% prekärer. Die Überdimensionierung wirkt sich bei den Wärmepumpen und Kältemaschinen mehrheitlich negativ aus. Im Fall der Sole-Wasser-Wärmepumpe kann die Effizienz unter Umständen sogar besser sein. Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass es in der Praxis verschiedene Möglichkeiten gibt, der Überdimensionierung entgegenzuwirken. Entsprechende Empfehlungen wurden im Projekt ausgearbeitet.

Résumé

L'expérience tirée de divers projets pilotes et de démonstration, ainsi que les évaluations d'experts, suggèrent que les systèmes de chauffage et de refroidissement sont souvent surdimensionnés. L'étude "OptiPower" l'a confirmé. Dans les plus de 600 bâtiments multifamiliales (nouveaux bâtiments) étudiés, le surdimensionnement médian des systèmes de pompe à chaleur est de 40 %, bien que certains systèmes soient surdimensionnés jusqu'à 80 %. Dans les dix immeubles de bureaux étudiés, la situation est plus critique, ayant 200 à 300% de surdimensionnement. Le surdimensionnement a un effet négatif sur la majorité des pompes à chaleur. Dans le cas de la pompe à chaleur eau glycolée/eau, l'efficacité peut même être améliorée dans certaines circonstances. Des études approfondies ont montré qu'en pratique, il existe plusieurs moyens de lutter contre le surdimensionnement. Les recommandations correspondantes ont été élaborées dans le cadre du projet.

Summary

Experience from various pilot and demonstration projects as well as assessments by experts suggest that heating and cooling systems are often oversized. This has now been confirmed in the present study "OptiPower". In the more than 600 multi-family buildings (new builds) studied, the median oversizing of heat pump systems is 40%, although there are systems that are up to 80% oversized. In the ten office buildings studied, the situation is more critical, with oversizing between 200 and 300%. The oversizing has a negative effect on the majority of heat pumps. In the case of brine-to-water heat pumps, the efficiency may even be better under certain circumstances if the heat pump is oversized. Detailed investigations have shown that in practice there are various ways to counteract oversizing for those that are currently in operation in buildings. Corresponding recommendations were elaborated in the project.



Take-home messages

- Die Auswertung umfangreicher Messdaten bestätigt die in der Praxis vermutete Überdimensionierung der Wärme- und Kälteerzeuger. Diese liegt bei Wohngebäuden im Median bei +40% und bei Verwaltungsgebäuden zwischen +100% und +300%.
- Die festgestellte Überdimensionierung kann bei Wohngebäuden mit einer im Projekt erarbeiteten einfachen Plausibilisierungsmethode reduziert werden, bei Verwaltungsgebäuden wird die Anwendung der neuen Norm SIA 380/2:2022 (dynamische Gebäudesimulation) empfohlen. Die Mehrkosten einer Überdimensionierung übersteigen die Zusatzkosten einer dynamischen Gebäudesimulation um ein Vielfaches.
- In fast allen Fällen der Verwaltungsgebäude wäre eine Wärmeerzeugerleistung nach Norm-Heizlast ausreichend gewesen, jedoch führt die Berücksichtigung von hohen Zuschlägen wie z.B. Luftherhitzer oft zu einer deutlichen Überschätzung des Leistungsbedarfs. Hier besteht Optimierungspotential in der Normung.
- Eine Überdimensionierung muss nicht in jedem Fall die Effizienz des Anlagenbetriebs verschlechtern, bei Sole-Wasser-Wärmepumpen kann die Effizienz auch steigen. Allerdings gehen diese Effizienzsteigerungen mit hohen Kosten einher, so dass eine Überdimensionierung dennoch nicht empfehlenswert ist.
- Insbesondere die Vorteile der Inverterregelung können durch höhere Überdimensionierung konterkariert werden. Dies ist besonders kritisch bei Luft-Wasser Wärmepumpen, die eine steilere Leistungskennlinie aufweisen. Daher sollte speziell in diesen Fällen eine sorgfältige und eher knappe Auslegung der Wärmepumpe erfolgen, damit die Vorteile der Inverterregelung voll zum Tragen kommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	17
1.2	Motivation des Projektes.....	17
1.3	Projektziele	18
2	Übersicht der aktuellen Normen.....	18
3	Vorgehen und Methode	23
3.1	Gebäude- und Anlagenbeschreibung	25
3.2	Ermittlung der Überdimensionierung	31
3.3	Gebäudesimulationen.....	34
3.4	Systemsimulationen.....	40
4	Ergebnisse und Diskussion.....	52
4.1	Planung versus Messung.....	52
4.2	Einfluss auf die Wärmepumpen	85
4.3	Wirtschaftlichkeit.....	112
5	Schlussfolgerungen	116
5.1	Auswertung Gebäude	116
5.2	Auswertung Gebäudetechnik.....	121
5.3	Empfehlungen.....	124
6	Ausblick und offene Forschungsfragen	126
7	Literaturverzeichnis.....	127



Abkürzungsverzeichnis

EBF	Energiebezugsfläche
EPGF	Energy Performance Gap Factor
GWR	Gebäude- und Wohnungsregister
JAZ	Jahresarbeitszahl
MFH	Mehrfamilienhaus
PM	Performance Map
RCP	Representative Concentration Pathway
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SNG	Systemnutzungsgrad
STASCH	Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WW	Warmwasser

Synthese

Erfahrungen aus verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten sowie Einschätzungen von Experten lassen vermuten, dass Wärme- und Kälteerzeuger häufig überdimensioniert sind. Im BFE-Projekt ImmoGap [1] konnte anhand der Untersuchung von 65 Mehrfamilienhäusern gezeigt werden, dass die Wärmeerzeuger in 75% der Objekte zwischen 10% und 60% überdimensioniert sind. Trotz des breiten Konsenses in der Fachwelt, dass die Überdimensionierung ein Problem darstellt, gab es für die Schweiz bisher keine systematische Untersuchung mit realen Messdaten. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsgebäude, da diese bezogen auf die Energiebezugsfläche den grössten Anteil am Neubau in der Schweiz haben. Insgesamt wurden zehn Bürogebäude und insgesamt 251 Heizungsanlagen von neuen Mehrfamilienhäusern untersucht. Zusätzlich wurden 58 Fernwärmestationen von Mehrfamilienhäusern aus dem Bestand separat ausgewertet.

Auswertung Mehrfamilienhäuser

In Abbildung 1 ist die aus den Messdaten ermittelte spezifische Heizleistung für die neuen Mehrfamilienhäuser in Abhängigkeit des gemessenen spezifischen Heizwärmeverbrauchs dargestellt (orange Punkte). Zum Vergleich ist die installierte spezifische Wärmeerzeugerleistung (blaue Punkte) und die aus den Planungsunterlagen ermittelte Heizleistung (grüne Punkte) aufgetragen. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Auswertung sind:

- Deutliche Abhängigkeit der gemessenen Heizleistung vom Heizwärmeverbrauch (orange Punkte), was auch nahe liegt, da bei guter Gebäudehülle auch die Leistung geringer ist als bei einem schlecht gedämmten Gebäude.
- Die Planwerte und die installierte Wärmeerzeugerleistung zeigen eine deutlich geringere Abhängigkeit vom Heizwärmeverbrauch. Bei gleichem Heizwärmeverbrauch kann die ausgewiesene Leistung (geplant oder installiert) sehr unterschiedlich sein (hohe Streuung der Datenpunkte, geringes Bestimmtheitsmass).
- Die Planungswerte übersteigen die tatsächlich benötigte Leistung zum Teil deutlich. Die installierte Wärmeerzeugerleistung weist gegenüber den Planungswerten eine zusätzliche Überdimensionierung auf.

In Abbildung 2 ist die Überdimensionierung als Histogramm dargestellt, dabei bezieht sich die relative Überdimensionierung auf die aus den Messdaten bestimmte Heizleistung. Im Median kann eine Überdimensionierung (installierte Leistung) von +40% festgestellt werden, wobei im Schnitt auf den Planungswert weitere 12% draufgeschlagen werden (+2.8 W/m²).

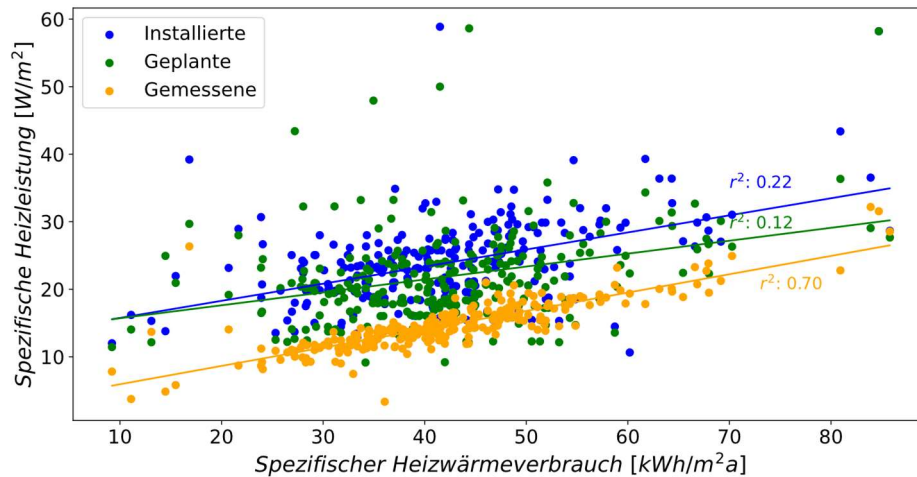


Abbildung 1: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs (Mittelwert aller Messjahre). Es wird zwischen drei Fällen unterschieden: Installierte spez. Heizleistung (blau), aus Messdaten ermittelte spez. Heizleistung (orange) und aus den Planungsunterlagen ermittelte spez. Heizleistung (grün).

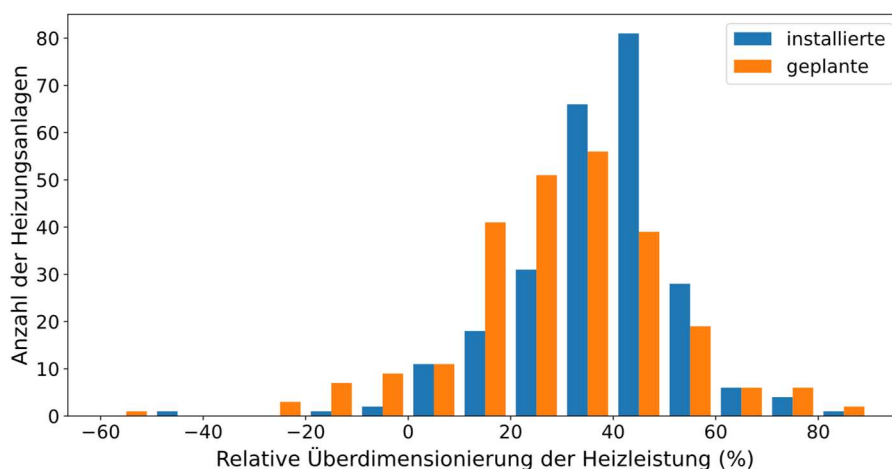


Abbildung 2: Histogramm der Überdimensionierung bezogen auf den Vergleich von gemessener Leistung zu geplanter bzw. installierter Heizleistung.

Um die Überdimensionierung und insbesondere die Streuung der Leistung bei gleichem Heizwärmebedarf zu reduzieren, wurde eine Methode entwickelt, mit der die berechnete Norm-Heizlast anhand von Messdaten in der Praxis plausibilisiert werden kann. Dazu wird ein linearer Fit durch die vorliegenden Messdaten gelegt (siehe Abbildung 3, rote Linie). Es zeigt sich, dass die gemessene Leistung in der überwiegenden Zahl der Fälle im Bereich von $\pm 20\%$ um diesen linearen Fit liegt¹. Somit kann aus dem spezifischen Heizwärmeverbrauch eine realistische spezifische Heizleistung ermittelt werden. Bei grösseren Abweichungen vom Fit sollte die Berechnung der Norm-Heizlast überprüft werden. Weitere Details mit den entsprechenden Gleichungen sind im Kapitel 4.1.3 zu finden.

¹ Wobei bei sehr gut gedämmten Gebäuden wie Passivhäusern mit einem Heizwärmebedarf deutlich unter 30 kWh/m^2 der Fit nur bedingt gültig ist.

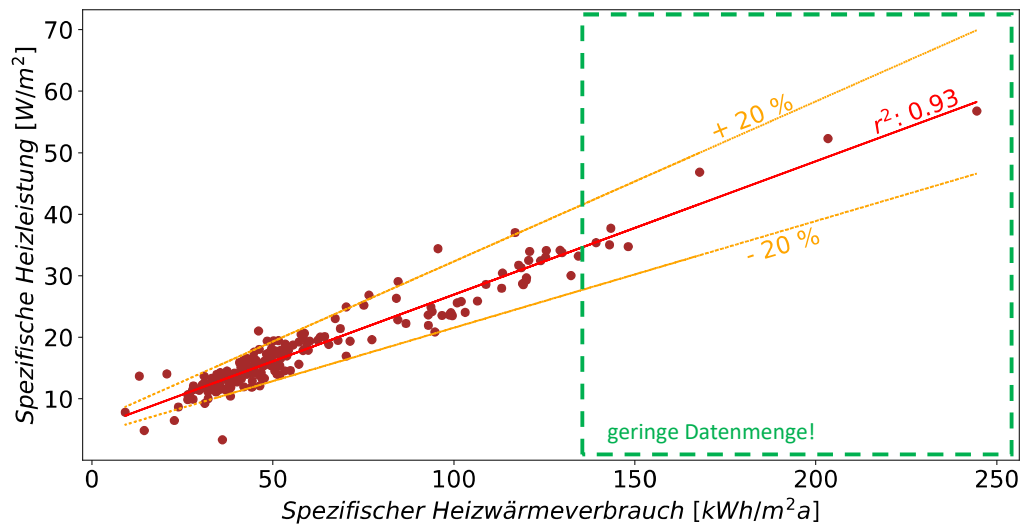


Abbildung 3: Real benötigte spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des Heizwärmeverbrauchs für neue und bestehende Mehrfamilienhäuser. Die gelben Linien zeigen die Abweichung plus und minus 20% zum linearen Fits (rote Linie) mit einem Bestimmtheitsmass (r^2) von 0.93.

Auswertung Verwaltungsgebäude

Bei den Bürogebäuden ist die Situation deutlich dramatischer, wie Abbildung 4 zeigt, in der die Überdimensionierung bezogen auf die installierte Leistung für die zehn Gebäude dargestellt ist. Die Überdimensionierung wurde ermittelt, indem die tatsächliche Leistung aus den Messdaten mit den Leistungsangaben der Wärme- bzw. Kälteerzeuger verglichen wurde. Sieben Gebäude haben ein bivalentes Heizsystem bestehend aus Wärmepumpe (orange) und Gaskessel (grau schraffiert). Bei diesen Gebäuden fällt auf, dass bis auf das Gebäude Neuhof, welches mit Baujahr 1990 schon älter ist, die Heizleistung der Wärmepumpen ausreichen würde, um die benötigte Heizleistung abzudecken. Die installierte Kühlleistung ist bei allen Gebäuden deutlich grösser als der tatsächliche Bedarf, wobei die extreme Überdimensionierung beim Gebäude «3-Plan» darauf zurückzuführen ist, dass dieses Gebäude aufgrund einer sehr gut funktionierenden Nachtauskühlung kaum aktiv gekühlt werden muss.

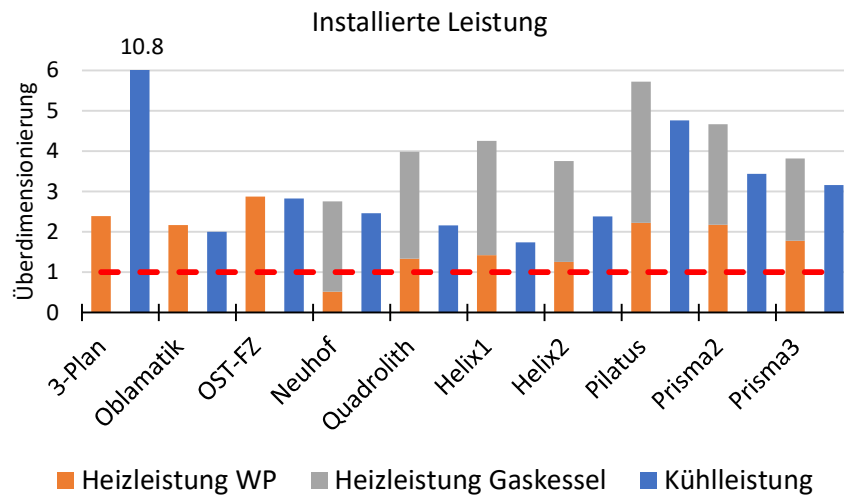


Abbildung 4: Verhältnis der aus Messdaten ermittelten Heiz- bzw. Kühlleistung zur installierten Heiz- bzw. Kühlleistung, ermittelt aus den Angaben der Wärme- bzw. Kälteerzeuger. Die rot-gestrichelte Linie (Verhältnis von 1) zeigt die Übereinstimmung von Messung und Installation und damit eine Überdimensionierung von 0%.

Neben der installierten Leistung ist es auch wichtig, die aus der Planung ermittelte Leistung mit dem tatsächlichen Bedarf zu vergleichen, da insbesondere bei bivalenten Anlagen Redundanzüberlegungen teilweise Einfluss auf die installierte Leistung haben können. In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die geplante Heizleistung die tatsächlich benötigte Heizleistung um 90% bis 300% übersteigt. Bei der Kühlleistung wird je nach Gebäude bis zu einem Faktor 5.5 mehr Kühlleistung ausgewiesen als tatsächlich benötigt wird (Ausnahme Gebäude «3-Plan»). Dies verdeutlicht den Handlungsbedarf bei den Bürogebäuden. Die detaillierte Untersuchung von drei Bürogebäuden zeigt, dass mit Hilfe von dynamischen Gebäudesimulationen und der Anwendung der neuen Norm SIA 380/2:2022 eine Überdimensionierung vermieden oder zumindest massiv reduziert werden kann.

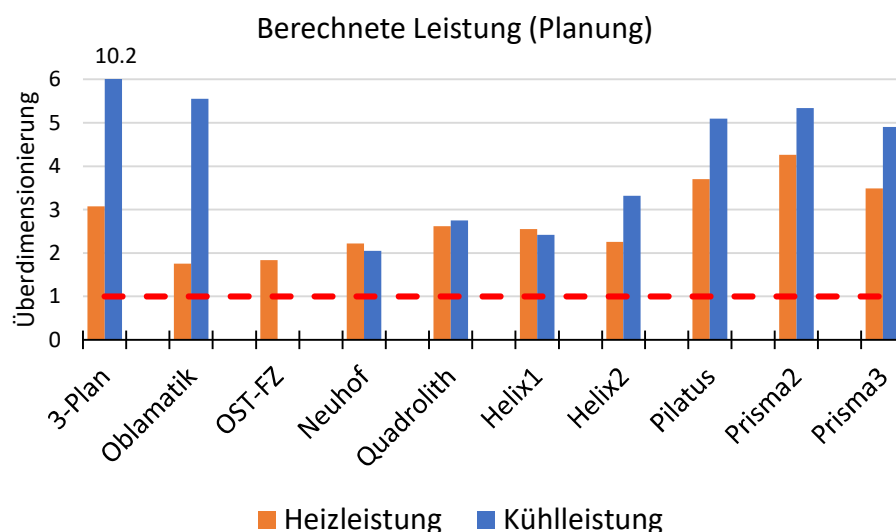


Abbildung 5: Verhältnis der aus Messdaten ermittelten Heiz- bzw. Kühlleistung zur geplanten Heiz- bzw. Kühlleistung, ermittelt aus den Angaben der Wärme- bzw. Kälteerzeuger und den zur Verfügung gestellten Hydraulik-Schemata. Die rot-gestrichelte Linie (Verhältnis von 1) zeigt die Übereinstimmung von Messung und Planung und damit eine Überdimensionierung von 0%.

Die Berücksichtigung von Leistungszuschlägen für Luftherhitzer (nach SIA 384/1) trägt wesentlich zur beobachteten Überdimensionierung bei den Verwaltungsgebäuden bei. In fast allen untersuchten Bürogebäuden wäre die nach Norm-Heizlast berechnete Leistung ausreichend gewesen. Im Kühlfall erhöht neben der Berücksichtigung der Luftherhitzer auch die oft überschätzte Kühlleistung der Server (bis zu Faktor 10) die Kälteleistung. Leider wird in der Norm nur wenig Spielraum eingeräumt, die Wärmeerzeuger auch kleiner zu dimensionieren. Es wäre wünschenswert, wenn in Absprache mit der Bauherrschaft auf eine Untergrenze verzichtet werden könnte. Dies würde es erlauben, nachträglich bei konkretem Bedarf eine Erhöhung der Leistung zu realisieren (z.B. durch eine zusätzliche Wärmepumpe).

Die Auswertung der Klimadaten der letzten 22 Jahre für Zürich zeigt, dass eine knappe oder sogar leichte Unterdimensionierung (-20%) kaum einen Einfluss auf die Behaglichkeit der Bewohner hat, da die Wärmekapazität des Gebäudes sehr kalte Tage gut ausgleichen kann. Bei Extremereignissen wie im Jahr 2012 mit mehrtägigen Kälteperioden, was in 22 Jahren nur einmal vorkam, kann die Raumtemperatur bei "knapper" Dimensionierung auf 19-20 °C und bei Unterdimensionierung unter 19 °C absinken. Aus Sicht der Autoren kann aufgrund der Ergebnisse eine «knappe» Dimensionierung ohne Reserven in die Praxis umgesetzt werden, eine Unterschreitung der Norm-Heizlast wird nicht empfohlen.

Die Berücksichtigung der Klimadaten mit dem Klimaszenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) führte zu keiner signifikanten Reduktion der Heizleistung im Auslegungsfall. Aufgrund der aktuellen Klimamodelle ist davon auszugehen, dass die Auslegungstemperatur (Mittelwert der vier minimalen jährlichen Tagesmittelwerte) durch den Klimawandel nicht wesentlich beeinflusst wird. Auch die in Bearbeitung befindliche SIA 2028 (neue 30-Jahres-Periode) wird trotz höherer Jahresmitteltemperaturen voraussichtlich keine signifikant höheren Auslegungstemperaturen ausweisen.

Einfluss auf Wärmepumpen und Investitionskosten

Aufbauend auf den Resultaten aus der Situationsanalyse wurde der Einfluss der Überdimensionierung auf die Wärmeerzeugung untersucht. Dabei wurde der Fokus auf Wärmepumpen gelegt und mit Hilfe von Systemsimulationen untersucht, wie sich die energetische Effizienz und die Wirtschaftlichkeit verhalten. Dazu wurde ein einheitliches Lastprofil für den Heizbetrieb des Forschungszentrums der OST zugrunde gelegt. Die Eigenschaften der Wärmepumpe wurden als Performance Map einer Inverter-geregelten Sole-Wasser Wärmepumpe modelliert, deren Parametrierung aus Hersteller- und Messdaten erstellt wurde. Die anderen Wärmepumpentypen bzw. Verdichterregelungen einer festen Drehzahl mit Ein-Aus-Betrieb und einer kaskadierten Wärmepumpe mit mehreren Verdichtern wurden für eine feste Drehzahl von 50 Hertz aus derselben Performance Map abgeleitet um die Vergleichbarkeit zu erhöhen.

Durch Skalierung der Performance Map können einerseits unterschiedliche Leistungen für eine Aufteilung auf mehrere Verdichter erzeugt werden, andererseits auch eine Überdimensionierung in Bezug auf die Gebäudelast implementiert werden. Die Auswertungen wurden für Heizsysteme mit geringer Kapazität im Heizkreis entsprechend typischer Wärmeübergabesysteme für Büroanwendung wie Deckenheizung, Konvektoren und Radiatoren durchgeführt. Dies stellt den eher kritischen Fall dar, da eine höhere Kapazität im Heizkreis, wie sie etwa bei bauteilintegrierten Übergabesystemen wie Fussbodenheizung oder thermoaktiven Bauteilsystemen vorhanden ist, für stabilere Betriebsbedingungen, längere Laufzeiten und eine



bessere Effizienz der Wärmepumpe sorgt. Daher wurde auch eine Integration eines Heizungspufferspeichers mit unterschiedlichen Speichergrossen betrachtet. Die Überdimensionierung wurde von 0% (korrekte Auslegung auf die Normheizlast von 92 kW) bis 100% Überdimensionierung ausgewertet. Die Untersuchungen wurden für Sole-Wasser Wärmepumpen mit einem Erdwärmesondenfeld als Wärmequelle und für Luft-Wasser-Wärmepumpen durchgeführt. Im Falle der Sole-Wasser Wärmepumpe wurde das Erdwärmesondenfeld jeweils entsprechend überdimensioniert.

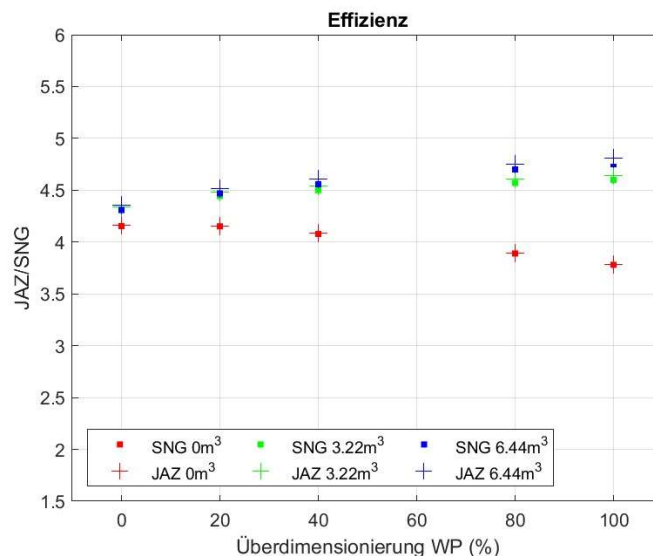


Abbildung 6: Effizienz in Abhängigkeit der Überdimensionierung für eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit fester Drehzahl und Ein-Aus-Regelung sowie die Abhängigkeit mit integriertem Pufferspeicher.

Die Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Jahresarbeitszahl (JAZ) und des Systemnutzungsgrades (SNG). Die JAZ setzt die produzierte Wärme der Wärmepumpe ins Verhältnis zum elektrischen Aufwand für den Verdichter, die Wärmequelle und die Regelung. Der SNG bezieht sich auf die Systemgrenze Wärme am Speicheraustritt. Für eine Ein-Aus geregelte Wärmepumpe und die Variation der Überdimensionierung von 0% – 100% erkennt man, dass die Überdimensionierung von Wärmepumpe und Sondenfeld die Effizienz der Wärmepumpe nicht vermindern, sondern die Effizienz mit steigender Überdimensionierung zunimmt. Die guten Arbeitszahlen bis ca. 4.7 sind auf die für geringe Temperaturdifferenzen optimierte Performance-Map der betrachteten Wärmepumpe zurückzuführen. Die Erklärung für die ansteigende Effizienz liegt in der Überdimensionierung des Erdsondenfeldes, welche bei der geringeren realen Heizlast des Gebäudes im überdimensionierten Fall eine höhere Quellentemperatur liefert.

Allerdings fällt die Jahresarbeitszahl bei höherer Überdimensionierung wieder ab. Dies liegt an der betrachteten niedrigen Kapazität im Heizsystem in Kombination mit der Überdimensionierung der Wärmepumpe, da in der Regelung für den Verdichter eine Mindestlaufzeit von 10 min vorgegeben wird. Ist die geringe Kapazität des Heizsystems aufgrund der hohen Leistung früher aufgeladen, dann steigt die Senktemperatur an und die Effizienz sinkt wieder ab. Wird die Kapazität hingegen durch einen integrierten Speicher erhöht, kann die volle Leistung während der Laufzeit des Verdichters aufgenommen werden und die Senktemperatur steigt nicht an, so dass die gute Effizienz im SNG erhalten bleibt.

Abbildung 7 zeigt die entsprechende wirtschaftliche Auswertung als Investitionskosten für die Variation der Überdimensionierung. Es ist offensichtlich, dass die Kosten der Erdsonden die anderen Systemkomponenten dominieren. Dies liegt vor allem an dem progressiven Anstieg der Kosten mit grösserem Erdsondenfeld durch die mangelnde Regeneration der inneren Sonden im Feld, die weniger Leistung liefern. Damit muss die Sondenanzahl überproportional erhöht werden. Je grösser also die Überdimensionierung, desto höher werden die Grenzkosten der Investition für den zusätzlichen Effizienzgewinn, so dass der Effizienzzuwachs immer teurer erkaufte wird.

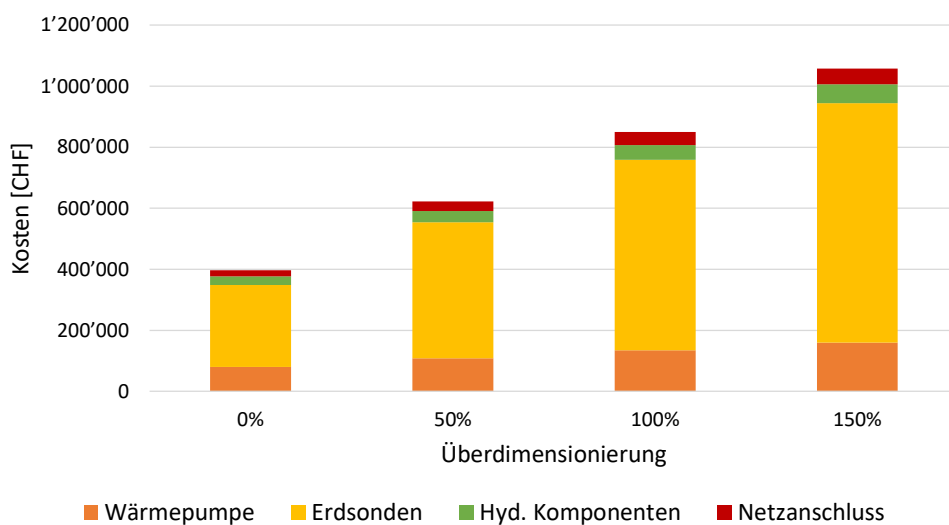


Abbildung 7: Geschätzte Kosten eines Wärmepumpensystems mit Erdwärmesonden für verschiedene Annahmen der Überdimensionierung, aufgeteilt auf die wichtigsten Komponenten. Als Basis (0% Überdimensionierung) wird ein Heizleistungsbedarf von 92 kW zu Grunde gelegt.

Weiterhin steigt auch der Materialeinsatz für das progressiv vergrösserte Erdsondenfeld, so dass auch die ökologische Belastung der grauen Energie und Emissionen ansteigt.

Eine Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Verdichter bzw. Kaskadierung der Wärmepumpen zeigt wegen der besseren Leistungsregelung ein recht robustes Verhalten gegenüber einer Überdimensionierung. Bei wechselweisem Einsatz der Verdichter sinkt die Laufzeit pro Verdichter und ein Taktbetrieb beschränkt sich auf den jeweils letztzugeschalteten Verdichter. Durch eine geringere Belastung des Erdsondenfeldes nimmt die Effizienz zu. Erkauft wird das bessere Betriebsverhalten bei Kaskadierung durch eine höhere Komplexität der Anlage und damit einer komplexeren Regelung und allfällig höheren Kosten.

Die beste Effizienz wird von einem Inverter-geregelten Verdichter bei korrekter Dimensionierung durch die gute Leistungsregelung im Bereich von 30%-100% der Auslegungsleistung erreicht. Allerdings wird der Regelbereich mit steigender Überdimensionierung "übersprungen", so dass der Inverter schneller in einen ineffizienten Taktbetrieb übergeht. Dies kann durch Speicherintegration entschärft werden, da der Speicher ein Laden mit höherer Leistung erlaubt und so den Regelbetrieb verlängert. Die Aufteilung auf zwei Verdichter mit Inverterregelung erreicht die besten Regeleigenschaften, mit denen quasi der gesamte Betriebsbereich abgedeckt werden kann und so bei korrekter Auslegung ein Taktbetrieb



weitgehend vermieden wird. Entsprechend robuster reagiert die Kombination auf Überdimensionierung.

Das Problem der Inverterregelung ist bei Luft-Wasser Wärmepumpen durch die steilere Leistungskennlinie und damit höhere Leistungszunahme bei steigender Aussentemperatur noch ausgeprägter. Bei Überdimensionierung wird daher der Regelbereich schnell reduziert. Die Problematik ist in *Abbildung 8* anhand des Leistungsdiagramms dargestellt. Der grüne Bereich stellt idealisiert die Heizleistungsanforderung des Gebäudes dar, die blauen Betriebspunkte zeigen die Leistung einer korrekt dimensionierten Wärmepumpe, die orangen die einer 100% überdimensionierten.

An den Betriebspunkten wird deutlich, dass die korrekt dimensionierte Wärmepumpe immerhin noch bis zu einer Aussentemperatur von 2 °C im Regelbereich des Inverters liegt, bevor ein Taktbetrieb bei 30% Leistung einsetzt. Bei 100% Überdimensionierung startet die Regelung schon bei 50% und erreicht die Regelgrenze von 30% bereits bei einer Aussentemperatur von -5 °C, so dass der Bereich der guten Leistungsregelung des Inverters fast vollständig übersprungen wird. Eine sorgfältige Auslegung ist daher insbesondere bei Luft-Wasser-Wärmepumpen wichtig und sollte eher knapp erfolgen, da die Auswertung der Klimadaten der letzten 22 Jahre zeigt, dass es kaum noch kritische Tage gibt, an denen eine Unterdimensionierung zu Problemen führen würde. Damit besteht auch keine Gefahr, dass die Beheizung über einen Heizstab direkt elektrisch erfolgt.

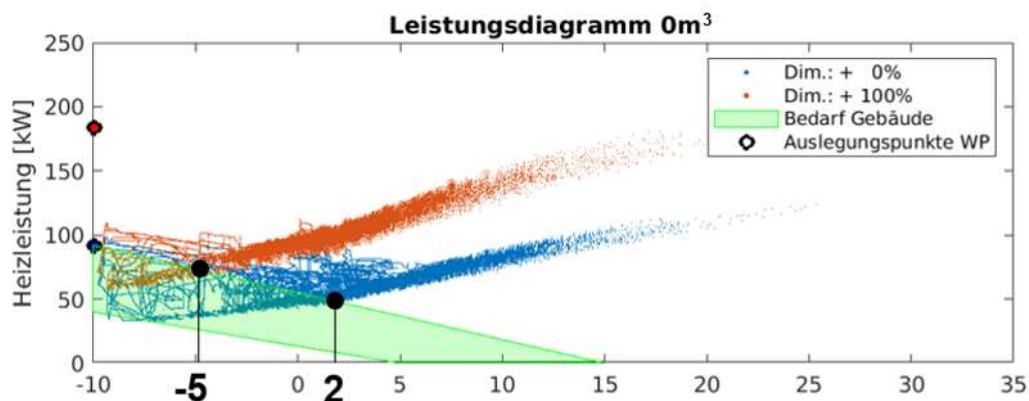


Abbildung 8: Leistungsdiagramm (Heizleistung in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Wie kritisch das Verhalten bei Inverterregelung ist, hängt aber auch von der Performance Map ab. Es wurden zwei Performance Maps mit unterschiedlichen Eigenschaften implementiert. Die eine weist eine gute Teillasteffizienz an der Regelgrenze von 30% auf, was die Effizienzeinbussen durch Taktbetrieb reduziert, und die zweite eine flache Leistungskennlinie, die den Bereich der Inverterregelung auch bei Überdimensionierung zu höheren Aussentemperaturen verschiebt und damit die Effizienzeinbussen begrenzt.

Allgemein ist bei ungünstigen Verhältnissen der Performance Map der Verzicht auf die günstigen Invertereigenschaften jedoch mit einem merklichen Absinken der JAZ um über einen Punkt verbunden, wie ein Vergleich mit einer Ein-Aus-Regelung auf der 50 Hz Kennlinie zeigt.

Am Beispiel der Inverter geregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde auch die Auswirkung der Überdimensionierung auf die Lebensdauer abgeschätzt. Es zeigt sich, dass unter der Voraussetzung, dass ein Verdichterstart die Lebensdauer um mindestens eine Stunde reduziert, bei 100% Überdimensionierung die Lebensdauer durch den verstärkten Taktbetrieb um 20-40% sinken kann. Ein integrierter Speicher kann den Taktbetrieb reduzieren und damit die Lebensdauerverkürzung beschränken.

Gemäss diesen Erkenntnissen sind die beiden primär untersuchten Bürogebäude, das Oblamatik mit zwei Inverter-Wärmepumpen und das Forschungszentrum der OST (OST-FZ) mit einer Wärmepumpe mit vier Verdichtern trotz der festgestellten Überdimensionierung mit gut angepasster Anlagentechnik ausgestattet.

Empfehlungen

- Für die Ermittlung der Heiz- und Kühlleistung von Verwaltungsgebäuden empfehlen wir die Anwendung der neuen SIA 380/2:2022 mit Berücksichtigung der internen Wärmequellen (z.B.: 80% der SIA 2024 Werte). Dynamische Gebäudesimulationen können die Überdimensionierung deutlich reduzieren und damit auch die Investitionskosten, die Zusatzkosten für die Simulation werden durch die Einsparungen deutlich übertroffen.
- Bei Mehrfamilienhäusern ist die Plausibilisierung der berechneten Heizleistung über die im Projekt erarbeitete Methode unter Berücksichtigung des Heizwärmebedarfs ausreichend (Details im Kapitel 4.1.3). Die Integration der Plausibilisierungsmethode in das kantonale Programm «WPesti» stellt aus Sicht der Autoren eine einfache und praktikable Möglichkeit dar, der Überdimensionierung von Wohngebäuden entgegenzuwirken.
- Verschiedene Anpassungen und Präzisierungen der SIA-Normen könnten auch zur Entschärfung der Situation beitragen, detaillierte Informationen sind im Kapitel 5.3 zusammengefasst.
- Eine Überdimensionierung kann im Nachhinein wirtschaftlich praktisch nur durch die Einbindung eines Speichers entschärft werden, der das erhöhte Takten reduziert und bei einer Inverter-WP einen längeren Regelbetrieb ermöglicht. Aus Kostengründen sollte bei geringer Kapazität im Heizsystem immer ein Pufferspeicher vorgesehen werden.
- Kaskadierte Wärmepumpen verhalten sich bei Überdimensionierung recht robust. Die Nachrüstung einer zweiten kleineren Wärmepumpe kann daher eine Verbesserung erzielen, ist aber wirtschaftlich kaum darstellbar. Bei Neuanlagen ist eine Kaskadierung auch aus Gründen der technischen Redundanz zu empfehlen, wenn auch eine robuste und flexible Regelung implementiert wird, was in der Praxis eine Herausforderung darstellen kann.
- Die Inverter-WP erreichen bei korrekter Dimensionierung die besten Effizienzwerte, reagieren aber bei höherer Überdimensionierung insbesondere bei Luft-Wasser-Wärmepumpen empfindlich, da der Regelbereich des Inverters übersprungen wird und sich ein Ein-Aus-Betrieb einstellt. Daher ist bei Luft-Wasser-Wärmepumpen eine knappe Dimensionierung zu empfehlen.



- Ein Taktbetrieb kann auch die Lebensdauer verkürzen. Anhand der Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde ausgewertet, dass die Lebensdauer bei 100% Überdimensionierung 20-40% reduziert werden kann. Daher sollen alle Möglichkeiten zur Verringerung des Taktbetriebs genutzt werden, insbesondere eine knappe Dimensionierung und Speicherintegration.
- Bei Sole-Wasser-Wärmepumpen wirkt sich eine Überdimensionierung nicht per se negativ auf die Effizienz aus, da auch das Erdwärmesondenfeld überdimensioniert werden muss. Die Effizienzgewinne sind jedoch aufgrund der hohen Kosten der Erdwärmesonden sehr teuer und wirtschaftlich nicht darstellbar, da das Erdsondenfeld der Kostentreiber für die gesamten Anlagekosten ist. Durch den höheren Materialeinsatz erscheinen sie auch aus Sicht der grauen Energie/ Emissionen nicht ökologisch, auch wenn die Effizienz gesteigert werden kann. Daher ist auch bei Sole-Wasser-Wärmepumpen eine knappe Dimensionierung zu empfehlen, insbesondere bei Inverterregelung, da dann die Effizienzvorteile des Inverters voll ausgenutzt werden können.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Erfahrung aus verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten als auch die Einschätzung von Experten, lässt vermuten, dass Wärme- und Kälteerzeuger oft überdimensioniert sind. Im BFE-Projekt ImmoGap [1] konnte auf Grund der Untersuchung von 65 Mehrfamilienhäusern aufgezeigt werden, dass 75% der Objekte eine Überdimensionierung der Heiz- und Kühlanlagen zwischen 10% und 60% aufweisen. Zusätzlich wiesen die Resultate darauf hin, dass die Überdimensionierung vom Dämmstandard abhängig ist. Je besser ein Gebäude gedämmt war, desto grösser war die relative Überdimensionierung.

Je nach Heizsystem führt eine Überdimensionierung dazu, dass die Wärmeerzeugung häufig nicht im optimalen Betriebspunkt betrieben wird und damit mehr Endenergie verbraucht wird als eigentlich nötig. Weitere Konsequenzen einer Überdimensionierung sind unnötig hohe Investitionskosten (Wärmeerzeuger, Erdsonden, Wärmetauscher, Anschlussleistung etc.). Die Problematik scheint in Bezug auf die Kühlung noch grösser zu sein. Hier zeigen Gespräche mit Energie-Contractor und Wärmepumpenherstellern (z.B. Scheco, Winterthur), dass ein Bedarf für Forschung besteht. In einem 2019 abgeschlossenen P&D-Projekt [2] wurde eine Wärmepumpe um 60% überdimensioniert (zwei Kompressoren zu viel), obwohl der HLK-Planer (in diesem Fall auch Bauherr) die Normwerte bewusst unterschritten hat. Dies hat weiterhin zur Folge, dass die Sekundäraggregate der Wärmepumpe (Rückkühler, Carterheizung² etc.) überdimensioniert sind und einen unnötig grossen Elektrizitätsbedarf verursachen, was zu einer verringerten Jahresarbeitszahl (JAZ) der Gesamtanlage führt. Das Projekt Compare-Renove [3] der Universität Genf zeigt, dass auch in Sanierungsprojekten die Leistungsermittlung schwierig sein kann und zu Problemen führen kann. Die Studie wertete die Daten von 26 Genfer Gebäuden mit insgesamt über 3'000 Wohnungen aus, die überwiegend in den 1960er Jahren erbaut und ab 2005 saniert wurden. Jedoch lag in der genannten Studie der Fokus auf der Energie und nicht auf der Leistung.

1.2 Motivation des Projektes

Immer häufiger werden die Energieverbrauchsdaten von Gebäuden mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst und mit der Planung verglichen. Dank dieser Entwicklung ist es nun möglich grössere Datenmengen zu Gebäudeverbrauchsdaten zu untersuchen und Zusammenhänge zwischen Planung und Verbrauch zu ermitteln.

Die Betriebsoptimierung hat sich in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Dadurch, dass auch die MuKE n 2014 dies explizit als Modul aufgenommen haben, könnte sich dies in Zukunft ändern. Wie häufig, spielt auch hier Minergie eine Vorreiterrolle, indem ein Monitoring für grössere Bauten verpflichtend ist, um die Zertifizierung zu erhalten. Immer mehr professionelle Portfolio-Manager prüfen ihre Gebäude bezüglich Energieverbrauch und CO₂-Emissionen und sind bestrebt den Betrieb zu optimieren und ihre Emissionen zu senken. Aus diesem Grund erachten wir es als wichtig den sogenannten Performance Gap im Bereich der Heiz- und Kühlleistung genauer zu untersuchen. Wir gehen davon aus, dass überdimensionierte Anlagen

² Heizelement vom Verdichter um das Schmieröl vorzuwärmen



nicht nur unnötig hohe Investitionskosten verursachen, sondern auch zu einem ineffizienten Betrieb führen.

Die Thematik der Überdimensionierung in der Planung von Wärmeerzeuger ist grundsätzlich nicht neu und ist in Fachkreisen ein bekanntes Problem. Jedoch ist uns keine Studie bekannt, welche eine grosse Anzahl an Objekten mit realen Messdaten systematisch dazu untersucht hat. Gerade durch die Bestrebungen der EU und der Schweiz, gemäss der Implementierung der EPBD [4] nur noch nZEB Gebäude zu bauen, veränderte sich die Situation in kurzer Zeit und Empfehlungen, zum Beispiel von EnergieSchweiz "Leistungsgarantie Haustechnik [5]" können für diese Objekte evt. schon nicht mehr zielführend und aktuell sein.

1.3 Projektziele

Im Projekt OptiPower wird der Einfluss von überdimensionierten Heiz- und Kühlanlagen (vorwiegend Wärmepumpen) sowohl auf die Investitionskosten von Bauprojekten als auch auf die Energieeffizienz der Anlagen untersucht. Im speziellen können erhebliche Kosten eingespart werden, wenn beispielsweise durch gute Planung die Anzahl der Erdsonden optimiert werden. Weiter soll mittels Simulationen und einer umfangreichen Messdatenauswertung der Betrieb von Wärmepumpen untersucht werden. Es wird ermittelt, inwiefern die Überdimensionierung dazu führt, dass die Wärmepumpen häufig in nicht optimalen Betriebspunkten³ laufen und damit ein erhöhter Elektrizitätsverbrauch entsteht. Weiter soll der Vergleich zwischen dynamischen Simulationen und Standardberechnungen (SIA) aufzeigen, wo die Gründe für die häufige Überdimensionierung liegen. Diese sollen in zukünftige Normenwerke einfließen (SIA Kommissionsmitglieder sind sowohl im Projekt als auch in der Begleitgruppe involviert).

2 Übersicht der aktuellen Normen

Nachfolgend werden die wichtigsten Schweizer Normen und Merkblätter der Behörden zur Bestimmung der Wärme- und Kälteleistung kurz beschrieben (siehe Tabelle 1), wobei teilweise bereits Ergebnisse aus der vorliegenden Studie in die Kommentare eingeflossen sind. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit und es ist zu beachten, dass die Normen laufend angepasst werden.

³ Invertergeregelt Wärmepumpen weisen nicht über den gesamten Leistungsbereich den gleich hohen Wirkungsgrad auf.

Tabelle 1: Übersicht der relevanten Normen und Merkblätter.

Bezeichnung	Version	Titel
SIA 384/1	2022	Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>
<p>Die SIA 384/1 gibt massgeblich die Dimensionierung des Wärmeerzeugungssystems vor. Die Leistung der Wärmeerzeuger berechnet sich aus der Summe folgender Werte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Norm-Heizlast Gebäude (SIA 384/2) • Leistungszuschlag Sperrzeiten • Leistungszuschlag Wassererwärmung • Leistungszuschlag verbundene Systeme <p>Es wird darauf hingewiesen, dass im speziellen die Wassererwärmung (SIA 385/2) nicht zwingend kumulativ sein muss, dies kann damit berücksichtigt werden, in dem eine Tagesbetrachtung am Auslegungstag gemacht wird (Reduktion des Zuschlags).</p> <p>Ab 10 kW darf die Leistung des Wärmeerzeugers den errechneten Wert nicht mehr als 30% überschreiten und nicht mehr als 5% unterschreiten.</p>		<p>Die gleiche Norm für Klimakälteanlagen gibt es aktuell noch nicht, diese ist aktuell in Ausarbeitung (SIA 384/4).</p> <p>Bei Verwaltungsgebäuden wird der Luftherhitzer der Lüftungsanlage als verbundenes System betrachtet, der Leistungszuschlag ist entsprechend zu berechnen. Bei der Berechnung ist gemäss Norm vom maximalen Aussenluftvolumenstrom auszugehen, der bei der Auslegungstemperatur nach SIA 2028 (Stundenwerte) auftritt. Im Beispiel Zürich wären dies minus 14 °C. Unklar ist jedoch, ob sich der maximale Aussenluftvolumenstrom auf die gemäss SIA 384/1 bei tiefen Aussentemperaturen um bis zu 50% reduzierten Volumenstrom bezieht, hier wäre eine Präzisierung wünschenswert. Die Ergebnisse von OptiPower zeigen, dass in vielen Fällen die Norm-Heizlast für die Dimensionierung des Wärmeerzeugers ausreicht und die weiteren Leistungszuschläge zu sehr grossen Überdimensionierungen führen. Es ist zu prüfen, ob bei Verwaltungsgebäuden nicht auf den Zuschlag für Lüftungsanlagen verzichtet werden sollte und die Lüftung nur über die Berechnung der Norm-Heizlast berücksichtigt wird.</p> <p>Teilweise wird in der Praxis auch ein Gleichzeitigkeitsfaktor für Leistungszuschläge verwendet. Es fehlen jedoch Angaben und Anwendungsbeispiele, die ein einheitliches Vorgehen in der Planung ermöglichen und die Berechnungen nachvollziehbar machen. Die Angaben in der SIA 384/2 (Tabelle 6) sind sehr knapp gehalten (siehe nächster Abschnitt).</p> <p>Die Unterschreitung von max. 5% der Wärmeerzeugerleistung gegenüber der Berechnung sollte überdacht werden, solange die heutigen Berechnungen zu sehr grossen Überdimensionierungen führen. Mehr dazu im Kapitel 5.3 Empfehlungen.</p>



SIA 384/2	2020	Heizungsanlagen in Gebäuden - Leistungsbedarf												
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>												
<p>Diese Norm gilt seit Juni 2020. Da die meisten Gebäude in der vorliegenden Studie älter sind, ist auch die Vorgängernorm (SIA 384.201) für die Untersuchung von Bedeutung.</p> <p>Die SIA 384/2 beschreibt die Berechnung der Norm-Heizlast die wiederum massgeblich die Berechnung der Wärmeerzeugerleistung (SIA 384/1) beeinflusst. Die Norm-Heizlast setzt sich aus folgenden Termen zusammen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transmissionswärmeverluste nach aussen, gegen unbeheizt und gegen Erdreich • Lüftungswärmeverluste des Raums • Korrekturfaktor Gleichzeitigkeit (abhängig vom Lüftungskonzept) • Wärmeeinträge (unter Norm-Aussenbedingungen) <p>Die Berücksichtigung von Wärmeeinträgen muss mit der Bauherrschaft vereinbart werden. Im Wohnbereich fallen in der Regel keine permanenten, internen Wärmeeinträge an, weshalb dieser Term auf null gesetzt werden kann.</p>		<p>Trotz der relativ niedrigen Mindest-Luftwechselrate von 0.1 h^{-1} für Bürogebäude (Tabelle 5) mit mechanischer Lüftung und Lufterwärmung zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass in vielen Fällen eine Wärmeerzeugerleistung in der Grössenordnung der Norm-Heizlast ausreichen würde. Dies deutet darauf hin, dass die Berücksichtigung der Lüftung über die Norm-Heizlastberechnung in Zukunft ausreichend sein könnte.</p> <p>Wärmeeinträge werden in der Regel nicht berücksichtigt, was für die Dimensionierung des Wärmeabgabesystems sinnvoll ist. Für die Dimensionierung des Wärmeerzeugers wäre die Berücksichtigung der Wärmeeinträge jedoch zu prüfen, da dadurch die festgestellte Überdimensionierung (siehe Abschnitt SIA 380/2) reduziert werden könnte. Dies müsste jedoch in der übergeordneten SIA 384/1 erfolgen.</p> <p>Die Berücksichtigung von Korrekturfaktoren der Gleichzeitigkeit ist sinnvoll und kann die errechnete Leistung erheblich reduzieren. Die folgende, aus der Norm übernommene Tabelle bietet jedoch wenig Hilfe, um in der Praxis die richtigen Werte zu verwenden. Speziell für die mechanische Lüftung ist mit "max. 1.0" eine maximale Bandbreite gegeben.</p> <p style="text-align: center;">Tabelle 6 Korrekturfaktor der Gleichzeitigkeit je nach Lüftungskonzept</p> <table border="1" data-bbox="1245 979 1821 1115"> <thead> <tr> <th>Lüftungskonzept</th> <th>Anzahl Räume</th> <th>f_{tz}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Natürlich belüftet</td> <td>1</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>≥ 2</td> <td>max. 0,8 min. 0,5</td> </tr> <tr> <td>Mechanisch belüftet</td> <td>Alle</td> <td>max. 1,0</td> </tr> </tbody> </table>		Lüftungskonzept	Anzahl Räume	f_{tz}	Natürlich belüftet	1	1,0	≥ 2	max. 0,8 min. 0,5	Mechanisch belüftet	Alle	max. 1,0
Lüftungskonzept	Anzahl Räume	f_{tz}												
Natürlich belüftet	1	1,0												
	≥ 2	max. 0,8 min. 0,5												
Mechanisch belüftet	Alle	max. 1,0												
SIA 384.201	2017	Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3												
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>												
<p>Die SIA 384.201 (EN 12831-1 mit nationalem Anhang) beschreibt die Berechnung der Norm-Heizlast die wiederum massgeblich die Berechnung der Wärmeerzeugerleistung (SIA 384/1) beeinflusst.</p>		<p>Die neue Norm (SIA 384/2) ist durch einige Vereinfachungen (z.B. Bestimmung der Mindest-Luftwechselrate) einfacher anzuwenden und deutlich übersichtlicher. Inwieweit sich die Leistungskennzahlen für ein Gebäude durch die Anpassungen verändern, konnte nicht ermittelt werden.</p>												

SIA 384/3	2020	Heizungsanlagen in Gebäuden - Energiebedarf	
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>	
<p>Mit der SIA 384/3 werden Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Endenergiebedarfs von Heizungsanlagen definiert. Dabei kann die sogenannte Bin-Methode auch für die Schätzung der Heizleistung verwendet werden, wobei darauf hingewiesen wird, dass keine Komponenten mit dieser Methode dimensioniert werden dürfen.</p> <p>Das von den Kantonen zur Verfügung gestellte Tool «WPesti» schätzt mit der Bin-Methode die Heizleistung für Wärmeerzeuger ab.</p>		<p>In einer Studie von Huber et. al. [2] im Auftrag der EnFK kommen die Autoren zum Schluss, dass die Leistungsberechnung nach SIA 384/3 zu besseren Ergebnissen führt als die Norm-Heizlastberechnung (SIA 384.201), wobei darauf hingewiesen wird, dass die Dimensionierung von Wärmeabgabesystemen weiterhin nach SIA 384.201 erfolgen soll. Die Ergebnisse von OptiPower zeigen jedoch, dass auch die Berechnung nach SIA 384/3 (WPesti) zu höheren Leistungen führt, als in der Realität benötigt werden, weshalb in dieser Studie eine neue Methode zur Plausibilisierung der Berechnung empfohlen wird.</p>	
SIA 380/2	2022	Energetische Berechnung von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf	
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>	
<p>Die Norm SIA 380/2 ersetzt die Norm SIA 382/2 und das Merkblatt 2044, die in der Praxis nur selten zur Anwendung kamen. Die neue Norm bietet die Möglichkeit, mit Hilfe von dynamischen Simulationsprogrammen verschiedene Nachweise und Bedarfsermittlungen durchzuführen. Hervorzuheben ist die Ermittlung der Heiz- und Kühlleistung.</p>		<p>Diese neue Norm stellt einen Meilenstein für die ganzheitliche Optimierung von Gebäuden und die gleichzeitige Erstellung mehrerer Nachweise dar. Zwar ist die Anwendung anspruchsvoller und erfordert den Einsatz von dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen, aber gerade bei Verwaltungsgebäuden kann dieser Aufwand durch die Einsparungen bei den Investitionen gut kompensiert werden (siehe Kapitel 4.2.2). Durch die konsequente Anwendung der BIM-Methode und die fortschreitende Digitalisierung im Bauwesen ist davon auszugehen, dass sich diese Berechnungsform in naher Zukunft durchsetzen wird.</p> <p>Die SIA 380/2 wurde in OptiPower für ausgewählte Gebäude angewendet und es hat sich gezeigt, dass bei der Ermittlung der Heiz- und Kühlleistung die Werte deutlich näher am tatsächlichen Bedarf liegen als bei den bestehenden Verfahren nach SIA 384/1 und SIA 384/2. Insbesondere wenn auch die internen Wärmegewinne (mit 80%) berücksichtigt wurden.</p>	



SIA 2028	2010	Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik	
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>	
Die SIA 2028 definiert die Auslegungstemperatur (Norm-Aussenlufttemperatur) für die Berechnung der Heizleistung. Dazu wird für jede Messstation der Mittelwert der jährlichen minimalen 4-Tagesmittelwerte (gleitende Mittelwerte) verwendet (verwendeter Zeitraum 1984 – 2003).		Eine Aktualisierung der SIA 2028 mit einer neuen Messperiode von 20 Jahren ist für 2023 oder spätestens 2024 zu erwarten. Aufgrund des Klimawandels ist mit einem Anstieg der Aussentemperatur im Jahresverlauf zu rechnen. Für die kalten Bemessungsperioden ist voraussichtlich keine Änderung zu erwarten, da kalte Perioden im Winter trotz Klimawandel erhalten bleiben.	
SIA 2024	2021	Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik	
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>	
Die SIA 2024 macht Angaben zu den internen Wärmegewinnen bzw. Lasten, wenn keine genaueren Angaben vorliegen.			
Merkblatt	2015	Leistungsgarantie Haustechnik⁴	
<i>Inhalt (relevant für OptiPower)</i>		<i>Kommentar</i>	
Im Merkblatt «Leistungsgarantie Haustechnik» ist ein Kapitel zur Bestimmung der Wärmeerzeugerleistung enthalten. Es fasst im Wesentlichen die nicht mehr gültigen Normen übersichtlich zusammen und geht auf die wichtigsten Kennwerte ein.		Ein Update dieses nützlichen Merkblattes wäre wünschenswert in dem die in dieser Studie vorgestellten Ergebnisse und Erkenntnisse miteinbezogen werden.	

⁴ <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/2610>

3 Vorgehen und Methode

Der Fokus von OptiPower liegt auf Mehrfamilienhäusern und Verwaltungsgebäuden, da diese den grössten Anteil am Neubauvolumen in der Schweiz aufweisen. Es wurden insgesamt zehn Bürogebäude und über 900 Mehrfamilienhäuser (MFH) untersucht, wobei mehrere MFH über eine Anlage gemeinsam versorgt werden, was dazu führt, dass insgesamt 399 Heizungsanlagen zur Verfügung standen. Davon wurden weitere Anlagen ausgeschlossen, da die Qualität der Daten nicht ausreichend oder zu unsicher war. Schlussendlich standen drei Datensätze zur Verfügung:

- Datensatz mit hohem Informationsgehalt bestehend aus 155 Heizungsanlagen
- Datensatz mit teilweise fehlendem Heizwärmebedarf (SIA 380/1) bestehend aus insgesamt 251 Heizungsanlagen (= 155 mit plus 96 ohne Heizwärmebedarf)
- Datensatz mit fehlendem Heizwärmebedarf (SIA 380/1) bestehend aus 58 Fernwärmestationen ohne einen separaten Wärmemengenzähler für Warmwasser

Da nicht für alle Auswertung der Norm-Heizwärmebedarf benötigt wird, wurde bewusst der grössere Datensatz beibehalten und verwendet. In der Abbildungsbeschriftung ist jeweils aufgeführt, wie gross der Datensatz ist (n=155 oder n=251). Die Auswertung der Fernwärmestationen wurde jeweils separat ausgewiesen.

Die Auswertung der Büro- und Wohngebäude wurde aufgeteilt und erfolgt in separaten Kapiteln, da sich die Nutzung und die Eigenschaften dieser zwei Gebäudearten stark unterscheiden. Weitere Informationen zu den untersuchten Gebäuden sind im Kapitel 3.1 und zu den Messdaten im Kapitel 3.2.2 zu finden.

Das grundsätzliche Vorgehen, um die Gründe und die Folgen einer Überdimensionierung zu ermitteln, ist in Abbildung 9 zusammengefasst.

Im Zentrum steht die Simulation der Wärmepumpenanlage (blau) welche in verschiedenen Varianten (variieren von Betriebsart, Leistung, Quelle etc.) durchgeführt wird. Als Ausgangslage dient immer die Anlage, welche im Feld real installiert wurde, damit auch die Simulation mit realen Messdaten validiert werden kann, um möglichst ein realistisches Verhalten abzubilden. Die Rahmenbedingungen für den Betrieb der Wärmepumpe werden durch die Gebäudesimulation festgelegt. Hierfür wurde ein Lastprofile generiert (braun). Zum einen werden die Gebäudesimulationen mit SIA-Norm Eingabewerten und Profilen (SIA 2024) durchgeführt und zum anderen mit möglichst realistischen Einstellungen aufgrund von Messdaten aus einem Monitoring (gelb).

Die Dimensionierung der Heizungsanlage erfolgt auf Basis unterschiedlicher Normen und der real installierten Anlage (grün).

Aus den Simulationsergebnissen wurde abgeschätzt, wie sich eine Überdimensionierung auf den elektrischen Bedarf einer Wärmepumpe, die Lebenserwartung (Ein/Aus-Zyklen) und die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Abschliessend wurden aus den Ergebnissen Empfehlungen ausgearbeitet.

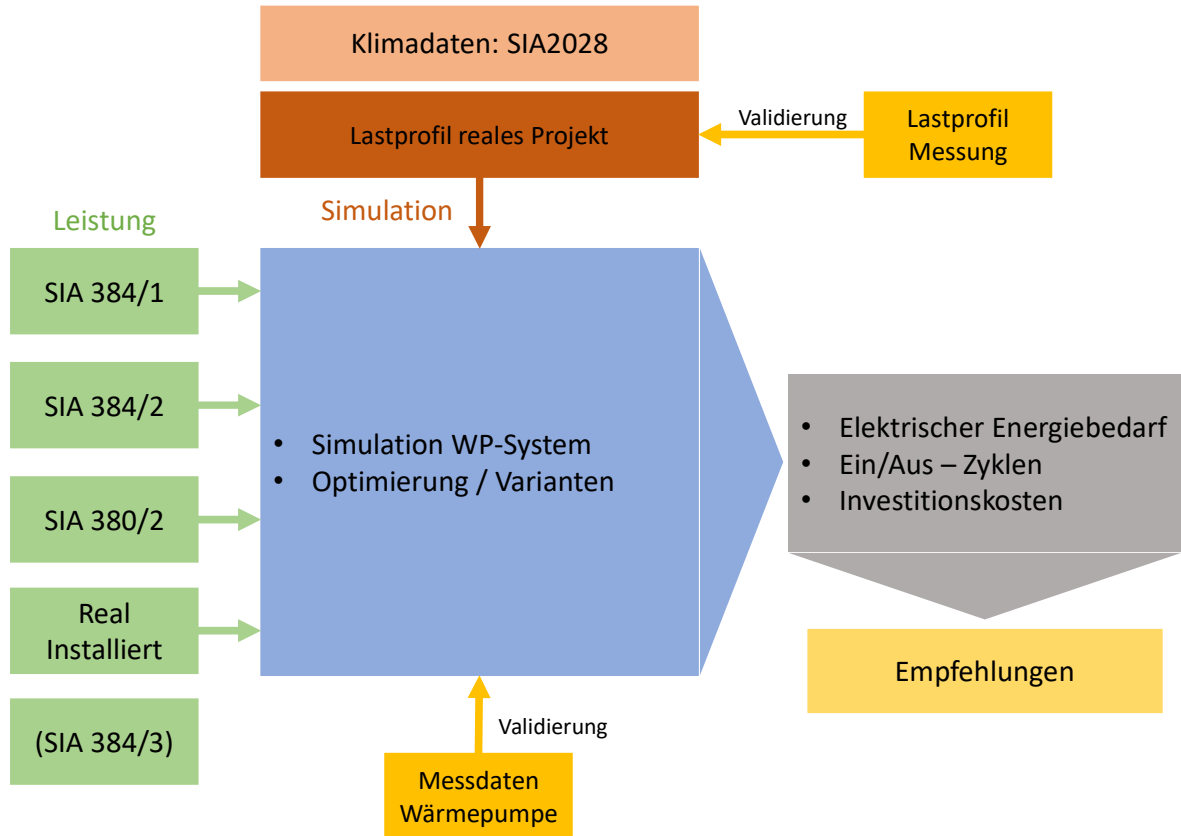


Abbildung 9: Einfaches Prinzipschema zum Vorgehen im Projekt und Übersicht der relevanten SIA-Normen die in Verbindung mit der Dimensionierung der Heizleistung stehen.

3.1 Gebäude- und Anlagenbeschreibung

3.1.1 Bürogebäude

Alle zehn im Projekt untersuchten Bürogebäude nutzen eine Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger. Sieben Gebäude haben ein bivalentes System, wobei in allen Fällen eine Gasheizung als zweiter Wärmeerzeuger eingesetzt wird. Alle Gebäude werden aktiv mit der Wärmepumpe gekühlt. Die folgenden Tabellen fassen die wichtigsten Daten der Gebäude zusammen⁵. Im Detail wurden drei von zehn Gebäuden (Tabelle 2 bis Tabelle 4) untersucht. Die Auswertung ist entsprechend auf zwei Kapitel aufgeteilt (Kapitel 4.1.1 und 4.1.2).

Tabelle 2: Kennzahlen zum 3-Plan Bürogebäude.

3-Plan		
	EBF	3'031 m ²
	Zertifizierung	Minergie P
	Fensteranteil an EBF	20%
	Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009)	16 kWh/(m ² a)
	Klimakältebedarf	2 kWh/(m ² a)
	Installierte Heizleistung	62 kW ⁶ / 20.4 W/m ²
	Installierte Klimakälteleistung	55 kW ⁷ / 18 W/m ²
	Gebäude Kategorien	Verwaltung

Tabelle 3: Kennzahlen zum OST-Forschungszentrum.

OST-Forschungszentrum (OST-FZ)		
	EBF	5'995 m ²
	Zertifizierung	Minergie ECO
	Fensteranteil an EBF	36%
	Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009)	26.4 kWh/(m ² a)
	Klimakältebedarf	32 kWh/(m ² a)
	Installierte Heizleistung	250 kW ⁸ / 41.7 W/m ²
	Installierte Klimakälteleistung	212 kW / 35.4 W/m ²
	Gebäude Kategorien	Schule

⁵ Die Messdaten und Gebäudedaten wurden aus P&D Projekten des SPF verwendet oder durch die Alfred Müller AG zur Verfügung gestellt.

⁶ Bei TvI/TrI = 30 °C/25 °C und Ta = -8 °C

⁷ Bei TvI/TrI = 17 °C/22 °C und Ta = 35 °C

⁸ Bei B0/W34



Tabelle 4: Kennzahlen zum Oblamatik Bürogebäude.

Oblamatik



EBF	6'064 m ²
Zertifizierung	Minergie P
Fensteranteil an EBF	29%
Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009)	20 kWh/(m ² a)
Klimakältebedarf	k.A
Installierte Heizleistung	160 kW ⁹ / 130 kW ¹⁰ 26.4 W/m ² / 21.4 W/m ²
Installierte Klimakälteleistung	90 kW ¹¹ / 14.8 W/m ²
Gebäude Kategorien	Verwaltung, Industrie, Restaurant, Lager

⁹ Bei B10/W35

¹⁰ Bei B0/W35

¹¹ Bei B10/W18

Tabelle 5: Übersicht aller im Projekt untersuchten Bürogebäude. Falls nicht anders vermerkt, nutzen die Wärmepumpen das Erdreich als Wärmequelle. LW = Luft-Wasser-WP

Gebäudebezeichnung	Standort	Heizungstyp	EBF [m ²]	Baujahr	Inst. Heizleistung [kW] / [W/m ²]	Inst. Kühlleistung [kW] / [W/m ²]
Neuhof	Baar	WP (LW) & Gaskessel	16'288	1990	135 & 580 8 & 36	320 / 20
Quadrolith 1	Baar	WP & Gaskessel	14'720	2019	213 & 425 15 & 29	506 / 34
Helix 1	Cham	WP & Gaskessel	13'424	2019	213 & 425 16 & 32	506 / 38
Helix 2	Cham	WP & Gaskessel	13'410	2020	213 & 425 16 & 32	506 / 38
Pilatus	Kriens	WP & Gaskessel	12'119	2018	200 & 315 17 & 26	300 / 25
Prisma 2	Steinhausen	WP & Gaskessel	11'079	2013	137 & 157 12 & 14	303 / 27
Prisma 3	Steinhausen	WP & Gaskessel	11'079	2010	137 & 157 12 & 14	303 / 27
Oblamatik	Chur	WP	6'064	2017	160 / 26	90 / 15
3-Plan	Winterthur	WP (LW)	3'031	2015	62 / 21	55 / 18
OST-FZ	Rapperswil	WP	5'996	2010	250 / 42	212 / 35

3.1.2 Wohngebäude

Bei den Wohngebäuden handelt es sich zum grössten Teil um MFH, bei denen die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) als Energie-Contractor direkt das Wärmepumpensystem installiert und betreibt oder die Quelle der Wärmepumpe zur Verfügung stellt. Zwei Gebäude (Fengari & Plattenhof) die für die detaillierte Auswertung (Kapitel 4.1.4) verwendet wurden sind aus anderen Projekten übernommen und sind nicht in einem Energie-Contracting. Ein weiterer Datensatz wurde durch die «Industrial Services of Genève» (SIG) über die Universität Genf zur Verfügung gestellt. Dieser Datensatz wurde nicht vertieft untersucht, sondern dient als Ergänzungen zu den EKZ-Daten und erweitert diese um ältere Gebäude aus dem Bestand. Die Auswertung dieser Datensätze erfolgt in der Regel separat. Die Bestandsgebäude der SIG werden über ein Fernwärmenetz versorgt, wobei nur ein einziger Wärmemengenzähler für Warmwasser und Heizung installiert ist. Aus diesem Grund wurde eine neue von der Universität Genf entwickelte Methode verwendet, um die Wärmemengen auf Warmwasser und Heizung aufzuteilen. Insgesamt wurden 58 Fernwärmestationen ausgewertet, die 348 Gebäude versorgen.



Für die Untersuchung der durch die EKZ versorgten Wohngebäude wurden insgesamt 341 Heizungsanlagen berücksichtigt. Wobei 230 davon einzelne Gebäude versorgen und in 111 Fällen mehrere Gebäude über eine Anlage versorgt werden. Insgesamt sind 620 Gebäude im untersuchten Datensatz enthalten, von denen 587 MFH (3 oder mehr Wohnungen) und 33 Einfamilienhäuser (EFH) (1 oder 2 Wohnungen) sind. Da es sich bei den EFH vorwiegend um Lösungen handelt, bei denen mehrere Objekte über eine Anlage versorgt werden, wurden diese vereinfacht als ein Objekt zusammengefasst.

Alle von der EKZ versorgten Wohngebäude, die in dieser Studie untersucht wurden, sind mit einer Wärmepumpe ausgerüstet und können als Neubauten betrachtet werden (Inbetriebnahme zwischen 2005 und 2017), es wurden keine Sanierungen oder Altbauten mitberücksichtigt, da in diesen Fällen kaum Messdaten in hoher Auflösung vorhanden sind und keine Planungsunterlagen beschafft werden können. Da nicht für alle untersuchten Gebäude die Energienachweise beschafft werden konnten, mussten Parameter wie die EBF oder der Heizwärmebedarf (SIA 380/1) über Daten des GWR mit entsprechenden Modellen berechnet werden. Die Modelle und das Vorgehen dazu sind im Annex B zusammengefasst. Die Tabelle 6 fasst die verwendeten Parameter und ihre Quellen zusammen. In Abbildung 10 ist die Verteilung der vier wichtigsten Kennwerte grafisch dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht der verwendeten Daten und ihren Quellen für die EKZ Gebäude.

Quelle	Anzahl der Heizungsanlagen
EBF aus Energienachweis	182
$Q_{h,norm}$ aus Energienachweis	179
EBF aus GWR	14
berechnete EBF aus vollständigen GWR-Daten	328
berechnete EBF aus unvollständigen GWR-Daten	13

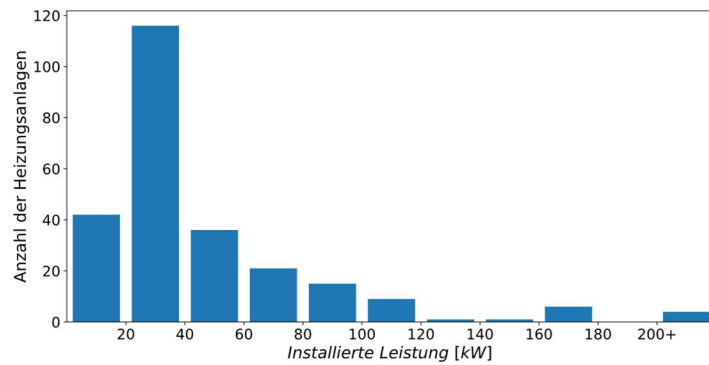
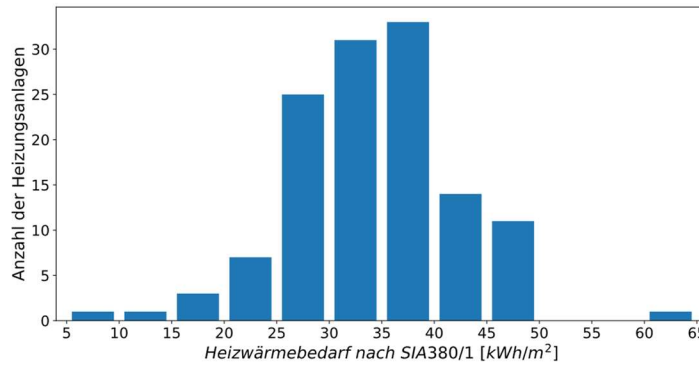
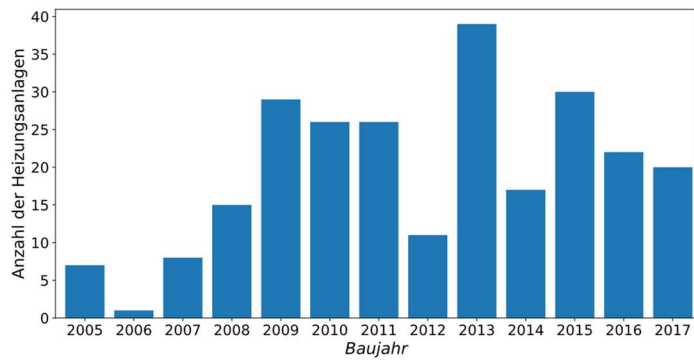
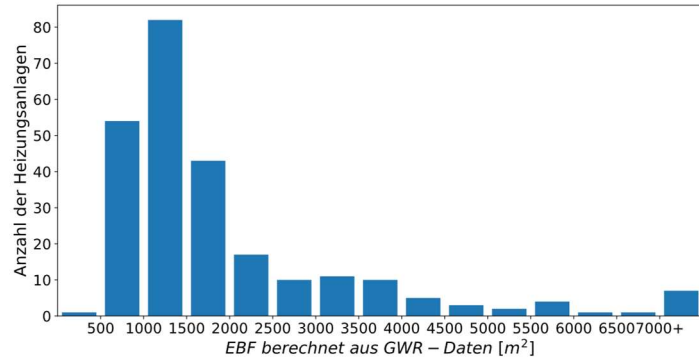


Abbildung 10: Wohngebäude aus dem EKZ Datensatz a) Verteilung der EBF-Werte der Heizsysteme auf der Grundlage der GWR-Daten; b) Verteilung des Baujahres; c) Verteilung von $Q_{h,norm}$; d) Verteilung der installierten Leistung.



In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind detailliertere Informationen zu den beiden Wohnhäusern aufgeführt die vertiefter betrachtet wurden.

Tabelle 7: Kennzahlen zum Wohngebäude Fengari.

Fengari



EBF	879 m ²
Zertifizierung	Minergie A
Fensteranteil an EBF	28%
Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009)	32 kWh/(m ² a)
Installierte Heizleistung	22 kW ¹² / 25 W/m ²
Gebäude Kategorien	Wohnen MFH

Tabelle 8: Kennzahlen zum Wohngebäude Plattenhof.

Plattenhof



EBF	3'012 m ²
Zertifizierung	-
Fensteranteil an EBF	26%
Heizwärmebedarf (SIA 380/1:2009)	29 kWh/(m ² a)
Installierte Heizleistung	58 kW ¹³ / 19.3 W/m ²
Gebäude Kategorien	Wohnen MFH

Tabelle 9: Übersicht der eingesetzten Gebäudetechnik und deren Kennwerte für die beiden Mehrfamilienhäuser.

Gebäude	Lüftung	Puffer- / Warm- wasserspeicher	Modulierung (Anzahl WP)	Wärmemessung
Fengari	WRG, Vorerwärmung	700 l / 2x 820 l	Nein (1)	Nutzwärme
Plattenhof	WRG, Vorerwärmung	2'000 l / 1'750 l	Ja (1), separater Kondensator für Heizung und WW	Nutzwärme

¹² Bei B0/W35

¹³ Bei B3.5/W37

3.2 Ermittlung der Überdimensionierung

Um die Überdimensionierung zu untersuchen, wurde für jedes Gebäude die installierte und die geplante Leistung mit den Messdaten verglichen. Dafür mussten verschiedene Datengrundlagen aufgearbeitet werden. Nachfolgend ist das Vorgehen für die Verwendung und Aufbereitung der Daten zusammengefasst.

3.2.1 Auslegungstemperatur

Zur Bestimmung der relevanten Leistung wird die Auslegungstemperatur (Norm-Aussentemperatur) verwendet. Diese stammt aus der Norm SIA 2028 (2010) und wird für die Berechnung der Norm-Heizlast (SIA 384/2:2020) benötigt und beeinflusst damit massgeblich die Auslegung der Leistung des Wärmeerzeugers.

Die Norm SIA 2028 definiert mehrere über die Schweiz verteilte Messstationen, deren Temperaturmesswerte für die Auslegung eines Heiz- oder Kühlsystems verwendet werden können. Zur Berechnung der in der Norm angegebenen Auslegungstemperatur wurde für jede Messstation der Mittelwert der jährlichen minimalen 4-Tagesmittelwerte (gleitende Mittelwerte) verwendet. Als Zeitraum wurden die Jahre 1984 bis 2003 gewählt.

Für diesen Bericht wurde jeweils die Messstation (und damit die Auslegungstemperatur)¹⁴ gewählt, die in gleichen Klimaregion die kürzeste Entfernung zum jeweiligen Gebäude aufweist, was in der Regel auch der Planung entspricht.

3.2.2 Mess- und Planungsdaten

Messdaten

Dem Projektteam standen hochaufgelöste Daten von Wärmemengenzählern zur Verfügung (angenommene Messunsicherheit von 5%). Diese Daten wurden für alle Gebäude zu Stunden- und Tageswerten aggregiert. Dabei handelt es sich um Wärmemengenzähler, die im Wärme- und Kälteabgabekreis installiert sind (siehe Abbildung 11, rote Markierung). Eine Ausnahme bilden die Messdaten des Fernwärmenetzes der SIG, bei denen es sich um Messungen an der Übergabestation handelt, so dass die Messdaten um den Warmwasserbedarf bereinigt werden mussten.

Installierte Leistung

Die installierte Leistung der Wärme- und Kälteerzeuger (i.d.R. Wärmepumpen) wurde anhand der Produktbezeichnung aus den entsprechenden Datenblättern ermittelt. Die Heizleistung bezieht sich auf den Kennwert B0/W35. Die Kühlleistung (nur Bürogebäude) wurde nicht auf einen einheitlichen Kennwert umgerechnet, sondern direkt der Wert aus den vorhandenen Unterlagen (Hydraulikschema etc.) entnommen. Bei den Wohngebäuden, die von der EKZ versorgt werden, wurde die installierte Heizleistung um $3 \text{ W/m}^2(\text{EBF})$ ¹⁵ reduziert, dies entspricht dem Leistungszuschlag für die Warmwasserbereitung. Davon sind 186 Heizungsanlagen betroffen, für die restlichen 71 Anlagen wurde kein Zuschlag berücksichtigt, da eine separate Wärmepumpe für die Warmwasserbereitstellung zur Verfügung steht.

¹⁴ Es wurde keine Korrektur der Standorthöhe vorgenommen, da die Höhenunterschiede gering sind.

¹⁵ Leistungsgarantie Haustechnik – Energie Schweiz



Planungsdaten

Die geplante Leistung wurde hauptsächlich aus den Angaben im Hydraulikschema ermittelt. Für wenige Gebäude standen auch Daten direkt aus der Norm-Heizlast Berechnung oder den kantonalen Energienachweis-Formularen (EN-3: Heizungs- und Warmwasseranlagen) zur Verfügung.

In der Abbildung 11 ist beispielhaft ein Ausschnitt eines Hydraulikschemas dargestellt. Die «geplante Leistung» im Hydraulikschema wurde in den meisten Fällen aus den Angaben zum Wärme- oder Kälteabgabesystem ermittelt (blaue Markierung), dabei wurde davon ausgegangen, dass die Summe entsprechend der Norm-Heizlast Berechnung (SIA 384.201 oder der neueren SIA 384/2) entspricht, was in einigen Fällen explizit ausgewiesen wurde.

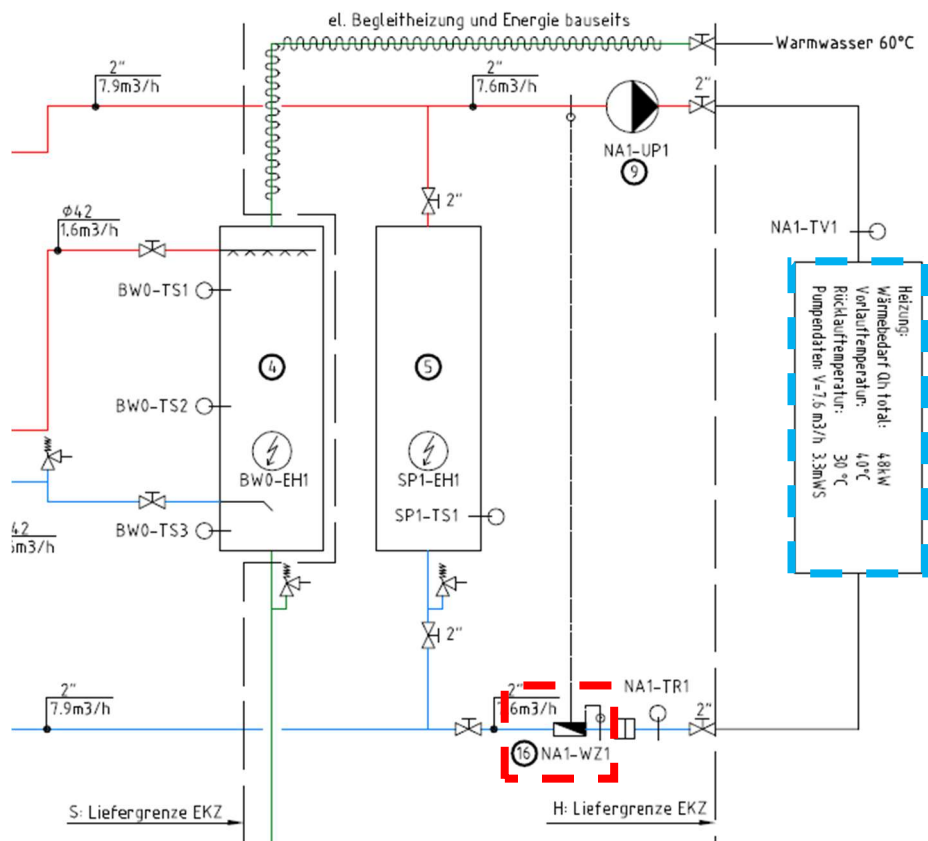


Abbildung 11: Ausschnitt aus einem Hydraulikschema mit Fokus auf das Wärmeabgabesystem (blaue Markierung) und den dazugehörigen Wärmemengenzähler (rote Markierung).

3.2.3 Leistungsbestimmung

Für den Vergleich der installierten Wärmeerzeugerleistung mit der tatsächlich benötigten Leistung auf Basis von Messdaten wurde möglichst der Messpunkt direkt am Verteilsystem (Wärme- und Klimakälteabgabe) verwendet (siehe rote Markierung Abbildung 11). Nur wenn an dieser Stelle keine oder nur unvollständige Messwerte vorlagen, wurden die Messpunkte direkt nach der Wärme- bzw. Kälteerzeugung verwendet (nur im Fall der Bürogebäude). Diese Messwerte haben den Nachteil, dass sie in der Regel höher liegen, da die Wärmepumpe nur in wenigen Fällen zu jedem Zeitpunkt genau die vom Gebäude benötigte thermische Leistung liefern kann. Dieser Effekt ist bei drehzahlgeregelten Wärmepumpen geringer, aber tiefem Wärmebedarf trotzdem vorhanden, da drehzahlgeregelte Wärmepumpen ihre Leistung nicht beliebig anpassen können. Die Messdaten der Fernwärmestationen (SIG) wurden bezüglich Warmwasserbezug korrigiert.

Um die Leistung zu bestimmen die in Realität benötigt wird, wurden zwei Methoden verwendet:

1. In der ersten Methode wurden nur die Messpunkte berücksichtigt, die in einem ausgewählten Aussentemperaturbereich liegen. Die gemessene Leistung gemittelt über eine Stunde wird in einem Bereich von $\pm 1\text{ °C}$ um die Auslegungstemperatur erfasst und über einen Boxplot visualisiert (siehe Abbildung 12).
2. Die zweite Methode verwendet die Energiesignatur (Leistungskennlinie) für die Ermittlung der Vergleichsleistung aus den gemessenen Daten. Dabei wird der Schnittpunkt zwischen dem lineareren Fit durch die Messdaten und der Auslegungstemperatur (vertikale Linie) verwendet (siehe Abbildung 13). Für den linearen Fit werden Werte unterhalb einer Leistung von 0.6 kW und über 14 °C Aussenlufttemperatur nicht berücksichtigt.

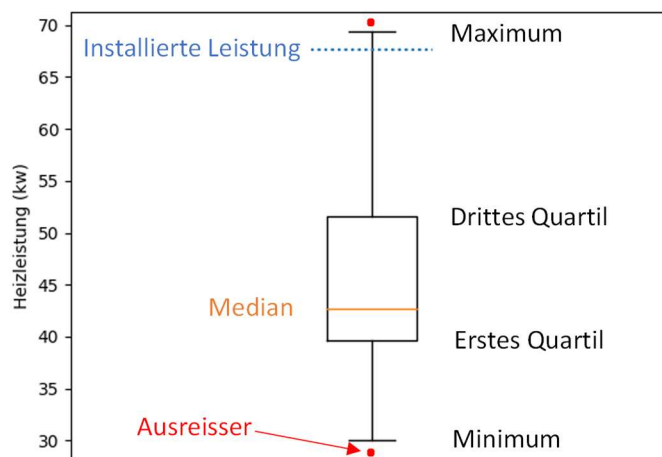


Abbildung 12: Beispielhafte Darstellung für die «Box-Plot»-Methode zur Bestimmung der Norm-Heizlast aus stündlichen Messdaten.

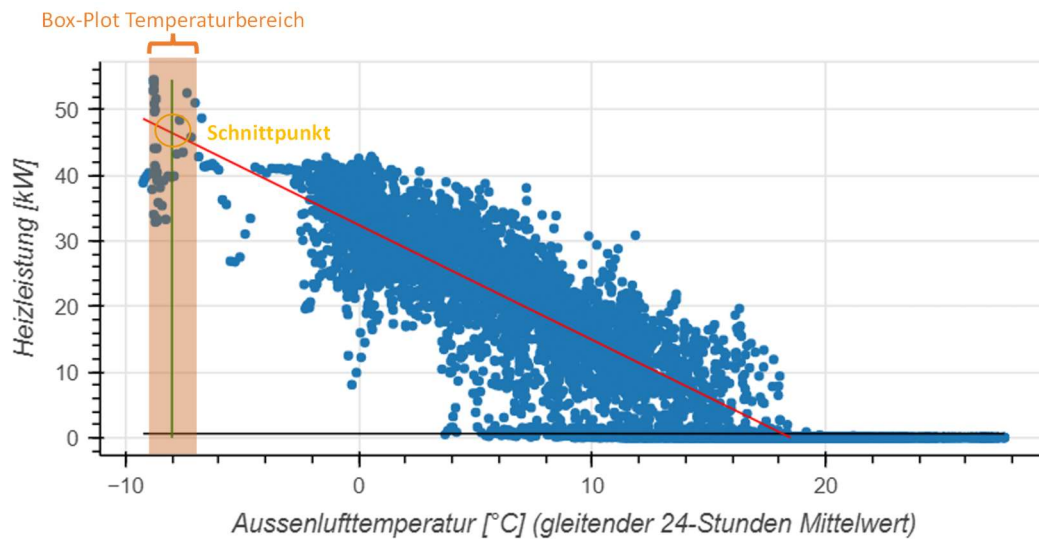


Abbildung 13: Beispielhafte Darstellung für die «Energiesignatur»-Methode zur Bestimmung der Norm-Heizlast aus gemittelten Tagesmessdaten. Hier ist ein Beispiel mit Daten von mehreren Jahren dargestellt.

Der Vergleich der beiden Methoden mit realen Messdaten ist im Anhang C zu finden.

3.3 Gebäudesimulationen

3.3.1 Hintergrund und Ablaufplanung

Für die vorliegende Studie wurde das Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE Version 4.8 SP2 verwendet. Für die detaillierte Untersuchung mittels Simulation wurden drei Verwaltungsgebäude und zwei Wohngebäude ausgewählt. Die wichtigsten Spezifikationen der untersuchten Gebäude sind in Kapitel 3.1 zusammengefasst.

Diese Gebäude wurden für die detaillierte Untersuchung ausgewählt, da ausreichend gute Gebäudedaten aus der Planung und umfangreiche Messdaten vorlagen.

Die folgenden Berechnungen wurden für die detaillierte Auswertung angewendet:

- Nachweis winterlicher Wärmeschutz nach SIA 380/1:2016: Wurde vorwiegend für die Validierung und Prüfung der Simulationsmodelle (Gebäudehülle) verwendet.
- Norm-Heizlastberechnung (SIA 384.201): Wurde für den Vergleich zwischen Messung und Normberechnung verwendet, um die zur Zeit der Umsetzung verwendete Norm zu prüfen.
 - Für die Norm-Heizlastberechnung wurden keine internen Wärmegewinne berücksichtigt.
- Heiz- und Kühllastermittlung nach SIA 380/2:2022: Wurde für den Vergleich zwischen Messung und Normberechnung verwendet, um die aktuelle Norm zur Leistungsbestimmung mit der Realität abzugleichen.
 - Die internen Wärmeeinträge nach SIA 2024 wurden im Fall der Heizlast-Berechnung mit einem Faktor von 0.8 mitberücksichtigt und im Fall der Kälteleistung wurden die vollen Wärmeeinträge berücksichtigt.

- Dynamische Energiebedarfsberechnung nach SIA 380/2:2022 (Jahressimulation): Wurde verwendet, um stündliche Bedarfsprofile zu erstellen, welche für die Wärmepumpensimulationen benötigt werden.
 - Dynamische Berechnung mit Wetterdaten aus SIA 2028:2010 und Raumdaten aus SIA 2024:2021 (dynamische Normberechnung)
 - Dynamische Berechnung mit Klimadatensätzen für die Zukunft «2035» RCP8.5 DRY [3] und Raumdaten aus SIA 2024:2021 (dynamische Normberechnung plus Klimawandel)
 - Dynamische Berechnung mit gemessenen Wetterdaten und realen Raumdaten und Nutzung (dynamische Realberechnung)

3.3.2 Standort und Klima

Für den winterlichen Wärmeschutznachweis nach SIA 380/1 in IDA ICE wurde die entsprechende Klimastation aus den bestehenden Systemnachweisberichten übernommen.

Die Heizlastberechnung in IDA ICE basiert auf der nach SIA 2028:2010 für den jeweiligen Standort definierten dynamischen Auslegungsperiode (vier kalte Tage im Januar). Für die Kühllastberechnung wurden für jede Wetterstation drei Auslegungstage in den Kalendermonaten Juni, August und Oktober festgelegt (SIA 2028:2010 Ziffer 3.7). Der entsprechende Bemessungszeitraum für jedes Gebäude ist in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10 Auslegungszeitraum gemäss SIA2028:2010 nach Standort

Gebäude	Station	Auslegungsperiode Winter	Auslegungstemperatur (Norm-Heizlast)	Auslegungsperiode Sommer
3-Plan	Zürich-Kloten	3. - 6. Januar 1995	-8 °C	22. Juni 2003 4. August 1994 2. Oktober 1997
Oblamatik	Chur	19. - 22. Januar 1987	-7 °C	21. Juni 2000 3. August 2003 2. Oktober 2001
OST-FZ	Zürich - SMA	10. - 13. Januar 1985	-8 °C	22. Juni 2003 3. August 1986 2. Oktober 2001
MFH Fengari	Bern-Liebefeld	3. - 6. Januar 1995	-7 °C	20. Juni 2000 4. August 1994 2. Oktober 1997
MFH Horgen	Zürich – SMA	10. - 13. Januar 1985	-8 °C	22. Juni 2003 3. August 1986 2. Oktober 2001



Die dynamischen Energiebedarfsberechnungen nach der Norm SIA 380/2:2022 werden mit dem Referenzjahr SIA 2028:2010 berechnet. Für die dynamischen Realberechnungen werden die Wetterdaten der Jahre 2021 und 2018 gewählt. Diese Jahre wurden aufgrund der Messdaten der untersuchten Gebäude gewählt. So liegen für die Verwaltungsgebäude Oblamatik und OST-Forschungszentrum Messdaten aus dem Jahr 2021 vor, während für das Bürogebäude 3-Plan Messdaten aus dem Jahr 2018 vorliegen. Darüber hinaus wurden für diese beiden Jahre die Wetterparameter aus verschiedenen Quellen zusammengestellt. Die Daten stammen von MeteoSchweiz [4] und NASA Power [5], mit Ausnahme des OST-Forschungszentrums, für das umfangreiche Messungen aus dem nahe gelegenen Solarprüflabor des SPF zur Verfügung standen.

Für die Simulationen mit zukünftigen Klimadatensätzen wurde das Szenario «2035» RCP8.5 DRY gewählt, was den aktuellen Empfehlungen der SIA [3] zur Bestimmung der Auswirkungen der Auslegung auf das Teillastverhalten und die Energie entspricht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese neu berechneten Wetterdaten die Globalstrahlung deutlich unterschätzen. Die aktuell real gemessenen Globalstrahlungswerte übersteigen bereits heute die Prognosen inklusive Klimawandel, was in der Studie von Jeremias et. al [6] deutlich wird.

Weiterführende Informationen zu den verwendeten Klimaparameter in IDA ICE finden sich im Annex A.

3.3.3 Gebäudemodell

Die Gebäudemodelle basieren vorwiegend auf den Daten der zur Verfügung stehenden Energienachweise. Einige Kennwerte sind im Annex F zusammengefasst.

3.3.4 Interne Lasten

Für die Simulationen wurden die Werte für die internen Lasten von Geräten, Personen und Beleuchtung aus der Norm SIA 2024:2021 verwendet. Da die Verwaltungsgebäude «Oblamatik» und «OST-Forschungszentrum» mit Messdaten aus den Jahren 2020 und 2021 validiert wurden, mussten die internen Lasten gegenüber den Normwerten reduziert werden. Aufgrund der temporären HomeOffice-Pflicht war davon auszugehen, dass die internen Lasten in diesem Zeitraum deutlich geringer ausfallen als im Normalbetrieb. Die internen Lasten wurden für die Wintermonate (Okt-Apr) auf 20 % und für die Sommermonate (Mai-Sep) auf 60 % reduziert. Dies wurde für alle Gebäude mit Ausnahme des Bürogebäudes «3-Plan» umgesetzt, da für dieses Gebäude die dynamische Simulation mit Messdaten aus dem Jahr 2018 durchgeführt wurde.

3.3.5 Sonnenschutz

Alle im Detail untersuchten Gebäude verfügen über einen aussenliegenden Sonnenschutz. Deshalb wurde für alle Gebäude die Regelung nach SIA 180 C1 für die Steuerung der Storen festgelegt. Das heisst, der aussenliegende Sonnenschutz wird automatisch aktiviert sobald folgende Bedingungen erfüllt sind:

- wenn die Sonneneinstrahlung auf das Fenster 200 W/m^2 überschreitet
- die empfundene Raumtemperatur oberhalb der in SIA 180 (Figur 4) dargestellten unteren Grenzlinie liegt (siehe Abbildung 14)

- 1 m über der Dachkante ist die Windgeschwindigkeit kleiner als der eingegebene Grenzwert von 10 m/s

Figur 4 Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind, je nach gleitendem Mittelwert der Aussentemperatur

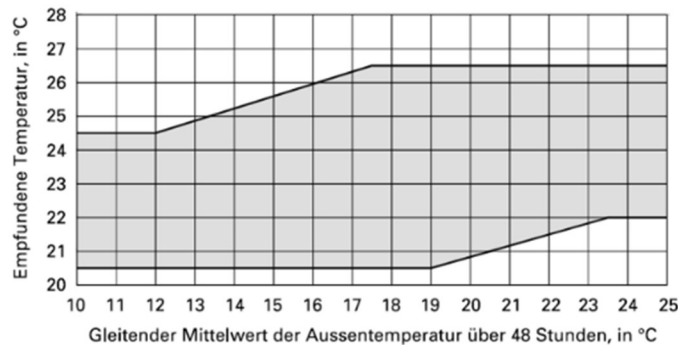


Abbildung 14: Definition des zulässigen Temperaturbereichs aus der SIA 180 – Figur 4.

Dabei wird ein Abminderungsfaktor für den g-Wert von 0.2 (SIA Zielwert) eingesetzt. Dies bedeutet, dass bei geschlossenem Sonnenschutz der g-Wert des Fensters um 80 % reduziert wird, also bei einem Fenster g-Wert von 0.5 auf einen Gesamt g-Wert des Fensters mit Verschattung von 0.1.

3.3.6 Gebäudetechnik, Sollwerte und Regelung

Für die Berechnungen nach Norm SIA 380/1 wurden keine Abweichungen zur Norm vorgenommen. Die Raumsolltemperaturen als auch der thermisch wirksame Aussenluftvolumenstrom wurden entsprechend der gewählten Gebäudekategorien unverändert übernommen.

Für die dynamischen Simulationen wurden die Sollwerteneinstellung der SIA 380/2:2022 übernommen. Als Basis dienen dabei die in Abbildung 15 aufgeführten Temperaturbereiche. Die Tabelle 11 fasst die verwendeten Sollwerte und Regeleinstellungen als auch die relevante Gebäudetechnik für die Simulationen der unterschiedlichen Gebäude zusammen.



Figur 1 Raumtemperatur-Sollwerte für Heizen und Kühlen

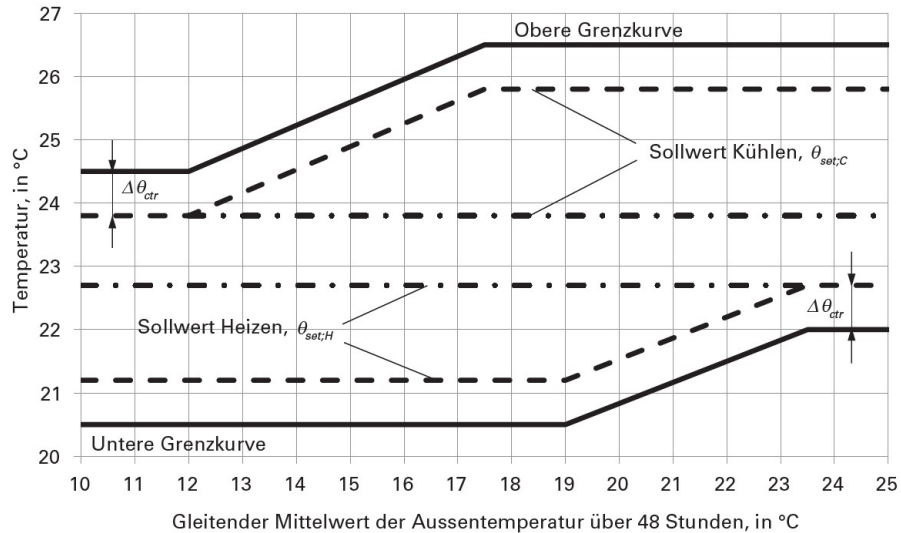


Abbildung 15: Raumtemperatur-Sollwerte nach SIA 380/2:2022 – Kapitel 5.2.2.3 Figur 1. Die obere und untere Grenzkurve (durchgezogene Linie) entsprechend den Anforderungen der SIA 180:2014. Die konstanten Sollwerte (strichpunktierte Linien) sind nur relevant für Gebäude, die keiner Wohn- oder Büronutzung entsprechen (z.B. Schwimmbäder, Turnhallen, Garderoben etc.). Die Sollwerte mit angepassten Kurven (gestrichelte Linien) berücksichtigen eine saisonale Abhängigkeit der Bekleidung. Der Term $\Delta\theta_{ctr}$ bezeichnet die Regelabweichung der Wärme- und Kälteabgabe.

Tabella 11: Zusammenfassung der verwendeten Regelparameter und Einstellung für die Bedarfssimulationen.

Gebäude	Berechnung	Parameter	Wert
Oblamatik	dynam. berechneter Heizwärmebedarf (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert Heizen	Gestrichelte Line, Regelabweichung 0.5 °C
	dynam. berechneter Klimakältebedarf (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert Kühlen	Gestrichelte Line, Regelabweichung 0.5 °C
3-Plan, OST-Forschungszentrum, MFH	dynam. berechneter Heizwärmebedarf (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert Heizen	Strichpunktierte Line, Regelabweichung 0.5 °C
	dynam. berechneter Klimakältebedarf (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert Kühlen	Strichpunktierte Line, Regelabweichung 0.5 °C
Alle	Heizlast (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert	Gestrichelte Line (unten)
		Interne Lasten	Keine
		Vorkonditionierung	14 Tage
Alle	Kühllast (SIA 380/2:2022)	Raumtemperatur-Sollwert	Gestrichelte Line (oben)
		Interne Lasten	Keine
		Vorkonditionierung	14 Tage
Alle	Alle Normberechnungen	Heiz- und Kühlelemente	Ideale Elemente
Verwaltungsgebäude	Alle Normberechnungen	Lüftung	Heizregister, Kühlregister, Wärmerückgewinnung (70%), Zuluftventilatoren, Abluftventilatoren
MFH	Alle Normberechnungen	Lüftung	Heizregister ¹⁶ , Wärmerückgewinnung (70%), Zuluftventilatoren, Abluftventilatoren

Für die Simulation der Lüftung sind möglichst die realen Einstellungen (Regelbescrieb) für die Regelung der Volumenströme verwendet worden. Diese variieren je nach Raumnutzung und können bedarfsabhängig sein (Luftqualität) oder konstant (Nebenräume und Aufenthalt). Für alle Bürogebäude wurde für die Wochenende ein reduzierter Volumenstrom berücksichtigt. Die Vorerwärmung der Zuluft wird für das Oblamatik und OST-FZ nach der Aussentemperatur

¹⁶ Beide im Detail untersuchten Wohngebäude weisen ein Heizregister auf, was für Wohnbauten dieser Grösse eher selten der Fall ist



geregelt. Für das 3-Plan Gebäude wurden keine Heiz- und Kühlregister berücksichtigt. Für die Gebäude Oblamatik und 3-Plan wurde zusätzlich noch eine Nachtauskühlung berücksichtigt. Dies wurde nach SIA 180 C.2 und C.3 berücksichtigt (siehe Abbildung 16), die Fenster sind unter Einhaltung folgenden Bedingungen geöffnet:

- die Raumlufftemperatur war am letzten Abend um 22 Uhr über 24 °C
- die aktuelle Raumlufftemperatur liegt über dem Heizsollwert
- die Aussenlufttemperatur liegt tiefer als die Raumlufftemperatur.

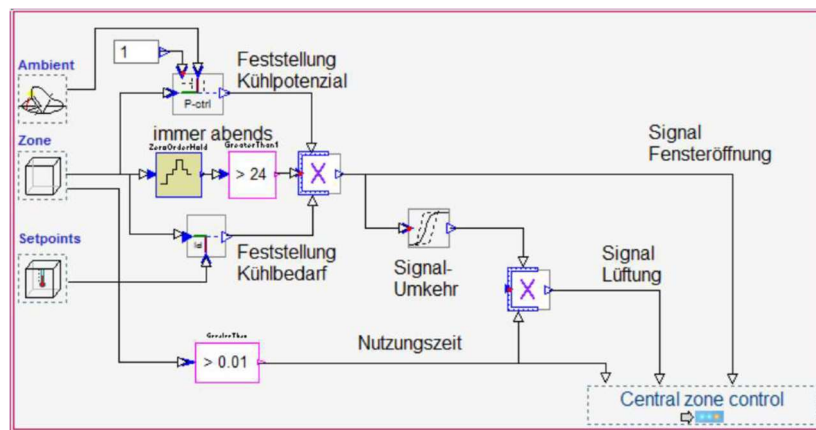


Abbildung 16: Fensterlüftungsregelung nach SIA 180 C2/C3 implementiert in IDA ICE.

Weitere Angaben zu den Simulationseinstellungen sind im Annex F aufgeführt.

3.4 Systemsimulationen

Aufbauend auf der Charakterisierung des Gebäudebetriebs und der Lastsituation wird die Dimensionierung des Wärmeerzeugers, also in diesem Fall der Wärmepumpe, analysiert und modelliert. Ziel der Systemmodellierung und -simulation ist eine Beurteilung der Auswirkungen der realen Dimensionierung des Wärmeerzeugers auf das Betriebsverhalten und die Performance. Nach Validierung der Modelle an den verfügbaren Messdaten können dann im Anschluss mittels Simulationen die Einflüsse verschiedener Grade an Überdimensionierung oder eine Variation des Speichervolumens untersucht und interpretiert werden. Daraus lassen sich Empfehlungen für Systemverbesserungen ableiten.

3.4.1 Modellaufbau

Zur Systemmodellierung werden dabei die Systemmodelle auf die wesentlichen Anlagenkomponenten reduziert: Wärmeerzeuger, Wärmequelle- bzw. -senke, Gebäude bzw. Heizlasten und zwischengeschalteter Speicher. Diese Komponenten werden in Matlab-Simulink mit der Carnot-Toolbox [7] modelliert. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf das Betriebsverhalten und die Regelmöglichkeiten der Wärmepumpe gelegt, um den realen Anlagenbetrieb möglichst genau anhand der vereinfachten Modelle in der Simulation abbilden zu können. Fehlende Angaben zur Wärmepumpe, etwa des Herstellerkennfelds, können über gezielte Auswertungen des Anlagenbetriebs aus den Messdaten extrahiert werden (siehe nachfolgende Beschreibung des Wärmepumpenmodells). Anhand der so abgeleiteten Modelle

können dann für spezifische Betriebsfälle längere Zeiträume, wie die Heizperiode oder Jahressimulation ausgewertet und an den verfügbaren Messdaten validiert werden, so dass eine ausreichend genaue Abbildung des Anlagenbetriebs für den Einsatz des Modells für andere Lastsituationen und veränderte Regelstrategien gewährleistet werden kann. Im Anschluss können aus diesen Simulationen beliebige Prozessdaten ausgewertet werden, mit welchen Rückschlüsse auf Effizienz, Ökonomie und Verbrauch getroffen werden können. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zur Modellierung der wesentlichen Anlagenkomponenten gegeben.

Wärmepumpen

Die Wärmepumpen werden anhand des Leistungs- und COP-Kennfeldes, einer sogenannten Performance Map (PM) modelliert. Basierend auf den Quellen- und Senktemperaturbedingungen und dem Lastzustand können die Leistung und der COP der WP ausgewertet werden. Insgesamt wurden fünf verschiedene Performance Maps (PM) aufgestellt und, soweit verfügbar, mit Messdaten validiert, die die wesentlichen Verdichterregelungen eines Ein-/Aus-Betriebs, einer Anlage mit mehreren Verdichtern bzw. eine kaskadierte WP und eine Invertergeregelter WP abbilden.

Je nach Typ und Aufbau der WP können allfällig nicht alle Betriebsmodi bzw. das gesamte Betriebsverhalten aus Herstellerdaten synthetisiert werden, z. B. bei Anlagen mit mehreren Verdichtern oder leistungsgeregelten Komponenten. Hier kann für die Modellierung auf die verfügbaren Messdaten zurückgegriffen werden, in dem die PM gezielt für Lastzustände ausgewertet und ergänzt werden, um das vollständige Betriebsverhalten abzubilden. Als alternativer Modellierungsansatz sind auch Modelle auf Basis des Gütegrads in Abhängigkeit der Wärmepumpenbauart implementiert worden.

Die PM der Anlage mit mehreren Verdichtern wurde aus den Messdaten des Bürogebäudes «OST-Forschungszentrums» für eine WP mit vier Verdichtern erstellt. Aufgrund verschiedener Restriktionen, welche beim Erstellen einer PM aus Messdaten (siehe Kap. 3.4.4 bzw. Anhang D zur Validierung Wärmepumpen-Modelle) entstehen, wurde die PM für eine invertergeregelter WP aus den Labor- und Feldmessdaten einer BS2 Niederhub WP erstellt. Diese hat ein auf niedrige Temperaturhübe optimiertes Kennfeld, welches dementsprechend hohe JAZ erzielt, die nicht von jeder WP erreicht werden. Die Kennfelder werden in Kapitel 3.4.4 näher beschrieben.

Erdwärmesondenfeld

Die Modellierung von Erdwärmesondenfelder erfolgt mit einem selbst entwickelten Simulink-Block, mehrheitlich basierend auf dem Modell von Huber [8] mit einem Widerstandsmodell für den Sonden-Nahbereich und der sogenannten g-function nach Eskilson [9] im Sonden-Fernbereich. Damit kann eine Erdsondenquelle an die Wärmepumpe gekoppelt werden und auch Überdimensionierungen in Erdwärmesondenfeldern, welche einen wesentlichen Faktor in den Investitionskosten darstellen können, siehe Kapitel 4.3, untersucht werden.

Wärmespeicher

Die Modellierung von integrierten Wasserspeichern erfolgt als Schichtenspeicher mit einer wählbaren Anzahl an Schichten. Damit können unterschiedliche Temperaturniveaus für Speicherladung und die Übergabesysteme sowie die Speicherbewirtschaftung hinreichend



genau abgebildet werden, und auch unterschiedliche Speicherregelungen berücksichtigt werden.

Gebäude

Das Gebäude wurde als zeitlich hochaufgelöstes Lastprofil basierend auf den Messdaten integriert. Für Detailuntersuchungen können auch dynamische Raummodelle angekoppelt werden, die die Kapazität des Gebäudes abbilden können. Darauf wurde jedoch verzichtet, da in dieser Arbeit schwerpunktmässig untersucht wird, wie der Wärmeerzeuger auf Überdimensionierung reagiert, was die Modellierung erheblich vereinfacht. Für die Simulationen wurde das Heizsystem zusätzlich mittels einer thermischen Kapazität abgebildet. Das Lastprofil entzieht dieser Kapazität Wärme, die vom Wärmeerzeuger wieder bereitgestellt werden muss. Aufgrund des typischen Heizsystems in Nicht-Wohngebäuden wurde für die Untersuchung eine geringe Kapazität des Heizsystems entsprechend einer Decken-, Konvektor- oder Radiatorheizung zugrunde gelegt. Dies stellt auch den kritischen Fall dar, da das Takten der Wärmepumpe erhöht wird, was zu Effizienzeinbussen führen kann. Zum Vergleich wurden auch einzelne Simulationen zusätzlich mit einer hohen Kapazität entsprechend einer Bodenheizung durchgeführt.

Wetterdaten

Das Modell wird mit Wetterdaten (Messdaten für die Validierung, Normwetterdaten für die weiteren Untersuchungen) gekoppelt. Die Wetterdaten dienen auch als Quelltemperatur für die Simulation der Luft-Wasser-Wärmepumpen. Für die Simulation wurden die Wetterdaten von Zürich MeteoSchweiz mittleres Jahr verwendet.

3.4.2 Vorgehensweise bei realen Gebäuden

Basierend auf der Verfügbarkeit von Messdaten wurden zunächst die Daten der zwei Gebäude «Oblamatik» und «Gebäude 8 der OST» untersucht, die beide sowohl einen Heiz- als auch Kühlbetrieb aufweisen. Dafür werden die Daten zunächst aufbereitet und gefiltert. Beim Filtern werden stationäre Zustände des Wärmepumpenbetriebs eruiert und dynamische Vorgänge wie Anfahren und Abschalten der Wärmepumpe respektive einzelner Verdichter entfernt, so dass stationäre Zustände aus den Messdaten extrahiert werden können, die eine Ergänzung für die PM des Wärmepumpenmodells liefern. Nach Erstellung der PM wird die Regelung der Wärmepumpe entsprechend des realen Gebäudebetriebs integriert, so dass das Modell an den Messdaten validiert werden kann. Nach guter Übereinstimmung mit den Messdaten werden Parametervariationen durchgeführt, um die Effizienz des Wärmepumpenbetriebs bei unterschiedlicher Auslegung, Betriebszuständen und Systemkonfigurationen, etwa mit integrierten Speichern oder reduziertem Erdsondenfeld, auswerten zu können.

3.4.3 Einschränkungen Modellierung

Die Abbildung des Gebäudes als Lastprofil ist eine Vereinfachung, die den Modellaufbau vereinfacht, die Simulation beschleunigt und die eine wesentliche Reduktion an Parametern bewirkt. Durch die Beschränkung des Gebäudes auf ein Lastprofil können jedoch auch bestimmte Effekte im Gebäude nicht detailliert abgebildet werden, die allfällig auch Rückwirkungen auf den Betrieb des Wärmeerzeugers haben. Insbesondere wird die Gebäuderegelung nur abstrahiert implizit im Lastprofil betrachtet. Damit kann nicht explizit die Abregelung der Heizflächen abgebildet werden, die durch Reduktion der Kapazität des Gebäudes

bzw. Wärmeübergabesystems Einfluss auf das Taktverhalten des Wärmeerzeugers haben können.

Im Gebäudemodell wird zwar eine Kapazität des Heizsystems berücksichtigt, die aber konstant ist und nicht in Abhängigkeit des Raumzustands geregelt wird. Da für die Untersuchung Bürogebäude zugrunde gelegt werden, wird von einem Übergabesystem mit begrenzter Kapazität und geringer Ankopplung an die Gebäudemasse ausgegangen. Dies ist für die Auswirkungen der Überdimensionierung auf einen Taktbetrieb der kritischere Fall, da eine höhere Kapazität dämpfend wirkt und die Laufzeit verlängert.

Weiterhin kann auch keine detaillierte Abbildung der Raumzustände in Abhängigkeit des Wärmepumpenbetriebs erfolgen und hydraulische Einflüsse nicht abgebildet werden. Diese werden nur implizit im Lastprofil für die Simulationseinstellungen der zugrundeliegenden Gebäudesimulation des SPF abgebildet.

Auf diese Weise können die grundlegenden Auswirkungen einer Überdimensionierung auf den Wärmepumpenbetrieb abgebildet werden, aber keine Optimierungen für das Gesamtsystem vorgenommen werden.

3.4.4 Validierung Wärmepumpen-Modelle

Es wurden unterschiedliche PM der verschiedenen WP-Typen abgeleitet. Gesamthaft wurden fünf PM erstellt, die zum Teil direkt aus Herstellerangaben parametrisiert werden konnten und an verfügbaren Messdaten validiert wurden. Falls nicht genügend Herstellerdaten zur Verfügung standen, wurden Messdaten zur Hilfe genommen, und zur Validierung ein anderer Messdatenzeitraum gewählt. Die fünf PM beziehen sich auf die folgenden WP-Typen.

- eine Ein-/Aus geregelte PM einer Luft-Wasser-WP, die von der Uni Genf bereitgestellt wurde,
- zwei Inverter-geregelte PM von Luft-Wasser WP aus Herstellerdaten
- eine PM der Sole-Wasser WP mit vier Verdichtern aus dem Gebäude 8 der OST, die aus Hersteller- und Messdaten identifiziert wurde
- eine Inverter-geregelte Sole-Wasser-WP, die ebenfalls aus Hersteller und Messdaten identifiziert wurde.

Für die identifizierten Modelle wurden auch Validierungen durchgeführt, die im Annex D dargestellt sind.

3.4.5 Vorgehensweise

Aufgrund der Schwierigkeit, klar festzustellen, wie stark ein Wärmeerzeuger überdimensioniert ist, wurden nach der Validierung dazu übergegangen, die Simulationen relativ abstrahiert von den realen Gebäuden durchzuführen.

Da detaillierte Daten zunächst nur von zwei Gebäuden, dem Gebäude 8 der OST und dem Gebäude Oblamatik vorlagen, wurde mit der Begleitgruppe abgestimmt, dass statt einer Optimierung der konkreten Gebäude eine eher generische Auswertung der unterschiedlichen Verdichterregelungen bzw. WP-Typen erfolgen soll, um so verallgemeinerte Aussagen für die Auswirkungen einer Überdimensionierung auf unterschiedliche WP-Typen abzuleiten. Um



Einflüsse der PM ebenfalls zu eliminieren, wurde für die Sole-Wasser-WP die BS2-WP zugrunde gelegt, und der WP-Typ mit fester Drehzahl ohne Inverterregelung durch Auswertung der BS2 PM bei 50 Hz ermittelt.

Das gleiche skalierte Kennfeld wurde ebenfalls für den WP-Typ mit mehreren Verdichtern zugrunde gelegt und entsprechend skaliert, bei 2 Verdichtern und korrekter Auslegung halbiert, bei vier Verdichtern auf 25% reduziert. Für den WP-Typ mit Inverter kann direkt das validierte BS2-Kennfeld genutzt werden.

Bei den Luft-Wasser Wärmepumpe wurde die Untersuchung auf den Fall mit Inverterregelung beschränkt, da dieser WP-Typ kritisch auf Überdimensionierung reagiert. Dazu wurden zwei Herstellerkennfelder mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewertet, um den Einfluss der PM auf das WP-Verhalten darzustellen. Als Vergleich wurde ebenfalls ein PM mit fester Drehzahl aus einer PM durch Festlegung der Drehzahl auf 50 Hz generiert. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die PM der Sole-Wasser und Luft-Wasser WP jeweils am Anfang des Kapitels der Diskussion der Simulationsresultate dargestellt.

Die Überdimensionierung der WP wird über das Lastprofil der IDA ICE Simulationen ermittelt. Dabei wird die höchste Spitze des Lastprofils als Soll-Heizleistung der WP angenommen. Anschliessend wird die PM der WP auf diese Leistung skaliert. Für einheitliche Lastbedingungen wurde für alle WP-Typen das Lastprofil des Gebäudes 8 der OST zugrunde gelegt.

Dabei wird angenommen, dass das Verhalten des Systems bei hohen Leistungen nicht signifikant anders als bei kleineren Leistungen ausfällt, also das zyklische Verhalten eines Gebäudes nicht an die Heizlast gekoppelt ist, sondern sich nur die Heizlast des Gebäudes zwischen verschiedenen grossen Gebäuden mit ähnlichem Ausbaustandard unterscheidet.

Zusätzlich wird angenommen, dass die WP und ihr Verhalten beliebig skaliert werden kann. Dem ist in Realität nicht so, erwies sich aber für die verallgemeinerte Betrachtung als aussagekräftiger Ansatz, da das grundlegenden Verhalten abgebildet werden kann und für die skalierten Fälle das grundlegende Verhalten nicht ändert. Die Skalierung wurde über die Nennleistung bei dem jeweiligen Betriebspunkt vorgenommen. Für die mehrstufige Wärmepumpe wurde zusätzlich über die Verdichteranzahl skaliert. Dementsprechend lässt sich so eine beliebige Anzahl Verdichter einstellen. Dieses Vorgehen erlaubt es, die Dimensionierung klar festzulegen und so einen gut dimensionierten Fall mit einem überdimensionierten Fall zu vergleichen. Das Vorgehen ist in Abbildung 17 dargestellt, welche den Workflow der Simulationen zeigt.

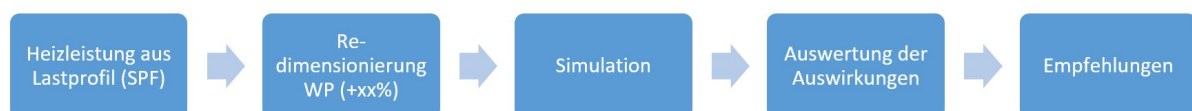


Abbildung 17: Vorgehen WP-Simulationen am IET.

Die Simulation wurde ausschliesslich für den Heizbetrieb durchgeführt, da die Resultate des Heizfalls eins zu eins auf den Kühlfall übertragen werden können und beide Betriebsmodi sich analog hinsichtlich der Auswirkungen auf die Überdimensionierung der WP verhalten, was auch von der Begleitgruppe bestätigt wurde. Im Weiteren wurden die Heizkurve und das

Lastprofil des Gebäudes 8 der OST sowie die SIA-Wetterdaten von Zürich Meteoschweiz für ein normales Jahr verwendet.

Tabelle 12 gibt eine Übersicht der betrachteten PM und simulierten Konfigurationen. Diese wurde jeweils mit verschiedenen Speichervolumina und Überdimensionierungen zwischen 0% und 100% simuliert.

Tabelle 12: Simulierte WP-Typen und Kennfelder

Kennfeld (PM)	Konfiguration	Wärmequelle	
BS2 Niederhub WP	Einstufige Ein/Aus WP	Erdsondenfeld	Erdsondenfeld
	WP mit zwei Verdichtern	reskaliert	(ein Variante mit
	WP mit vier Verdichtern		konstanter Auslegung)
	WP mit Inverterregelung		
WP 1	WPs mit zwei Invertern		
WP 1	Inverter-WP	Aussenluft	
WP 2	Inverter-WP		
WP 1	Einstufige Ein/Aus WP	Fiktive Modifikation der WP1	

Variation Speichervolumen

Die Speichervolumina wurden über drei Stufen variiert.

- Kein Speicher
- 3.22 m³ Speicher
- 6.44 m³ Speicher

Die Speichervolumina wurden aus der STASCH-Empfehlung [10] von 35 l/kW abgeleitet, und ein doppelt so grosser Speicher als Variante betrachtet, was gemäss Rückmeldung aus der Begleitgruppe jedoch allenfalls zu grosse Speichervolumina für die Platzverhältnisse im Gebäude ergibt, da die STASCH-Planungshilfen für Kleinwärmepumpenanlage bis 25 kW entwickelt wurden, und für grössere Anlagen allfällig nicht der nötige Platz für diese Speicherauslegung zur Verfügung steht.

Variation Überdimensionierung

Die Überdimensionierung wurde in fünf Schritten von +0%, +20%, +40%, +80%, +100% variiert. Diese Reihenfolge wurde gewählt, um den kaskadierten WP bei der Überdimensionierung keinen Vorteil zu geben. Würde diese in 25%-Schritten gewählt, entspricht dies den Leistungsschritten der WP mit zwei bzw. vier Verdichtern beim Zuschalten von zusätzlichen Verdichtern.

3.4.6 Taktverhalten

Das Taktverhalten und die generellen Einflüsse auf eine WP sind sehr schwierig zu quantifizieren, da sie genau wie die PM typspezifisch sind, aber keine Informationen dazu zur Verfügung stehen. Im Wesentlichen ergeben sich jedoch drei negative Aspekte aus dem Taktverhalten:

- Verkürzung der Verdichter-Lebensdauer: Vom Industriepartner wurde ausgeführt, dass ein Schaltzyklus mindestens eine Betriebsstunde an Lebensdauer kostet. Dementsprechend kritisch ist ein Taktbetrieb zu beurteilen, da allfällig die Lebensdauer deutlich reduziert wird.



- Standby-Verluste: Stromverbrauch von Regelung, Ölsumpfheizung, Inverter etc. bei ausgeschaltetem Verdichter
- Anfahr-Verluste: Nach dem Start der Wärmepumpe dauert es einige Minuten, bis sich die Überhitzungsregelung in einem stabilen Betrieb bei niedriger Überhitzung eingeregelt hat. Zu Beginn ist die Überhitzung üblicherweise eher etwas zu hoch (Schutz des Verdichters vor Kältemittel-Flüssigkeitsschlägen), was zu einer verminderten Verdampfungstemperatur und damit einem geringeren COP führt.

Nach Rücksprache mit den Industriepartnern und dem WPZ¹⁷ wurden folgende Massnahmen in die Simulation implementiert:

- Anfahrrampe: Die WP benötigt eine Minute, um auf die maximale Heizleistung hochzufahren
- Zeitlich begrenzte Reduktion der Quellentemperatur, um eine niedrigere Verdampfungstemperatur zu imitieren (-3 K über 2 Minuten)
- Standby-Verbrauch von 15 W für Mehrverdichter- und 40 W für Inverter-WP in Anlehnung an [11]

3.4.7 Regelung und Daten

Die Wärmepumpe wird auf die durch das Lastprofil vorgegebene Vorlauftemperatur (Eintritt in den Heizkreis) geregelt. Die Regelung gibt dem Verdichter eine minimale Laufzeit von zehn Minuten vor.

Bei den Modellen mit eingebautem Speicher regelt die WP ebenso auf die Vorlauftemperatur ins Gebäude. Da keine Kapazität zwischen Speicher und Gebäude eingebaut ist, entspricht dies einem Temperatursensor direkt am Speicheraustritt des Heizwasserstroms.

Mehrverdichterregelung

Die Mehrverdichterregelung wurde mittels einer parametrierbaren Hysterese implementiert. Wenn die Temperatur am Sensor über die Solltemperatur steigt, werden in 10-Minuten-Abständen jeweils ein Verdichter ausgeschaltet, bis die Sensortemperatur unter die Solltemperatur fällt. Analog wird mit der Erreichung der unteren Schwelle der Hysterese verfahren, jedoch nur mit einer Minute Wartezeit.

Um für alle Wärmepumpentypen die gleiche Regelung zu betrachten und damit Unterschiede aufgrund verschiedener Regelstrategien auszuschliessen, wurde auch bei den Wärmepumpen mit einem Verdichter und fester Drehzahl eine Mindestlaufzeit anstelle einer in der Praxis häufig anzutreffenden Wiedereinschaltsperr implementiert. Die Regelung der Wärmepumpen ist zudem darauf ausgerichtet, sicherzustellen, dass die vom Gebäude geforderte Leistung jederzeit verfügbar ist. Dadurch wird gewährleistet, dass die Soll-Vorlauftemperatur auch bei begrenzter Gebäudekapazität möglichst präzise aufrechterhalten werden kann. Eine Wiedereinschaltsperr bei Wärmepumpen mit fester Drehzahl und begrenzter Kapazität birgt die Gefahr, dass die erforderliche Leistung nicht erbracht werden kann. Infolgedessen könnte die gewünschte Temperatur nicht aufrechterhalten werden, und die Vergleichbarkeit des Systems mit anderen Konfigurationen wäre nicht mehr gewährleistet.

¹⁷ Wärmepumpen-Testzentrum der OST in Buchs

Inverter-Regelung

Die Regelung der Inverter-WP erfolgt mittels PID-Regler. Die Regelparameter lehnen sich an die Regelung des «Oblamatik» Gebäudes an. Diese berechnet aus der gemessenen Temperatur eine Speicherbeladung und schaltet die erste WP ein, sobald der Speicher bei 50% Beladung ist und schaltet bei 95% Beladung wieder aus. Der PID gibt ein Drehzahlsignal aus. Falls dieses unterhalb der minimalen Drehzahl liegt, wird eine Ein-/Aus-Regelung wie bei den Mehrverdichter-WPs eingeschaltet. Jedoch hat diese keine Einschaltverzögerung um Diskontinuitäten in der Simulation zu vermeiden.

In der Simulation wurde ebenfalls eine Speicherbeladung berechnet. Dabei wurde diese Beladung an den PID-Regler weitergegeben, welcher im Anschluss ein Drehzahlsignal ausgibt. Wenn dieses Signal unter 30% gesunken ist, schaltet die Steuerung auf eine Stufen-Steuerung um und schaltet die WP gemäss der Mehrverdichterregelung.

Bei der zwei-Inverter-Regelung wird die zweite WP zugeschaltet, wenn die erste WP länger als 10 min bei mehr als 70% Drehzahl läuft. Ausgeschaltet wird die zweite WP, wenn die erste WP länger als 10 min bei weniger 40% Drehzahl läuft.

Temperatur-Überhöhung

Die Regelungen nehmen die Soll-Vorlauftemperatur der Heizkurve als Regelgrösse und bewirtschaften das System dementsprechend gleitend. Die Mehrverdichterregelung basiert jedoch auf einer Hysterese zwischen der Einschalt- und Ausschalttemperatur. Dies führt im System zu einer Temperaturüberhöhung. In diesen Simulationen wurde diese auf fünf Kelvin eingestellt, womit einerseits die Realität gut abgebildet wird, andererseits aber auch alle Modelle gut funktionieren.

Beladung in WP

Das System besteht aus zwei Hydraulikkreisen, einem Speicherladekreis, welcher die Wärme der WP zum Speicher transportiert und das Verteil- und Übergabesystem, welches die Wärme anschliessend zum Gebäude transportiert. Ist kein Speicher integriert, liegt dementsprechend nur das Verteilsystem vor. Dieses System kann entweder mit einem fixierten Massenstrom oder mittels eines fixierten Temperaturhubs definiert werden. Hier wurde eine fixierte Temperaturbeladung implementiert. Dies bedeutet, dass die WP den eingehenden Strom immer um 5 K aufwärmt. Der Massenstrom wird dementsprechend angepasst.

Ziel der Systemsimulationen im Projekt OptiPower ist, die grundsätzliche Auswirkung einer Überdimensionierung auf den WP-Betrieb zu beurteilen. Dafür werden die häufigsten Verdichterkonfigurationen untersucht. Die implementierte Regelung zielt dabei primär darauf ab, die Lastanforderung des Gebäudes zu jedem Zeitpunkt einzuhalten, was entsprechend der Validierung in Annex D möglich ist. Für die unterschiedlichen Typen wurde eine weitgehend einheitliche Regelung entsprechend den obigen Angaben implementiert.

Bei den Untersuchungen wurde jedoch deutlich, dass die Regelung dabei teils hohen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Insofern sind die Ergebnisse so zu interpretieren, dass die wesentlichen Effekte der Überdimensionierung dargestellt werden können, jedoch je nach Anlagenkonfiguration allfällig noch Optimierungspotenzial der Regelung besteht, dessen Implementierung jedoch auch eine detailliertere Modellierung des Gebäudes erfordert hätte und damit den Rahmen dieser Untersuchung gesprengt hätte. Insofern sind die Ergebnisse



nicht als optimiertes System zu interpretieren und allfällig können einige der dargestellten Werte mit angepasster Regelung noch verbessert werden.

3.4.8 Auswertekriterien

Zur Auswertung des Betriebsverhaltens und der Auswirkung der Überdimensionierung der verschiedenen simulierten Varianten wurden nachfolgende technische Kriterien ausgewertet.

- Effizienz als Jahresarbeitszahl (JAZ) und Systemnutzungsgrad (SNG)

Für die Kennzahlen JAZ und SNG wurden die Definitionen und Systemgrenzen entsprechend [12] zugrunde gelegt, die in Abbildung 18 dargestellt sind. Die Effizienz wird für die einzelnen Stufen der Überdimensionierung dargestellt, um die Auswirkungen mit wachsender Überdimensionierung zu veranschaulichen.

- Laufzeit und Verdichterstarts

Die Verdichterstarts sind aus unterschiedlichen Gründen schädlich für die Effizienz der Anlage, wie schon in Kapitel 3.4.6 für die Modellierung des Taktverhaltens aufgeführt ist. Insbesondere wird die Effizienz durch Anfahrverluste und Stand-by Betrieb reduziert und die Lebensdauer des Verdichters verkürzt.

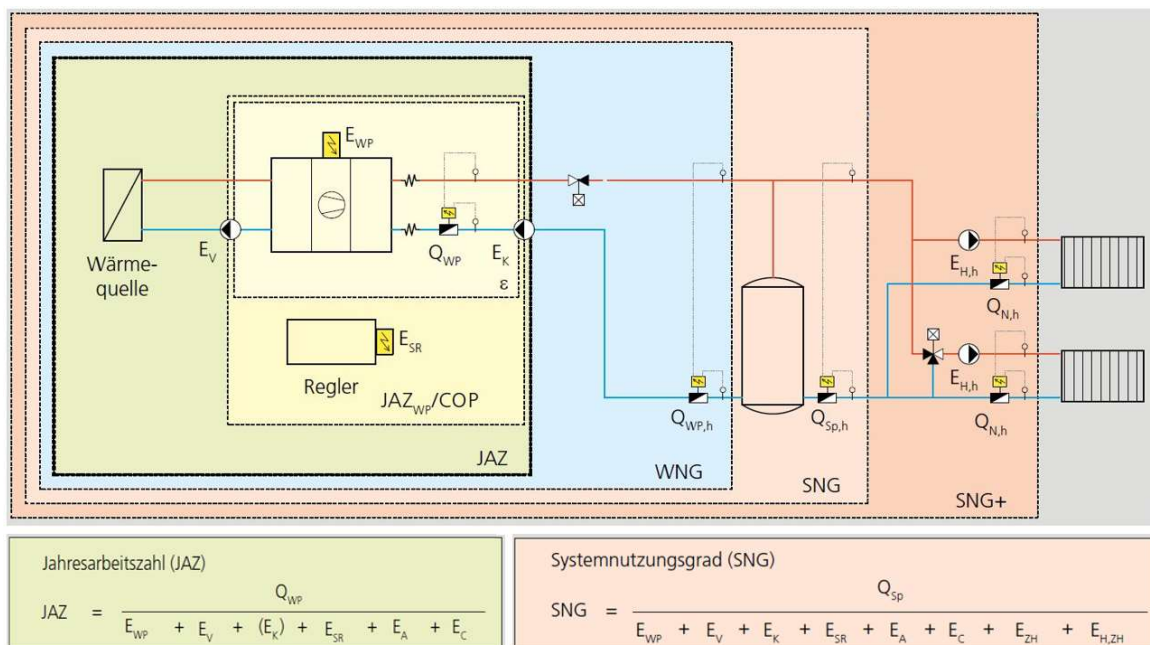


Abbildung 18: Systemgrenzen und Definitionen für die Jahresarbeitszahl (JAZ) und den Systemnutzungsgrad (SNG) (modifiziert nach [12]).

3.4.9 Darstellung der Ergebnisse

Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse wurde für alle Varianten die gleichen graphischen Darstellungen gewählt, welche die oben genannten Auswertungskriterien zusammenfassen und weitere Aspekte wie das Verhältnis aus Heizleistung der WP (Leistungskennlinie) zur Heizlast des Gebäudes über der Aussentemperatur (Energiesignatur) als Betriebspunkte gegenüberstellt oder die Entwicklung des Temperaturhubs mit der Überdimensionierung als Haupteinflussgrösse auf die Effizienz angibt. Bei den WP-Typen mit fester Drehzahl werden zusätzlich die anteiligen Verdichterlaufzeiten dargestellt.

Effizienz

Die Effizienz wird ohne und mit Speicherintegration über dem Anteil der Überdimensionierung dargestellt.

Auswertung Temperaturhub

Als Kriterium für die Entwicklung der Effizienz wird der Temperaturhub ausgewertet, der aus der Quellen- und der Senkentemperatur berechnet wird, wie in Abbildung 19 dargestellt. Als Darstellung wurden Boxplots gewählt, die bereits in Kapitel 3.2.3 eingeführt worden sind. Gründe für die Erhöhung der Quelltemperatur liegen in der Überdimensionierung des Erdwärmesondenfeldes (EWS-Feldes), Gründe für eine steigenden Senkentemperatur sind eine geringe Kapazität im Heizkreis, so dass nach Ladung der Kapazität die restliche Leistung zur Erhöhung der Senkentemperatur führt, da der Verdichter eine Mindestlaufzeit gemäss den Regeleinrichtungen aufweist.

Bei Erhöhung der Kapazität im Heizkreis über Speicherintegration steigt die Senkentemperatur nur moderat an, was sich positiv auf die JAZ auswirkt.

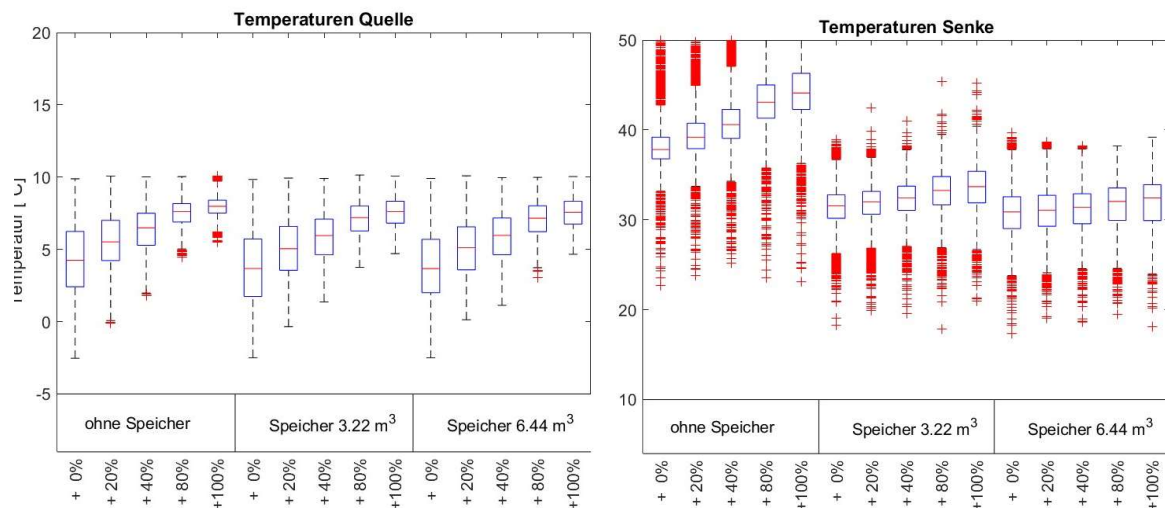


Abbildung 19: Entwicklung der Quellen- (links) und Senkentemperatur (rechts) mit und ohne Speicherintegration.

Leistungsdiagramm

In der Abbildung 20 wird die Heizleistung der WP über die Aussentemperatur blau dargestellt. Am Auslegungspunkt entspricht bei monovalenter Auslegung die Heizleistung der WP der Normheizlast. Das in grün dargestellte Heizlastband des Gebäudes stellt dabei eine idealisierte Abstraktion der realen Gebäudelast dar, die als Tagesmittelwerte als dunkelgrüne Punkte abgebildet ist. Als obere Grenze für das idealisierte Heizlastband des Gebäudes wurde die Gerade zwischen Auslegungsleistung und Heizgrenze von 15 °C angesetzt, bei der die Tageswerte klein werden. Die Graphik veranschaulicht die Differenz zwischen produzierter Leistung der WP und nachgefragter Leistung zur Deckung der Gebäudelast. Je nach WP-Konfiguration bzw. Verdichterregelung liegen mit zunehmender Aussentemperatur die Betriebspunkte der WP über der Gebäudelast, was zu kürzeren Laufzeiten und Taktbetrieb führen kann. Die Abbildung veranschaulicht, wie gut die Leistung der Wärmepumpe an die Gebäudelast angepasst werden kann. Da aber im realen Lastprofil einige Tagesmittelwerte auch jenseits der grünen Grenzkurve liegen, überschreitet die Wärmepumpe selbst bei guter



Leistungsanpassung, z.B. mit Inverterregelung, die Grenzkurve zur Deckung der Gebäudelast bei Tagesmittelwerten jenseits der Grenzkurve.

Zu den Betriebspunkten werden auch die Schaltzyklen pro Verdichter und die Laufzeiten jeweils für die korrekt dimensionierte und die 100% überdimensionierte WP als Balkendiagramm angegeben, um die Bandbreite dieser wichtigen Grössen für die Lebensdauer bewerten zu können. Die gesamte Darstellung vergleicht auch den Einfluss des Speichers auf Taktzyklen und Laufzeit durch Gegenüberstellung des Falls ohne Speicher mit den Speichervariationen.

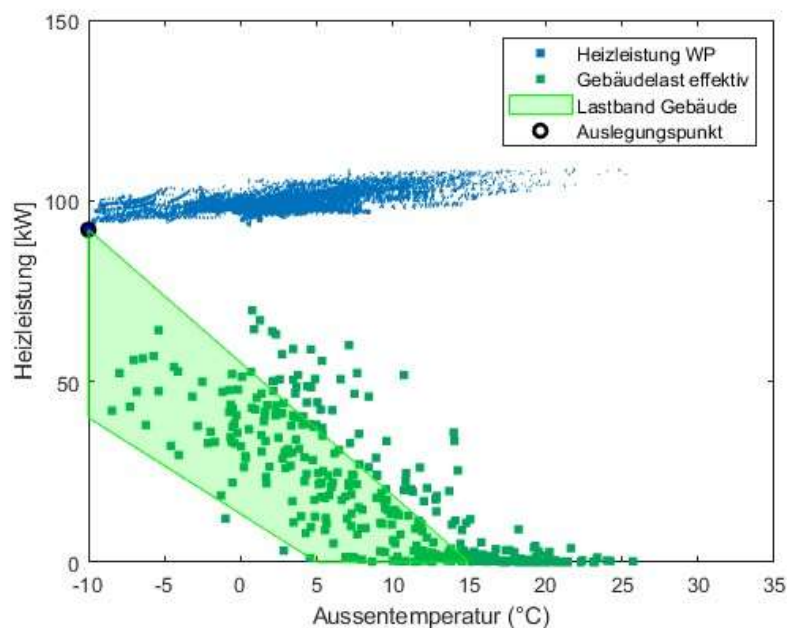


Abbildung 20: Vereinfachte Darstellung der Heizlast des Gebäudes als Band.

Verdichterlaufzeiten

Bei den WP-Typen mit fester Drehzahl (Ein-Aus-Regelung, mehrere Verdichter) wurde zusätzlich als anteilige Laufzeit angegeben, wie viele Verdichter, mit und ohne Speicher, in Betrieb sind. Dies zeigt insbesondere bei mehreren Verdichtern die Belastung der einzelnen Verdichter hinsichtlich der Lebensdauer und illustriert die technische Überdimensionierung.

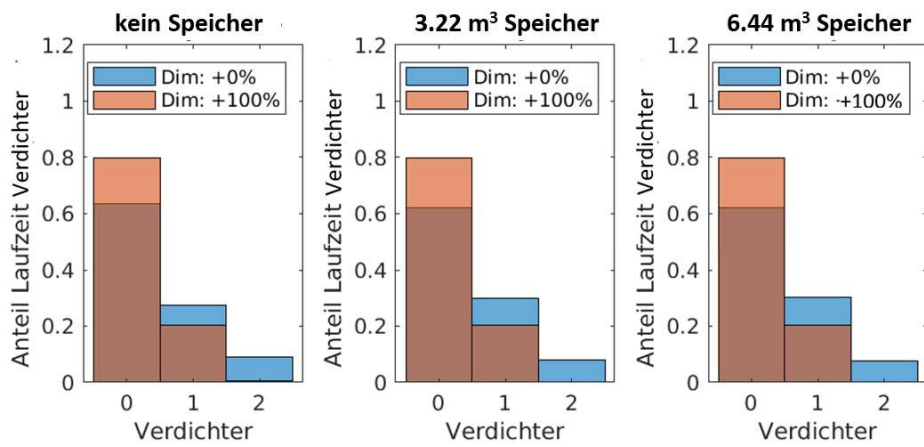


Abbildung 21: Beispiel der anteiligen Verdichterlaufzeiten bei zwei Verdichtern mit und ohne Speicherintegration.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Planung versus Messung

Die detaillierten Informationen zu den ausgewerteten Gebäuden sind im Kapitel 3.1 zu finden.

4.1.1 Bürogebäude detaillierte Auswertung

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate der drei im Detail untersuchten Bürogebäude (3-Plan, Oblamatik, OST-FZ) basieren auf der gemessenen Nutzenergie (Eintritt Wärme- und Kälteabgabesystem). Alle drei Gebäude werden über eine oder zwei Wärmepumpen versorgt ohne zusätzliche Wärmeerzeuger (z.B.: Gas oder Öl).

3-Plan

In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist die gemessene thermische Leistung für die «Box-Plot»- und «Energiesignatur»-Methode für das Bürogebäude 3-Plan dargestellt. In Abbildung 22 ist zusätzlich die installierte Leistung (rot gestrichelt) dargestellt. Die tatsächlich benötigte Heizleistung (Messung der Nutzwärme) liegt bei der «Box-Plot»-Methode im Median bei 27 kW bei einer Aussenlufttemperatur im Bereich von $-7\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Die Auswertung der «Energiesignatur»-Methode ergibt eine benötigte Leistung von 26 kW. Beide Methoden zeigen damit eine gute Übereinstimmung und liegen im Bereich der Messunsicherheit ($\pm 1.3\text{ kW}$). Die installierte Wärmepumpe hat somit eine um ca. 36 kW (+138%) höhere Leistung als im realen Betrieb benötigt.

Da bei diesem Gebäude der Heizungsplaner auch der Gebäudeeigentümer ist, wurde vom üblichen Vorgehen (nach SIA 384/1) bei der Bestimmung der Wärmeerzeugerleistung während der Realisierung abgewichen. Folgende Korrekturen wurden bei der Berechnung vorgenommen:

- Reduktion der Luftmengen um 20% unter einer Aussentemperatur von -2 °C
- Reduktion der Norm-Heizlast um 40% (Berücksichtigung von internen Wärmequellen)

Beim strikten Vorgehen nach SIA 384/1 unter Berücksichtigung von Sperrzeiten und der Lüftung (Verbundsystem) resultiert eine Wärmeerzeugerleistung von 80.1 kW. Werden die oben genannten Reduktionen berücksichtigt, resultiert noch eine Leistung von 54.1 kW.

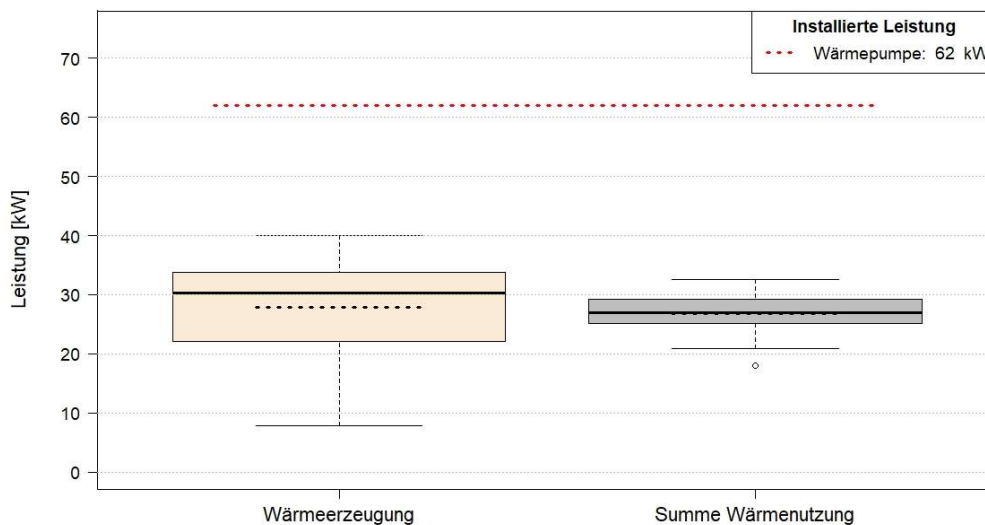


Abbildung 22: Vergleich der gemessenen Heizleistung des 3-Plan Gebäudes ab Wärmeerzeuger (Box-Plot links) und ab Wärmeverteilung (Box-Plot rechts) mit der installierten Leistung (rot-gestrichelte Linie). Die volle Linie im Box-Plot entspricht dem Medianwert und die gestrichelte Linie entspricht dem Mittelwert. Stündliche Messwerte im Temperaturbereich zwischen $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Messperiode vom 01.11.2017 bis 01.10.2018. Anzahl Messpunkte: 43.

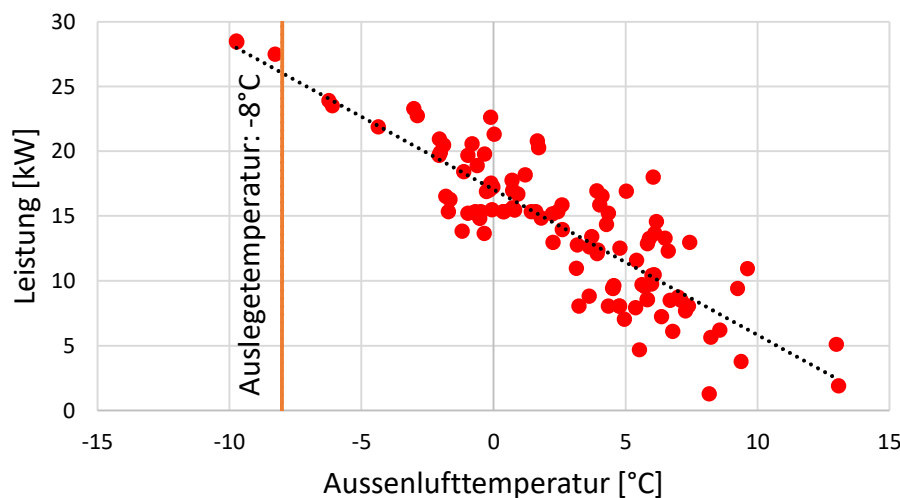


Abbildung 23: Leistungskennlinie des 3-Plan Gebäudes für die Messperiode vom 1.11.2017 bis 1.10.2018. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie).

In den nachfolgenden Abbildungen wird ein Vergleich zwischen Simulation und Messung vorgenommen, wobei die Messdaten für die Validierung der Simulation verwendet wurden. In Abbildung 10 ist links die Heizleistung und rechts die Kühlleistung dargestellt. Auffällig ist die geringe Kühlleistung im Vergleich zur Heizleistung, was für Bürogebäude eher ungewöhnlich ist. Der tiefe Kältebedarf (siehe Abbildung 11) ist auf die konsequente Nachtauskühlung zurückzuführen. Der Heizwärmebedarf wird mit den Simulationen leicht unterschätzt, was darauf zurückzuführen ist, dass es schwierig ist die Nutzungsprofile und Lüftungseinstellungen genau nachzuvollziehen und entsprechend in der Simulation abzubilden.

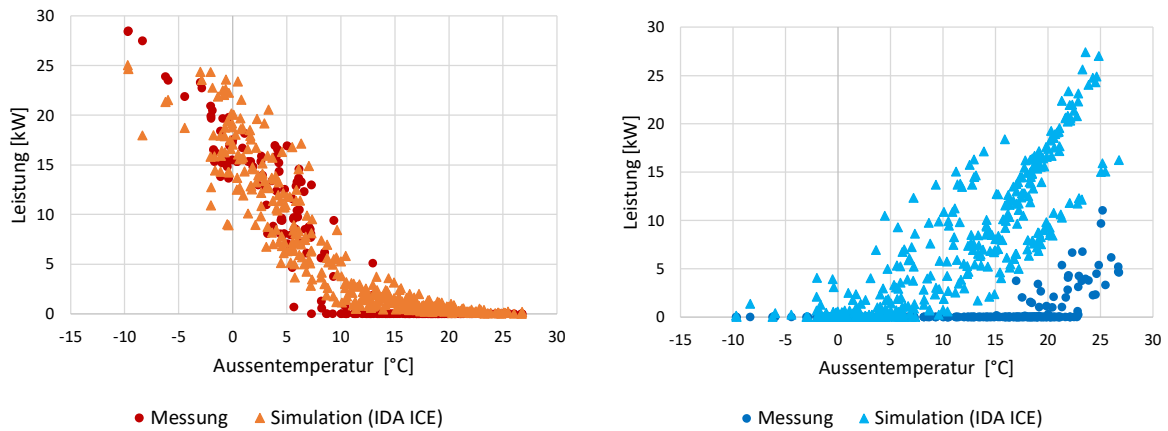


Abbildung 24: Tagesmittelwert der Heizleistung (links) und der Kälteleistung (rechts) in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für Messperiode Nov. 2017 – Okt. 2018. Vergleich zwischen dynamischer Gebäudesimulation (mit bestmöglichen Annahmen zur Nutzung) und der real gemessenen Leistung für das 3-Plan Gebäude.

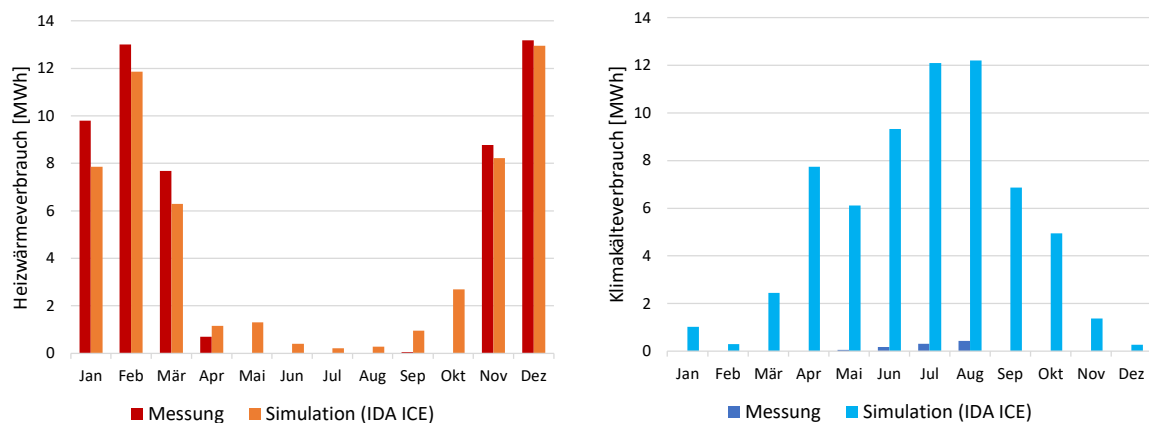


Abbildung 25: Monatliche Energiebilanz des 3-Plan Bürogebäudes im Vergleich zwischen Messung und Simulation in IDA ICE für die Messperiode Nov. 2017 – Okt. 2018, wobei für den Monat Oktober die Messdaten fehlen. Es wurden bestmögliche Annahmen zur Nutzung für die Simulationen verwendet (Luftmengen, Raumsolltemperaturen, interne Lasten etc.).

Alle Leistungskennzahlen für das 3-Plan Bürogebäude sind in der Tabelle 13 zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass trotz einer Unterschreitung der Normwerte (SIA 384/1) um 23%, die installierte Heizleistung um etwa 138% grösser ausfällt als in Realität benötigt. Bei der Kühlleistung ist die Differenz sehr gross mit einer Überdimensionierung von 980%. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die realisierte Nachtauskühlung ausserordentlich gut funktioniert [13] und damit der Kühlbedarf sehr gering ist.

Die Berücksichtigung der internen Lasten (80%)¹⁸ führt zu einer Reduktion der simulierten Heizleistung um 6 kW (-15%), was zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messdaten führt. Berücksichtigt man die zukünftigen Klimadaten («weiter wie bisher»), dann sinkt die Heizleistung geringfügig (2 kW) und die Kühlleistung steigt um 12 kW (24%) signifikant. In

¹⁸ Die internen Lasten nach SIA 2024 oder Projektwert werden mit einem Faktor von 0.8 multipliziert

diesem Fall würde die Kühlleistung bei der Normberechnung (SIA 380/2) die Heizleistung deutlich übersteigen. Bei diesem Gebäude und der aktuell bewussten Nutzung kann davon ausgegangen werden, dass auch mit Klimawandel die installierte Kälteleistung bei weitem den Bedarf übersteigt.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Resultate für das 3-Plan Bürogebäude. Mit «reale» Lasten und Nutzungsprofile sind Eingabewerte gemeint, die möglichst mit den vor Ort eingestellten Werten übereinstimmen. H: Heizfall / K: Kühlfall.

Leistungs- ermittlung	Berechnungs- methode	Lasten und Nutzungs- profile	Klima- daten	Heizleistung / Kälteleistung [kW]	Relative Differenz der Leistung ¹⁹
Ausgewiesen (Installation)	-	-	-	62 / 55	+138% / +978%
Messung	Energiesignatur		2017/18	26 / 5.1 ²⁰	Referenz
	Box-Plot		2017/18	27 / -	-
Simulation	Leistungsermittlung nach SIA 380/2	SIA 2024 (H:80%/K:100%)	SIA 2028 ²¹	33 / 51	+27% / +900%
		Reale (H:80%/K:100%)	SIA 2028	33 / 51	+27% / +900%
	Leistungsermittlung nach SIA 384.201	Ohne	SIA 2028	39 / -	+50% / -
	Jahressimulation nach SIA 380/2	Reale Reale	SIA 2028 «2035» RCP8.5	37 / 50 35 / 62	+42% / +880% +35% / +1116%
Berechnung (Planung)	SIA 384.201 / k.A		SIA 2028	58 / -	+123% / -
	SIA 384/1 ²²		SIA 2028	80 / 52	+208% / +920%

¹⁹ Rel. Differenz = "Vergleichende Leistung" dividiert durch gemessene Leistung minus eins

²⁰ Bei einer Tagesmitteltemperatur von 25 °C

²¹ Version 2010

²² Berücksichtigung von Warmwasser, Sperrzeiten und Verbundsystemen (z.B. Lüftung)



Oblamatik

Wie beim 3-Plan Gebäude ist auch im Fall Oblamatik eine deutliche Überdimensionierung der Wärmepumpe zu erkennen (Abbildung 26 und Abbildung 27). Dabei ist ein Unterschied zwischen der «Box-Plot»-Methode (85 kW) und der «Energiesignatur»-Methode (74 kW) sichtbar. Bezogen auf die «Energiesignatur»-Methode ist die installierte Wärmeerzeugerleistung um 86 kW (+116%) und die Kühlleistung um 45 kW (+100%) überdimensioniert. Betrachtet man den Vergleich zwischen Simulation und Messung in Abbildung 28, fällt auf, dass im Fall der Heizleistung mit bestmöglicher Einstellung bezüglich Nutzung und Lasten (Projektwerte) eine gute Übereinstimmung erreicht wird. Im Fall der Kühlleistung ist die Differenz deutlich zu sehen, da die Messdaten eine viel grössere Streuung der Datenpunkte aufweisen. Dies liegt daran, dass die Regelung der Kühlung komplex ist und nicht mit vertretbarem Aufwand in den Simulationen berücksichtigt werden kann. So werden z.B. in der Heizperiode die Räume bewusst mit den solaren Gewinnen erwärmt und gleichzeitig gekühlt, um die Wärmequelle der Wärmepumpe zu regenerieren. Details können im Schlussbericht des P&D Projektes OblaTherm²³ nachgelesen werden, der voraussichtlich ab Herbst 2023 zur Verfügung steht.

Der Heizwärmeverbrauch kann durch die Simulation sehr gut abgebildet werden und bestätigt die korrekte Modellierung des Gebäudes (siehe Abbildung 29). Die Abweichung beim Klimakälteverbrauch ist deutlich grösser, was auf die oben beschriebene komplexe Regelung zurückzuführen ist.

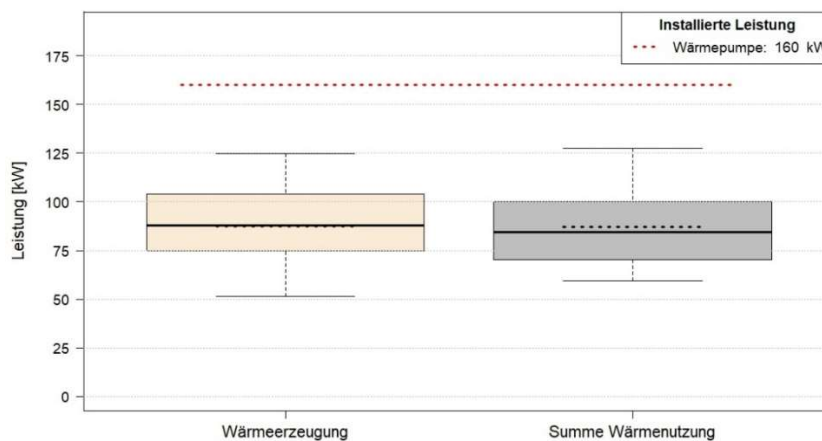


Abbildung 26: Vergleich der gemessenen Heizleistung des Oblamatik Gebäudes ab Wärmeerzeuger (Box-Plot links) und ab Wärmeverteilung (Box-Plot rechts) mit der installierten Leistung (rot-gestrichelte Linie). Die volle Linie im Box-Plot entspricht dem Medianwert und die gestrichelte Linie entspricht dem Mittelwert. Stündliche Messwerte im Temperaturbereich zwischen -8 °C und -6 °C für die Messperiode vom 06.10.2021 bis 05.03.2023. Anzahl Messpunkte: 29.

²³ www.spf.ch/oblatherm

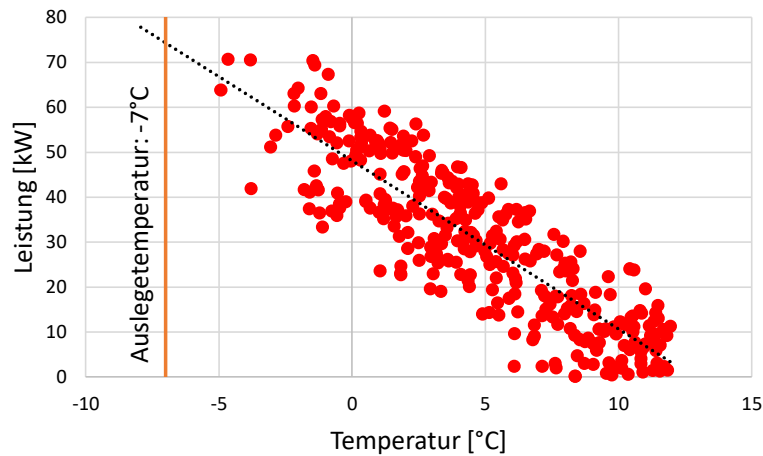


Abbildung 27: Leistungskennlinie des Oblamatik Gebäudes für die Messperiode vom 1.1.2022 bis 31.12.2022. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie).

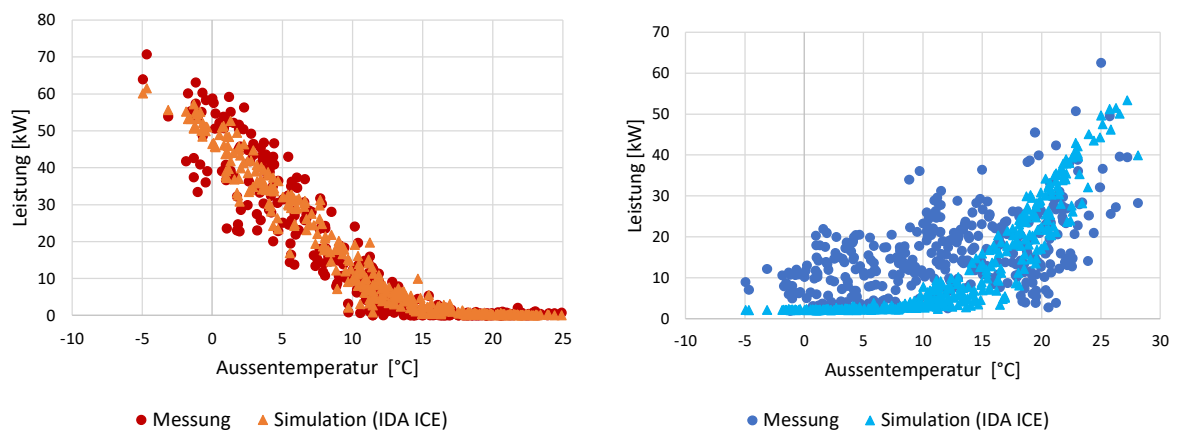


Abbildung 28: Tagesmittelwert der Heizleistung (links) und der Kälteleistung (rechts) in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Messperiode Jan-Dez 2022. Vergleich zwischen dynamischer Gebäudesimulation (mit bestmöglichen Annahmen zur Nutzung) und der real gemessenen Leistung für das Oblamatik Gebäudes.

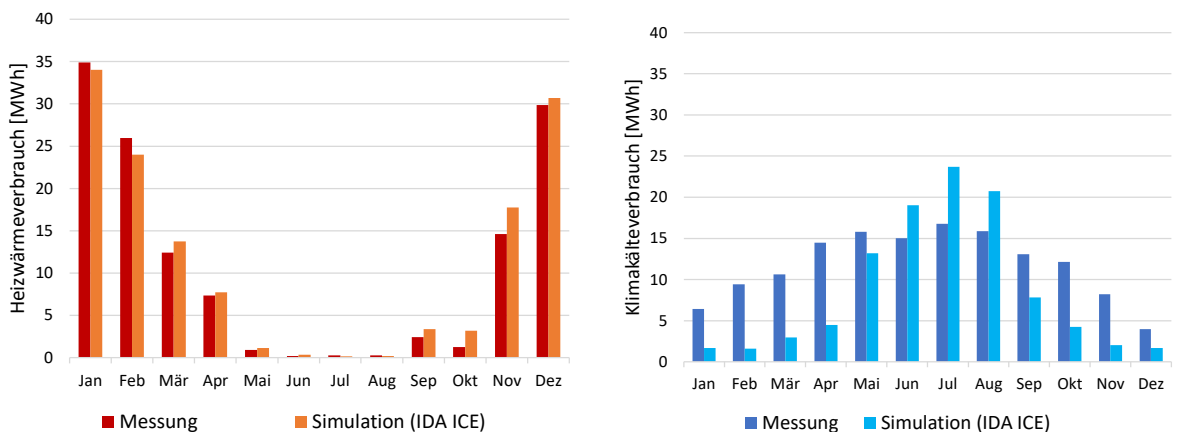


Abbildung 29: Monatliche Energiebilanz des Oblamatik Bürogebäudes im Vergleich zwischen Messung und Simulation in IDA ICE für die Messperiode Jan-Dez 2022. Es wurden bestmögliche Annahmen zur Nutzung für die Simulationen verwendet (Luftmengen, Raumsolltemperaturen, interne Lasten etc.).



In der Tabelle 14 sind alle Leistungskennwerte aus Messung, Planung und Installation für das Oblamatik Gebäude zusammengefasst. Aus den vorhandenen Planungsunterlagen konnten nachfolgende Fakten zusammengetragen werden:

- Die Wärmeerzeugerleistung nach SIA 384/1 beträgt 130 kW, dabei wird die Lüftung (Verbundsystem) mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0.6 berücksichtigt. Die Lüftung hat mit Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors einen Leistungsbedarf von 52 kW. Die Warmwassererzeugung wurde mit 4.6 kW berücksichtigt. Es wurden keine Sperrzeiten berücksichtigt. Die Gebäude Norm-Heizlast beträgt 74 kW. Es wurden keine internen Lasten berücksichtigt.
- Die Gebäudekühlleistung wurde nach VDI 2078 berechnet und beträgt 153 kW. Mit Berücksichtigung der Verbundsysteme Lüftung und Server resultiert eine totale Kühlleistung von 252 kW. Für die Lüftung wurde ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0.8 und eine Aussentemperatur von 35 °C berücksichtigt, was zu einer Leistung für die Lüftung von 75 kW führt. Für die Serverkühlung wurde mit 24 kW gerechnet.

Aus den Planungsdaten wird deutlich, dass für die Auslegung die Klimakälte ausschlaggebend war mit einer berechneten Leistung von 252 kW (siehe auch Berechnung im Anhang E). Dabei wird eine maximale Spitzenleistung für die schlimmste Stunde im Jahr ausgewiesen. Die real installierte Leistung ist jedoch um 64% geringer, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Planung des Energiekonzeptes eng durch das SPF über Simulationen begleitet wurde, da das Gebäude Bestandteil eines P&D Projektes des BFE ist.

Die Heizlastberechnung nach SIA 384.201 trifft den realen Bedarf sehr gut, die Berechnung nach SIA 380/2 mit Berücksichtigung der internen Lasten (80%) unterschätzt den Heizleistungsbedarf um 11% und überschätzt den Kühlleistungsbedarf um 102%. Der grosse Zuschlag resultiert erst durch die Berücksichtigung der Verbundsysteme (SIA 384/1) für dieses Gebäude.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Resultate für das Oblamatik Bürogebäude. Mit «reale» Lasten und Nutzungsprofilen sind Eingabewerte gemeint, die möglichst mit den vor Ort eingestellten Werten übereinstimmen. H: Heizfall / K: Kühlfall.

Leistungs- ermittlung	Berechnungs- methode	Lasten und Nutzungs- profile	Klima- daten	Heizleistung / Kälteleistung [kW]	Relative Differenz der Leistung ²⁴
Ausgewiesen (Installation)	-	-	-	160 / 90	+116% / +100%
Messung	Energiesignatur		2017/18	74 / 45 ²⁵	Referenz
	Box-Plot		2017/18	85 / -	-
Simulation	Leistungsermittlung nach SIA 380/2	SIA 2024 (H:80%/K:100%) Reale (H:80%/K:100%)	SIA 2028 ²⁶ SIA 2028	66 / 91 66 / 91	-11% / +102% -11% / +102%
	Leistungsermittlung nach SIA 384.201	Ohne	SIA 2028	71 / -	-4% / -
	Jahressimulation nach SIA 380/2	Reale Reale	SIA 2028 «2035» RCP8.5	67 / 95 66 / 102	-9% / +111% -11% / +127%
Berechnung (Planung)	SIA 384.201 / VDI 2078		SIA 2028	74 / 152	0% / +238%
Berechnung (Planung)	SIA 384/1 ²⁷		SIA 2028	130 / 250	+76% / +456%

OST-Forschungszentrum (OST-FZ)

Das OST-FZ Gebäude weist von den drei im Detail untersuchten Gebäuden die grösste Überdimensionierung auf. Die installierte Leistung übersteigt den gemessenen Bedarf, ermittelt über die «Energiesignatur»-Methode (Abbildung 30), um 163 kW (+187%), die Auswertung mit der «Box-Plot»-Methode (Abbildung 31) kommt auf ein ähnliches Resultat (innerhalb der Messunsicherheit). Die installierte Kühlleistung überschreitet die aus den Messdaten ermittelte Leistung um 137 kW (+183%).

Betrachtet man den Vergleich zwischen Simulation und Messung in Abbildung 32, so fällt auf, dass im Fall der Heizleistung mit bestmöglicher Einstellung bezüglich Nutzung und Lasten (Projektwerte) diese leicht unterschätzt werden, wobei die Differenz mit zunehmender Aussentemperatur grösser wird (unterschiedliche Steigung). Die Kühlleistung wird mit den Simulationen ebenfalls leicht unterschätzt. Ein möglicher Grund für diese Abweichung ist die grosse Unsicherheit der ausgewerteten Messperiode aufgrund der Covid-Pandemie. In den Simulationen wurde eine reduzierte Belegschaft (tiefere interne Lasten) in der Winterperiode angenommen, jedoch könnten noch weitere Parameter, die dem Projektteam unbekannt sind, eine Rolle spielen. Der Betrieb der Heizung auch an den warmen Tagen lässt darauf

²⁴ Rel. Differenz = "Vergleichende Leistung" dividiert durch gemessene Leistung minus eins

²⁵ Bei einer Tagesaussentemperatur von 25 °C

²⁶ Version 2010

²⁷ Berücksichtigung von Warmwasser, Speerzeiten und Verbundsystemen (z.B. Lüftung)



schliessen, dass die Anlagenregelung nicht optimal eingestellt ist, da eine Warmwassererwärmung ausgeschlossen werden kann.

Der Heizwärmeverbrauch und der Klimakälteverbrauch übersteigen die simulierten Werte im speziellen in der Übergangszeit deutlich wie dies in Abbildung 33 zu erkennen ist. Der gemessene Wärmeverbrauch und Klimakälteverbrauch sind um 36% höher als der simulierte Bedarf.

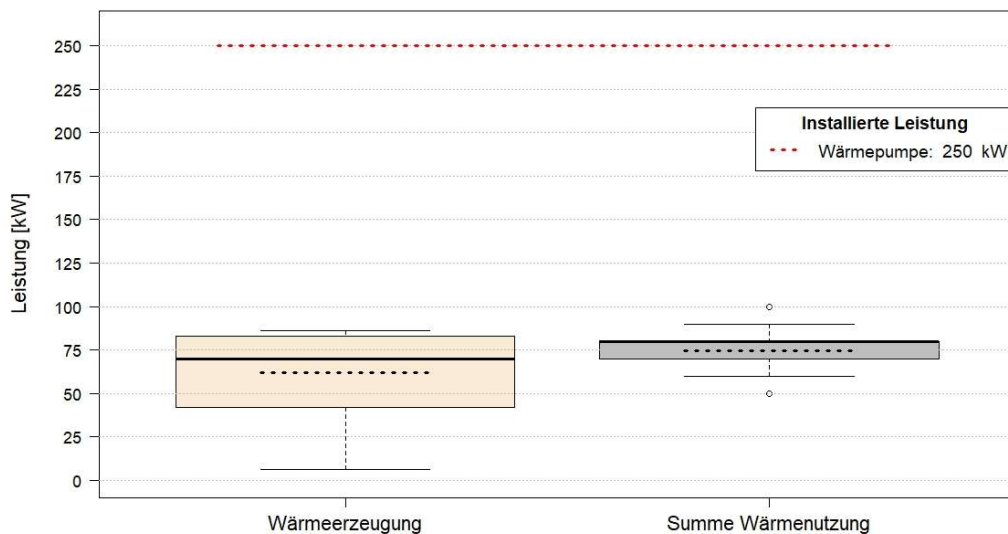


Abbildung 30: Vergleich der gemessenen Heizleistung des OST-FZ ab Wärmeerzeuger (Box-Plot links) und ab Wärmeverteilung (Box-Plot rechts) mit der installierten Leistung (rot-gestrichelte Linie). Die volle Linie im Box-Plot entspricht dem Medianwert und die gestrichelte Linie entspricht dem Mittelwert. Stündliche Messwerte im Temperaturbereich zwischen $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Messperiode vom 1.01.2020 bis 31.12.2021. Anzahl Messpunkte: 53.

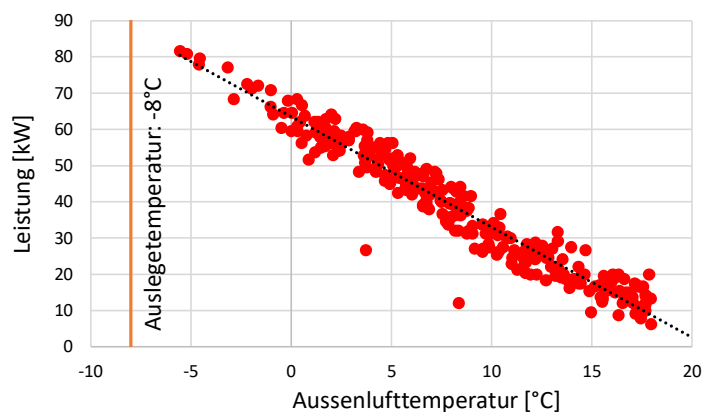


Abbildung 31: Leistungskennlinie des OST-FZ Gebäudes für die Messperiode vom 1.01.2020 bis 31.12.2021. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie).

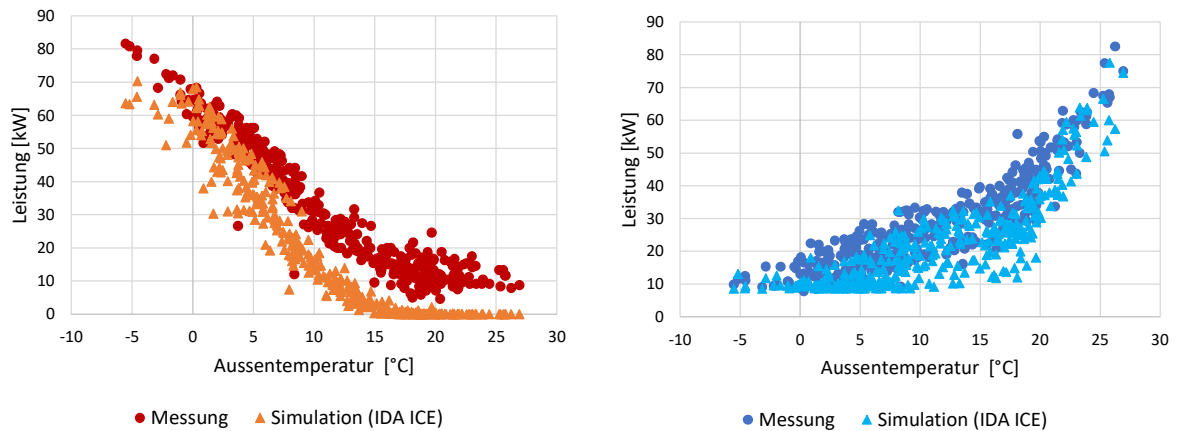


Abbildung 32: Tagesmittelwert der Heizleistung (links) und der Kälteleistung (rechts) in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für Messperiode Jan-Dez 2021. Vergleich zwischen dynamischer Gebäudesimulation (mit bestmöglichen Annahmen zur Nutzung) und der real gemessenen Leistung für das OST-FZ.

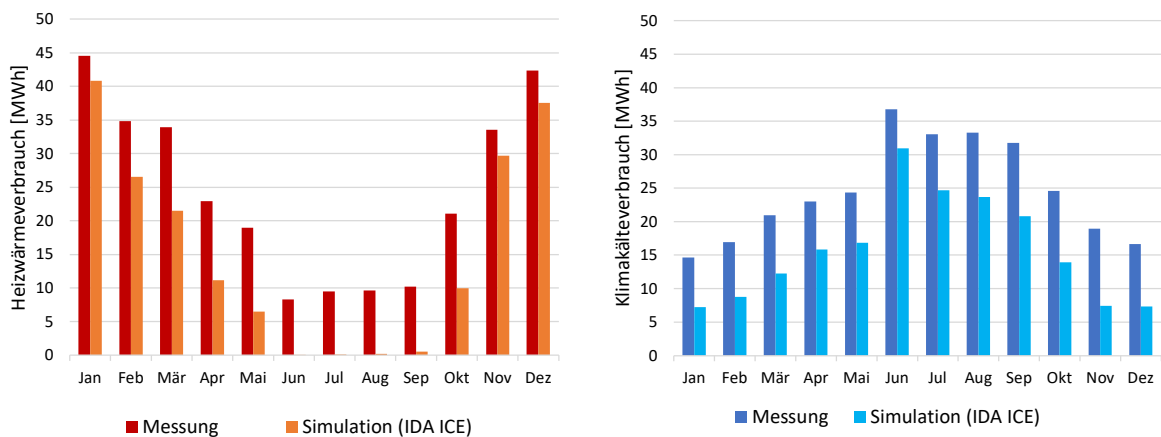


Abbildung 33: Monatliche Energiebilanz des OST-FZ im Vergleich zwischen Messung und Simulation in IDA ICE für die Messperiode Jan-Dez 2021. Es wurden bestmögliche Annahmen zur Nutzung für die Simulationen verwendet (Luftmengen, Raumsolltemperaturen, interne Lasten etc.).

In Tabelle 15 sind alle Leistungskennwerte aus Planung, Installation und Simulation für das OST-FZ Gebäude zusammengefasst. Leider standen im Vergleich zu den beiden anderen Gebäuden deutlich weniger Planungsunterlagen zur Verfügung, weshalb nicht alle Planungsschritte genau nachvollzogen werden können. So kann z.B. nicht abgeschätzt werden, wie hoch der Zuschlag für die Verbundsysteme ist und wie gross die Abweichung zwischen der Berechnung nach SIA 384/1 und der installierten Leistung ist. Im Gegensatz zum Oblamatik-Gebäude weist das OST-Forschungszentrum eine grosse Differenz (50%) zwischen der Norm-Heizlast (160 kW) und der gemessenen Heizlast im Auslegungspunkt (87 kW) auf. Unter Berücksichtigung der internen Lasten und der Simulation nach SIA 380/2 ergibt sich eine genauere Abschätzung (102 kW) der tatsächlich benötigten Heizleistung. Wie bei der Heizleistung erhält man auch für die Kälteleistung die genaueste Abschätzung mit der SIA 380/2 Simulation.

Die Abbildung 34 und Abbildung 35 fassen die wichtigsten Resultate aller drei im Detail untersuchter Gebäude zusammen.



Tabelle 15: Zusammenfassung der Resultate für das OST-Forschungszentrum. Mit «reale» Lasten und Nutzungsprofile sind Eingabewerte gemeint, die möglichst mit den vor Ort eingestellten Werten übereinstimmen. H: Heizfall / K: Kühlfall.

Leistungs- ermittlung	Berechnungs- methode	Lasten und Nutzungs- profile	Klima- daten	Heizleistung / Kälteleistung [kW]	Relative Differenz der Leistung ²⁸
Ausgewiesen (Installation)	-	-	-	250 / 212	+187%/+183%
Messung	Energiesignatur		2017/18	87 / 75	Referenz
	Box-Plot		2017/18	80 / -	-
Simulation	Leistungsermittlung nach SIA 380/2	SIA 2024 (H:80%/K:100%)	SIA 2028 ²⁹	102 / 100	+17% / +33%
		Reale (H:80%/K:100%)	SIA 2028	130 / 128	+49% / +71%
	Leistungsermittlung nach SIA 384.201	Ohne	SIA 2028	146 / -	+68% / -
	Jahressimulation nach SIA 380/2	Reale	SIA 2028	92 / 127	+6% / +69%
Reale		«2035» RCP8.5	84 / 133	-3% / +77%	
Berechnung (Planung)	SIA 384.201 / k.A		SIA 2028	160 / k.A	+84% / -
Berechnung (Planung)	SIA 384/1 ³⁰		SIA 2028	k.A / k.A	- / -

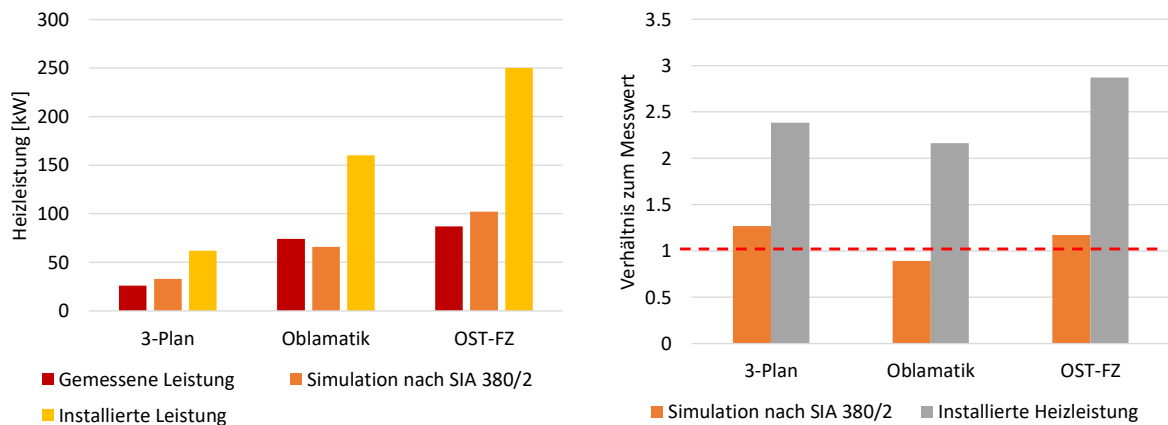


Abbildung 34: Vergleich der installierten Heizleistung mit der gemessenen bzw. nach SIA 380/2 simulierten Leistung für die drei detailliert untersuchten Bürogebäude (links). Verhältnis der aus den Messdaten ermittelten Heizleistung zur installierten und nach SIA 380/2 simulierten Leistung (rechts), was der Überdimensionierung entspricht. Werte oberhalb der rot-gestrichelten Linie zeigen eine Überdimensionierung an, Werte unterhalb eine Unterdimensionierung.

²⁸ Rel. Differenz = "Vergleichende Leistung" dividiert durch gemessene Leistung minus eins

²⁹ Version 2010

³⁰ Berücksichtigung von Warmwasser, Sperrzeiten und Verbundsystemen (z.B. Lüftung)

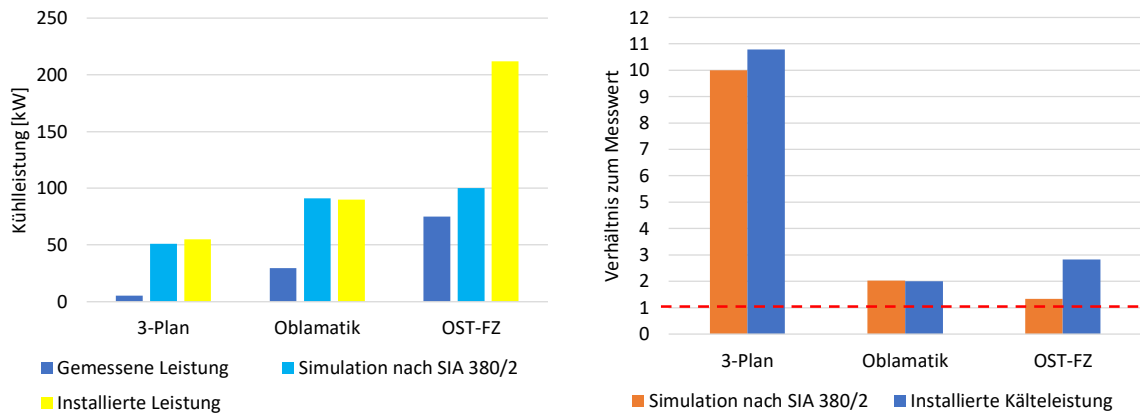


Abbildung 35: Vergleich der installierten Kälteleistung mit der gemessenen bzw. nach SIA 380/2 simulierten Leistung für die drei detailliert untersuchten Bürogebäude (links). Verhältnis der aus den Messdaten ermittelten Kälteleistung zur installierten und nach SIA 380/2 simulierten Leistung (rechts), was der Überdimensionierung entspricht. Werte oberhalb der rot-gestrichelten Linie zeigen eine Überdimensionierung an, Werte unterhalb eine Unterdimensionierung.



4.1.2 Bürogebäude erweiterter Datensatz

Nachfolgend werden sieben weitere Bürogebäude ausgewertet, wobei diese nicht im gleichen Detaillierungsgrad wie die Gebäude im letzten Kapitel untersucht wurden. Die Gebäude sind im Besitz der Alfred Müller AG und weisen alle ein sehr ähnliches Heiz- und Klimakältekonzzept auf. Die Anlagen wurden grundsätzlich so geplant, dass ca. 20% der Heizwärme durch einen Gaskessel gedeckt wird und der Rest durch eine Wärmepumpe.

In Abbildung 36 ist für alle sieben Gebäude die installierte und gemessene Heizleistung aufgetragen, wobei bei der installierten Leistung unterschieden wird zwischen Leistung der Wärmepumpe (rot-gestrichelte Linie) und der Summe aus Wärmepumpe und Gasheizung (blau-gestrichelte Linie). Mittels Box-Plots wird die gemessene stündliche Heizleistung dargestellt, wobei die schwarze Linie dem Medianwert entspricht. Wenn immer möglich wird die Leistung aus der Nutzenergie (Wärmeabgabesystem, graue Markierung) ermittelt, da diese am besten dem realen Gebäudebedarf entspricht. In drei Fällen mussten die Messungen direkt nach dem Wärmeerzeuger verwendet werden (blaue Markierung).

Die Auswertung zeigt, dass ausgenommen für das ältere Gebäude «Neuhof» die installierte Heizleistung der Wärmepumpe, bezogen auf den Medianwert (schwarze Linie), für alle Gebäude ausreichen würde.

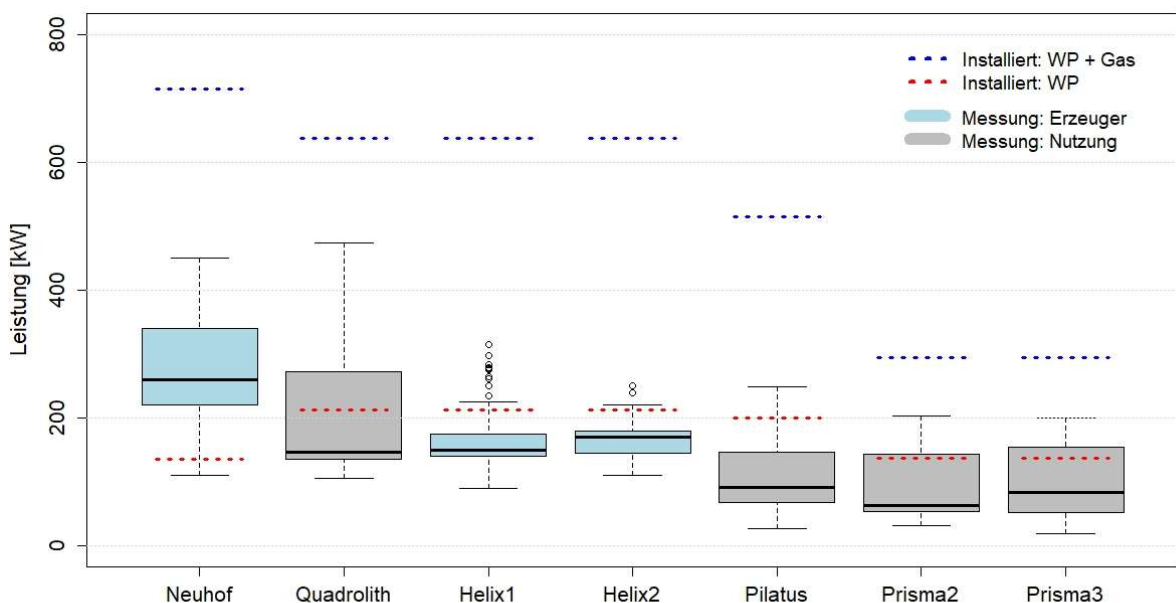


Abbildung 36: Gemessene stündliche Heizleistungen bei Auslegetemperatur der Bürogebäude mit bivalentem Heizsystem im Vergleich zur installierten Wärmeerzeugerleistung. Wenn möglich wurden Messwerte der Wärmeabgabe genutzt (Boxplot grau). Wenn diese Daten nicht vorhanden waren, wurden Messwerte direkt bei der Wärmeproduktion verwendet (Boxplot blau). Die rot-gestrichelten Linien zeigen die Leistungen der verbauten Wärmepumpen und die blau-gestrichelten Linien die gesamt installierte Leistung (Wärmepumpe + Gaskessel). Der schwarze Strich im Box-Plot stellt den Medianwert dar.

In Abbildung 37 ist die Überdimensionierung der Heizleistung für unterschiedliche Datenquellen aufgeführt. Der Vergleich wird immer mit der aus den Messdaten ermittelten Heizleistung (real benötigten) gemacht. Die rot-gestrichelte Linie (Faktor 1) entspricht einer Übereinstimmung mit der gemessenen Leistung, wobei in dieser Auswertung der Median Messwert verwendet wurde. Alle Balken oberhalb der rot-gestrichelten Linie weisen auf eine Überdimensionierung hin. Wie schon in der Abbildung 35 aufgezeigt, reicht in den meisten Fällen die installierte Wärmepumpenleistung (grauer Balken) aus um die Gebäude auch ohne Gasheizung zu heizen. Da der Medianwert eher der «Energiesignatur-Methode» entspricht (siehe Abbildung 13), wird für die Auswertung vor allem auf diesen Bezug genommen, da bei Gebäuden mit grosser thermischer Masse (grosse Trägheit) stündliche Leistungsspitzen eher vernachlässigbar sind für die Einhaltung des Komforts.

Neben der installierten Heizleistung wurde zusätzlich untersucht, welche Werte aus der Planung resultieren. Dazu wurde zum einen die Angaben aus der Norm-Heizlast Berechnung ausgewertet (z.B. EN-Formulare)³¹ und zum anderen die Angaben aus dem Hydraulikschema, welche sich auf die Abgabesysteme beziehen (siehe Kapitel 3.2.2). Die Auswertung zeigt, dass die Planungswerte (blaue, orange und gelbe Balken) alle eine deutliche Überdimensionierung aufweisen, wobei die Norm-Heizlast (blaue Balken) im Vergleich zu den Angaben im Hydraulikschema (gelbe Balken) eine deutlich geringe Überdimensionierung aufweist. Dies ist vermutlich auf die Anforderungen der SIA 384/1 zurückzuführen (Berücksichtigung von Verbundsystemen, siehe Kapitel 2). Man muss davon ausgehen, dass bei einer reinen Wärmepumpenheizung ohne zusätzlichen Gasbrenner, die Wärmepumpenanlagen noch eine viel grössere Überdimensionierung aufweisen würden.

³¹ Kantonale Dokumente die eingereicht werden müssen um eine Baubewilligung zu erhalten

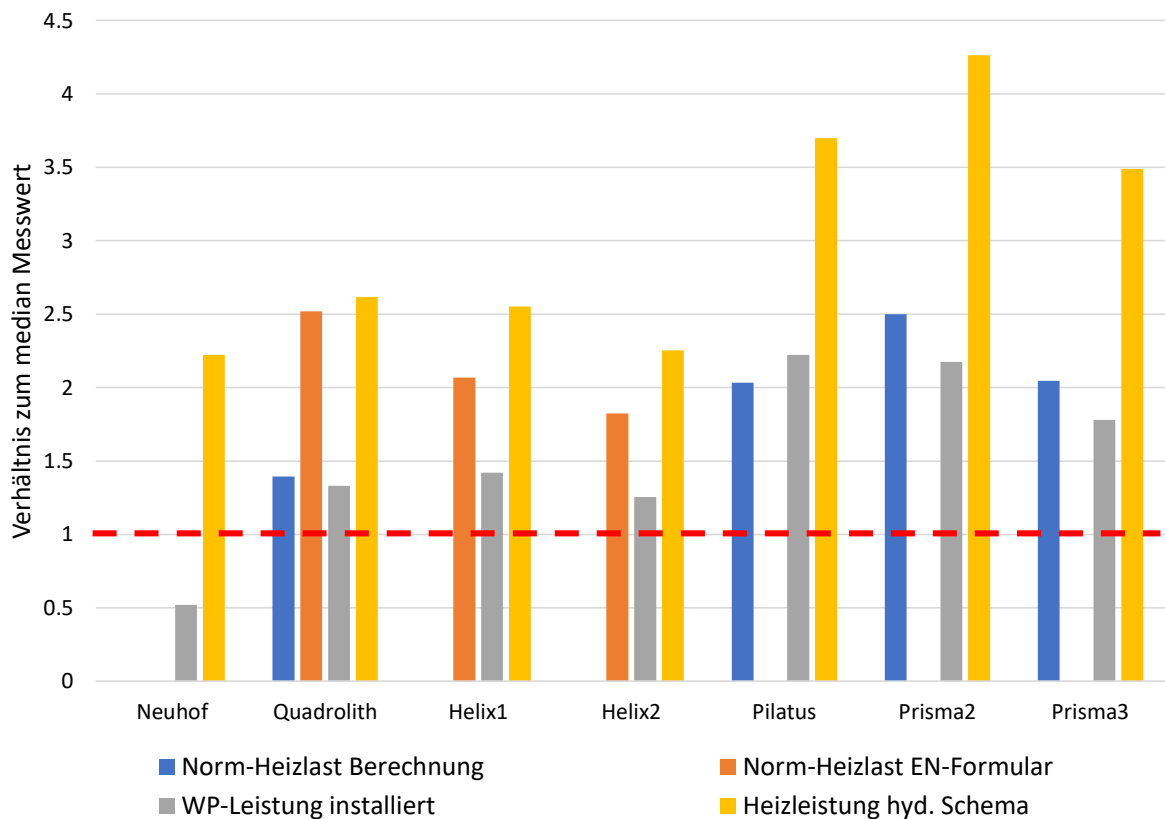


Abbildung 37: Verhältnis der aus Messdaten ermittelten Heizleistung und der installierten bzw. geplanten Heizleistung. Die rot-gestrichelte Linie (Verhältnis von 1) zeigt die Übereinstimmung von Messung und Planung/Installation und damit eine Überdimensionierung von 0%. Das Verhältnis von zwei bedeutet beispielsweise, dass die installierte oder geplante Leistung eine Überdimensionierung von 100% aufweist, gegenüber der Leistung die aus den Messungen (median Stundenwert bei Auslegungstemperatur) ermittelt wurde.

In Abbildung 38 ist die gemessene und die installierte Kälteleistung für die sieben Bürogebäude der Alfred Müller AG dargestellt. Dabei fällt auf, dass die installierte Kälteleistung (rot-gestrichelte Linie) noch weit stärker als bei der Heizleistung die aus den Messungen ermittelte Leistung übertrifft.

In Abbildung 39 ist die aus den Messdaten ermittelte Klimakälteleistung im Verhältnis zur installierten bzw. geplanten Leistung (hyd. Schema) dargestellt. Wie bei der Heizleistung zeigt sich auch bei der Klimakälteleistung eine deutliche Überdimensionierung der Anlagen (Überschreitung der rot-gestrichelten Linie). Die Bandbreite der Überdimensionierung ist mit 80% bis 420% sehr gross, wobei die Werte aus dem Hydraulikschema zum Teil die installierte Leistung deutlich überschreiten (Prisma 2&3). Zu beachten ist, dass für die Auswertung in Abbildung 39 eine Aussentemperatur von 35 °C für die Auslegung verwendet wurde. Da für diese hohe Aussentemperatur kaum Messdaten vorliegen, wurde die Leistungssteigerung auf Basis niedrigerer Aussentemperaturen linear extrapoliert.

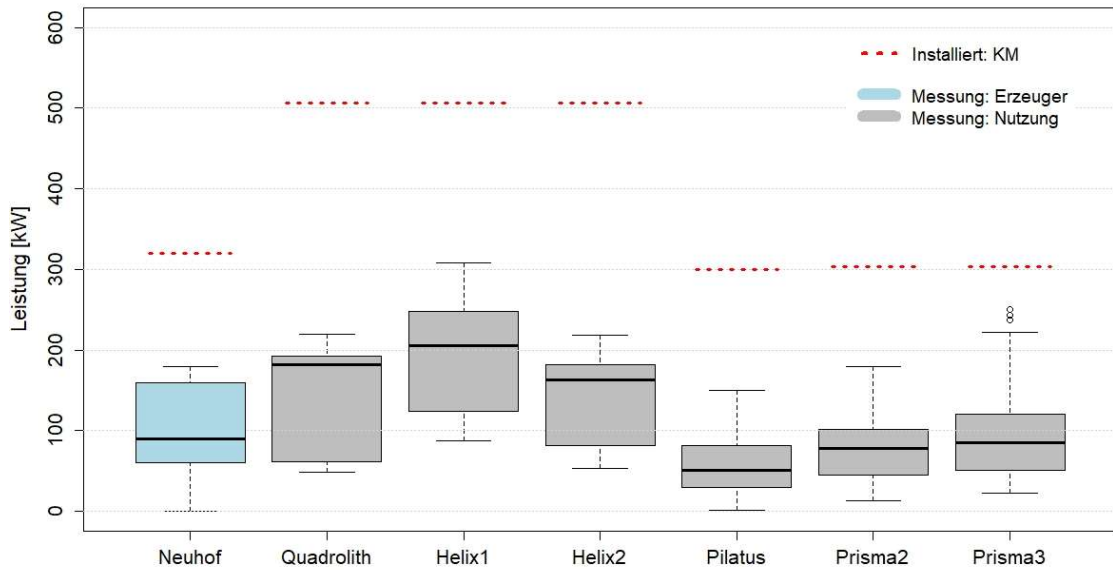


Abbildung 38: Gemessene stündliche Kühlleistung bei einer Aussentemperatur von 30 °C der Bürogebäude mit bivalentem Heizsystem im Vergleich zur installierten Kälteleistung. Wenn möglich wurden Messwerte der Kälteabgabe genutzt (Boxplot grau). Wenn diese Daten nicht vorhanden waren, wurden Messwerte direkt bei der Kälteproduktion verwendet (Boxplot blau). Die rot-gestrichelten Linien zeigen die Leistungen der verbauten Kältemaschine. Der schwarze Strich im Box-Plot stellt den Medianwert dar.

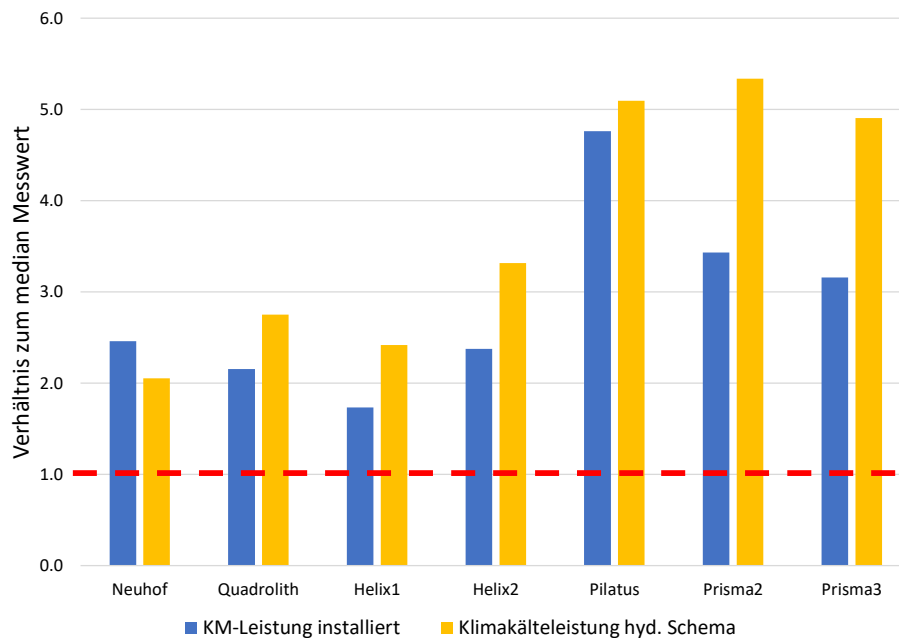


Abbildung 39: Verhältnis der aus Messdaten ermittelten Kälteleistung und der installierten bzw. geplanten Kälteleistung. Die rot-gestrichelte Linie (Verhältnis von 1) zeigt die Übereinstimmung von Messung und Planung/Installation und damit eine Überdimensionierung von 0%. Das Verhältnis von zwei bedeutet beispielsweise, dass die installierte oder geplante Leistung eine Überdimensionierung von 100% aufweist, gegenüber der Leistung die aus den Messungen (median Stundenwert bei Aussentemperatur von 35 °C) ermittelt wurde.



4.1.3 Wohngebäude

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung der Datensätze für Mehrfamilienhäuser zusammengefasst, wobei zunächst die Ergebnisse des «kleinen» Datensatzes dargestellt werden, der aus 155 Heizungsanlagen besteht und auch Daten aus dem Energieausweis ($Q_{h, \text{norm}}$, EBF) enthält (siehe Details im Kapitel 3.1.2). Die in diesem Kapitel dargestellten Überdimensionierungen werden, wenn nicht anders angegeben, mit der «Energiesignatur»-Methode ermittelt (siehe Kapitel 3.2.3, Abbildung 13). Dabei wurden Stundenwerte über mehrere Messjahre verwendet. Bei Anlagen ohne separate Warmwasser-Erzeugung wurde die installierte Leistung um 3 W/m^2 (EBF) reduziert (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Abbildung 40 zeigt die Verteilung der Anzahl der Heizungsanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Messjahre. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei Anlagen mit wenigen Betriebsjahren (< 2) die Bauaustrocknung zu etwas höheren Leistungswerten als im späteren Betrieb führen kann, da es sich im Vergleich zum Gesamtdatensatz um wenige Anlagen handelt, wurden diese nicht gesondert betrachtet.

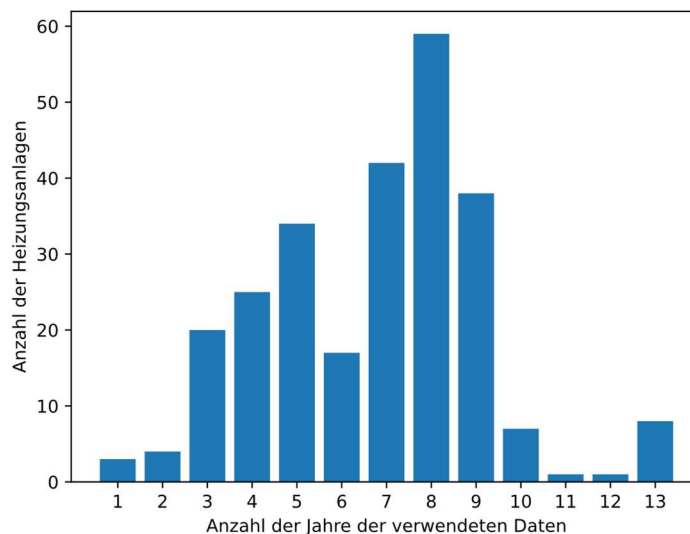


Abbildung 40: Histogramm der Messjahre die zur Auswertung verwendet wurden ($n=251$, grosser Datensatz).

Abbildung 41 zeigt die gemessene Leistung im Vergleich zur geplanten Heizleistung (links) und im Vergleich zur installierten Heizleistung (rechts). Die rote Linie stellt die 1zu1-Marke dar. Alle Anlagen, die unterhalb der roten Linie liegen, sind überdimensioniert. Einige wenige Anlagen sind unterdimensioniert. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass im Auslegungsfall die eingestellten Sollwerte (z.B. Raumtemperatur oder Zulufttemperatur³²) nicht eingehalten werden können, wobei die Raumsolltemperatur in der Regel deutlich höher liegt (im Mittel bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$) als in der Auslegung angenommen [14].

³² Was eher selten der Fall ist in Wohngebäuden, da diese nur in wenigen Fällen eine Luftvorerwärmung aufweisen.

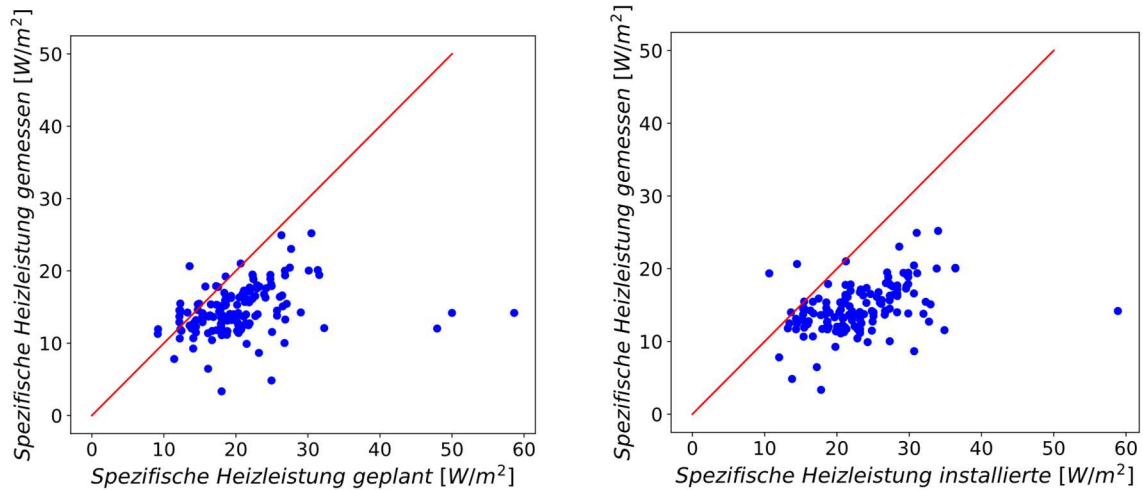


Abbildung 41: Vergleich der geplanten spez. Heizleistung (rechts) und der installierten spez. Heizleistung (links) mit der aus Messdaten ermittelten Heizleistung (n=155). Die rote Linie ist die 1:1-Marke, bei welcher die gemessene und die geplante respektive installierte Leistung übereinstimmen.

Abbildung 42 zeigt die spezifische Heizleistung in Abhängigkeit vom spezifischen Heizwärmeverbrauch (Messung). Dabei wird zwischen der installierten Wärmeerzeugerleistung (blau), der aus Messdaten ermittelten Heizleistung (orange) und den Planungswerten (grün) unterschieden. Detaillierte Informationen zu den Definitionen «installierte», «geplante» und «gemessene» Leistung findet sich in Kapitel 3.2.2.

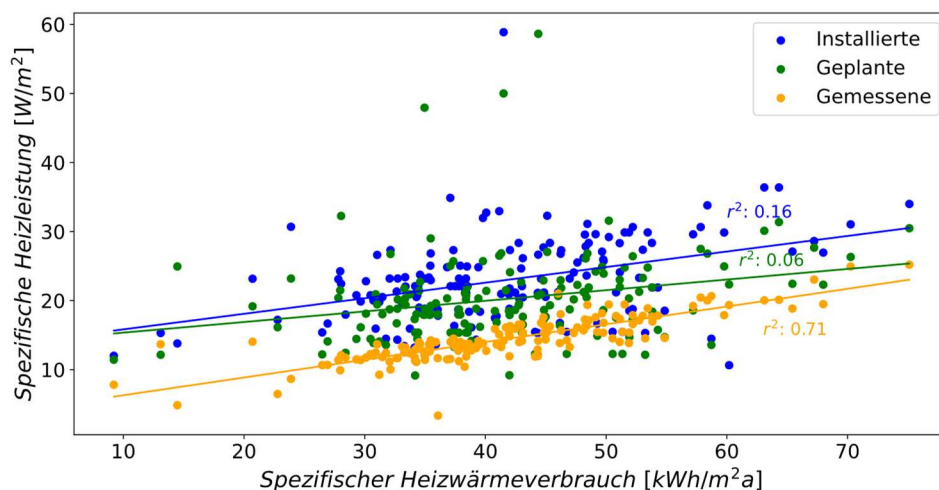


Abbildung 42: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs (Mittelwert aller Messjahre). Es wird zwischen drei Fällen unterschieden: Installierte spez. Heizleistung (blau), aus Messdaten ermittelte spez. Heizleistung (orange) und aus der Planungsunterlagen ermittelte spez. Heizleistung (grün) (n=155).

In der Abbildung 42 ist die hohe Korrelation ($R^2=0.71$) zwischen dem gemessenen Heizwärmeverbrauch und der aus Messdaten ermittelten Heizleistung deutlich zu erkennen. Wohngebäude mit einem spezifischen Heizwärmeverbrauch über 25 kWh/m^2 weisen eine



geringe Streuung der Heizleistung auf. Unterhalb dieses Wertes scheint die Streuung grösser zu werden, obwohl nur wenige Datenpunkte zur Verfügung stehen. Bei sehr gut gedämmten Gebäuden (z.B. Minergie-P) gehen wir davon aus, dass die Heizleistung nicht mehr mit dem Heizwärmeverbrauch korreliert, da unter realen Bedingungen (inkl. interne Lasten und solare Gewinne) der Heizwärmebedarf stärker abnimmt als die für den Auslegungsfall ermittelte Heizleistung. Um diese These zu prüfen, bedarf es jedoch weiterer Daten von sehr gut gedämmten Gebäuden.

Betrachtet man die spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmebedarfs gemäss Normberechnung (SIA 380/1), so nimmt die Korrelation zwischen dem berechneten Heizwärmebedarf und der aus den Messungen ermittelten Heizleistung deutlich ab (orange Punkte, $R^2 = 0.22$) gegenüber dem gemessenen Heizwärmebedarf ($R^2 = 0.71$, Abbildung 42). Der Grund dafür ist der sogenannte «Energy Performance Gap» [1], der dazu führt, dass der Wärmeverbrauch in der Realität höher ist als in den Normberechnungen ausgewiesen und damit auch eine höhere Heizleistung benötigt wird. Ein Indiz dafür ist die leichte Korrelation ($R^2 = 0.17$) zwischen dem Energy Performance Gap Factor (EPGF)³³ und der ermittelten Überdimensionierung (siehe Abbildung 44). Die Überdimensionierung nimmt mit steigendem EPGF ab.

In beiden Fällen (Abbildung 42 und Abbildung 43) zeigt sich, dass die Korrelation zwischen dem Wärmebedarf und der installierten Heizleistung mit einem Bestimmtheitsmass von 0.16 bzw. 0.21 etwas geringer ist und im Fall der geplanten Heizleistung mit 0.06 bzw. 0.09 deutlich geringer ausfällt. Ein möglicher Grund für das höhere Bestimmtheitsmass bei der installierten Heizleistung (blau) könnte sein, dass die Tatsache, dass immer das gleiche Unternehmen für die Ausführungsplanung zuständig ist (Energie-Contracting), dank langjähriger Erfahrung ein leicht korrigierender Effekt gegenüber der Planung eintritt.

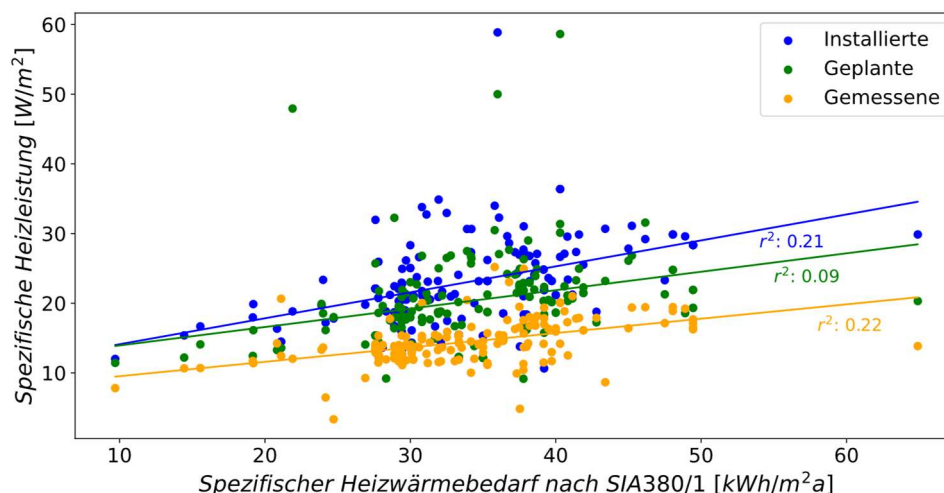


Abbildung 43: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des berechneten Norm-Heizwärmebedarfs. Es wird zwischen drei Fällen unterschieden: Installierte spez. Heizleistung (blau), aus Messdaten ermittelte spez. Heizleistung (orange) und aus der Planungsunterlagen ermittelte spez. Heizleistung (grün) ($n=155$).

³³ EPGF = Verhältnis von gemessener Heizwärme und berechnetem Heizwärmebedarf (SIA 380/1).

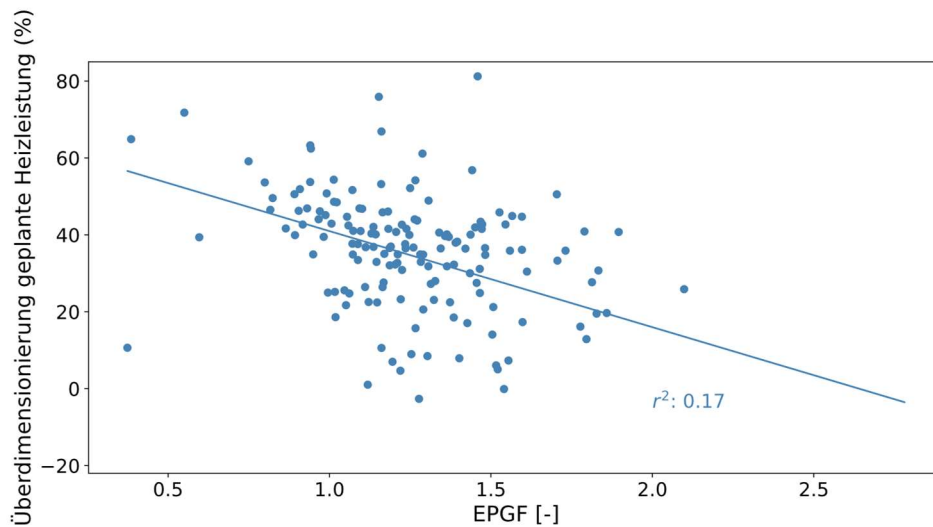


Abbildung 44: Relative Überdimensionierung der installierten Heizleistung in Abhängigkeit vom Energy Performance Gap Factor (n=155).

Eine Abhängigkeit der relativen Überdimensionierung und dem Baujahr oder der Gebäudegrösse (EBF) konnte keine festgestellt werden (siehe Abbildung 45). Auch scheint der Gebäudestandard (Abbildung 46, links) keinen Einfluss zu haben, wobei berücksichtigt werden muss, dass nur wenige Gebäude mit ganz tiefem Bedarf (z.B. Minergie-P) im untersuchten Datensatz enthalten sind. Anders verhält es sich beim EPGF, der eine leichte Korrelation ($R^2 = 0.15$) mit dem Norm-Heizwärmebedarf aufweist. Mit steigendem Heizwärmebedarf sinkt der EPGF, was damit zusammenhängt, dass das Nutzerverhalten einen erheblichen Einfluss auf den EPGF hat. Der zusätzliche Heizwärmebedarf verursacht durch das realistische Nutzerverhalten ist für gut und schlecht gedämmte Gebäude in absoluten Werten gleich, im relativen Vergleich macht das Nutzerverhalten bei gut und sehr gut gedämmten Gebäuden jedoch einen erheblichen Anteil aus [1,14]. Dieser Effekt zeigt sich bei der Ermittlung der Performance im untersuchten Datensatz nicht. Dabei ist zu beachten, dass es sich ausschliesslich um neuere Gebäude handelt.

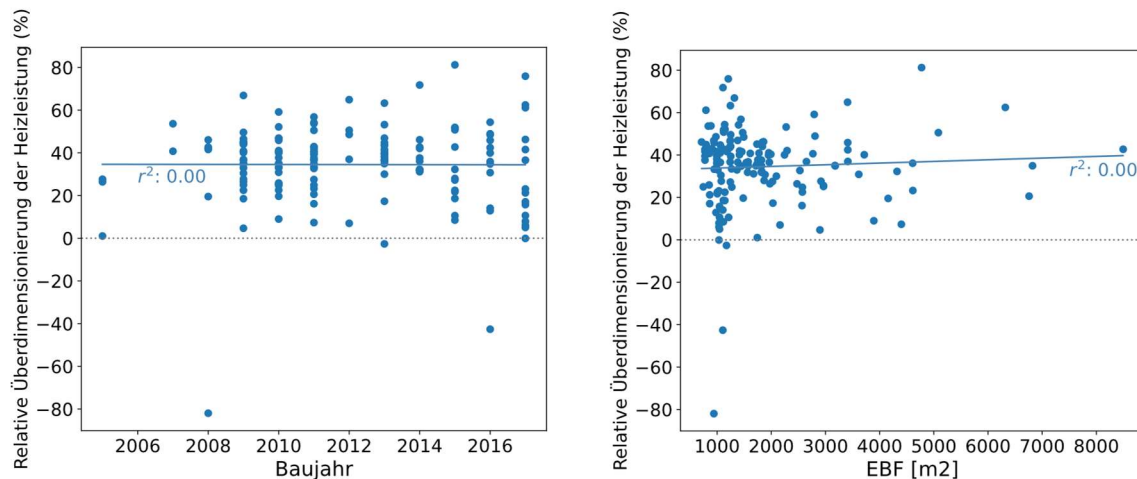


Abbildung 45: Relative Überdimensionierung der installierten Wärmeerzeugerleistung in Abhängigkeit vom Baujahr (links) und in Abhängigkeit von der EBF (rechts) (n=155).

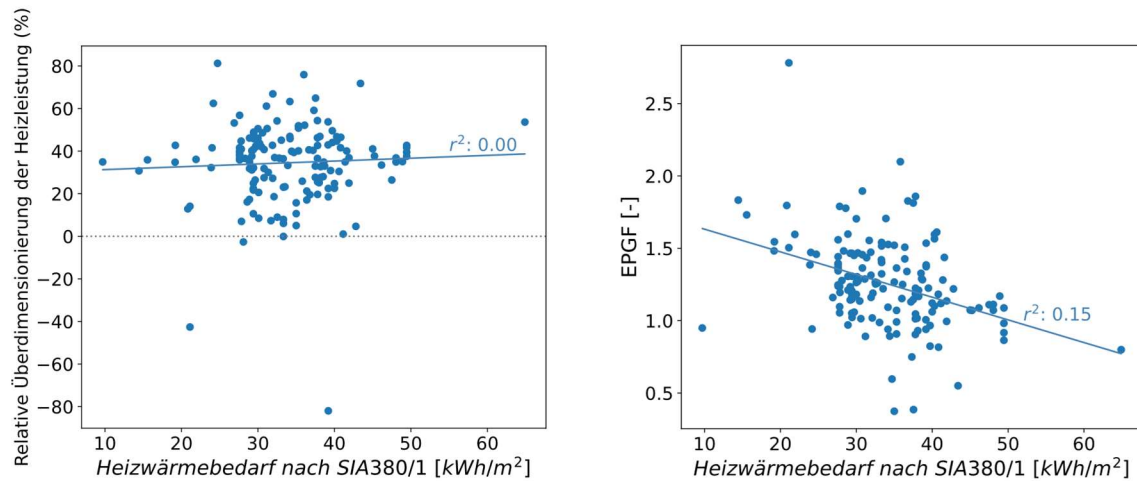


Abbildung 46: Relative Überdimensionierung der installierten Wärmeerzeugerleistung (links) und EPGF (rechts) in Abhängigkeit vom spez. Norm-Heizwärmebedarf (n=155).

Im Folgenden wird der erweiterte Datensatz («großer Datensatz») mit 251 Heizungsanlagen betrachtet. Mit diesem kann jedoch kein Vergleich mit dem Norm-Heizwärmebedarf durchgeführt werden, da keine Energieausweise zur Verfügung standen. Ausserdem musste die EBF aus den GWR-Daten modelliert werden (siehe Annex B), was die Unsicherheit der Auswertung erhöht. Der Schwerpunkt der folgenden Auswertungen liegt daher auf dem Vergleich der gemessenen Daten mit den aus den Planungsunterlagen (z.B. Hydraulikschema) ermittelten Werten. Abbildung 47 zeigt den Vergleich der installierten, geplanten und aus Messdaten ermittelten spezifischen Heizleistung in Abhängigkeit vom gemessenen Heizwärmeverbrauch. Trotz der Tatsache, dass das Bestimmtheitsmass für die installierte und geplante Heizleistung mit grösserem Datensatz zunimmt (im Vergleich zu Abbildung 42), ist der Unterschied und die Streuung zu den Messdaten erheblich.

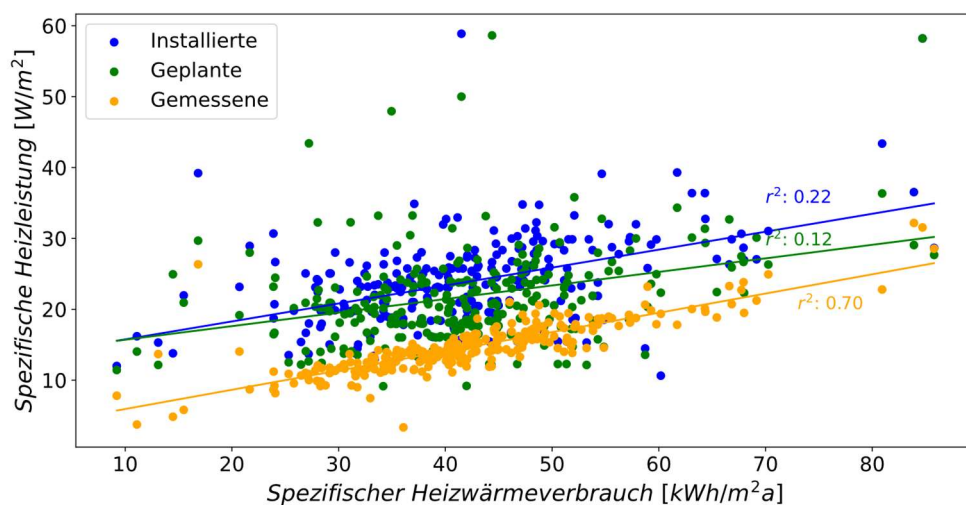


Abbildung 47: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs (Mittelwert aller Messjahre). Es wird zwischen drei Fällen unterschieden: Installierte spez. Heizleistung (blau), aus Messdaten ermittelte spez. Heizleistung (orange) und aus der Planungsunterlagen ermittelte spez. Heizleistung (grün) (n=251).

Die Abbildung 48 zeigt das Histogramm der relativen Überdimensionierung aufgeteilt nach installierter und geplanter Heizleistung. Der überwiegende Anteil der Anlagen weist eine Überdimensionierung der installierten Heizleistung (blau) von mehr als 30% auf. Der Medianwert beträgt 40%. Die geplante Heizleistung (orange) weist mit einem Medianwert von 30% erwartungsgemäss eine geringere Überdimensionierung auf. Im Median beträgt der Zuschlag zwischen Planung und Installation rund 2.8 W/m² (+12%).

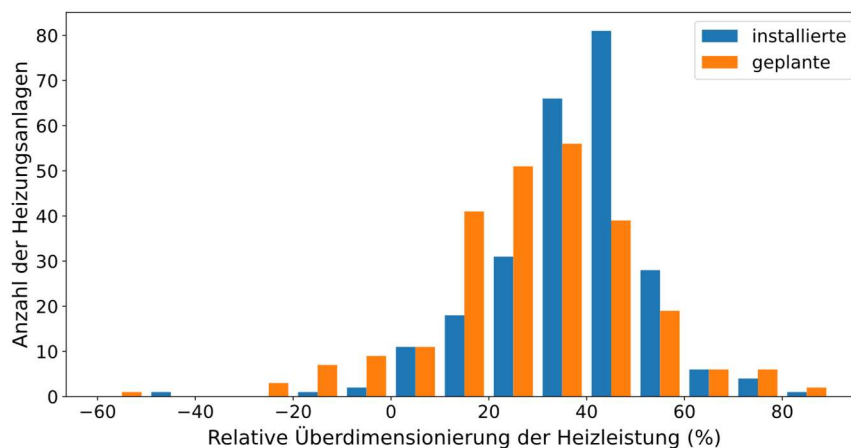


Abbildung 48: Histogramm der Überdimensionierung bezogen auf die geplante und installierte Heizleistung (n=251).

Abbildung 49 zeigt das Histogramm der relativen Überdimensionierung für die installierte Heizleistung, ermittelt mit der «Box-Plot»-Methode unter Berücksichtigung der maximal gemessenen Leistung (ohne Ausreisser). Dies reduziert die Überdimensionierung im Vergleich zur «Energiesignatur»-Methode deutlich. Die Betrachtung der maximalen Leistungswerte ist aus Sicht der Autoren nicht geeignet, da die Gebäude nicht im Detail untersucht werden können und somit der Einfluss von Einmaleffekten nicht ausgeschlossen werden kann (Bauaustrocknung, Nutzerverhalten, besondere Witterungsbedingungen, Leerstand etc.)

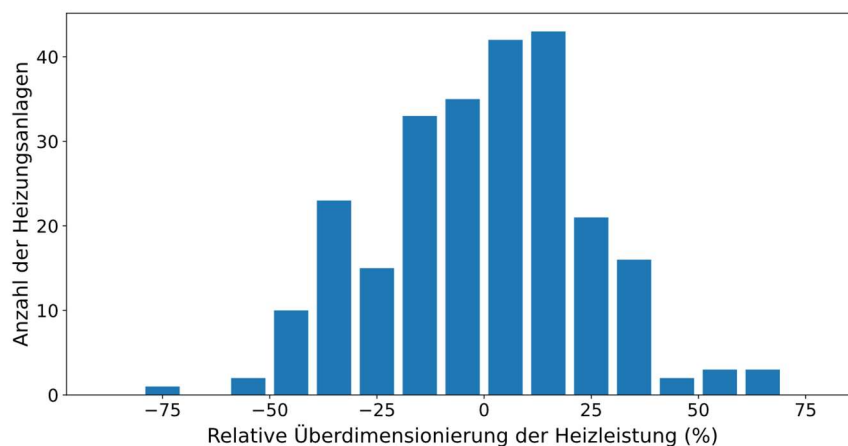


Abbildung 49: Histogramm der Überdimensionierung bezogen auf die installierte Heizleistung ermittelt über die «Box-Plot»-Methode mit Berücksichtigung der Maximalwerte (ohne Ausreisser) (n=251).



Die Berücksichtigung der inneren Lasten³⁴ in der Planung reduziert die Abweichung zur gemessenen Heizleistung und damit die Überdimensionierung, ändert aber nichts an der Streuung der Datenpunkte (siehe Abbildung 50). Folgende Gründe können für die Streuung der Daten verantwortlich sein:

- Die Verwendung unterschiedlicher Software führt zu unterschiedlichen Ergebnissen, was jedoch eher unwahrscheinlich ist, da die Software grundsätzlich validiert werden muss
- Unterschiedliche Eingaben und Vorgehensweisen je nach Unternehmen
- Fehlerhafte Datengrundlagen für die Berechnung
- «Angstzuschläge» die möglicherweise von Objekt zu Objekt unterschiedlich sind
- Unterschiedliche Warmwasserzuschläge und Berücksichtigung von Sperrzeiten³⁵

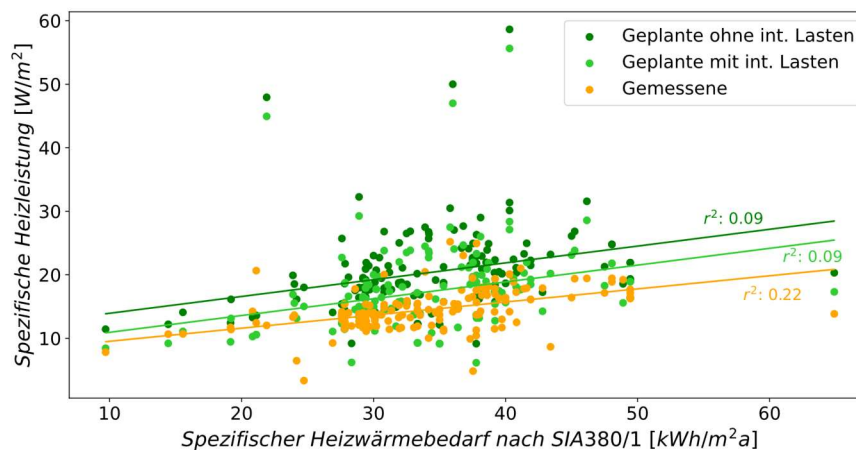


Abbildung 50: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs (SIA 380/1). Es wird zwischen drei Fällen unterschieden: Geplante spez. Heizleistung ohne interne Lasten (dunkelgrün), geplante spez. Heizleistung mit internen Lasten (hellgrün) und aus Messdaten ermittelte spez. Heizleistung (orange) ($n=155$).

Die folgenden Auswertungen konzentrieren sich auf die Daten der SIG, wobei es sich hier um Bestandsgebäude mit Fernwärmeanschluss handelt. In Abbildung 51 ist die installierte und die aus den Messdaten ermittelte spezifische Heizleistung in Abhängigkeit vom spezifischen Heizwärmeverbrauch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die tatsächlich installierte Leistung, hier die Übertragungsleistung der Fernwärmestation, mit steigendem Heizwärmeverbrauch deutlich stärker ansteigt, als dies aufgrund der Messdatenauswertung erforderlich wäre. In Abbildung 52 wurden zusätzlich die Daten der EKZ hinzugefügt und es wird deutlich, dass die Auswertung der gemessenen Heizleistung der beiden Datensätze sehr gut übereinstimmt. Die Streuung der installierten Leistung ist jedoch bei den SIG-Daten grösser als bei den EKZ-Daten. Ein möglicher Grund dafür könnte die grössere Unsicherheit bei der Ermittlung der Basisdaten sein, wie z.B. die EBF oder die nachträgliche Aufteilung in Heizwärme und Warmwasser.

³⁴ Annahme: 3 W/m² für Personen, Geräte und Beleuchtung, nach SIA 2024:2021 (Interne Wärmeeinträge von 74 Wh/m² dividiert durch 24 h).

³⁵ Die Elektrizitätswerke haben in der Schweiz die Möglichkeit für ein paar Stunden die elektrische Heizung abzuschalten. Üblicherweise wurde dies in der Vergangenheit über die Mittagszeit gemacht, jedoch kommt diese externe Regelung immer seltener zum Einsatz.

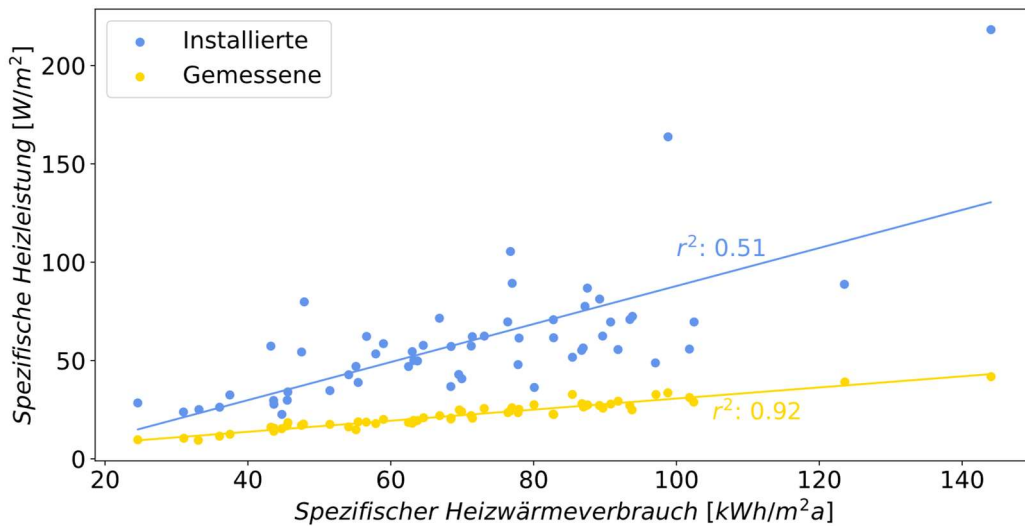


Abbildung 51: Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des spezifischen klimakorrigierten Heizwärmeverbrauchs (2022) ausgewertet für die SIG-Daten. Es wird dabei zwischen real installierter Leistung und aus den Messdaten ermittelter Leistung unterschieden (n = 58).

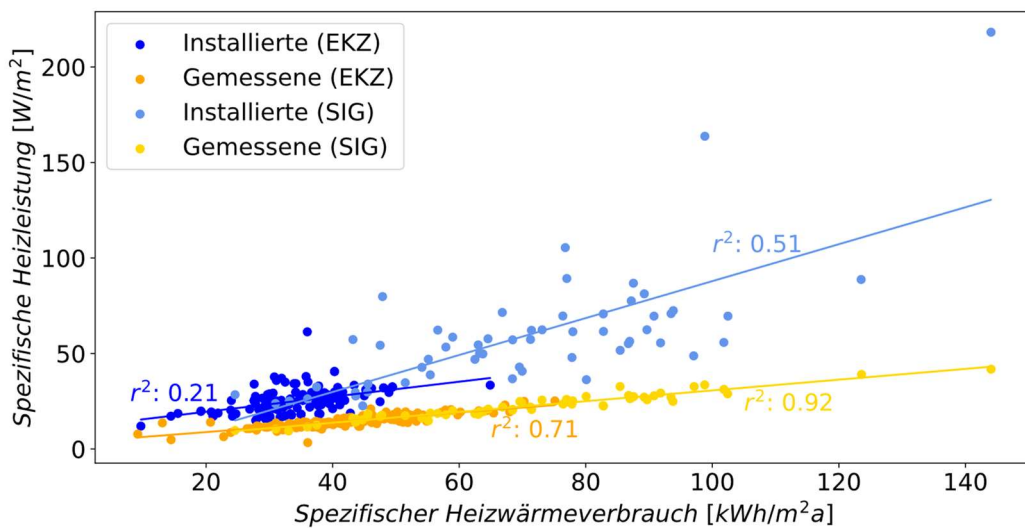


Abbildung 52: Vergleich der beiden ausgewerteten Datensätze. Spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des spezifischen Heizwärmeverbrauchs. Es wird dabei zwischen real installierter Leistung und aus den Messdaten ermittelter Leistung unterschieden (SIG: n = 58, EKZ: n = 155).



In Abbildung 53 ist das Histogramm der relativen Überdimensionierung für die EKZ- und SIG-Daten im Vergleich dargestellt. Es wird deutlich, dass die Überdimensionierung bei den SIG-Daten im Durchschnitt höher ist. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei einem Fernwärmeanschluss eher eine grössere Leistung für die Übergabestation gewählt wird, da abgesehen von eventuell höheren Anschlusskosten für den Kunden (Gebäudeeigentümerschaft) keine negativen Auswirkungen auf die Energieeffizienz zu erwarten sind.

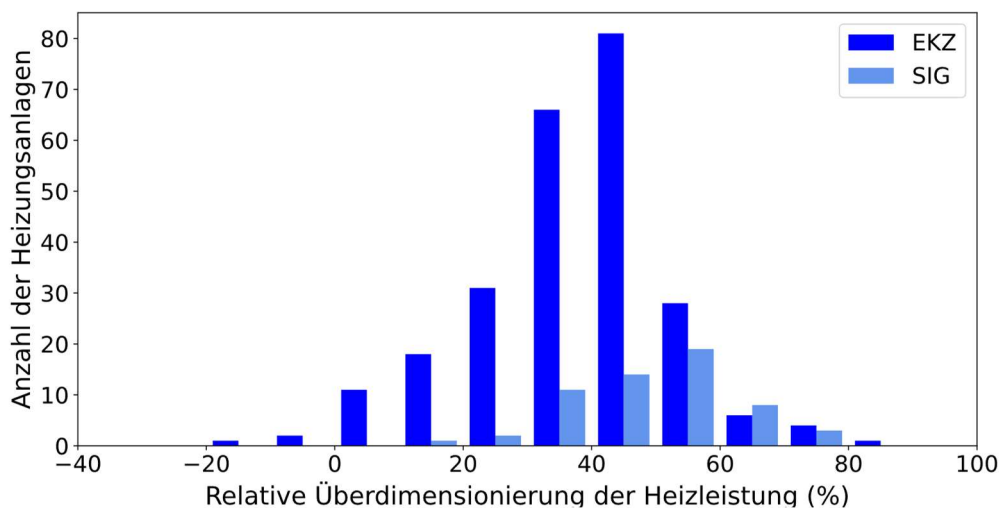


Abbildung 53: Histogramm der Überdimensionierung bezogen auf die installierte Heizleistung für die beiden verschiedenen Datensätze.

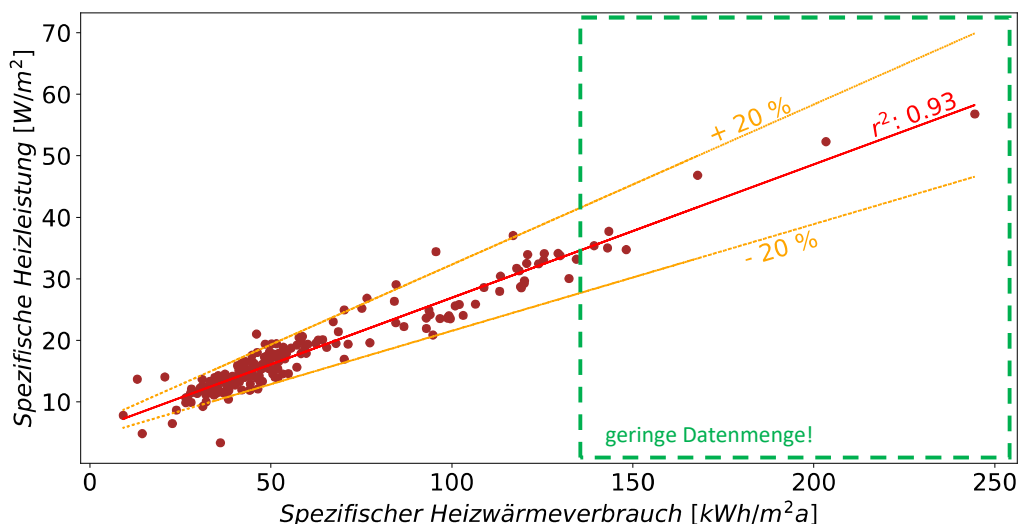


Abbildung 54: Real benötigte spezifische Heizleistung in Abhängigkeit des Heizwärmeverbrauchs für beide Datensätze zusammen. Die gelben Linien zeigen die Abweichung plus und minus 20% zum linearen Fit (rote Linie) mit einem Bestimmtheitsmass (r^2) von 0.93. Diese Grafik kann in der Planung für die Validierung der eigenen Berechnungen verwendet werden, um eine zu grosse Überdimensionierung zu vermeiden.

In Abbildung 54 sind die Datensätze von EKZ und SIG zusammengefasst und zeigen die spezifische Heizleistung in Abhängigkeit vom Heizwärmeverbrauch. Diese Abbildung kann verwendet werden, um die in der Planung berechnete Leistung zu überprüfen und somit eine deutliche Überdimensionierung zu vermeiden. **Dabei ist zu beachten, dass der lineare Fit (rote Linie) für Gebäude im Mittelland gilt, da sich die Messungen auf den Raum Zürich und Genf beschränken.** Ein ähnlicher Ansatz wird in Anhang C der Norm SIA 384/1:2022 verwendet, wobei die Berechnung für jede Klimastation unterschiedlich ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass in der Norm die GEAK-Daten als Grundlage verwendet wurden und in OptiPower aktuelle Messdaten verwendet wurden und vermutlich die Datengrundlage eine höhere Qualität aufweist. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei älteren Gebäuden mit hohem Heizwärmeverbrauch die Datenmenge gering ist.

Zur Plausibilisierung der Leistungsberechnung können nachfolgende Gleichungen angewendet werden, wobei Gl. 1 dem linearen Fit der Datenpunkte aus Abbildung 54 (rote Linie) und Gl. 2 dem linearen Fit mit einem Zuschlag von 20% entspricht, um die Wahrscheinlichkeit einer Unterdimensionierung deutlich zu verringern. Die Anwendung von Gleichung 1 führt unweigerlich dazu, dass einige Anlagen leicht unterdimensioniert sind (die meisten Datenpunkte liegen zwischen den beiden gelben Linien $\pm 20\%$). Wird für die Ermittlung des Heizwärmeverbrauchs ein Energienachweis nach SIA 380/1 verwendet, so ist dieser mit dem Korrekturfaktor (f_{EPG}) 1.4 zu multiplizieren, da bei Wohngebäuden im Mittel mit einem «Energy Performance Gap»³⁶ von 40% zu rechnen ist [1,14]. Liegt ein gemessener klimakorrigierter Heizwärmeverbrauch vor, ist kein Zuschlag erforderlich ($f_{EPG} = 1$).

$$\text{Gl. 1} \quad \Phi_H = (0.217 \cdot q_h \cdot f_{EPG} + 5.251) \cdot A_E \text{ (Gültigkeitsbereich: Mittelland)}$$

$$\text{Gl. 2} \quad \Phi_H = (0.260 \cdot q_h \cdot f_{EPG} + 6.301) \cdot A_E \text{ (Gültigkeitsbereich: Mittelland)}$$

mit:

Φ_H = Heizleistungsbedarf [W]

q_h = spez. Heizwärmeverbrauch [kWh/m²a]

f_{EPG} = Korrekturfaktor "Energy Performance Gap"

A_E = Energiebezugsfläche [m²]

Durch verschiedene Massnahmen könnte die installierte Leistung generell reduziert werden. Eine mögliche Massnahme wäre die generelle Erhöhung der Auslegungstemperatur um 1-2 K, was dazu führen würde, dass mehr Anlagen eine Unterdimensionierung aufweisen würden, insbesondere wenn diese deutlich mehr Heizwärme benötigen als berechnet. Dabei ist zu beachten, dass diese Massnahme nicht die Streuung der Daten reduzieren würde, dafür dient das oben beschriebene Vorgehen mit Gleichung 1 und 2. Um die Folgen einer Unterdimensionierung abzuschätzen, wurden die Aussentemperaturen der letzten 22 Jahre (2000 - 2022) für die Wetterstation Kloten im Detail betrachtet. In Abbildung 55 ist die Anzahl Perioden mit einer Aussentemperatur von -7 °C oder weniger für eine bestimmte Anzahl

³⁶ Erhöhter Heizwärmebedarf aufgrund des realen Nutzerverhalten



Stunden dargestellt. Es wird deutlich, dass in den letzten 22 Jahren nur dreimal während mehr als 24 Stunden eine Temperatur von -7 °C oder tiefer auftrat. Es kann davon ausgegangen werden, dass Kälteperioden von 24 Stunden oder weniger kaum einen Einfluss auf das Gebäude haben, da die thermische Masse dazu beiträgt, solche Perioden abzufedern. Eine zu geringe Heizleistung würde sich wohl kaum auf den Wohnkomfort auswirken. Längere Perioden wie 2001 und insbesondere 2012 sind sehr selten und könnten durch kurzzeitig niedrigere Raumtemperaturen (z.B. $19\text{--}20\text{ °C}$) kompensiert werden. Dies ist in Abbildung 57 ersichtlich, wo die empfundene Temperatur für ein simuliertes Mehrfamilienhaus für das Extremjahr 2012 ausgewertet wurde. Aus Sicht der Autoren sollte eine kurze Periode von paar wenigen Tagen im Jahr, in der die gewünschten Raumtemperaturen (22 °C) einmal in 20 Jahren unterschritten wird, zumutbar sein, sofern keine Elektronachheizung eingesetzt wird. Zu beachten ist, dass der Fokus auf dem Mittelland liegt, ob diese Aussagen auch für andere Regionen gelten, müsste noch untersucht werden.

In Abbildung 56 ist als Ergänzung die Häufigkeit und die Länge der Kälteperioden von unter -5 °C dargestellt.

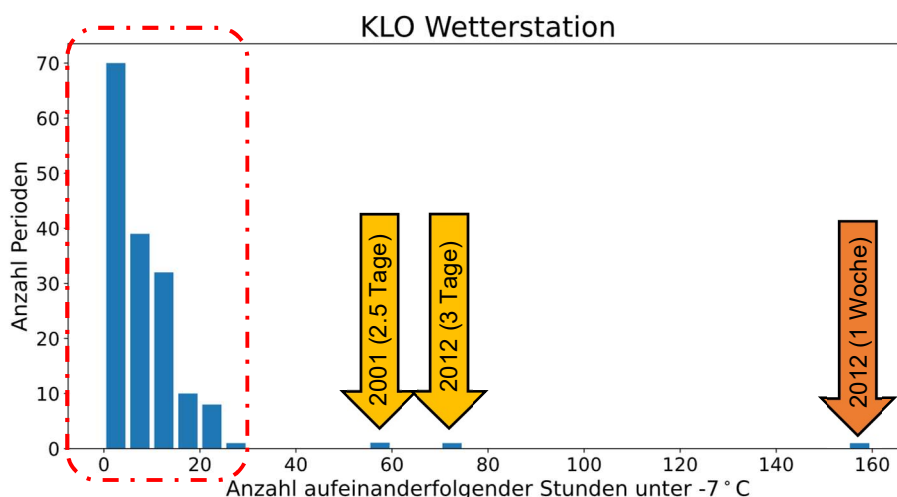


Abbildung 55: Anzahl Kälteperioden in Abhängigkeit der Anzahl Stunden bei welcher die Aussenlufttemperatur unter -7 °C fällt für die Klimastation Kloten für die Jahre 2000 – 2022.

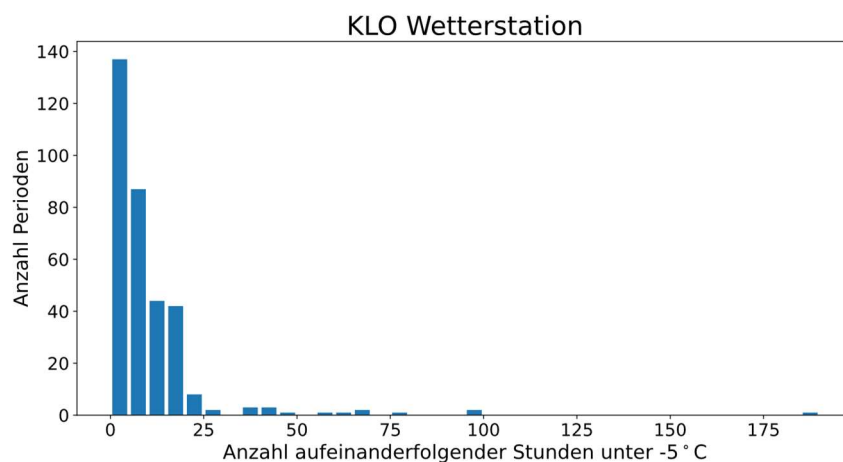


Abbildung 56: Anzahl Kälteperioden in Abhängigkeit der Anzahl Stunden bei welcher die Aussenlufttemperatur unter -5 °C fällt für die Klimastation Kloten für die Jahre 2000 – 2022.

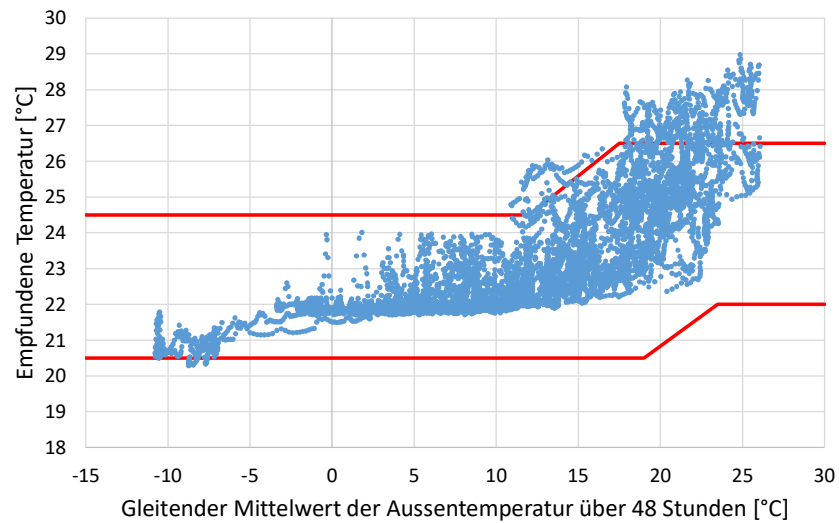


Abbildung 57: Behaglichkeitsbewertung nach SIA 180 für ein Referenz-Mehrfamilienhaus (SPF) für die kritische Wohnung (West-EG) mittels dynamischer Gebäudesimulation mit Wetterdaten von Rapperswil SG aus dem Jahr 2012. Die roten Linien zeigen den zulässigen Bereich der Stundenmittelwerte der empfundenen Temperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur, wenn das Gebäude geheizt oder gekühlt wird. Die Heizung wurde nach SIA 384/2 für eine Innentemperatur von 22 °C ohne weitere Zuschläge und Reserven ausgelegt (entspricht damit einer "knappen" Auslegung).



4.1.4 Wohngebäude detaillierte Auswertung

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse der beiden detailliert untersuchten Mehrfamilienhäuser (Fengari und Plattenhof) basieren auf der gemessenen Nutzenergie (Wärmeabgabesystem). Beide Gebäude werden über eine Wärmepumpe ohne zusätzliche Wärmeerzeuger (z.B. Gas oder Öl) versorgt und beide verfügen über eine mechanische Lüftung mit Zuluftvorwärmung. Da der Heizwärmeverbrauch in den Wohnungen erfasst wird und kein zusätzlicher Wärmemengenzähler für die Zuluftvorwärmung vorhanden ist, musste diese zusätzliche Leistung über Simulationen abgeschätzt werden, wobei ein Wärmerückgewinnungsgrad von 70% angenommen wurde.

Mehrfamilienhaus Fengari

Abbildung 58 zeigt die gemessene Leistungskennlinie für das MFH Fengari. Mit der «Energiesignatur»-Methode kann eine erforderliche Heizleistung von 8.3 kW ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Zuluftvorwärmung von ca. 2 kW (siehe Abbildung 59, links «Lüftung (IDA ICE)») beträgt die aus den Messdaten ermittelte Heizleistung 10.3 kW. Installiert wurde eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 22 kW, was zu einer Überdimensionierung von 114% führt. Die Validierung der dynamischen Gebäudesimulation mit den Messdaten zeigt in Abbildung 59 eine gute Übereinstimmung, wobei der Heizwärmebedarf in den Wintermonaten leicht überschätzt wird und in der Übergangszeit zum Teil deutlich unterschätzt wird, was wiederum auf das realistische Nutzerverhalten zurückzuführen ist [14].

Der gemessene spez. Heizwärmeverbrauch beträgt für das Jahr 2021 ohne Luftvorwärmung 24 kWh/(m²a). Der simulierte Heizwärmeverbrauch mit Luftvorwärmung beträgt 33.7 kWh/(m²a), was ziemlich gut mit der Normberechnung von 32 kWh/(m²a) übereinstimmt. Die Heizgradtage für das Jahr 2021 sind praktisch identisch mit den Norm-Heizgradtagen (SIA 2028:2015), weshalb auf eine Klimakorrektur verzichtet werden kann.

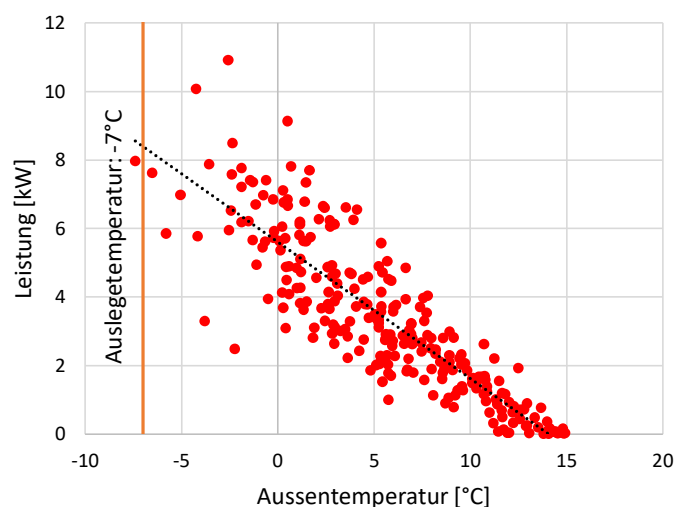


Abbildung 58: Leistungskennlinie des Fengari MFH für die Messperiode vom 01.01.2021 bis 31.12.2021. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie). Berücksichtigt wurden nur Messwerte bis zu einer Heizgrenze von 15 °C.

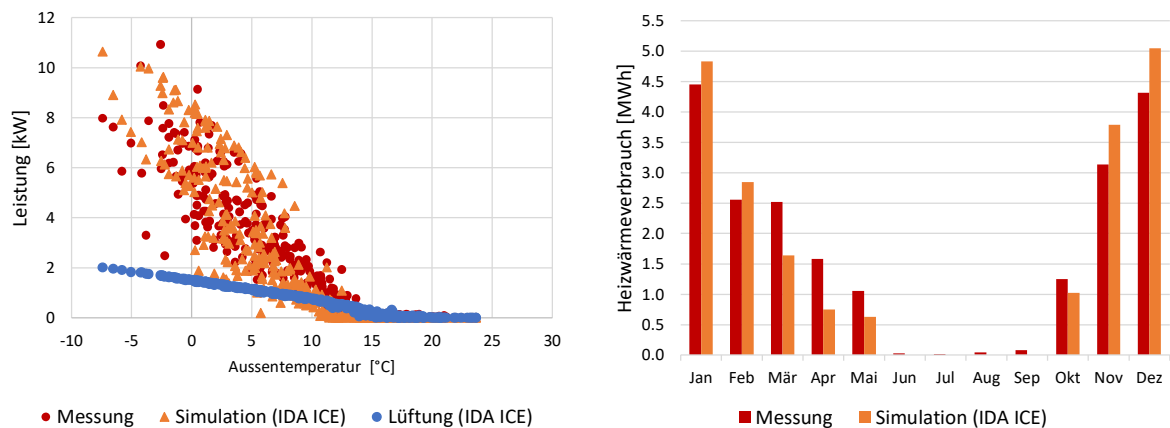


Abbildung 59: Tagesmittelwerte der Heizleistung (links) in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und der monatliche Heizwärmeverbrauch (rechts) für den Messzeitraum 01.01.2021 bis 31.12.2021. Vergleich der dynamischen Gebäudesimulation (mit bestmöglichen Annahmen nur zur Nutzung) und der tatsächlich gemessenen Leistung und des monatlichen Heizwärmeverbrauchs für das MFH Fengari. In der linken Abbildung ist die simulierte Leistung der Luftvorwärmung separat dargestellt. Bei der monatlichen Auswertung wurde die Luftvorwärmung nicht berücksichtigt.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den in der Tabelle 16 aufgeführten Kennzahlen sind:

- Die Leistungsermittlung nach SIA 380/2 führt zu plausiblen Werten und würde die Überdimensionierung bei der Anwendung der Standardlast- und Nutzungsprofile nach SIA 2024 deutlich reduzieren.
- Die Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien ohne Klimaschutz führt zu den gleichen Ergebnissen wie die heute verwendeten Klimadaten.
- Die Berechnung der Norm-Heizlast nach SIA 384.201 sowie mit dem von den Kantonen zur Verfügung gestellten Tool «WPesti» führt zu einer deutlichen Überdimensionierung.
- Die Plausibilisierung der geplanten bzw. installierten Leistung gemäss der vorgeschlagenen Methode in Kapitel 4.1.3 (Gl. 1 und Gl. 2), führt zu einer erwarteten Heizleistung von 13.2 kW (Gl.1) bzw. 15.8 kW (Gl. 2). Diese Abschätzung stimmt gut mit der SIA 380/2 Simulation überein und hätte zu einer deutlichen Reduktion der Überdimensionierung geführt.



Tabelle 16: Zusammenfassung der Resultate für das MFH Fengari. Mit «reale» Lasten und Nutzungsprofile sind Eingabewerte gemeint die möglichst den vor Ort eingestellten Werten übereinstimmen.

Leistungs-ermittlung	Berechnungs-methode	Lasten und Nutzungs-profile	Klima-daten	Heizleistung [kW]	Relative Differenz der Leistung ³⁷
Ausgewiesen (Installation)	-	-	-	22	+114%
Messung	Energiesignatur	-	2001	10.3	Referenz
	Box-Plot	-	-	-	-
Simulation	Leistungsermittlung nach SIA 380/2	SIA 2024 (80%) Reale (80%) ³⁹	SIA 2028 ³⁸ SIA 2028	12 19	+17% +84%
	Leistungsermittlung nach SIA 384.201	Ohne	SIA 2028	21	+104%
	Jahressimulation nach SIA 380/2	Reale Reale	SIA 2028 «2035» RCP8.5	13 13	+26% +26%
Berechnung (Planung)	SIA 384/3 (WPesti) ⁴⁰		SIA 2028	18	+75%
Berechnung (Planung)	SIA 384/1 ⁴¹		SIA 2028	k.A.	-

Mehrfamilienhaus Plattenhof

Die Auswertung der Leistungskennlinie (siehe für Abbildung 60) des MFH Plattenhof ergibt eine Heizleistung von 18 kW. Für die Zulufterwärmung wurde eine Leistung von 4.4 kW ermittelt, was eine Gesamtheizleistung von 22.4 kW ergibt. Auffällig ist der leicht gekrümmte Verlauf der Messpunkte, die Heizleistung nimmt nicht proportional mit tieferer Aussenlufttemperatur zu. Dieser Verlauf führt bei der Bestimmung der Leistung über den linearen Fit zu eher einer tieferen Heizleistung.

Installiert wurde eine Wärmepumpe mit einer Leistung von 58 kW, was einer Überdimensionierung von 159% entspricht. Die Validierung der dynamischen Gebäudesimulation mit den Messdaten zeigt in Abbildung 61 eine gute Übereinstimmung, wobei noch deutlicher als beim Gebäude Fengari das realistische Nutzerverhalten zu einer deutlichen Unterschätzung des Wärmebedarfs in den Übergangsmonaten führt. In den Wintermonaten stimmt die Simulation gut mit der Messung überein. Die in Abbildung 61 separat dargestellte Luftvorwärmung zeigt bei sehr tiefen Aussentemperaturen einen abflachenden Trend, was auf die Luftmengenreduktion gemäss SIA 382/1 (Ziffer 2.2.6.6) zurückzuführen ist. Die in IDA ICE simulierte Heizleistung für die Luftvorwärmung von 4.4 kW entspricht den Angaben im Hydraulikschema.

³⁷ Rel. Differenz = "Vergleichende Leistung" dividiert durch gemessene Leistung minus eins

³⁸ Version 2010

³⁹ Die Luftmengen für mech. Lüftung wurden anhand der Messungen eingestellt (Erhöhter Luftvolumenstrom gegenüber der Norm)

⁴⁰ Eine Berechnung nach SIA 384.201 stand nicht zur Verfügung

⁴¹ Berücksichtigung von Warmwasser, Speerzeiten und Verbundsystemen (z.B. Lüftung)

Der gemessene spez. Heizwärmeverbrauch beträgt für das Jahr 2021 ohne Luftvorwärmung 15.7 kWh/(m²a). Der simulierte Heizwärmeverbrauch mit Luftvorwärmung beträgt 17.2 kWh/(m²a) und liegt damit deutlich unter der Normberechnung von 29 kWh/(m²a). Damit ist dieses Gebäude eines der wenigen, das trotz des deutlichen Mehrverbrauchs in den Übergangsmonaten besser abschneidet als rechnerisch zu erwarten wäre. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Normberechnung nach SIA 380/1 fehlerhaft ist.

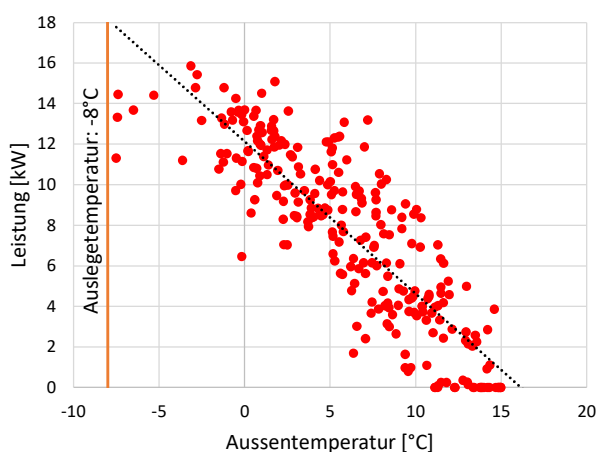


Abbildung 60: Leistungskennlinie des Plattenhof MFH für die Messperiode vom 01.01.2021 bis 31.12.2021. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie). Berücksichtigt wurden nur Messwerte bis zu einer Heizgrenze von 15 °C.

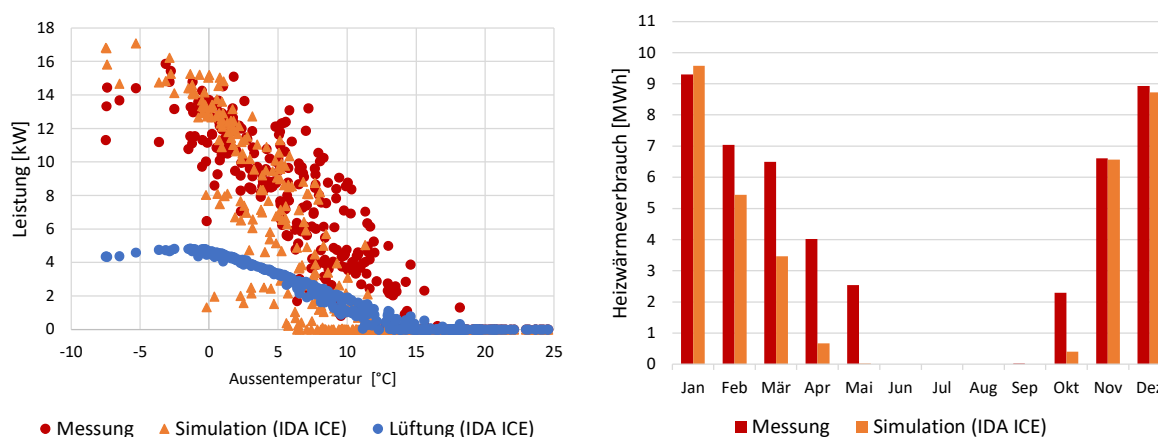


Abbildung 61: Tagesmittelwerte der Heizleistung (links) in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und der monatliche Heizwärmeverbrauch (rechts) für den Messzeitraum 01.01.2021 bis 31.12.2021. Vergleich der dynamischen Gebäudesimulation (mit bestmöglichen Annahmen nur zur Nutzung) und der tatsächlich gemessenen Leistung und des monatlichen Heizwärmeverbrauchs für das MFH Plattenhof. In der linken Abbildung ist die simulierte Leistung der Luftvorwärmung separat dargestellt. Bei der monatlichen Auswertung (rechts) wurde die Luftvorwärmung nicht berücksichtigt.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den in der Tabelle 17 aufgeführten Kennzahlen sind:

- Die Leistungsermittlung nach SIA 380/2 führt zu plausiblen Werten und würde bei der Anwendung der Standardlast- und Nutzungsprofile nach SIA 2024 die Überdimensionierung



deutlich reduzieren. Im Vergleich zum Gebäude Fengari würde sich dennoch eine Überdimensionierung ergeben.

- Die Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien ohne Klimaschutz führt zu keiner signifikanten Reduktion der Heizleistung.
- Die Jahressimulation mit Berücksichtigung der realitätsnächsten Rahmenbedingungen führt zu einer Heizleistung, die sehr gut mit der Messung übereinstimmt. Ein Grund für diese gute Übereinstimmung könnte der reduzierte Volumenstrom der mechanischen Lüftung sein, der aus den Messdaten ermittelt wurde.
- Die Plausibilisierung der geplanten bzw. installierten Leistung nach der vorgeschlagenen Methode in Kapitel 4.1.3 (Gl. 1 und Gl. 2) führt zu einer erwarteten Heizleistung von 42.4 kW (Gl.1) bzw. 50.8 kW (Gl. 2). Damit ist die Heizleistung deutlich höher als aus den Messdaten ermittelt. Dies ist auf den hohen Heizwärmebedarf zurückzuführen, der in Realität deutlich niedriger liegt. Wird der reale Heizwärmeverbrauch zur Plausibilisierung herangezogen, ergeben sich 31.6 kW bzw. 37.8 kW, was auch den Simulationen nach SIA 380/2 wesentlich besser entspricht.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Resultate für das MFH Plattenhof. Mit «reale» Lasten und Nutzungsprofile sind Eingabewerte gemeint die möglichst den vor Ort eingestellten Werten übereinstimmen.

Leistungs- ermittlung	Berechnungs- methode	Lasten und Nutzungs- profile	Klima- daten	Heizleistung [kW]	Relative Differenz der Leistung ⁴²
Ausgewiesen (Installation)	-	-	-	58	+159%
Messung	Energiesignatur Box-Plot		2021 -	22.4 -	Referenz -
Simulation	Leistungsermittlung nach SIA 380/2	SIA 2024 (80%) Reale (80%)	SIA 2028 ⁴³ SIA 2028	32 32	+43% +43%
	Leistungsermittlung nach SIA 384.201	Ohne	SIA 2028	38	+70%
	Jahressimulation nach SIA 380/2	Reale Reale	SIA 2028 «2035» RCP8.5	22 21	-2% -6%
Berechnung (Planung)	SIA 384/3 ⁴⁴ (WPesti)		SIA 2028	58	+159%
Berechnung (Planung)	SIA 384/1 ⁴⁵		SIA 2028	k.A.	-

Beide Gebäude weisen mit 114% bzw. 159% eine starke Überdimensionierung auf, verglichen mit der in Kapitel 4.1.3 ermittelten Überdimensionierung von 44% im Median für eine grosse Anzahl von Mehrfamilienhäusern. Diese beiden Gebäude scheinen eher Ausreisser zu sein und sind nicht repräsentativ für den gesamten Gebäudepark.

⁴² Rel. Differenz = "Vergleichende Leistung" dividiert durch gemessene Leistung minus eins

⁴³ Version 2010

⁴⁴ Eine Berechnung nach SIA 384.201 stand nicht zur Verfügung

⁴⁵ Berücksichtigung von Warmwasser, Sperrzeiten und Verbundsystemen (z.B. Lüftung)

4.2 Einfluss auf die Wärmepumpen

In den folgenden Kapiteln wird auf die Resultate der WP-Simulationen für die unterschiedlichen WP-Typen einer WP mit fester Drehzahl, einer WP mit mehreren Verdichtern und einer Inverter-geregelten WP eingegangen. Die Ergebnisse gliedern sich in Sole-Wasser-WP und Luft-Wasser-WP. Diese wurden generell mit geringer Kapazität im Heizkreis simuliert, die etwa einer Deckenheizung, Konvektorheizung oder Radiatorheizung entspricht. Als Vergleich wurde zusätzlich eine Variante mit hoher Kapazität im Heizkreis simuliert, die einer bauteilintegrierten Heizung wie Fussbodenheizung (FBH) oder thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) entspricht. Zunächst wird das Verhalten der Sole-Wasser WP analysiert.

Die Leistungs- und COP-PM der Sole-Wasser-WP sind in Abbildung 62 angegeben.

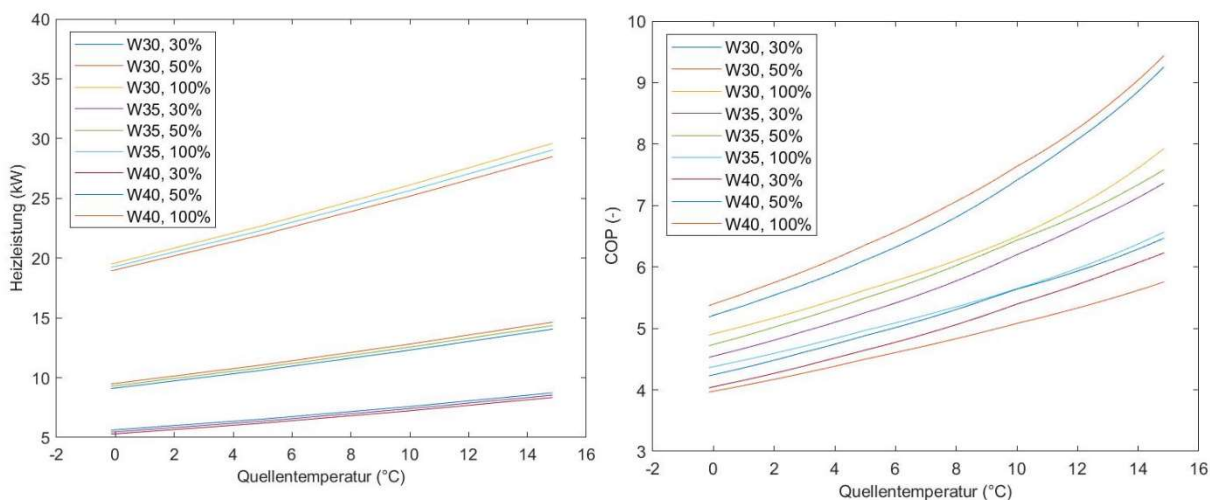


Abbildung 62: Leistungs-PM und COP-PM der BS2-WP

4.2.1 Sole-Wasser-Wärmepumpe mit fester Drehzahl

Ein Verdichter mit fester Drehzahl

Abbildung 63 zeigt die Effizienz als Jahresarbeitszahl (JAZ) und Systemnutzungsgrad (SNG) für eine geringe thermische Kapazität im Heizkreis, die durch Abregelung mit Thermostatventilen im Betrieb noch reduziert werden kann. Im Allgemeinen bewirkt eine Überdimensionierung bei einer erdgekoppelten Sole-Wasser Wärmepumpe (S/W-WP) eine Erhöhung der JAZ bzw. des SNG, wenn eine ausreichende Kapazität vorliegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine Überdimensionierung der WP auch eine Überdimensionierung des Erdwärmesondenfeldes (EWS-Feldes) mit sich bringt, da das EWS-Feld auf die Quellenleistung der WP ausgelegt wird.

Wenn das Feld durch die Überdimensionierung der WP jedoch im realen Betrieb mit geringeren spezifischen Entzugsleistungen belastet wird, steigt die Quelltemperatur, wie auch in Abbildung 64 an der Entwicklung des Temperaturhubs sichtbar wird, was die Effizienz erhöht. Dieser Effizienzgewinn durch die bessere JAZ wird allerdings teuer erkaufte, wie in Kapitel 4.3 anhand der Kostenstruktur diskutiert wird. In Abbildung 63 ist aber auch zu sehen, dass die JAZ bei höherer Überdimensionierung von 80% bzw. 100% wieder absinkt, was auf die Regelung zurückzuführen ist und zu einer Erhöhung des Temperaturhubs in Abbildung 64 korrespondiert. Dies liegt an der Mindestlaufzeit des Verdichters, der bei geringer Kapazität im Heizsystem zu einer Erhöhung der Senktemperatur führt. Häufig wird bei WP mit einem



Verdichter eine Wiedereinschaltperre eingesetzt, worauf in dieser Untersuchung zugunsten der Vergleichbarkeit mit den anderen Systemkonfigurationen verzichtet wurde, siehe auch Kap. 3.4.7.

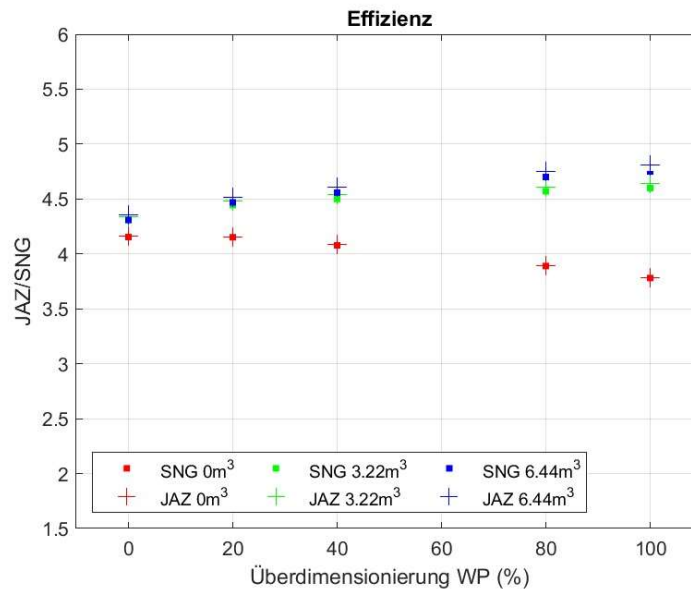


Abbildung 63: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit fester Drehzahl.

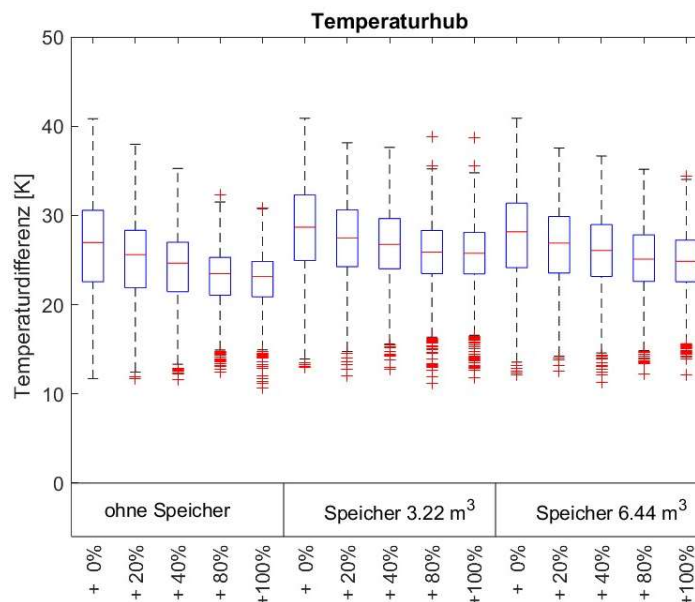


Abbildung 64: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senktemperatur mit und ohne Speicherintegration.

Wird die Kapazität hingegen durch einen Speicher vergrößert, kann die Leistung während der Mindestlaufzeit in der Kapazität gespeichert werden und der Temperaturhub sinkt bei Überdimensionierung durch die steigende Quelltemperatur. Dies wird im Systemnutzungsgrad (SNG) in Abbildung 63 deutlich, der bei Überdimensionierung kontinuierlich ansteigt.

Abbildung 65 zeigt das Leistungsdiagramm sowie die Einschaltungen pro Verdichter und die Laufzeit der Wärmepumpe jeweils ohne (in blau) und mit 100% Überdimensionierung (in

orange). An der Leistungskennlinie wird deutlich, dass bei monovalenter Auslegung auf die Norm-Aussentemperatur schon bei korrekter Dimensionierung über den gesamten Betriebsbereich mehr WP-Leistung zur Verfügung steht als für die Gebäudeheizlast (grüner Bereich) benötigt wird. Es ist zudem erkennbar, dass die effektive Heizleistung der überdimensionierten WP (ca. 200 kW) noch über dem Auslegungspunkt liegt (184 kW). Dies liegt daran, dass die Quelltemperatur der überdimensionierten WP höher liegt als die Auslegungstemperatur und dadurch bei fixer Verdichterdrehzahl die Heizleistung über der Auslegungsleistung liegt. Da eine WP mit fester Verdichterdrehzahl betrachtet wird, besteht die einzige Möglichkeit zur Leistungsanpassung in einem Ein-Aus-Betrieb. Dies führt zu mehr Verdichterstarts, welche Taktverluste verursachen und die Lebensdauer des Verdichters verringern (siehe Kap. 3.4.6 und Kap. 4.3.2). Mit einer Speicherintegration kann die Anzahl der Starts abhängig vom Speichervolumen wirksam reduziert werden.

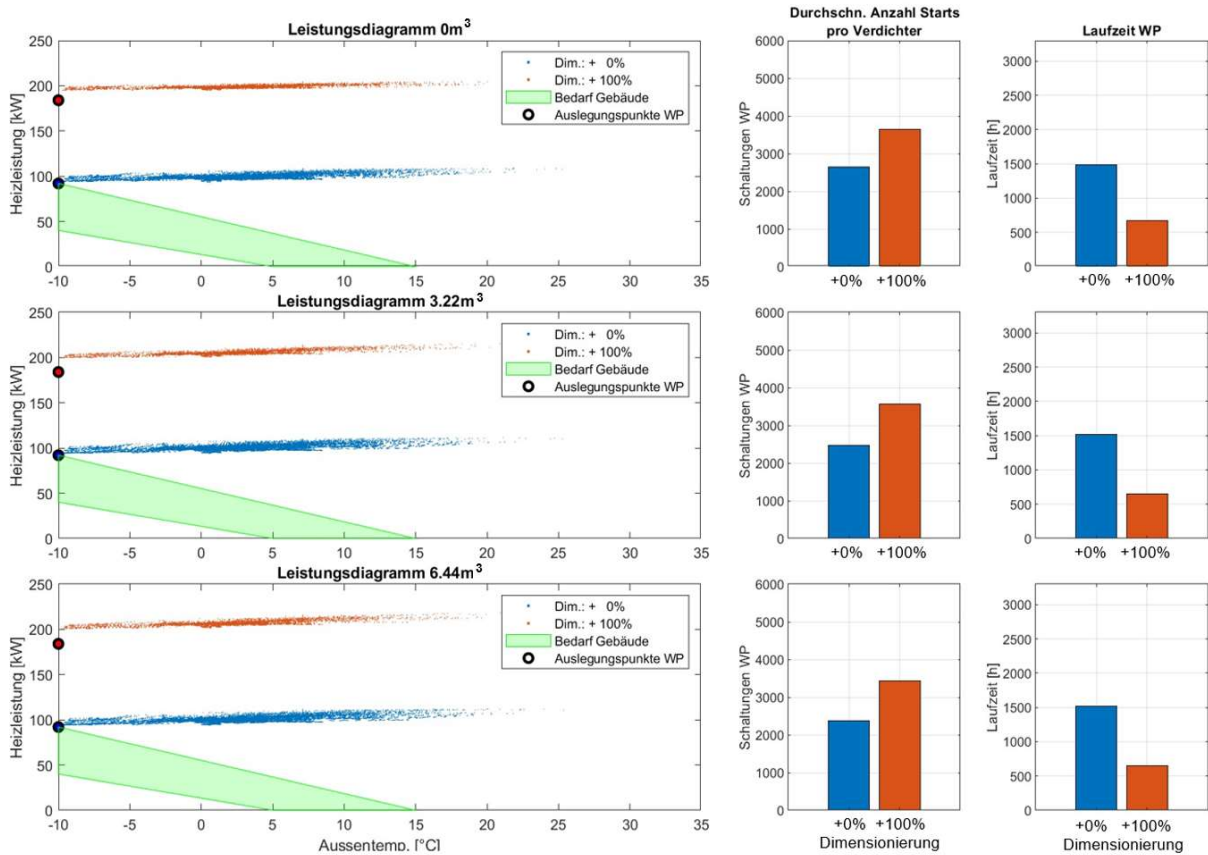


Abbildung 65: Leistungsdiagramm der WP mit fester Drehzahl

Bei 100% Überdimensionierung steht entsprechend mehr Leistung zur Verfügung, was die Laufzeit der Wärmepumpe reduziert, um die gleiche Energie ins Gebäude zu bringen. Allerdings erhöht sich auch der Temperaturhub aufgrund der Mindestlaufzeit, wie in Abbildung 64 erkennbar ist, was zu Reduktion der JAZ bei höherer Überdimensionierung in Abbildung 63 führt. Durch die höhere Energieabgabe reduzieren sich aber die Schaltvorgänge und die Laufzeit.



Exkurs: Vergleich mit hoher Kapazität im Heizkreis

Abbildung 66 bis Abbildung 68 zeigen die entsprechenden Darstellungen für ein Gebäude mit höherer Kapazität einer FBH oder TABS.

Aufgrund der höheren Kapazität tritt bei Überdimensionierung keine Reduktion der JAZ mehr auf, wie schon bei geringerer Kapazität mit integriertem Speicher festgestellt wurde. Mit der grösseren Kapazität der FBH steigt nun auch die JAZ und der SNG ohne integrierten Speicher mit steigender Überdimensionierung. Dies liegt daran, dass mit steigender Überdimensionierung die Senktemperatur aufgrund der hohen Kapazität nicht ansteigt und der Temperaturhub durch die steigende Quelltemperatur kontinuierlich abnimmt und damit die Effizienz verbessert wird, wie aus Abbildung 67 ersichtlich ist. Weiterhin ist auch erkennbar, dass der Temperaturhub mit integriertem Speicher etwas höher liegt als ohne Speicher und damit die JAZ bzw. der SNG mit integriertem Speicher etwas niedriger als ohne Speicher ausfällt.

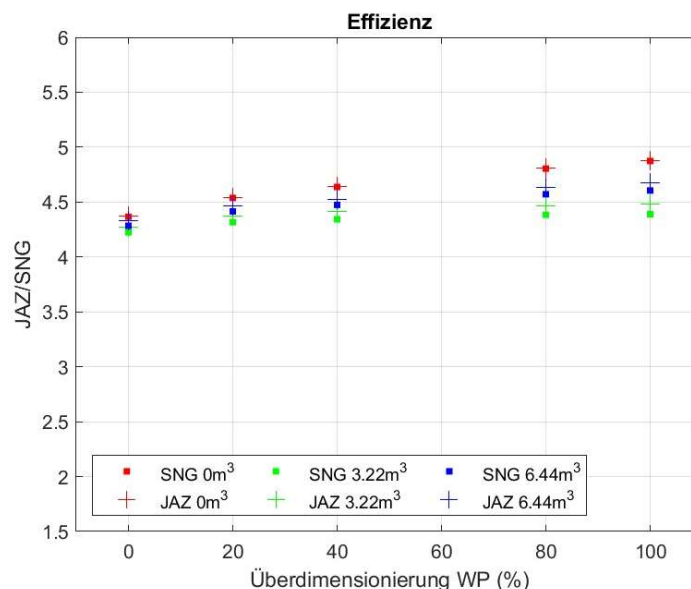


Abbildung 66: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit fester Drehzahl

Abbildung 68 zeigt die Schaltungen und die Laufzeit der WP. Da die FBH schon eine hohe Kapazität hat, bewirkt die Speicherintegration nur kleinere Änderungen in der Anzahl der Verdichterstarts, wobei die Kapazität bei Speicherintegration sogar etwas abgesenkt wird. An den orangen Betriebspunkten ist die deutliche Überdimensionierung erkennbar. Die höhere Leistung bei 100% Überdimensionierung reduziert die Laufzeit.

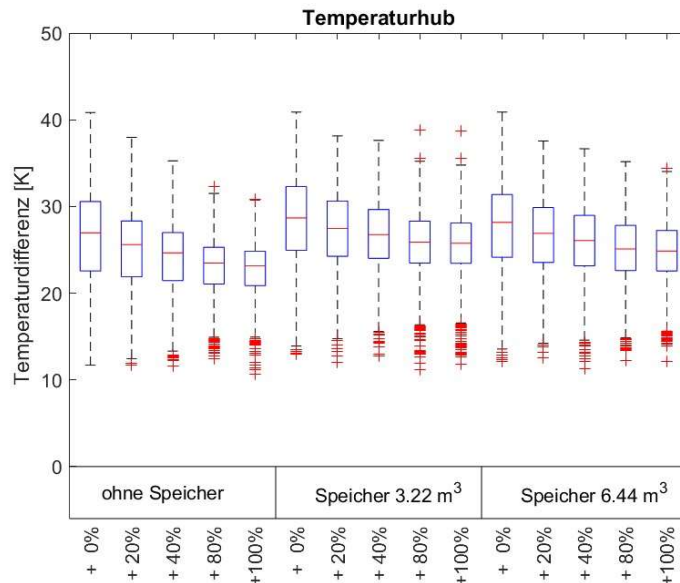


Abbildung 67: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur mit und ohne Speicherintegration

Abbildung 69 zeigt die relative Laufzeit des Verdichterbetriebs bei FBH. Dies entspricht dem Anteil der Laufzeit von 1500 h bezogen auf die 8760 Jahresstunden bei korrekter Auslegung in blau.

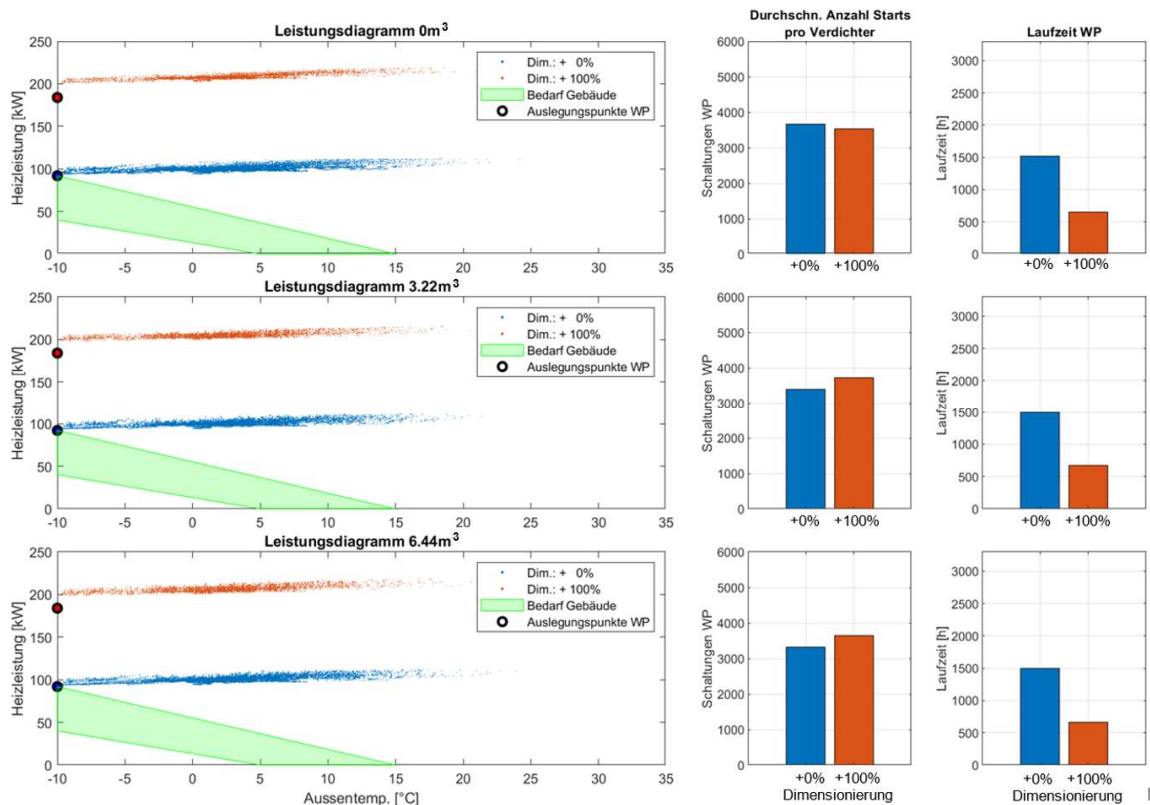


Abbildung 68: Leistungsdiagramm WP mit fester Drehzahl und hoher Kapazität im Heizkreis (FBH, TABS).



Der wesentliche Einfluss auf die Laufzeit ist die Leistung der WP, die Speicherintegration hat bei einem Verdichter kaum einen Einfluss. Bei höherer Leistung sinkt die Laufzeit, da ausreichend Kapazität im System vorliegt, um die grössere Leistung innerhalb der Mindestlaufzeit aufzunehmen.

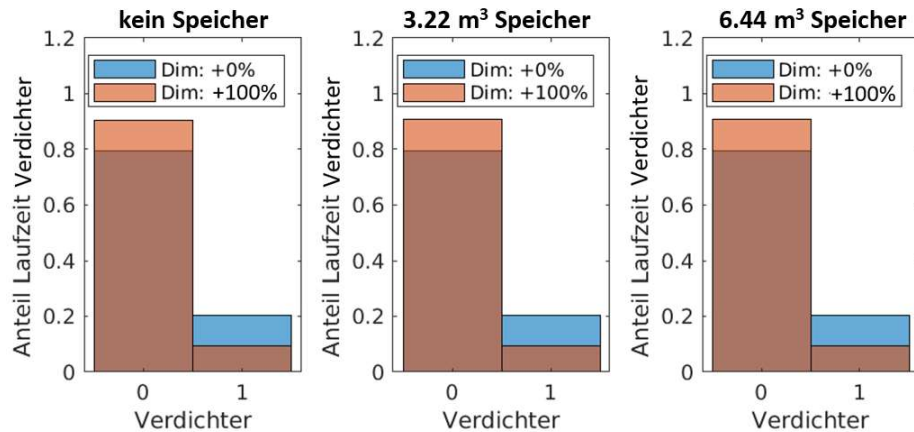


Abbildung 69: Laufzeit bei einem Verdichter. Dabei steht 0 für eine ausgeschaltete WP während 1 die Laufzeit des ersten Verdichters der WP repräsentiert

Da in diesem Projekt Bürogebäude betrachtet werden, wird für die folgenden WP-Konfigurationen der Fall der Kapazität, also Decken-, Konvektor- oder Radiatorheizung zugrunde gelegt. Damit sind auch eher die kritischen Bedingungen abgebildet, da eine höhere Kapazität im Heizsystem für stabilere Betriebsbedingungen sorgt und eine bessere Effizienz erzielt.

Exkurs: Einfluss der Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes

Bei der Auslegung des Erdwärmesondenfeldes spielen sowohl die installierte Heizleistung als auch die entzogene Wärmeenergie eine Rolle. Um den Einfluss der Sondentiefe (höhere Erdreichtemperaturen) zu eliminieren, wurden alle Simulationen mit gleich langen Sonden (250 m) durchgeführt, jedoch die Anzahl Sonden variiert. Tabelle 18 gibt einen Überblick der simulierten Varianten der Auslegung bzw. der Überdimensionierung des EWS-Feldes.

Tabelle 18: Darstellung der simulierten Varianten der Auslegung/Überdimensionierung des EWS-Feldes.

		Anzahl Sonden				
		+ 0%	+ 20%	+ 40%	+ 80%	+ 100%
Skalierung Energie	+ 100%				28	33
	+ 80%			20		
	+ 40%	17				
	+ 20%		16			
	+ 0%	12	13	14	17	18
		+ 0%	+ 20%	+ 40%	+ 80%	+ 100%
		Skalierung Leistung				

In den Untersuchungen zum Verhalten der WP wurde jeweils von einer konstanten Volllaststundenzahl ausgegangen, d.h. wenn die Wärmepumpenleistung 100% überdimensioniert wurde, wurde auch ein 100% grösserer Wärmebedarf bei der Auslegung des Feldes

berücksichtigt (grüne Kästchen in Tabelle 18), was wegen der gegenseitigen Beeinflussung der Sonden (Feldeffekt) zu einem überproportionalen Wachstum des Sondenfeldes (in diesen Simulationen auf Faktor 2.8 der Sondenmeter bei 100% Überdimensionierung und konstanter Sondentiefe über alle Überdimensionierungsvarianten) und der damit verbundenen Kostenfolge führt.

Das gelbe Feld zeigt die Anzahl benötigter Sonden unter Berücksichtigung eines "Energy Performance Gap" von 40% und entspricht damit der benötigten Sondenzahl ohne "Energy Performance Gap", jedoch einer Überdimensionierung der Leistung von 80%.

Der andere Extremfall ist ein Erdwärmesondenfeld, welches für eine richtig dimensionierte Wärmepumpe und Heizwärmebedarf ausgelegt ist, jedoch mit einer überdimensionierten Wärmepumpe betrieben wird (in diesem Fall 12 Sonden für alle Überdimensionierungsvarianten). Hier besteht die Gefahr, dass das EWS-Feld übernutzt wird und schon nach wenigen Jahren Schäden durch Einfrieren entstehen.

Zwischen diesen beiden Extremen liegt die Überdimensionierung der Leistung bei konstantem Wärmeenergieentzug (blaue Felder in Tabelle 18).

Zur Illustration der Auswirkungen auf die Effizienz wurden daher Simulationen mit konstantem EWS-Feld (12 Sonden für alle Fälle) trotz Überdimensionierung der Wärmepumpe durchgeführt und mit EWS-Feldern, welche nur auf eine leistungsmässige, nicht aber auf eine energetische Überdimensionierung ausgelegt wurden (blaue Felder).

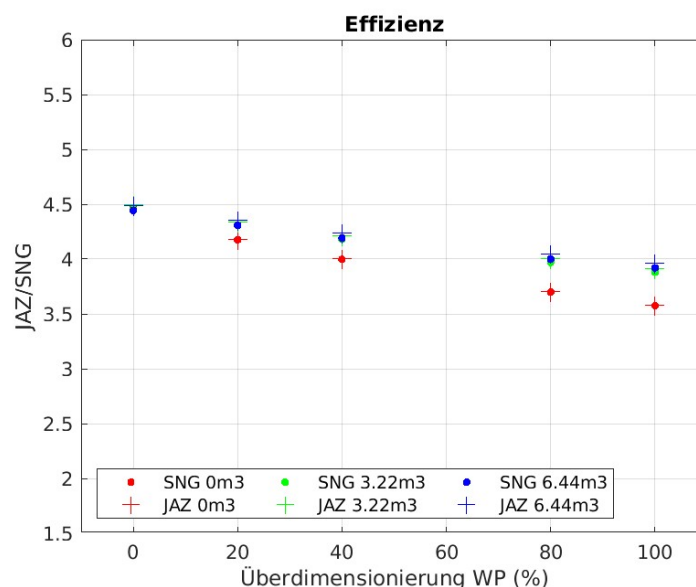


Abbildung 70: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit konstanter Auslegung des EWS-Feldes

Abbildung 70 zeigt den Fall des konstanten Erdwärmesondenfeldes, welches durch die Überdimensionierung der WP effektiv unterdimensioniert ist. Dies zeigt sich in einem Absinken der JAZ und des SNG mit steigender Überdimensionierung der Wärmepumpe bei gleichbleibender Sondenzahl, da das EWS-Feld mit zunehmender Überdimensionierung zu klein für die Entzugsleistung ausgelegt ist.

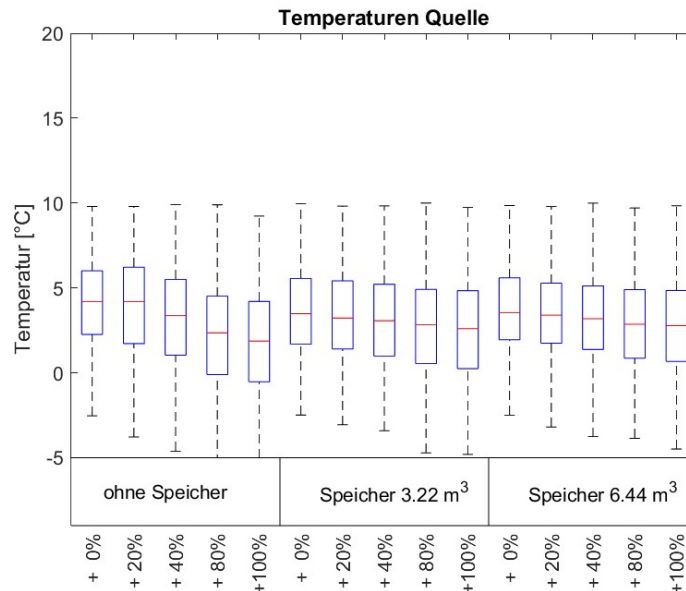


Abbildung 71: Quelltemperatur mit und ohne Speicherintegration für ein unterdimensioniertes EWS-Feld

Abbildung 71 zeigt die Quelltemperatur für das unterdimensionierte EWS-Feld. Man erkennt, dass mit zunehmender Belastung durch die steigenden Überdimensionierung der WP die Quelltemperatur absinkt. Dies korrespondiert zum Absinken der JAZ bzw. des SNG in Abbildung 70. Durch Speicherintegration kann das Absinken der Quelltemperatur leicht reduziert werden, was zu den besseren JAZ bzw. SNG in Abbildung 70 führt.

Mit Dimensionierung des Sondenfeldes auf eine höhere Wärmepumpenleistung (blaue Kästchen in Tabelle 18), jedoch gleichbleibendem Wärmeenergieentzug in allen Überdimensionierungsvarianten ergibt sich eine leicht ansteigende Sondenanzahl (Faktor 1.5 bei 100% Überdimensionierung). Damit kann die Quelltemperatur und damit auch die JAZ bzw. der SNG über alle Überdimensionierungsvarianten relativ konstant gehalten werden, wenn genügend Speicherkapazität installiert ist, wie Abbildung 72 zeigt.

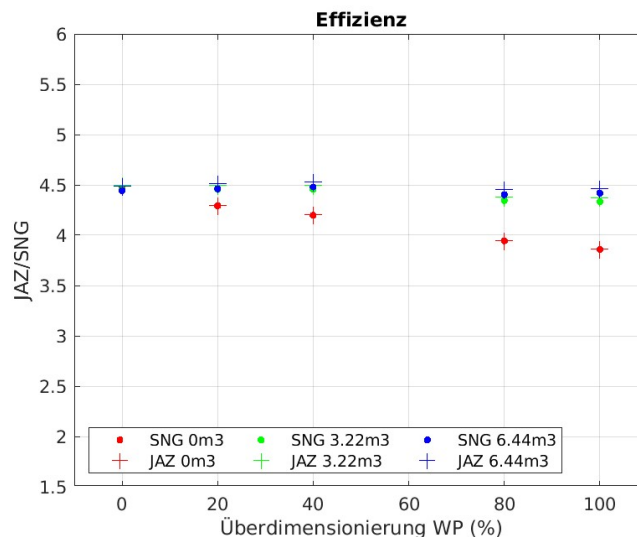


Abbildung 72: JAZ und SNG bei leicht zunehmender Sondenanzahl.

Zwei Verdichter mit fester Drehzahl

Abbildung 73 zeigt die JAZ und den SNG einer WP mit zwei Verdichtern bzw. WP-Kaskade aus zwei gleichen WP, die jeweils die Hälfte der Auslegungsleistung der WP bereitstellen.

Somit wird bei korrekter Dimensionierung bei Betrieb mit zwei Verdichtern gerade die Auslegungsleistung erreicht. Bei Überdimensionierung erhöht bzw. bei 100% Überdimensionierung verdoppelt sich die Auslegungsleistung. Diese Kaskadierung von zwei Verdichtern mit halber Leistung steigert die JAZ und den SNG. Dies ist auf eine höhere Quelltemperatur zurückzuführen, da bei Betrieb eines Verdichters mit halber Auslegungsleistung das EWS-Feld mit einer geringeren Entzugsleistung belastet wird, so dass sich auch ohne Überdimensionierung bessere Quelltemperaturverhältnisse ergeben.

Durch die längeren Betriebszeiten bei den geringeren Leistungen werden zudem die Stand-by Verluste reduziert und die Einschaltungen pro Verdichter sinken deutlich. Auch bei den zwei Verdichtern ergibt sich mit der Überdimensionierung ein Anstieg der Effizienz.

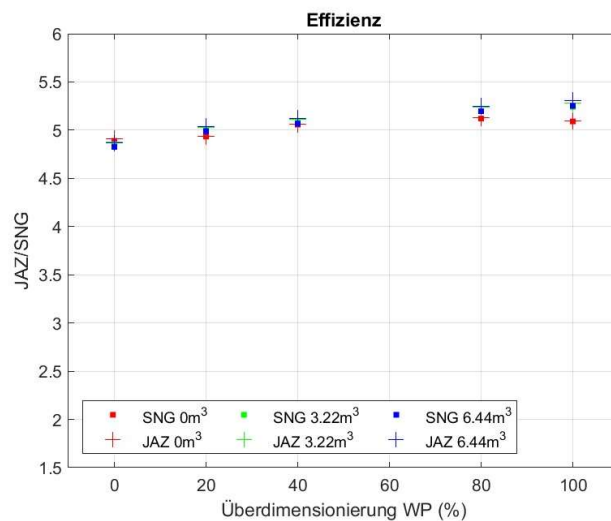


Abbildung 73: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit 2 Verdichtern.

Abbildung 74 zeigt den Temperaturhub bei zwei Verdichtern. Der Temperaturhub sinkt mit der Überdimensionierung, da die Quelltemperatur durch die Überdimensionierung des EWS-Feldes ebenfalls steigt. Mit integriertem Speicher sinkt der Temperaturhub noch stärker, was zu einem besseren SNG führt.

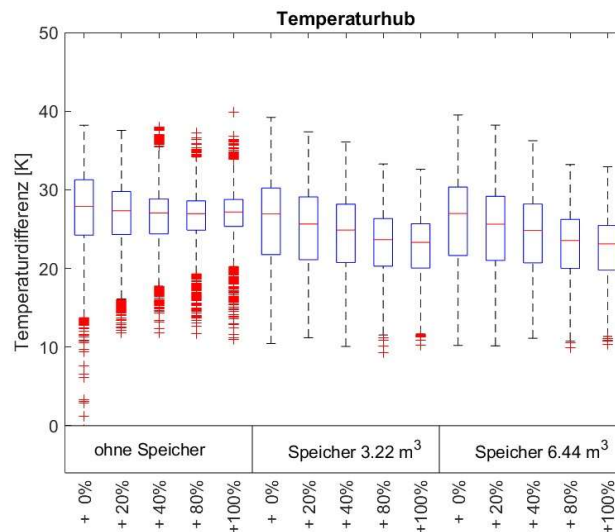


Abbildung 74: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senktemperatur mit und ohne Speicherintegration.

Zu der hohen Effizienz im Bereich über 5 ist anzumerken, dass das Kennfeld speziell auf Niederhubanwendungen ausgelegt ist und daher hohe Werte der JAZ bzw. SNG erreicht werden.

Abbildung 75 zeigt das Leistungsdiagramm und die Betriebspunkte. Bei der korrekt dimensionierten Anlage sind zwei Verdichter in Betrieb, während bei 100% Überdimensionierung nur noch ein Verdichter läuft. Aufgrund der kleineren Leistung von einem Verdichter bei korrekter Dimensionierung steigt die Laufzeit. Die Starts der einzelnen Verdichter sind geringer, aber die gesamten Starts von den beiden Verdichtern (dargestellter Wert x 2) liegen über dem überdimensionierten Fall, in dem nur ein Verdichter läuft.

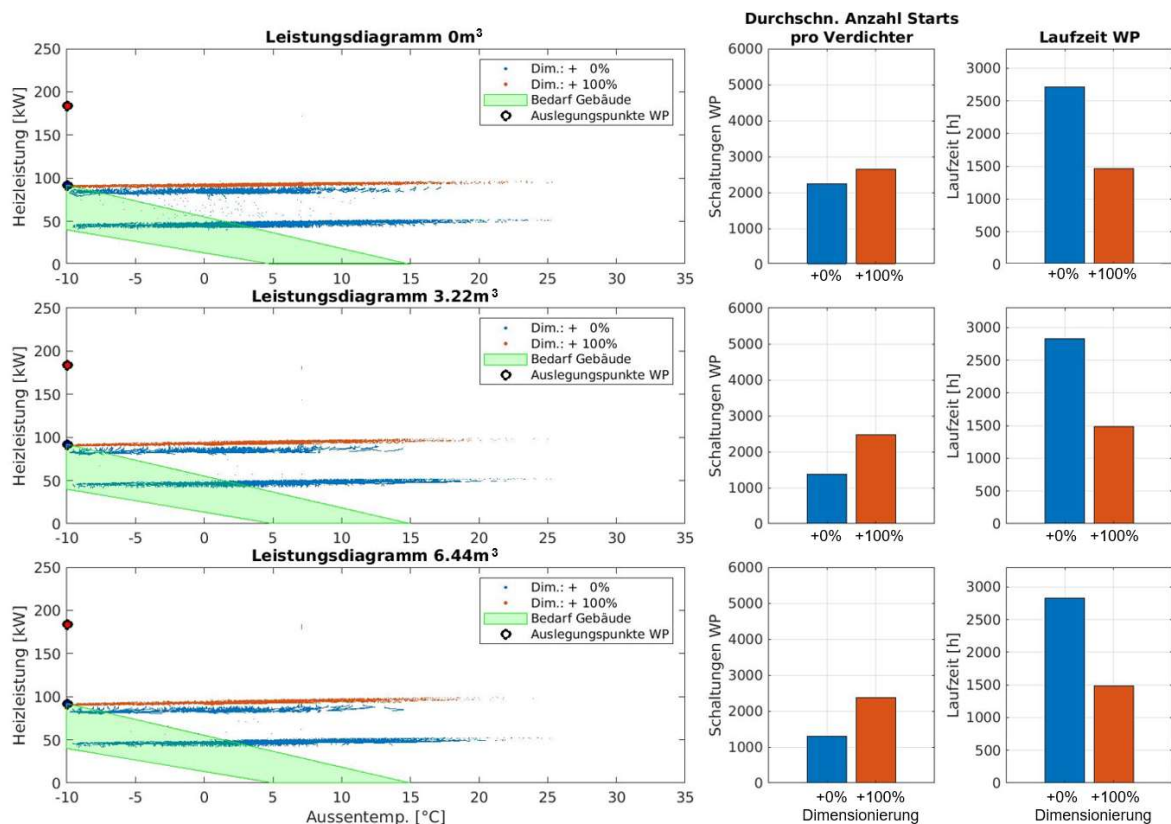


Abbildung 75: Leistungsdiagramm der WP mit zwei Verdichtern.

Dieses Verhalten ist in Abbildung 76 anhand der anteiligen Verdichterlaufzeiten bei zwei Verdichtern dargestellt. Es wird deutlich, dass bei korrekter Auslegung die Zeiten, in denen zwei Verdichter in Betrieb sind, auf ca. 20% der gesamten Verdichterlaufzeit begrenzt sind, also in ca. 80% der Betriebszeit nur die halbe oder sogar weniger Leistung der WP benötigt wird, was günstige Bedingungen für die Belastung des EWS-Feldes sind. Weiterhin besteht in diesen Betriebspunkten auch eine technische Redundanz durch die zwei Verdichter, die wechselseitig eingesetzt werden können, was die Lebensdauer erhöht. Dies ist vor allem auch der Fall für die 100% überdimensionierte WP, bei der über den gesamten Betriebsbereich faktisch nur ein Verdichter in Betrieb ist, da dieser schon genug Leistung bereitstellt, um die Gebäudebelastung zu decken.

Es ist allerdings anzumerken, dass die Regelung einer kaskadierten WP nicht trivial ist und deutlich komplexer als bei einer Anlage mit einem Verdichter sein kann, siehe auch Montero et al. [15]. Eine Speicherintegration ändert in diesem Fall nichts an den anteiligen Laufzeiten.

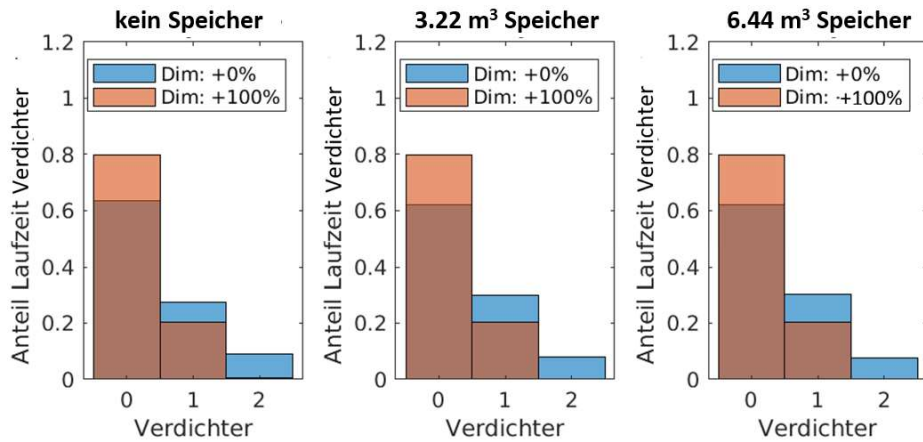


Abbildung 76: Verdichterlaufzeiten bei 2 Verdichtern.

Vier Verdichter mit fester Drehzahl

Die Verhältnisse gestalten sich noch günstiger, wenn die Gesamtleistung auf vier Verdichter verteilt wird und damit bei korrekter Dimensionierung die Leistung bis auf 25% reduziert werden kann. Dies zeigt sich in einer weiter steigenden Effizienz in Abbildung 77 auf Maximalwerte einer JAZ/SNG bis 5.5, was zum etwas niedrigeren Temperaturhub in Abbildung 78 korrespondiert.

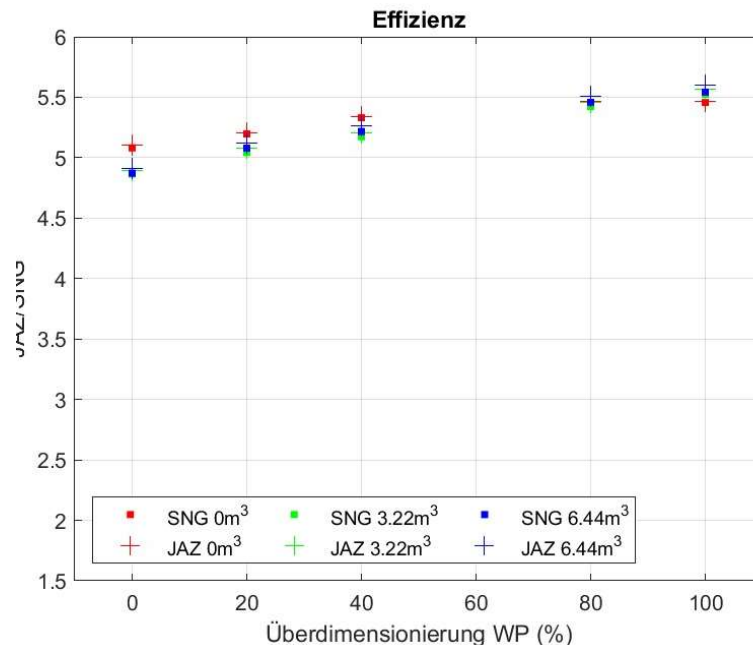


Abbildung 77: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit 4 Verdichtern

Durch die noch kleinere Leistung wird das EWS-Feld nochmal weniger belastet als bei einer WP mit einem Verdichter, der immer die 100% Quellenleistung bezieht, was wiederum Auswirkungen auf die Quellentemperatur hat.

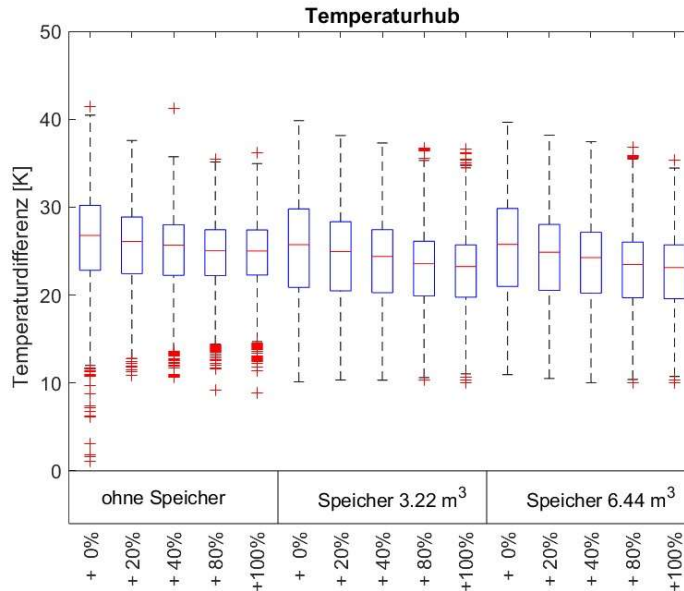


Abbildung 78: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senktemperatur der WP mit 4 Verdichtern mit und ohne Speicherintegration.

In Abbildung 79 zeigt sich anhand der Betriebspunkte im Leistungsdiagramm, dass effektiv bei korrekter Dimensionierung deutlich kleinere Leistungen möglich sind, die auch schon bei kälteren Aussentemperaturen auftreten (blaue Punkte).

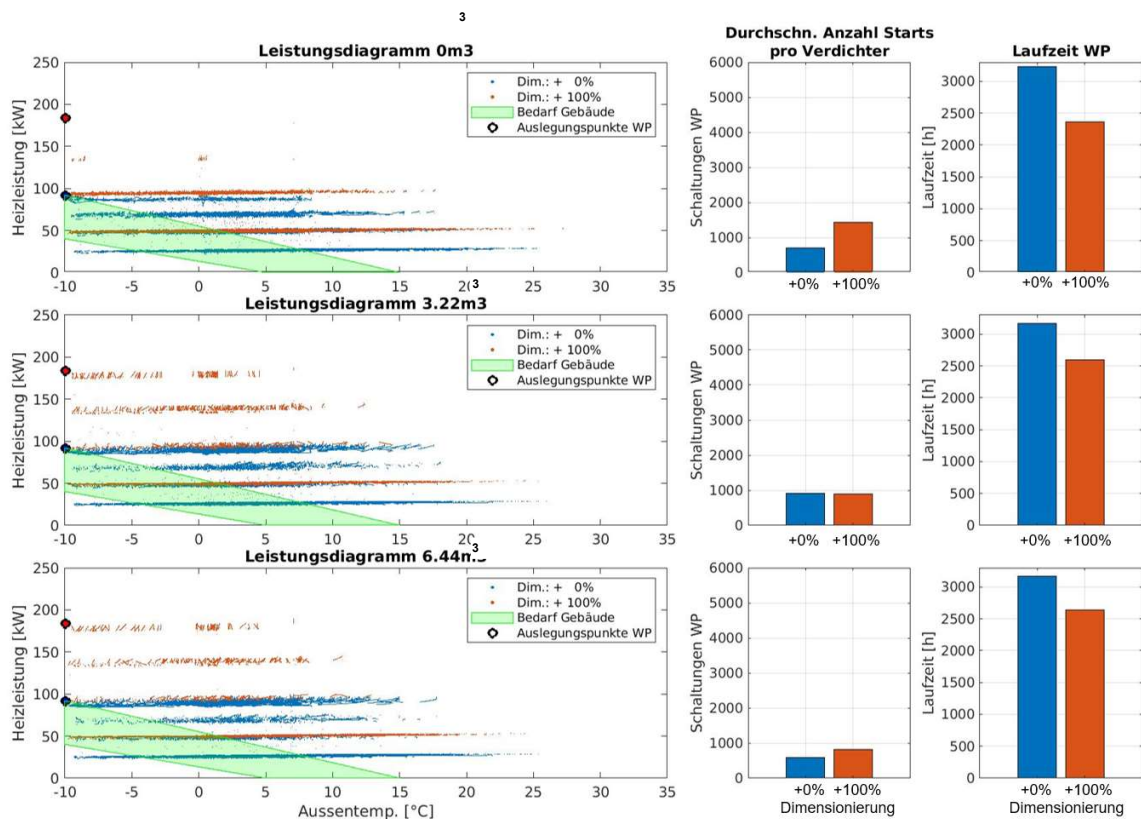


Abbildung 79: Leistungsdiagramm der WP mit 4 Verdichtern.



Insbesondere können durch die Aufteilung auf vier Verdichter auch im überdimensionierten Fall kleinere Leistungen bereitgestellt werden, was wiederum die steigende JAZ/SNG bei Überdimensionierung erklärt. Andererseits kann sich die Regelung entsprechend noch komplexer gestalten. Effektiv kommen aber ohne Speicher nur zwei Verdichter zum Einsatz, wie an den Betriebspunkten zu erkennen ist, weil wiederum bereits mit der Hälfte der verfügbaren Verdichter die Heizlast des Gebäudes bereitgestellt werden kann. Auch hier besteht also technische Redundanz. Durch die kleineren Leistungen erhöhen sich die Laufzeiten nochmals etwas, während die Anzahl Verdichterstarts (Multiplikation mit vier) recht ähnlich zum Fall mit zwei Verdichtern liegen. Wie schon im Fall mit zwei Verdichtern werden insgesamt die einzelnen Verdichter aber deutlich weniger ein- und ausgeschaltet.

Bei Speicherintegration zeigen die orangenen Betriebspunkte allerdings auch einen häufigeren Betrieb aller 4 Verdichter, der Speicher kann also mit höheren Leistungen geladen werden. Dies wird in Abbildung 80, die die anteiligen Laufzeiten der 4 Verdichter zeigt, noch deutlicher. Ohne Speicher gehen aufgrund der geringeren Kapazität bei Radiatorheizung die anteiligen Laufzeiten sukzessive zurück, wobei 1 Verdichter mit ca. 20% anteiliger Laufzeit den längsten Betrieb aufweist und entsprechend alle 4 Verdichter nur während ca. 5% der Laufzeit in Betrieb sind. Bei höherer Kapazität mit integriertem Speicher kann der Speicher auch mit höherer Leistung geladen werden, so dass die 4 Verdichter häufiger in Betrieb sind. Bei Überdimensionierung ist gut erkennbar, dass ohne Speicher jeweils nur max. 2 Verdichter laufen. Bei integriertem Speicher treten auch geringe Laufzeiten mit 3 Verdichtern auf, die meiste Zeit läuft jedoch wie im Fall ohne Speicher nur ein Verdichter.

Ein ähnliches Verhalten würde sich auch bei höherer Kapazität im Heizsystem einstellen, etwa bei Fussbodenheizung. Anzumerken ist aber auch hier, dass das Schaltverhalten in erster Linie von der implementierten Regelung abhängt, sich entsprechend also auch anders gestalten kann.

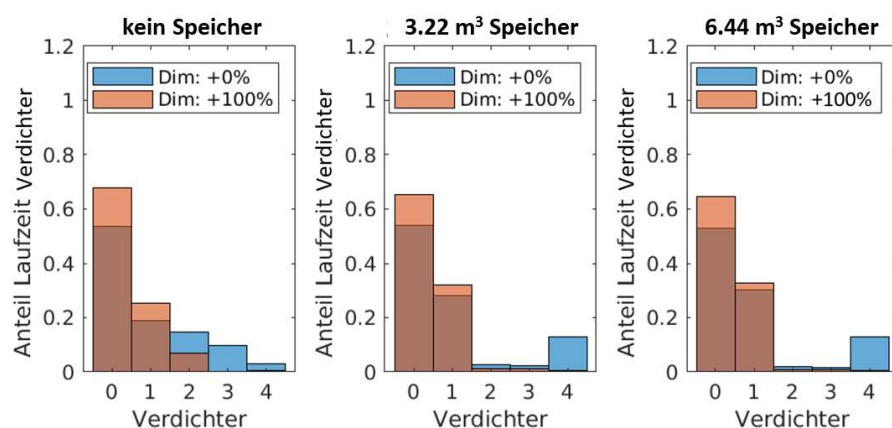


Abbildung 80: Verdichterlaufzeiten der WP mit 4 Verdichtern.

Zusammenfassend schafft eine Aufteilung der Leistung auf mehrere Verdichter bzw. Kaskadierung von WPs bessere Betriebsbedingungen und in Grenzen kann auch eine Überdimensionierung entschärft werden. Je mehr die Gesamtleistung auf unterschiedliche Verdichter auf-

geteilt werden kann, desto besser wird die Anpassungsmöglichkeit an den aktuellen Leistungsbedarf und die Regelungsmöglichkeit, was das Betriebsverhalten auch bei Überdimensionierung verbessern kann. Zusätzlich entsteht durch die überwiegende Laufzeit mit niedriger Verdichterzahl noch eine technische Redundanz, was die Lebensdauer und Verfügbarkeit der Anlage positiv beeinflusst. Dies zeigt sich in verbesserter Effizienz. Erkauft werden die Vorzüge durch eine allfällig höhere Komplexität der Anlage und höhere Kosten.

4.2.2 Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Inverter

Ein Verdichter mit Inverter

Die invertergeregelterte Wärmepumpe stellt die Grundlage für die im Projekt eingesetzten PM dar, da die PM mit fester Drehzahl aus dem leistungsgeregelten Kennfeld bei festgesetzter Drehzahl erstellt worden sind. Das volle Inverterkennfeld hat dabei die Vorteile, dass bei Teillast durch die Drehzahlregelung bessere COP-Werte als bei fester Drehzahl erzielt werden können, was allerdings auch von der konkreten PM für COP- und Leistung abhängt, siehe auch die Auswertung der Luft-/Wasser-WP in Kap. 4.2.3. Ein typischer Regelbereich einer Inverterregelung reicht von Vollast bei 100% bis ca. 30% Teillast, so dass die WP ohne Ein-/Aus Betrieb und damit ohne Taktverluste die Leistung in einem weiten Leistungsbereich an den Gebäudebedarf angepasst werden kann. Unterhalb des Regelbereichs verhält sich die Inverter-WP dann wie eine Ein-/Aus geregelte WP. Der Inverter verursacht jedoch auch einen gewissen Verlust durch die Leistungselektronik (Frequenzumrichter), der aber durch die besseren Betriebsbedingungen überkompensiert werden kann. Weiterhin bietet der Inverter auch für das Anfahren Vorteile, die in dieser Bewertung nicht berücksichtigt wurden.

Daraus ergibt sich für eine Überdimensionierung allerdings das Problem, dass z.B. bei 50% Überdimensionierung für die korrekte Leistung mit dem Inverter schon auf 67% abgeregelt werden muss, was den Regelbereich einschränkt.

So kann ein Teil des Vorteils des Inverters nicht genutzt werden. Je höher die Überdimensionierung, umso mehr wird das günstige Betriebsverhalten im Regelbereich des Inverters "übersprungen", so dass im Extremfall bei hoher Überdimensionierung direkt auf einen Taktbetrieb an der Grenze des Regelbereichs gewechselt werden muss.

Je nach PM des COP kann dadurch sogar ein ineffizienterer Betrieb als mit einer Ein-/Aus-Regelung mit besserer PM entstehen. Dies hängt auch von der Leistungscharakteristik der WP ab, die ebenfalls einen Einfluss darauf hat, wie schnell niedrige Teillastzustände erreicht werden.

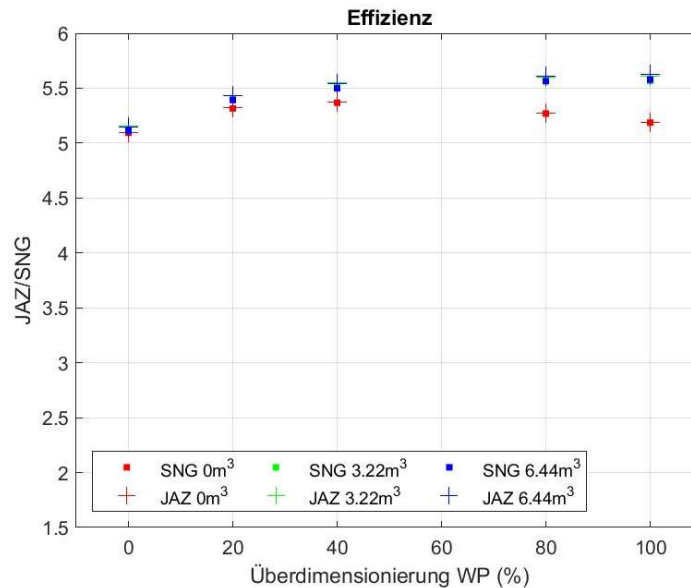


Abbildung 81: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit Inverterregelung

Kritisch sind steile Leistungskennlinien, wie sie für Luft/Wasser (L/W)-WP charakteristisch sind, siehe auch Kap. 4.2.3. Ein Inverter kann daher auch nur begrenzt die Probleme einer Überdimensionierung entschärfen. Prinzipiell stellt die Inverterregelung von den untersuchten WP-Konfigurationen die beste Regelmöglichkeit und das beste Anpassungsverhalten an den Leistungsbedarf dar, welches aber mit Überdimensionierung wieder abnimmt.

Abbildung 81 zeigt die Effizienz, die dem Fall mit 4 Verdichtern ähnelt, da sich der Regelmöglichkeiten in einer ähnlichen Bandbreite von 100% bis hinunter zu 30% bewegt. Allerdings lassen sich im Vergleich zur WP mit mehreren Verdichtern auch noch Vorteile der PM der COP bei reduzierten Drehzahlen nutzen.

Die Abnahme der Effizienz bei höherer Überdimensionierung von 80%-100% zeigt schon den Effekt des "Überspringens" des Regelbereichs und einem verstärkten Ein-/Aus-Betrieb, der die Effizienz wieder sinken lässt, ähnlich dem Verhalten bei Ein-/Aus-Regelung in Abbildung 63. Dies zeigt sich auch in Abbildung 82 am leichten Anstieg des Temperaturhubs.

Bei integriertem Speicher hingegen kann mit höherer Leistung geladen werden, ohne dass die Temperatur überhört wird, so dass die Effizienz bei Speicherintegration nicht einbricht und der Temperaturhub kontinuierlich mit der Überdimensionierung abnimmt. Im Teillastbetrieb, wenn ausreichend Ladezeit für den Speicher zur Verfügung steht, kann daher die Ladung auf die Leistung/Drehzahl optimiert werden, bei der der beste COP erreicht wird, was jedoch eine entsprechend optimierte Regelung erfordert und wiederum die Komplexität erhöht.

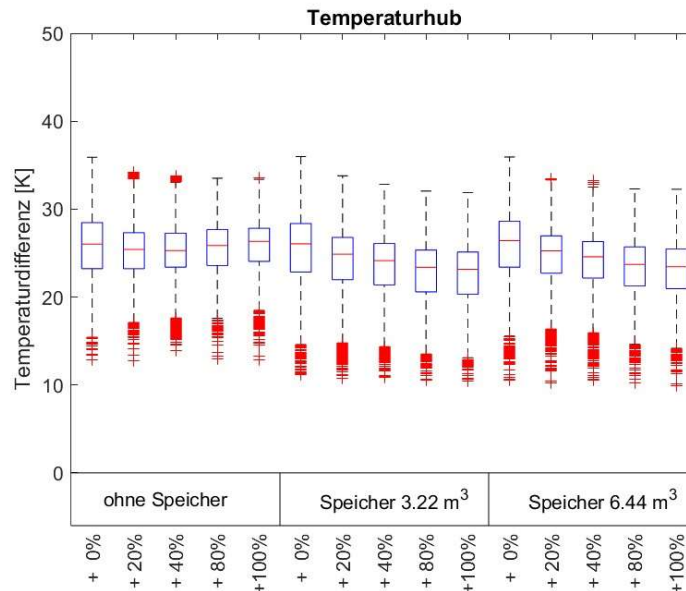


Abbildung 82: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur der WP mit Inverterregelung mit und ohne Speicherintegration

Die grundlegenden Eigenschaften und die Problematik bei Überdimensionierung zeigt sich auch deutlich im Leistungsdiagramm und an den Verdichterstarts in Abbildung 83. Bei korrekter Dimensionierung der blauen Betriebspunkte kann die Inverterregelung in einem Bereich bis zu einer Aussentemperatur von etwa 7 °C die Leistung regeln. Oberhalb taktet die Wärmepumpe an der Leistungsgrenze mit 30%.

Durch die kontinuierliche Leistungsregelung sinkt die Anzahl an Verdichterstarts, da das Takten erst spät einsetzt. Die Laufzeit steigt durch den kontinuierlichen Betrieb bei variabler Leistung. Im Fall einer Überdimensionierung der orangenen Betriebspunkte kann die Inverterregelung dem Leistungsbedarf des Gebäudes nur bis zu einer Aussentemperatur von ca. -1 °C folgen, und beginnt bereits dann den Taktbetrieb, der Regelbereich wird also durch die Überdimensionierung bereits deutlich reduziert. Dadurch erhöht sich die Anzahl Verdichterstarts massiv, was durch eine Speicherintegration aufgrund der höheren Kapazität zum Teil wieder abgefangen werden kann. Die korrekt ausgelegte Wärmepumpe zeigt aber deutlich weniger Starts bis zu fast kontinuierlichem Betrieb mit einer ausreichend hohen Kapazität.

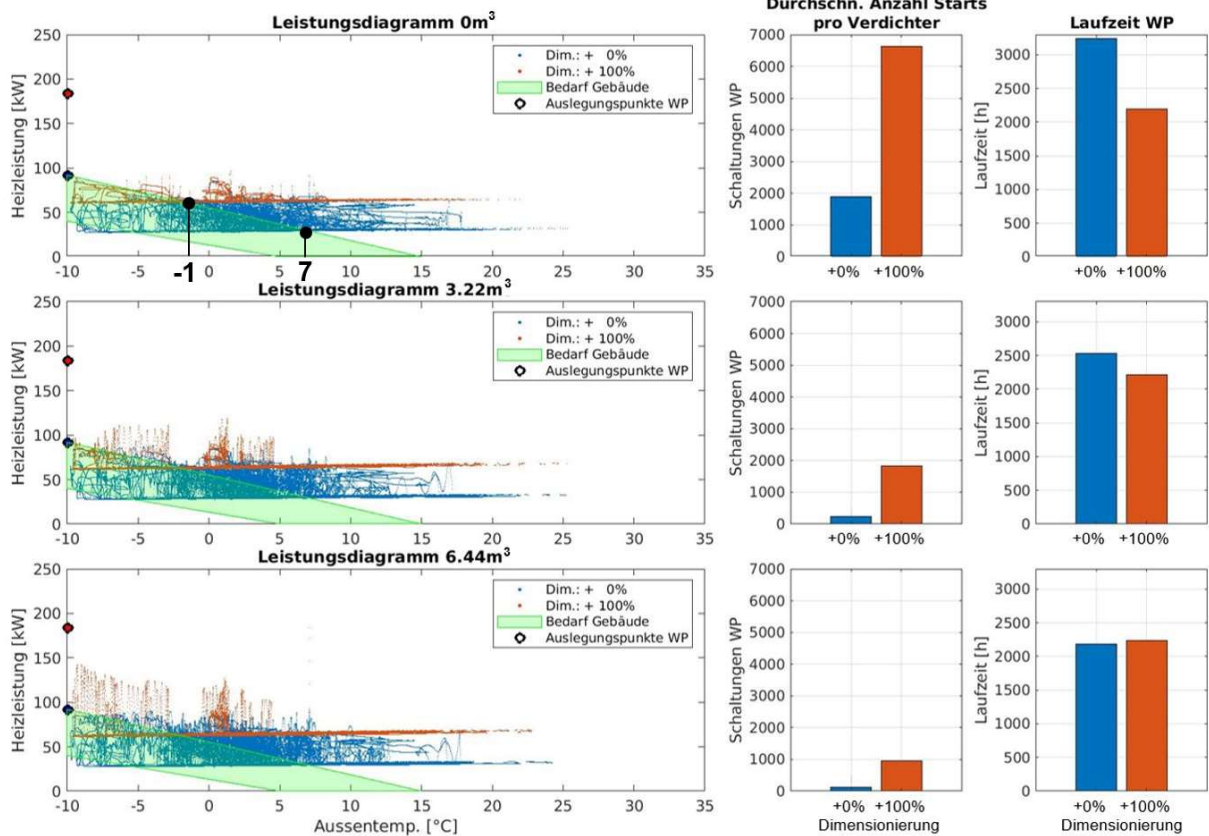


Abbildung 83: Leistungsdiagramm der WP mit einem Invertergeregelten Verdichter

Zwei Verdichter mit Inverter

Durch eine Kaskadierung von WP's mit Inverterregelung kann der Regelbereich fast auf den gesamten Leistungsbereich ausgeweitet werden und damit die Aussen-temperaturen, bei denen ein Taktbetrieb beginnt, mit korrekter Dimensionierung Richtung Heizgrenze bzw. auch bei Überdimensionierung zu höheren Temperaturen verschoben werden. So reagiert diese WP-Konfiguration am robustesten auf eine Überdimensionierung. Der vergrößerte Bereich mit Inverterregelung und damit die verbesserte Nutzung der Effizienzpotentiale der PM wirkt sich auch positiv auf die Effizienz aus, wie in Abbildung 84 dargestellt ist.

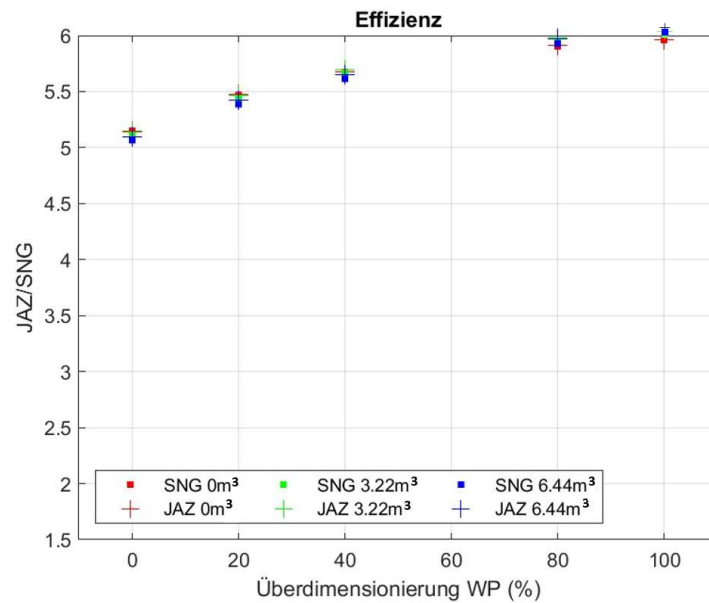


Abbildung 84: Entwicklung JAZ/SNG der WP mit 2 Verdichtern mit Inverterregelung.

Die WP-Konfiguration mit 2 Invertern erreicht die höchsten JAZ/SNG auch ohne Speicherintegration aufgrund der guten Möglichkeiten zur Leistungsanpassung und einen niedrigen Temperaturhub, wie in Abbildung 85 dargestellt ist. Der niedrige Temperaturhub auch ohne Speicherintegration ergibt sich, da die Leistung fast über den gesamten Betriebsbereich an die Gebäudelast angepasst werden kann, so dass sich keine Erhöhung der Senkentemperatur ergibt und durch die geringe Entzugsleistung aus dem EWS-Feld eine hohe Quellentemperatur resultiert.

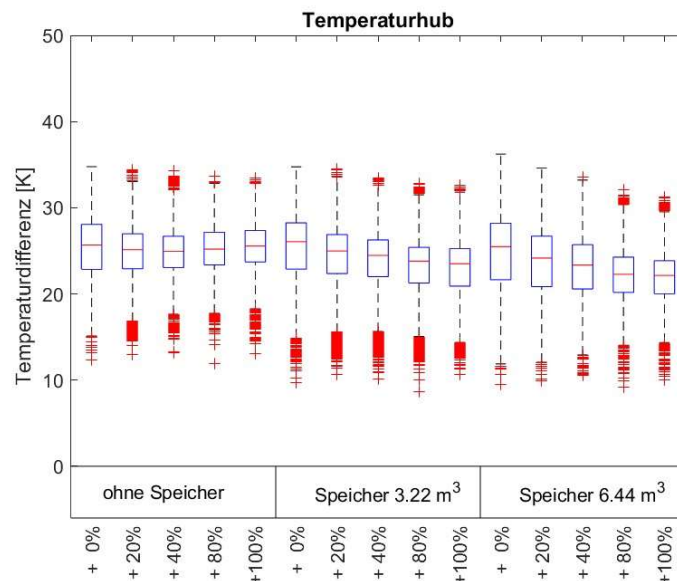


Abbildung 85: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur der WP mit 2 Inverter-geregelten Verdichtern mit und ohne Speicherintegration



Abbildung 86 bestätigt, dass die Verdichterstarts gegenüber einem invertergeregelten Verdichter nochmals reduziert sind, und mit Speicherintegration sehr stark reduziert werden können, so dass die Verdichter annähernd durchlaufen können.

Auch bei Überdimensionierung kann die Anzahl an Verdichterstarts stark reduziert werden. Aus den orangenen Betriebspunkten zeigt sich, dass der Regelbereich der Inverterregelung noch bis ca. 6 °C Aussentemperatur reicht, während sich der Bereich bei korrekter Dimensionierung bis zur Aussentemperatur von ca. 10 °C und damit über fast den gesamten Betriebsbereich erstreckt.

Zusammenfassend bietet der Inverter die beste Effizienz und das beste Regelverhalten, welche allerdings bei Überdimensionierung stark eingeschränkt werden können, da bei 100% Überdimensionierung nur noch der Regelbereich von 50 – 30% zur Verfügung steht. Dadurch wird allfällig auch auf Effizienzpotenziale der PM des COP bei Invertern verzichtet, so dass die Effizienz deutlich sinken kann, siehe Kap. 4.2.3 bei Luft-Wasser WP. Eine Kaskadierung von Inverter-WP's kann den Regelbereich auch bei Überdimensionierung deutlich erweitern. Eine Speicherintegration ermöglicht in Grenzen einen Betrieb mit höherer Leistung, was die Effizienz und die Lebensdauer verbessert.

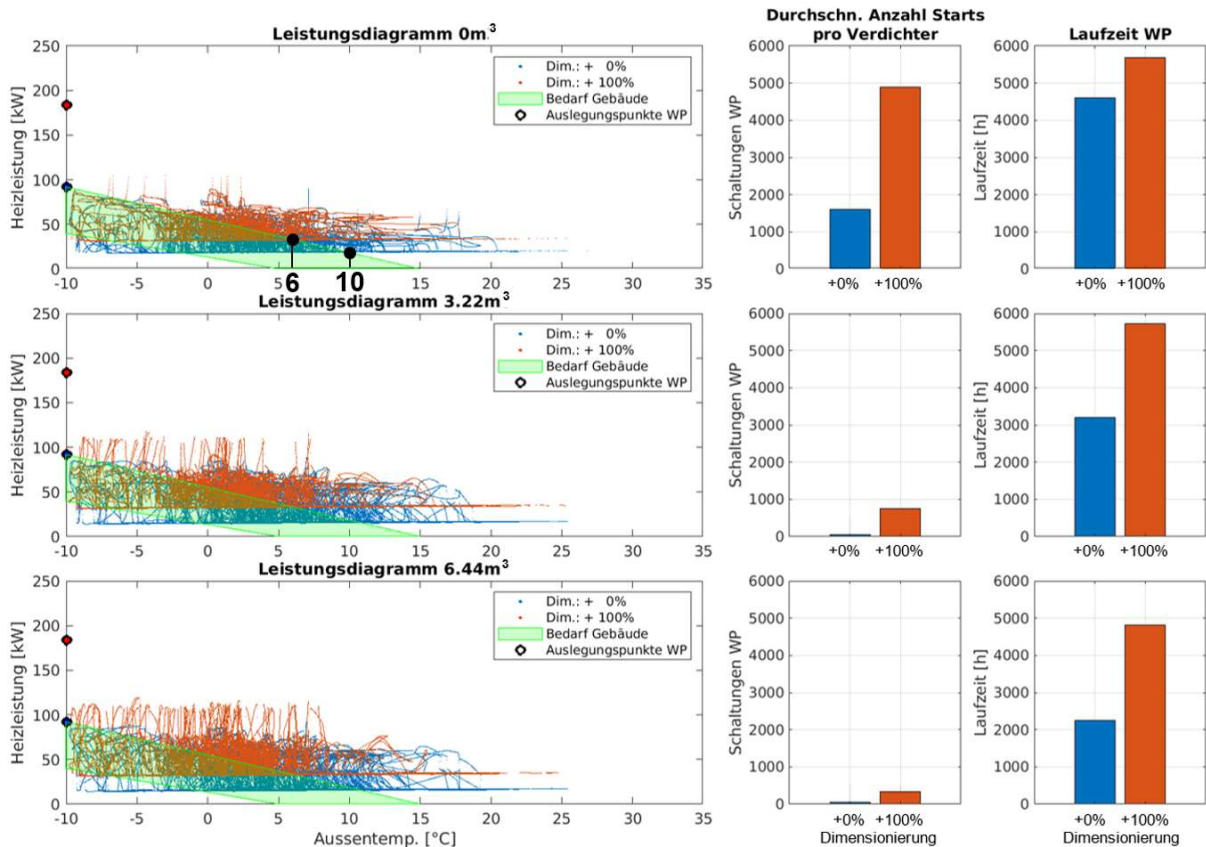


Abbildung 86: Leistungsdiagramm der WP mit 2 Invertergeregelten Verdichtern

4.2.3 Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die Auswirkungen einer Überdimensionierung bei Luft-Wasser WP (L/W-WP) werden anhand von zwei unterschiedlichen Inverter-geregelten L/W-WP demonstriert, deren PM unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die Eigenschaften der PM des COP sind in Abbildung 87 dargestellt.

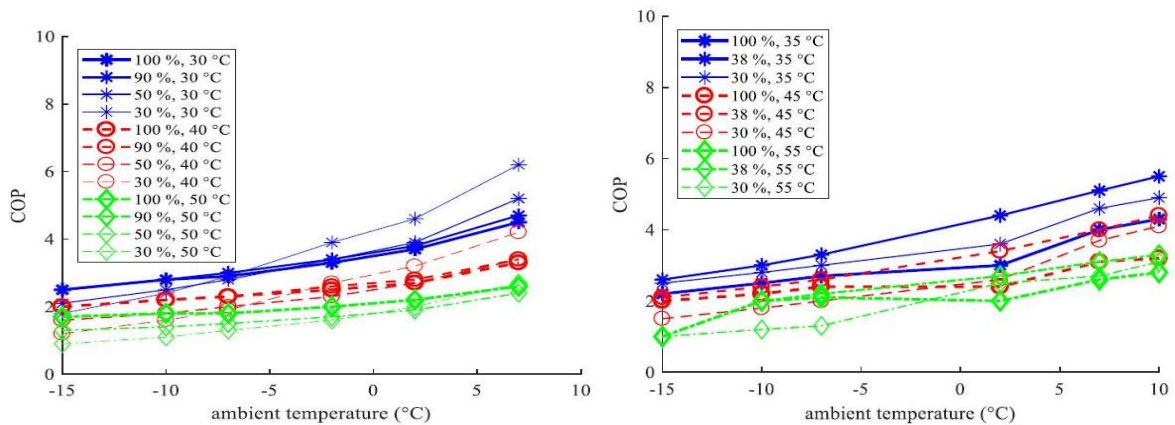


Abbildung 87: Kennfelder der Luft-Wasser-Wärmepumpen: WP1 (steile Leistungskennlinie, max. COP bei 30%) und WP2 (flache Kennlinie, max. COP-Werte um 50%).

WP1: L/W-Wärmepumpe mit Inverter

Abbildung 88 zeigt die Effizienz der Luft-Wasser WP1.

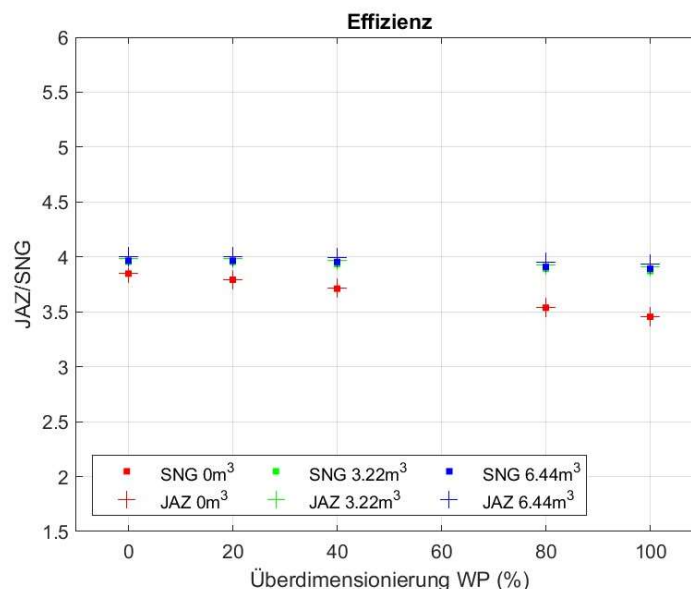


Abbildung 88: Entwicklung JAZ/SNG der L/W-WP1 mit Inverterregelung

Im Gegensatz zu erdgekoppelten Wärmepumpen gibt es bei L/W-WP keine ausgeprägte Verbesserung der Quellenbedingungen mit Überdimensionierung, so dass eine Überdimensionierung auf 100% die JAZ um 0.5 Punkte vermindert. Im Fall der WP1 wird der Abfall der



JAZ durch die gute Performance bei 30% abgemildert, sonst wäre die Auswirkung der Überdimensionierung noch deutlich ausgeprägter.

Wird die 50% Kennlinie für den Taktbetrieb am Ende der Leistungsregelung zugrunde gelegt, würde die JAZ sogar deutlich abfallen und weit unter der korrekten Dimensionierung liegen, siehe am Ende dieses Kapitels.

In Abbildung 89 ist der Temperaturhub dargestellt. Ohne integrierten Speicher steigt der Temperaturhub mit wachsender Überdimensionierung an, während der Temperaturhub über Speicherintegration konstant gehalten werden kann. Dies erklärt den Abfall der JAZ sowie den annähernd konstanten SNG in Abbildung 88. Die Steigerung des Temperaturhubs ohne Speicher beruht im Wesentlichen auf dem Anstieg der Senkentemperatur, da die Quelltemperatur von der Überdimensionierung bei L/W-WP nicht beeinflusst wird.

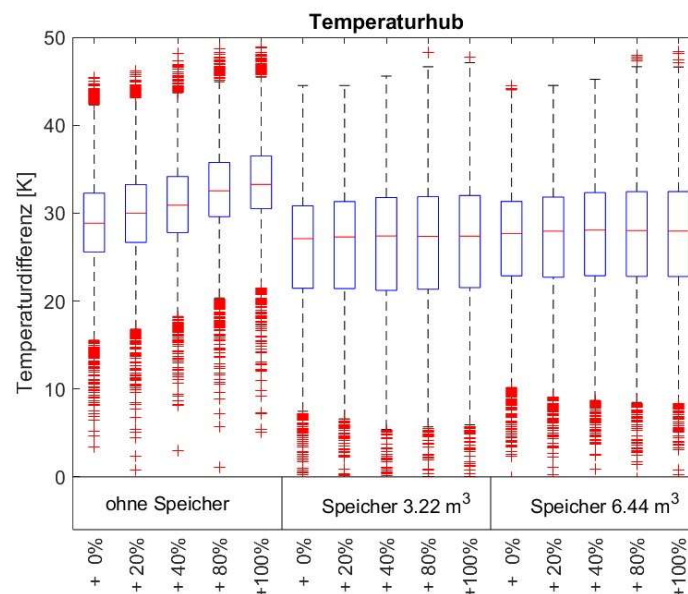


Abbildung 89: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur bei L/W WP1 mit und ohne Speicherintegration

Der Grund für den Anstieg wird aus dem Leistungsdiagramm in Abbildung 90 ersichtlich. Selbst bei korrekter Dimensionierung beginnt die WP1 schon ab einer Aussentemperatur von etwa 2 °C zu takten, bei Überdimensionierung schon ab ca. -5 °C, so dass die Inverterregelung nur bei sehr kalten Temperaturen in einem kleinen Temperaturbereich zum Tragen kommt. Die 100% überdimensionierte WP verhält sich also quasi wie eine Ein-Aus geregelte WP. Die gute JAZ ist hier nur aus dem guten COP bei 30% an der Grenze des Regelbereichs zu erklären. Durch die steile Kennlinie ist zudem die Leistungsdiskrepanz zwischen produzierter und nachgefragter Leistung besonders gross, so dass sich bei geringer Kapazität schnell eine Temperaturerhöhung einstellt, was die Senkentemperatur und den Temperaturhub erhöht.

Mit integriertem Speicher kann zwar die Leistungsregelung nicht verlängert werden, aber durch die höhere Kapazität gegenüber einer Decken- oder Radiatorheizung kann die Überladung begrenzt und dadurch der Leistungsüberschuss besser aufgenommen werden,

was den Temperaturhub annähernd konstant hält. Die Anzahl Verdichterstarts, insbesondere bei Überdimensionierung, kann deutlich gesenkt werden.

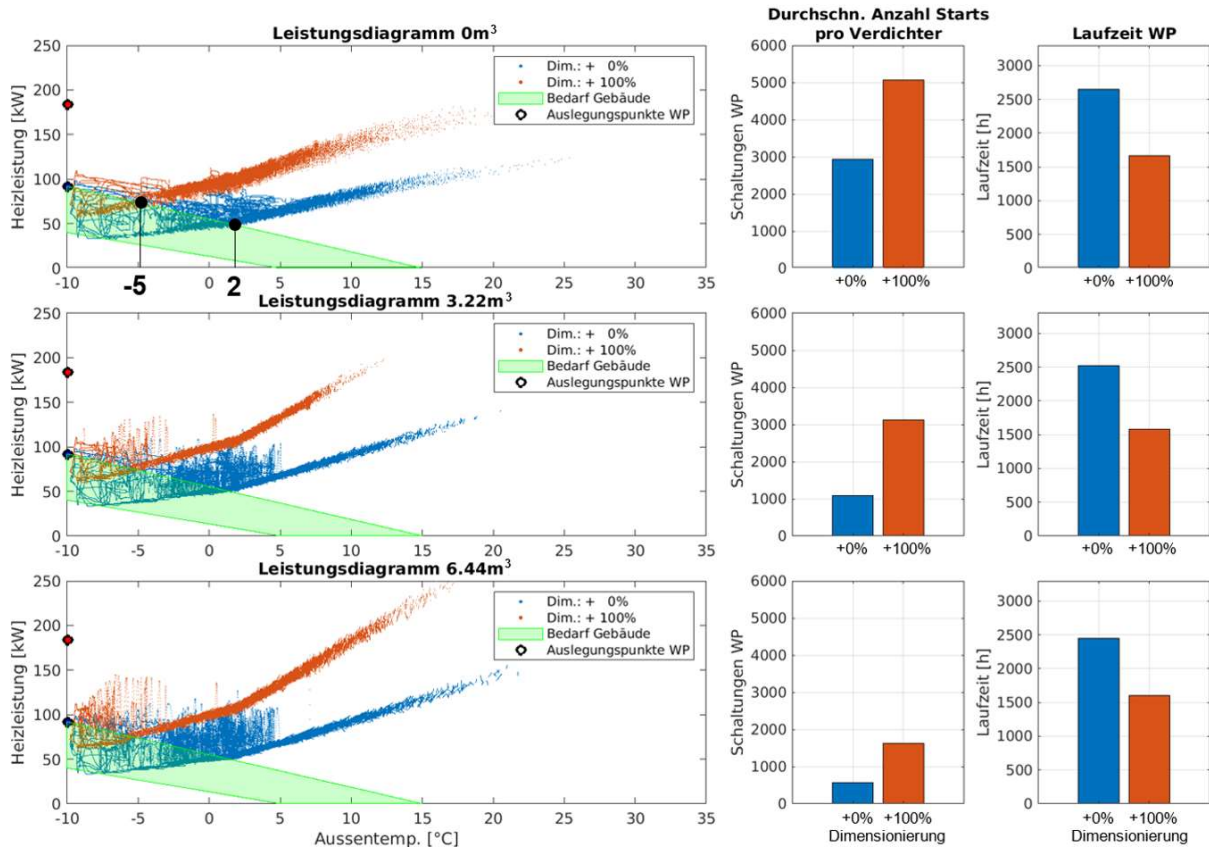


Abbildung 90: Leistungsdiagramm invertergeregelter WP1

Abschätzen des Einflusses der Überdimensionierung auf die Lebensdauer

Am Beispiel der invertergeregelter Luft-Wasser WP soll auch der Einfluss einer Überdimensionierung auf die Lebensdauer abgeschätzt werden. Dazu wird die Aussage des Industriepartners aus der Begleitgruppe zugrunde gelegt, dass ein Verdichterstart die Lebensdauer um mindestens 1 h reduziert. Ohne integrierten Speicher hat die korrekt dimensionierte WP1 3000 Einschaltungen, während die Überdimensionierung um 100% die Einschaltungen auf 5000 erhöht, dadurch, dass fast über den ganzen Betriebsbereich getaktet wird. Allerdings reduziert sich die Laufzeit durch die höhere Leistung von 2500 h auf 1500 h. Damit reduziert die Überdimensionierung die Lebensdauer um 1000 h/a, was bezogen auf die korrekt dimensionierte WP einen Anteil von 18.2%, also knapp 20% ausmacht. Da der Ansatz oben einen Mindestwert darstellt, kann die Auswirkung im Bereich von 20-40% liegen.

Bei Speicherintegration besteht die gleiche Diskrepanz von 2000 h zwischen der korrekt dimensionierten WP1 mit 1000 Einschaltungen und der überdimensionierten WP1 mit 3000 Einschaltungen. Die Speicherintegration senkt aber die Gesamtzahl der Einschaltungen deutlich ab, so dass die korrekt dimensionierte WP1 2000 Verdichterstarts weniger aufweist als ohne Speicher. Dies erhöht die Lebensdauer beider Varianten um 2000 h/a. Die Integration eines Heizungspufferspeichers ist also bei geringer Kapazität im Heizkreis insbesondere bei L-W-Wärmepumpe zu empfehlen.



WP2: L/W-Wärmepumpe mit Inverter

Abbildung 91 zeigt die Effizienz der L/W-WP2. Auch hier sinkt die JAZ bzw. der SNG bei Überdimensionierung ab, allerdings unterscheidet sich das Kennfeld der WP2 von der WP1.

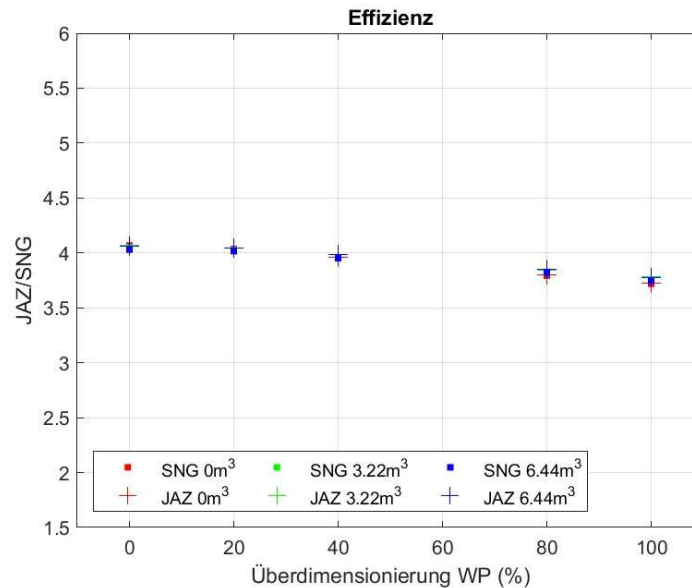


Abbildung 91: Entwicklung JAZ/SNG der L/W-WP2 mit Inverterregelung.

Die besten COP-Werte werden bei 40-50% Teillast erreicht, und der COP fällt zu kleineren Teillastzustände hin wieder ab. JAZ und SNG liegen praktisch übereinander, so dass mit der Speicherintegration keine Verbesserung der Effizienz erreicht wird.

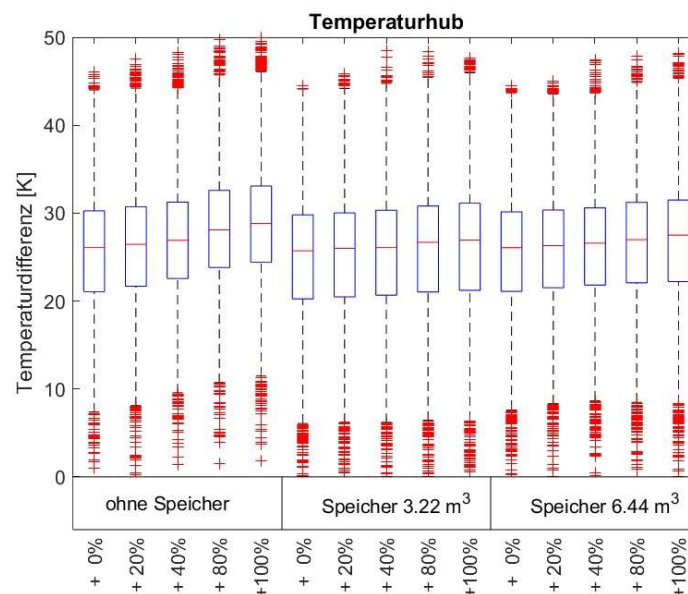


Abbildung 92: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur der invertergeregelten WP 2 mit und ohne Speicherintegration.

Der Temperaturhub in Abbildung 92 steigt damit mit steigendem Taktbetrieb bei Überdimensionierung an. Selbst bei Speicherintegration stellt sich ein Anstieg des Temperaturhubs ein, wodurch die JAZ und der SNG in Abbildung 91 quasi identisch sind.

Allerdings zeigt das Leistungsdiagramm in Abbildung 93, dass die Leistungskennlinien sowohl bei korrekter als auch bei 100% Überdimensionierung relativ flach verlaufen, und damit der Regelbereich der Inverterregelung bei korrekter Dimensionierung bis zur Aussentemperatur von ca. 7.5 °C, und selbst bei 100% Überdimensionierung noch bis ca. 2 °C reicht.

Dies begrenzt den Abfall von JAZ und des SNG, da der Taktbetrieb dadurch noch begrenzt wird. Durch den so reduzierten Taktbetrieb verhalten sich auch die Anzahl Verdichterstarts noch moderat und können mit Speicherintegration weiter abgesenkt werden.

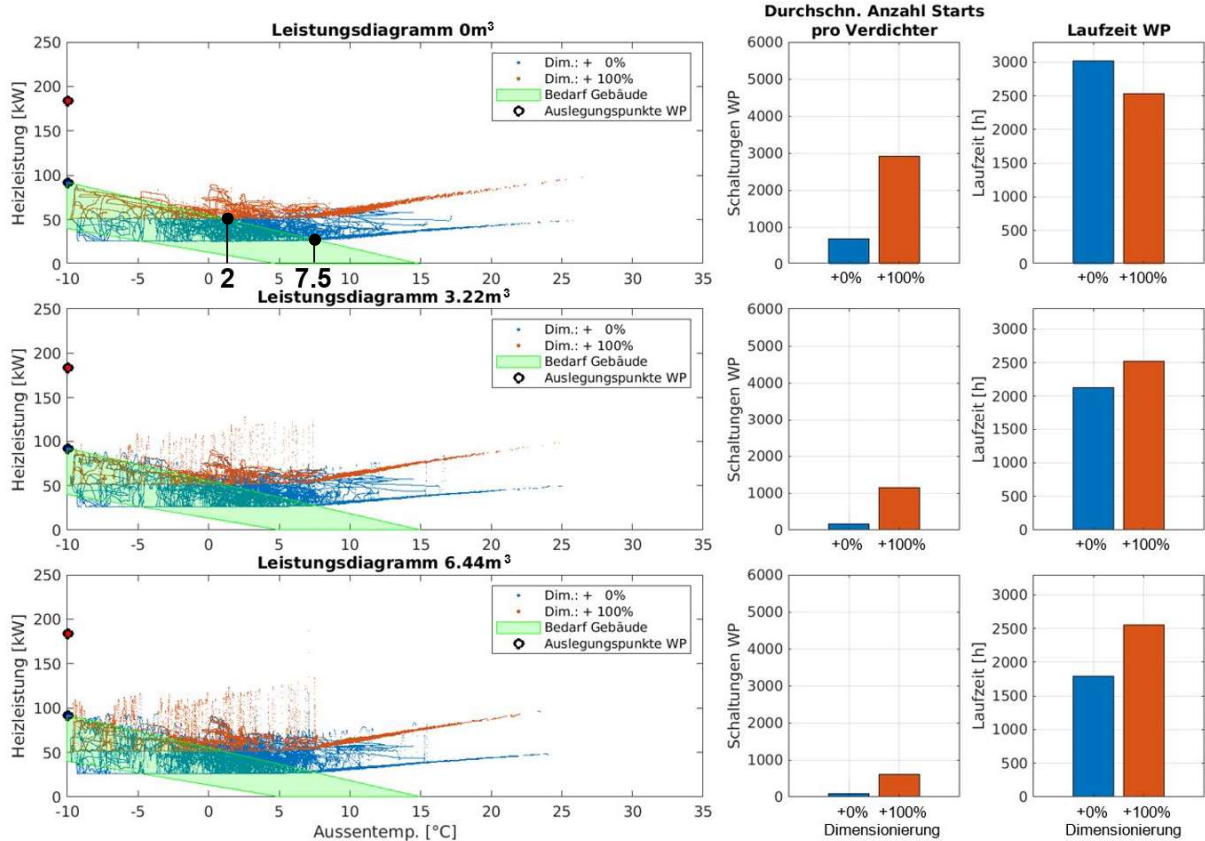


Abbildung 93: Leistungsdiagramm der WP2 L/W WP.

WP1 mit fester Drehzahl

Wird bei der WP1 die Drehzahlregelung eliminiert und die Kennlinie bei Netzfrequenz von 50 Hz als Kennlinie mit fester Drehzahl zugrunde gelegt, also auf die Vorteile der Leistungsregelung verzichtet, zeigen sich die Einschränkungen, die sich durch das "Überspringen" des Inverterbereichs ergeben.

In Abbildung 94 ist die Effizienz für den Fall mit fester Drehzahl dargestellt. Von der JAZ von 4 bei Inverterregelung fällt selbst bei korrekter Dimensionierung die JAZ auf 2.5.

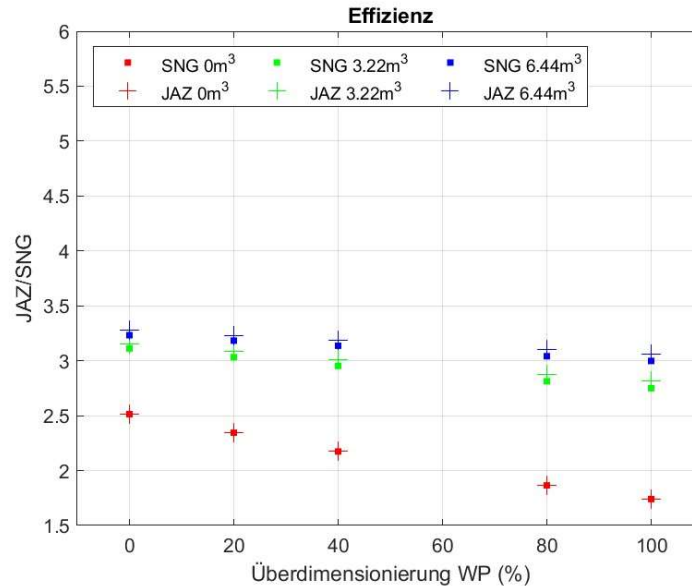


Abbildung 94: Jahresarbeitszahlen der L/W-WP mit fester Drehzahl bei 50 Hz.

Mit Speicherintegration kann der Anstieg des Temperaturhubs noch im Rahmen gehalten werden, wie in Abbildung 95 dargestellt ist, und der SNG liegt damit im Bereich von 3. Bei Überdimensionierung ohne Speicher steigt die Senkentemperatur und damit der Temperaturhub deutlich an, was die Effizienz unter eine JAZ von 2 abfallen lässt.

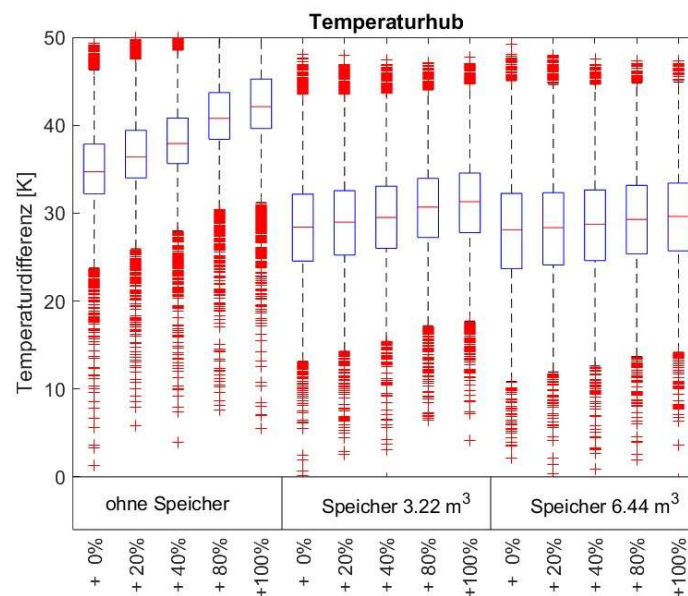


Abbildung 95: Temperaturhub zwischen Quellen- und Senkentemperatur der WP1 mit fiktiv fester Drehzahl bei 50 Hz mit und ohne Speicherintegration

Zusammenfassend zeigt sich damit, dass bei L/W-WP die Überdimensionierung technisch weit kritischer zu bewerten ist als bei erdgekoppelten WP, da die Quellentemperatur kaum von der Überdimensionierung beeinflusst wird und damit keine Kompensation der schädlichen Effekte der Überdimensionierung erfolgt.

Je nach Kennfeld können bei Inverterregelung der Abfall der JAZ bei guter Teillasteffizienz an der Grenze des Regelbereichs oder einer flachen Kennlinie, die den Regelbereich erweitert, noch moderat ausfallen.

Allerdings wird bei steiler Kennlinie besonders deutlich, dass schon bei korrekter Dimensionierung der Bereich mit Inverterregelung beschränkt ist und bereits im Bereich der meisten Heizstunden von -3 °C – 7 °C ein Taktbetrieb vorliegt. Mit wachsender Überdimensionierung schrumpft der Regelbereich des Inverters sehr schnell zusammen, so dass schon bei tiefen Temperaturen im Bereich von -5 °C ein Taktbetrieb einsetzt und damit fast vollständig auf die Vorteile der Inverterregelung verzichtet wird. Dies kann die Effizienz bei ungünstigen Kennfeldeigenschaften deutlich herabsetzen, wie der Vergleich von WP1 mit fester Drehzahl bei 50 Hz zeigt. Ohne die Kompensation der guten Teillasteffizienz bei 30% bricht die JAZ deutlich ein. Daher sollte bei L/W-Wärmepumpen eine Überdimensionierung aus Effizienzgründen auf jeden Fall vermieden werden und zum möglichst vollständigen Ausnutzen des Inverterregelbereichs die WP eher knapp dimensioniert werden.



4.3 Wirtschaftlichkeit

Um die Mehrkosten einer Überdimensionierung abzuschätzen, wurden die Anschaffungskosten für die wichtigsten Komponenten geschätzt. Als Beispiel dient das Forschungszentrum OST mit einer Heizleistung von 92 kW (0% Überdimensionierung). Abbildung 96 zeigt die geschätzten Investitionskosten für unterschiedlich stark überdimensionierte Wärmepumpensysteme. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hier dargestellten absoluten Kosten ohne Rabatte («Listenpreise») oder sonstige in der Realität auftretende Reduktionen dargestellt sind. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt auf der Preissteigerung durch Überdimensionierung bei den einzelnen Komponentenkategorien. Die Erdwärmesonden sind der grösste Kostenfaktor mit entsprechend grossem Einfluss auf die Mehrkosten bei einer Überdimensionierung. Hier steigen die Kosten überproportional durch den überproportionalen Anstieg der Sondenmeter, was auf sogenannte Feldeffekte (nachbarschaftliche Sondenauskuhlung) zurückzuführen ist. Einen deutlich geringeren Einfluss haben die Wärmepumpe, die hydraulischen Komponenten⁴⁶ und der elektrische Netzanschluss.

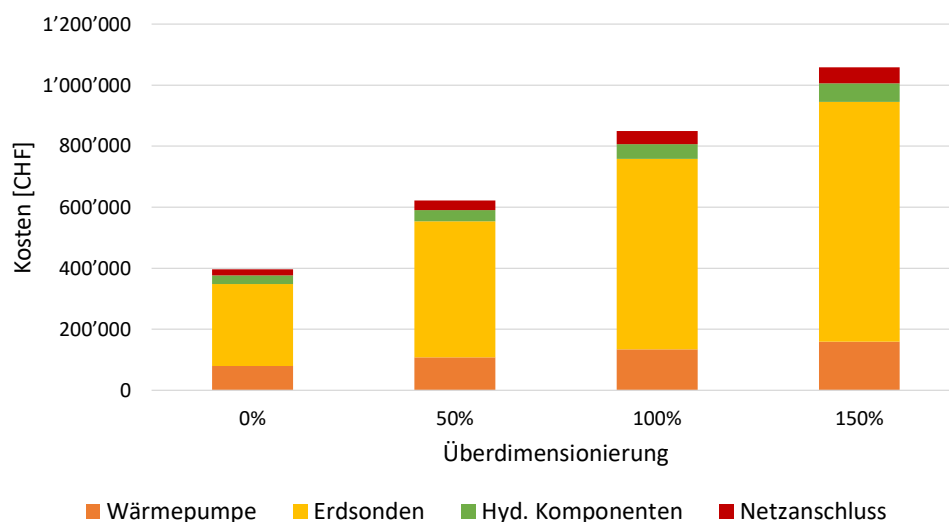


Abbildung 96: Geschätzte Kosten eines Wärmepumpensystems mit Erdwärmesonden für verschiedene Annahmen der Überdimensionierung, aufgeteilt auf die wichtigsten Komponenten. Als Basis (0% Überdimensionierung) wird ein Heizleistungsbedarf von 92 kW zu Grunde gelegt.

In Abbildung 97 sind die Mehrkosten eines um den Faktor 2 (100%) überdimensionierten Wärmepumpensystems genauer aufgeschlüsselt. Die Mehrkosten von insgesamt 0.45 Mio. CHF machen ca. 1% der Gesamtkosten (ca. 40 Mio. CHF) des Gebäudes aus. Damit wird deutlich, dass sich eine Begleitung durch Simulationsexperten lohnt, da die Kosten einer Überdimensionierung die Kosten des Simulationsaufwandes deutlich übersteigen.

Die oben erwähnte Abkühlung des Sondenfeldes durch Nachbarschaftseffekte tritt in der Realität nicht auf, da die Belastung im Betrieb geringer ist. Diese Überdimensionierung führt zu höheren Quellentemperaturen für die Wärmepumpe, was wiederum zu einem besseren

⁴⁶ In den Kostenberechnungen wurden Leitungen, Leitungsdämmung, div. Ventile, Wärmemengenzähler, Expansionsgefässe, Wärmetauscher, Pumpen, Pufferspeicher und Entgaser berücksichtigt

Wirkungsgrad mit tieferen Betriebskosten führt. Eine grobe wirtschaftliche Abschätzung hat jedoch gezeigt, dass der Strompreis über einem Franken liegen muss, um die hohen Investitionskosten zu kompensieren.

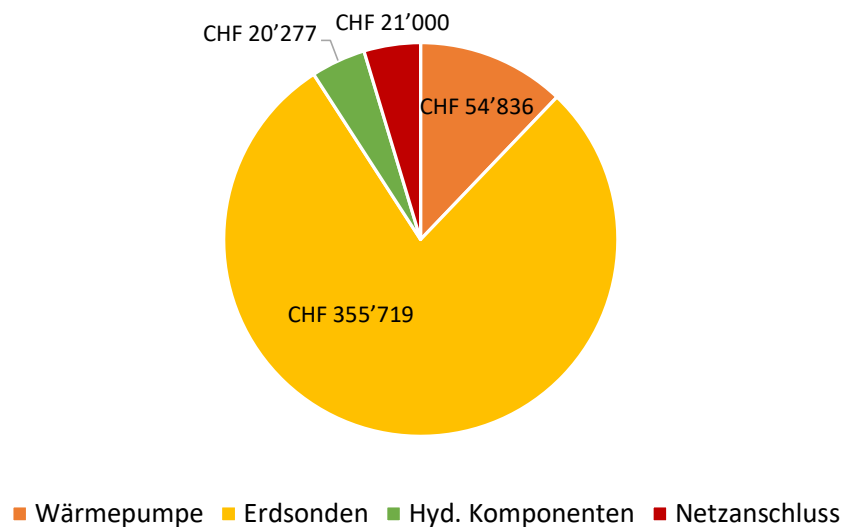


Abbildung 97: Aufteilung der Mehrkosten einer Sole-Wasser-WP bei einer Überdimensionierung von 100%, ausgehend von einer Basisleistung (0% Überdimensionierung) von 92 kW.

Die Schwierigkeit bei der Kostenschätzung liegt darin, dass es zwei Möglichkeiten gibt, das Erdwärmesondenfeld zu dimensionieren:

1. Ausgehend von der Leistungsberechnung (SIA 384/1) wird über die Volllaststunden auch der Wärmebedarf für die Sondenauslegung berechnet. Dadurch ist die Überdimensionierung des Erdwärmesondenfeldes deutlich grösser, da nicht nur der Leistungsbedarf, sondern auch der Wärmebedarf überschätzt wird.
2. Für die Auslegung wird der Heizwärmebedarf aus der SIA 380/1 und der gleiche Leistungsbedarf wie in Variante 1 (SIA 384/1) verwendet. Damit wird das Erdwärmesondenfeld deutlich kleiner als in Variante 1, da der Heizwärmebedarf eher unterschätzt als überschätzt wird (Stichwort: Energy Performance Gap).

Die Abbildung 98 zeigt die Kostensteigerung für die Berechnungsvariante 2, bei welcher das Erdwärmesondenfeld deutlich kleiner ausfällt als in Variante 1 (Abbildung 96). Die Kostensteigerung aufgrund der Überdimensionierung ist auch für die Variante 2 vor allem durch die Erdwärmesonden getrieben, mit jedoch einem geringeren Anstieg als in Variante 1.

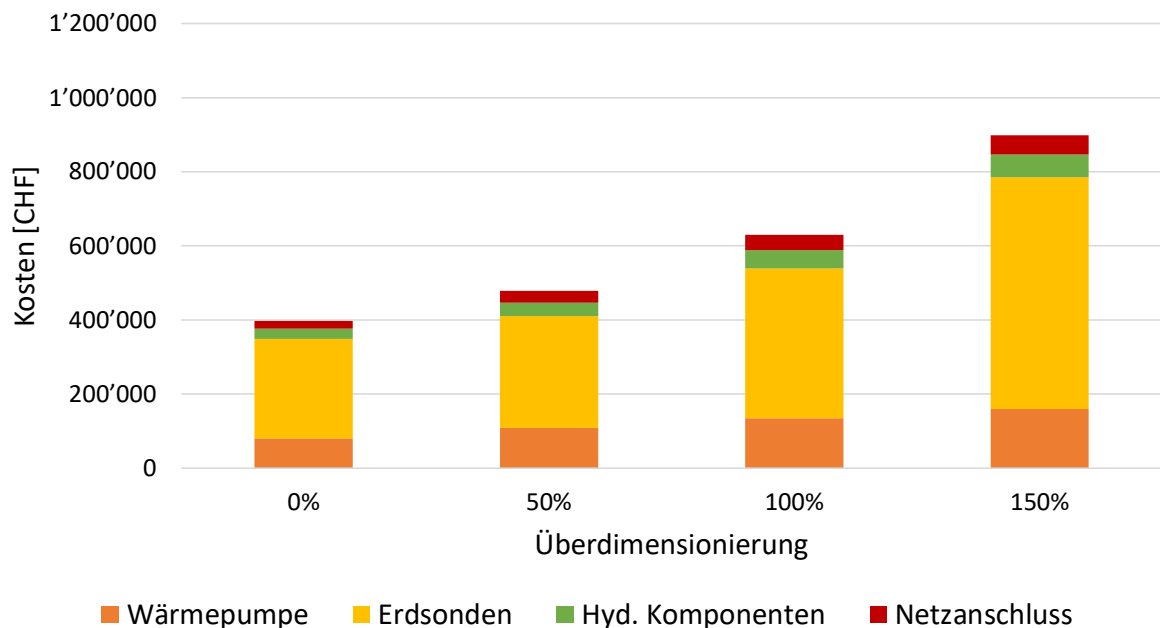


Abbildung 98: Geschätzte Kosten eines Wärmepumpensystems mit Erdwärmesonden für verschiedene Annahmen der Überdimensionierung, aufgeteilt auf die wichtigsten Komponenten. Als Basis (0% Überdimensionierung) wird ein Heizleistungsbedarf von 92 kW zu Grunde gelegt. Für die Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes wurde eine Überdimensionierung der Leistung angenommen aber kein erhöhter Wärmebedarf (Variante 2).

In Abbildung 99 und Abbildung 100 sind die Kostenabschätzungen für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe dargestellt. Es zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die Kostensteigerung im Vergleich zur Sole-Wasser-Wärmepumpe geringer ausfällt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hier gewählten Komponenten so ausgelegt sind, dass die schalltechnischen Anforderungen erfüllt werden (<70 dB(A)) und eine Verbindungsleitung von ca. 30 Meter zwischen Wärmepumpe und Luftkühler (Wärmequelle) angenommen wurde (Kosten unter «Luftkühler» berücksichtigt). Die Kosten für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sind höher, da aufgrund der niedrigeren Quellentemperatur im Auslegungsfall im Vergleich zu einer Sole-Wasser-Wärmepumpe eine grössere Maschine angeschafft werden muss. Um den Wärmetauscher eisfrei zu halten, kommen zusätzliche hydraulische Komponenten hinzu, die die Kosten für Hydraulik im Vergleich zur Sole-Wasser-Wärmepumpe erhöhen. Optische Anforderungen wurden nicht berücksichtigt, diese können je nach Situation zu erheblichen Mehrkosten führen.

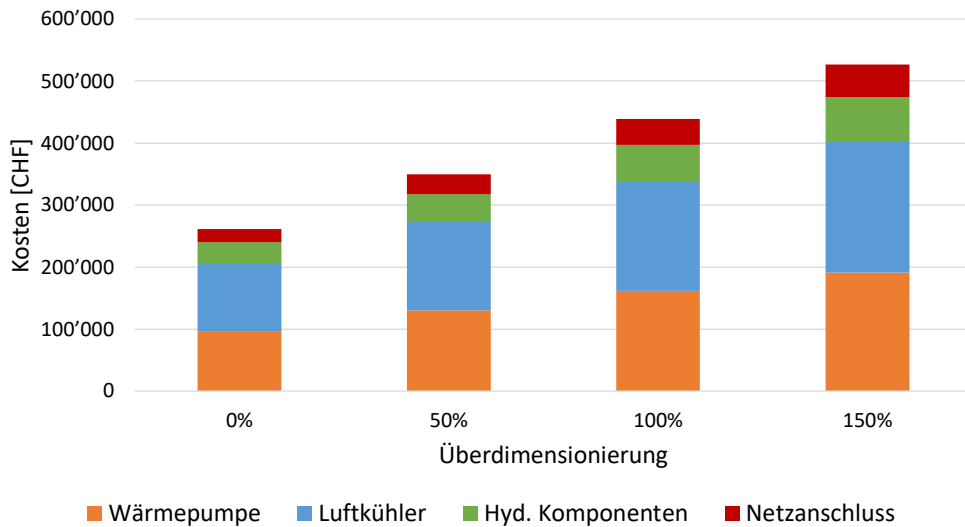


Abbildung 99: Geschätzte Kosten eines Wärmepumpensystems mit Luftkühler (Wärmequelle) für verschiedene Annahmen der Überdimensionierung, aufgeteilt auf die wichtigsten Komponenten. Als Basis (0% Überdimensionierung) wird ein Heizleistungsbedarf von 92 kW zu Grunde gelegt.

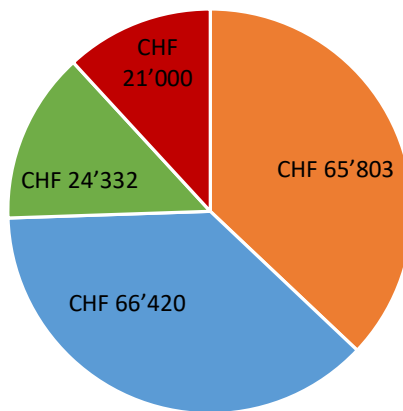


Abbildung 100: Aufteilung der Mehrkosten für eine Luft-Wasser-WP bei einer Überdimensionierung von 100%, ausgehend von einer Basisleistung (0% Überdimensionierung) von 92 kW.



5 Schlussfolgerungen

5.1 Auswertung Gebäude

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bestätigen die in der Fachwelt häufig angesprochene Problematik der Überdimensionierung von Wärme- und Kälteerzeuger. Insbesondere bei der Auslegung in Verwaltungsgebäuden konnte ein klarer Handlungsbedarf festgestellt werden. Die Vermutung, dass die Normen nicht mehr aktuell sind und nicht dem heutigen Baustandard entsprechen, konnte nicht vollumfänglich bestätigt werden. Das Problem liegt vorwiegend in der Anwendung der Normen. Die im nachfolgenden Kapitel vorgeschlagenen Empfehlungen könnten zu einer Verbesserung der Situation beitragen. Folgende Schlussfolgerungen wurden aus der Datenauswertung gezogen. Die Schlussfolgerungen zum Einfluss auf die Wärmepumpe werden im Kapitel 5.2 beschrieben.

Mehrfamilienhäuser

Bei den Mehrfamilienhäusern scheint der Handlungsbedarf geringer zu sein als bei den Bürogebäuden. Im Median liegt die Überdimensionierung bei ca. 40%, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse zum Teil sehr stark streuen und es auch Wohngebäude mit einer Überdimensionierung von 100% gibt. Für Wärmepumpen mit Erdwärmesonden als Wärmequelle ist eine Überdimensionierung von ca. 45% nicht nachteilig, sondern vorteilhaft, da aus der Studie ImmoGap [1] bekannt ist, dass Wohngebäude im Mittel einen Mehrverbrauch an Heizwärme von ca. 40% gegenüber der SIA 380/1 Berechnung aufweisen. Durch die Überdimensionierung wird somit ein zu starkes Auskühlen der Erdwärmesonden durch den Mehrverbrauch an Wärme vermieden. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen ergibt sich kein Vorteil, da die Leistung bei steigenden Aussenlufttemperaturen ohnehin zunimmt. Die höhere Leistung der Rückkühler führt zwar zu geringeren Schallemissionen im leistungsreduzierten Betrieb, kann aber bei der Baueingabe nicht berücksichtigt werden, da sich dieser Vorteil erst im Betrieb zeigt, und bei der Bewilligung nicht von einer Überdimensionierung ausgegangen wird. Wie stark die Überdimensionierung die Baubewilligung von Luft-Wasser-Wärmepumpen beeinflusst wurde hier nicht untersucht, jedoch ist ein beachtlicher Teil des Schweizer Gebäudeparks (15-30%) von Einschränkungen betroffen [16].

Um die starke Streuung der Daten (unterschiedliche Leistungsauslegung bei gleichem Heizwärmebedarf des Gebäudes) in der Praxis zu reduzieren, wurde im Projekt eine Methode entwickelt, um die berechnete Heizleistung anhand des Heizwärmebedarfs zu plausibilisieren (siehe Kapitel 4.1.3, Gl.1 & Gl.2).

Vorläufige Ergebnisse der Wärmepumpen-Feldmessungen (Jahresbericht 2023) des Instituts für Energiesysteme der OST zeigen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie, dass die Überdimensionierung bei Einfamilienhäusern in der gleichen Grössenordnung liegt wie bei den hier untersuchten Mehrfamilienhäusern.

Anwendung der SIA 384/1:2022 – Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen

Ein wesentlicher Beitrag zur Überdimensionierung bei Verwaltungsgebäuden ist auf die Berücksichtigung der Warmwassererwärmung und der so genannten verbundenen Systeme zurückzuführen. Verbundsysteme sind bei Verwaltungsgebäuden in der Regel die Luftherhitzung bzw. -kühlung und die Serverkühlung. Grundsätzlich sind auch Sperrzeiten durch das Elektrizitätswerk zu berücksichtigen, die jedoch in der Praxis immer seltener auftreten. Folgende Punkte sind aus Sicht der Autoren als kritisch zu betrachten:

- Die Norm SIA 384/1 (Ziffer 4.2.5.2) fordert für Luftherhitzer einen Leistungszuschlag, der bei maximalem Aussenluftvolumenstrom bei Auslegungstemperatur nach SIA 2028 (Stundenwert) auftritt. Dies führt zu extrem hohen Leistungszuschlägen, da einerseits die Lüftung oft bereits in der Norm-Heizlastberechnung berücksichtigt wird und andererseits der Aussenluftvolumenstrom bei kalten Temperaturen gemäss SIA 382/1:2014 (Ziffer 2.2.6.5)⁴⁷ in der Regel um bis zu 50% reduziert werden kann. Aus Ziffer 4.2.5.2 geht nicht eindeutig hervor, ob der reduzierte Volumenstrom für die Berechnung verwendet werden darf.
- Häufig werden bei den Leistungszuschlägen (z.B.: mech. Lüftung) in der Praxis Korrekturfaktoren für die Gleichzeitigkeit berücksichtigt, die diese Zuschläge reduzieren. Wie diese ermittelt und angewendet werden, ist aus Sicht der Autoren nicht transparent, weshalb in der Praxis sehr unterschiedlich damit umgegangen wird. Für die Norm-Heizlastberechnung gibt es Angaben, welche vom Lüftungskonzept abhängig sind, aber auch diese Angaben sind sehr vage gehalten (siehe SIA 384/2:2020, Tabelle 6).
- Die Norm lässt wenig Spielraum, den Wärmeerzeuger kleiner zu dimensionieren, da der Basiswert (Heizleistungsberechnung) um 30% über- und nur um 5% unterschritten werden darf (siehe Ziffer 4.3.2.1). Es wäre wünschenswert, wenn auf eine Untergrenze verzichtet werden könnte, da es z.B. in Absprache mit der Bauherrschaft sinnvoll sein kann, eine geringere Leistung zu installieren (mit der Option einer späteren Leistungserweiterung, siehe Empfehlungen), da aufgrund von Simulationen (z.B. SIA 380/2:2022) die benötigte Leistung deutlich unter den heute häufig verwendeten Berechnungsgrundlagen (Basiswert) zu liegen kommt.
- In fast allen untersuchten Bürogebäuden hätte die nach der Norm-Heizlast (SIA 384.201) berechnete Leistung ausgereicht. Die Berücksichtigung weiterer Leistungszuschläge wäre nicht nötig gewesen.

Serverkühlung

Erfahrungen⁴⁸ und Auswertungen in dieser Studie zeigen, dass der Kühlbedarf für die Serverinfrastruktur in Bürogebäuden zum Teil bis um den Faktor 10 überschätzt wird. Häufig wird dabei die maximale elektrische Anschlussleistung der Serverinfrastruktur für den Kühlbedarf herangezogen. Hier gilt es, die Gebäudetechnikexperten darauf aufmerksam zu machen, damit eine bewusste Bedarfsabklärung mit der Bauherrschaft erfolgt.

⁴⁷ In der neuen SIA 382/1, welche voraussichtlich Ende 2023 erscheint, ist es die Ziffer 2.2.5.6

⁴⁸ Rückmeldung durch die Begleitgruppe



Die neue Norm SIA 380/2:2022, dynamische Gebäudesimulationen

Die detaillierte Untersuchung von drei Büro- und zwei Wohngebäuden zeigt, dass die neue Norm *SIA 380/2:2022 – Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf* eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten aufweist. Bei konsequenter Anwendung dieser neuen Norm könnte die Überdimensionierung deutlich reduziert werden. Der finanzielle Mehraufwand für die Gebäudesimulation kann bei Verwaltungsgebäuden und sehr grossen Wohngebäuden durch Einsparungen bei den Investitionen zum Teil um ein Vielfaches kompensiert werden. Bei kleinen und mittleren Wohngebäuden kann der Mehraufwand nicht in jedem Fall refinanziert werden, da mit einfachen Mitteln, wie in Kapitel 4.1.3 vorgeschlagen, die Plausibilität der Leistungsauslegung überprüft werden kann.

Interne Lasten

Im Vorfeld der Studie wurde vermutet, dass ein wesentlicher Grund für die Überdimensionierung in der Nichtberücksichtigung der Wärmeeinträge (interne Lasten) liegt. Die Auswertung zeigt, dass bei Verwaltungsgebäuden die Leistungszuschläge aufgrund der Luftherhitzung (verbundene Systeme) wesentlich grösser sind als die Nichtberücksichtigung der Wärmeeinträge. Bei den Wohngebäuden könnte die Berücksichtigung der Wärmeeinträge durch Personen, Geräte etc. im Mittel zu einer leichten Reduktion der Überdimensionierung führen ($\sim 3 \text{ W/m}^2$), jedoch bleibt trotz Berücksichtigung der Wärmeeinträge die Streuung der Dimensionierung bei gleichem Heizwärmebedarf gross.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Norm SIA 384/2:2020 zur Norm-Heizlastberechnung im Wohnbereich die Wärmegewinne in der Regel als nicht permanent betrachtet und daher nicht berücksichtigt. Bei Verwaltungsgebäuden wird empfohlen, diese mit der Bauherrschaft zu vereinbaren. Erfahrungen aus der Praxis zeigen jedoch, dass ein solcher Austausch kaum stattfindet und diese Möglichkeit kaum genutzt wird.

Ermittlung der Leistung

Die Bestimmung der erforderlichen Heiz- oder Kühlleistung aus den Messdaten ist mit einigen Herausforderungen verbunden:

- Ausreisser können einen linearen Fit stark beeinflussen, daher sollte sowohl im Heizfall als auch im Kühlfall eine Heizgrenze bzw. Kühlgrenze von ca. $14 \text{ }^\circ\text{C}$ verwendet werden. Alle Werte, die darüber bzw. darunter liegen, sind zu entfernen.
- Im Kühlfall streuen die Messungen stark und zeigen teilweise keine lineare Abhängigkeit zur Aussentemperatur, weshalb ein linearer Fit zu unrealistischen Werten führen kann (oft wird die Kühlleistung unterschätzt). In diesem Fall wäre die «Box-Plot»-Methode besser geeignet, allerdings sind oft nur wenige Messdaten für die Auslegungstemperatur verfügbar.
- Insbesondere bei Verwaltungsgebäuden können spezifische Massnahmen wie z.B. die Nachtauskühlung die Ergebnisse stark beeinflussen. Daher ist es wichtig, diese Gebäudeeigenschaften zu kennen, um die Messdaten besser interpretieren zu können.

Die Studie zeigt, dass beide angewendeten Methoden zur Ermittlung der Heizlast aus den Messdaten funktionieren und sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Für die Bestimmung der Kühllast empfehlen wir die Anwendung beider Methoden, insbesondere wenn ein grosser Datensatz von Gebäuden untersucht wird und nicht für jedes Gebäude die Leistungskennlinie überprüft werden kann.

Erzeugerleistung versus Wärmeverteilsystem

Es ist wichtig zu unterscheiden, dass eine Überdimensionierung beim Wärmeerzeuger negative Auswirkungen haben kann, beim Wärmeabgabesystem (Fussbodenheizung etc.) aber eher positiv ist (tiefere Vorlauftemperaturen) und daher zwischen diesen beiden Fällen unterschieden werden muss. Es kann sinnvoll sein, dass die Wärmeerzeugerleistung deutlich geringer ist als die Leistung des Wärmeabgabesystems. Dies hätte zur Folge, dass in den Planungsunterlagen beide Werte explizit separat ausgewiesen werden. Grundsätzlich wären mehr Informationen aus der Planung wünschenswert, jedoch ist es schwierig, an diese Unterlagen zu kommen, da häufig auch die Bauherrschaft nicht über die Berechnungen verfügt und meist nur die Ausführungspläne vorliegen. Der Weg über die Planungsfirmer ist aufwendig und oft nicht erfolgreich, da die Planung schon mehrere Jahre zurückliegen kann.

Wärmepumpenleistung versus Erdsondenfeld

Eine Überdimensionierung des Erdsondenfeldes einer Wärmepumpe gegenüber der SIA 384/6, ohne dabei den Wärmeerzeuger ebenfalls grösser auszulegen, kann dazu führen, dass ein Sondenfeld anstatt mit Frostschutz mit Wasser befüllt und die Quelltemperatur massiv erhöht werden kann. Dies hat eine deutliche Erhöhung der JAZ zur Folge und entsprechend einen tieferen elektrischen Energiebedarf der Anlage, insbesondere auch in den Wintermonaten. Diese Variante wurde in der vorliegenden Studie nicht untersucht, weshalb zu Energieeinsparungen und Wirtschaftlichkeit dieser Option hier auch keine Aussagen gemacht werden können.

Verschärfte Dachkonkurrenz

Neben den offensichtlichen Auswirkungen auf die Kosten und die Energieeffizienz führt eine Überdimensionierung auch zu einer verschärften Flächenkonkurrenz auf den Dächern von Verwaltungsgebäuden. Insbesondere die Rückkühler benötigen viel Platz und müssen bei hohen Leistungen auf mehrere Geräte verteilt werden, was zur Folge hat, dass diese mit ausreichend grossem Abstand installiert werden müssen, um Luftkurzschlüsse oder Kaltluftseen (vor allem im Heizfall, da die kalte Luft nach unten sinkt) zu vermeiden. Überdimensionierte Luft-Wasser-Wärmepumpen stehen damit in Konkurrenz zu Dachbegrünungen und zur Solarenergienutzung über Photovoltaik oder Solarwärme.



Unterdimensionierung

Die Auswertung der Klimadaten der letzten 22 Jahre für Zürich zeigt, dass eine knappe oder sogar leichte Unterdimensionierung (-20%) kaum einen Einfluss auf die Behaglichkeit der Bewohner hat, da die Wärmekapazität des Gebäudes sehr kalte Tage gut ausgleichen kann. Bei Extremereignissen wie im Jahr 2012 mit mehrtägigen Kälteperioden, was in 22 Jahren nur einmal vorkam, kann die Raumtemperatur bei "knapper" Dimensionierung auf 19-20 °C und bei Unterdimensionierung unter 19 °C absinken. Aus Sicht der Autoren kann aufgrund der Ergebnisse eine «knappe» Dimensionierung ohne Reserven in die Praxis umgesetzt werden, eine Unterschreitung der Norm-Heizlast wird nicht empfohlen.

Klimawandel

Die Berücksichtigung der Klimadaten mit dem Klimaszenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) führte zu keiner signifikanten Reduktion der Heizleistung im Auslegungsfall. Aufgrund der aktuellen Klimamodelle ist davon auszugehen, dass die Auslegungstemperatur (Mittelwert der vier minimalen jährlichen Tagesmittelwerte) durch den Klimawandel nicht wesentlich beeinflusst wird. Auch die in Bearbeitung befindliche SIA 2028 (neue 30-Jahres-Periode) wird trotz höherer Jahresmitteltemperaturen voraussichtlich keine signifikant höheren Auslegungstemperaturen ausweisen.

5.2 Auswertung Gebäudetechnik

Ziel der Auswertung der Gebäudetechnik war die Charakterisierung der schädlichen Wirkung einer Überdimensionierung, und ob bzw. wie dieser begegnet werden kann. Für möglichst allgemeingültige Aussagen wurde zwar eine Validierung der WP-Performance Map (PM) an den untersuchten Bürogebäuden erstellt, für die weitere Untersuchung der Sole-Wasser WPs wurde jedoch eine einheitliche PM der BS2 verwendet, um die Vergleichbarkeit der Konfigurationen zu gewährleisten. Bei den Luft-Wasser WPs wurden hingegen zwei unterschiedliche PMs ausgewählt, um den Unterschied des Kennfeldes zu veranschaulichen.

Sole-Wasser-Wärmepumpe

- Bei den untersuchten Sole-Wasser-WP wurde technisch keine schädliche Wirkung der Überdimensionierung auf die JAZ bzw. den SNG festgestellt. Dies ist primär darauf zurückzuführen, dass bei Überdimensionierung nicht nur die WP, sondern auch die Wärmequelle des EWS-Feldes überdimensioniert wird bzw. werden muss. Bei der reduzierten Entzugsleistung des realen Gebäudebetriebs steigen die Quellentemperaturen durch die geringere Belastung des Erdsondenfeldes an, was zu einem reduzierten Temperaturhub und damit zur Verbesserung der JAZ führt. Diese Tendenz ergibt sich unabhängig von der Verdichterregelung.
- Eine Inverterregelung liefert die beste JAZ, allerdings ist der Unterschied nicht so gross wie bei einer Luft-Wasser WP.
- Eine Aufteilung der gesamten Heizlast auf mehrere Verdichter bzw. eine Kaskadierung der WP erreicht nicht ganz die hohen JAZ einer Inverterregelung, aber erweist sich in den Simulationen als recht robust gegen Überdimensionierung. Durch die geringeren Leistungen der einzelnen Verdichter besteht zumindest in diskreten Schritten eine Regelmöglichkeit, so dass nur der letztgeschaltete Verdichter in einem Taktbetrieb läuft. Durch Verteilung der Gesamteinschaltungen auf unterschiedliche Verdichter relativiert sich auch die schädliche Wirkung eines Taktbetriebs auf die Lebensdauer der Verdichter, wenn sie wechselweise genutzt werden, also nicht immer der gleiche Verdichter für die Lastspitzen zugeschaltet wird.
- Die geringsten JAZ werden bei Ein-/Aus-Regelung erreicht.

Luft-Wasser-Wärmepumpen

- Invertergeregelter Luft-Wasser-Wärmepumpen können heute mit richtiger Dimensionierung sehr gute Arbeitszahlen über 4 erreichen
- Ein Vergleich einer Inverterregelung mit einem Ein-/Aus-Betrieb bei 50 Hz und gleicher PM belegt, dass die Inverterregelung die Arbeitszahl deutlich steigern kann
- Aufgrund der steileren Leistungskennlinie bzw. der grösseren Leistungssteigerung mit der Aussentemperatur als bei Sole-Wasser Wärmepumpe reagieren Luft-Wasser-Wärmepumpen deutlich empfindlicher auf Überdimensionierung
- Bei höherer Überdimensionierung über 50% kann der Bereich der Inverterregelung "übersprungen" werden, so dass schon bei negativen Temperaturen eine Ein-Aus-Regelung einsetzt



- Wie stark die Effizienz durch eine Ein-Aus-Regelung beeinflusst wird, hängt auch von der PM ab. Eine sehr gute Effizienz im unteren Drehzahlbereich kann eine Effizienzminderung durch Ein-/Aus-Regelung mildern, so dass die Arbeitszahl bei Überdimensionierung nur moderat abnimmt.
- Liegt im unteren Teillastbereich eine geringe Effizienz vor, dann kann die WP auch für den Taktbetrieb auf einer höheren konstanten Drehzahl betrieben werden, z.B. bei 50% Teillastzustand.
- Andererseits kann eine flachere Leistungskennlinie einen längeren Bereich der Inverterregelung bis zu positiven Temperaturen auch bei Überdimensionierung bewirken, so dass der Ein-/Aus-Betrieb reduziert wird.
- Wie schädlich eine Überdimensionierung ist, hängt also wesentlich auch vom Leistungs- und COP-Kennfeld der konkreten Inverter-Wärmepumpe ab.
- Ein erhöhter Taktbetrieb wirkt sich vor allem auch negativ auf die Lebensdauer aus. Eine Abschätzung der Auswirkungen für die invertergeregelte Luft-Wasser-Wärmepumpe ergab ein 20-40% verkürzte Lebensdauer. Ein Taktbetrieb ist also unbedingt zu minimieren.
- Der Taktbetrieb lässt sich insbesondere bei Luft-Wasser-WP, aber auch bei erdgekoppelten WP wirkungsvoll über eine Speicherintegration reduzieren. Daher sollte immer ein thermischer Speicher integriert werden, wenn im Heizsystem eine geringe thermische Kapazität vorliegt, wie dies bei typischen Übergabesystemen für Bürogebäude wie Deckenheizung, Konvektoren und Radiatoren der Fall ist, wie sie für die Untersuchungen zugrunde gelegt worden sind.
- Bei niedrigen Temperaturen bewirken die Speicherverluste nur eine geringe Minderung der Jahresarbeitszahl, die über Verbesserung des Taktverhaltens überkompensiert wird.
- Hinsichtlich der Speicherauslegung scheinen die Empfehlung nach STASCH auch für grössere Anlagen gute Ergebnisse zu liefern, eine doppelt so grosse Auslegung bringt aber teils noch weitere Reduktionen der Einschaltungen bei der hier betrachteten geringen Kapazität im Heizsystem. Allerdings besteht bei den hier betrachteten höheren Leistungen die Frage, ob genügend Platz für das Speichervolumen vorhanden ist oder der Speicher allfällig durch den verfügbaren Platz limitiert wird.

Wirtschaftlichkeit

Auch wenn zumindest bei erdgekoppelten WP keine technisch schädliche Wirkung der Überdimensionierung festgestellt wurde, so wird die allfällige Effizienzerhöhung durch sehr hohe Kosten erkaufte. Die Kostenstruktur der Investitionskosten zeigt, dass das EWS-Feld der Kostentreiber für die gesamte Investition ist, da sich Kosten bei Überdimensionierung sogar progressiv erhöhen. Dies beruht auf der geringen natürlichen Regeneration von inneren Sonden in einem EWS-Feld. Um die Kosten zu begrenzen, sollte bei grösseren Feldern eine Regeneration eingeplant werden [17]. Auch bei Luft-Wasser Wärmepumpen verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit bei Überdimensionierung, allerdings nicht in dem Masse wie bei den progressiv steigenden Kosten des EWS-Feldes.

Energy Performance Gap

Ein weiterer Aspekt ist der Energy Performance Gap, der besagt, dass Neubauten um die 40% mehr Energie verbrauchen als in der Planung berechnet [1]. Daher könnte eine Überdimensionierung weniger schädlich sein als oben angenommen, da sowieso wegen des höheren Verbrauchs eine grössere Auslegung notwendig sein könnte. Simulationen haben ergeben, dass bei einem Heizwärme-Mehrverbrauch von 40% auch entsprechend ein 40% grösseres Erdsondenfeld benötigt wird. Insofern scheint eine Überdimensionierung um bis 40% aus Gründen des Energy Performance Gaps gerechtfertigt.

Materialaufwand

Mit einer Überdimensionierung vergrössern sich die Komponenten, und damit steigen nicht nur die Kosten von Erdwärmesonden und der anderen Komponenten bei Überdimensionierung, sondern auch der Materialaufwand und die graue Energie bzw. die grauen Emissionen. Gerade die Erdarbeiten bei erdgekoppelten WP stellen allfällig eine hohe ökologische Belastung dar. Inwiefern die grauen Emissionen durch eine verbesserte Effizienz im Winter kompensiert werden können, müsste in einem Folgeprojekt untersucht werden.



5.3 Empfehlungen

Aus den Projektergebnissen lassen sich nachfolgende Empfehlungen aufgeschlüsselt nach Stakeholder ableiten.

Energiefachleute (Planungs- und Beratungsunternehmen)

- Bei Wohngebäuden sollte die ermittelte Heizleistung mit den Ergebnissen aus der Abbildung 54 bzw. den beiden Gleichungen zur Plausibilisierung der spezifischen Heizleistung aus dem spezifischen Heizwärmebedarf (Kapitel 4.1.3) verglichen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dies mit den vorhandenen Messdaten nur für das Mittelland gilt, für andere Regionen müsste der Datensatz ergänzt werden.
- Bei komplexeren Gebäuden wie Verwaltungsgebäuden sollte die Problematik der Überdimensionierung grundsätzlich offen mit der Bauherrschaft diskutiert werden, um diese entsprechend zu sensibilisieren. Mit dem Einverständnis der Bauherrschaft kann aufgrund der Sensibilisierung eine der folgenden Massnahmen angewendet werden:
 - Begleitung der Planung durch dynamische Gebäudesimulationen und Anwendung der neuen SIA 380/2:2022, welche den Leistungsbedarf realitätsnäher als die heute üblichen Berechnungsmethoden ermittelt.
 - Überdimensionierung bewusst in Kauf nehmen, aber die Anlagen so auslegen, dass mehrere Wärmepumpen mit unterschiedlichen Leistungsbereichen die optimale Effizienz und die wenigsten Ein-/Ausschaltvorgänge und damit eine lange Lebensdauer aufweisen (siehe Kapitel 4.2).
 - Auslegung der Heiz- und Kühlleistung wie üblich, jedoch wird in einem ersten Schritt ein Wärmeerzeuger mit einer um 50% geringerer Leistung als berechnet installiert. Die Wärmeabgabe und die gesamte Hydraulik werden auf 100% ausgelegt (geringe Mehrkosten). Sollte sich in den ersten Betriebsjahren herausstellen, dass die installierte Leistung nicht ausreicht, kann später eine weitere Wärmepumpe installiert werden. Diese Vorgehensweise setzt allerdings voraus, dass die Wärmequelle (Erdsonden, Luftkühler) nachträglich erweitert werden kann.
- Die real benötigte Serverinfrastruktur ist mit der Bauherrschaft genau abzuklären, da in der Praxis die Kühlleistung oft um den Faktor 10 überschätzt wird.

Bauherrschaft und Bauherrenvertretungen

Für komplexere Gebäude wie Verwaltungsgebäude empfehlen wir, eine dynamische Gebäudesimulation durch das Planungsbüro oder einen externen Dienstleister durchführen zu lassen und für die Leistungsermittlung die neue SIA 380/2:2022 anzuwenden. Die Einsparungen bei den Investitionen übersteigen die Kosten für eine Gebäudesimulation bei weitem. Mit der Gebäudesimulation können neben der Leistungsermittlung viele weitere Aspekte (Gebäudehülle, Komfort etc.) optimiert werden.

Normungswesen und Behörden

- Die in diesem Projekt vorgeschlagene Plausibilisierung der berechneten Norm-Heizleistung für Wohngebäude könnte, in das von den Kantonen zur Verfügung gestellte Programm «WPesti» integriert werden. Die hier vorgeschlagene Methode müsste jedoch auf weitere Klimazonen erweitert respektive geprüft werden (z.B.: Davos, etc.).
- Die Norm SIA 384/1 sollte für mechanische Lüftungskonzepte (verbundene Systeme) eine Reduktion des Luftvolumenstroms bei Auslegungstemperatur um bis zu 50% zulassen und auf die Norm SIA 382/1 (Ziffer 2.2.6.6) verweisen. Es sollte geprüft werden, ob bei Verwaltungsgebäuden (z.B. Büro) nicht auf einen Leistungszuschlag für die Lüftungsanlage verzichtet werden kann, da die Lüftung auch schon in der Norm-Heizlast berücksichtigt ist und die Ergebnisse zeigen, dass häufig die Norm-Heizlast ausreicht für die Dimensionierung der Wärmeerzeuger.
- Für die Anwendung der Korrekturfaktoren für die sogenannte Gleichzeitigkeit sollten weitere Hinweise und Informationen zur Verfügung gestellt werden. Die Anwendung dieser Korrekturfaktoren erscheint teilweise willkürlich. Die SIA 384/2:2020 gibt mit der Tabelle 6 nur wenige Informationen zur Anwendung derselben.
- Die Berücksichtigung von Wärmegegewinnen (internen Lasten) könnte die Überdimensionierung im Heizfall weiter reduzieren. Die Gefahr einer Unterdimensionierung ist gering und hätte einen vertretbaren Einfluss auf die Behaglichkeit (siehe Simulationen für das Jahr 2012, Kapitel XY). Auch die Gefahr von Frostschäden ist bei Berücksichtigung der internen Wärmelasten nicht gegeben, da die Leistung in jedem Fall ausreicht, um eine Minimaltemperatur von 16 °C zu erreichen.

Empfehlungen bei einer Überdimensionierung

- Falls die Steuerung der WP es zulässt, kann und sollte die Regelung der WP optimiert werden. Die Regelung hat potenziell einen sehr grossen Einfluss auf die Effizienz der WP. Durch eine gute Regelung kann die Überdimensionierung bei Sole-Wasser WP auch positive Einflüsse auf Lebensdauer und Effizienz der WP haben.
- Bei festgestellter Überdimensionierung kann eine Kapazitätserhöhung (in Form eines grösseren Wärmespeichers) das Verhalten der WP positiv beeinflussen. Wenn diese die Möglichkeit hat, hohe Leistungen an das System abzugeben, kann das bewirken, dass der Temperaturhub sinkt und/oder die Laufzeiten verlängert werden. Dies wiederum wirkt sich positiv auf JAZ, SNG und Lebensdauer der WP aus. Die JAZ steigt aufgrund des tieferen Temperaturhubes, während der SNG positiv beeinflusst wird, weil der potenzielle Speicher nicht mehr so stark überladen wird (was zu geringeren Speicherverlusten führt). Die längeren Laufzeiten führen zu geringerem Takten, was sowohl die JAZ erhöhen sowie auch die Lebensdauer der WP verlängern kann. Im Vergleich zu den anderen Systemkomponenten fallen die Speicherkosten kaum ins Gewicht, so dass sich der Einbau lohnt. Kritischer können eher die Platzverhältnisse sein, die auch einen Ausschlag geben, welche Speichervolumina installiert werden können.
- Andere Anpassungen können schnell kostspielig oder technisch sehr kompliziert werden. Beispielsweise kann bei einem Gebäude mit einer überdimensionierten WP mit fester Drehzahl ein Frequenzumrichter vorgeschaltet werden. Dies ist jedoch technisch nicht trivial und auch nicht in allen Fällen möglich. Alternativ könnte eine kleinere zweite WP eingebaut werden, welche tiefere Leistungen abdecken kann. Bei dieser Option stellt sich



jedoch die Frage, ob eine Effizienzverbesserung die Investitionskosten amortisieren kann. Als dritte Option kann auch die alte WP ausgebaut werden und durch eine besser dimensionierte WP ersetzt werden. Dies empfiehlt sich jedoch nur, wenn festgestellt wird, dass die WP tatsächlich hohe Schaltungen aufweist und am Ende Ihrer Lebensdauer ist.

6 Ausblick und offene Forschungsfragen

Die Ergebnisse von OptiPower werden so breit wie möglich über Fachzeitschriften und Konferenzen publiziert (drei Publikationen in Ausarbeitung). Die ersten Ergebnisse wurden an der Wärmepumpentagung in Burgdorf (2023) präsentiert.

Zusätzlich wird der vorliegende Bericht an ausgewählte SIA-Mitglieder bzw. Kommissionsmitglieder der betroffenen Normen und den Verbänden suissetec und "Die Planer" (SWKI) verschickt.

Offene Forschungsfragen sind:

- Bei Wohngebäuden mit gleichem Heizwärmebedarf kann die ausgewiesene Leistung sehr stark variieren, der Grund dafür konnte im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Eine vertiefende Auswertung von ausgewählten Wohngebäuden aus dieser Studie, bei der aktiv Planungsunterlagen beschafft werden, könnte eine Antwort liefern.
- Es sollte überprüft werden, ob die hier vorgestellte Methode zur Plausibilisierung der Norm-Heizlast auf Basis des spezifischen Heizwärmebedarfs auch für andere Klimaregionen Gültigkeit hat. Ein Vergleich mit der in der SIA 384/1 (Anhang C) vorgeschlagenen Methode könnte hilfreich sein.
- Im Rahmen der WP-Systemuntersuchung wurde eine weitgehend einheitliche Regelung für die unterschiedlichen WP-Typen implementiert. Es wurde während den Untersuchungen jedoch festgestellt, dass die Regelung einen grossen Einfluss insbesondere auf Laufzeiten und das Taktverhalten haben kann. Eine vertiefte Untersuchung von Optimierungspotenzialen und die Auswirkungen auf das Systemverhalten wäre interessant, so dass die hier ermittelten grundlegenden Aussagen noch detaillierter dargestellt und spezifiziert werden können. Allfällig könnte über eine optimierte Regelung schädliche Wirkungen von einer Überdimensionierung abgemildert oder positive Effekte z.B. die Effizienzerhöhung bei Sole-Wasser WP noch verstärkt werden.
- Die Auswirkungen der Überdimensionierung wurde in dieser Studie auf die anlagentechnischen und wirtschaftlichen Aspekte beschränkt. Interessant wäre auch eine genauere Untersuchung der Auswirkungen des Materialeinsatzes durch Überdimensionierung im Hinblick auf Graue Energie/Emissionen, was ein weiterer problematischer Aspekt einer Überdimensionierung sein könnte.
- Es wurde nicht untersucht, inwiefern eine Überdimensionierung von Sondenfeldern gegenüber der SIA 384/6 ohne gleichzeitige Erhöhung der Heizleistung der Wärmepumpen Jahreszahl und Nutzungsgrad verbessern und Winterstrombedarf einsparen kann. Dieses Konzept, unter Umständen mit Wasser anstatt Frostschutz im Quellenkreis betrieben, müsste separat betrachtet werden.

7 Literaturverzeichnis

- [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, HSR Hochschule für Technik Rapperswil; 2018.
- [2] Huber H, Sibold C, Lüscher P. Der Heizleistungsbedarf als Beurteilungsgrösse für die energetische Qualität der Gebäudehülle. Muttenz: Minergie Agentur Bau; 2014.
- [3] Anwendungsempfehlung zu den stündlichen Klimadatensätzen für die Zukunft in Ergänzung zur SIA2028. 2022.
- [4] Klima der Schweiz - MeteoSchweiz n.d. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz.html> (accessed December 14, 2022).
- [5] POWER | Data Access Viewer n.d. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed December 14, 2022).
- [6] Schmidli J, Carbonell D, Biba C. Future Weather Data Analysis for Solar Heating and Cooling. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2022:1331–5. <https://doi.org/10.4229/WCPEC-82022-4BV.4.32>.
- [7] CARNOT Toolbox for Matlab/Simulink R2022a 2022.
- [8] Huber A, Schuler O. Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Huber Energietechnik; 1997.
- [9] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. University of Lund, 1987.
- [10] Afjei T, Gabathuler H, Mayer H. STASCH - Standardschaltungen für Kleinwärmepumpen, Teil 1 - Planungshilfe. Muttenz: 2002.
- [11] Berthold M, Uhlmann M, Bertsch S, Eschmann M. Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2021/22. Buchs: 2022.
- [12] von Euw R, Alimpic Z, Huber H, Schrader B, Nipkow J, Steiger O, et al. Gebäudetechnik - Systeme integral planen. 2nd ed. Faktor; 2022.
- [13] Benz M, Van Velsen S, Löhner R, Rohrer S, Mojic I, Cramer S, et al. Neuartige reversible Luft/Wasser Wärmepumpe mit natürlichem Kältemittel (Propan) für ein energieeffizientes Bürogebäude. Winterthur: 3-Plan Haustechnik AG; 2020.
- [14] 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.
- [15] Montero D, Brischoux P, Hollmüller P. Gestion en cascade de pompes à chaleur air/eau pour immeubles résidentiels collectifs existants - Partie 1. 2023.
- [16] Jakob M, Catenazzi G, Müller J, Schmid J, Weinberg L, Zulliger D, et al. Low-Invest-Cost Sanierungen (LICS) - Potenziale und Limitationen von bestehenden und neuen Lösungen für Low-Invest-Cost Sanierungen zur Erreichung eines tiefen CO₂-Grenzwerts bei Bestandsbauten. Zürich: 2022.
- [17] Meier C, Wemhöner C. HP-source - Integrationsmöglichkeiten von Wärmequellen. Rapperswil: laufend.
- [18] pvlib.irradiance.disc — pvlib python 0.9.3 documentation n.d. <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/generated/pvlib.irradiance.disc.html> (accessed December 14, 2022).
- [19] Schluck T, Streicher KN, Mennel S. Statistical modelling of the energy reference area based on the Swiss building stock. J Phys: Conf Ser 2019;1343:012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012031>.



Annex A: Weiterführende Informationen Gebäudesimulationen

Klimadaten

Die folgenden Parameter sind notwendig, um eine dynamische Energieberechnung in IDA ICE durchzuführen.

- *IDirNorm* - Direkte normale Strahlung [W/m^2]
- *IDiffHor* - Diffuse Strahlung auf einer horizontalen Fläche [W/m^2]
- *Tair* - Aussen Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- *RelHum* - Relative Feuchtigkeit [%]
- *WindDir* - Windrichtung [$^{\circ}$]
- *WindVel* - Windgeschwindigkeit skalar [m/s^2]

Alle oben aufgeführten Wetterparametren, ausser *IDirNorm* und *IDiffHor*, sind entweder in ida web oder in der NASA-Datenbank zu finden. *IDirNorm* und *IDiffHor* musste zusätzlich mit Hilfe der Globalstrahlung, die ebenfalls in der Datenbank verfügbar ist, und dem solaren Zenitwinkel berechnet werden. Mit Hilfe des PVIlibdisc-Modells [18] wurde *IDirNorm* und der solare Zenitwinkel berechnet. Nach der Ermittlung von *IDirNorm* und solarer Zenitwinkel wurde die Diffusstrahlung mit der nachfolgenden Gleichung berechnet.

Gleichung 1:
$$I_{diff,hor} = I_{glo,ho} - I_{norm} \cdot \cos \theta_s$$

$I_{glo,hor}$:	Horizontale Globalstrahlung [W/m^2]
$I_{dir,norm}$:	Direkte normale Strahlung [W/m^2]
θ_s :	solarer Zenitwinkel [$^{\circ}$]
$I_{diff,hor}$:	Diffuse Strahlung auf einer horizontalen Fläche [W/m^2]

Annex B: Berechnung von fehlenden Gebäudeparametern

Von den 341 Heizungsanlagen standen dem Projektteam nur für 182 Anlagen detaillierte Informationen zur Verfügung, da zum Beispiel keine Energienachweise zur Verfügung gestellt wurden um beispielsweise die EBF zu bestimmen.

Die nachfolgende Berechnung wurde verwendet, um die EBF für die verbleibenden Heizsysteme zu schätzen. Es wurde eine Gleichung, basierend auf Schluck et al. 2019 [19] zur Berechnung der EBF verwendet, die auf GEAK Daten von über 40'000 Gebäuden in der Schweiz basiert. Die Methode verwendet die Grundfläche (GF), die Wohnfläche (WF) und die Anzahl der Geschosse (AdE), sowie zusätzlich die Nutzung des Gebäudes (GN). Da in dieser Studie nur Ein- und Mehrfamilienhäuser betrachtet werden, haben wir zur Berechnung der EBF eine vereinfachte Version der Gleichung verwendet:

$$\text{Gleichung 2: } Y_{EBF,i} = \beta_1 X_{WF,i} + \beta_2 X_{GF,i} + \beta_3 X_{AdE,i} + \begin{cases} \beta_{4,GN} = \text{"EFH"} \\ \beta_{4,GN} = \text{"MFH"} \end{cases} +$$
$$\begin{cases} \beta_{5,GN} = \text{"EFH"} \cdot X_{GF,i} \\ \beta_{5,GN} = \text{"MFH"} \cdot X_{GF,i} \end{cases} + \begin{cases} \beta_{6,GN} = \text{"EFH"} \cdot X_{WF,i} \\ \beta_{6,GN} = \text{"MFH"} \cdot X_{WF,i} \end{cases} + \varepsilon_i$$

Wobei

$X_{WF,i} = \lg(\text{WohnFläche})$; $X_{GF,i} = \lg(\text{GrundFläche})$; $X_{AdE,i} = \sqrt{\text{Anzahl der Geschosse}}$ und die Parameter sind $\beta_1 = -0.031$; $\beta_2 = 0.766$; $\beta_3 = 0.231$; $\beta_{4,GN=\text{"EFH"}} = 0.528$; $\beta_{4,GN=\text{"MFH"}} = 0.422$; $\beta_{5,GN=\text{"EFH"}} = -0.448$; $\beta_{5,GN=\text{"MFH"}} = -0.468$; $\beta_{6,GN=\text{"EFH"}} = 0.373$; $\beta_{6,GN=\text{"MFH"}} = 0.496$.

Schliesslich wird der EBF wie folgt berechnet:

$$\text{Gleichung 3: } EBF = 10^{Y_{EBF,i}}$$

Die oben beschriebene Methode beinhaltet auch einen Epsilon-Störungsterm (ε_i). Aus dem Vergleich der berechneten EBF mit den verfügbaren EBF der 182 Gebäude (Abbildung 101) ergibt sich ein Wert von 0.065. Dieser Wert wurde so lange angepasst, bis die beste Gesamtübereinstimmung mit den EBF-Werten aus den Energienachweis gefunden wurde. Für die restlichen 159 Heizungsanlagen wurde die obige Gleichung mit dem Störungsterm 0.065 zur Bestimmung der EBF verwendet.



Vergleich der EBF-Werte mit dem Störungsterm 0,065

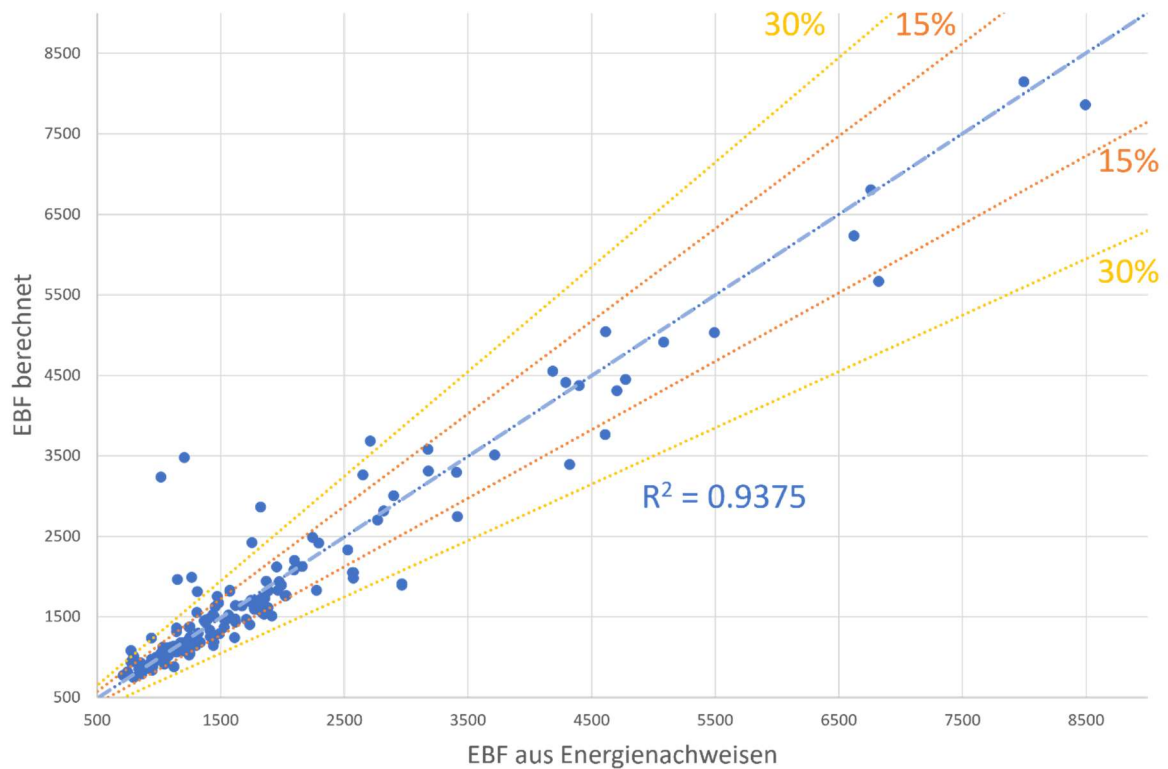


Abbildung 101: Vergleich der EBF-Werte mit dem Störungsterm 0.065, 15- und 30-prozentige Konfidenzintervalle sind eingezeichnet.

Viele Heizungsanlagen bestehen aus mehreren Gebäuden. In diesen Fällen wurden die EBF der einzelnen Gebäude berechnet und anschliessend summiert, um den Wert für die gesamte Heizungsanlage zu erhalten.

Die Werte für Grundfläche, Wohnfläche, Anzahl der Stockwerke und Gebäudenutzung wurden der GWR-Datenbank entnommen. Häuser mit einer oder zwei Wohnungen werden als Einfamilienhäuser klassifiziert, während Häuser mit drei oder mehr Wohnungen als Mehrfamilienhäuser eingestuft werden. Die 341 Anlagen in dieser Studie umfassen 620 verschiedene Gebäude, die in der GWR-Datenbank mit 728 verschiedenen EGID-Nummern erscheinen. Der Grund für die grössere Anzahl von EGID-Nummern ist, dass die EGID jeder einzelnen Adresse (Hauseingang) entspricht, während für die EBF-Berechnung mehrere Hauseingänge zusammengefasst wurden, wenn die Grundfläche zusammenhängend ist. Die GWR-Datenbank liefert nur in sehr wenigen Fällen direkt die EBF, für 14 Heizungsanlagen (30 Gebäude) ist dies der Fall, wobei diese aus anderen Gründen nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden. Im untersuchten Datensatz haben eine Grundfläche und 25 Wohnflächen im GWR-Datensatz gefehlt, diese wurden Anhand von Geo-Karten geschätzt. In drei Fällen war die Anzahl der Stockwerke offensichtlich falsch, dies wurde manuell auf der Grundlage von Google Street View-Beobachtungen korrigiert.

Für jedes Gebäude wurde eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt, bei der wir die Wohnfläche aus der GWR-Datenbank mit einer Schätzung der Wohnfläche (Anzahl der Stockwerke * 130

Grundfläche * 0,8) verglichen wurde. Von den 620 Gebäuden stellten wir fest, dass bei 179 die erwarteten und die angegebenen Werte für die Wohnfläche um mehr als 20 % für ein einziges Stockwerk des Gebäudes abwichen. Es wären weitere Untersuchungen erforderlich, um festzustellen, welche der drei Parameter (Wohnfläche, Grundfläche, Anzahl der Stockwerke) bei jedem der 193 Gebäude falsch sind. Auch wenn die Messung der Grundfläche anhand einer Satellitenansicht oder die Bestimmung der Anzahl der Stockwerke anhand einer Strassenansicht ohne weiteres möglich ist, würde die Validierung der Wohnfläche einen hohen Aufwand bedeuten.



Annex C: Auswertung der Methoden zur Leistungsbestimmung

Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Leistungsermittlung ("Box-Plot" und "Energiesignatur") und der zeitlichen Auflösung (Stunden und Tageswerte).

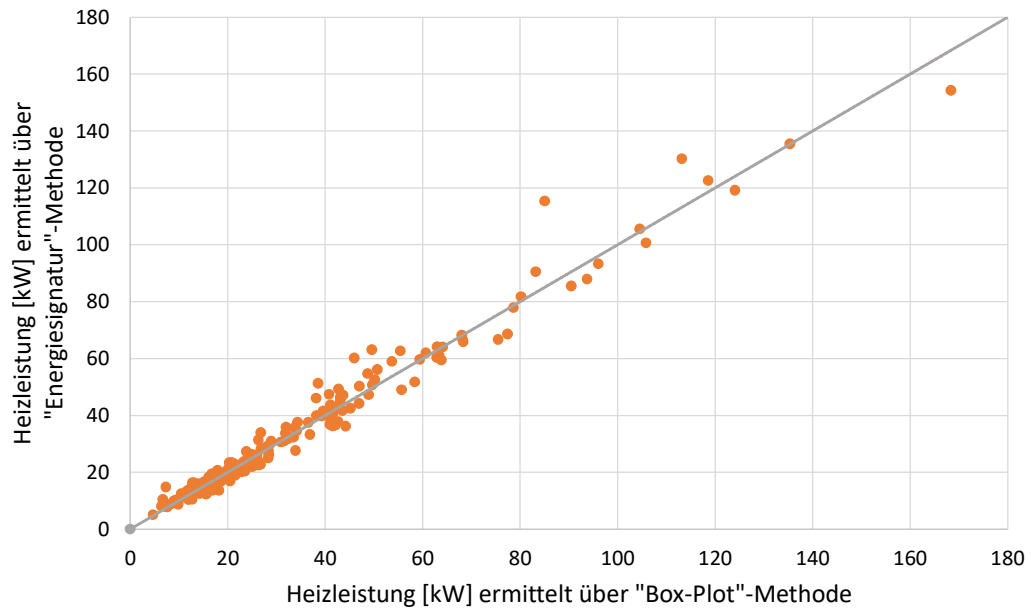


Abbildung 102: Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Norm-Heizlast aus den EKZ-Messdaten für Stundenmittelwerte.

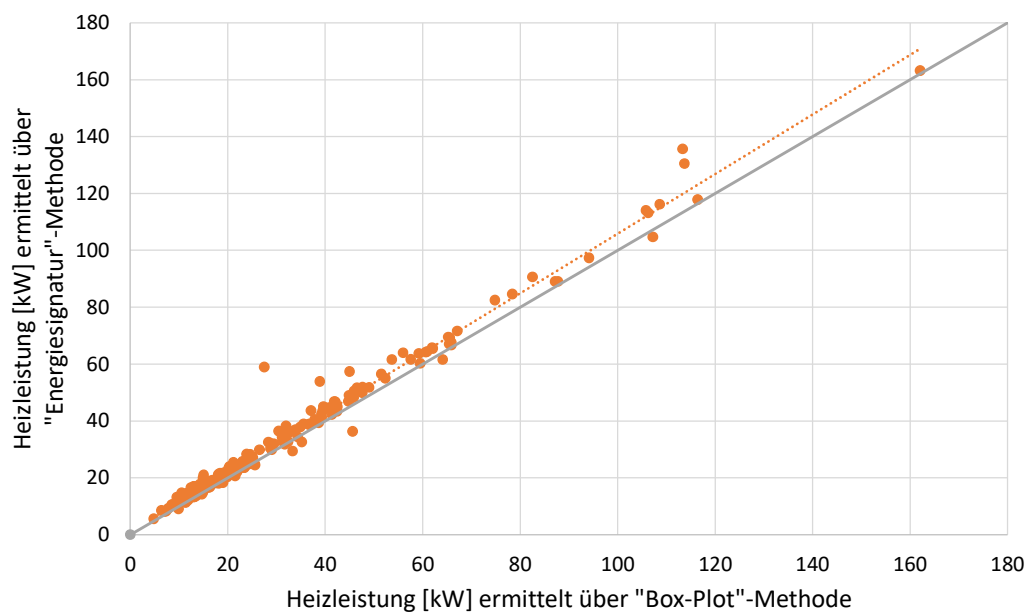


Abbildung 103: Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Norm-Heizlast aus den EKZ-Messdaten für Tagesmittelwerte.

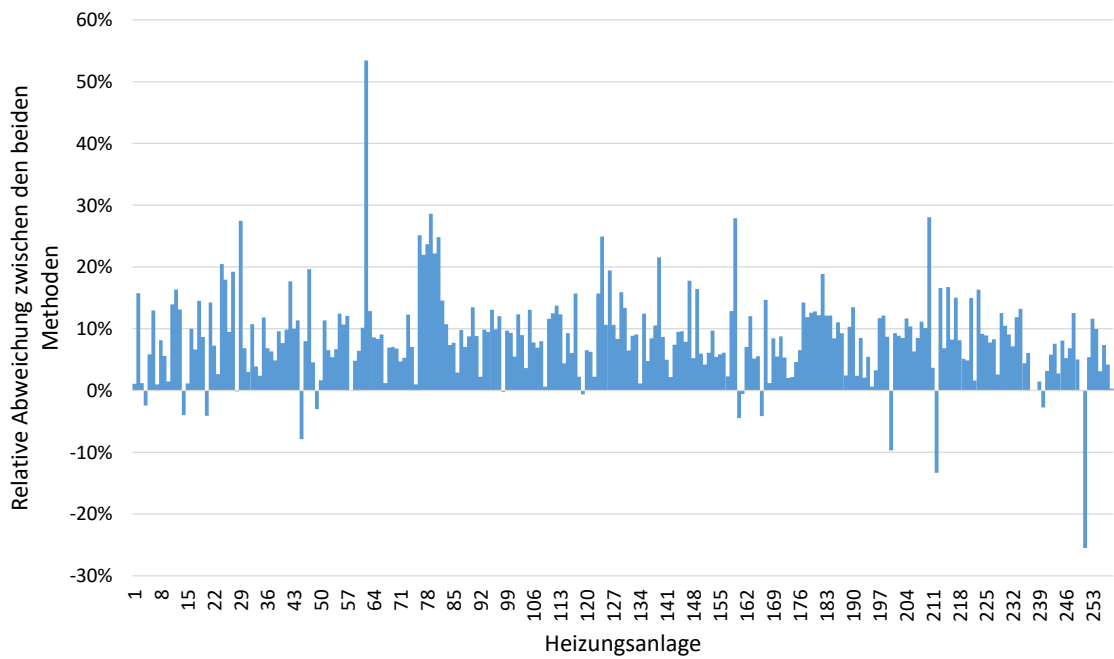


Abbildung 104: Relative Abweichung zwischen den beiden Methoden zur Ermittlung der Heizleistung aus Messdaten (EKZ) für Tagesmittelwerte. Median Abweichung beträgt +8%, wobei ein positiver Wert bedeutet, dass die mit der "Energiesignatur"-Methode die Leistung um 8% höher ausfällt als bei der "Box-Plot"-Methode.



Annex D: Validierung Wärmepumpen

OST FZ: Enren ENX 033 DL

Dies ist eine 4-stufige WP der Firma Enren. Die PM wurde anhand vorhandener Messdaten aus dem Betrieb erstellt. Damit können aber nur Zustände identifiziert werden, die als Messdaten aus dem Betrieb vorliegen. Dies bedeutet, dass die Senkentemperaturen nur in einem engen Temperaturband variieren, in diesem Fall zwischen 30 °C und 38 °C auf Kondensatorseite und zwischen 7 °C und 16 °C auf Verdampferseite. Da in der Simulation jedoch abweichende Temperaturniveaus entstehen können, mussten Datenpunkte ausserhalb dieser Bereiche extrapoliert werden. dabei wurde darauf geachtet, dass auch im extrapolierten Bereich keine unrealistischen Werte entstehen.

Dieses Modell nutzt als Eingabe die Quellen- und Senkentemperatur und die Anzahl zugeschalteter Verdichter, und liefert anschliessend entsprechende Betriebsdaten für eine Stufe. In der Validierung wurde die Regelung so eingestellt, dass der Wärmebedarf abgefahren wird und die elektrische Energie anschliessend verglichen wurde. In Abbildung 105 ist die Auswertung dieser Simulation ersichtlich. Die elektrische Energie wird über den Verlauf eines Jahres um ca. 6 % unterschätzt. Zusätzlich ist die Leistung dargestellt, wobei die Wärmeleistung sehr genau reproduziert wird und die elektrische Energie eine geringe Abweichung aufweist.

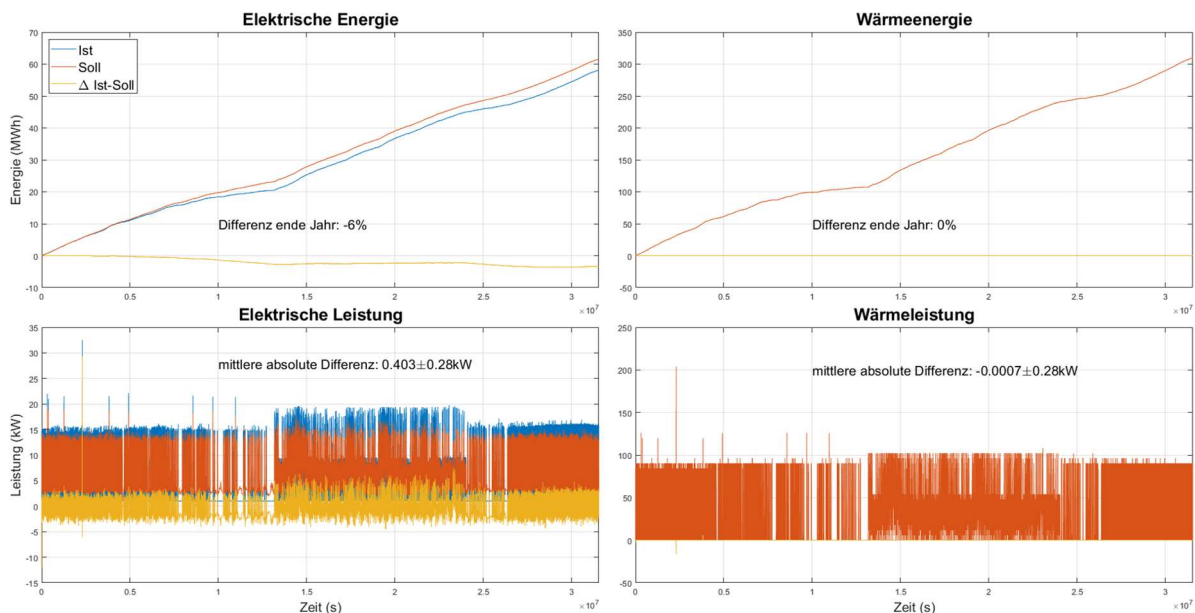


Abbildung 105: Validierung WP mit vier Verdichtern.

Invertergeregelt Sole-Wasser-Wärmepumpe

Aufgrund des grossen Zeitaufwandes und der oben genannten Einschränkungen einer Performance-Map aus Messdaten wurde die Entscheidung getroffen, für die Invertergeregelt Sole-Wasser Wärmepumpe ein Kennfeld einer BS2-Niederhub-Wärmepumpe zu erstellen. Für dieses Modell standen viele Kennfeldwerte basierend auf einem mit Labor- und

Feldmessdaten parametrisierten Modell zur Verfügung. Aus ca. 100 Kennfeldwerten wurde mittels Machine-learning ein Gütegrad-Modell erstellt. Dieses wurde mittels Betriebsdaten desselben Typs validiert.

Das Modell lässt sich auf zwei Arten ansteuern: Zum einen kann eine gewünschte Heizleistung mit den entsprechenden Quellen- und Senkentemperaturen eingegeben werden. Ausgegeben wird im Anschluss die aufgewendete elektrische Leistung und die aufgenommene Quellenleistung aus dem Erdreich. Zusätzlich wird die entsprechende Drehzahl ausgegeben. Zum anderen kann eine Drehzahl mit den entsprechenden Quellen- und Senkentemperaturen vorgegeben werden. Im Anschluss gibt das Modell die Heiz-, Kühl- und elektrische Leistung aus. In diesem Modus wurde das Modell auch implementiert und getestet.

Für die Validierung der PM wurden Messdaten aus dem realen Betrieb verwendet. In diesen Messdaten sind die Drehzahlen der WP aufgezeichnet worden. Anhand dieser Drehzahlen wurden die abgegebene Heizleistung und Energie sowie die Quellen- bzw. Kälteleistung und die elektrische Leistung und Energie ausgewertet. In Abbildung 106 ist ersichtlich, wie genau das Modell die Messdaten trifft.

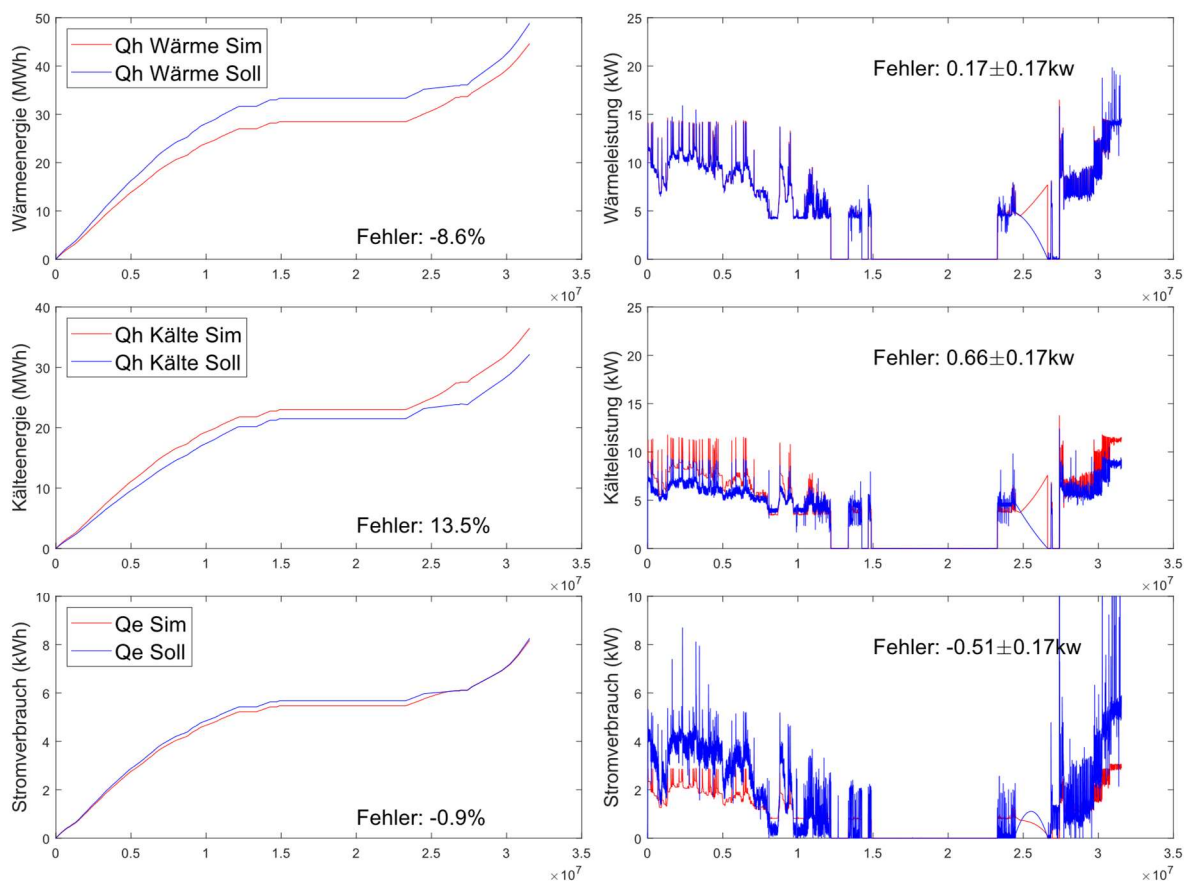


Abbildung 106: Messdatenvalidierung BS2 Niederhub WP.

Besonders die elektrische Energie wird dabei sehr gut mit lediglich 0.9% Abweichung zu den Messdaten abgebildet.



Annex E: Beispiel einer Leistungsberechnung aus der Praxis

Dimensionierung Wärmeerzeugung Heizung

Wärmebedarf Heizung		θ_a					$\Phi_{HL, Geb}$
		[°C]					[kW]
Gebäudeheizlast SIA 384.201 ; 18.07.2017		-7					73.678

Wärmebedarf Warmwasser		θ_a	θ_{KW}	θ_{WW}	c	WP Laufzeit	Φ_{WW}
		[h]	[°C]	[°C]	[kJ/kg·K]	[h]	[kW]
		2000	10	50	4.187	20	4.652

Wärmebedarf Lüftung		Luftmenge	θ_a	$\theta_{LE\ ein}$	$\theta_{LE\ aus}$	$\Phi_{LE\ Frost}$	$\Phi_{LE\ normal}$	$\Phi_{LE\ -7}$
		[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[kW]	[kW]	[kW]
Lager / Produktion HZ=32.7		6850	-14	16.1	21	32.70	10.74	8.593
Büro / Sitzungsraum HZ=39.3		9220	-14	15	29	39.30	41.31	34.581
Aufenthaltsräume / Nebenräume HZ=50.4		9920	-14	13.9	21	50.40	22.54	18.031
Küche HZ=25.6		5750	-14	15.2	20	25.60	8.83	7.014
Restaurant HZ=18.8		3480	-14	13.2	21	18.80	8.69	6.949
Lager		4260	-14	15.8	26	22.70	13.90	11.471
						189.50	106.01	86.64
Wärmebedarf Lüftung bei Gleichzeitigkeitsfaktor						0.6	86.639	51.983

Erforderliche Heizleistung ohne Sperrzeiten				[kW]
Wärmebedarf Heizung			$\Phi_{HL, Geb}$	73.678
Wärmebedarf Warmwasser			Φ_{WW}	4.652
Wärmebedarf Lüftung			$\Phi_{LE\ -7}$	51.983
Ergebnis				Φ_{WP} 130.313

Abbildung 107: Ausschnitt aus der Heizlastberechnung für das Oblamatik Bürogebäude.

Dimensionierung Wärmeerzeugung Kälte

Auslegungstemperatur Kühlung		θ_a	35	[°C]
Kältebedarf Gebäude				
		θ_a		
		[°C]	35	$\Phi_{KL, Geb}$
Gebäudekühllast VDI 2078 ; 25.07.2017				153.111

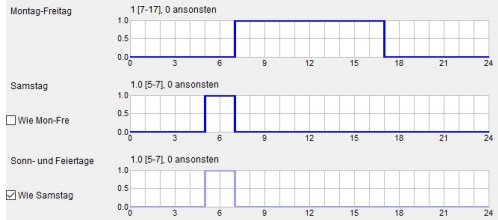
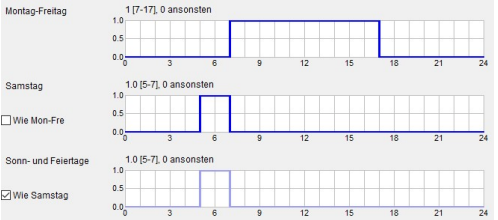
Kältebedarf Serverräume					$\Phi_{KL, Serv}$
					[kW]
					24.000

Kältebedarf Lüftung		Luftmenge	θ_a	Φ_{LK}	$\Phi_{KL\ +35}$
		[m ³ /h]	[°C]	[kW]	[kW]
Lager / Produktion KL=16.7		6850	33	16.70	17.712
Büro / Sitzungsraum KL=23.1		9220	33	23.10	24.500
Aufenthaltsräume / Nebenräume KL=24.2		9920	33	24.20	25.667
Küche KL=15.9		5750	33	15.90	16.864
Restaurant KL=8.5		3480	33	8.50	9.015
				88.40	93.76
Wärmebedarf Lüftung bei Gleichzeitigkeitsfaktor				0.8	75.006

Erforderliche Kühllast ohne Sperrzeiten				[kW]
Kältebedarf Gebäude			$\Phi_{KL, Geb}$	153.111
Kältebedarf Server			$\Phi_{KL\ Server}$	24.000
Kältebedarf Lüftung			$\Phi_{KL\ +35}$	75.006
Ergebnis				$\Phi_{Kälte}$ 252.117

Abbildung 108: Ausschnitt aus der Kühllastberechnung für das Oblamatik Bürogebäude.

Annex F : Eingaben und Annahmen für die Berechnungen

Konstruktion	Oblamatik		OST-Forschungszentrum	
	Bauteil	U – Wert [W/m²K]	Bauteil ⁴⁹	U – Wert [W/m²K]
	Decke zu Unbeheizt	0.19	Flachdach	0.15
	Flachdach EG	0.16	Boden gegen Aussen	0.15
	Flachdach	0.07	Boden gegen Erdreich	0.15
	Wand zu Erdreich	0.23	Wand zu Erdreich	0.15
	Wand zu Unbeheizt	0.23	Decke gegen Aussen	0.15
	Aussenwand	0.17		
	Boden zu Erdreich 2.UG	0.20		
	Boden zu Erdreich EG	0.12		
	Boden zu unbeheizt EG	0.12		
	Boden zu Aussen	0.18		
	Fenster	1.4 (U _f) 0.5 (U _g) g = 0.4 (-) U _{total} = 0.72	1.4 (U _f) 0.7 (U _g) g = 0.38 (-) U _{total} = 0.77	
	Durchschnittlicher U-Wert = 0.28 [W/m²K]			
Internen Lasten	Raumnutzungsdaten nach SIA 2024 ⁵⁰		Raumnutzungsdaten nach SIA 2024	
Lüftung	Zone	Regelung	Zone	Regelung
	Büro / Sitzungsräumen	VVR, CO ₂ + Zeitplan	Büro	VVR, CO ₂ + Zeitplan
	Labor / Produktion	VVR + Zeitplan		
	Restaurant EG	VVR + Zeitplan		
	Küche	VVR + Zeitplan		
	Aufenthalt / Nebenraum	VVR, CO ₂ + Zeitplan KVR + Zeitplan		
	Zeitplan 		Zeitplan 	
	1 = Ein 0 = Aus		1 = Ein 0 = Aus	

⁴⁹ Im Nachweis werden die Grenzwerte ohne Berechnung der U-Werte und damit ohne Aufbauschichten angegeben. In der Simulation wurden die gleichen U-Werte genommen

⁵⁰ Die Dynamische Simulation für das Jahr 2021 wird im Winter auf 20% und im Sommer auf 60% reduziert



Heizung / Kühlung	Ideales Heiz- / Kühlelement		Ideales Heiz- / Kühlelement	
Raumtemperaturen	Variable Sollwert nach SIA380/2:2022		Konstante Sollwert nach SIA 380/2:2022	
Klimastation	Berechnung	Klimastation	Berechnung	Klimastation
	Winterlicher Wärmeschutz SIA 380/1	Chur (SIA 2028:2010)	Winterlicher Wärmeschutz SIA 380/1	Zürich-MeteoSchweiz (SIA 2028:2010)
	Heizlastermittlung SIA 380/2	Chur (Heizen) (SIA 2028:2010)	Heizlastermittlung SIA 380/2	Zürich-MeteoSchweiz (Heizen) (SIA 2028:2010)
	Kühllastermittlung SIA 380/2	Chur (Kühlen) (SIA 2028:2010)	Kühllastermittlung SIA 380/2	Zürich-MeteoSchweiz (Kühlen) (SIA 2028:2010)
	Dynamische normberechnung	Chur (normal) (SIA 2028:2010)	Dynamische normberechnung	Zürich-MeteoSchweiz (normal) (SIA 2028:2010)
	Dynamische Realberechnung	Chur Jahr 2021(ida web / NASA Power)	Dynamische Realberechnung	Rapperswil Jahr 2021(Solarpüflabor SPF)
Sonnenschutz	Sonnenschutzregelung nach SIA 180 C1.		Sonnenschutzregelung nach SIA 180 C1.	