



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 23.12.2022

---

# **Vermeidung von Effizienzeinbussen von Heizungswärmepumpen durch digitale Betriebsanalyse**

DIBA-WP

---



**HSLU** Hochschule  
Luzern

ALERA  
ENERGIES

**Datum:** 23.12.2022

Ort: Horw und Ballwil

Subventionsgeberin:  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Subventionsempfänger/innen:  
Hochschule Luzern Technik & Architektur  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

Alera energies AG  
Gibelfühstrasse 9  
6275 Ballwil  
[www.alera-energies.ch](http://www.alera-energies.ch)

Autor/in:  
Raphael Agner, Hochschule Luzern, [raphael.agner@hslu.ch](mailto:raphael.agner@hslu.ch)  
Matthias Etterlin, Alera energies AG, [m.etterlin@alera-energies.ch](mailto:m.etterlin@alera-energies.ch)  
Daniel Troxler, Hochschule Luzern, [daniel.troxler@hslu.ch](mailto:daniel.troxler@hslu.ch)  
Lukas Gasser, Alera energies AG, [l.gasser@alera-energies.ch](mailto:l.gasser@alera-energies.ch)  
Beat Wellig, Hochschule Luzern, [beat.wellig@hslu.ch](mailto:beat.wellig@hslu.ch)

BFE-Projektbegleitung:  
Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)  
Stephan Renz, [info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)

BFE-Vertragsnummer: SI/501973-01

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



## Zusammenfassung

Der Energiebedarf zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser beträgt rund 40 % des Endenergieverbrauchs der Schweiz [1]. Diese Bereitstellung verursacht rund 24 % der Schweizer Treibhausgas-Emissionen [2]. Die Wärmepumpe (WP) stellt die Kerntechnologie zur Ermöglichung der emissionsfreien Wärmebereitstellung dar und deren breiter Einsatz ist zur Erreichung des Ziels «Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050» unerlässlich.

Die WP-Technologie ist heute weit ausgereift. Allerdings ist die Effizienz im Betrieb von WP unter anderem stark von der richtigen Installation und Einstellung abhängig. Mehrere Studien haben einen signifikanten «Performance-Gap» im Feldbetrieb ausgewiesen. Während einige Ursachen für Effizienz-einbussen, z. B. aufgrund von falschen Auslegungen, während dem Betrieb nicht mehr behoben werden können, sind fehlerhafte Einstellungen an der WP in der Regel korrigierbar. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf letztere Ursache, die fehlerhaften Einstellwerte.

Das Ziel dieses BFE-Projekts ist die Schaffung der Grundlagen für eine digitale Betriebsanalyse (DIBA) von Heizungswärmepumpen bis 25 kW Heizleistung zur Erreichung hoher Effizienzwerte im Feldbetrieb. Dazu muss untersucht werden, welche Betriebsdaten der WP und Metadaten des Gebäudes erforderlich und welche Berechnungsmethoden für die DIBA zu verwenden sind. Dabei soll mit möglichst wenig Daten eine möglichst hohe Aussagekraft erreicht werden. Im vorliegenden Bericht wird aufgezeigt, welche Fehler in der Praxis auftreten, wie sich diese auf Effizienz und Lebensdauer der WP auswirken und wie ausgewählte Fehler mit hoher Relevanz mittels DIBA erkannt und bestenfalls behoben werden können.

Die im Feld vorkommenden Fehler wurden im Rahmen von Recherchen und Experten-Meetings erhoben und in einer umfassenden Fehlerliste zusammengefasst (insgesamt 130 Fehler). Zur Sicherstellung der Umsetzbarkeit der DIBA wurden zudem die verfügbaren Betriebsdaten von auf dem Markt verfügbaren WP analysiert und zusammengetragen. Die total 130 Fehler wurden kategorisiert und darauf basierend 27 Fehler für die weitere Analyse berücksichtigt. Für die quantitative Bewertung dieser Fehler wurden Simulationsmodelle, bestehend aus WP, Hydraulik und Gebäude, erstellt. In der nachfolgenden Simulationsstudie wurden rund 400 Jahresgangsimulationen zur Bewertung der Fehlereinflüsse durchgeführt und ausgewertet. Auf Basis der Simulationsresultate und Diskussionen mit der Begleitgruppe wurden im Anschluss die relevantesten Fehler in Bezug auf Energieeffizienz und Lebensdauerwirkung selektioniert. Für diese vier Fehler wurden Berechnungsvorgehen für die Ausführung der DIBA erarbeitet. Diese Berechnungsvorgehen verwenden Betriebs- und ggf. Metadaten des Systems und basieren auf physikalischen Grundlagen:

- **Fehlerhafte Heizkurveneinstellung:** Hierzu wurden zwei aufeinander aufbauende Erkennungsansätze erarbeitet. Sie unterscheiden sich in ihrer Komplexität und dem Bedarf an Betriebsdaten. Beide basieren auf der bestmöglichen Ausnutzung der Wärmeübertragungsfähigkeit des Heizwärmeabgabesystems, so dass erkannt werden kann, ob und wie weit die Vorlauftemperatur des Heizwassers reduziert werden kann.
- **Fehlerhafte Einstellung der Quellenpumpe bei Sole/Wasser-WP:** Es wird aufgezeigt, dass der Massenstrom der Quellenpumpe in (optimaler) Korrelation mit der Kältemittel-Überhitzung stehen muss. Das Berechnungsvorgehen vergleicht folglich die Temperaturspreizung der Sole mit dem Überhitzungs-Sollwert und ist relativ einfach umsetzbar.
- **Fehlerhafte Umschaltemperatur auf die WP-internen elektr. Heizstäbe:** Zur Vermeidung einer zu frühen Umschaltung auf elektrische Heizstäbe ist zu empfehlen, die Regelstrategie zu überprüfen und die Umschaltung direkt anhand der limitierenden Prozessgrössen (Kondensationsdruck und Heissgastemperatur) zu vollziehen. Wenn dies nicht möglich ist, sieht das Berechnungsvorgehen eine periodische Überprüfung dieser Grössen vor.



- **Verschlechterung des Abtauverhaltens:** Zur Überprüfung der Verschlechterung des Abtauverhaltens wurde eine Methodik in Anlehnung an die statistische Prozesskontrolle erarbeitet. Sie analysiert die Abtaudauer und Abtauhäufigkeit in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen.

Für die Erarbeitung der Berechnungsvorgehen wurde unter anderem auf die Simulationsergebnisse aus den Fehlerbewertungen zurückgegriffen. Die Berechnungsvorgehen wurden aber auch mithilfe der Simulationsmodelle getestet und auf ihre Wirksamkeit überprüft.

Es zeigt sich, dass die Fehlereinflüsse aufgrund der grossen Anzahl an installierten und noch zu installierenden WP in der Schweiz von Relevanz für das Schweizer Energiesystem sind. Die Überhöhung der Heizkurven um 3 K aller WP in Schweizer Privathaushalten führt gemäss durchgeführten Simulationen beispielsweise zu einem vermeidbaren jährlichen elektrischen Energiebedarf von 113 GWh im Jahr 2021, was rund 0.2 % des gesamten Schweizer Elektrizitätsbedarfs entspricht.

Im Rahmen des Projekts DIBA-WP beteiligte sich das Projektteam am Annex 56 des Technology Collaboration Program (TCP) for Heat Pumping Technologies (HPT) der International Energie Agentur (IEA). Unter der Leitung des Austrian Institute of Technology (AIT) wurde das Thema «Digitalization and IoT for Heat Pumps» in einer internationalen Kollaboration bearbeitet. Im Rahmen dieser Kooperation konnten insbesondere Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Bezug auf die Digitalisierung identifiziert und mögliche Entwicklungsrichtungen für die Weiterentwicklung der Digitalisierung von WP aufgezeigt werden.

Hinsichtlich weiterführender Arbeiten ist der Fokus auf die Erkennung fehlerhafter Heizkurveneinstellung zu legen. In dieser Arbeit konnten die Grundlagen dafür erarbeitet, aber noch nicht im Labor und vor allem nicht im Feldbetrieb überprüft werden. Ebenfalls sind die formulierten Grundlagen und möglichen Vereinfachungen bezüglich Datenerhebung genauer zu untersuchen, um die Umsetzung im Feld zu ermöglichen. Der zur Erkennung der Verschlechterung des Abtauverhaltens gewählte Ansatz, auf Basis der statistischen Prozesskontrolle, könnte bei geeigneten Anwendungsfällen auf weitere Prozessgrössen übertragen werden.

WP schöpfen aufgrund verschiedener Fehler bzw. Fehleinstellungen das Potenzial für hohe Effizienzwerte häufig nicht aus. Im vorliegenden Bericht wird aufgezeigt, wie durch die DIBA relevante Fehler erkannt und die Ursachen behoben werden können. Damit werden WP-Herstellern die notwendigen Grundlagen zur Verfügung gestellt und ein Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz von WP im Feld geleistet.



## Résumé

L'énergie nécessaire pour le chauffage et l'eau chaude représente environ 40 % de la consommation énergétique totale en Suisse [1]. Elle est aussi à l'origine d'environ 24 % des émissions suisses de gaz à effet de serre [2]. La principale technologie pour fournir de la chaleur sans émissions est la pompe à chaleur (PAC). Son utilisation à grande échelle est essentielle pour atteindre l'objectif de «zéro émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050».

La technologie PAC est déjà bien rodée aujourd'hui. Mais l'efficacité des PAC en fonctionnement dépend aussi largement de leur installation et des réglages effectués. Plusieurs études montrent un «écart de performance» significatif sur le terrain. Alors que certaines des causes de cette perte d'efficacité, comme les erreurs de dimensionnement par exemple, ne peuvent plus être corrigées une fois la mise en service réalisée, des réglages incorrects sur les PAC peuvent généralement être rattrapés. Le présent document se focalise sur cette dernière cause, à savoir les réglages incorrects.

L'objectif de ce projet de l'OFEN est de poser les bases d'une analyse numérique de fonctionnement (ANF) des pompes à chaleur avec une puissance calorifique jusqu'à 25 kW, afin d'atteindre des rendements élevés sur le terrain. Il faut dès lors se demander quelles sont les données d'exploitation des PAC et les métadonnées du bâtiment, ainsi que les méthodes de calcul à utiliser pour l'ANF. Il s'agit d'obtenir un maximum de pertinence avec le moins de données possible. Le présent rapport met en évidence les erreurs qui se produisent dans la pratique, leur impact sur l'efficacité et la durée de vie des PAC, ainsi que la manière dont les erreurs sélectionnées les plus pertinentes peuvent être détectées et, au mieux, être corrigées par l'ANF.

Les erreurs commises sur le terrain ont été collectées lors de recherches et de réunions d'experts, puis elles ont été regroupées dans une liste détaillée d'erreurs (130 erreurs au total). Afin de garantir la faisabilité de l'ANF, les données de fonctionnement disponibles des PAC commercialisées ont également été analysées et rassemblées. Les 130 erreurs au total ont ensuite été catégorisées, et 27 erreurs ont été soumises à une analyse plus approfondie. Pour l'évaluation quantitative de ces erreurs, des modèles de simulation ont été élaborés, comprenant la PAC, le système hydraulique et le bâtiment. Dans l'étude de simulation qui a suivi, environ 400 simulations par année de fabrication ont été réalisées et évaluées pour déterminer les impacts des erreurs. Sur la base des résultats de ces simulations et des discussions avec le groupe d'accompagnement, les erreurs les plus pertinentes en matière d'efficacité énergétique et d'impact sur la durée de vie ont alors été sélectionnées. Pour ces quatre erreurs, des méthodes de calcul ont été élaborées pour la réalisation de l'ANF. Ces méthodes de calcul utilisent les données d'exploitation et, le cas échéant, les métadonnées du système et se fondent sur des bases physiques :

- **Réglage incorrect des courbes de chauffage** : deux approches de détection basées l'une sur l'autre ont été élaborées à cet usage. Elles diffèrent par leur complexité et leur besoin en données opérationnelles. Toutes les deux se fondent sur l'exploitation optimale de la capacité de transfert thermique du système de distribution de chaleur, qui permet de déterminer si et dans quelle mesure la température de départ de l'eau de chauffage peut être réduite.
- **Réglage incorrect de la pompe de captage dans le cas de PAC eau/eau glycolée** : il est prouvé que le débit massique de la pompe de captage doit être en corrélation (optimale) avec la surchauffe du fluide frigorigène. La méthode de calcul compare donc l'étalement de la température de l'eau glycolée à la valeur de consigne de surchauffe. Elle est relativement facile à mettre en œuvre.
- **Température de commutation incorrecte sur les corps-de-chauffe électriques internes aux PAC** : afin d'éviter une commutation prématurée sur les corps-de-chauffe électriques, il est recommandé de vérifier la stratégie de régulation et d'effectuer la commutation directement à l'aide des grandeurs restrictives (pression de condensation et température du gaz chaud). Si cela n'est pas possible, la méthode de calcul prévoit une révision périodique de ces grandeurs.



- **Détérioration du comportement de dégivrage** : une méthodologie inspirée du contrôle statistique des processus a été élaborée pour vérifier la détérioration du comportement de dégivrage. Elle analyse la durée et la fréquence de dégivrage en fonction des conditions ambiantes.

Les résultats des simulations des évaluations des erreurs ont été utilisés pour élaborer les méthodes de calcul. Ces méthodes de calcul ont également été testées à l'aide des modèles de simulation, et leur efficacité a été vérifiée.

En raison du grand nombre de PAC installées et à installer en Suisse, il apparaît que ces erreurs ont un impact énorme à l'échelle du système énergétique suisse. Selon les simulations effectuées, l'augmentation excessive des courbes de chauffage de 3 K sur l'ensemble des PAC installées dans les ménages privés suisses conduit par exemple à une consommation annuelle d'énergie électrique qui pourrait être évitée de 113 GWh en 2021, soit environ 0,2 % de la demande totale d'électricité de la Suisse.

Dans le cadre du projet DIBA-WP (ANF-PAC), l'équipe de projet a participé à l'Annexe 56 du Technology Collaboration Program (TCP) for Heat Pumping Technologies (HPT) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Sous la direction de l'Austrian Institute of Technology (AIT), le thème de la « Digitalization and IoT for Heat Pumps » a fait l'objet d'une collaboration internationale. Cette coopération a notamment permis d'identifier les points communs et les différences en matière de numérisation, et de dégager des pistes de développement possibles pour la numérisation des PAC.

En ce qui concerne la suite du travail, l'accent doit être mis sur l'identification des réglages incorrects des courbes de chauffage. Ce travail a permis de poser les bases, mais ces dernières n'ont pas encore été vérifiées en laboratoire et en particulier pas sur le terrain. Il faudra également examiner de plus près les bases formulées et les simplifications possibles en matière de collecte des données afin de permettre leur mise en œuvre sur le terrain. L'approche adoptée pour détecter la détérioration du comportement de dégivrage, basée sur le contrôle statistique des processus, peut être utilisée pour d'autres grandeurs si elle est appliquée de manière appropriée.

Souvent, les pompes à chaleur n'exploitent pas tout leur potentiel à cause d'erreurs ou de réglages incorrects. Le présent rapport montre comment l'ANF permet de détecter les erreurs pertinentes et d'en corriger les causes. Les fabricants de PAC disposent ainsi des bases nécessaires et contribuent à l'amélioration de l'efficacité énergétique des PAC sur le terrain.



## Summary

The energy demand for the provision of space heating and hot water amounts to about 40 % of the final energy consumption in Switzerland [1]. This causes about 24 % of the Swiss greenhouse gas emissions [2]. The heat pump (HP) represents the core technology to enable zero-emission heat supply. Its widespread use is essential to achieve the goal of "net zero greenhouse gas emissions by 2050".

Today, HP technology is well-matured. However, the efficiency in the operation of HPs is, among other things, highly dependent on proper installation and adjustment. Several studies have shown a significant "performance gap" in field operation. While some causes of efficiency losses, e.g. due to incorrect design, cannot be corrected during operation, incorrect settings of the HP are usually correctable. The present work focuses on the latter cause, the incorrect settings.

The aim of this SFOE project is to create the basis for a digital operational analysis (DOA) of HPs up to 25 kW heating capacity in order to achieve high efficiency values in field operation. For this purpose, it must be investigated which operating data of the HP and metadata of the building are required and which calculation methods are to be used for the DOA. The aim is to achieve the highest possible informative significance with as little data as possible. This report shows which errors occur in practice, how they affect the efficiency and service life of the HP, and how selected errors with high relevance can be detected and, if possible, eliminated by means of DOA.

The faults occurring in the field were collected during investigations and expert meetings and summarized in a comprehensive list of faults (130 faults in total). To ensure the feasibility of the DOA, the accessible operating data of HPs on the market were also analyzed and compiled. A total of 130 faults were categorized and based on this, 27 faults were considered for further analysis. For the quantitative evaluation of these errors, simulation models consisting of HP, hydraulics and building were created. In the subsequent simulation study, about 400 annual simulations were carried out and evaluated to assess the influence of the faults. On the basis of the simulation results and discussions with the monitoring group, the most relevant faults in terms of energy efficiency and device lifetime impact were subsequently selected. For these four faults, calculation procedures for the execution of the DOA were developed. These calculation procedures use operating data and, if necessary, metadata of the system and are based on physical principles:

- **Faulty heating curve setting:** Two successive detection approaches were developed to this end. They differ in their complexity and the need for operating data. Both are based on the best possible utilization of the heat transfer capacity of the heating system, so that it can be determined whether and how far the supply temperature of the heating water can be reduced.
- **Incorrect setting of the source pump within brine/water HPs:** It is shown that the mass flow of the source pump must be in (optimal) correlation with the refrigerant superheat. Consequently, the calculation procedure compares the brine temperature spread with the superheat setpoint and is relatively easy to implement.
- **Incorrect switchover temperature to the HP-internal electric heating rods:** To avoid a too early switchover to electric heating rods, it is recommended to check the control strategy and to perform the switchover directly on the basis of the limiting process variables (condensation pressure and hot gas temperature). If this is not possible, the calculation procedure provides for a periodic check of these variables.
- **Deterioration of defrosting behavior:** To check the deterioration of defrosting behavior, a methodology based on statistical process control was developed. It analyzes the defrost duration and frequency as a function of the ambient conditions.

For the development of the calculation procedures, among other things, the simulation results from the error evaluations were used. Furthermore, the calculation procedures were specifically tested with the aid of the simulation models and checked for their effectiveness.



It can be seen that the influences of the faults are relevant for the Swiss energy system due to the large number of HPs installed and still to be installed in Switzerland. For example, according to the simulations, the increase of the heating curves by 3 K of all HPs in Swiss private households leads to an avoidable annual electrical energy demand of 113 GWh in 2021, which corresponds to about 0.2 % of the total Swiss electricity demand.

As part of the DIBA-WP project, the project team participated in the Annex 56 of the Technology Collaboration Program (TCP) for Heat Pumping Technologies (HPT) of the International Energy Agency (IEA). Under the leadership of the Austrian Institute of Technology (AIT), the topic of "Digitalization and IoT for Heat Pumps" was worked on in international collaboration. Within the framework of this collaboration, it was possible to identify commonalities and differences with regard to digitalization and to identify possible development directions for the further development of the digitalization of HP.

Concerning further work, the focus is to be placed on the detection of faulty heating curve settings. In this work, the basics for this were elaborated, but not yet verified in the laboratory and especially not in field operation. Likewise, the formulated basics and possible simplifications concerning data collection have to be investigated in more detail in order to enable the implementation in the field. The approach chosen to detect the deterioration of the defrosting behavior, based on statistical process control, could be applied to other process variables in suitable applications.

HPs often do not exploit their potential for high efficiency values due to various errors or misadjustments. This report shows how DOA can identify relevant errors and eliminate the causes. This provides HP manufacturers with the necessary basis and contributes to increasing the energy efficiency of HPs in the field.



## Take-home messages

- Die Effizienz von Heizungswärmepumpen hängt stark von der korrekten Einstellung ab. Diese Fehleinstellungen führen dabei vielfach zu keinem zusätzlichen Komfortgewinn, allerdings zu signifikanten Effizienzeinbussen, die infolge unnötiger (Exergie-)Verluste im System entstehen.
- Zur Erkennung der wichtigsten Fehleinstellungen hinsichtlich Energieeffizienz und Auswirkung auf die Lebensdauer der Wärmepumpe wurden in diesem Projekt Berechnungsvorgehen entwickelt. Sie erlauben auf Basis von Betriebsdaten eine Aussage über die Qualität der entsprechenden Einstellungen.
- Für zukünftige Heizungssysteme ist die Kommunikation zwischen der Wärmepumpe und der Wärmeabgabe-Regelung anzustreben. Damit sind der Wärmepumpe z. B. Auslastungsgrade der einzelnen Heizzonen bekannt, was die Bestimmung der optimalen Vorlauftemperatur vereinfacht. Eine manuelle Einstellung der Heizkurve erübrigt sich damit im besten Fall.
- Infolge der zu erwartenden Anzahl Wärmepumpen von 1.5 Mio. Stk. im Jahr 2050, nimmt die Relevanz von Effizienzverlusten bei Heizungswärmepumpen zu. Bereits heute beträgt das Einsparpotenzial elektrischer Energie, bei der Annahme, dass die Heizkurven aller in der Schweiz installierten WP am Auslegungspunkt um 3 K zu hoch eingestellt sind, ca. 113 GWh. Projiziert auf das Jahr 2050 ist bei dieser Annahme allein in Bezug auf falsche Heizkurven-einstellungen von einem Einsparpotenzial von rund 345 GWh elektrischer Energie auszugehen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>5</b>
<b>Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>7</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	15
1.2 Motivation des Projektes .....	15
1.3 Projektziele .....	16
1.4 Vorgehen und Berichtstruktur.....	16
<b>2 Monitoring und Fehlererkennung von WP-Systemen</b> .....	<b>18</b>
2.1 Wärmepumpen-Feldmessungen in der Schweiz.....	18
2.2 Performance Gap .....	18
2.3 Fehlererkennung/Betriebsanalyse.....	19
<b>3 Randbedingungen und Systemgrenze</b> .....	<b>20</b>
3.1 Systemgrenze.....	20
3.2 Hydraulische Systembauvarianten von Wärmepumpen-Heizsystemen .....	20
3.3 Erfasste Betriebsdaten von WP-Heizsystemen.....	22
3.4 Metadaten von Gebäude und System .....	25
3.5 Gängige Regelstrategien von Wärmepumpen .....	26
<b>4 Fehler an WP-Systemen im Feld</b> .....	<b>27</b>
4.1 Fehlerkategorien.....	27
4.1.1 Fehlerhafte Einstellwerte .....	27
4.1.2 Fehlerhafte Auslegung, Planung und Installation.....	27
4.1.3 Funktionsstörungen .....	28
4.1.4 Fehler im Kühlbetrieb .....	28
4.1.5 Fehlerhafte Komponenten-Auslegungen und Entscheidungen WP-Hersteller .....	28
4.1.6 Ineffiziente Regelstrategien WP-Hersteller .....	28
4.2 Betrachtete Fehler .....	29
4.3 Annahmen und Abgrenzungen für die weiteren Untersuchungen .....	30
<b>5 Simulationsmodell WP-System und Gebäude</b> .....	<b>31</b>
5.1 Evaluation der Simulationsumgebung .....	31
5.2 Aufbau von WP-Systemen innerhalb der Simulationsumgebung .....	32



5.2.1	Wärmepumpenmodell .....	32
5.2.2	Gebäudemodell .....	33
5.2.3	Hydraulik .....	36
5.2.4	Regelstrategie und Einstellwerte .....	37
5.3	Modellabgleich .....	38
<b>6</b>	<b>Fehlersimulation .....</b>	<b>39</b>
6.1	Simulation von Fehlern im Gesamtsystem .....	39
6.2	Kriterien zur Bewertung von simulierten Fehlern .....	39
6.2.1	Komfortverletzung .....	39
6.2.2	Effizienzeinfluss .....	40
6.2.3	Lebensdauereinfluss .....	40
6.3	Darstellung und Diskussion ausgewählter Simulationsergebnisse .....	40
6.3.1	Heizgrenze .....	41
6.3.2	Heizkurve .....	42
6.3.3	Massenstrom Quellenpumpe .....	44
6.3.4	Umschalttemperatur auf Heizstäbe zur Warmwasser-Aufbereitung .....	45
6.4	Bewertung und Selektion der simulierten Fehler .....	46
<b>7</b>	<b>Berechnungsvorgehen zur digitalen Betriebsanalyse .....</b>	<b>47</b>
7.1	Erkennung einer falsch eingestellten Heizkurve .....	47
7.1.1	Grundlegende Zusammenhänge der HeizkurvenEinstellung .....	47
7.1.2	Berechnungsvorgehen Mittleres Massenstromverhältnis .....	49
7.1.3	Berechnungsvorgehen kA-Wert .....	54
7.1.4	Erforderliche Daten .....	61
7.1.5	Digitalisierte FBH-Regelung .....	62
7.2	Erkennung einer falsch eingestellten Quellenpumpe .....	63
7.2.1	Motivation und Ziel .....	63
7.2.2	Grundlegende Zusammenhänge .....	64
7.2.3	Berechnungsvorgehen .....	68
7.2.4	Erforderliche Daten .....	69
7.3	Erkennung einer falsch eingestellten Umschalttemp. auf Heizstäbe zur WW-Aufbereitung ...	70
7.3.1	Grundlegende Zusammenhänge .....	70
7.3.2	Berechnungsvorgehen .....	70
7.3.3	Erforderliche Daten .....	72
7.4	Trenderkennung Abtauung .....	73
7.4.1	Grundlegende Zusammenhänge .....	73
7.4.2	Berechnungsvorgehen .....	73
7.4.3	Erforderliche Daten .....	75
<b>8</b>	<b>Energetisches und wirtschaftliches Potenzial optimaler Heizkurven .....</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>78</b>



<b>10</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen</b> .....	<b>79</b>
<b>11</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit</b> .....	<b>79</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>80</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>83</b>
13.1	Fehlerliste .....	83
13.2	Regelstrategien .....	91
13.3	Zusammenfassung simulierte Fehler .....	93
13.4	Übersicht simulierte Fehler .....	96



## Abkürzungsverzeichnis

AIT	Austrian Institute of Technology
BFE	Bundesamt für Energie
COP	Coefficient of Performance
DIBA	Digitale Betriebsanalyse
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
FBH	Fussbodenheizung
FAWA	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone
GWP	Global Warming Potential (Erderwärmungspotenzial)
IEA	Internationale Energie Agentur
JAZ	Jahresarbeitszahl
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
MFH	Mehrfamilienhaus
MMV	Mittleres Massenstromverhältnis
OG	Obergeschoss
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STASCH	Standardschaltungen
S/W-WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
WA	Wärmeabgabesystem
WNG	Wärmenutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
W/W-WP	Wasser/Wasser-Wärmepumpe
WPSM	Wärmepumpen-Systemmodul

## Symbolverzeichnis

### Variablen

$\mu$	Mittelwert	div.
$\varphi$	Verhältnis Massenstrom (kA-Wert)	-
$\sigma$	Standardabweichung	div.
$A$	Fläche	m <sup>2</sup>
$c$	Konstanten	div.
$c_p$	Spez. Wärmekapazität	kJ/kg/K
$E$	Energie	Ws
$EG$	Eingriffsgrenze	div.
$F$	Sensitivitätsfaktor	-
$k$	Wärmeübergangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> /K
$Komf_{\cdot verl.}$	Komfortverlust	Kh
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$N$	Anzahl	-
$n$	Krümmung (Regressionsgleichung)	-
$p$	Druck	Pa
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$T$	Temperatur	°C



## Indexe

$\alpha$	Eintretend
$\omega$	Austretend
<i>amb</i>	Umgebung
<i>av</i>	Mittelwert
<i>Eff.</i>	Effektiv
<i>el</i>	Elektrisch
<i>HD</i>	Hochdruck
<i>HG</i>	Heissgas, Heizgrenze
<i>i</i>	Temperaturgruppe
<i>Kond</i>	Kondensation, Kondensator
<i>m</i>	Mittelwert (log. Mitteltemperatur)
<i>max</i>	Maximal
<i>min</i>	Minimal
<i>ND</i>	Niederdruck
<i>nom</i>	Nominal
<i>Q</i>	Quelle
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>rel</i>	Relativ
<i>S</i>	Senke
<i>SG</i>	Sauggas
<i>SP</i>	Heizspeicher
<i>tot</i>	Total
<i>ÜH</i>	Überhitzung
<i>Verd</i>	Verdampfung, Verdampfer
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>WA</i>	Wärmeabgabesystem
<i>WW</i>	Warmwasser
<i>x</i>	Kenngrösse (Abtauungsverhalten)



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der Raumwärme- und Warmwasserbedarf entspricht in der Schweiz rund 40 % des gesamten Endenergieverbrauchs [1]. Der Gebäudesektor verursacht rund 24 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen [2]. Es ist unbestritten, dass die Wärmepumpe (WP) eine Kerntechnologie für die ökologische Wärmebereitstellung in Gebäuden darstellt. Ohne den breiten Einsatz von WP ist das Ziel eines emissionsfreien Betriebs des Schweizer Gebäudeparks nicht erreichbar (vgl. [3]).

Der Stellenwert der WP auf dem Schweizer Markt ist hoch und er dürfte in Zukunft weiter zunehmen. In den vergangenen 10 Jahren (2012 bis und mit 2021) wurden schweizweit rund 222'000 WP verkauft, was einem Durchschnitt von 22'200 Stück pro Jahr entspricht. In den letzten drei Jahren ist ein starker Absatzzuwachs zu beobachten, im Jahr 2021 wurden beispielsweise 33'704 WP verkauft [4]. Es wird angenommen, dass bis im Jahr 2050 ein Grossteil der über 1 Mio. verbleibenden fossilen Heizungen mit WP ersetzt werden [5].

Die Effizienz und Betriebssicherheit heutiger WP bewegt sich auf einem hohen Niveau. Das grösste Verbesserungspotenzial liegt nicht mehr im WP-Kreisprozess oder in Einzelkomponenten, sondern in der Integration der WP in das Gesamtsystem sowie in der «Intelligenz» desselben. Die grossen Verluste entstehen im System!

Hinsichtlich des Effizienz-Potenzials von WP zeigen verschiedene Studien ([6 - 8]), dass das volle Potenzial im Feldbetrieb oft nicht ausgeschöpft wird. Die im Feldbetrieb resultierenden Effizienzwerte liegen teilweise rund 20 bis 25 % tiefer als die in den Datenblättern deklarierten Effizienzwerte. Zur Vermeidung dieser Verluste im System ist (neben Aspekten wie der korrekten Planung, Installation usw.) die Einstellung von WP von entscheidender Bedeutung. Die ideale Einstellung einer WP benötigt neben Fachwissen und Systemkenntnissen auch Zeit, weil das Gesamtsystem bestehend aus WP, Heizsystem und Gebäude» träge ist und die Auswirkungen von veränderten Einstellungen nicht unmittelbar erkennbar sind. Solange allerdings keine Komforteinbussen auftreten, werden WP-Einstellungen nach der erfolgreichen Inbetriebnahme aufgrund hoher Kosten und fehlenden Ressourcen selten durch Fachpersonen überprüft und optimiert. Weiter wird die Effizienz des WP-Systems meist auch nicht überwacht, da entsprechende Messtechnik und die zugehörige Analyse kostenintensiv sind.

## 1.2 Motivation des Projektes

Zur weiteren Verbesserung der Energieeffizienz, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit von WP sind weiterführende Forschungsaktivitäten erforderlich. Während sich einige Entwicklungstendenzen in der Branche bereits abzeichnen, wurden andere Aspekte bisher noch wenig aufgegriffen. Unter anderem gibt es in folgenden Themengebieten weiteren Forschungsbedarf [9]:

- Intelligente Regelungen
- Digitalisierung
- Low-GWP Kältemittel
- Wärmepumpentechnologie (insbesondere Kältemittelkreislauf)

Das BFE-Forschungsprojekt «Vermeidung von Effizienzeinbussen von Heizungs-WP durch digitale Betriebsanalyse, DIBA-WP» fokussiert auf die Punkte «intelligente Regelungen» sowie «Digitalisierung» von WP. Mithilfe gezielter Optimierungen in diesen Bereichen soll die Energieeffizienz künftiger WP im Feldbetrieb weiter verbessert und damit ein Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 [10] geleistet werden.



Damit die Effizienzeinbussen in WP-Systemen künftig vermieden und das volle Potenzial der WP genutzt werden kann, ist die Entwicklung intelligenter Regelungen erforderlich, welche in der Lage sind, Fehler im System selbständig zu erkennen und diese, wenn möglich zu beheben oder zumindest darauf hinzuweisen. Damit könnten beispielsweise aufwändige (und kostenintensive) Einstellarbeiten und Effizienzeinbussen infolge Fehleinstellungen vermieden werden.

### 1.3 Projektziele

**Das Ziel dieses Projekts ist die Schaffung der Grundlagen für die digitale Betriebsanalyse (DIBA) von Heizungswärmepumpen zur Erreichung hoher Effizienzwerte im Feldbetrieb.**

Zur Ermöglichung einer DIBA gemäss obiger Zielsetzung muss geklärt werden, welche Betriebsdaten der WP zur Verfügung stehen, welche Metadaten des Gebäudes für die Betriebsanalyse erforderlich sind und mit welchen Berechnungsmethoden die Analyse durchzuführen ist. Das Ziel ist, mit möglichst wenig Daten ein möglichst aussagekräftiges Bild zu erhalten. Die Entwicklung der entsprechenden Berechnungsvorgehen sowie die Ableitung der erforderlichen Betriebsdaten der WP und Metadaten des Gebäudes bedingen umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen, welche von einzelnen WP-Herstellern kaum gestemmt werden können. Aus diesem Grund sollen im Rahmen des vorliegenden Projekts die Grundlagen für die DIBA von WP geschaffen und branchengerecht dokumentiert werden. Auf diese Weise sollen den Herstellern aufwändige Forschungstätigkeiten abgenommen und eine raschere Steigerung der Effizienz der WP im Feld gefördert werden.

Konkret sind folgende Hauptziele definiert:

1. **Konzipierung und Entwicklung von Berechnungsvorgehen** unter Anwendung exergischer Grundlagen zur Bestimmung des Betriebsverhaltens und der Effizienz von WP.
2. **Aufzeigen, welche Parametrierfehler der WP** mithilfe der DIBA erkannt und ggf. mittels adaptiver Regelungen durch die WP im Betrieb selbstständig behoben werden können.
3. **Theoretischer Nachweis** der Funktionalität der erarbeiteten Berechnungsvorgehen.
4. **Bedürfnis- und branchengerechte Beschreibung** der für die DIBA relevanten Grundlagen. Daraus abgeleitet werden Handlungsempfehlungen für Ingenieure und Planerinnen.

Die DIBA soll für WP mit einer Heizleistung von bis zu 25 kW angewendet werden können. Einerseits weil WP in diesem Leistungsbereich selten engmaschig und professionell überwacht werden und andererseits weil in diesem Leistungsbereich am meisten WP abgesetzt werden [4] und folglich eine Mehrzahl dieser im Bestand vorhanden sein dürfte.

### 1.4 Vorgehen und Berichtstruktur

Zur Erreichung der Zielsetzung wurden in einem ersten Schritt mittels Literatur- und Marktrecherche die relevanten Randbedingungen heutiger WP-Systeme zusammengetragen. Diese bilden die Grundlage für die Entwicklung der Berechnungsvorgehen. Weiter wurde unter anderem mithilfe der Begleitgruppe eine Fehlerliste erarbeitet, welche die Basis für die zu untersuchenden Fehler bildet. Sämtliche Fehler der Fehlerliste wurden im Anschluss kategorisiert und die in dem Projekt weiter betrachteten Fehler selektioniert. Diese Resultate werden in den Kapiteln 2-4 dargelegt.

Darauffolgend wurden die für die Bewertung der relevanten Fehler sowie zum theoretischen Nachweis der Berechnungsvorgehen notwendigen mathematisch-physikalischen Simulationsmodelle erstellt. Die dazu geeignete Simulationsumgebung Modelica / Dymola wurde vorgängig detailliert evaluiert. Die Dokumentation hierzu befindet sich in Kapitel 5.



Anschliessend wurden die relevanten Fehler mittels der erstellten Simulationsmodelle simuliert und deren Einfluss auf die Effizienz und Lebensdauer von WP-Systemen beurteilt (Kapitel 6). Eine weitere Selektion führte zur Auswahl der mittels DIBA zu erkennenden Fehler. Entsprechend wurden für diese Fehler Berechnungsvorgehen zur DIBA entwickelt (Kapitel 7).

Abschliessend wurden die entwickelten Berechnungsvorgehen mithilfe der Simulationsmodelle auf ihre Funktion und Wirksamkeit hin überprüft. Ebenfalls wurden das energetische und wirtschaftliche Potenzial der DIBA abgeschätzt sowie Empfehlungen für die weitere Ausarbeitung der DIBA bzw. der Erprobung im Feld erarbeitet (Kapitel 7-10).

Zusammengefasst, wurde im vorliegenden Projekt das folgende Vorgehen gewählt:

1. Literatur- & Marktrecherche
2. Erarbeitung Fehlerliste & Eingrenzungen
3. Evaluation Simulationsumgebung
4. Erstellung Simulationsmodelle
5. Durchführung Simulationen zur Quantifizierung der Fehler
6. Auswertung Simulationen und Selektion relevanter Fehler
7. Erarbeitung der Berechnungsvorgehen (für die Erkennung der relevanten Fehler)
8. Überprüfung Berechnungsvorgehen
9. Ausarbeitung Handlungsempfehlung



## 2 Monitoring und Fehlererkennung von WP-Systemen

In diesem Kapitel werden die relevanten angrenzenden Forschungsarbeiten dargelegt und die für das Projekt DIBA-WP relevanten Erkenntnisse erörtert.

### 2.1 Wärmepumpen-Feldmessungen in der Schweiz

In der Schweiz werden seit 1996 systematisch angelegte Feldmessungen mit einheitlich definierten Messpunkten an einer grossen Zahl von Heizungs-WP durchgeführt. In der «Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen» (FAWA, 1996-2003, [8]) wurden 236 WP-Systeme messtechnisch erfasst. Bei 221 dieser Anlagen konnte die Jahresarbeitszahl (JAZ) auf Basis von Ablesungen der Energiezähler (Wärme und Strom) bestimmt werden. Eine Haupteckdaten aus FAWA ist, dass die Heizkurven der WP oftmals zu hoch eingestellt sind. In den Jahren 2004-2014 wurde die Überwachung und Auswertung in mehreren Arbeiten fortgeführt [11 - 13]. Die Datenerfassung erfolgte ebenfalls durch Ablesung der Energiezähler durch den Anlagenbesitzer/-betreiber. Für die detailliertere Analyse einzelner WP wurden zudem während einer begrenzten Zeitperiode zeitlich höher aufgelöste Messungen (Temperaturen, Laufzeit usw.) durchgeführt.

Seit 2015 führt das WP-Testzentrum Buchs (WPZ) der Ostschweizer Fachhochschule (OST) neue Feldmessungen durch [14 - 16]. Insgesamt wurden 16 neue WP-Systeme mit Messtechnik ausgerüstet. Die Datenerfassung erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) in einer zeitlichen Auflösung von 10 Sekunden. Anhand der aufgezeichneten Messdaten werden verschiedene Kenndaten wie die JAZ und der Wärmenutzungsgrad (WNG) berechnet. Zudem erfolgt auf Basis der Leistungs-, Energie- und Temperatur-Werte eine Analyse zum Auflade- und Heizverhalten der verschiedenen Objekte. Somit sind aus den Messdaten Erkenntnisse z.B. zum Einfluss der Senktemperatur oder zum Einfluss der Energieaufnahme des Heizstabes auf die Gesamteffizienz der WP-Anlage ersichtlich. Mit den Feldmessungen kann somit der Ist-Zustand der WP-Systeme im Feld aufgezeigt werden.

Im Hinblick auf das Forschungsprojekt DIBA-WP sind die folgenden erkannten Ursachen für Effizienz-einbussen des Systems wichtig [14, pp. 25-26]:

- Zu hohe Heizgrenze
- Suboptimaler Pumpenbetrieb (Quellen- und Senkenseite)
- Zu kurze Stillstandzeiten (zu viele Verdichterstarts)
- Suboptimale Ladung des Warmwasserspeichers

Die Einstellung der Heizkurve wurde dabei gezielt nicht behandelt, zumal die notwendige Komfort-Überwachung nicht Teil der Feldmessungen ist.

### 2.2 Performance Gap

Neben den oben beschriebenen Studien zu Schweizer Feldmessungen zeigen auch Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Deutschland [7], dass die im Feldbetrieb resultierenden Effizienzwerte von WP teilweise rund 20 bis 25 % tiefer als die in den Datenblättern deklarierten Effizienzwerten liegen. Weiter zeigen zwei Arbeiten zum Thema Performance Gap aus der Schweiz [17, 18], dass bei WP in Ein- und Mehrfamilienhäusern der Betreiber hinsichtlich Performance Gap eine entscheidende Rolle spielt. Hauptaugenmerk lag auf der Erfassung der Hemmnisse für den energetisch optimierten Betrieb von WP. Die abgeleiteten Massnahmen beziehen sich hauptsächlich darauf, die Betreiber für einen energieeffizienten Betrieb zu sensibilisieren sowie die Ausgabe von Anlagenparametern auf Steuerungsebene zu vereinheitlichen. Das Ziel dabei ist, die oft durch Fehleinstellungen hervorgerufenen Effizienzeinbussen durch Schulungen der WP-Betreiber zu reduzieren.



## 2.3 Fehlererkennung/Betriebsanalyse

Neben der Adressierung des Performance Gaps von Heizungs-WP in der Praxis wurde im Rahmen eines BFE-Projekts an der ETH Zürich eine «Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen» entwickelt [19 - 21]. Die Erfassung der Mängel einer WP-Anlage in einem detaillierten Fehlerbaum [19, pp. 96-103] bildete die Grundlage für die spätere Entwicklung der Berechnungsmethoden. Zogg [22] entwickelte automatisierte Methoden zur Fehlererkennung von Ein/Aus-geregelten WP, welche sowohl simulationsbasiert als auch experimentell validiert wurden. Der Fokus lag auf der Erkennung von Funktionsstörungen wie z.B. Störungen von Pumpen oder des Kompressors [22, p. 41]. Im Projekt DIBA-WP liegt der Fokus hingegen auf der Erkennung von Fehlern (Einstellungen, Systemaufbau usw.), welche die Effizienz und/oder die Lebensdauer des Systems reduzieren, aber nicht zwangsläufig zu Störungen oder Ausfällen der Anlage führen. Ungeachtet davon kann von verschiedenen Ansätzen aus den Forschungsarbeiten der ETH Zürich profitiert werden.

Mehrere Arbeiten am Royal Institute of Technology in Stockholm befassen sich mit der Feststellung der Häufigkeit verschiedener Defekte während der Garantieperiode [23] sowie mit der Entwicklung einer Fehlererkennungsmethode basierend auf messtechnisch erfassten Betriebsdaten der WP ([24, 25]). Die zu erkennenden Fehler sind dabei ähnlich wie bei Zogg [22] und damit in erster Priorität auf Funktionsstörungen des WP-Systems ausgerichtet.



## 3 Randbedingungen und Systemgrenze

### 3.1 Systemgrenze

Das im Rahmen dieses Forschungsprojektes betrachtete System umfasst die Wärmequelle, die Heizungs-WP, das hydraulische Verteilsystem, die Wärmesenke (Bedarfsseite) sowie das Gebäude inklusive des Wärmeabgabesystems (WA) und ist in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt. Die DIBA soll durch die Analyse von Betriebsdaten sowie unter Umständen der Verwendung von Metadaten dazu beitragen, dass durch Fehler verursachte Effizienz- und Lebensdauereinsparungen vermieden werden können. Zur Erreichung der in Kapitel 1.3 beschriebenen Zielsetzungen ist es erforderlich, das Verhalten der Bedarfsseite und damit auch das Zusammenwirken zwischen Gebäude und WP in genügendem Detaillierungsgrad durch Simulationsmodelle abzubilden. Dadurch können Fehler praxisnah simuliert, die relevanten Fehler eruiert und darauf aufbauend die Berechnungsvorgehen zur DIBA entwickelt werden. Nur mit dem detaillierten Aufbau unterschiedlicher Kombinationen des Gesamtsystems (WP, hydraulische Verteilsystem, Gebäude) in der Simulationsumgebung kann ein praxisnahes Systemverhalten abgebildet werden.

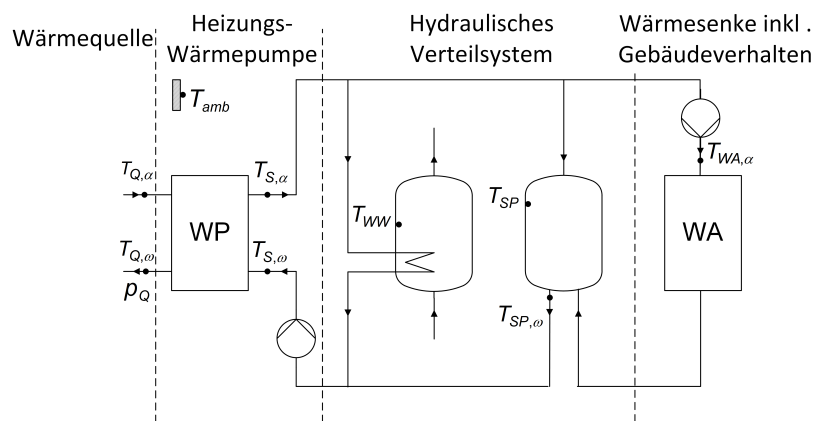


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung eines WP-Heizsystem nach hydraulischer Systembauvariante WPSM 6.

Die relevanten Randbedingungen von heutigen WP-Systemen wurden in diesem Projekt durch eine Literatur- und Marktrecherche zusammengetragen. Es wurden insbesondere Recherchen zu hydraulischen Systembauvarianten von WP-Heizsystemen, zu Betriebs- und Metadaten sowie zu gängigen WP-Regelstrategien durchgeführt. Ein Hauptaugenmerk dieser Untersuchung lag insbesondere darauf, welche Betriebs- und Metadaten in der Praxis einerseits zur Entwicklung und andererseits zur Ausführung der Berechnungsvorgehen zu Verfügung stehen.

### 3.2 Hydraulische Systembauvarianten von Wärmepumpen-Heizsystemen

Im Rahmen einer Literatur- und Marktrecherche wurden die gängigen hydraulischen Systembauvarianten von WP-Heizsystemen ermittelt und zusammengefasst. Es wurde geprüft, mit welcher Häufigkeit welche Aufbauvarianten angeboten werden. Die wichtigsten Systembauvarianten wurden identifiziert, um diese in den weiterführenden Untersuchungen konsequent berücksichtigen zu können.

#### Standardisierte hydraulische Systembauvarianten von Wärmepumpen in der Schweiz

Die Forschungsarbeit Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen [26, 27] (STASCH) bildet die Grundlage für die systematische WP-Installation in der Schweiz. Unter anderem darauf aufbauend wurden von EnergieSchweiz Empfehlungen für Planung, Optimierung, Betrieb und Wartung von WP [28] publiziert. Seit 2017 existiert zudem mit dem Wärmepumpen-System-Modul [29] (WPSM) eine



zentrale Zertifizierungsstelle für WP-Installationen in der Schweiz. Das WPSM ist eine Entwicklung von WP-Herstellern und Lieferanten sowie Verbänden und Installateuren in der Schweiz. Es dient zur verbindlichen Regelung und Standardisierung der Abläufe bei der Planung, Installation und Inbetriebnahme von WP-Systemen bis 15 kW Heizleistung. Eine Zertifizierung nach WPSM ist in 25 von 26 Kantonen Voraussetzung (Stand 2021 [30]) zur Förderung des Ersatzes von fossilen und elektrischen Heizungsanlagen durch eine WP. Gemäss WPSM Jahresbericht 2021 [30] sind seit der Einführung 2017 insgesamt rund 26'000 Anträge zur Zertifizierung eingegangen, beinahe 100 % der WP-Installation in Sanierungen sind folglich nach WPSM zertifiziert worden.

Stellt man die vorgeschlagenen hydraulischen Systembauvarianten von STASCH, EnergieSchweiz und dem WPSM einander gegenüber, so kann folgendes festgestellt werden. Die Ausführungen von EnergieSchweiz bezüglich Klein-WP (<15 kW) verweisen direkt auf das WPSM [28, p. 87] und sind somit deckungsgleich. Grundsätzlich werden im WPSM acht unterschiedliche hydraulische Systembauvarianten unterschieden. Die Systembauvarianten 1-6 vom WPSM und STASCH sind identisch. Unterschiede treten hingegen bei der Integration von Solarthermie-Kollektoren auf (STASCH 7 / WPSM 7.x). Bei den Ausführungen nach STASCH wird ein Heizspeicher mit integriertem Warmwasser (WW)-Speicher (Kombispeicher) zur Solarenergienutzung verwendet. Im Vergleich dazu können Systembauvarianten nach WPSM entweder mit einem seriellen, parallelen oder ohne Heizspeicher betrieben werden. Zudem sind die Systembauvarianten in STASCH ausführlicher behandelt als beim WPSM. Die WP als solches wird bei allen Ausführungen als Blackbox betrachtet. Der Kältemittelkreislauf ist somit nicht detailliert dargestellt.

#### **Betrachtung der gängigen hydraulischen Systembauvarianten am Markt:**

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die hydraulische Einbindung der WP mehrheitlich nach dem WPSM richtet. Eine Stichprobe von 12 WPSM zertifizierten WP-Anlagen zeigt, dass insbesondere die Systembauvariante mit parallelem Heizspeicher (WPSM 5) und in Kombination mit einem WW-Speicher (WPSM 6) stark vertreten sind. Weniger stark vertreten ist die Integration des Heizspeichers in serieller Weise (WPSM 3 und 4). WP-Anlagen mit Kombispeicher (WPSM 8) sind gerade bei Sanierungen aus Platzgründen eine attraktive Variante. Deshalb wurde auch der Kombispeicher in den letzten Jahren im WPSM aufgenommen. Die Stichprobe zeigt, dass von den 12 betrachteten WP-Anlagen drei WP-Modelle mit einem Kombispeicher angeboten werden. Die Erkenntnisse aus der Stichprobe decken sich somit mit den Beobachtungen aus der Praxis. Eine Auflistung der betrachteten Systembauvarianten inklusive Kategorisierung nach WPSM kann der Tabelle 1 entnommen werden.



Tabelle 1: Zusammenfassung der angebotenen WPSM-Systembauvarianten nach WP-Anlage und Hersteller.

WPSM Nr.	CTA S/W (I) <sup>1</sup>	CTA L/W (I)	alpha innotec S/W (E/A) <sup>1</sup>	alpha innotec L/W (E/A)	alpha innotec S/W, L/W <25 kW (E/A)	Stiebel Eltron S/W (E/A)	Stiebel Eltron L/W (I)	Viessmann S/W (E/A)	Viessmann L/W (E/A)	Anzahl
1	x	x	x			x	x	x		6
2	x	x	x			x	x	x		6
3		x	x	x						3
4		x	x	x						3
5	x	x	x		x	x	x	x	x	8
6	x	x	x		x	x	x	x	x	8
8	x					x	x			3

Zusätzlich zur obigen Betrachtung wurden hydraulische Systembauvarianten ohne WPSM-Zertifizierung betrachtet. Ab einer Heizleistung von ca. 25 kW unterscheiden sich die Schaltungen insofern vom WPSM, da aufgrund einer grösseren Heizleistung und der zu produzierenden WW-Menge u.a. mehrere WW-Speicher parallelgeschaltet werden müssen. Des Weiteren sind hydraulische Systembauvarianten vorhanden, welche die WW-Erzeugung mit einem externen Wärmeübertrager bewerkstelligen (Magro-Ladung). Vielfach wird in den Planungshandbüchern der WP-Hersteller zudem der bivalente Heizbetrieb in Kombination mit weiteren Wärmebereitstellungsanlagen thematisiert (vgl. [31, 32]). Dies bestätigt auch eine Studie zur Erweiterung des WPSM aus 2017 [33], welche Systeme mit höherer Heizwassertemperatur im Sanierungsbereich bzw. bivalente Systeme betrachtet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die angebotenen hydraulischen Einbindungen der WP mehrheitlich nach dem WPSM richten; dies auch in Fällen, wo keine Zertifizierung nach WPSM vorliegt. Um einerseits eine möglichst grosse Anzahl von Installationen abzudecken aber andererseits die Komplexität der Berechnungsvorgehen tief zu halten, wurde im Rahmen von DIBA-WP entschieden, dass die DIBA bei den Systembauvarianten 1 bis 6 und 8 gemäss WPSM anwendbar sein soll.

### 3.3 Erfasste Betriebsdaten von WP-Heizsystemen

Im Rahmen dieses Projektes interessieren neben den Systemgrenzen und dem hydraulischen Aufbau zudem die durch die Steuerungen/Regelungen der WP erfassten Betriebsdaten. Dabei sind nicht nur die Betriebsdaten des Systems, sondern auch die internen Betriebsdaten der WP relevant.

Die Untersuchungen zeigen, dass die erfassten Betriebsdaten des Systems massgeblich von der hydraulischen Systembauvariante nach WPSM abhängig sind. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, welche Unterschiede bezüglich verfügbarer Betriebsdaten bei den einzelnen Systembauvarianten bestehen und wie häufig diese bei den betrachteten WP-Anlagen vorkommen.

---

<sup>1</sup> I = leistungsgeregelt mit Inverter, E/A = Ein/Aus geregelt



Abbildung 2 zeigt die betrachteten hydraulischen Systembauvarianten nach WPSM und die jeweils erfassten Betriebsdaten des Systems gemäss nachfolgender Variablenliste:

$T_{amb}$	Umgebungstemperatur	$T_{S,\omega}$	Austrittstemperatur Senke
$T_{Q,\alpha}$	Eintrittstemperatur Quelle	$T_{WW}$	WW-Temperatur
$T_{Q,\omega}$	Austrittstemperatur Quelle	$T_{SP}$	Temperatur im Heizspeicher
$p_Q$	Druck Quelle (L/W-WP)	$T_{SP,\omega}$	Temperatur Austritt Heizspeicher
$T_{S,\alpha}$	Eintrittstemperatur Senke	$T_{WA,\alpha}$	Eintrittstemperatur Wärmeabgabe

Als Beispiel kann bei der Systembauvariante nach WPSM 5 die Heizspeichertemperatur angeführt werden. Von 16 betrachteten, am Markt verfügbaren, WP-Anlagen wird jeweils von 12 die Heizspeichertemperatur oben  $T_{SP}$  im parallel integrierten Heizspeicher erfasst. Von den restlichen vier betrachteten WP-Modellen wird die Heizspeichertemperatur am Austritt  $T_{SP,\omega}$  aus dem Heizspeicher im Rücklauf zur WP gemessen.

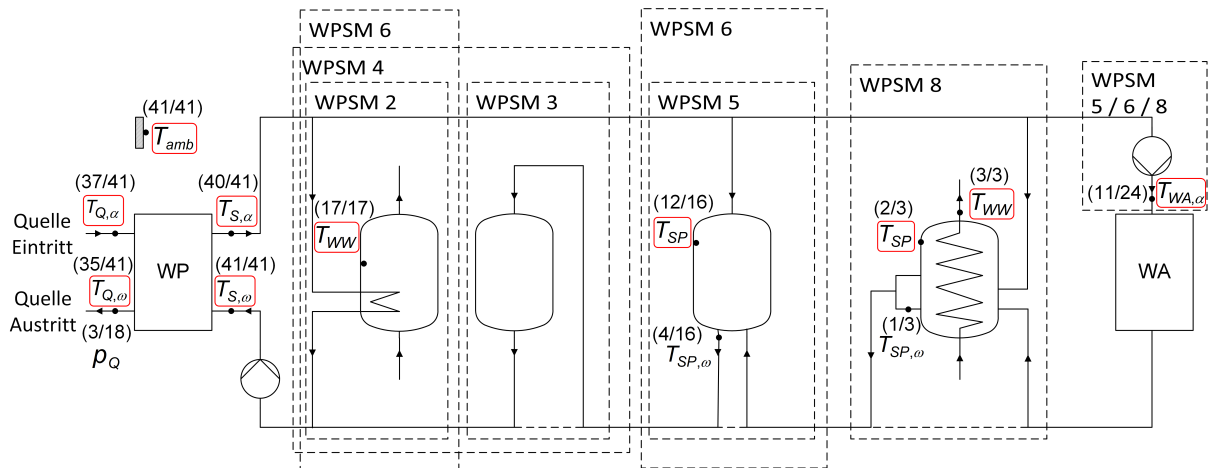


Abbildung 2: Zusammenfassung hydraulischer Systembauvarianten nach WPSM sowie erfasster Betriebsdaten.

Für die zu betrachtenden Systembauarten (nach WPSM 1-6, 8) zeigt sich, dass von den betrachteten WP-Anlagen mehrheitlich die gleichen Betriebsdaten erfasst werden. Dies bestätigen zusätzlich Gespräche mit Fachexperten während den durchgeführten Begleitgruppensitzungen. Die DIBA kann damit auf die in der Abbildung 2 markierten Betriebsdaten zurückgreifen.

Neben den dargestellten, durch die WP erfassten Betriebsdaten des Systems, werden von der WP auch interne Betriebsdaten, also z.B. Daten des Kältemittelkreislaufs, erfasst. Diese Betriebsdaten könnten ebenfalls für die DIBA genutzt werden. Anhand einer Marktrecherche wurde ermittelt, welche internen Betriebsdaten herstellerübergreifend durch die Regelungen/Steuerungen der WP erfasst werden und damit für die DIBA verwendet werden können. Abbildung 3 zeigt die für die DIBA verwendbaren internen Betriebsdaten gemäss nachfolgender Variablenliste:

$T_{Q,\alpha}$	Eintrittstemperatur Quelle	$T_{Verd}$	Verdampfungstemperatur
$T_{Q,\omega}$	Austrittstemperatur Quelle	$p_{HD}$	Hochdruck (Kältemittelkreislauf)
$T_{S,\alpha}$	Eintrittstemperatur Senke	$p_{ND}$	Niederdruck (Kältemittelkreislauf)
$T_{S,\omega}$	Austrittstemperatur Senke	$\Delta T_{\ddot{U}H}$	Überhitzung
$T_{Kond}$	Kondensationstemperatur	$T_{SG}$	Sauggastemperatur



Es handelt sich dabei nicht ausschliesslich um direkte Messwerte, sondern auch um berechnete Werte. Beispielsweise berechnen die Steuerungen/Regelungen der WP die Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen anhand der Verdampfungs- und Kondensationsdrücke. Diverse Hersteller führen gar eine rechnerische Ermittlung der erzeugten (momentanen) Heizleistung, der Verdampferleistung und der Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP) anhand der Verdampfungs- und Kondensationsdrücke, sowie der Kompressordrehzahl<sup>2</sup> durch. Es wird davon ausgegangen, dass diese Betriebsdaten für die DIBA ebenfalls nutzbar sind. Weitere Betriebsdaten sind verfügbar, falls die WP mit elektronischem Expansionsventil und drehzahlvariablem Kompressor (mit Frequenzumrichter) ausgestattet ist. In diesem Fall können neben dem Stellsignal des Expansionsventils auch Daten zu elektrischer Spannung, elektrischem Strom und elektrischer Leistung des Kompressors für die DIBA genutzt werden.

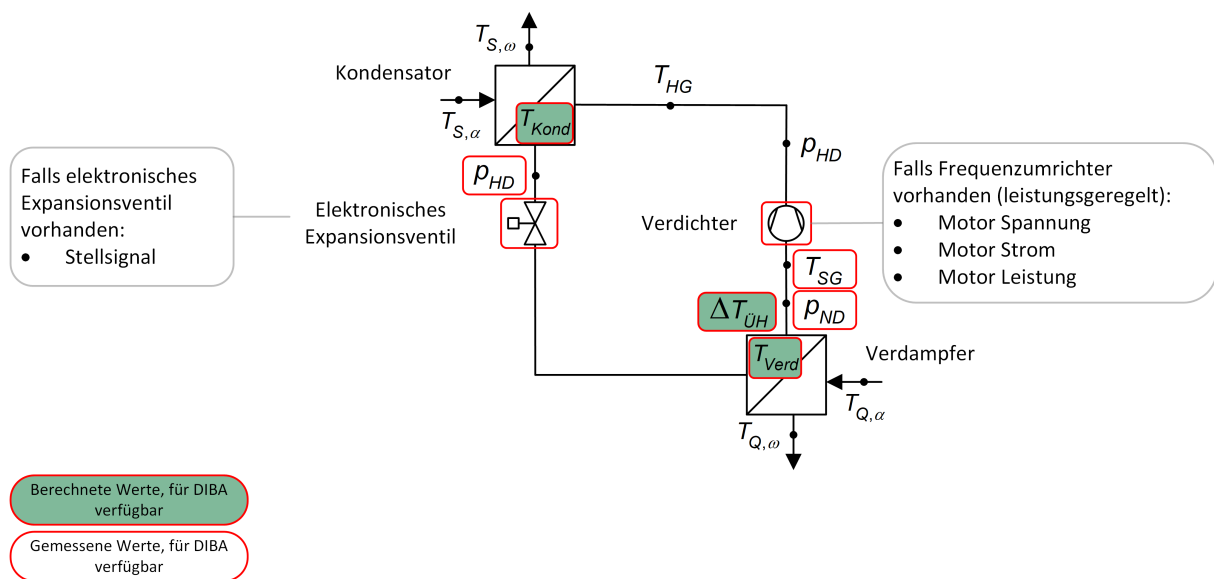


Abbildung 3: Verfügbare interne Betriebsdaten von WP.

<sup>2</sup> Nur erforderlich falls WP mit drehzahlvariablem Kompressor und Frequenzumrichter ausgestattet ist.



### 3.4 Metadaten von Gebäude und System

Neben den durch die WP erfassten Betriebsdaten erfordern die Berechnungsvorgehen zur DIBA ggf. die manuelle Eingabe von Metadaten des Gebäudes und Systems. Bei der Entwicklung der Berechnungsvorgehen sollen allerdings möglichst wenige Metadaten verwendet werden, da fehlerhafte Eingaben zu Falsch-Interpretationen führen könnten. Im Gespräch mit den Begleitgruppenteilnehmenden hat sich ergeben, dass insbesondere der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK), der Minergie-Nachweis sowie die Impulsberatungen vom Programm erneuerbar Heizen als Quelle für Metadaten genutzt werden können. In Tabelle 2 sind die verfügbaren Metadaten der unterschiedlichen Quellen zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der verfügbaren Metadaten aus GEAK, Minergie-Nachweis und Impulsberatungen.

Metadaten	GEAK [34]	Minergie-Nachweis [35]	Impulsberatungen [36]
Standort		x	x
Baujahr	X		x
Energiebezugsfläche (EBF)	X	x	x
Anzahl Bewohner			x
Baustandard	Anzahl Geschosse		Anzahl Wohneinheiten
	Dach-Typ (Flach-/Schrägdach)		Gebäudeart
	U-Werte [W/m <sup>2</sup> /K] (Dach, Aussenwand, Fenster, Boden)		Gebäudeerneuerung inkl. Umsetzungsjahr (Fenster/Dämmung)
Thermische Masse (Kategorie)	Bauweise (schwer/mittel/leicht/sehr leicht)		
Wärmeabgabesystem			x
Jährlicher Energiebedarf Heizen/WW	Energieverbrauch pro Jahr für Heizung (gemessen) [kWh/a]	Heizwärmebedarf mit Standardluftwechsel [kWh/m <sup>2</sup> /a]	Verbrauch Ölheizung [l/a]
	Energieverbrauch pro Jahr für WW (gemessen) [kWh/a]		Verbrauch WW [kWh/a]
			Energiekennzahl [kWh/m <sup>2</sup> /a]

Die unterschiedlichen Metadaten-Quellen zeigen, dass insbesondere Metadaten, wie die Energiebezugsfläche (EBF) oder der Baustandard, für die DIBA zur Verfügung stehen. Diese Metadaten charakterisieren das Gebäude. Betrachtet man neben den Metadaten des Gebäudes jene des Heizsystems, so sind keine Informationen zur hydraulischen Systembauvariante oder zum Einsatz einer Einzelraumregelung/Thermostatventile verfügbar.



### 3.5 Gängige Regelstrategien von Wärmepumpen

Mittels Literatur- und Marktrecherche erfolgte die Ermittlung gängiger Regelstrategien der Teilsysteme von WP-Systemen. Durch die Evaluation der relevanten Regelstrategien von WP konnten diese bei der Entwicklung der Berechnungsvorgehen der DIBA konsequent berücksichtigt werden. Bei den durchgeführten Analysen wurden die Regelstrategien von Sole/Wasser-, Wasser/Wasser- und Luft/Wasser-WP von sieben unterschiedlichen WP-Hersteller systematisch betrachtet, miteinander verglichen und zusammengefasst.

Die Recherche zeigt, dass für die Steuerung/Regelung von WP eine Vielzahl an Regelstrategien existieren. Die für die DIBA als bedeutsam erachteten Regelstrategien der relevanten Teilsysteme sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Relevante Regelungen/Steuerungen der Teilsysteme von WP.

Regelung WP / Kompressor		
Ein/Aus-Regelung	Kontinuierliche Leistungsregelung nach Heizkurve	
Regelung Quellenpumpe (S/W-, W/W-WP)		
Konstanter Volumenstrom	Konstante Temperaturspreizung	
Regelung Ladepumpe		
Konstante Pumpendrehzahl	Konstante Temperaturspreizung	Regelung nach Vorlauftemperatur
Regelung Warmwasserladung		
Stufenladung	Schichtladung	
Regelung Heizkreispumpe		
Proportional- / Konstantdruckregelung		
Regelung Heizkreismischer		
Regelung nach Vorlauftemperatur		
Regelung Abtauung		
Steuerung Zeitschaltkriterium	Regelung abhängig von Temperaturdifferenz	
Regelung Ventilator (L/W-WP)		
Konstante Drehzahl	Variable Drehzahl proportional zu Kompressorleistung	



## 4 Fehler an WP-Systemen im Feld

Auf Basis der Literatur- und Marktrecherche sowie von Gesprächen mit Fachpersonen aus der WP-Branche wurde eine Liste von in der Praxis vorkommenden Fehlern in WP-Systemen zusammengestellt (siehe Anhang 13.1). Diese Untersuchungen zeigen, dass im Feldbetrieb eine Vielzahl von Fehlern vorliegen kann. Die resultierende Fehlerliste ist mit ca. 130 Fehlern entsprechend umfangreich. Für jeden Fehler wird das Symptom und die Ursache beschrieben. Da die Erarbeitung bewusst sehr offen gestaltet wurde, finden sich in der Fehlerliste nicht nur Fehler, die im Fokus des Projekts DIBA-WP liegen, sondern auch Fehler von WP-Systemen, die nicht mit einer Betriebsanalyse behoben werden können. Die Analyse der Fehlerliste hat aufgezeigt, dass die Fehler in sechs Kategorien aufgeteilt werden können. Die Tabelle 4 zeigt diese Kategorisierung und zugleich auch, welche Kategorien im weiteren Projektverlauf berücksichtigt wurden.

Tabelle 4 Übersicht Fehlerkategorien mit weiter verfolgten Kategorien (grün) und teilweise weiterverfolgten Kategorien (blau).

Fehlerhafte Einstellwerte
Fehlerhafte Auslegung, Planung und Installation
Funktionsstörungen
Fehler im Kühlbetrieb
Fehlerhafte Komponenten-Auslegung und Entscheidungen WP-Hersteller
Ineffiziente Regelstrategien WP-Hersteller

### 4.1 Fehlerkategorien

#### 4.1.1 Fehlerhafte Einstellwerte

Fehlerhafte Einstellwerte, können am Regler der WP durch den Inbetriebnehmer, den Techniker sowie in gewissen Fällen durch den Endkunden verursacht aber auch korrigiert werden. Fehler dieser Kategorie werden bei der Entwicklung der DIBA prioritär berücksichtigt. Auf deren Erkennung und die spätere Optimierung zielt das Forschungsprojekt im Grundsatz ab. Gründe dafür sind, dass diese Fehler häufig vorkommen, weil Einstellungen objektspezifisch vorgenommen und damit nicht vom Hersteller definiert werden können. Deren Vorkommen bleibt zudem oft unbemerkt, solange kein Komfortverlust auftritt. Weiter sind Fehleinstellungen einfach korrigierbar, da sie keine physische Anpassung am System wie z. B. den Wechsel einer Pumpe bedingen.

#### 4.1.2 Fehlerhafte Auslegung, Planung und Installation

Die korrekte Auslegung und Planung eines WP-Systems (Dimensionierung WP, Auslegung Hydraulik und WA usw.) ist objektspezifisch und bildet die Basis für ein effizientes und langlebiges System. Sind die Auslegung und Planung fehlerbehaftet, kann das WP-System nach der Installation nur mit verhältnismässig grossem Aufwand verbessert werden. Da das Fehlerpotenzial als hoch erachtet wird, werden im Projekt DIBA-WP solche Fehler in Bezug auf deren Einfluss auf Effizienz und Lebensdauer mithilfe von Simulationen untersucht. Die DIBA könnte auf solche Planungsfehler zukünftig aufmerksam machen. Im Vergleich zur Kategorie Einstellwerte sollen Fehler in der Auslegung, Planung und Installation jedoch sekundär behandelt werden, da deren Behebung einerseits schwieriger ist und Diskussionen mit WP-Hersteller andererseits zeigten, dass diese wenig Interesse zur Implementierung einer DIBA zeigen, welche den Endkunden auf Planungsfehler in ihren Anlagen aufmerksam machen würde.



### 4.1.3 Funktionsstörungen

Wie im Kapitel 2.3 beschrieben, wurden von Zogg [20 - 22] Forschungsarbeiten zur Erkennung von Funktionsstörungen der WP durchgeführt. Obwohl Funktionsstörungen mit den nachfolgend beschriebenen Simulationsmodellen simuliert werden können, werden diese in der DIBA nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt auf der Erkennung von Fehlern, welche die Effizienz und/oder die Lebensdauer des Systems reduzieren, aber nicht zwangsläufig zu Störungen oder Ausfällen der Anlage führen.

### 4.1.4 Fehler im Kühlbetrieb

Fehler, die während des Kühlbetriebs bzw. infolge des Kühlbetriebs auftreten, sind nicht Bestandteil des Projekts. Sie werden im vorliegenden Projekt deshalb nicht behandelt.

### 4.1.5 Fehlerhafte Komponenten-Auslegungen und Entscheidungen WP-Hersteller

Hersteller von WP und weiteren Komponenten des WP-Systems betreiben grossen Aufwand für die Auslegung, das Design und die Produktion ihrer Produkte. Sie treffen dabei bewusste Entscheidungen hinsichtlich des Preises, der Effizienz und der Lebensdauer ihrer Produkte. Im Vergleich zu den bereits beschriebenen Kategorien von Fehlern kann davon ausgegangen werden, dass Fehlauslegungen bei Herstellern deutlich seltener und nicht objektspezifisch sind, sondern baureihenübergreifend auftreten. Tritt dies dennoch auf, werden Schwachstellen durch Endkunden (Hausbesitzer) zeitnah über den Installateur an den WP-/Komponenten-Hersteller gemeldet. Werden die Schwachstellen beseitigt, wird das Produkt auf dem Markt bestehen bleiben, ansonsten nicht. Somit findet bei den Produkten eine gewisse Selbstregulierung statt, wobei schlecht ausgelegte oder funktionierende Produkte auf längere Sicht keine breite Anwendung im Markt finden. Weiter führt das WP-Testzentrum Buchs als akkreditierte Prüfstelle Leistungsprüfungen an WP zur Erlangung u.a. des internationalen Gütesiegels durch [37]. Aus diesen Gründen wird diese Kategorie von Fehlern im Projekt nicht berücksichtigt.

### 4.1.6 Ineffiziente Regelstrategien WP-Hersteller

Die Entscheidung eines WP-Herstellers, welche Regelstrategien gewählt werden, basieren auf Fachwissen, Erfahrungen, Lebensdauieranforderungen, ökonomischen Überlegungen usw. und sind wohl überlegt. Eine Aussage, welche Regelstrategie die richtige ist, basiert daher auf unterschiedlichen Kriterien und kann durch einen rein effizienz- und/oder lebensdauergetriebenen Ansatz nicht beantwortet werden. An dieser Stelle soll als Beispiel die Abtauregelung von L/W-WP erwähnt werden. Die Art der Abtauregelung (bedarfsgesteuert, fixe Intervalle usw.) ist eine bewusste Entscheidung der WP-Hersteller. Das Projektteam anerkennt hier die Herausforderung der teilweise ineffizienten Abtauerung von L/W-WP im Feld. Allerdings handelt es sich bei vielen Fragestellungen, die in diesem Kontext zu beantworten sind, um Produktentwicklungsfragen. Das Projektteam ist der Ansicht, dass es im Bereich Abtauregelung noch F&E-Bedarf gibt, jedoch ist dies eine Optimierung der WP als Produkt und somit nicht Bestandteil des Projekts.

Im Rahmen von DIBA-WP wird auf Basis der Diskussionen an der 2. Begleitgruppensitzung darauf fokussiert, inwiefern sich die Abtaueffizienz im Betrieb verschlechtert. Damit kann der Endnutzer darauf hingewiesen werden, dass Verschlechterungen bei der Abtaueffizienz vorliegen und eine Überprüfung empfohlen wird.



## 4.2 Betrachtete Fehler

Die durchgeführte Kategorisierung zeigt auf, dass nicht alle aufgelisteten Fehler für das Projekt relevant sind und entsprechend nicht berücksichtigt wurden. Fehler, die durch falsche Einstellwerte einen negativen Einfluss auf die Effizienz und/oder Lebensdauer des WP-Systems haben können, werden prioritär betrachtet. Fehler, die durch fehlerhafte Auslegungen, Planungen und Installationen resultieren, werden mit sekundärer Priorität berücksichtigt. D. h. sie werden ausschliesslich simuliert (siehe Kapitel 6), für die Entwicklung der Berechnungsvorgehen allerdings nicht berücksichtigt. Einen Überblick über die betrachteten Fehler bietet Tabelle 5.

Tabelle 5 Betrachtete Fehler. Nummerierung gemäss Fehlerliste (Anhang).

ID	Beschreibung
2	Falsche Parametrierung der Heizkurve
3	Falsch platzierter Fühler im Heizspeicher
4	Zu kleine Dimensioniertes Wärmeabgabesystem
8	Sperrzeiten der WP zu Lang
11	Dämmung des Heizspeichers ungenügend
12	Unnötig grosses Volumen vom Heizspeicher
14	Zu hohe bzw. zu tiefe Kennlinie der Heizkreispumpe
18	Falscher Volumenstrom der Ladepumpe
21	Falsch eingestellte Heizgrenze
22	Falsche Mittelungsdauer Aussentemperatur für Heizgrenze
25	Falsch dimensionierte Wärmequelle (Erdwärmesonde)
30 / 94	Falsch eingestellte/ausgelegte Quellenpumpe (für Heiz- und WW-Betrieb)
47 / 109	Falsch dimensionierte WP (für Heiz- und WW-Betrieb)
61	Zu grosser Warmwasserspeicher
62	Solltemperatur Warmwasser zu hoch
62.2	Hysterese WW Anforderung zu klein
63	Umschaltung von WP-Betrieb auf Heizstab bei zu tiefer Warmwassertemperatur
67	Zu kleines Register (Wärmeübertragerfläche) im Warmwasserspeicher
69	Falsch eingestellte Ladepumpe Warmwasser
70	Falsch platzierte Fühler im Warmwasserspeicher
71	Schlecht Isolierter Warmwasserspeicher
89	Falsch dimensionierte Wärmequelle (Erdwärmesonde)



### 4.3 Annahmen und Abgrenzungen für die weiteren Untersuchungen

Für die Beurteilung der im vorangehenden Kapitel 4.2 definierten Fehler bedarf es insbesondere für die Simulationen an Annahmen und Abgrenzungen. Damit wird einerseits nur auf die verbreitetsten Kombinationen (WPSM, WA-Typ etc.) fokussiert und andererseits wird die Komplexität der zu entwickelnden Berechnungsvorgehen reduziert und deren Erfolgsaussicht potenziell erhöht. Die Annahmen und Abgrenzungen für die weitere Bearbeitung sind wie folgt definiert:

- **WPSM:** Das System wurde gemäss WPSM-Vorgaben korrekt geplant und installiert. Für die Beurteilung der Fehler werden die WPSM 1 bis 6 und 8 berücksichtigt. Die Funktionalität der DIBA ist daher mindestens für diese WPSM vorzusehen.
- **WA-Regelung und Typ:** Die WA ist grundsätzlich geregelt. D. h. es sollen Fussbodenheizungs (FBH)-Systeme mit Einzelraumregelung und Radiator-Systeme mit Thermostaten untersucht werden. Dabei kann eine geringe Anzahl an unregulierten Zonen (z. B. Nasszellen) vorkommen. Ansonsten werden unregelte Systeme nicht berücksichtigt.
- **Mischung des WA-Typs:** Das System besteht entweder aus FBH oder aus Radiatoren. Eine Mischung beider WA-Typen wird nicht untersucht.
- **Regelung Heizkreispumpe:** Die Heizkreispumpe ist auf einen definierten Differenzdruck (z. B. 25 kPa) geregelt.

Die in den nachfolgenden Kapiteln folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die obigen Annahmen und Abgrenzungen. Entsprechend beziehen sich die Ergebnisse ausschliesslich darauf.



## 5 Simulationsmodell WP-System und Gebäude

Zur Bewertung der Relevanz der zu untersuchenden Fehler sowie für die Entwicklung und Erprobung des Berechnungsvorgehens der DIBA wurden umfangreiche Simulationsmodelle erarbeitet. In den nachfolgenden Kapiteln wird daher das Vorgehen zur Erstellung der Simulationsmodelle erläutert und der Aufbau des Modells dargelegt.

### 5.1 Evaluation der Simulationsumgebung

Aus den Erkenntnissen der Arbeiten zu den Randbedingungen und zur Systemgrenze (siehe Kapitel 3) ist ersichtlich, dass das Simulationsmodell und somit auch die Simulationsumgebung in der Lage sein müssen, neben dem Verhalten unterschiedlicher Gebäudetypen (Altbau/Neubau), dem Nutzerverhalten und der WP, auch die verschiedenen hydraulischen Systembauvarianten nach WPSM abzubilden. Das resultierende Simulationsmodell soll unter den erarbeiteten Randbedingungen die Auswirkungen unterschiedlicher Fehler am Gesamtsystem quantifizieren können. Weiter sollen die Simulationsergebnisse eine Basis für die Entwicklung des Berechnungsvorgehens bilden. Zur Sicherstellung der Erfüllung dieser Anforderungen an das Simulationsmodell wurde zu Beginn des Projekts eine Evaluation möglicher Simulationsumgebungen durchgeführt. Bei der Evaluation wurden u.a. bestehende Modelle in Matlab® aus vergangenen Forschungsprojekten (LOREF [38]), die kommerziellen Umgebungen in IDA ICE [39], Polysun [40] und Dymola [41] (Modelica Modellierungssprache [42]) betrachtet.

Da das Heizsystem eines Gebäudes eine starke Kopplung zwischen den Untersystemen (WP, Wärmeverteilung, Gebäude) aufweist und deren Detaillierungsgrad frei wählbar sein muss, wurde mit der Modellierungssprache Modelica ein quelloffener Standard mit einer Vielzahl an Bibliotheken mit physikalischen Modellen von Einzelkomponenten ausgewählt. Durch den objektorientierten Ansatz der Sprache ist der Austausch einzelner Komponenten (z.B. der Wechsel eines Gebäudemodells) einfach umsetzbar. Dies erlaubt einerseits die schnelle Anpassung / Konfiguration von Modellen und bringt andererseits den Vorteil mit sich, dass jeweils mit denselben Grundkomponenten gearbeitet wird. Erst dies ermöglicht den Vergleich der Resultate verschiedener Konfigurationen.

Die Erstellung der Modelica-Modelle wurde in diesem Projekt mit dem Programm Dymola [41] durchgeführt. Aus Anwendersicht besteht ein weiterer Vorteil der Modellierungssprache Modelica auch darin, dass die physikalische Koppelung von Modellen (Aktoren, Komponenten, Systeme, mathematische Operatoren etc.) auf grafischer Ebene definiert werden können, wohingegen das Verhalten des Modells mittels Gleichungen auf der Code-Ebene definiert ist. In den nachfolgenden Kapiteln wird deshalb und sofern sinnvoll aus grafischer Sichtweise auf die erarbeiteten Simulationsmodelle eingegangen.



## 5.2 Aufbau von WP-Systemen innerhalb der Simulationsumgebung

### 5.2.1 Wärmepumpenmodell

Für die Simulation des Teilsystems «Wärmepumpe» stehen zwei unterschiedliche Simulationsmodelle zur Verfügung, wobei ersteres einen hohen Detaillierungsgrad aufweist und zweiteres kürzere Rechenzeiten erlaubt.

#### Detailliertes WP-Modell

Beim ersten WP-Modell wird der Kältekreislauf detailliert mit Modellen der TIL Suite Library (TIL) [43], Modelica Standard Library [44] und Buildings Library [45] modelliert (siehe Abbildung 4). Damit können z. B. Überhitzungswerte eingestellt, Kältemittelmengen angepasst oder unterschiedliche Wärmeübertrager-Flächen simuliert werden.

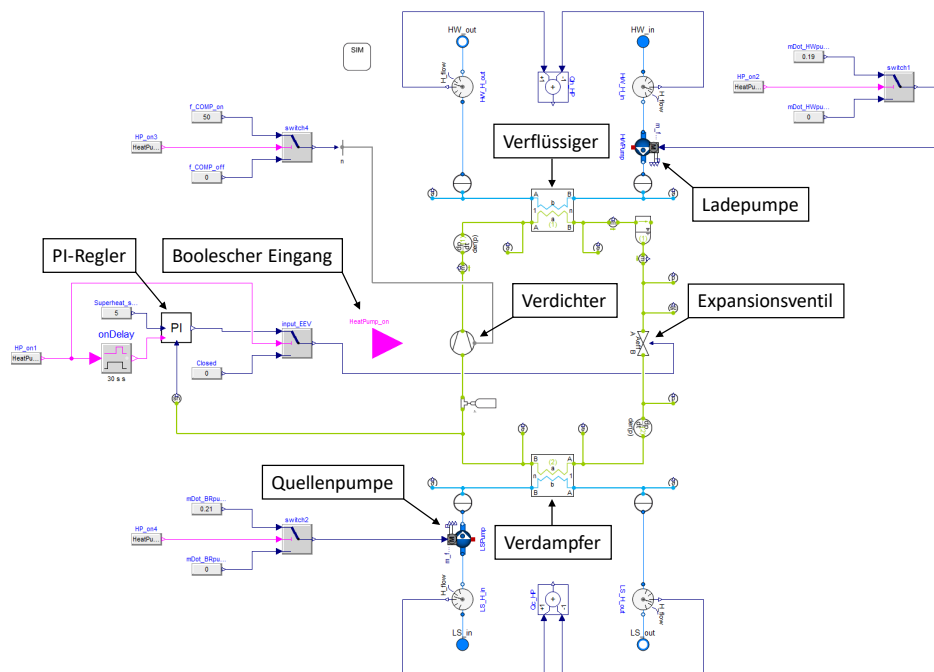


Abbildung 4: Detailliertes WP-Modell (S/W-WP Ein/Aus-geregelt)

In Kombination mit dem anfänglich erarbeiteten Einfamilienhaus (EFH)-Gebäudemodell (mit nur zwei Zonen – Erdgeschoss (EG) und Obergeschoss (OG) – Gemäss [46]) und verschaltet nach WPSM5 resultieren für eine Jahrgangssimulationen mit der in diesem Projekt verwendeten Workstation (Intel i7-5930K CPU und 56 GB RAM) Rechenzeiten von 5 h. Aufgrund der zusätzlichen Komplexität der finalen Gebäudemodelle, insbesondere demjenigen des Mehrfamilienhauses (MFH, 27 Räume bzw. Zonen), steigen die Rechenzeiten mit dem detaillierten Modell auf weit über 50 h pro Simulation an.

#### Vereinfachtes WP-Modell

Weil für die Quantifizierung der Fehler auch Simulationen mit MFH-Gebäuden notwendig sind, Rechenzeiten grösser 50 h als nicht praktikabel erachtet werden und die betrachteten zu simulierenden Fehler nicht zwingend den hohen Detaillierungsgrad des WP-Modells erfordern, wird für die grundsätzlichen Simulationen auf das zweite, vereinfachte WP-Modell der Buildings Library gesetzt. Dieses berechnet die Zustände im Kältemittelkreislauf nur eingeschränkt, bietet aber die Möglichkeit, validierte Parametersätze von auf dem Markt verfügbaren WP zu verwenden. Der für die Simulationen verwendete Parametersatz bildet das Betriebsverhalten der WP «Viessmann Vitocal 300-G BW 301.A21» [45] ab. Vergleiche des Modells mit den im Datenblatt angegebenen Werten stimmen mit guter Genauigkeit überein. Neben der Auswahl des Parametersatzes verfügt das Modell über die



Möglichkeit, die Kapazität der WP zu skalieren. Damit können mit dem gleichen Modell verschiedene WP-Grössen simuliert werden, ohne dass auf einen anderen Parametersatz zurückgegriffen werden muss. Bei der Quantifizierung der Fehler erlaubt dies eine bessere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen WP-Leistungsstufen, da immer derselbe Parametersatz verwendet wird.

Für das MFH-Gebäudemodell, verschaltet nach WPSM5, resultieren mit dem vereinfachten WP-Modell Rechenzeiten von 20 bis 30 h. D.h. sie sind mindestens um ca. Faktor 2.5 kürzer als Simulationen mit dem detaillierten WP-Modell. Für den weiteren Projektverlauf wurde daher auf das vereinfachte WP-Modell zurückgegriffen. Das detaillierte WP-Modell kam nur bei spezifischen Fragestellungen wie zum Beispiel bei Untersuchungen zum optimalen Massenstrom der Quellenpumpe zum Einsatz (siehe Kapitel 7.2).

## 5.2.2 Gebäudemodell

Zur realitätsnahen Abbildung möglicher Konfigurationen der betrachteten WP-Systeme mit Heizleistungen bis 25 kW wurden drei Gebäudemodelle erarbeitet. Damit sollen gebäudespezifische Unterschiede erfasst werden, welche ggf. die Auswirkungen von Fehlern beeinflussen können. Für die Modellierung der Gebäude wurden dabei die drei nachfolgenden Hauptanforderungen definiert:

- Die erforderlichen maximalen Heizleistungen liegen im betrachteten Bereich bis 25 kW.
- Die Modelle sollen, wenn möglich, typische Gebäude des Schweizer Gebäudeparks repräsentieren.
- Die Modelle bilden die räumliche Unterteilung einer Wohnung näherungsweise ab, damit ein realitätsnahes hydraulisches Verhalten, ausgelöst durch einzelne Thermostate, simuliert werden kann.

Die dazu betrachteten Studien sind: Clima-Bau [47], Tri-HP-Projekt [48], IEA SHC Task44/HPP Annex 38 [46]. Abgeleitet von diesen Anforderungen wurden die in Tabelle 6 aufgeführten Gebäudetypen definiert. Damit werden drei unterschiedliche Heizleistungsstufen, drei unterschiedliche spez. Heizenergiebedarfe, bezogen auf die EBF, sowie zwei unterschiedliche WA-Systeme abgedeckt.

Tabelle 6: Modellerte Gebäudetypen

Gebäude	Kurzname	Energiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> /a]	Heizleistung bei -8°C [kW]	Anzahl Räume	Referenz
Altbau EFH	EFH100	100	ca. 8	9	IEA SHC Task44/HPP Annex 38 [46]
Saniertes MFH	MFH60	60	ca. 24	27	Tri-HP Project [48]
Neubau MFH Minergie	MFH30	30	ca. 13	27	Tri-HP Project [48]

Der spezifische Energiebedarf der Gebäude bezieht sich gemäss betrachteten Studien auf eine Standard-Raumtemperatur von 21°C. Da in der Praxis allerdings meist höhere Raumtemperaturen vorliegen (vgl. [49]), werden alle Simulationen mit 22°C Raumtemperatur durchgeführt. Der Energiebedarf in den Simulationen ist somit leicht höher, widerspiegelt die Realität aber besser. Es werden die Klimadaten für den Standort Zürich (1h Auflösung) gemäss des «typischen Jahres» des Programms Meteonorm 7 verwendet [50].

Das EFH100 basiert auf dem Gebäudemodell SFH100 der Quelle IEA SHC Task44/HPP Annex 38 [46]. Im Vergleich zum SFH100, bei welchem das EG und OG jeweils durch eine geregelte Zone (ein Raum)



abgebildet ist, werden die Geschosse beim EFH100 Modell in mehrere Räume bzw. Zonen unterteilt. Dabei wird eine unregelte Zone (die Nasszelle) modelliert. Weiter werden die Räume mit Radiatoren mit einer Soll-Vorlauftemperatur  $T_{VL,Soll}$  von 50°C bei Auslegebedingungen beheizt. Die geregelten Räume sind dabei mittels Thermostaten (abgebildet mit PI-Reglern) geregelt.

Die beiden MFH-Gebäude weisen einen identischen Grundriss bzw. die gleiche Wohnfläche auf und unterscheiden sich im Wesentlichen in der Wärmedämmung und Belüftung. Als Referenz wurden hier die MFH-Modelle aus dem Projekt «Tri-HP Project» [48] herangezogen. Diese Gebäudedaten werden auch im «SCCER JASM (Joint Activity Scenarios and Modelling)» [51] verwendet. Abbildung 5 zeigt hierzu die Visualisierung des Referenzgebäudes mit drei Wohngeschossen und insgesamt sechs Wohnungen. Die Räume werden mit einer FBH, mit einer Soll-Vorlauftemperatur  $T_{VL,Soll}$  von 35°C (MFH30) bzw. 45°C (MFH60) bei Auslegebedingungen (-8°C, vgl. [52]) beheizt. Die Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauf beträgt 6 K.

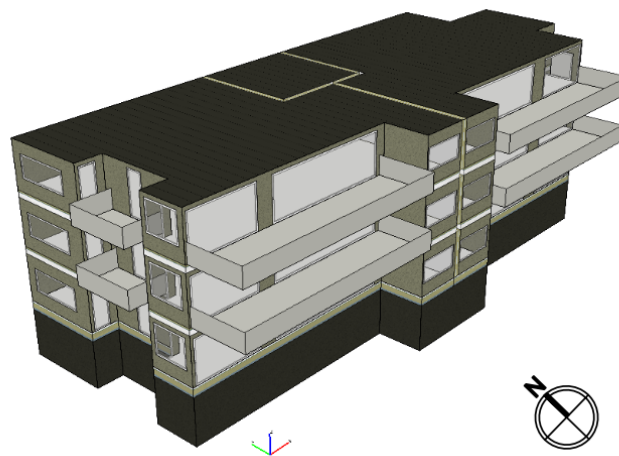


Abbildung 5: Visualisierung des Referenzgebäudes [48].

Um die in Tabelle 6 definierten Anforderungen zu erfüllen, wurden die vom Projekt Tri-HP Project [48] verwendeten MFH-Gebäudemodelle angepasst. Tabelle 7 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Referenzgebäude und den erarbeiteten MFH-Gebäuden in DIBA-WP.

Tabelle 7: Anpassungen MFH-Modelle im Vergleich zum Projekt «Tri-HP Project» [48]

Bezeichnung	Referenz [48]	Anpassungen für DIBA-WP
Wohnfläche pro Einheit	150 m <sup>2</sup>	120 m <sup>2</sup>
Spez. Energiebedarf «altes» MFH	90 kWh/m <sup>2</sup> /a	60 kWh/m <sup>2</sup> /a (neue Fenster + leicht besser gedämmt)
Grundriss	vgl. Abbildung 5	leichte Vereinfachung (siehe Abbildung 6)
Zoneneinteilung	nicht vorhanden	siehe Abbildung 6

Abbildung 6 stellt die in DIBA-WP umgesetzte Zonenaufteilung der MFH-Modelle dar. Der Vergleich mit der Visualisierung des Referenzgebäudes in Abbildung 5 zeigt eine leichte Vereinfachung der Aussenkontur.

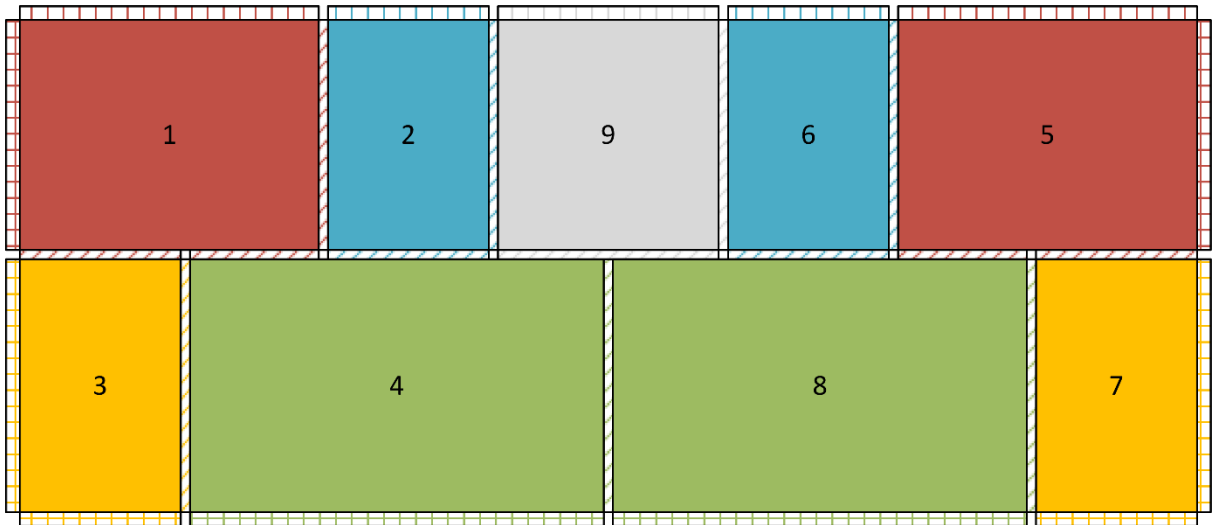


Abbildung 6: Raumeinteilung MFH-Modelle.

Die Umsetzung der Zonenaufteilung in Modelica ist in Abbildung 7 dargestellt. Pro Geschoss, welches innerhalb des Gebäudemodells ein Teilmodell darstellt, sind neun Zonen bzw. Räume erkennbar. Diese sind mittels hydraulischer Koppelung (blau) an den Vor- und Rücklauf des Heizsystems angeschlossen. Weiter sind die Zonen mittels thermischer Koppelung (rot) miteinander in Kontakt und greifen via gelbe Koppelung auf die Klimadaten zu (Temperatur, solare Einstrahlung etc.).

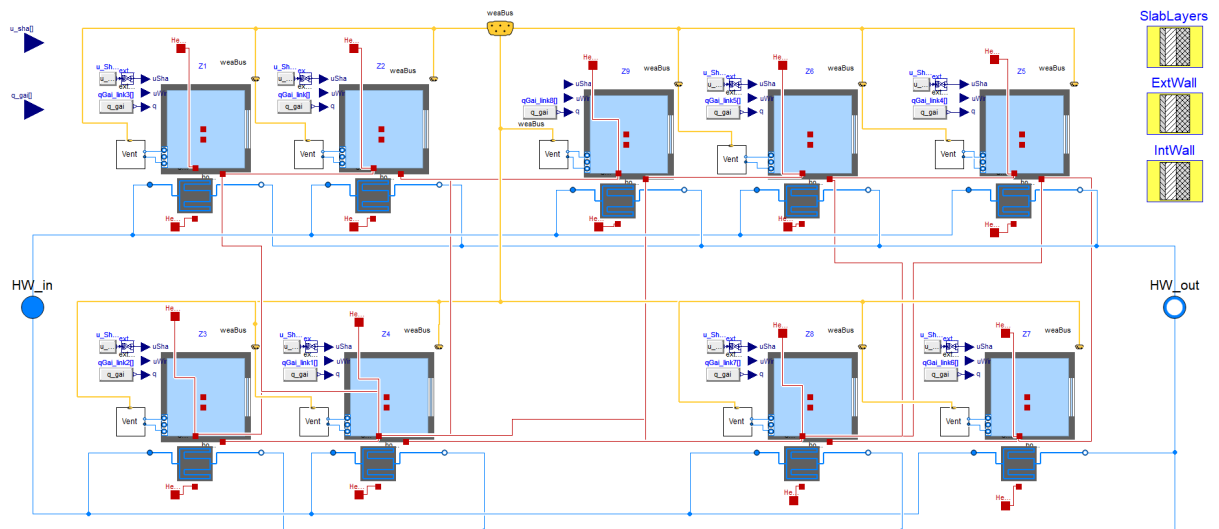


Abbildung 7: Modelica-Modell eines Stockwerks des MFH-Modells mit einer Zone je Raum (Z1-Z9) in Modelica.



### 5.2.3 Hydraulik

Die Hydraulik des gesamten WP-Systems wird in Modelica auf der obersten Modellebene modelliert und ist in Abbildung 8 am Beispiel einer S/W-WP, verschaltet nach WPSM 5, abgebildet. Gut ersichtlich ist hier die Modularität, welche die Simulationsumgebung bietet. So kann im vorliegenden Fall z. B. das Gebäude MFH30 einfach durch das MFH60 ersetzt und die notwendigen Modellparameter (z. B. Heizkurve oder die Länge der Erdwärmesonde) angepasst werden. Neue Konfigurationen eines Gesamtsystems sind damit vergleichsweise schnell definiert und simulationsbereit.

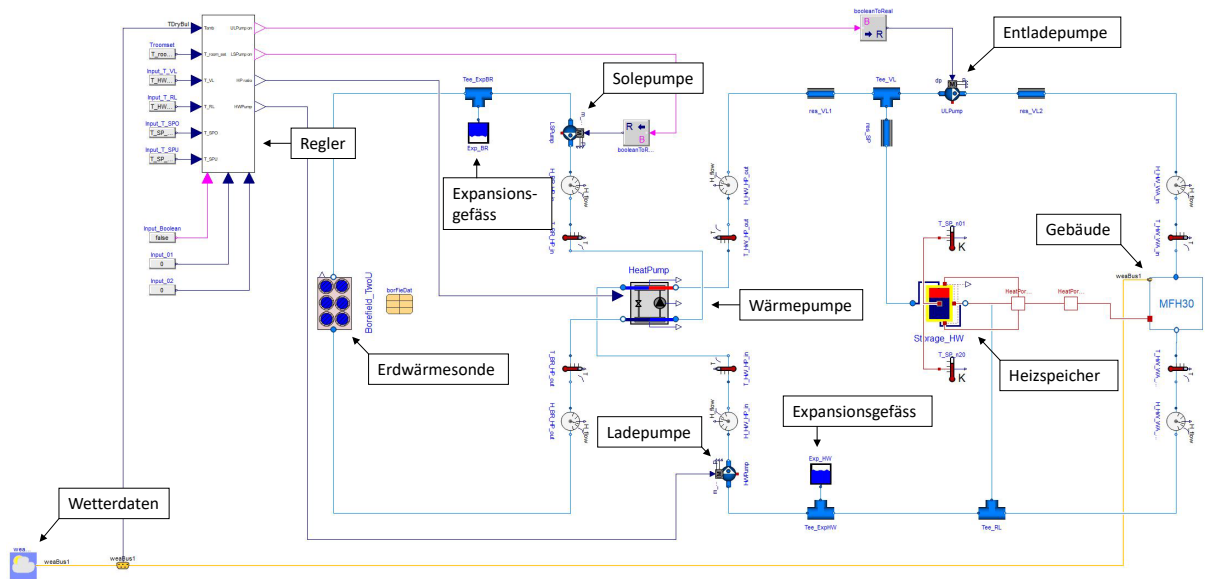


Abbildung 8: Hydraulische Verschaltung, S/W-WP, Ein/Aus-geregt, WPSM5, MFH30.



## 5.2.4 Regelstrategie und Einstellwerte

Die im Feld verwendeten Regelstrategien und Einstellwerte sind von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Um die Anzahl durchzuführender Simulationen hinsichtlich Quantifizierung der Fehlerinflüsse zu limitieren, wird pro WPSM und WP-Typ jeweils nur eine Regelstrategie umgesetzt.

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind beispielhaft die Regelstrategie und Einstellwerte für die Simulation der leistungsgeregelten S/W-WP aufgezeigt. Weitere, für die Simulationen verwendete, Regelstrategien sind im Anhang 13.2 ersichtlich. Die in Kapitel 6 erläuterten Resultate basieren auf diesen Definitionen.

Tabelle 8: Regelstrategie und Einstellwerte für S/W-WP, leistungsgeregelte, WPSM 1, 5 und 6

Komponente / Einstellung	Einstellung / Kriterium
Quellenpumpe	konstante Drehzahl, bei Nominalleistung 3.5 K Spreizung
Lade- / Kondensatorpumpe, WPSM 1	Konstanter Differenzdruck MFH30/60: 40 kPa, 6 K Spreizung bei Nominalleistung EFH100: 42.5 kPa, 5 K Spreizung bei Nominalleistung
Lade- / Kondensatorpumpe, WPSM 5 & 6	konstante Drehzahl / Massenstrom, FBH: bei Nominalleistung 6 K Spreizung Radiatoren: bei Nominalleistung 5 K Spreizung
Entlade- / Heizkreispumpe WPSM 5 & 6	konstanter Differenzdruck, MFH30 und MFH60: 25 kPa EFH100: 22.5 kPa
Einschaltbedingung WP	WPSM 1: $T_{VL} < T_{VL,Soll}$ ( $T_{VL,Soll}$ : Soll-Vorlauftemperatur) WPSM 5 & 6: $T_{SP} < T_{VL,Soll}$
Start-Drehzahl Kompressor	50 Hz (für erste 3 Minuten)
Maximale Drehzahl Kompressor	90 Hz
Minimale Drehzahl Kompressor	25 Hz
Regelung Drehzahl	$T_{VL}$ wird auf $T_{Soll,VL}$ geregelt
Ausschaltbedingungen WP	$T_{RL} > T_{Soll,VL}$
Wiedereinschaltsperrzeit WP	20 min
Mittelungsdauer $T_{amb}$ für Heizkurve	12 h
Mittelungsdauer $T_{amb}$ für Heizgrenze	24 h
Sperrzeiten	möglich, im Standard-Fall nicht aktiviert



### 5.3 Modellabgleich

Für die angemessene Genauigkeit der Simulationsresultate basieren die erstellten Simulationsmodelle auf validierten Modellen etablierter Bibliotheken:

- Gebäudemodelle:
  - Basismodelle: Buildings Library [53]
  - MFH Spezifikationen: basierend auf Tri-HP Project Reference Framework [48]
  - EFH Spezifikationen: basierend auf IEA SHC Task44/HPP Annex 38 [46]
- WP-Modelle und Hydraulik:
  - Buildings Library [53] und TIL-Library [43]
- Regelung:
  - Modelica Standard Library [44], Buildings Library [53]

Obwohl die einzelnen Modelle validiert sind, können im System dennoch falsche Implementierungen oder mathematische bedingte Fehler/Probleme auftreten. Aus diesem Grund wurden das Systemverhalten der einzelnen Konfigurationen kritisch hinterfragt und ggf. Anpassungen am Modell vorgenommen. Unabhängig davon muss darauf hingewiesen werden, dass die Modelle nicht zum Nachweis oder zur Vorhersage von absoluten Werten eines realen Gebäudes dienen, sondern primär für Relativ-Vergleiche untereinander eingesetzt werden.

Der Detaillierungsgrad v. A. des Gebäudemodells bedingt, dass die angestrebten Jahresgang-Simulationen, trotz Einsatz der leistungsfähigen Workstation (Intel i7-5930K CPU und 56 GB RAM), mehrere Stunden dauern. In Kombination mit der gesamten Hydraulik, der Regelung und dem WP-Modell resultieren Rechenzeiten von ca. 20-30 h, welchen mittels entsprechender Automatisierung und Parallelisierung gemäss Kapitel 6.1 Rechnung getragen wurde.



## 6 Fehlersimulation

Mit den erstellten Simulationsmodellen erfolgt die Entwicklung eines Berechnungsvorgehens zur DIBA von WP. Durch Simulationen des Gesamtsystems wurden zunächst Fehler bezüglich Auswirkung auf Effizienz und Lebensdauer quantifiziert. Damit konnten die für die Entwicklung der DIBA relevanten Fehler identifiziert werden. Auf dieser Basis wurde in einem weiteren Schritt das Berechnungsvorgehen für die als relevant eingestuften Fehler entwickelt.

### 6.1 Simulation von Fehlern im Gesamtsystem

Zur Quantifizierung der Auswirkung von Fehlern auf Effizienz und Lebensdauer wurden breit angelegte Fehlersimulationen in Dymola durchgeführt. Dazu wurde pro Fehler für eine bestimmte Systemkonfiguration (WP-Typ, Hydraulik, Regelstrategie, Gebäude) ein einzelner Modellparameter (z.B. die Heizgrenze) in einem definierten Bereich variiert. Um die grosse Anzahl an notwendigen Simulationen automatisiert durchführen zu können, wurde ein Programm in der Programmiersprache Python zur parallelen Ausführung von bis zu 12 Simulation (Anzahl logischer Kerne der eingesetzten Workstation). Für jede Simulation wurden für ca. 250 Variablen die Zeitreihen in zwei Minuten-Schritten abgelegt. Diese bilden die Basis zur Beurteilung der Relevanz der Fehler.

An dieser Stelle ist anzufügen, dass trotz der oben beschriebenen Eingrenzung der Fehlerliste in der Praxis etliche Kombinationen von Fehlern vorkommen können. Zusätzlich gibt es im Feld eine Vielzahl unterschiedliche WP-Heizsysteme (WP-Typ, Hydraulik, Wärmespeicherung, -verteilung, -abgabe, Regelung, Gebäude). Die unten beschriebenen Simulationen haben zum Ziel, mit einem vernünftigen Aufwand ein möglichst aussagekräftiges Bild von Fehlern zu liefern. Daher wurden ausgewählte Fehler in unterschiedlich aufgebauten WP-Heizsystemen simuliert und untersucht. Fehlerkombinationen, also das gleichzeitige Vorhandensein von mehreren Fehlern, wurden jedoch nicht betrachtet, zumal dies eine noch grössere Simulationsstudie bedingen würde.

### 6.2 Kriterien zur Bewertung von simulierten Fehlern

Ziel eines optimal eingestellten WP-Heizsystems ist es, den Komfort stets zu gewährleisten, während das System lediglich die dafür minimal benötigte Energie aufnimmt. Fehler führen zu Einbussen bezüglich Effizienz und Lebensdauer, oft ohne Einfluss auf den Komfort. Um den Einfluss der simulierten Fehler auf die Effizienz und Lebensdauer quantifizieren zu können, wurden hinsichtlich Komfort-, Effizienz- und Lebensdauereinfluss aggregierte Kennzahlen definiert.

#### 6.2.1 Komfortverletzung

Das Projekt DIBA-WP beschäftigt sich nicht detailliert mit der Behaglichkeit im Raum (Temperatur vs. Feuchtigkeit, Strahlung usw.). Es wird ausschliesslich die Einhaltung der Soll-Raumtemperatur zur Bewertung der Komfortverletzung herangezogen. Jede Unterschreitung der Soll-Raumtemperatur ab 0.1 K wird dabei mit der jeweiligen Dauer der Unterschreitung gewichtet (siehe Abbildung 9). Die Komfortverletzung ist folglich das Integral zwischen der Solltemperatur und der Raumtemperatur, sofern zweitens unterhalb der Toleranzschwelle liegt. Die Einheit der Komfortverletzung ist Kh. Nach der Berechnung der Komfortverletzung pro Zone wird das arithmetische Mittel über alle Zonen gebildet und für die Bewertung verwendet. Ab einer Überschreitung der Komfortverletzung von 10 Kh pro Jahr (Komfortschwelle) wird davon ausgegangen, dass der Komfort im Gebäude nicht gewährleistet ist. 10 Kh/a bedeutet, dass die Raum- bzw. Zonentemperaturen im simulierten Jahr durchschnittlich, während 10 Stunden 1 K zu tief waren. Es handelt sich somit um ein sehr konservatives Kriterium, zumal für die Akzeptanz der DIBA ein Trade-off zwischen Komfort und Effizienz nicht vorgesehen ist.

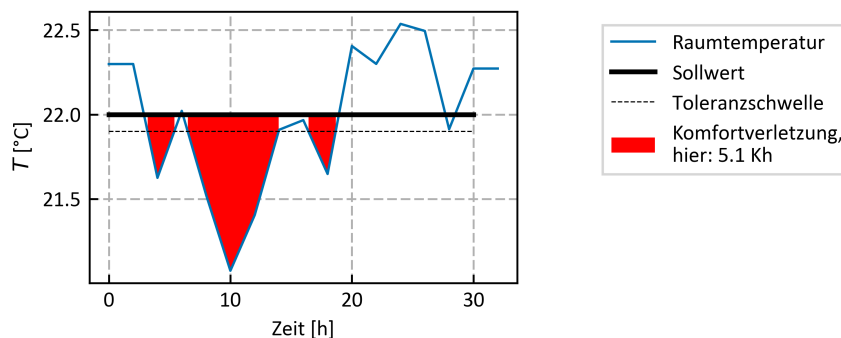


Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung des Integrals zur Bestimmung der Komfortverletzung (rote Fläche).

## 6.2.2 Effizienzeinfluss

Als effizienter Betrieb wird die Gewährleistung der Soll-Raumtemperatur bei minimalem elektrischen Energieverbrauch definiert. Klassische Systemeffizienzbewertungen, wie z. B. die JAZ, könnten hingegen irreführend sein. So kann eine JAZ hoch sein, wenn zu viel Wärme bei Betriebspunkten mit hoher Effizienz abgegeben wird. Da für die Vergleichssimulationen im vorliegenden Projekt stets dieselben Randbedingungen (Umgebungsbedingungen, Interne Lasten) anliegen, kann der Vergleich über die absolute Kenngrösse des spezifischen Energieverbrauchs durchgeführt werden. Aus diesen Gründen wird in diesem Projekt der spezifische elektrische Energiebedarf  $E_{el}$  bezogen auf die EBF in kWh/m<sup>2</sup>/a als Effizienzkriterium verwendet.

## 6.2.3 Lebensdauereinfluss

Die Lebensdauer eines WP-Heizsystems ist u.a. von der Anzahl Einschaltzyklen der WP abhängig. Je öfter eine WP ein- und ausschaltet, je stärker werden WP-Komponenten wie z.B. der Softstarter oder der Kompressor belastet. Die Auswirkung von Fehlern auf die Lebensdauer wird in diesem Projekt mit der Zykluszahl  $N_{Zyklen}$  in [1/a] beurteilt.

## 6.3 Darstellung und Diskussion ausgewählter Simulationsergebnisse

Die aggregierten Kennzahlen ermöglichen, die Auswirkung der Fehler auf die Effizienz und Lebensdauer, unter Berücksichtigung der Einhaltung des Komforts, zu quantifizieren. Für jeden der simulierten Fehler wurde zur visuellen Darstellung zwei Balkendiagramme erstellt. Darin können für jeden Parameterschritt folgende Informationen abgelesen werden:

- Jährlicher spezifischer elektrischer Energiebedarf  $E_{el}$  (bezogen auf die EBF).
- Anzahl Einschaltzyklen der WP
- Arithmetisches Mittel der Komfortverletzungen aller Zonen.

Darauf aufbauend sind folgende Interpretationen der Fehlerauswirkungen möglich:

- Ab welchem Ausmass des Fehlers (Parameterschritt) Komfortverletzungen auftreten
- Fehlereinfluss pro Parameterschritt: Wie hoch der Einfluss des Fehlers, ausgehend vom Optimum (keine Komfortverletzung und kleinster Energiebedarf), pro Parameterschritt ist. Dieser relative Fehlereinfluss (siehe Abbildung 11) lässt Aussagen über die Sensitivität des betrachteten Fehlers zu.
- Fehlereinfluss über mehrere Parameterschritte: Wie hoch der Einfluss des Fehlers, ausgehend vom Optimum (keine Komfortverletzung und kleinster Energiebedarf), über den betrachteten Parameterbereich ist. Der maximale Fehlereinfluss (siehe Abbildung 11) lässt Aussagen über die Auswirkung des Fehlers im betrachteten Bereich zu.



In den folgenden Kapiteln werden vier ausgewählte Fehler detailliert dargestellt und beschrieben. Die Resultate aller simulierten Fehler befinden sich im Anhang 13.4 ab Seite 96.

### 6.3.1 Heizgrenze

Der Einfluss einer falsch eingestellten Heizgrenze wurde anhand einer kontinuierlich leistungs-geregelten S/W-WP mit hydraulischer Systembauvariante WPSM5 an allen drei zur Verfügung stehenden Gebäudetypen (MFH30/MFH60/MFH100) simuliert. Dabei wurde die Heizgrenze über einen Parameterbereich von 5-23°C mit einem Parameterschritt von 2 K variiert. Die Simulationsergebnisse für das MFH30 und MFH60 sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

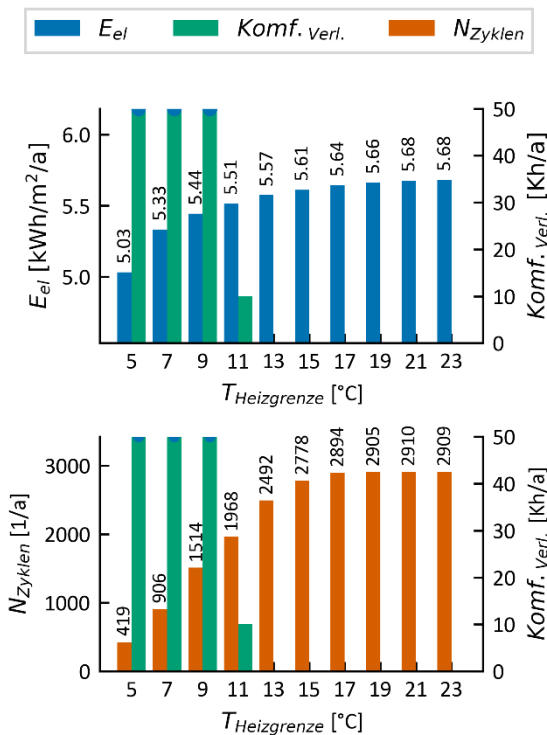


Abbildung 10: Einfluss einer falsch eingestellten Heizgrenze in einem Parameterbereich 5-23°C, Parameterschritt 2 K, MFH30 und WPSM5.

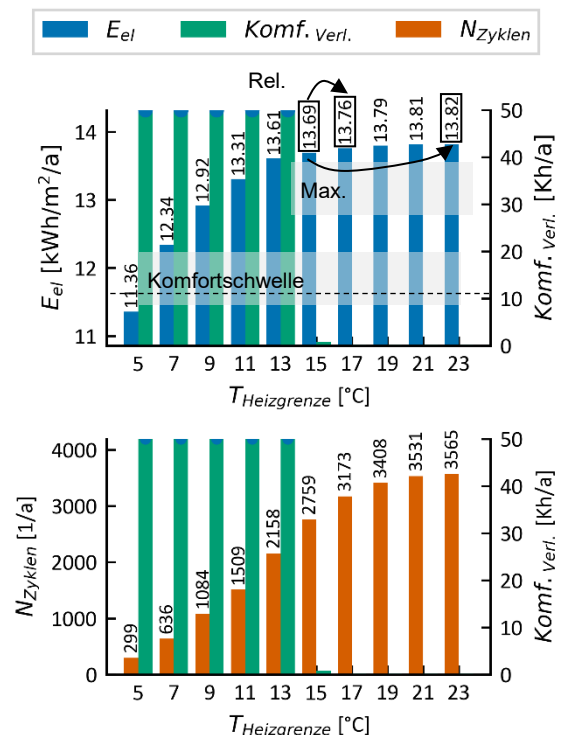


Abbildung 11: Einfluss einer falsch eingestellten Heizgrenze in einem Parameterbereich 5-23°C, Parameterschritt 2 K, MFH60 und WPSM5. Relativer und Maximaler Fehlereinfluss sind am Beispiel des Energieverbrauchs ab Erreichen des Schwellwerts der Komfortverletzung beispielhaft hervorgehoben.

In Abbildung 11 ist erkennbar, dass die Komfortverletzung für das MFH60 bei einer Heizgrenze von 13°C über 50 Kh liegt. Die Erhöhung um 2 K auf 15°C führt zu einer deutlichen Abnahme der Komfortverletzung auf unter 10 Kh. Entsprechend liegt die optimale Heizgrenze zwischen 13 und 15°C und wird einfachheitshalber bei 15°C angenommen. Zum nächsten Parameterschritt (17°C) ergibt sich eine Zunahme des elektrischen Energiebedarfs von 13.69 auf 13.76 kWh/m²/a, was einer Zunahme um 0.51 % entspricht.

Die Tabelle 9 zeigt den maximalen und relativen Fehlereinfluss bei Variation der Heizgrenze für die Gebäude MFH30, MFH60 und EFH100.



Tabelle 9: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse zur Auswirkung einer falsch eingestellten Heizgrenze.

	Max. Fehlereinfluss in %			Rel. Fehlereinfluss in %		
	MFH30	MFH60	EFH100	MFH30	MFH60	EFH100
Auswirkung auf Effizienz ( $E_{el}$ )	+2.0	+0.9	+0.9	+0.7	+0.5	+0.4
Auswirkung auf Lebensdauer ( $N_{Zyklen}$ )	+16.8	+29.2	+14.4	+11.5	+15	+8.5

Obwohl nach Einschätzung von Fachexperten eine falsch eingestellte Heizgrenze im Feld häufig auftritt, ist deren Einfluss auf die Effizienz gemäss der Simulationsergebnisse gering. Grund dafür ist, dass ein einzelraumgeregeltes Gebäude (wie in DIBA-WP modelliert), trotz zu hoch eingestellter Heizgrenze, nur wenig zusätzliche Wärmeenergie bezieht. Einzig die ungeregelten Zonen wie z. B. Nassräume beziehen noch Wärme. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen in diesen Zeiträumen ist die Energiemenge allerdings gering. Hingegen ist feststellbar, dass eine zu hoch eingestellte Heizgrenze zu einem vermehrten Ein- und Ausschalten der WP-Anlagen führt. Weiter ergibt sich neben einer erhöhten Zykluszahl der WP auch eine hohe Laufzeit der Entladepumpe im Heizkreis. Einen negativen Einfluss auf die Komponenten-Lebensdauer ist somit feststellbar, wird aber als moderat erachtet.

Gemäss Einschätzung des Projektteams ist die Relevanz einer falsch eingestellten Heizgrenze in Bezug auf die Energieeffizienz und Lebensdauer, als gering einzustufen.

### 6.3.2 Heizkurve

Der Einfluss einer falsch eingestellten Heizkurve wurde ebenfalls anhand einer kontinuierlich leistungsgeregelten S/W-WP mit hydraulischer Systembauvariante WPSM5 an allen drei zu Verfügung stehenden Gebäudetypen (MFH30/MFH60/MFH100) untersucht. Dabei wurden die Soll-Temperaturen von Vor- und Rücklauf der Heizkurve bei Nominalbedingungen ( $-8^{\circ}\text{C}$ ) über einen Parameterbereich von 18 K mit einem Parameterschritt von 2 K variiert. Die Simulationsergebnisse für das MFH30 und MFH60 sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

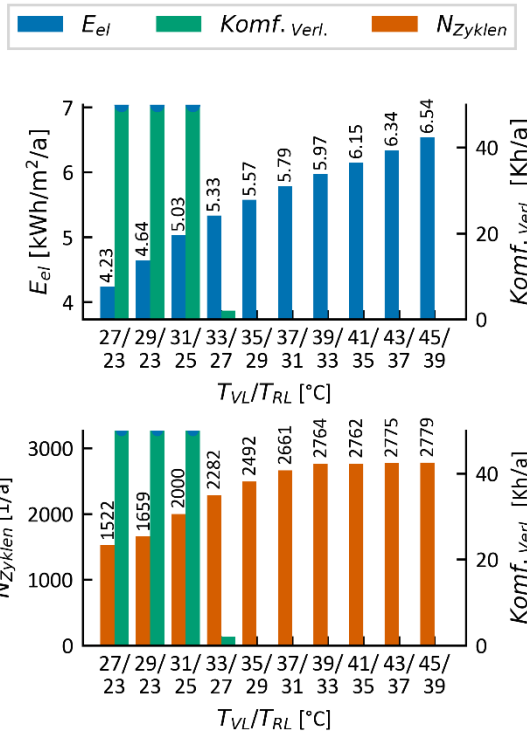


Abbildung 12: Einfluss einer falsch eingestellten Heizkurve über einen Parameterbereich von 27-45°C Solltemperatur im Vorlauf, Parameterschritt 2 K, MFH30 und WPSM5.

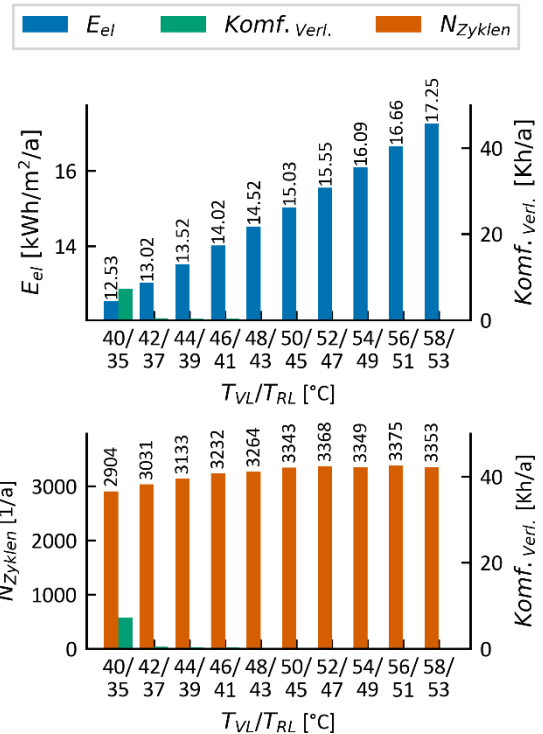


Abbildung 13: Einfluss einer falsch eingestellten Heizkurve über einen Parameterbereich von 40-58°C Solltemperatur im Vorlauf, Parameterschritt 2 K, MFH60 und WPSM5.

Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen, dass die Auswirkung einer falsch eingestellten Heizkurve auf Effizienz und Lebensdauer von grosser Bedeutung ist. Entscheidend für die markanten Effizienz-einbußen infolge zu hoch eingestellter Heizkurve ist der höhere Temperaturhub der WP. Zusätzlich führt eine zu hoch eingestellte Heizkurve bei der simulierten Regelstrategie dazu, dass die WP eine zu hohe Heizleistung abgibt. Dies führt zu einer schnelleren Ladung des Heizspeichers bzw. zu einer kürzeren Laufzeit der WP. Dadurch steigt die Zyklenzahl an, was eine negative Auswirkung auf die Lebensdauer haben kann. Darauf basierend und mit der Kenntnis des häufigen Auftretens im Feld, stellt sich eine falsch eingestellte Heizkurve für die Entwicklung der DIBA als relevant dar.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse zur Auswirkung einer falsch eingestellten Heizkurve.

	Max. Fehlereinfluss in %			Rel. Fehlereinfluss in %		
	MFH30	MFH60	EFH100	MFH30	MFH60	EFH100
Auswirkung auf Effizienz ( $E_{el}$ )	+22.7	+37.7	+16.2	+4.5	+3.9	+3.8
Auswirkung auf Lebensdauer ( $N_{Zyklen}$ )	+21.8	+16.2	+0.9	+9.2	+4.4	+0.6



### 6.3.3 Massenstrom Quellenpumpe

Die Auswirkung einer falsch ausgelegten oder falsch eingestellten Quellenpumpe einer kontinuierlich leistungsgeregelten S/W-WP wurde anhand eines WP-Heizsystems mit hydraulischem Aufbau gemäss WPSM5 und WPSM6 sowie einem MFH30 untersucht. Zur Simulation wurde der Quellenpumpen-Massenstrom vom Auslegungspunkt in mehreren Parameterschritten um 0.2 kg/s verändert. Die Simulationsergebnisse für ein MFH30 mit den untersuchten Heizsystem nach WPSM5 und 6 sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

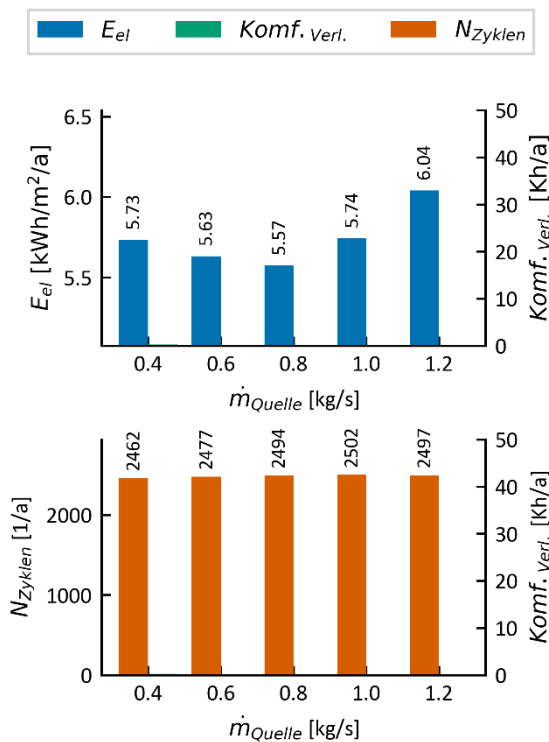


Abbildung 14: Einfluss falsch ausgelegter/eingestellter Quellenpumpe über einen Parameterbereich von 0.4-1.2 kg/s, Parameterschritt 0.2 kg/s, MFH30 und WPSM5.

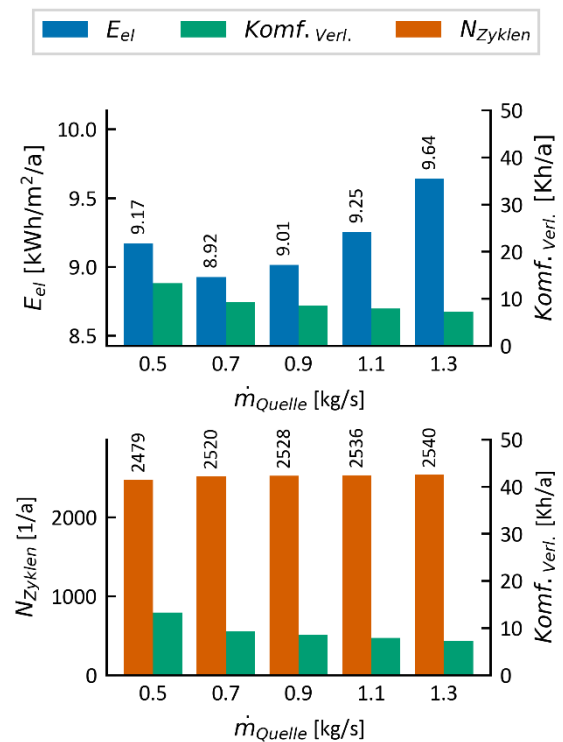


Abbildung 15: Einfluss falsch ausgelegter/eingestellter Quellenpumpe über einen Parameterbereich von 0.5-1.3 kg/s, Parameterschritt 0.2 kg/s, MFH30 und WPSM6.

Die Untersuchungen (siehe Tabelle 11) zeigen, dass ein zu niedrig aber auch ein zu hoch eingestellter Quellenpumpen-Massenstrom negative Auswirkungen auf den Energiebedarf haben. Ist der Quellenpumpen-Massenstrom zu niedrig eingestellt, führt dies zu tieferen Verdampfungstemperaturen bzw. zu einem grösseren Temperaturhub der WP. Ist der Quellenpumpen-Massenstrom hingegen zu hoch eingestellt, führt dies zu einem erhöhten Druckverlust über die Erdwärmesonde bzw. zu einer erhöhten Leistungsaufnahme der Quellenpumpe. Dies bedeutet, dass bei der Auslegung und im Betrieb der Quellenpumpe ein Optimum gefunden werden kann, welches sich in einem möglichst niedrigen Energiebedarf für das Gesamtsystem niederschlägt. Die Auswirkung eines falsch eingestellten Quellenpumpen-Massenstroms auf die Lebensdauer kann hingegen vernachlässigt werden. Da in der Praxis die Quellenpumpe gemäss Fehlerliste oft nicht im Optimum betrieben wird und die Auswirkung auf die Effizienz nicht zu vernachlässigen ist, wird dieser Fehler für die Entwicklung der DIBA als relevant eingestuft.



Tabelle 11: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse zur Auswirkung einer falsch ausgelegten Quellenpumpe.

	Max. Fehlereinfluss in %		Rel. Fehlereinfluss in %	
	MFH30, WPSM5	MFH30, WPSM6	MFH30, WPSM5	MFH30, WPSM6
Auswirkung auf Effizienz ( $E_{el}$ )	+8.4	+8.1	+3.1	+2.8
Auswirkung auf Lebensdauer ( $N_{Zyklen}$ )	+1.6	+2.5	+0.6	+1.7

### 6.3.4 Umschalttemperatur auf Heizstäbe zur Warmwasser-Aufbereitung

Die Auswirkung einer falsch eingestellten Umschalttemperatur auf die Heizstäbe zur WW-Aufbereitung wurde anhand eines WP-Heizsystems mit hydraulischem Aufbau gemäss WPSM6 sowie dem MFH30 untersucht. Die Simulation erfolgte über einen Parameterbereich von 45-65°C und mit einem Parameterschritt von 5 K. Die Simulationsergebnisse für ein MFH30 mit dem untersuchten Heizsystem nach WPSM6 sind in Abbildung 16 dargestellt.

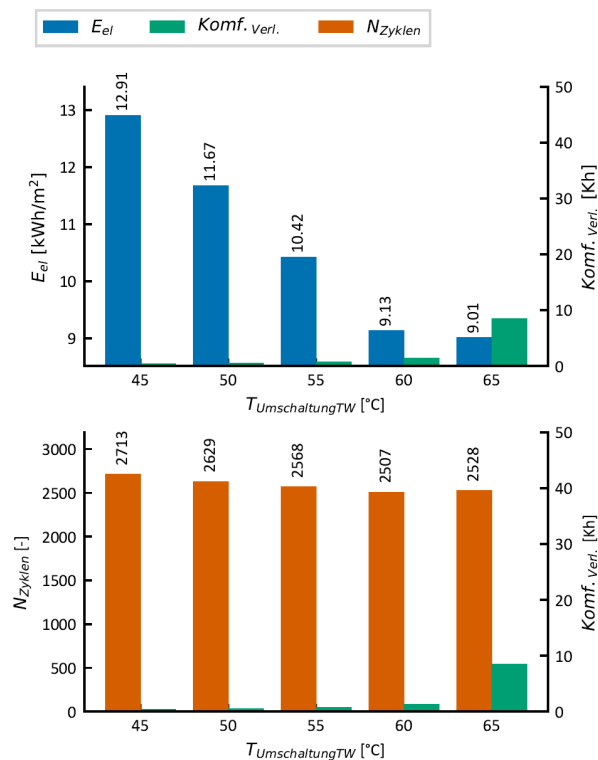


Abbildung 16: Einfluss einer falsch eingestellter Umschalttemperatur auf Heizstäbe zur WW-Aufbereitung über einen Parameterbereich von 45-65°C, Parameterschritt 5 K, MFH30 und WPSM6.



Die Ergebnisse in Tabelle 12 zeigen, dass eine falsch eingestellte Umschalttemperatur auf die Heizstäbe zur WW-Aufbereitung zu einem erheblichen Anstieg des Energiebedarfs führt. Ein falscher Einstellwert (unterhalb der Wasser-Temperatur im Heisspeicher, die noch mit der WP erzeugt werden kann) hat somit grosse Effizienzeinbussen zur Folge, wohingegen sich die Einschaltzyklen nur moderat ändern. Aufgrund des Effizienzeinflusses wird die Wichtigkeit der Umschalttemperatur auf die Heizstäbe als hoch erachtet.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse zur Auswirkung einer zu tiefen Umschalttemperatur auf die elektrischen Heizstäbe zur WW-Aufbereitung.

	Max. Fehlereinfluss in %	Rel. Fehlereinfluss in %
	MFH30	MFH30
Auswirkung auf Effizienz ( $E_{el}$ )	+43.3	+1.3
Auswirkung auf Lebensdauer ( $N_{zyklen}$ )	+8.2	+2.4

## 6.4 Bewertung und Selektion der simulierten Fehler

Das in Kapitel 6.2 dargestellte Auswertungsverfahren hinsichtlich Komfortverlust, Energieverbrauch und Lebensdauereinfluss wurde auf alle 27 simulierten Fehler angewandt. Zur Selektion der für die DIBA relevanten Fehler wurden die in Kapitel 6.3 dargestellten Kennwerte für alle Fehler berechnet und in einer Übersichtstabelle dargestellt. Die folgenden Kennwerte wurden dabei betrachtet:

- Maximaler Einfluss auf Energieverbrauch (ab Komfortschwelle bis Ende Parameterbereich)
- Maximaler Einfluss auf Lebensdauer (ab Komfortschwelle bis Ende Parameterbereich)
- Relativer Einfluss auf Energieverbrauch (ab Komfortschwelle bis zum nächsten Parameterschritt)
- Relativer Einfluss auf Lebensdauer (ab Komfortschwelle bis zum nächsten Parameterschritt)

Die Übersichtstabelle aller simulierten Fehler ist im Anhang im Kapitel 13.3 ab Seite 93 ersichtlich. Es ist anzumerken, dass sämtliche ermittelten Kennwerte von den gewählten Parameterschritten und -bereichen abhängig sind. Deshalb wurde für die Bewertung der Fehler-Relevanz auch der Verlauf der Fehlerauswirkungen berücksichtigt (siehe z. B. Abbildungen in Kapitel 6.3).

Basierend auf den Priorisierungs-Kriterien aus Kapitel 4, den berechneten Kennwerten und deren Verläufe wurden drei für die DIBA relevante Fehler identifiziert. Es sind Fehler, die gemäss der Motivation des Projektes korrigierbare Einstellwerte sind, optimiert werden können und keine Änderung der Nutzerbedürfnisse bedingen. Es sind dies:

- Eine falsch eingestellte Heizkurve
- Ein falsch eingestellter Massenstrom der Quellenpumpe
- Eine falsche Umschalttemperatur auf interne Heizstäbe zur WW-Erwärmung

Ergänzend zu diesen drei Fehlern, wurde aufgrund der Diskussionen während der Begleitgruppensitzung ein Kompromiss hinsichtlich Behandlung der Abtauung eingegangen: Obwohl die Abtauregelung als solches produktspezifisch gelöst und nicht in grösserer Masse objektabhängig ist, wurde die Verschlechterung der Abtauung (Trenderkennung) als zu behandelnder Fehler in die weitere Projektbearbeitung aufgenommen.



## 7 Berechnungsvorgehen zur digitalen Betriebsanalyse

Die in Kapitel 6 beschriebene Fehlersimulation mit den vier resultierenden zu bearbeitenden Fehlern bildet die Basis für die nachfolgend beschriebenen Berechnungsvorgehen. Es werden nachfolgend für jeden Fehler die relevanten Grundlagen zu dessen Erkennung erläutert und die erarbeiteten Berechnungsvorgehen detailliert beschrieben.

### 7.1 Erkennung einer falsch eingestellten Heizkurve

#### 7.1.1 Grundlegende Zusammenhänge der Heizkurveneinstellung

##### Heizkurve

Zur Regelung einer Heizungs-WP wird i.d.R. eine Heizkurven-Funktion implementiert, die in Abhängigkeit der (gefilterten) Aussentemperatur die Soll-Vorlauftemperatur  $T_{VL,soll}$  definiert. Die konkrete Implementierung und Parametrisierung der Heizkurve ist dabei herstellerspezifisch. Das Grundprinzip der aussentemperaturabhängigen Vorlauftemperatur bleibt in sich aber gleich. Die Heizkurve kann mit folgender Gleichung 1 beschrieben werden [53]:

$$T_{VL,soll} = T_{Raum} + \left( \frac{T_{VL,nom} + T_{RL,nom}}{2} - T_{Raum,nom} \right) \dot{Q}_{rel}^{\frac{1}{m}} + \frac{T_{VL,nom} - T_{RL,nom}}{2} \dot{Q}_{rel} \quad (1)$$

$T_{Raum}$  ist dabei die Raumtemperatur,  $T_{VL,nom}$  und  $T_{RL,nom}$  die nominalen Vor- und Rücklauftemperaturen und  $T_{Raum,nom}$  die nominale Raumtemperatur beim Auslegungspunkt des Heizsystems;  $m$  ist der sog. Heizkurvenexponenten, welcher in Abhängigkeit des eingesetzten Wärmeabgabesystems (WA) zu setzen ist,  $\dot{Q}_{rel}$  ist der relative Wärmestrom gemäss Gleichung 2.

$$\dot{Q}_{rel} = \max \left( 0, \frac{T_{Raum} - (T_{amb} + \Delta T_{HG})}{T_{Raum,nom} - (T_{amb,nom} + \Delta T_{HG})} \right) \quad (2)$$

Diese beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  und dem benötigten Wärmestrom.  $T_{amb,nom}$  ist die nominelle Umgebungstemperatur, bei welcher  $T_{VL,nom}$  vom Heizsystem benötigt wird (Der Auslegungspunkt, für Zürich z.B.  $-8^{\circ}\text{C}$  [52])  $\Delta T_{HG}$  stellt dabei die Differenz zwischen der nominellen Raumtemperatur und der Heizgrenze  $T_{HG}$  dar:

$$\Delta T_{HG} = T_{Raum,nom} - T_{HG} \quad (3)$$

Abbildung 17 zeigt eine beispielhafte Heizkurve nach Gleichungen 1-3, wie sie im vorliegenden Projekt verwendet wurde. Die rot markierten Punkte stellen dabei die Parametrierungspunkte ( $T_{VL,nom}$  und  $T_{HG}$ ) auf der Kurve dar.

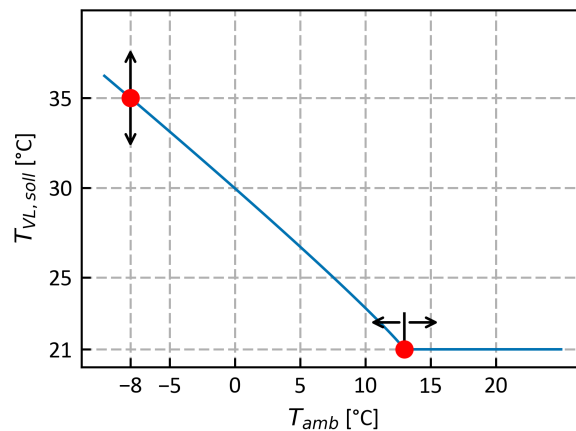


Abbildung 17: Beispielhafte Heizkurve mit den beiden markierten Parametrierungspunkte Heizgrenze und Nominal-Vorlauftemperatur

## Raumkomfort

Zur Gewährleistung des Raumkomforts muss die Vorlauftemperatur des in die WA eintretenden Mediums ausreichend hoch sein, sodass die WA einen genügend hohen Wärmestrom an den Raum übertragen kann. Eine überhöhte Vorlauftemperatur bringt keinen zusätzlichen Komfortgewinn, aber verursacht infolge des höheren Temperaturhubes der WP signifikante Effizienzeinbußen. Die Heizkurve ist im theoretischen Idealfall also genau so eingestellt, dass die WA bei offenen Raumthermostaten bzw. Ventilen genau die richtige Leistung an den Raum überträgt und die gewünschte Raumtemperatur damit konstant halten kann. Aus diversen Gründen (unterschiedliche Exposition der Räume, interne Lasten usw.) ist dies allerdings nicht realistisch. Zur Anpassung des effektiven Wärmestroms der WA an den Wärmebedarf des Gebäudes / der Räume sind folglich Regelungsmechanismen erforderlich. Hierbei gilt die Unterscheidung zwischen zwei vornehmlich angewandten Regelungsmethoden.

- FBH: Im Fall einer FBH ist i.d.R. eine Einzelraumregelung mittels Wandthermostaten und diskret schaltenden Ventilen am FBH vorhanden.
- Radiatoren: Bei Gebäuden mit Radiatoren sind die Ventile i.d.R. über kontinuierlich regelnde Heizkörperthermostate geregelt.

Die Regelmethoden der beiden WA-Typen wirken sich dabei unterschiedlich auf den Rest des Systems aus. Nachfolgend wird daher dargestellt, inwiefern sich ein zu hohe Vorlauftemperatur im System bemerkbar macht.

## Massenstromverlauf

Bei FBH ist die momentane Heizleistung bei geöffneten Ventilen i.d.R. grösser als die benötigte Heizleistung. Die Anpassung erfolgt über die diskret regelnden Ventile. Durch Ausnützung der Trägheit des Gebäudes, kann die Raumtemperatur so nahezu konstant gehalten werden. Der Durchfluss über die einzelnen Heizkreise bleibt unabhängig von der HeizkurvenEinstellung näherungsweise konstant, da die Heizkreispumpe auf eine konstante Druckdifferenz regelt. Im Falle einer überhöhten Heizkurve bleibt bei geöffnetem Heizkreis folglich der Durchfluss konstant und das treibende Temperaturgefälle an der WA wird grösser. Die momentane Heizleistung steigt in der Folge an. Die WA regelt dies über die Taktung der einzelnen Regelventile entsprechend aus und der Nutzer bemerkt keinen Unterschied. Es lässt sich aber beobachten, dass die Ventile bei zu hohen Vorlauftemperaturen nur kurz geöffnet sind (geringer Auslastungsgrad). Der mittlere Massenstrom, über mehrere Taktzyklen betrachtet, ist deswegen tiefer als bei einer korrekt eingestellten Heizkurve. Abbildung 18 zeigt exemplarisch, inwiefern sich eine überhöhte Heizkurve auf die Leistung der WA auswirkt und wie diese wiederum das Einschaltverhältnis der FBH beeinflusst. Es ist erkennbar, dass bei einer überhöhten Heizkurve die



momentane Heizleistung  $\dot{Q}_{Eff}$  ansteigt und deswegen der Massenstrom  $\dot{m}_{Eff}$  während einer kürzeren Zeit anliegt.

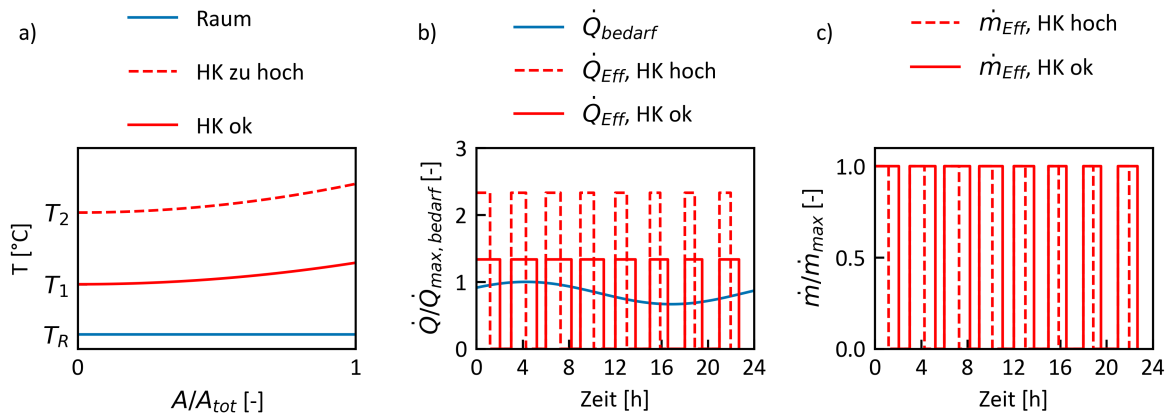


Abbildung 18: Exemplarische Darstellung der Auswirkungen einer überhöhten Heizkurve (a) bei einer FBH mit diskreter Einzelraumregelung auf die momentane Heizleistung (b) sowie den Massenstrom (c).

Im Gegensatz zur FBH wird bei Radiatoren die momentane Heizleistung der benötigten Heizleistung mittels kontinuierlicher Variation des Massenstroms angepasst. Der mittlere Massenstrom ist aber auch bei Radiator-Heizungen im Falle einer überhöhten Heizkurve tiefer als bei einer richtig eingestellten Heizkurve. Abbildung 19 illustriert diese Effekte. Der Massenstrom  $\dot{m}_{Eff}$  bleibt entsprechend der Überhöhung der Heizkurve auf einem tieferen Niveau.

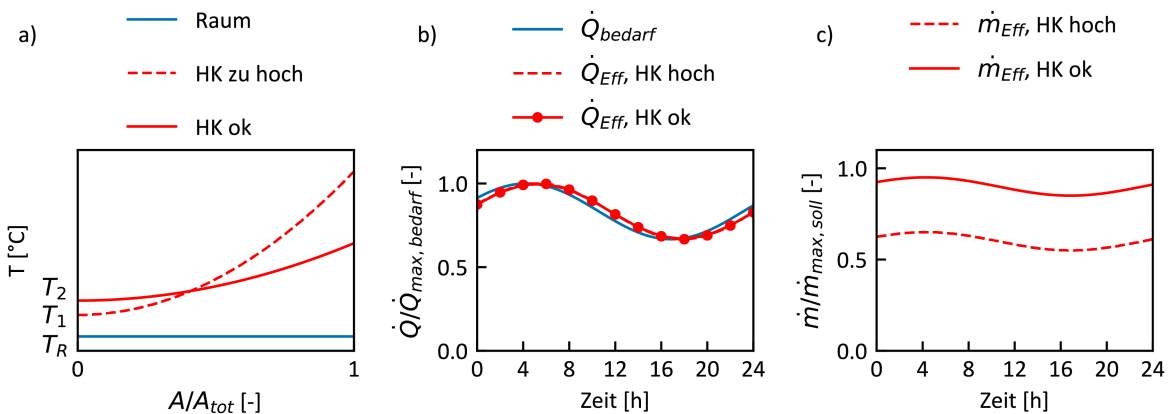


Abbildung 19: Exemplarische Darstellung der Auswirkungen einer überhöhten Heizkurve bei einem Radiatorsystem auf die momentane Heizleistung (b) sowie den Massenstrom (c).

### 7.1.2 Berechnungsvorgehen Mittleres Massenstromverhältnis

Wie im vorhergehenden Kapitel aufgezeigt, beeinflusst die Höhe der Vorlauftemperatur bei beiden Regelungsmethoden den mittleren Massenstrom. Im Berechnungsvorgehen «Mittleres Massenstromverhältnis (MMV)» wird dieser Umstand genutzt, um eine Aussage über die Einstellgüte der Heizkurve zu treffen.

Konkret wird mit diesem Berechnungsvorgehen für die stabilsten Betriebszeiten des Tages, namentlich die Morgenstunden, der Massenstrom der WA gemittelt betrachtet. Dieser wird dabei in Relation zum 49/105



maximal beobachteten Massenstroms gestellt und in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur ausgewertet. Das Berechnungsvorgehen kann wie folgt zusammengefasst werden.

1. Bestimmung des maximalen Massenstroms der WA in der Heizperiode (kann zeitgleich mit Schritt 2 erfolgen)
2. Aufzeichnung des gemittelten Massenstroms in Abhängigkeit der Aussentemperaturen (Index  $i$ ) je betrachtetem Zeitfenster (Morgenstunden, Index  $k$ )
3. Bestimmung des MMV in Abhängigkeit der Aussentemperatur nach Vorliegen einer genügend grossen Anzahl Datenpunkten (z.B. eine Heizperiode)

$$MMV(T_i) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N \dot{m}_{av,k}(T_i)}{\dot{m}_{max}} \quad \forall i \quad (4)$$

4. Überwachung des MMV im sensitiven Temperaturbereich (gemäss Simulationen ca. um 0°C)
5. Vergleich des MMV gegenüber einem vorgegebenen Schwellwert (gemäss Simulation könnte 0.8 ein möglicher Wert sein, eine Erprobung im Feld scheint hier jedoch unerlässlich zu sein.)

Zur Erarbeitung dieses Berechnungsvorgehens wurden mehrere Simulationen mit verschiedenen Systemkonfigurationen durchgeführt. Abbildung 20 zeigt dazu beispielhaft die MMV bei jeweiligen Umgebungstemperaturen für das Gebäudemodell MFH30 mit einer kontinuierlich leistungsregelten WP und der Hydraulik-Topologie WPSM5 auf. Hierzu wurde die Heizkurve bei jeder Simulation mittels Änderung der Vorlauftemperatur beim Auslegepunkt angepasst. Im vorliegenden Fall waren dies Vorlauftemperaturen von 31°C bis 45°C, wobei in 2 K-Schritten simuliert wurde. Die Legende zeigt die entsprechenden Vorlauftemperaturen, die über das Jahr aufsummierten Komforteinbussen sowie den spezifischen elektrischen Energiebedarf an. Auf den ersten Blick lässt sich für den mittleren Teil der Grafik (ca. -2°C bis 5°C) erkennen, dass für die hohen Heizkurveneinstellungen ein tieferes MMV resultiert als für die niedrigere Heizkurveneinstellungen. Weiter lässt sich erkennen, dass die niedrigsten Heizkurveneinstellungen (31°C, 33°C und 35°C) keine nennenswerten Unterschiede zueinander haben. Zugleich sind es auch die drei simulierten Heizkurven, bei denen Komforteinbussen aufgetreten sind.

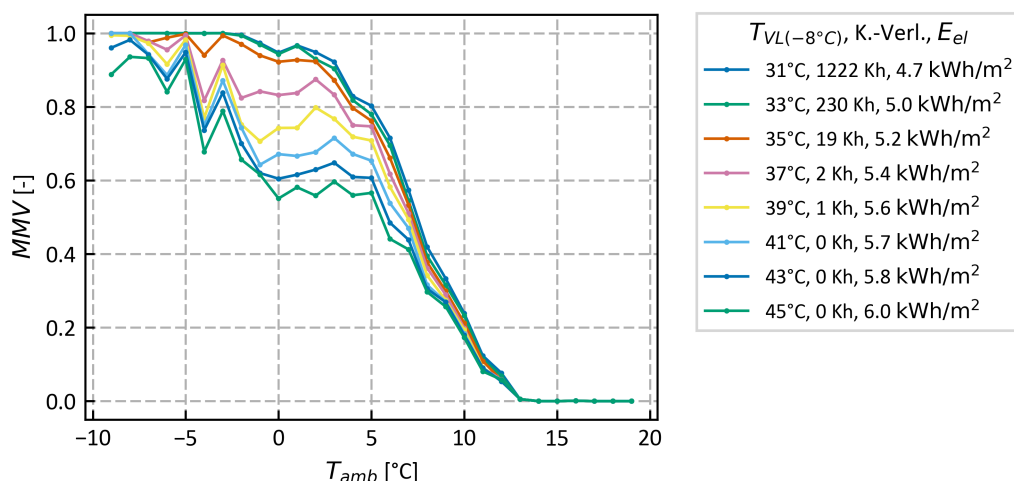


Abbildung 20: Mittleres Massenstromverhältnis (MMV) für verschiedene Heizkurveneinstellungen beim MFH30 (FBH, Neubau) mit WPSM5 und WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung.



Betrachtet man das MMV bei 0°C in Kombination mit der sich ergebenden Komfortverletzung (Abbildung 21), lässt sich beobachten, dass nahe an einer optimal eingestellten Heizkurve (ca. 35°C) das MMV nahe eins ist.

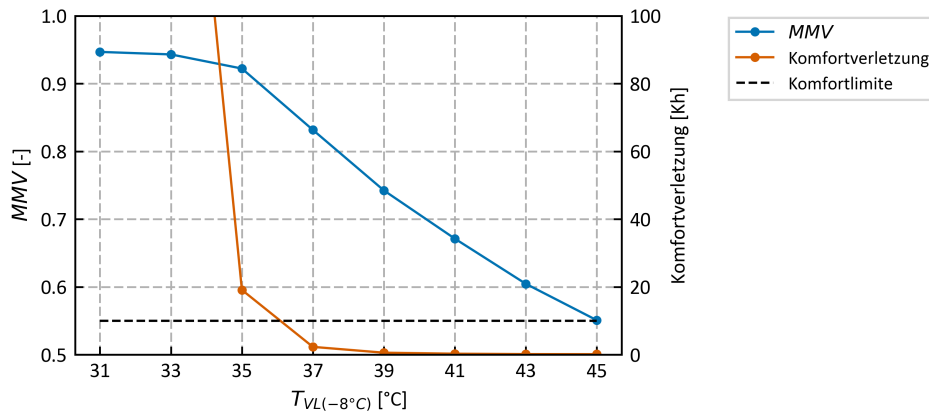


Abbildung 21: MMV und Komfortverletzung bei 0°C Aussentemperatur für den Fall aus Abbildung 20 in Abhängigkeit der Heizkurveneinstellung.

Betrachtet man hingegen den gesamten Temperaturbereich, fällt auf, dass die MMV, sowohl am oberen als auch am unteren Ende, trotz verschiedener Heizkurveneinstellungen keine deutlichen Änderungen aufweisen. Während im unteren Temperaturbereich die kleine Anzahl an Datenpunkten die Ursache für die reduzierte Aussagekraft sein dürfte (vgl. Abbildung 22) und dies auch im Feld der Fall sein wird, wurden für den oberen Bereich von 5°C-13°C mittels Simulationen erörtert, dass die höhere Fluktuation in den solaren Einträgen hauptverantwortlich für die reduzierte Aussagekraft der Methode sein dürfte. Es wurde konkret untersucht, wie sich das mittlere MMV bei der (partiellen) Eliminierung der solaren Einträge verhält. Eine genaue Festlegung aller Einflussfaktoren ist jedoch nicht möglich, zumal in diesem Temperaturbereich (der Übergangszeit) die Dynamik der Umgebungsbedingungen hoch ist.

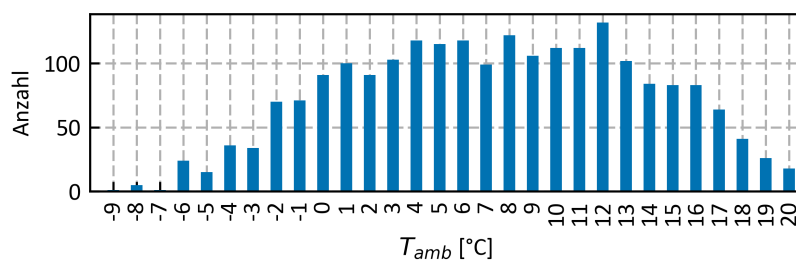


Abbildung 22: Verteilung der Anzahl Datenpunkte in der Auswertung in Abbildung 20.

Bei der Anwendung des vorangehend beschriebenen Berechnungsvorgehens auf dasselbe Gebäudemodell, allerdings mit der hydraulischen Verschaltung nach WPSM1, ergibt sich der Verlauf des MMV gemäss Abbildung 23. Einerseits lässt sich feststellen, dass die MMV ebenfalls im Bereich um 0°C am besten die unterschiedlichen Heizkurveneinstellung abbildet und es somit ebenso eine Abhängigkeit des MMV gegenüber der Einstellgüte der Heizkurve gibt. Andererseits ist kein konstanter Bereich des MMV erkennbar. Zu niedrig eingestellte Heizkurven führen wiederum dazu, dass das MMV gegen eins strebt.

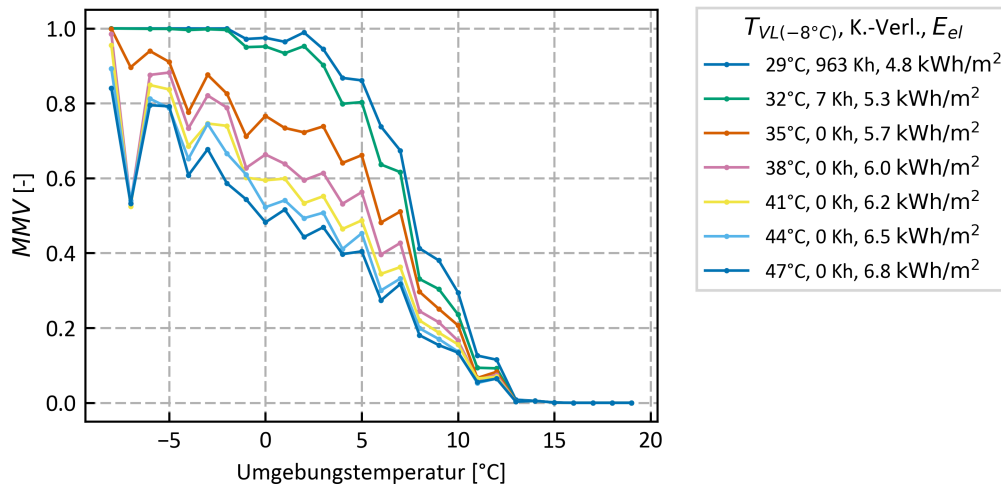


Abbildung 23: MMV für verschiedene (überhöhte bis zu tiefe) Heizkurveinstellungen beim MFH30 (FBH, Neubau) mit WPSM1 und einer WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung.

Bei der Anwendung desselben Berechnungsvorgehens auf das Gebäude mit Radiatoren ergeben sich die MMV gemäss Abbildung 24. Während in diesem Fall ebenfalls eine gewisse Abhängigkeit der MMV von der Heizkurveinstellung erkennbar ist, treten hier bereits vor der Erreichung der Vollaustattung der WA (MMV = 1) Komfortverluste auf. Es ist zudem festzuhalten, dass das MMV hier nicht mit steigender Vorlauftemperatur monoton abnehmend ist, zumal der maximale Massenstrom nicht immer gleich ist. Da mit hoher Heizkurveinstellung bei dem System mit Radiatoren nie alle Ventile gleichzeitig voll offen waren, überrascht dies nicht.

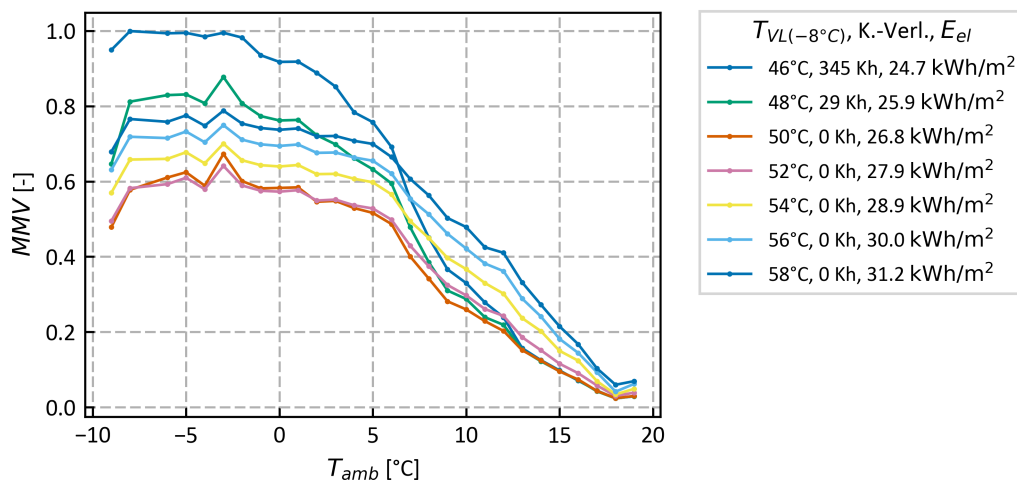


Abbildung 24: MMV für verschiedene (überhöhte bis zu tiefe) Heizkurveinstellungen beim EFH100 (Radiatoren, Altbau) mit WPSM5 und einer WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung.

Voraussetzung für die beschriebenen Analysen ist das Vorhandensein einer Durchflussmessung im Heizkreis. Dies ist mit einem gewissen Mehraufwand verbunden. Für eine weitere Vereinfachung der Umsetzbarkeit ist zu überprüfen, inwiefern die Informationen über die Auslastung der WA an einfach messbaren Grössen, wie z.B. der el. Leistung der Umwälzpumpe im Heizkreis feststellbar ist.



Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem Berechnungsverfahren MMV insbesondere bei Systemen mit FBH eine Methode vorliegt, die mit geringem Zusatzaufwand eine Aussage über die Einstellgüte der Heizkurve zulässt. Die fehleranfällige Eingabe von Metadaten ist nicht erforderlich.

Im nachfolgenden Kapitel 7.1.3 wird das Berechnungsverfahren MMV erweitert, um auch in den Übergangszeiten eine Aussage zur Einstellgüte treffen zu können. Weiter erlaubt das erweiterte Berechnungsverfahren die Berechnung der Heizkurven-Form. In Kapitel 7.1.4 wird zudem aufgezeigt, wie die Einstellgüte der Heizkurve bei Gebäuden mit digitalen WA-Reglern ohne zusätzliche Messtechnik verbessert werden könnte.



### 7.1.3 Berechnungsvorgehen kA-Wert

Kapitel 7.1.1 bringt zum Ausdruck, dass die Erhöhung des zeitlich gemittelten Massenstroms durch die WA, die Reduktion der Vorlauftemperaturen in einem Heizsystems erlaubt. Dies kann der besseren Ausnutzung der Wärmeübertragungsfähigkeit der WA gleichgesetzt werden. Selbsterklärend ist die Erhöhung des zeitlich gemittelten Massenstroms nur dann möglich, wenn die zeitlich gemittelten Ventilstellungen nicht bereits 100 % betragen (vollständig offen). Das Berechnungsvorgehen «kA-Wert» basiert auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur und dem mittleren Massenstrom sowie dem oben erläuterten Berechnungsvorgehen «Mittleres Massenstromverhältnis (MMV)». Er hat zum Ziel, die jeweils optimale Heizkurve über den gesamten Temperaturbereich zu bestimmen. Die Bezeichnung «kA» entstammt dabei der Grundgleichung 5. Sie beschreibt die Abhängigkeit des Wärmestroms  $\dot{Q}$  vom Wärmeübertragungskoeffizient  $k$ , der Fläche  $A$  und der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$ .

$$\dot{Q} = k A \Delta T_m \quad (5)$$

Das Berechnungsvorgehen «kA-Wert» hat den Ansatz die jeweilige Wärmeübertragungsfähigkeit, die sich anhand des Produktes  $k \cdot A$  ausdrücken lässt, zu ermitteln und für die Bestimmung der optimalen Heizkurve weiterzuverwenden. Nachfolgend wird das dazu erarbeitete Vorgehen erläutert. Die dabei erwähnten Eingriffsgrenzen bzw. Werte zur Abgrenzung von Datensätzen sind Beispielswerte wie sie im vorliegenden Projekt verwendet wurden. Zur besseren Leserlichkeit wird in den folgenden Schritten des Berechnungsvorgehens aber darauf verzichtet, diese als Beispielswerte zu nennen.

1. **Einstellung Heizkurve:** Bei der Erstinbetriebnahme der WP wird die Heizkurve, wie bisher, anhand der verfügbaren Metadaten eingestellt. Die Einstellung erfolgt konservativ. Es wird damit sichergestellt, dass zu Beginn keine Komfortverletzungen auftreten.
2. **Kontinuierliche Berechnung der Heizleistung:** Voraussetzung für das Berechnungsvorgehen «kA-Wert» ist die Kenntnis der in die WA ein- bzw. austretenden Vor- und Rücklauftemperaturen ( $T_{VL,WA}$  bzw.  $T_{RL,WA}$ ). In Kombination mit der Kenntnis des Heizwasser-Massenstroms ( $\dot{m}_{WA}$ ), der durch die WA strömt, kann die an die WA abgegebene Heizleistung ( $\dot{Q}_{WA}$ ) berechnet werden (siehe nachfolgende Gleichung 6).

$$\dot{Q}_{WA} = \dot{m}_{WA} c_p (T_{WA,VL} - T_{WA,RL}) \quad (6)$$

Die Heizleistung wird in diesem Schritt kontinuierlich berechnet und für die Berechnungen in Schritt 3-5 über einen bestimmten Zeitbereich (z. B. 24 h) gemittelt. Im selben Zeitbereich wird auch die gemessene Aussentemperatur erfasst und gemittelt. Entsprechend resultiert der Datenpunkt Aussentemperatur / Heizleistung. Er bringt zum Ausdruck, welche mittlere Heizleistung bei der jeweiligen Aussentemperatur erforderlich war.

3. **Bildung Temperaturgruppen:** Für die weitere Datenverarbeitung und visuelle Darstellung werden die unter Schritt 2 erfassten Datenpunkte in Temperaturgruppen eingeteilt. Ein Datenpunkt mit der Aussentemperatur 2.3°C wird z. B. der Temperaturgruppe 1.5 bis 2.5°C (Breite 1 K) zugeteilt und für die weitere Datenverarbeitung unter der Temperatur 2°C geführt. Abbildung 25 zeigt hierzu beispielhaft die Datenpunkte der Simulation «MFH30, mit hydraulischer Verschaltung nach WPSM 1 und leistungsgeregelter WP», betrachtet über ein ganzes Jahr und mit einer Mittelungsdauer von 24 h. Bei der Gruppierung kann im Grundsatz überprüft werden, wie viele Datenpunkte pro Temperaturgruppe vorhanden sind. Bei niedrigen Aussentemperatur-Gruppen resultieren naturgemäss nur noch wenige Datenpunkte, wodurch die Aussagekraft der Gruppe abnimmt. Hier sollte für die weitere Datenverarbeitung darauf geachtet werden, dass pro Temperaturgruppe eine Mindestanzahl an Datenpunkten vorhanden ist. Ansonsten sollte auf die Verwendung dieser Temperaturgruppe verzichtet werden. Die optimale Heizkurve kann für diese Temperaturgruppe später mittels Extra- bzw. Interpolation berechnet werden.

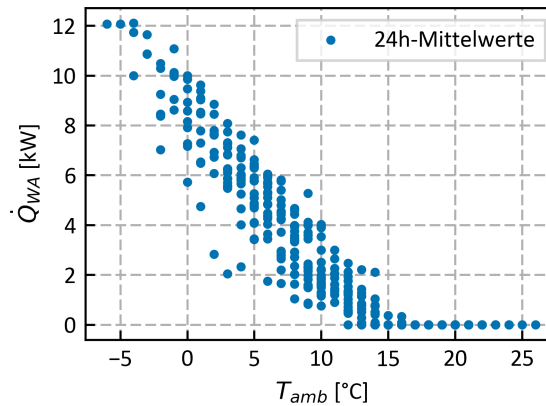


Abbildung 25: MFH30, WPSM1, leistungsgeregelt, FBH mit Raumthermostat: Heizleistung WA, gemittelt über 24h

- Definition der Heizgrenze  $T_{HG}$ :** Zur Bestimmung der Heizgrenze wird ausgewertet, ab welcher Aussentemperatur bzw. Temperaturgruppe das Gebäude keine Heizleistung mehr erfordert. Dazu wird für jede Temperaturgruppe das 95 %-Quantil ermittelt, womit Ausreisser bei der Heizleistung ausgeschlossen werden. Die rote Linie in Abbildung 26 zeigt beispielhaft den Verlauf des 95 %-Quantils. Die Heizgrenze wird nun bei der niedrigsten Temperatur(-gruppe) angenommen, bei der das Quantil einen bestimmten Schwellwert noch unterschreitet. Die Bestimmung des Schwellwertes erfolgte in dieser Arbeit durch die Multiplikation des grössten 95 %-Quantils mit 0.03 (3 %). Um die Heizgrenze noch etwas konservativer zu definieren kann ggf. noch ein Zuschlag von z. B. 1 K erfolgen. Bei Abbildung 26 liegt die Heizgrenze bei 15°C. Mit dem Zuschlag würde diese bei 16°C liegen.
- Regressionsgleichung der 95 % Quantile:** Für die angestrebte Berechnung der optimalen Heizkurve werden die unter Schritt 4 ermittelten 95 %-Quantile mittels Regressionsgleichung beschrieben. Damit soll der Heizleistungsbedarf des Gebäudes in Abhängigkeit der Aussentemperatur  $T_{amb}$  berechnet werden können. Für die Regressionsgleichung wird der Funktionstyp nach Gleichung 7 verwendet. Zudem werden die 95 %-Quantile von Temperaturgruppen, die oberhalb der Heizgrenze liegen, nicht berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{WA} = c_1 \sqrt[n]{T_{HG} - T_{amb}} \quad (7)$$

Die Anpassung der Regressionsgleichung resultiert in den Konstanten  $c_1$  und  $n$ , wobei erstere die Steilheit und zweitere die Krümmung der Kurve beschreibt. Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Funktion (schwarze Linie) für den bereits vorangehend referenzierten Datensatz. Die Heizgrenze  $T_{HG}$  ist bei 15°C definiert.

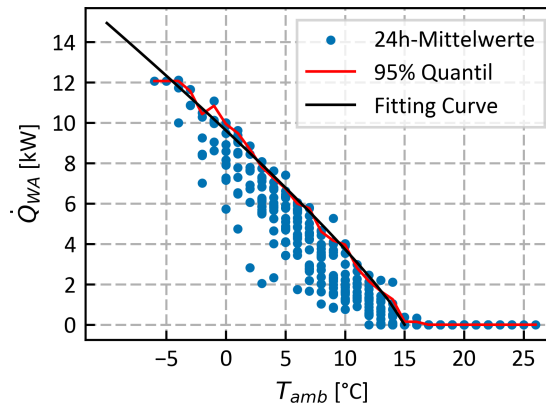


Abbildung 26: MFH30, WPSM1, leistungsgeregelt, FBH mit Raumthermostat: Heizleistung WA, gemittelt über 24h, mit Regressionsgleichung der 95 %-Quantile

6. **Berechnung stationärer kA-Werte:** Für die Bestimmung der optimalen Heizkurve wurde in den vorangehenden Schritten der gemittelte, aussentemperaturabhängige Heizleistungsbedarf ermittelt. Als weiterer Schritt ist es notwendig, Kenntnis über die Wärmeübertragungsfähigkeit der WA zu erhalten. Dazu werden die Vor- und Rücklaufemperatur ( $T_{VL,WA}$  bzw.  $T_{RL,WA}$ ) sowie der Heizwasser-Massenstrom  $\dot{m}_{WA}$  verwendet. Ebenfalls muss die Soll-Raumtemperatur  $T_{Raum,soll}$  bekannt sein, die bei genügend hoch eingestellten Heizkurven und korrekt regelnden Thermostaten / Ventilen näherungsweise der Raumtemperatur entspricht. Zur Berechnung der Wärmeübertragungsfähigkeit  $kA$  wird die Gleichung 8 angewandt, wobei die Temperaturdifferenz infolge numerischer Stabilität arithmetisch berechnet wird. Weiter erfolgt die Berechnung der Heizleistung  $\dot{Q}_{WA}$  mit der Gleichung 6. Im Gegensatz zu Schritt 2 bis 5 werden an dieser Stelle keine gemittelten Werte verwendet, sondern stationäre Betriebspunkte analysiert.

$$\dot{Q}_{WA} = kA \left( \frac{T_{WA,VL} - T_{WA,RL}}{2} - T_{Raum,soll} \right) \quad (8)$$

Da die Berechnung nur im stationären Fall aussagekräftig ist, müssen Ein- und Ausschalt-effekte der WP und / oder der Raumthermostaten von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Folglich wurden entsprechende Kriterien definiert. Hierzu wird jeweils die Standardabweichung der Heizleistung  $\dot{Q}_{WA}$  über einen bestimmten Zeitbereich (z. B. 30 min) berechnet. Erst wenn diese unter einem bestimmten prozentualen Wert (z. B. 0.5 %) der maximalen Heizleistung liegt, ist das erste Kriterium der Stationarität erfüllt. Als zweites Kriterium muss die absolute Streuung der Heizleistung im besagten Zeitbereich ebenfalls unter einem bestimmten prozentualen Wert der Heizleistung (z. B. 1 %) liegen. Ist dieses Kriterium auch erfüllt, so liegt Stationarität vor und der berechnete kA-Wert kann für die weitere Datenverarbeitung verwendet werden. Alle stationären kA-Werte können sodann in Relation zum jeweilig vorgelegenen Massenstrom  $\dot{m}_{WA}$  gesetzt und dargestellt werden, womit sich wiederum Datenpunkte für die weitere Verarbeitung ergeben. Abbildung 27 zeigt dazu die kA-Werte eines ganzen Jahres aus dem bereits oben verwendeten Datensatz. Es ist erkennbar, dass zwischen den kA-Werten und dem Massenstrom eine deutliche Korrelation vorliegt. Dies liegt im vorliegenden Fall primär daran, dass die aktive Wärmeübertragungsfläche (Zonen mit offenem Ventil) mit dem Massenstrom korrelieren, zumal dieser ebenfalls von den Ventilstellungen abhängt.

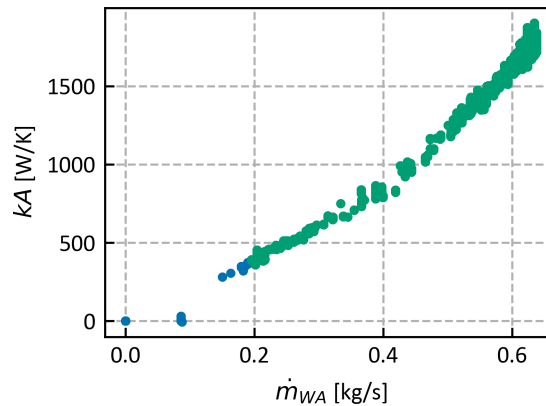


Abbildung 27: MFH30, WPSM1, leistungsgeregelt, FBH mit Raumthermostat: kA-Werte in Abhängigkeit des Massenstroms, Blau: kA-Werte kleiner als 30 % des maximalen Massenstrom, Grün: restliche kA-Werte.

7. **Regressionsgleichung kA-Werte:** Für die weitere Datenverarbeitung wird das Verhalten der in Schritt 6 erhobenen Datenpunkte ( $kA$  bezogen auf  $\dot{m}_{WA}$ ) mittels Regressionsgleichung beschrieben. Gleichung 9 zeigt den dazu verwendeten Funktionstyp auf.

$$kA = c_1 (\dot{m}_{WA} + c_3)^{c_2} + c_4 \quad (9)$$

Aus der Anpassung der Regressionsgleichung resultieren die Konstanten  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  und  $c_4$ , wobei die erste die Steigung, die zweite die Krümmung, die dritte die Verschiebung auf der x-Achse und die vierte Konstante die Verschiebung auf der y-Achse definiert. Da für das weitere Berechnungsvorgehen kA-Werte bei geringen Massenströmen nicht relevant sind und diese die Identifikation der oben genannten Konstanten negativ beeinflussen, werden kA-Werte mit Massenströmen kleiner 30 % des maximalen Massenstroms nicht berücksichtigt. Als Resultat dieses Schrittes liegt eine Funktion vor, die den Zusammenhang der kA-Werte und des Massenstroms des untersuchten Systems beschreibt (vgl. schwarze Linie in Abbildung 28).

8. **Berechnung des Soll-Massenstroms:** Basierend auf den vorangehend erläuterten Daten, mitunter dem zeitlich aufgelösten Massenstrom  $\dot{m}_{WA}$ , kann der maximal über die WA gemessene Massenstrom  $\dot{m}_{WA,max}$  ermittelt werden. Von diesem ausgehend, wird der Soll-Massenstrom  $\dot{m}_{WA,Soll}$  mittels Gleichung 10 berechnet. Dieser dient dem Berechnungsvorgehen als Mass für die effiziente Ausnutzung der Wärmeübertragungskapazität der WA.

$$\dot{m}_{WA,Soll} = \varphi \dot{m}_{WA,max} \quad (10)$$

Die Konstante  $\varphi$  kann nicht berechnet werden und ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Im Grundsatz ist aber ein möglichst hoher Massenstrom durch die WA, also ein  $\varphi$  nahe dem Wert 1, erstrebenswert. Er führt gemäss Abbildung 27 zu einem hohen kA-Wert und erlaubt damit wiederum niedrige Vorlauftemperaturen / Heizkurven. Würde  $\varphi$  allerdings auf 1 gesetzt, so bedeutete dies, dass die Raumthermostaten für die Übertragung der jeweils erforderlichen Heizleistung (bezogen auf die Aussentemperatur) einen durchschnittlichen Öffnungsgrad von 100 % aufweisen. Aus den nachfolgenden Gründen ist ein Öffnungsgrad von 100 % bzw.  $\varphi = 1$  allerdings nicht realistisch:

- **Auslegung:** Zwischen den einzelnen Zonen liegen auslegungsbedingt Unterschiede vor. Während der Komfort bei einer Zone mit 100 % Öffnungsgrad vielleicht gerade noch gewährleistet werden kann, so kann dieser bei einer anderen Zone mit ebenfalls 100 % Öffnungsgrad bereits verletzt sein. Daher muss davon ausgegangen, dass der Komfort bei maximalem Massenstrom nicht mehr gewährleistet werden kann.



- **Nutzerverhalten:** Auch wenn die einzelnen Zonen für die erwarteten Nutzerprofile ausgelegt werden, kann das Nutzerverhalten über die Nutzungsdauer eines Gebäudes / einer Zone variieren. Es ist deshalb sinnvoll Reserven ( $\varphi < 1$ ) einzuplanen. Den Raumthermostaten wird damit die Möglichkeit gegeben, über die Dauer betrachtet, etwas mehr Wärme in den Raum zu führen, als dies bei der Betrachtung nach Schritt 5 erfolgte.
- **Regelreserve:** Um den Raumkomfort bei kurzfristigen Bedarfsspitzen, die z. B. nach längerem Durchlüften auftreten, wieder schneller zu gewährleisten, wird eine gewisse Regelreserve benötigt. Auch aus diesem Grund sollte  $\varphi$  kleiner 1 gewählt werden.

Gestützt auf verschiedene Simulationen, erwies sich ein  $\varphi$  zwischen 0.8 und 0.9 als zielführend bzw. als genügend niedrig, um den obigen Aspekten Rechnung zu tragen.

9. **Berechnung Soll-kA-Wert:** Anhand der in Schritt 7 definierten Funktion und des definierten Soll-Massenstrom  $\dot{m}_{WA,Soll}$  kann nun der Soll-kA-Wert berechnet werden. Abbildung 28 zeigt ergänzend, die graphische Herleitung des Soll-kA-Wertes ( $kA_{WA,Soll}$ ).

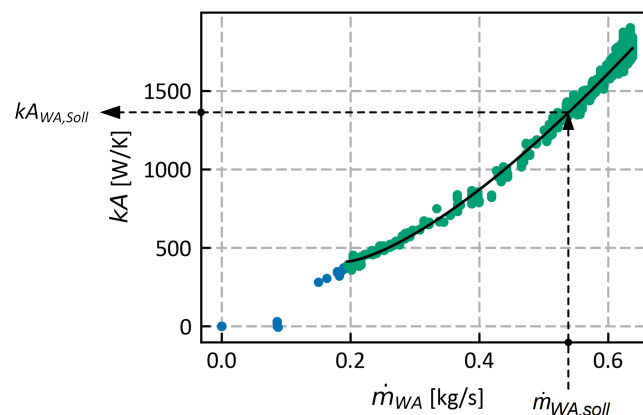


Abbildung 28: MFH30, WPSM1, leistungsgeregelt, FBH mit Raumthermostat: kA-Werte in Abhängigkeit des Massenstroms, mit Regressionsgleichung

10. **Berechnung Soll-Vorlauftemperaturen / Soll-Heizkurve:** Für die Berechnung der Soll-Vorlauftemperaturen bzw. der Soll-Heizkurve wird der berechnete Soll-kA-Wert  $kA_{WA,Soll}$  als allgemein gültig betrachtet. D. h. bei jeder Aussentemperatur soll der gleiche kA-Wert angestrebt werden. Abgeleitet von den Gleichungen 5 und 8 zeigt die Gleichung 11 die Beziehung zwischen der Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  und der erforderlichen Heizleistung  $\dot{Q}_{WA}$  auf.

$$T_{VL} = \frac{\dot{Q}_{WA}}{kA_{WA,Soll}} + \frac{\dot{Q}_{WA}}{\dot{m}_{WA,Soll} \cdot c_p \cdot 2} + T_{Raum} \quad (11)$$

$\dot{Q}_{WA}$  ist gemäss Gleichung 7 abhängig von der Aussentemperatur  $T_{amb}$ . Für jede Aussentemperatur(-gruppe) kann nun die erforderliche Heizleistung  $\dot{Q}_{WA}$  bestimmt und in Kombination mit den vorangehend definierten Variablen / Konstanten die jeweiligen Soll-Vorlauftemperatur  $T_{VL}$  berechnet werden. Am Ende dieses Schrittes liegt die Soll-Heizkurve vor.

11. **Vergleich Heizkurven & Nutzerhinweis:** Die ursprünglich eingestellte Heizkurve wird in diesem Schritt mit der berechneten Soll-Heizkurve verglichen. Weichen diese deutlich voneinander ab, im Mittel z. B. mehr als 2 K, so kann der Nutzer darauf hingewiesen werden, dass die Heizkurve ggf. nicht optimal eingestellt ist und die Werte der Soll-Heizkurve vorgeschlagen werden. Ferner ist es denkbar, die Anpassung automatisch und iterativ durchzuführen.



## Simulationsgestützte Überprüfung

Das beschriebene Berechnungsvorgehen wurde mithilfe der erstellten Simulationsmodelle überprüft. Dazu wird nachfolgend auf die Überprüfungsergebnisse zweier Simulationsreihen (Kombination Gebäude, Hydraulik und WP) eingegangen.

**MFH30, WPSM1, kontinuierliche Leistungsregelung, FBH:** Abbildung 29 zeigt die für die simulationsbasierte Überprüfung angewandten Heizkurven. Die blaue Heizkurve (Simulation) stellt diejenige Heizkurve dar, die im Berechnungsvorgehen bei Schritt 1 zur Anwendung kommt. Die grüne Heizkurve stellt die vorgeschlagene Soll-Heizkurve dar, die im Berechnungsvorgehen unter Schritt 10 berechnet wird, und auf den Simulationsergebnissen der blauen Heizkurve basiert. Als Referenz gilt die orange Heizkurve, die bereits unter Kapitel 6 simuliert wurde und dabei diejenige Heizkurveneinstellung darstellt, die keine Komfortverletzungen (< 10 Kh) und den geringsten elektrischen Energiebedarf aufweist. D. h., wenn die grüne Heizkurve nahe bei der orangen Heizkurve liegt, deutet dies auf eine gute Berechnung der Soll-Heizkurve hin.

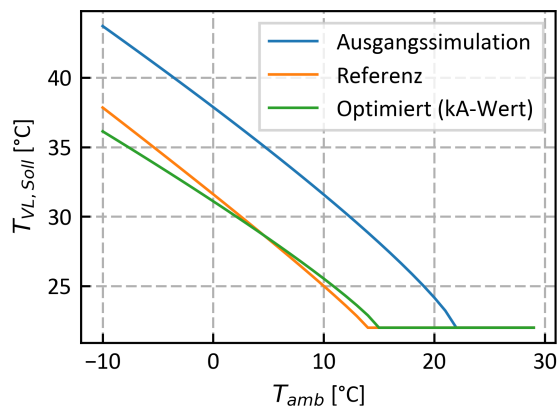


Abbildung 29: Simulierte Heizkurven beim Modell «MFH30, WPSM1, kontinuierliche Leistungsregelung, FBH».

Mittelungsdauer: 24h,  $\varphi = 85\%$

Wie die Abbildung zum Ausdruck bringt, ist die unter Schritt 1 verwendete Heizkurve absichtlich hoch eingestellt. Die berechnete Soll-Heizkurve liegt dann aber relativ nahe bei der orangen Referenz-Heizkurve, wobei insbesondere die Steigung noch etwas abweicht. Tabelle 13 zeigt zu den in Abbildung 29 ersichtlichen Heizkurven die simulierten Komfortverletzungen und Energiebedarfe auf.

Tabelle 13: Komfortverletzungen und Energiebedarfe beim Modell «MFH30, WPSM1, kontinuierliche Leistungsregelung, FBH» bei Heizkurven-Einstellungen nach Abbildung 29

Heizkurven-Einstellung	Komf.verl. [Kh]	E <sub>el</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]
Ausgangs-Simulation	0.0	6.24
Optimiert mit Berechnungsvorgehen kA-Wert (Mittelungsdauer 24h, $\varphi = 0.85$ )	9.3	5.40
Referenz-Simulation	0.0	5.68

Die durch das Berechnungsvorgehen berechnete Soll-Heizkurve führt gemäss Simulation zu einer noch akzeptablen Komfortverletzung von 9.3 Kh und weist gegenüber der Start-Simulation eine elektrische Energiebedarfseinsparung von ca. 14 % aus. Auch gegenüber der Referenz-Heizkurve weist sie eine



Einsparung von ca. 5 % auf, was auf die etwas niedrigeren Vorlauftemperaturen bei Aussentemperaturen unter 5°C zurückzuführen ist.

**EFH100, WPSM5, kontinuierliche Leistungsregelung, Radiatoren:** Gegenüber dem oben behandelten Gebäude unterscheidet sich das hierin betrachtete Modell besonders in der WA (FBH ggü. Radiatoren). Durch den Einsatz von Radiatoren mit kontinuierlich regelnden Heizkörperthermostaten kann es sein, dass der maximal mögliche Massenstrom durch die WA während des Betrachtungszeitraums nie auftritt. Dies ist dann der Fall, wenn die Heizkurve deutlich zu hoch eingestellt ist und die Heizkörperthermostate dadurch zu keinem Zeitpunkt 100 % offen sind. Entsprechend kann die erste Anwendung des Berechnungsvorgehens zu einem «falschen» Soll-kA-Wert und damit zu einer falschen Soll-Heizkurve führen, was eine iterative Anwendung des Vorgehens bedingt. Abbildung 30 zeigt die simulierten Heizkurven nach dem bereits oben erläuterten Farbschema.

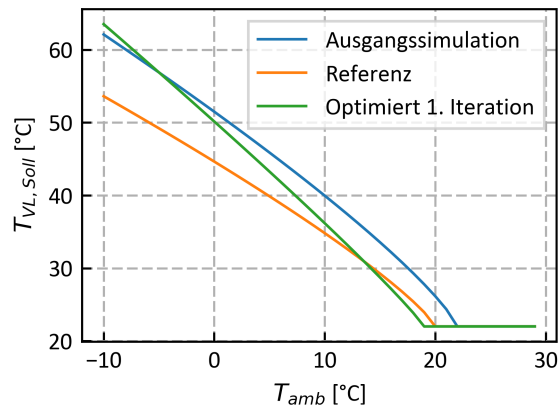


Abbildung 30: Simulierte Heizkurven beim Modell «EFH100, WPSM5, kontinuierliche Leistungsregelung, Radiatoren». Mittelungsdauer: 24h,  $\varphi = 85\%$

Die erste Anwendung des Berechnungsvorgehens (Optimiert 1. Iteration) reduziert die Heizgrenze nahe an die Referenz-Heizgrenze. Die Steigung weicht allerdings noch deutlich von der Referenz-Heizkurve ab, wobei die Vorlauftemperaturen ab einer Aussentemperatur von ca. -5°C sogar über den Vorlauftemperaturen der Ausgangs-Simulation liegen. Die zweite Anwendung des Berechnungsvorgehens (Optimiert 2. Iteration), die auf den Simulationsergebnissen mit der Heizkurve der 1. Iteration basieren, führt danach aber zu einer besseren Annäherung an die Referenz-Heizkurve (vgl. Abbildung 31). Tabelle 14 zeigt die Komfortverletzungen und elektrischen Energiebedarfe der simulierten Heizkurven.

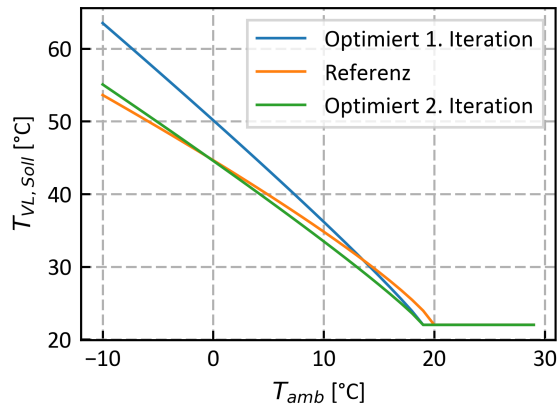


Abbildung 31: Simulierte Heizkurven in der zweiten Iteration beim Modell «EFH100, WPSM5, kontinuierliche Leistungsregelung, Radiatoren». Mittlungsdauer: 24h,  $\varphi = 85\%$

Tabelle 14: Komfortverletzungen und Energiebedarfe beim Modell «EFH100, WPSM5, kontinuierliche Leistungsregelung, Radiatoren» bei Heizkurven-Einstellungen nach Abbildung 31

Heizkurven-Einstellung	<i>Komf.</i> - <i>verl.</i> [Kh]	<i>E<sub>el</sub></i> [kWh/m <sup>2</sup> ]
Ausgangs-Simulation	0.0	31.2
Optimiert mit Berechnungsvorgehen kA-Wert (1. Iteration) (Mittlungsdauer 24h, $\varphi = 0.85$ )	0.0	29.2
Optimiert mit Berechnungsvorgehen kA-Wert (2. Iteration) (Mittlungsdauer 24h, $\varphi = 0.85$ )	1.8	26.5
Referenz-Simulation	1.8	26.3

Gegenüber der Ausgangs-Simulation resultiert mit der 1. Iteration zwar bereits eine Einsparung des elektrischen Energiebedarfes um 6.4 %, aber erst die 2. Iteration bringt diesen auf das Niveau der Referenz-Heizkurve. Ausgehend vom elektrischen Energiebedarf der Ausgangs-Simulation führen die beiden Iteration somit zu einer Einsparung von 15 %, bei einer vernachlässigbaren Komfortverletzung von 1.8 Kh.

Bei der Validierung des Berechnungsvorgehens zeigt sich, dass beim Modell mit der FBH bereits eine Iteration genügte, um nahe an die Referenz-Heizkurve zu gelangen. Beim Modell mit Radiatoren waren 2 Iterationen notwendig.

#### 7.1.4 Erforderliche Daten

Für die Anwendung des Berechnungsvorgehens MMV und kA-Wert wird die Kenntnis der folgenden Betriebsdaten vorausgesetzt:

- WA-Massenstrom  $\dot{m}_{WA}$
- Umgebungstemperatur  $T_{amb}$

Für die Anwendung des Berechnungsvorgehens kA-Wert sind zudem folgende Betriebsdaten nötig:

- Vor- und Rücklaufemperatur der WA ( $T_{WA,VL}$  und  $T_{WA,RL}$ )



Abhängig von der hydraulischen Verschaltung sind diese Betriebsdaten teilweise bekannt. Tabelle 15 zeigt auf, bei welchem WPSM die erforderlichen Betriebsdaten vorhanden bzw. berechenbar sind.

Tabelle 15: Verfügbare Betriebsdaten für die Anwendung des Berechnungsvorgehens kA-Wert

WPSM	$\dot{m}_{WA}$	$T_{WA,VL}$	$T_{WA,RL}$
1, 2	berechenbar	vorhanden	vorhanden
3, 4	berechenbar	vorhanden	n. v.
5, 6	n. v.	n. v.	n. v.
8	n. v.	n. v.	n. v.

Bei den WPSM 1, 2, 3 und 4 ist der Massenstrom als direkte Messgrösse nicht verfügbar. Anhand der Kompressor-Drehzahl, der Verdampfungs- / Kondensationstemperatur, der Überhitzung sowie der Temperaturspreizung des Heizwassers über den Verflüssiger kann der Massenstrom aber näherungsweise berechnet werden. Beim WPSM 1 und 2 könnte das Berechnungsvorgehen aus Sicht der verfügbaren Betriebsdaten somit ohne zusätzliche Messtechnik angewandt werden.

Ferner könnte als alternative Grösse zum Massenstrom über die WA auch die Pumpenleistung herangezogen werden. Die im Berechnungsvorgehen berechneten Heizleistungen stimmten dann zwar nicht mit der Realität überein, die korrekte Berechnung der Soll-Heizkurve würde dadurch aber nicht beeinträchtigt, zumal für das Berechnungsvorgehen der Vergleich zwischen dem stationären und dem gemitteltem Betriebsverhalten wichtig ist. Weiter ist es vielleicht auch möglich, die mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta T_m$  zwischen dem Heizwasser und dem Raum nur anhand der Vorlauftemperatur  $T_{WA,VL}$  und der eingestellten Raumtemperatur  $T_{Raum}$ , gemäss Gleichung 12, zu berechnen.

$$\Delta T_m = T_{WA,VL} - T_{Raum} \quad (12)$$

Die Verwendung der alternativen Grössen wurden infolge zur Verfügung stehender Ressourcen nicht weiter untersucht, sind aber zur Vollständigkeit dennoch genannt und könnten in weiteren Untersuchungen behandelt werden.

### 7.1.5 Digitalisierte FBH-Regelung

Für die Bestimmung der optimalen Heizkurve ist die Kenntnis über die Auslastung der einzelnen Heizkreise von zentraler Bedeutung. Mit modernen, digitalen FBH-Reglern wie sie z. B. vom Unternehmen Nussbaum oder Danfoss angeboten werden, wäre der erforderliche Informationsgehalt im Grundsatz digital verfügbar. Die Systeme sind bereits in der Lage anzuzeigen, wenn die Vorlauftemperatur deutlich zu hoch ist oder verfügen über Funktionen zur Ansteuerung eines Mischkreises zur Regelung der auf die WA strömende Vorlauftemperatur (was für ein normales WP-Heizsystem nicht erstrebenswert ist!).

Anbieter von FBH-Reglern sind sich der Thematik der Heizkurven-Einstellung offensichtlich bewusst. Es ist zu erwarten, dass diese dem Nutzer zukünftig noch bessere Angaben zur Einstellgüte der Heizkurve bereitstellen. Aus Sicht des Projektteams ist es in Zukunft erstrebenswert den Informationsfluss zwischen den FBH- und WP-Reglern zu etablieren, um die optimale Heizkurve entweder auf Seiten des FBH-Reglers oder auf Seiten des WP-Reglers zu bestimmen.



An einer Begleitgruppensitzung wurde zudem erörtert, dass die Heizkurve als solches in modernen Gebäuden nicht mehr das ideale Mittel zur Festlegung der Vorlauftemperaturen ist. Infolge der besseren Dämmung und des damit reduzierten Wärmeverlustes an die Umgebung gewinnen die solaren Einträge oder auch internen Lasten zunehmend an Bedeutung. Auch dieser Problematik könnte mit der Kenntnis der Auslastungsgrade der einzelnen Heizkreise entgegengetreten werden.

## 7.2 Erkennung einer falsch eingestellten Quellenpumpe

### 7.2.1 Motivation und Ziel

Die Simulationsergebnisse in Kapitel 6 zeigen die Relevanz des quellenseitigen Massenstroms auf und bringen zum Ausdruck, dass zur Minimierung des Energiebedarfs der optimale Massenstrom gefunden werden muss. Dabei muss der Energiebedarf der WP mit jenem der Quellenpumpe abgewogen werden. Die Abbildung 32 zeigt hierzu nochmals den Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf  $E_{el}$  bei änderndem Solemassenstrom  $\dot{m}_{Quelle}$ .

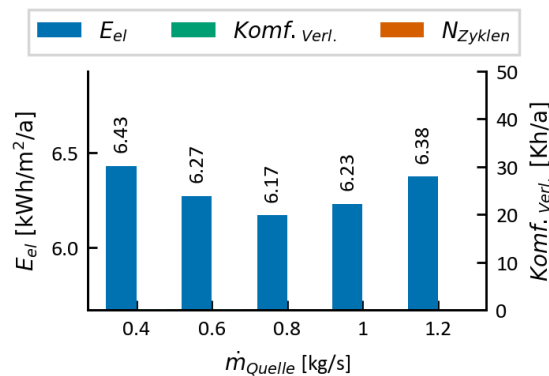


Abbildung 32: Einfluss des quellenseitigen Massenstrom über einen Parameterbereich von 0.4-1.2 kg/s, Parameterschritt 0.2 kg/s, Ein/Aus geregelte S/W-WP, MFH30, WPSM5.

Es ist ersichtlich, dass ein höherer oder niedriger Massenstrom als 0.8 kg/s zu höheren Energiebedarfen führt und das Optimum daher in diesem Bereich liegen muss. Durch eine höhere Auflösung der Parameterschritte könnte das Optimum noch genauer lokalisiert werden.

Der optimale Massenstrom liesse sich, bei gleichbleibenden Randbedingungen (Rücklauftemperatur, Quelltemperatur u. A.) und Kenntnis des momentanen elektrischen System-Leistungsbedarfes grundsätzlich durch das Variieren des Massenstroms ermitteln. Da der gesamte System-Leistungsbedarf in den meisten Fällen allerdings nicht bekannt ist, soll das Berechnungsverfahren auf anderweitigen Werten, die digital erfasst werden, basieren (vgl. Kapitel 3). Die Verwendung dieser anderweitigen Werte kann zur Einschränkung führen, dass nicht das genaue Optimum ermittelt werden kann. Das Berechnungsverfahren soll aber zumindest einen Bereich definieren, in welchem der Massenstrom der Quellepumpe hinsichtlich effizienten Betriebes der WP liegen sollte. Entsprechend ist das Ziel des Berechnungsverfahrens die Erkennung von deutlich zu hohen und zu niedrigen Sole-Massenströmen (Fehleinstellungen von Quellenpumpen bzw. eingetretenen Fehlern) unter Verwendung von verfügbaren Werten



## 7.2.2 Grundlegende Zusammenhänge

Bei S/W-WP dient die Sole als quellenseitiges Wärmeträgermedium und führt die dem Erdreich entzogene Wärme dem Verdampfer zu. In Abhängigkeit des Sole-Massenstroms und der Verdampferleistung resultiert über den Verdampfer eine bestimmte Temperaturspreizung der Sole, wobei der Soleaustritt kälter als der Soleeintritt ist. Hierfür gültig ist die nachfolgende, vom 1. Hauptsatz der Thermodynamik abgeleitete und für den stationären Zustand vereinfachte Gleichung:

$$\dot{Q}_{Verd} = \dot{m}_{Sole} c_{p,Sole} \Delta T_{Sole} \quad \text{mit: } \Delta T_{Sole} = T_{Q,\alpha} - T_{Q,\omega} \quad (13)$$

Bei gleichbleibender Verdampferleistung  $\dot{Q}_{Verd}$  und zunehmendem Solemassenstrom  $\dot{m}_{Sole}$  nimmt die Temperaturspreizung  $\Delta T_{Sole}$  entsprechend der Gleichung ab, da die Wärmekapazität der Sole  $c_{p,Sole}$  als konstant betrachtet werden kann. Umgekehrt reduziert sich der Solemassenstrom  $\dot{m}_{Sole}$ , wenn die Temperaturspreizung  $\Delta T_{Sole}$  erhöht wird.

Abbildung 33 zeigt den beispielhaften Temperaturverlauf der Sole sowie des Kältemittels im  $T, A$ -Diagramm. Die Temperatur-Spreizung der Sole entspricht dabei derjenigen der Kältemittelüberhitzung. Zwischen den ein- und austretenden Medien (Sole & Kältemittel) liegt im Vergleich zur Spreizung / dem Überhitzungswert eine geringe Temperaturdifferenz (Grädigkeit) vor, die bei Sole-WP erfahrungsgemäss beidseitig bei ca. 1 K liegt. Diese geringe Grädigkeit wird durch hohe Wärmedurchgangskoeffizienten und/oder grossen Wärmeübertragungsflächen erreicht und führt dazu, dass die Verdampfungstemperatur ansteigt, der Temperaturhub der WP sinkt und somit höhere COP erreicht werden.

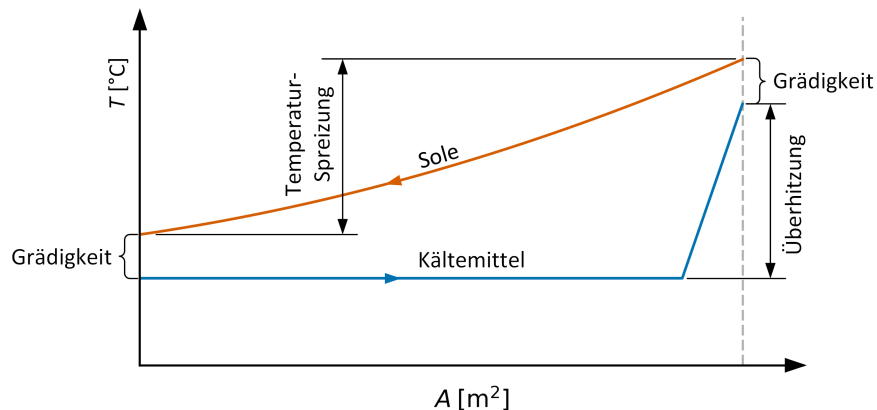


Abbildung 33: Beispielhafter Temperaturverlauf Verdampfer

Basierend auf einer konstanten Sole-Eintrittstemperatur und der geringen Grädigkeit zwischen den beiden Medien, führt eine Erhöhung der Sole-Temperaturspreizung betragsmässig in etwa zur gleichen Reduktion der Verdampfungstemperatur. Dadurch steigt der Temperaturhub der WP und damit die benötigte Verdichterleistung an. Hingegen sinkt die Leistung der Quellenpumpe, weil weniger Sole-Massenstrom gefördert wird. Abbildung 34 zeigt dazu beispielhaft den Temperaturverlauf, der aufgrund der Erhöhung der Sole-Temperaturspreizung auftritt.

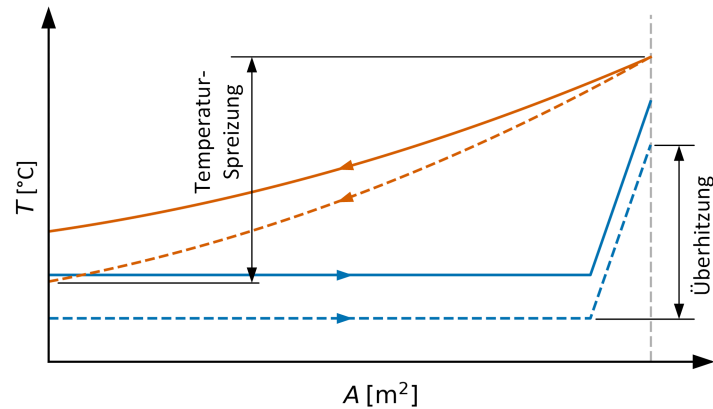


Abbildung 34: Beispielhafter Temperaturverlauf Verdampfer mit normaler (durchgezogene Linie) und erhöhter Sole-Temperaturspreizung (gestrichelte Linien).

Hingegen führt eine Verringerung der Sole-Temperaturspreizung nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Verdampfungstemperatur, da die Grädigkeit auf der Sole-Eintrittsseite bereits sehr gering ist und dadurch «hemmend» wirkt (siehe Abbildung 35). Der Temperaturhub und die Verdichterleistung nehmen damit nur geringfügig ab, die Pumpenleistung steigt allerdings an, da mehr Sole-Massenstrom gefördert werden muss.

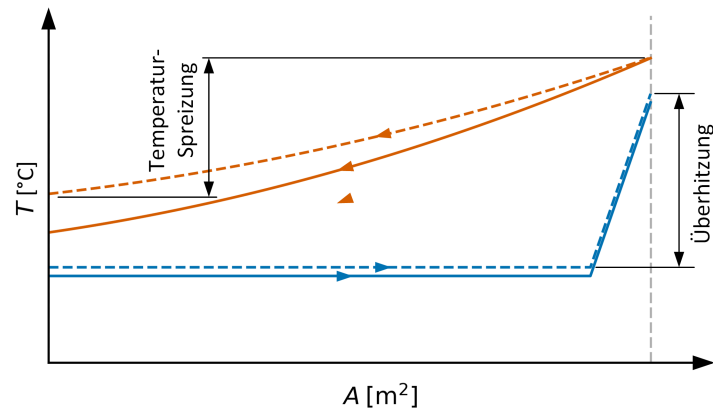


Abbildung 35: Beispielhafter Temperaturverlauf Verdampfer mit normaler (durchgezogene Linien) und reduzierter Sole-Temperaturspreizung (gestrichelte Linien).

Die obigen qualitativen Betrachtungen des Temperaturverlaufs führen zu den folgenden Aussagen:

- Sofern die Sole-Temperaturspreizung betragsmässig dem Überhitzungswert entspricht, führt eine Erhöhung der Spreizung zu einer reduzierten Verdampfungstemperatur.
- Sofern die Sole-Temperaturspreizung betragsmässig dem Überhitzungswert entspricht, führt eine Reduktion der Spreizung lediglich zu einer geringen Erhöhung der Verdampfungstemperatur.
- Die Verdichter-Leistung verhält sich gegenüber der Pumpenleistung entgegengesetzt. Somit besteht für jeden Betriebszustand ein Optimum.



Daraus abgeleitet lässt sich die folgende Hypothese formulieren:

- Bei üblichen Druckverlusten in der Erdwärmesonde und dem Verdampfer sollte die Sole-Temperaturspitzung für einen optimalen COP in etwa dem Überhitzungswert entsprechen.

Im Allgemeinen deckt sich diese Hypothese mit den Beobachtungen in [54]. Als Ergänzung wird sie aber auch mit den erarbeiteten Simulationsmodellen überprüft. Dazu wird das detaillierte WP-Modell verwendet und bei zwei Betriebspunkten im Zusammenspiel mit einem Erdsondenfeld sowie unterschiedlichen Sole-Temperaturspitzungen simuliert. Beim ersten Betriebspunkt, der als WA eine FBH darstellt soll, liegt die Sole-Eintrittstemperatur bei 5°C und das Heizwasser wird von 30 auf 35°C erwärmt (B5/W30..35). Beim zweiten Betriebspunkt, der als WA Radiatoren darstellt, liegt die Sole-Eintrittstemperatur ebenfalls bei 5°C und das Heizwasser wird von 46 auf 54°C erwärmt (B5/46..54). Damit die Eintrittstemperatur der Sole zu jedem Simulationszeitpunkt 5°C beträgt, wird die Sole aus einer unerschöpflichen Quelle mittels auf Spreizung geregelter Pumpe gefördert. Um dabei dennoch den korrekten Druckverlust der Erdwärmesonden zu berücksichtigen, wird die aus dem Verdampfer austretende Sole über das entsprechenden Erdsondenfeld geführt. Auf der Wärmesenken-Seite wird der Massenstrom des Heizwassers ebenfalls geregelt, damit die Spreizung dem erforderlichen Wert entspricht. Abbildung 36 zeigt dazu den hydraulischen Aufbau des Simulationsmodells in Modelica.

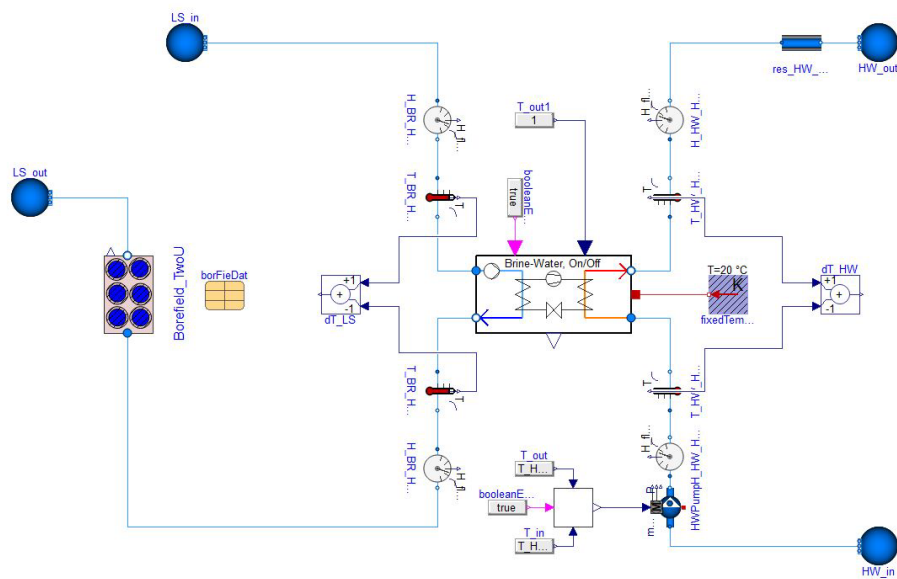


Abbildung 36: Hydraulische Verschaltung zur simulationsbasierten Untersuchung der Sole-Temperaturspitzung

Für das verwendete Simulationsmodell gelten weiter die in Tabelle 16 ersichtlichen Angaben.

Tabelle 16: Angaben zum Simulationsmodell zur Untersuchung des Einflusses der Sole-Temperaturspitzung

Komponente / Einstellung	Ausführung / Wert
WP-Typ	Sole-WP
Regelung	Ein / Aus
Leistung bei B0/W35	14 kW
Erdwärmesonden	2 Doppel-U Sonden à 150m, D=32mm (turbulenter Betrieb), parallel durchströmt
Sole	Ethylenglykol 30 %



Komponente / Einstellung	Ausführung / Wert
Sollwert Kältemittelüberhitzung	4 K
Quellenpumpe	Wilo Stratos 25/1-6 [53]
Ladepumpe	Wilo Stratos 25/1-4 [53]
Auswertung	stationäre Zustände

Die nachfolgende Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die simulierten COP-Verhalten bei den Betriebspunkten B5/W30..35 und B5/W46..54. Dabei wird in blau der COP exklusive und in grün derjenige inklusive Sole-Pumpenleistungen ausgewiesen. Die gelbe Kurve stellt den Leistungsbedarf der Solepumpe dar. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Pumpenleistung bei abnehmenden Sole-Spreizungen quadratisch zunimmt.

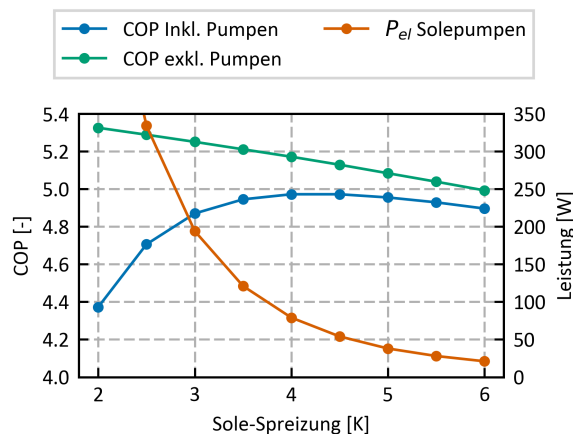


Abbildung 37: COP-Verlauf bei unterschiedlichen Sole-Spreizungen im Betriebspunkt B5/W30..35

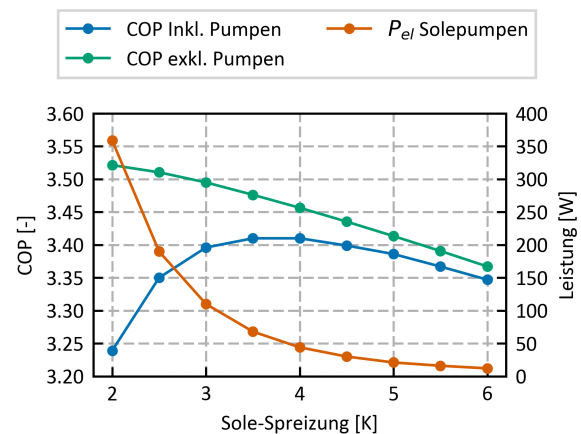


Abbildung 38: COP-Verlauf bei unterschiedlichen Sole-Spreizungen im Betriebspunkt B5/W46..54

Beim Betriebspunkt B5/W30..35 liegt die optimale Sole-Spreizung im Bereich von 4 bis 4.5 K, während diese bei B5/W46..54 zwischen 3.5 und 4 K liegt. Obwohl das System dasselbe ist, verschiebt sich die optimale Sole-Spreizung aufgrund der unterschiedlichen Kondensationstemperatur. Diese Änderung ist darauf zurückzuführen, dass bei geringeren Kondensationstemperaturen anteilmässig mehr Heizleistung aus der Erdwärmesonde entstammt als bei höheren Kondensationstemperaturen. Die auf Spreizung geregelte Quellenpumpe fördert beim Betriebspunkt B5/W30..35 daher mehr Massenstrom als bei B5/W46..54 und bedarf dadurch auch mehr elektrischer Leistung (vgl. gelbe Kurven). Bezogen auf den Betriebspunkt B5/W30..35 lohnt es sich deshalb, etwas grössere Spreizungen als 4 K in Kauf zu nehmen, da hier der positive Einfluss auf die Pumpenleistung grösser ist als der negative Einfluss auf den Temperaturhub. Beim Betriebspunkt B5/W46..54 verhält es sich umgekehrt. Hier lohnt sich eine etwas geringere Spreizung.

Obschon die optimalen Spreizungen nicht genau dem Überhitzungswert entsprechen, zeigt sich, dass diese eng angrenzend sind. Im obig beschriebenen Fall wäre ein Bereich von 3.5..4.5 K Spreizung optimal.



### 7.2.3 Berechnungsvorgehen

Basierend auf dem vorangehenden Kapitel 7.2.2 soll das Berechnungsvorgehen auf den Vergleich der Sole-Temperaturspreizung mit dem Soll-Überhitzungswerte fokussieren und damit den effizienten Betrieb des WP-Systems ermöglichen. Dazu wird die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. **Ermittlung quasi-stationärer Sole-Temperaturspreizungen:** Sobald die WP betrieben wird, wird die Sole-Temperaturspreizung berechnet und ermittelt, ob sich diese quasi-stationär verhält. D.h. die Spreizung ändert bezogen auf einen bestimmten Zeitbereich nur noch geringfügig. Eine Überprüfung könnte dabei wie folgt umgesetzt werden: Es werden kontinuierlich die Spreizungen der letzten z. B. 3 min betrachtet. Weichen die Spreizungen in diesem Zeitbereich nicht mehr als z. B. 0.5 K voneinander ab, so ist das Kriterium «Absolut-Differenz» erfüllt. Weiter wird überprüft, ob die Standardabweichung der Messwerte in besagten Zeitbereich z. B. 0.2 K nicht überschreitet. Ist dieses Kriterium «Standardabweichung» ebenfalls erfüllt, kann von einem quasi-stationären Zustand ausgegangen werden.
2. **Gleitende Mittelwertbildung der Sole-Temperaturspreizung:** Sobald quasi-stationäre Zustände der Sole-Spreizung vorliegen, startet bzw. läuft die Bildung des gleitenden Mittelwertes der Sole-Temperaturspreizung weiter. Die Spreizungen in allen quasi-stationären Betriebspunkten werden somit zur Berechnung des gleitenden Mittelwertes verwendet. Neben den eigentlichen Werten zur Bildung des Mittelwertes muss weiter die Mittelungsdauer definiert werden. Dies können z. B. 50 Betriebsstunden sein oder aber nur 10 h, wobei Abweichungen der Spreizung bei kleineren Mittelungsdauern schneller Einfluss auf das gleitende Mittel haben. Die korrekte Zeitdauer ist im Zuge der entsprechenden Entwicklungsarbeiten zu ermitteln.
3. **Vergleich des gleitenden Mittelwertes mit Soll-Überhitzungswert:** Die Voraussetzung für den Vergleich mit dem Soll-Überhitzungswert ist, dass das gleitende Mittel mindestens so lange wie die eigentliche Mittelungsdauer gebildet wurde. Sofern diese Bedingung erfüllt ist, wird kontinuierlich überprüft, um welchen Betrag ( $\Delta T_{\text{Abweichung}}$ ) der gleitende Mittelwert der Sole-Temperaturspreizung ( $\Delta \bar{T}_{\text{Sole}}$ ) vom Soll-Überhitzungswert ( $\Delta T_{\text{super,Soll}}$ ) abweicht. Die Berechnung erfolgt hierbei gemäss Gleichung 14:

$$\Delta T_{\text{Abweichung}} = \Delta T_{\text{ÜH,Soll}} - \Delta \bar{T}_{\text{Sole}} \quad (14)$$

Die Eingriffsgrenzen werden ausgehend von 0 K Abweichung symmetrisch mit z. B. +/- 1 K definiert. Abbildung 39 zeigt dazu einen beispielhaften Verlauf des gleitenden Mittelwertes auf, der die obere Eingriffsgrenze von 1 K überschreitet.

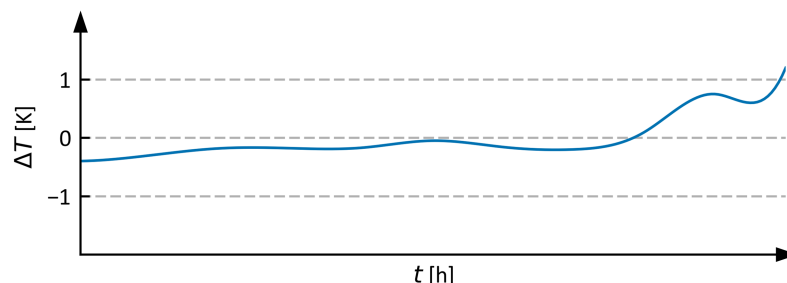


Abbildung 39: Beispielhafter Verlauf des gleitenden Mittelwertes mit Überschreitung der oberen Eingriffsgrenze von 5 K



4. **Nutzerhinweis:** Werden die definierten Eingriffsgrenzen über- oder unterschritten so soll dem Nutzer eine Meldung angezeigt werden mit dem Hinweis, dass der Massenstrom der Quellenpumpe zu hoch oder zu niedrig ist und daher schlechtere Effizienzwerte zu erwarten sind. Abhängig, ob die obere oder untere Eingriffsgrenze übertreten wird, können spezifische Angaben zum Massenstrom gemacht werden:
- Überschreitung der oberen Eingriffsgrenze: → Massenstrom ist zu hoch
  - Unterschreitung der unteren Eingriffsgrenze: → Massenstrom ist zu gering

#### **Gültigkeitsbereich:**

Der Gültigkeitsbereich des obig beschriebenen Berechnungsvorgehens beschränkt sich auf den folgenden Gültigkeitsbereich:

- Ein-/Aus geregelte WP mit konstanter Einstellung der Quellenpumpe
- Kont. Leistungsgeregelte WP mit auf Sole-Spreizung geregelter Quellenpumpe

Entsprechend sind kont. Leistungsgeregelte WP mit konstanter Einstellung der Quellenpumpe (z. B. Drehzahl) nicht durch das Berechnungsverfahren abgedeckt. Hier ändert sich die Sole-Temperatur-spreizung abhängig von der Kompressor-Drehzahl bzw. der Kälteleistung. Folglich ist die erläuterte Auswertung nicht zielführend.

#### **7.2.4 Erforderliche Daten**

Folgende Betriebsdaten sind für die Erkennung nötig:

- Eintrittstemperatur der Sole  $T_{Q,\alpha}$
- Austrittstemperatur der Sole  $T_{Q,\omega}$

Wie in Kapitel 3.3 ersichtlich ist, sind somit sämtliche Betriebsdaten standardmässig verfügbar. Metadaten sind folgende erforderlich:

- Sollwert der Überhitzung  $\Delta T_{\dot{U}H,soll}$

Diese sind WP-Intern ebenso vorhanden.



## 7.3 Erkennung einer falsch eingestellten Umschalttemperatur auf Heizstäbe zur WW-Aufbereitung

### 7.3.1 Grundlegende Zusammenhänge

Zum Schutz vor Schäden am Kompressor wird die Kondensations- und Heissgastemperatur einer WP begrenzt. Abbildung 40 zeigt dazu beispielhaft das Kennfeld eines Scroll-Kompressors auf. Typischerweise stellt dieses bei der Bereitstellung des WW eine Einschränkung dar. Für die Erwärmung von WW kann daher in der WP zusätzlich ein Heizstab eingesetzt werden, sofern die Soll-Temperatur nicht mit der WP erreicht wird.

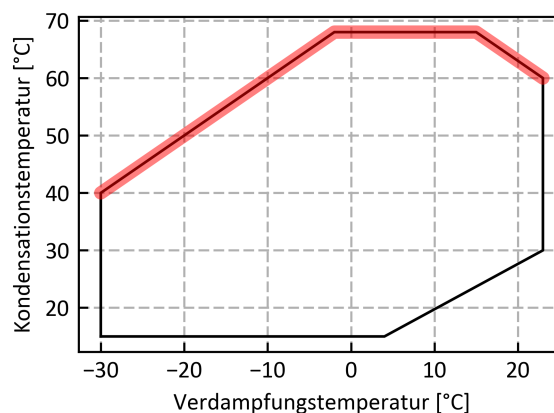


Abbildung 40: Beispiel-Kennfeld eines Copeland Scroll-Kompressors Typ XPV0182E-9X9 mit rot markierten maximalen Kondensationstemperaturen in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur, Daten von [55].

Je nach WP-Regler können die Einstellwerte für den Einsatz des Heizstabes so eingestellt werden, dass der Heizstab bereits aktiv ist, obwohl die WP die Soll-Temperatur im WW-Speicher  $T_{WW,Soll}$  ohne Unterstützung durch einen Heizstab erreichen kann. Dies führt (wie in den Simulationen gezeigt, siehe Tabelle 12) insbesondere zu einem höheren Energiebedarf. Es ist festzuhalten, dass die zu frühe Umschaltung auf den Heizstab vor allem dann ein Problem ist, wenn die Umschaltung aufgrund von Temperaturen im WW-Speicher erfolgt und nicht aufgrund von Betriebsdaten des Kältemittelkreislaufes. Zumal letztere direkt die für die Umschaltung verantwortlichen Grössen sind. Es ist daher generell empfehlenswert, die internen Betriebsdaten anstelle der WW-Temperatur im Speicher zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Ausführungen sind besonders für diejenigen Fälle relevant, in welchen die Wassertemperatur im WW-Speicher zur Umschaltung auf den Heizstab verwendet wird.

Bei den Regelstrategien muss grundsätzlich zwischen WW-Bereitstellung mit oder ohne Nachheizung durch einen Heizstab unterschieden werden. Bei heutigen Reglern wird oft die Einstellung ohne Nachheizung als Standard definiert (um unerwünschten zusätzlichen Energieverbrauch durch den Heizstab zu verhindern). Hier soll jedoch auf die Fälle mit einer Einstellung zur Nachheizung mithilfe eines Heizstabes eingegangen werden.

### 7.3.2 Berechnungsvorgehen

Ziel des Berechnungsvorgehens muss es sein, dass die Umschaltung auf Heizstäbe in jedem WP-Betriebsfall (wenn überhaupt) möglichst spät erfolgt, sodass möglichst viel Wärme durch die effizientere WP bereitgestellt wird. Das heisst, der Heizstab soll erst zum Einsatz kommen, wenn die WP ihre höchstmögliche Vorlauftemperatur und damit die höchstmögliche Temperatur im WW-Speicher überschreitet (kurz vor der Hochdruckstörung oder der maximal zulässigen Heissgastemperatur  $T_{HG,max}$ )



und die WW-Speichertemperatur ihren Sollwert  $T_{WW,Soll}$  noch nicht erreicht hat. Abbildung 41 verdeutlicht diese Zusammenhänge als exemplarischen Prozessablauf.

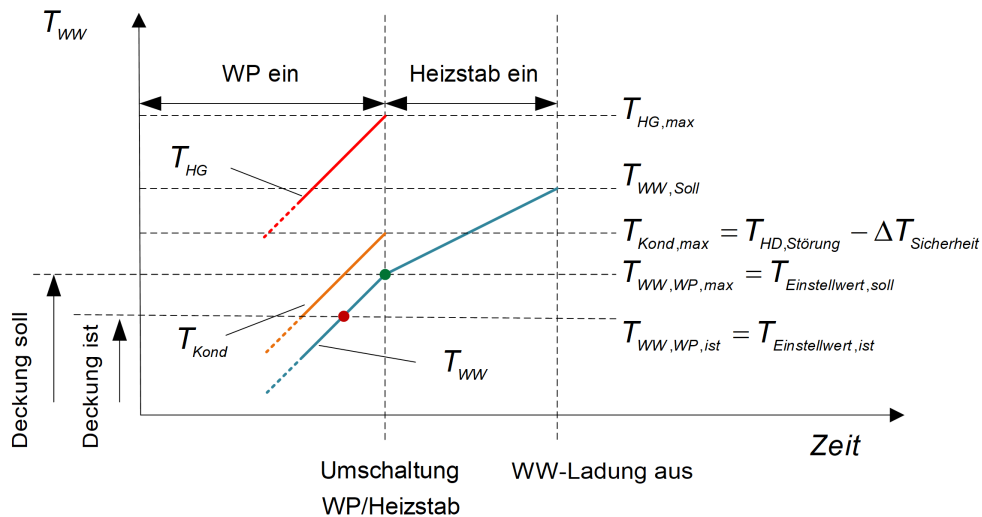


Abbildung 41: Verlauf der WW-Speichertemperatur während der WW-Ladung inkl. Umschaltung auf Heizstäbe. Ein zu tiefer Einstellwert der Umschalttemperatur (roter Punkt) führt zu erheblichen Effizienzverlusten.

Um allfällige Effizienzverluste durch eine zu tiefe Umschalttemperatur auf Heizstäbe zu vermeiden wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Das Vorgehen sollte mehrere Male über das Jahr verteilt automatisch (z.B. alle 2 Monate) ausgeführt werden, um den sich verändernden Umgebungsbedingungen (v.A. bei L/W-WP) Rechnung zu tragen.

- 1. Ermittlung Deckung WP zur WW-Aufbereitung**  
Zu ermitteln ist die max. WW-Temperatur im WW-Speicher bei alleiniger Deckung durch die WP bis zur WP-Hochdruckstörung ( $T_{WW,WP,max}$ )
- 2. Definition höchstmöglicher Umschalttemperatur auf Heizstäbe**  
Umschalttemperatur auf el. Heizstäbe wird gleich max. möglicher WW-Temperatur im Speicher durch Deckung der WP gesetzt
- 3. Vergleich höchstmöglicher Umschalttemperatur mit Einstellwert**  
Der Einstellwert der Umschalttemperatur auf el. Heizstäbe ( $T_{WW,WP,ist}$ ) wird mit der höchstmöglichen Umschalttemperatur  $T_{WW,WP,max}$  (im jeweiligen Betriebspunkt) verglichen
- 4. Ausgabe zu tief gesetzter Umschalttemperatur**  
Manuell zu tief gesetzte Umschalttemperatur auf el. Heizstäbe soll mit Warnung an Betreiber ausgegeben werden
- 5. Angleichung Einstellwert an die höchstmögliche Umschalttemperatur**  
Einstellwert für die Umschalttemperatur kann gleich dem höchstmöglichen Wert für die Umschalttemperatur gesetzt werden

Entscheidend ist die Ermittlung der maximalen WW-Temperatur im WW-Speicher  $T_{WW,WP,max}$ , welche durch die WP erzielt werden kann. Dazu wird die WP im WW-Betrieb bis knapp an die Betriebsgrenze (entweder maximale Kondensationstemperatur  $T_{Kond,max}$  (bzw. Kondensationsdruck  $p_{Kond}$ ) oder maximale Heissgastemperatur  $T_{HG,max}$ ) betrieben und dabei die maximal mögliche WW-Temperatur im WW-Speicher  $T_{WW,WP,max}$  ermittelt. Im Falle einer automatisierten Parameteranpassung wird der Sollwert für die Umschalttemperatur auf Heizstäbe entsprechend gesetzt (bzw. leicht darunter, zur Vermeidung von Betriebsstörungen).



Für die reine Betriebsanalyse ist der aktuelle Einstellwert der Umschalttemperatur auf Heizstäbe  $T_{WW,WP,ist}$  mit dem möglichen Sollwert  $T_{WW,WP,max}$  zu vergleichen. Falls der Einstellwert signifikant tiefer als der Sollwert eingestellt ist, ist an den Betreiber eine Meldung auszugeben.

### 7.3.3 Erforderliche Daten

Folgende Betriebsdaten sind für das Berechnungsverfahren notwendig:

- $T_{WW}$
- $T_{HG}$
- $p_{Kond}$

Wie in Kapitel 3.3 ersichtlich ist, sind die erforderlichen Betriebsdaten standardmässig verfügbar. Weiter ist die Kenntnis der nachfolgenden Metadaten, welche dem WP-Hersteller ebenfalls bekannt sind, erforderlich.

- Maximale Heissgastemperatur  $T_{Heissgas,max}$
- Maximaler Kondensationsdruck  $p_{Kond,max}$



## 7.4 Trenderkennung Abtauung

### 7.4.1 Grundlegende Zusammenhänge

L/W-WP entziehen der (feuchten) Umgebungsluft mit dem Verdampfer Wärme. Abhängig vom Zustand der Umgebungsluft kann dieser dabei vereisen, was die Effizienz der Anlage signifikant reduziert und im Extremfall deren Betrieb gar verunmöglicht. Die notwendige Abtauung des Verdampfers wird deswegen mit zyklischen Abtauvorgängen durchgeführt. WP-Hersteller verfolgen dazu verschiedene Ansätze, deren detaillierte Untersuchung nicht Teil des Projekts DIBA-WP sind. Die relevanten Grundlagen für die effiziente Abtauung von L/W-WP sind in [56] zu finden. Da die Optimierung der Abtauungen im Allgemeinen nicht zum Fokus dieses Projekts gehört, beschränkt sich das nachfolgend beschriebene Berechnungsvorgehen auf die Erkennung von Veränderungen im Betrieb der WP. Es soll erkannt werden, inwiefern sich das Abtauverhalten der Anlage verändert. Eine Verschlechterung des Abtauverhaltens kann z. B. aufgrund von Verschmutzungen am Verdampfer resultieren. Diese Veränderungen würden wie die anderen untersuchten Fehler im Feldbetrieb vom Betreiber kaum bemerkt, da der Komfort erst bei extremen Verschmutzungen beeinträchtigt würde.

Die Abtauung ist primär im Umgebungstemperaturbereich von ca.  $-7^{\circ}\text{C}$  bis  $5^{\circ}\text{C}$  erforderlich [57], da in diesem Bereich Verdampfungstemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  auftreten und die Luft absolute Feuchten im relevanten Mass aufweist. Bei höheren Temperaturen ist die Abtauung aufgrund Verdampfungstemperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  nicht mehr notwendig und bei sehr tiefen Aussentemperaturen ist die absolute Feuchte sehr tief. (Vgl. [56]).

### 7.4.2 Berechnungsvorgehen

Zur Analyse des Abtauverhaltens wurden die beiden nachfolgenden Kenngrößen definiert. Sie beziehen sich stets auf eine zu definierende Auswertungszeitdauer (z. B. 12h), um die diskrete Natur des Abtauzyklus zu berücksichtigen:

- Abtandauer  $d$  in Abhängigkeit der mittleren Umgebungstemperatur je Zeitfenster
- Anzahl Abtauzyklen  $N$  je Zeitfenster in Abhängigkeit der mittleren Umgebungstemperatur der Zeitfenster

Das konkrete Berechnungsvorgehen lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Berechnung der obigen Kennzahlen und Einteilung in Temperaturgruppen (Breite der Temperaturgruppen: z. B. 2 K). Die Einteilung anhand der mittleren Umgebungstemperatur, welche die primäre Einflussgröße darstellt, erfolgt für die bessere Vergleichbarkeit der Datenpunkte. Für die Temperaturgruppen wird nachfolgend der Index  $i$  verwendet.
2. Berechnung des Mittelwertes und der Standard-Abweichung pro Temperaturgruppe, sobald eine zu definierende Anzahl Werte pro Temperatur-Gruppe vorliegt (z. B. 50 Werte)
  - a. Speicherung des Referenz-Mittelwertes je Kenngröße
  - b. Speicherung der Referenz-Standardabweichung je Kenngröße
3. Für die Kenngrößen  $d$  und  $N$ : Definieren der Eingriffsgrenzen  $EG_{x,i}$  pro Temperaturgruppe  $i$  wobei die Eingriffsgrenze ein Mehrfaches der Standardabweichung  $\sigma_{x,i}$  über dem Mittelwert  $\mu_{x,i}$  zu liegen kommt (Faktor  $F$ ). Der Faktor  $F$  ist eine Einstellgröße zur Justierung der Sensitivität der Erkennungsmethode.

$$EG_{x,i} = \mu_{x,i} + F\sigma_{x,i} \quad x \in \{d, N\}, \quad \forall i \quad (15)$$



4. Kontinuierliche Überwachung des Prozesses durch Bildung des gleitenden Mittelwerts der Kenngrößen und Vergleich dessen gegenüber der Eingriffsgrenze.
5. Meldung an den Nutzer wenn die Eingriffsgrenze überschritten wird.

Zur Überprüfung der Funktionsweise und Visualisierung des Berechnungsvorgehens wurden Daten aus den WP-Feldmessungen [15] analysiert. Nachfolgend werden Daten vom Objekt 1 aus den Heizperioden 2018/19 und 2019/20 der Feldmessungen dargestellt. Für die Länge des Zeitfensters der Auswertung wurden 12 h gewählt. Abbildung 42 zeigt das Histogramm der Abtaudauern für die Temperaturgruppe 1°C – 3°C.

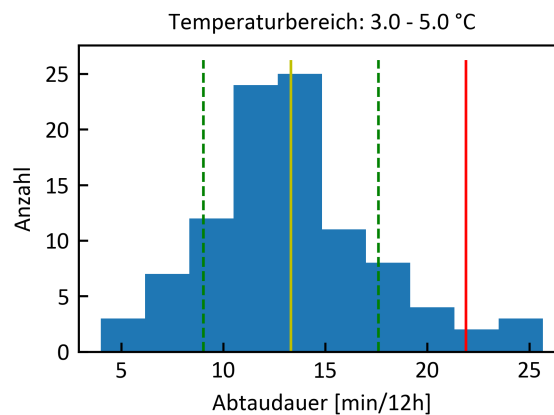


Abbildung 42: Histogramm der Abtaudauer  $d$  je Zeitfenster mit markiertem Mittelwert  $\mu_d$  (gelb), Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung  $\sigma_d$  (grün) und Eingriffsgrenze  $EG_d$  für den Fall  $F = 2$

Der temperaturabhängige Verlauf des Mittelwertes, der Standardabweichung und der Eingriffsgrenze sind, für die mittlere Abtaudauer sowie die mittlere Abtauzyklen-Anzahl, in Abbildung 43 dargestellt.

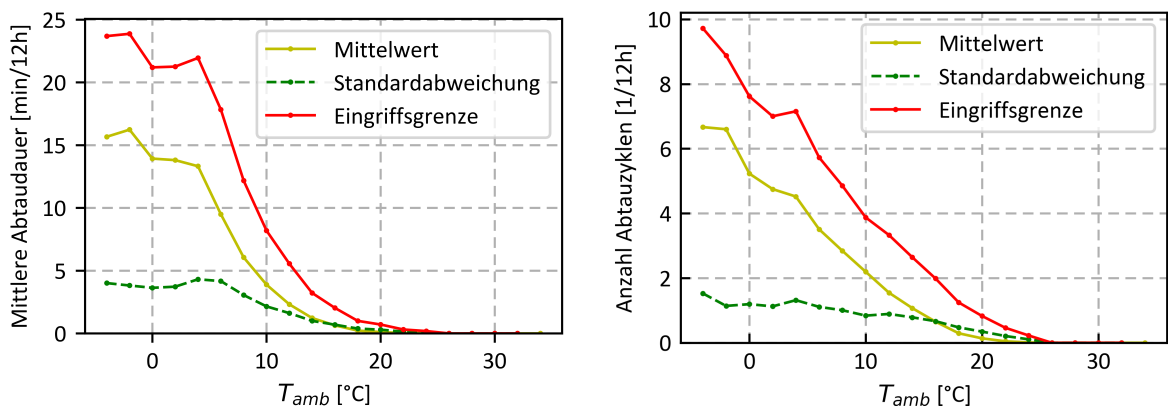


Abbildung 43: Mittelwert (Gelb), Standardabweichung (Grün) und Eingriffsgrenze (Rot) der mittleren Abtaudauer (links) und der mittleren Anzahl Abtauzyklen (rechts)

Das Vorgehen lehnt sich stark an der Methodik der Prozesskontrollkarte (vgl. z.B. [58, pp. 640 ff.]) an. Es stellt eine Anwendung derer auf die relevanten Größen einer L/W-WP hinsichtlich Abtauung dar.

Für die Überprüfung der Funktionsweise und Verlässlichkeit des Berechnungsvorgehens ist als nächster Schritt die Erprobung im Feld anzustreben.



### 7.4.3 Erforderliche Daten

Folgende Betriebsdaten sind für die Erkennung notwendig:

- Umgebungstemperatur  $T_{amb}$
- Ein und Ausschaltzeitpunkte der Abtauregelung

Diese Daten sind in der WP-Steuerung vorhanden. Metadaten sind für dieses Berechnungsverfahren nicht erforderlich.



## 8 Energetisches und wirtschaftliches Potenzial optimaler Heizkurven

Aus den in Kapitel 6 dargestellten Ergebnissen der Fehlersimulationen geht hervor, dass insbesondere eine zu hoch eingestellte Heizkurve zu einem deutlich erhöhten elektrischen Energiebedarf führt (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). Die daraus resultierenden energetischen und wirtschaftlichen Potenziale werden nachfolgend diskutiert.

Gemäss Definition in Kapitel 6.2.1 beschreibt die optimale Heizkurve die niedrigste Vorlauftemperatur, bei welcher der Komfort gewährleistet ist (Komfortverletzung kleiner als 10 Kh/a). Von dieser optimalen Heizkurve ausgehend zeigt Abbildung 44 den prozentualen Mehraufwand an elektrischer Energie, wenn die Nominal-Vorlauftemperatur erhöht wird (siehe auch Abbildung 17). Die Heizgrenz-Temperatur, welche die Heizkurve ebenfalls mitdefiniert, wird dabei nicht geändert. Es ist zu erkennen, dass für alle drei modellierten Gebäudetypen nach Kapitel 5.2.2 ein näherungsweise linearer Zusammenhang der zu hoch eingestellten Heizkurve und dem Mehraufwand an elektrischer Energie besteht. Pro Kelvin Heizkurvenüberhöhung ergibt sich ein zusätzlicher Energieverbrauch von ca. 2 %.

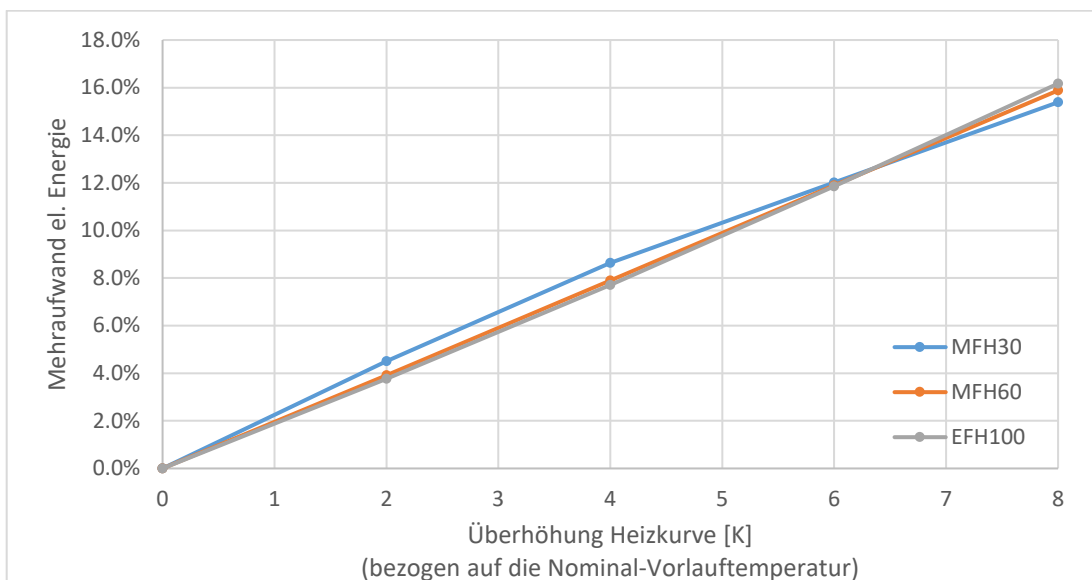


Abbildung 44: Prozentualer Mehraufwand elektrischer Energie in Abhängigkeit einer zu hoch eingestellten Heizkurve

Mit der Annahme, dass die Heizkurven von WP durchschnittlich um 3 K zu hoch eingestellt sind, resultiert ein elektrischer Mehraufwand von jeweils 6 %. Eine korrekt eingestellte Heizkurve hätte für eine Wohnung in einem sanierten MFH (Gebäudetyp MFH60) mit einer EBF von 150 m<sup>2</sup> somit eine Reduktion des jährlichen elektrischen Energiebedarfs von 1'955 kWh auf 1'844 kWh zur Folge. Unter der Annahme eines durchschnittlichen Strompreises von 20 Rp./kWh reduzierten sich die jährlichen Energiekosten damit um 22 Franken auf rund 369 Franken.

Ausgehend vom schweizweiten elektrischen Endenergieverbrauch von WP für die Bereitstellung von Raumwärme in Privathaushalten, der sich im Jahr 2021 auf 2'000 GWh belief [1], ergeben sich mit der oben genannten Optimierung der Heizkurve jährliche Einsparungen von rund 113 GWh elektrischer Energie (entspricht rund 0.2 % des gesamten Schweizerischen Elektrizitätsverbrauch). Wirtschaftlich betrachtet bedeutete dies beim oben genannten Strompreis von 20 Rp./kWh Einsparungen von 23 Mio. CHF. Oder allgemeiner gefasst: pro Kelvin zu hoch eingestellter Heizkurven werden schweizweit zusätzliche 40 GWh an elektrischer Energie benötigt, was zu Mehrkosten von rund 8 Mio. CHF allein in den Privathaushalten führt. Die Aufschlüsselung bis zum Endenergieverbrauch für WP ist lediglich für



Privathaushalte verfügbar. Die Tatsache, dass die Privathaushalte aber 65.8 % ([1, p. 93]) des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser ausmachen, lässt jedoch auf eine gute Aussagekraft der Abschätzung schliessen.

Zukünftig wird im Rahmen der Umsetzung der Energiestrategie 2050 ein Grossteil der über 1 Mio. fossilen Heizungen durch WP ersetzt [5]. Konkrete Abschätzungen lassen sich unter Einbezug der «Energieperspektiven 2050+» [59] durchführen. Bis im Jahr 2050 werden schweizweit rund 1.5 Mio. WP in Betrieb sein. Das jährliche Einsparpotenzial durch die richtige Einstellung der Heizkurve dürfte dann mehrere 100 GWh betragen. Im Jahr 2050 werden rund 6'100 GWh elektrischer Energie für die Raumwärme verwendet [59, p. 295]. Folglich bedeutet eine Absenkung aller Heizkurven um drei Kelvin eine Reduktion des Energiebedarfs um 345 GWh.



## 9 Schlussfolgerungen

Der effiziente Betrieb von Wärmepumpen im Feld bedingt neben einer korrekten Auslegung und fehlerfreien Installation die richtige Einstellung des Wärmepumpensystems. Wie dieses Projekt aufzeigt, können an Wärmepumpensystemen eine Vielzahl an Fehlern auftreten. Die möglichen Fehler können dabei den Kategorien gemäss Kapitel 4.1 zugewiesen werden. Die primäre Fokussierung auf die Kategorie «fehlerhafte Einstellwerte» ermöglichte eine Eingrenzung der 130 identifizierten Fehler auf 27 zu simulierende Fehler. Die dafür entwickelten Simulationsmodelle sind in der Lage die Fehleinstellungen bei unterschiedlichen Gebäudemodellen und hydraulischen Verschaltungen realitätsnah abzubilden und ermöglichen damit eine quantitative Beurteilung. Die qualitative und quantitative Bewertung der Fehler verdeutlicht, dass der Fokus auf eine stark eingeschränkte Anzahl von Fehlern mit hoher Relevanz gelegt werden sollte. Es sind dies:

- Eine falsch eingestellte Heizkurve
- Ein falsch eingestellter Massenstrom der Quellenpumpe
- Eine falsche Umschaltemperatur auf interne Heizstäbe zur WW-Erwärmung
- Die Verschlechterung des Abtauverhaltens

Die entwickelten Berechnungsvorgehen für die vier selektierten Fehler sind in der Lage, Fehler bei den für die Simulation verwendeten Gebäudemodellen zu erkennen. Es zeigt sich dabei, dass mit physikalisch-basierten Ansätzen eine zuverlässige Aussage über das Vorliegen von Fehlern gemacht bzw. die Qualität von Einstellwerten beurteilt werden kann. Der damit erbrachte theoretische Nachweis der Funktionalität der Berechnungsvorgehen bzw. der digitalen Betriebsanalyse legt die Grundlage für die weiterführende Entwicklung und experimentelle Erprobung. Es lässt sich allerdings auch festhalten, dass mit einem generischen Berechnungsvorgehen nicht alle Einstellfehler erkannt werden können, sondern dass spezifische Ansätze je Fehler vielversprechender sind. Weiter benötigt das Berechnungsvorgehen für die Erkennung überhöhter Heizkurven unter Umständen zusätzliche Messtechnik. Auch hier wird ein weiterer Forschungsbedarf identifiziert, der durch die entsprechenden Diskussionen in den Begleitgruppensitzungen untermauert wird. Die fortschreitende Digitalisierung der Gebäudetechnik eröffnet hierzu neue Entwicklungsmöglichkeiten, sodass die Kommunikation von digitalen Reglern der Wärmeabgabe mit der Wärmepumpe z.B. die Einstellung der Heizkurve vereinfachen könnten.

Das energetische und wirtschaftliche Potenzial von Fehleinstellungen ist insbesondere auf übergeordneter Ebene von hoher Relevanz. Künftig (2050) fällt schätzungsweise 10 % des Elektrizitätsbedarfs durch Wärmepumpen an und dies vorwiegend in den Wintermonaten. Mit der besseren Einstellung von Wärmepumpen kann dieser Bedarf reduziert werden. Durch die Absenkung der Heizkurve aller in der Schweiz installierten Heizungswärmepumpen um z.B. 3 K kann im Jahr 2050 schätzungsweise 345 GWh an elektrischer Energie eingespart werden.



## 10 Ausblick und Empfehlungen

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Regelung von Heizsystemen konnte in dieser Arbeit aufgezeigt und auch an der dritten Begleitgruppensitzung übereinstimmend festgehalten werden, dass bei modernen Gebäuden mit tiefen Heizwärmebedarf die aussentemperaturgeführte Heizkurve nicht der ideale Ansatz ist. In solchen Gebäuden haben solare Gewinne und interne Lasten einen massgeblichen Einfluss auf das Systemverhalten. Für zukünftige Generationen von Gebäuden ist zur Erreichung einer hohen Effizienz eine adaptive Einstellung Weiterführender Forschungsbedarf wird in erster Linie in der praxisnahen Erprobung der Berechnungsvorgehen zur Erkennung überhöhter Heizkurven erachtet. Die hergeleiteten Grundlagen konnten in den Simulationsstudien bestätigt werden, die Anwendung der Methoden im Labor und insbesondere im Feldbetrieb ist noch ausstehend.

der Vorlauftemperatur, die auf dem digitalen Informationsaustausch zwischen WP und Heizwärmeabgabesystem basiert, zielführend.

Die Berechnungsvorgehen zur falsch eingestellten Quellenpumpe, der falsch eingestellten Umschalttemperatur auf Heizstäbe und zur Trenderkennung der Abtauung sind im Vergleich zur Erkennung der falschen HeizkurvenEinstellung bereits näher an der realen Umsetzung. Dennoch ist auch hier eine vorgängige Erprobung in Feldanlagen zu empfehlen.

## 11 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des BFE-Projekts DIBA-WP arbeitete das Projektteam im Annex 56 des Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies der Internationalen Energie Agentur (IEA HPT Annex 56) mit. Unter der Leitung des Austrian Institute of Technology (AIT) wird das Thema «Digitalization and IoT for Heat Pumps» in einer internationalen Kollaboration bearbeitet. Im Annex werden drei Stossrichtungen verfolgt: Interfaces, Data Analysis und Services. Zur Analyse des Standes der Technik (Task 1) wurde eine umfangreiche Sammlung von IoT-Use-Cases in Bezug auf WP-Systeme aller Art erarbeitet und nach Kriterien (welche im Zuge der Sammlung definiert wurden) kategorisiert. Diese Use-Cases wurden zum Abschluss des Projektes in Factsheets aufbereitet und werden online auf der Website des Annexes zur Verfügung gestellt.

Es wird pro Task ein gemeinsamer Teilbericht von allen Teilnehmenden erstellt. Die Berichte des Annex werden ebenfalls auf der Website des Annex zur Verfügung gestellt. Die Website des Annex kann unter folgendem Link aufgerufen werden: [www.heatpumpingtechnologies.org/annex56](http://www.heatpumpingtechnologies.org/annex56)



## 12 Literaturverzeichnis

- [1] A. Kemmler und T. Trachsel, "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2021: Auswertung nach Verwendungszwecken," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2022.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, "Emissionen von Treibhausgasen nach CO<sub>2</sub>-Gesetz, Kyoto-Protokoll und Übereinkommen von Paris," Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2022.
- [3] Bundesamt für Energie BFE, "Energiestrategie 2050 nach dem Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes," Bern, 2018.
- [4] Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS, "Statistik 2021," Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS, Bern, 2022.
- [5] S. Peterhans, R. Dott, W. Eugster, M. Freymond, M. Generelli, G. Guggenheim, P. Hubacher, und C. Müller, "FWS Jahresbericht 2019," vol. 2019, 2019.
- [6] P. Hubacher und C. Bernal, "Feldmessungen an leistungsgeregelten Wärmepumpen und Warmwasser-Wärmepumpen," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2015.
- [7] M. Miara, D. Günther, T. Kramer, T. Oltersdorf, und J. Wapler, "Wärmepumpen Effizienz," Fraunhofer-Institute für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2011.
- [8] M. Erb, P. Hubacher, und M. Ehrbar, "Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2004.
- [9] B. Wellig, "Wärmepumpen-Forschung: Stand und künftige Herausforderungen," in *25. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte»*, 2019, pp. 29–44.
- [10] O. Meile, "Energiestrategie 2050 und Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE): Chancen für Wärmepumpen ?," in *21. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte»*, 2015, pp. 18–28.
- [11] P. Hubacher und C. Bernal, "QS-WP/QP: Fortsetzung des Feldmonitorings," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2015.
- [12] P. Hubacher und C. Bernal, "QS-WP/QP: Fortsetzung des Feld-Monitorings von WP-Anlagen mittels Feldmessungen, Analyse des Lanzzeitverhaltens und Bestimmung der Effizienz für das Modell der Wärmepumpenstatistik für die Jahre 2008 bis 2011," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2012.
- [13] M. Nani, P. Hubacher, und M. Ehrbar, "QS-WP: Qualitäts-Prüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen," Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2005.
- [14] M. Prinzing, M. Berthold, S. Bertsch, und M. Eschmann, "Schlussbericht «Feldmessungen Wärmepumpen-Anlagen 2015-2018 (Auswertung verlängert bis Dez. 2019)»,» EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2019.
- [15] M. Prinzing, M. Berthold, S. Bertsch, und M. Eschmann, "Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2020/21»,» Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.
- [16] M. Prinzing, M. Berthold, M. Eschmann, und S. Bertsch, "Bericht «Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2019/20»,» Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2020.
- [17] B. Frei, C. Sagerschnig, und D. Gyalistras, "ParkGap – Performance Gap Gebäude," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [18] M. Roost, M. Ménard, M. Lehmann, W. Ott, und B. Sitzmann, "WP-GAP: Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpe – die Rolle der Betreiber," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [19] G. Reiner, E. Shafai, H. R. Gabathuler, R. Wimmer, D. Zogg, und H. U. Bruderer, "Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen: Phase 1 bis 3," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 1998.
- [20] D. Zogg und E. Shafai, "Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen: Phase 4," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 1999.
- [21] D. Zogg und E. Shafai, "Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen Phase 5," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2001.



- [22] D. Zogg, "Fault diagnosis for heat pump systems," Phd Thesis, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, 2002.
- [23] H. Madani und E. Roccatello, "A comprehensive study on the important faults in heat pump system during the warranty period," *International Journal of Refrigeration*, pp. 19–25, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.08.007.
- [24] H. Madani, "Smart fault detection and diagnosis for heat pump systems," in *24th IIR International Congress of Refrigeration*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 3703–3710.
- [25] M. Abuasbeh und H. Madani, "Fault Detection and Diagnosis for Brine to Water Heat Pump Systems," in *12th IEA Heat Pump Conference*, 2017.
- [26] H. R. Gabathuler, H. Mayer, und T. Afjei, "Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen: Teil 1: STASCH-Planungshilfen," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2002.
- [27] T. Afjei, U. Schonhardt, C. Wemhöner, M. Erb, H. R. Gabathuler, H. Mayer, G. Zweifel, M. Achermann, R. von Euw, und U. Stöckli, "Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen: Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen," 2002.
- [28] R. Dott, A. Genkinger, R. Kobler, Z. Alimovic, P. Hubacher, und T. Afjei, "Wärmepumpen: Planung | Optimierung | Betrieb | Wartung," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [29] WPSYSTEMMODUL, *Wärmepumpen als Systemmodul*. [Online]. Verfügbar unter: [www.wp-systemmodul.ch](http://www.wp-systemmodul.ch) (zugegriffen am: 10.03.2020).
- [30] A. Dellios, P. Hubacher, und G. Guggenheim, "Wärmepumpen-System-Modul (WPSM): Jahresbericht 2021," Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2022.
- [31] Stiebel Eltron, "Planung und Installation: Wärmepumpen," Holzwinden, 2021.
- [32] Viessmann, "Planungshandbuch Wärmepumpen," Allendorf, 2011.
- [33] R. Gadola und C. Bless, "Wärmepumpen-Heizungszentralen in der Praxis: Vorschläge für eine gesamtheitliche Betrachtung kleiner und mittelgrosser Anlagen," EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2017.
- [34] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, *Muster Gebäudeenergieausweis der Kantone*. [Online]. Verfügbar unter: [www.uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/Themen/Energie/Energieberatung/geak\\_muster.pdf?la=de-CH](http://www.uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/Themen/Energie/Energieberatung/geak_muster.pdf?la=de-CH) (zugegriffen am: 20.06.2021).
- [35] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, *Nachweis der energetischen Massnahmen im Gebäudebereich*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.endk.ch/de/fachleute-1/energienachweis/Kantonale\\_Hauptformulare](https://www.endk.ch/de/fachleute-1/energienachweis/Kantonale_Hauptformulare) (zugegriffen am: 20.06.2021).
- [36] Bundesamt für Energie (BFE), "Gebäudepark 2050 - Vision des BFE," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2020.
- [37] OST, *Wärmepumpen-Testzentrum Buchs (WPZ)*. [Online]. Verfügbar unter: [www.wpz.ch](http://www.wpz.ch) (zugegriffen am: 10.08.2022).
- [38] L. Berlinger, M. Imholz, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker, R. Sahinagic, und L. Gasser, "LOREF : Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung Optimierung des Lamellenluftkühlers / Verdampfers von Luft / Wasser-Wärmepumpen Teil 2 : Mathematisch-physikalische Simulation des Lamellenluftkühlers mit Kondensat- und Frostbildung," (in Deutsch), BFE, Projektnummer 100059, pp. 1–95, 2008.
- [39] EQUA Simulation AB, *IDA ICE*. [Online]. Verfügbar unter: [www.equa.se/de](http://www.equa.se/de) (zugegriffen am: 1.09.2020).
- [40] Vela Solaris AG, *Polysun*. [Online]. Verfügbar unter: [www.velasolaris.com](http://www.velasolaris.com) (zugegriffen am: 1.09.2020).
- [41] Daussalt Systems, *Dymola*. [Online]. Verfügbar unter: [www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/](http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/) (zugegriffen am: 1.09.2020).
- [42] Modelica Association, *Modelica Programming Language*. [Online]. Verfügbar unter: [www.modelica.org](http://www.modelica.org) (zugegriffen am: 10.09.2020).
- [43] TLK-Thermo GmbH, *TIL Suite: Softwarepaket zur Simulation thermischer Systeme*. [Online]. Verfügbar unter: [www.tlk-thermo.com/index.php/de/software/til-suite](http://www.tlk-thermo.com/index.php/de/software/til-suite) (zugegriffen am: 20.11.2020).



- [44] Modelica Association, *Modelica Standard Library*. [Online]. Verfügbar unter: [www.modelica.org/libraries](http://www.modelica.org/libraries) (zugegriffen am: 20.11.2020).
- [45] International Building Performance Simulation Association (IBPSA), *Modelica Buildings Library*. [Online]. Verfügbar unter: [www.modelica.org/libraries](http://www.modelica.org/libraries) (zugegriffen am: 20.11.2020).
- [46] M. Y. Haller, R. Dott, J. Ruschenburg, F. Ochs, und J. Bony, "The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Part A: General Simulation Boundary Conditions A technical report of subtask C Report C1 Part A Final -Revised," 2013.
- [47] G. Settembrini, S. Domingo-Irigoyen, T. Heim, D. Jurt, A. Zakovorotyni, A. Seerig, G. Zweifel, und U.-P. Menti, "ClimaBau - Planen angesichts des Klimawandels," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2017.
- [48] M. Igor, S. Cramer, M. Caflisch, D. Carbonell Sanchez, und M. Haller, "Reference Framework for Building and System Simulation: Multifamily Reference Building," SPF, Institut für Solartechnik; HSR, Hochschule für Technik Rapperswil, Dec. 2019.
- [49] M. Igor, M. Luzzatto, M. Haller, M. Lehmann, M. Benz, und S. Van Velsen, "ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [50] Meteotest AG, *Meteonorm*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.meteonorm.com/de/downloads>
- [51] S. Yilmaz, P. Murray, A. Bollinger, und G. Guidati, "Hourly Demand Profiles For Space Heating and Electricity," EMPA, ETH Zurich, Université de Genève, 2020.
- [52] *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*, SIA 2028, 2010.
- [53] M. Wetter, W. Zuo, T. S. Nouidui, und X. Pang, "Modelica Buildings library," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 7, no. 4, pp. 253–270, 2014, doi: 10.1080/19401493.2013.765506.
- [54] L. Gasser, I. Wyssen, T. Käch, M. Kleingries, und B. Wellig, "Sole/Wasser-Wärmepumpen mit kontinuierlicher Leistungsregelung," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2015.
- [55] Emerson Climate Technologies GmbH, *Select 8*. [Online]. Verfügbar unter: [www.climate.emerson.com/en-gb/tools-resources/copeland-select-software](http://www.climate.emerson.com/en-gb/tools-resources/copeland-select-software) (zugegriffen am: 20.12.2022).
- [56] L. Gasser, I. Wyssen, M. Albert, M. Häusermann, M. Kleingries, und B. Wellig, "Effiziente Luft / Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung," 2011.
- [57] S. Sobotta, *Praxis Wärmepumpe: Technik, Planung, Installation*, 4th ed. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2022.
- [58] D. C. Montgomery, *Applied statistics and probability for engineers*, 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [59] Prognos AG, Infras AG, TEP Energy GmbH, und Ecoplan AG, "Energieperspektiven 2050+: Technischer Bericht," Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2020.



## 13 Anhang

### 13.1 Fehlerliste

Für die Fehlerkategorien aus Kapitel 4.1 werden folgenden Abkürzungen verwendet:

- Einstellwerte: **ew**
- Auslegung/Planung/Installation: **api**
- Funktionsstörung: **fs**
- Kühlbetrieb: **kü**
- Auslegung/Entscheide WP-Hersteller: **he**
- Regelstrategien WP-Hersteller: **rs**

ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulationsset
1	Speicher wird unnötigerweise überladen (zu hohe Temp. im Speicher)	falsche Parametrierung (Hysterese)	ew	n	
2	Speicher wird unnötigerweise überladen (zu hohe Temp. im Speicher)	falsche Parametrierung (Heizkurve)	ew	j	Set 2, Set 15, Set 24
3	Speicher wird unnötigerweise überladen (zu hohe Temp. im Speicher)	falsch platzierter Fühler im Heizspeicher	api	j	Set 20
4	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen	zu klein dimensioniertes Wärmeabgabesystem	api	n	
5	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen	nicht ordnungsgemäss funktionierendes Wärmeabgabesystem (geschlossene oder teilverschlossene Heizkreise, Luft im System, Verschmutzung, fehlender hydraulischer Abgleich)	api, fs	n	
6	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen	falsche Parametrierung (Heizkurve)	ew	j	s. ID 2
7	Zu hohe erforderliche Heizleistung	falsch dimensioniertes Wärmeabgabesystem	api	j	s. ID 4
8	Zu hohe erforderliche Heizleistung	zu lange Sperrzeiten	api	j	Set 19
9	Zu hohe erforderliche Heizleistung	zu langer WW-Betrieb	api	j	s. ID 61
10	Zu hohe erforderliche Heizleistung	unnötiger Wärmebedarf (z.B. falsch eingestellte Heizgrenze und geöffnete Fenster in Übergangszeit)	ew	n	



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
11	Zu hohe Wärmeverluste des Puffer-Speichers	Dämmung des Puffer-Speichers ungenügend	api	j	Set 4, Set 18
12	Zu hohe Wärmeverluste des Puffer-Speichers	unnötig grosses Speichervolumen	api	j	Set 5, Set 17
13	Zu hohe Wärmeverluste des Puffer-Speichers	ungeeigneter Aufstellungsort des Speichers (z.B. Draussen)	api	n	
14	Unnötiges Heruntermischen der Systemtemperaturen	falsch eingestellte Systemkomponenten (z.B. Abstimmung Lade- und Entlade-Pumpe) oder falscher Systemaufbau (permanenter Bypass)	ew, api	j	Set 13
15	Unnötiges Heruntermischen der Systemtemperaturen	zu hohe Volumenströme Ladepumpe (Heiz und/oder Abtaubetrieb)	api	j	s. ID 18
16	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	verschmutzte Plattenwärmeübertrager, Vorfilter	fs	n	
17	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	falsch dimensionierte Umwälzpumpen (Ladepumpe / Heizkreispumpe)	api	j	s. ID 14
18	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Regelstrategie Ladepumpe	rs, ew	j	Set 7
19	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Regelstrategie Heizkreispumpe	rs, ew	j	s. ID 14
20	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Regelstrategie Wärmepumpe	rs	n	
21	Unnötige Anforderung	falsch eingestellte Heizgrenze	ew	j	Set 1, Set 14
22	Unnötige Anforderung	falsche Temperaturmittelung	ew	j	Set 11, Set 16
23	Unnötige Anforderung	falsch platzierte Fühler	api	n	
24	Unnötige Anforderung	während Tag Kühlbetrieb, in der Nacht Heizen	ew	n	
25	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch dimensionierte Wärmequelle (Erdwärmesonde, Grundwasserbrunnen, Lamellenluftkühler/Ventilator)	api	j	Set 22
26	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	verschmutzte Wärmequelle (Verdampfer, Plattenwärmeübertrager, Vorfilter usw.)	fs	n	
27	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	Luft im Wärmequellensystem (Erdsonden, W/W, Zwischenkreise)	fs	n	
28	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch dimensioniertes Expansionsventil	he	n	



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
29	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	schlecht regelndes Expansionsventil	fs, he	n	
30	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegte Quellenpumpe	api	j	Set 12,
31	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegter Ventilator	he	n	
32	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegter Verdampfer	he	n	
33	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsche quellenseitige Regelung durch falsche Parametrierung und/oder Programmierung (Pumpe, Ventilator)	ew, he	j	s. ID 30
34	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	zu wenig Kältemittel (Kältemittelverlust)	fs	n	
35	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	nicht rechtzeitige Abtauung	rs, he	n	
36	Zu hohe Kondensationstemperaturen	falsch dimensionierte Wärmesenke	api	j	s. ID 4
37	Zu hohe Kondensationstemperaturen	verschmutzte Wärmesenke (Kondensator, Filter usw.)	fs	n	
38	Zu hohe Kondensationstemperaturen	zu klein ausgelegte Ladepumpe	api	j	s. ID 18
39	Zu hohe Kondensationstemperaturen	zu klein ausgelegte Heizkreispumpe	api	j	s. ID 14
40	Zu hohe Kondensationstemperaturen	"falsche" Regelstrategie Ladepumpe	ew	j	s. ID 18
41	Zu hohe Kondensationstemperaturen	"falsche" Regelstrategie Heizkreispumpe	ew	n	
42	Zu hohe Kondensationstemperaturen	Ineffiziente WP-Technik (Ein-/Aus-Regelung)	rs	n	
43	Zu kurze Taktzeiten	falsche Parametrierung Heizkurve (Heiz und/oder Ladekreis) und Ein/Ausschalthysterese	ew	j	s. ID 1, 2
44	Zu kurze Taktzeiten	falsche Regelstrategie	rs	n	
45	Zu kurze Taktzeiten	falsch dimensionierter Heizspeicher	api	j	s. ID 12
46	Zu kurze Taktzeiten	unnötige Anforderung	ew	j	s. ID 21, 22
47	Zu kurze Taktzeiten	falsch dimensionierte WP	api	j	Set 8
48	Zu kurze Taktzeiten	Fehlende Abstimmung Lade- und Heizkreispumpe	api	j	s. ID 14, 18



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
49	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsche Parametrierung	ew, he	n	
50	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsche Regelstrategie	rs	n	
51	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	verschmutzter Verdampfer / ungünstige Luftführung	fs	n	
52	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsch dimensionierter Verdampfer	he	n	
53	Zu hohe erzeugte Vorlauftemperaturen	falsche Parametrierung (Heizkurve)	ew	j	s. ID 2
54	Zu hohe erzeugte Vorlauftemperaturen	falsche Regelstrategie	rs	n	
55	Zu hohe erzeugte Heizleistung	falsche Parametrierung (interne Regelung WP)	ew, he	n	
56	Zu hohe erzeugte Heizleistung	falsche Regelstrategie	rs	n	
57	Effizienz Wärmepumpe schlecht	Kompressor fehlerhaft (z.B. interne Leckagen infolge Abnützung)	fs	n	
58	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsch ausgelegte Quellenpumpe (siehe auch zu tiefe Verdampfungstemperaturen)	api	j	s. ID 30
59	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsch ausgelegter Ventilator (siehe auch zu tiefe Verdampfungstemperaturen)	he	n	
60	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsche quellenseitige Regelung durch falsche Parametrierung und/oder Programmierung (Pumpe, Ventilator)	ew	j	s. ID 30
61	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	tägliche Legionellenschaltung mit Heizstab und zu "geringem" Tagesbedarf bzw. zu grossem WW-Speicher	api	j	Set 30
62	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	Einstellung Solltemperatur Warmwasser zu hoch	ew	j	Set 27
62.2	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	Ein/Ausschalthysterese zu klein bzw. Ein/WW-Temperatur zu hoch	ew	j	Set 28
63	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	Legionellenschaltung wird grundsätzlich nur mit Heizstab durchgeführt, obwohl dies die WP bis zu einer bestimmten WW-Speichertemperatur übernehmen könnte	ew	j	Set 32



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
64	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	zu frühes Umschalten von der WP auf den Heizstab aufgrund falscher Parametrierung, "falscher" Programmierung oder zu kleinem Wärmeübertrager (Register) im WW-Speicher	ew	j	s. ID 63
65	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	nicht erkanntes und signalisiertes Umschalten in den Notbetrieb mit Heizstab	fs	n	
66	Unnötige Bereitstellung WW mittels el. Heizeinsatz	WP Heizleistung zu gering für WW & Heizen	api	n	
67	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen zum WW-Speicher	zu kleines Register (Wärmeübertragerfläche) im WW-Speicher	api	j	Set 33
68	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen zum WW-Speicher	verschmutztes (Kalk) Register im WW-Speicher	fs	n	
69	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen zum WW-Speicher	falsch dimensionierte "Peripherie" Pumpe / Leitungen zum WW-Speicher	api	j	Set 35
70	Zu hohe erforderliche Vorlauftemperaturen zum WW-Speicher	falsch platzierte / defekte Fühler	api, fs	j	Set 36
71	Zu hohe Wärmeverluste des WW-Speichers	zu schlechte Isolation des WW-Speichers	api	j	Set 37
72	Zu hohe Wärmeverluste des WW-Speichers	fehlendes Siphon an der Warmwasserabgangsleitung	api	n	
73	Zu hohe Wärmeverluste des WW-Speichers	viel zu grosses Speichervolumen	api	n	
74	Zu hohe Wärmeverluste des WW-Speichers	ungeeigneter Aufstellungsort des Speichers (z.B. Draussen)	api	n	
75	Heruntermischen des WW-Speichers bei Frischwassersystemen	"falsche" Regelstrategie	ew, rs	n	
76	Heruntermischen des WW-Speichers bei Frischwassersystemen	zu grosse Ladepumpe	api	n	
77	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	verschmutzte Plattenwärmeübertrager, Vorfilter	fs	n	
78	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	falsch dimensionierte Ladepumpe	api	j	s. ID 69



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
79	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Regelstrategie Ladepumpe	ew	n	
80	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Regelstrategie Wärmepumpe	rs	n	
81	Zu hoher Energiebedarf der zugehörigen Peripherie	"falsche" Parametrierung (Z.B. Zirkulationspumpe läuft durch / keine Nachtabschaltung)	ew	n	
82	Zu hoher WW-Bedarf	Fehlzirkulation Heizungswasser über Register WW-Speicher	fs	n	
83	Zu hoher WW-Bedarf	Zu hohe Wärmeverluste des WW-Speichers (siehe oben)	api	j	s. ID 71
84	Unnötige Anforderung WW-Ladung	falsche Regelstrategie	ew, rs	n	
85	Unnötige Anforderung WW-Ladung	falsch platzierte Fühler	api	j	s. ID 70
86	Unnötige Anforderung WW-Ladung	Einstellung Ein/Ausschalthysterese bzw. Ein/Ausschalttemperatur ungünstig	ew	j	s. ID 62.2
87	Zu lange Laufzeit WW-Ladung	falsche Regelstrategie	rs	n	
88	Zu lange Laufzeit WW-Ladung	zu kleines Register (Wärmeübertragerfläche) im WW-Speicher	api	n	
89	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch dimensionierte Wärmequelle (Erdwärmesonde, Grundwasserbrunnen, Lamellenluftkühler/Ventilator)	api	j	Set 43
90	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	verschmutzte Wärmequelle (Verdampfer, Plattenwärmeübertrager, Vorfilter usw.)	fs	n	
91	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	Luft im Wärmequellensystem (Erdsonden, W/W, Zwischenkreise)	fs	n	
92	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch dimensioniertes Expansionsventil	he	n	
93	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	schlecht regelndes Expansionsventil	he	n	
94	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegte Quellenpumpe	api	j	Set 39
95	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegter Ventilator	he	n	



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
96	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsch ausgelegter Verdampfer	he	n	
97	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	falsche quellenseitige Regelung durch falsche Parametrierung und/oder Programmierung (Pumpe, Ventilator)	ew	j	s. ID 94
98	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	zu wenig Kältemittel (Kältemittelverlust)	fs	n	
99	Zu tiefe Verdampfungstemperaturen	nicht rechtzeitige Abtauung	rs	n	
100	Zu hohe Kondensationstemperaturen	falsch dimensionierte Wärmesenke	api	j	s. ID 67
101	Zu hohe Kondensationstemperaturen	verschmutzte Wärmesenke (Filter, Register WW-Speicher usw.)	fs	n	
102	Zu hohe Kondensationstemperaturen	falsch ausgelegte Ladepumpe	api	j	s. ID 69
103	Zu hohe Kondensationstemperaturen	falsche senkenseitige Regelung durch falsche Parametrierung und/oder Programmierung	ew,he	n	
104	Zu hohe Kondensationstemperaturen	Ineffiziente WP-Technik (Ein-/Aus-Regelung)	rs	n	
105	Zu kurze Taktzeiten	falsche Parametrierung (WW-Ladung mit zu hoher Leistung)	ew	n	
106	Zu kurze Taktzeiten	falsche Regelstrategie	rs	n	
107	Zu kurze Taktzeiten	falsch dimensionierte Speicher	api	j	s. ID 61
108	Zu kurze Taktzeiten	unnötige Anforderung	ew	j	s. ID 62, 62.2, 70
109	Zu kurze Taktzeiten	falsch dimensionierte WP	api	j	Set 40
110	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsche Parametrierung	ew	n	
111	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsche Regelstrategie	rs	n	
112	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	verschmutzter Verdampfer / ungünstige Luftführung	fs	n	
113	Zu viele Abtauungen bei L/W-WP	falsch dimensionierter Verdampfer	he	n	
114	Effizienz Wärmepumpe schlecht	Kompressor fehlerhaft (z.B. interne Leckagen infolge Abnutzung)	fs	n	



ID	Symptom	Mögliche Ursache	Kategorie	Simulation [j/n]	Simulations-set
115	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsch ausgelegte Quellenpumpe (siehe auch zu tiefe Verdampfungstemperaturen)	api	j	s. ID 94
116	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsch ausgelegter Ventilator (siehe auch zu tiefe Verdampfungstemperaturen)	he	n	
117	Effizienz Wärmepumpe schlecht	falsche quellenseitige Regelung durch falsche Parametrierung und/oder Programmierung (Pumpe, Ventilator)	ew	j	s. ID 94
118	Kondensatbildung beim Kühlen	falsche Parametrierung Kühlkurve	ew, kü	n	
119	Kondensatbildung beim Kühlen	falsch platzierte Fühler	api, kü	n	
120	Kondensatbildung beim Kühlen	falsche Regelstrategie	kü, he	n	
121	Kondensatbildung beim Kühlen	fehlende / defekte Fühler (Temperatur & Feuchtigkeit)	api, fs, kü	n	
122	Häufiges Umschalten Heizen/Kühlen	falsche Parametrisierung Kühlgrenztemperatur	ew, kü	n	
123	Zu geringe Kühlleistung	kein geeignetes Abgabesystem	api, kü	n	
124	Zu geringe Kühlleistung	Abgabesystem nicht auf Kühlbetrieb umgeschaltet (Einzelraumregelungen in Modus Heizbetrieb)	ew, kü	n	
125	Zu geringe Kühlleistung	falsche Parametrierung	ew, kü	n	
126	Vermischung des Vor- und Rücklaufs	Speicher Anschluss falsch installiert	api	n	
127	Schlechte Effizienz und Komfort	Falsche Wahl der hydraulischen Systembauvariante	api	n	
128	Fehlverhalten der WP i.A.	Falsche Konfiguration der Regelung (z.B. Speichertyp falsch)	ew	n	
129	Schwankende Vor- und Rücklauftemperaturen	WP mit Leistungsregelung: Kompressordrehzahl schwingt	api, kü, he	n	
130	Unnötiges Heizen / Falsche Vorlauftemperaturen	Fehlender Raum-Temperatursensor	api	n	



## 13.2 Regelstrategien

### Regelstrategie und Einstellwerte für S/W-WP, Ein/Aus-geregelt, WPSM 1, 5 und 6

Komponente / Einstellung	Einstellung / Kriterium
Quellenpumpe	konstante Drehzahl, bei Nominalleistung 3.5 K Spreizung
Lade- / Kondensatorpumpe, WPSM 1	Konstanter Differenzdruck MFH30/60: 40 kPa, 6 K Spreizung bei Nominalleistung EFH100: 42.5 kPa, 5 K Spreizung bei Nominalleistung
Lade- / Kondensatorpumpe, WPSM 5 & 6	konstante Drehzahl / Massenstrom, FBH: bei Nominalleistung 6 K Spreizung Radiatoren: bei Nominalleistung 5 K Spreizung
Entlade- / Heizkreispumpe WPSM 5 & 6	konstanter Differenzdruck, MFH30 und MFH60: 25 kPa EFH100: 22.5 kPa
Einschaltbedingung WP	WPSM 1: $T_{VL} < T_{VL,Soll}$ ( $T_{VL,Soll}$ : Soll-Vorlauftemperatur) WPSM 5 & 6: $T_{SP} < T_{VL,Soll}$
Ausschaltbedingungen WP	$T_{RL} > T_{Soll,VL}$
Wiedereinschaltperre WP	20 min
Mittelungsdauer $T_{amb}$ für Heizkurve	12 h
Mittelungsdauer $T_{amb}$ für Heizgrenze	24 h
Sperrzeiten	möglich, im Standard-Fall nicht aktiviert



### Regelstrategie und Einstellwerte für die Trinkwassererwärmung bei S/W-WP, WPSM 6

Komponente / Einstellung	Einstellung / Kriterium
Solltemperatur Trinkwasser	55°C
Quellenpumpe	konstante Drehzahl, Einstellung wie bei Heizbetrieb
Lade- / Kondensatorpumpe	konstante Drehzahl, Spreizung Heizwasser 3K
Sensorplatzierung im Speicher	1 Temperaturfühler auf 65% Höhe (von unten her betrachtet)
Hysterese	20 K
Einschaltbedingung WP	$T_{\text{Speicher}} < (T_{\text{Trinkwasser,Soll}} - \text{Hysterese})$
Ausschaltbedingungen WP	$T_{\text{Speicher}} > T_{\text{Trinkwasser,Soll}}$
Drehzahl Kompressor	Ein/Aus-Regelung: 50 Hz Leistungsgeregelt: bis $T_{c,switch}$ 70 Hz, bis $T_{c,max}$ 50 Hz
Kondensationstemperatur bei welcher auf geringere Drehzahl umgeschaltet wird	$T_{c,switch} = 60^{\circ}\text{C}$
Maximale Kondensationstemperatur (danach wird auf Heizstab umgeschaltet)	$T_{c,max} = 65^{\circ}\text{C}$
Legionellen-Schaltung	Alle 7 Tage auf 60°C Trinkwassertemperatur



### 13.3 Zusammenfassung simulierte Fehler

Set	Fehler	WPSM	Gebäude	x min	x Basiswert Energie	x max	Parameterschritt	Param. Einheit	E_el Abw. Inkrement	E_EI Abw Ges. Bereich	N_zyk Abw. Inkrement	N_zyk Abw. Ges. Bereich
31	WW Bedarf Skalierung	6	MFH30	0.4	0.4	1.2	20	%	13.3%	54.5%	-1.5%	13.4%
2	Heizkurve	5	MFH30	27/23	33/27	45/39	2	K	4.5%	22.7%	9.2%	21.8%
43	Länge Sonde	6	MFH30	100	200	200	50	m	3.9%	12.1%	4.5%	6.4%
24	Heizkurve	5	MFH60	40/35	40/35	58/53	2	K	3.9%	37.7%	4.4%	16.2%
15	Heizkurve	5	EFH100	40/35	50/45	58/53	2	K	3.8%	16.2%	0.6%	0.9%
42	WP Dimensionierung	5	EFH100 E/A	8	8	16	2	kW	3.5%	15.7%	8.2%	11.1%
12	Massenstrom Quellenpumpe	5	MFH30	0.4	0.8	1.2	0.2	kg/s	3.1%	8.4%	0.6%	1.6%
27	WW Temperatur	6	MFH30	50	50	75	5	K	2.9%	39.0%	3.5%	4.1%
39	Massenstrom Quellenpumpe WW	6	MFH30	0.515	0.715	1.315	0.2	kg/s	2.8%	8.1%	1.7%	2.5%
33	Norm-Leistung Normleistung WW-Spirale	6	MFH30	5000	20000	20000	-50	%	2.6%	7.4%	4.1%	4.1%
41	Heizkurve MFH30 WW	6	MFH30	27/23	35/29	45/39	2	K	2.3%	10.3%	5.9%	14.8%
22	Länge Sonde	5	MFH30	75	250	250	50	m	2.3%	23.3%	3.6%	10.0%
40	WP Dimensionierung WW	6	MFH30	10	16	21	3	kW	1.7%	2.8%	4.3%	7.8%
36	Sensorhöhe WW	6	MFH30	5	5	17	35	%	1.6%	4.1%	0.1%	5.5%
8	WP-Dimensionierung Heizen	5	MFH30	8	12	16	2	kW	1.5%	2.4%	3.4%	5.8%
30	WW Speichervolumen	6	MFH30	0.56	0.56	1.41	0.268	m3	1.3%	2.8%	0.2%	5.0%



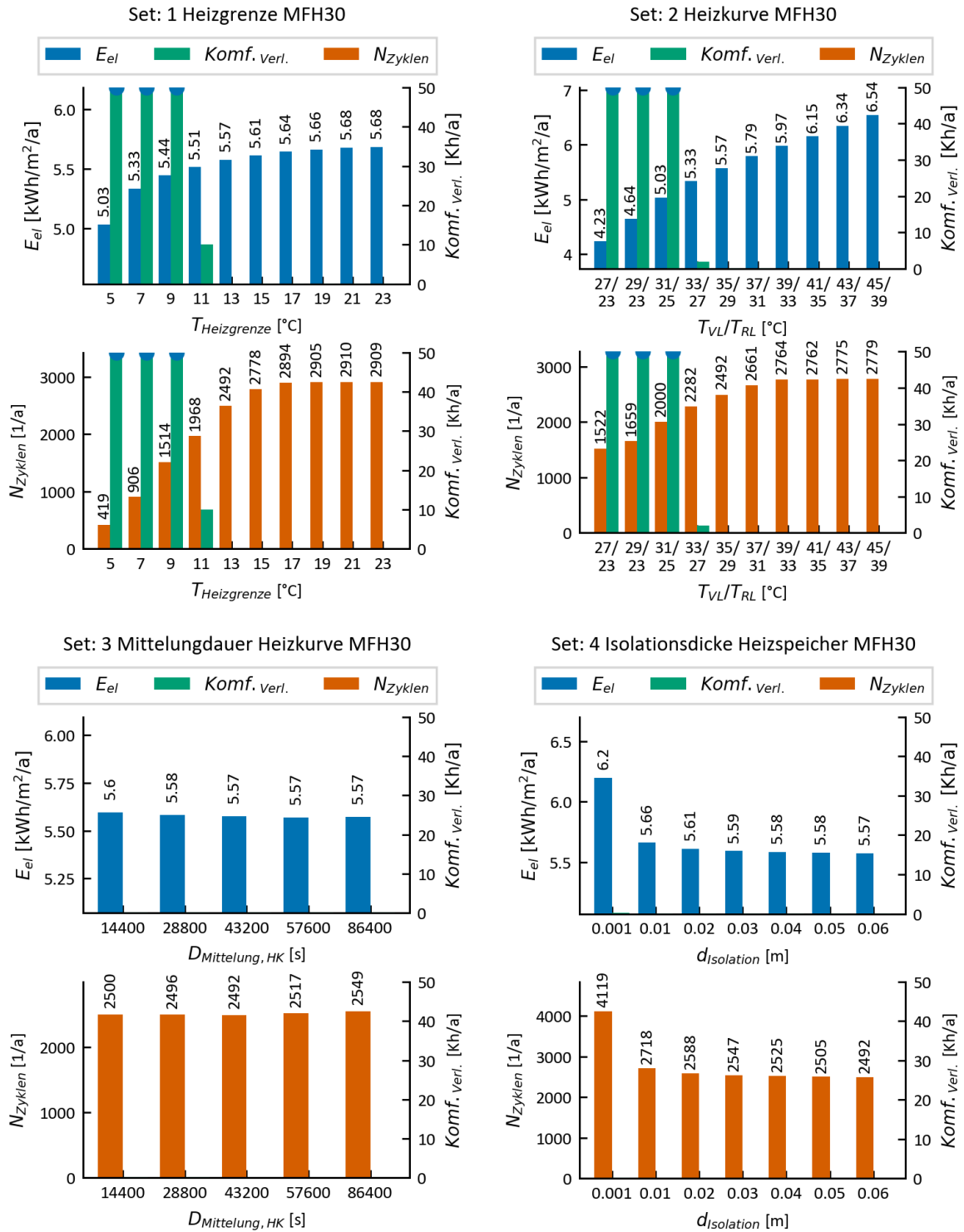
Set	Fehler	WPSM	Gebaeude	x min	x Basiswert Energie	x max	Parameterschritt	Param. Einheit	E_el Abw. Inkrement	E_EI Abw Ges. Bereich	N_zyk Abw. Inkrement	N_zyk Abw. Ges. Bereich
32	Umschalttemp eratur auf Heizstäbe	6	MFH30	45	65	65	5	K	1.3%	43.3%	2.4%	8.2%
13	delta p Entladepumpe	5	MFH30	20000	20000	35000	5	kPa	0.9%	3.1%	9.3%	17.4%
1	Heizgrenze	5	MFH30	5	13	23	2	K	0.7%	2.0%	11.5%	16.8%
35	Massenstrom WW	6	MFH30	0.52	1.02	1.52	0.25	kg/s	0.6%	1.0%	0.9%	1.1%
7	Massenstrom Ladepumpe	5	MFH30	0.42	0.42	0.82	0.1	kg/s	0.5%	1.8%	19.5%	51.2%
23	Heizgrenze	5	MFH60	5	15	23	2	K	0.5%	0.9%	15.0%	29.2%
26	Heizgrenze	5	EFH100 E/A	5	17	23	2	K	0.5%	0.9%	1.9%	2.9%
17	Heizspeicher Volumen	5	EFH100	0.1	0.1	1	0.1	m3	0.4%	2.2%	12.1%	751.9 %
14	Heizgrenze	5	EFH100	5	17	23	2	K	0.4%	0.9%	8.5%	14.4%
5	Heizspeicher Volumen	5	MFH30	0.1	0.1	1	0.1	m3	0.4%	0.9%	9.6%	705.6 %
37	Isolationsdicke WW	6	MFH30	0.04	0.16	0.16	0.03	m	0.2%	2.1%	0.8%	0.8%
4	Isolationsdicke Heizspeicher	5	MFH30	0.001	0.06	0.06	0.01	m	0.2%	11.3%	0.5%	65.3%
20	Platizierung Sensor Heizspeicher (von Oben)	5	MFH30	1	1	15	5	1/20	0.2%	0.4%	24.5%	155.5 %
18	Isolationsdicke Heizspeicher	5	EFH100	0.001	0.06	0.06	0.01	m	0.1%	14.5%	0.5%	36.6%
28	WW Hysterese	6	MFH30	1	30	30	5	K	0.1%	3.9%	0.8%	7.0%
29	Legionellensch altung nach N tagen	6	MFH30	1	7	7	1	d	0.1%	3.1%	0.2%	4.2%
25	Mittelungsdaue r Heizgrenze	5	MFH60	14400	57600	72000	14400	s	0.1%	0.1%	1.6%	6.2%



Set	Fehler	WPSM	Gebaeude	x min	x Basiswert Energie	x max	Parameterschritt	Param. Einheit	E_el Abw. Inkrement	E_EI Abw Ges. Bereich	N_zyk Abw. Inkrement	N_zyk Abw. Ges. Bereich
16	Mittelungsdauer Heizgrenze	5	EFH100	14400	57600	86400	14400	s	0.0%	0.1%	1.9%	7.7%
3	Mittelungsdauer Heizkurve	5	MFH30	14400	43200	86400	14400	s	0.0%	0.5%	1.0%	2.3%
11	Mittelungsdauer Heizgrenze	5	MFH30	14400	7200	86400	14400	s	0.0%	0.4%	1.8%	4.0%
19	Sperrzeiten (Heizkurve Var)	5	EFH100	50/45	50/45	54/49	6	h	0.0%	0.0%	1.1%	1.1%

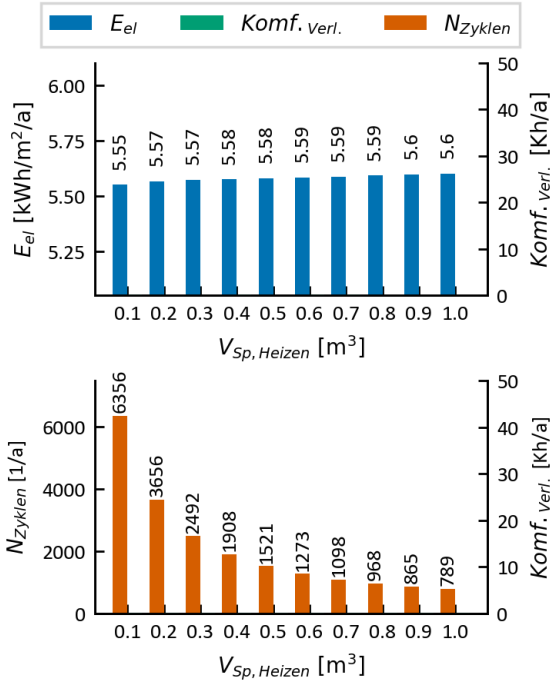


## 13.4 Übersicht simulierte Fehler

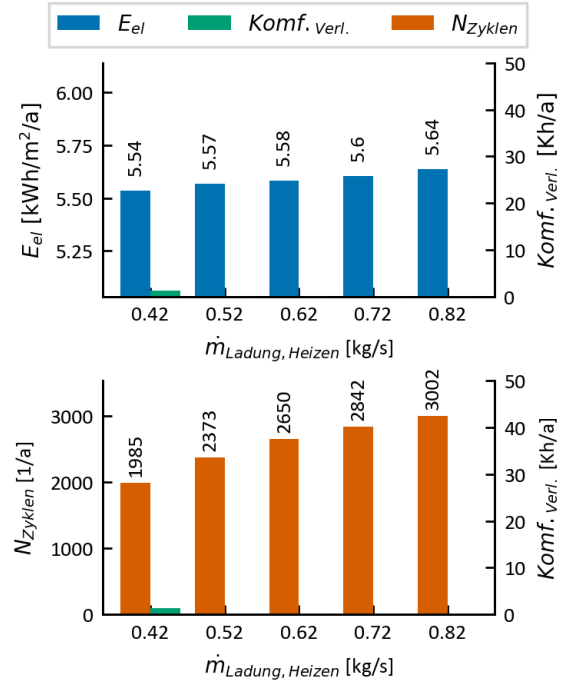




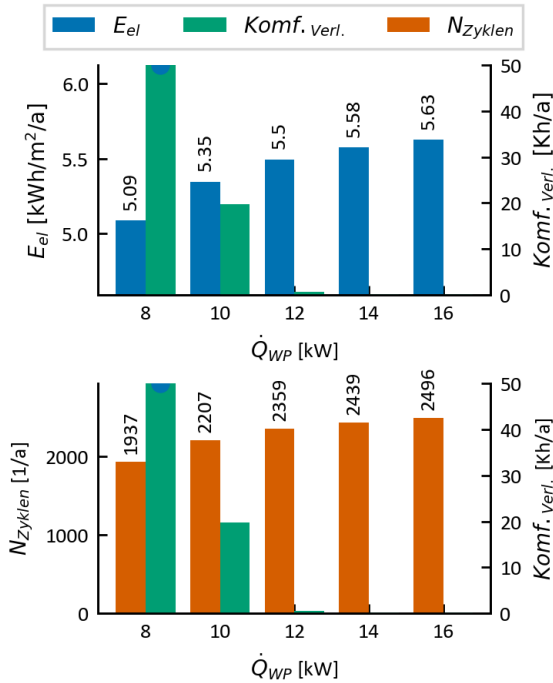
Set: 5 Heizspeicher Volumen MFH30



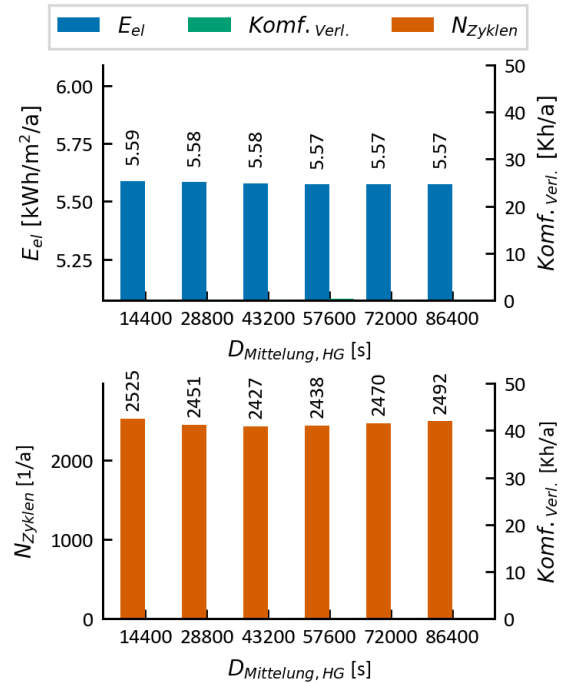
Set: 7 Massenstrom Ladepumpe MFH30



Set: 8 WP-Dimensionierung Heizen MFH30

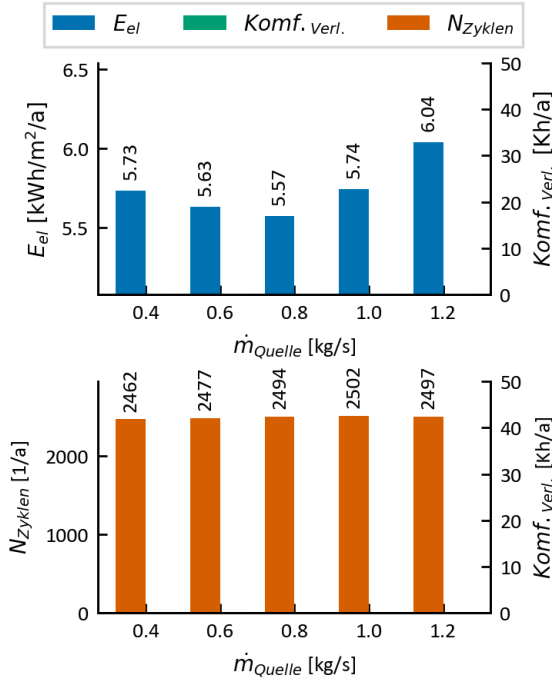


Set: 11 Mittlungsdauer Heizgrenze MFH30

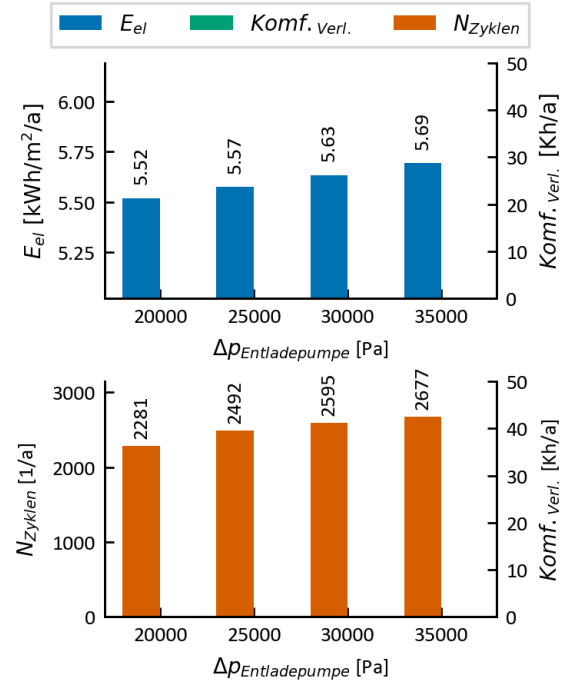




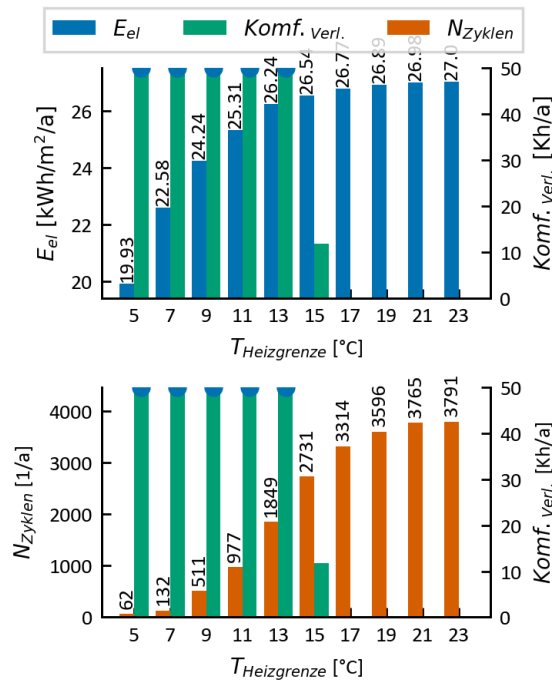
Set: 12 Massenstrom Quellenpumpe MFH30



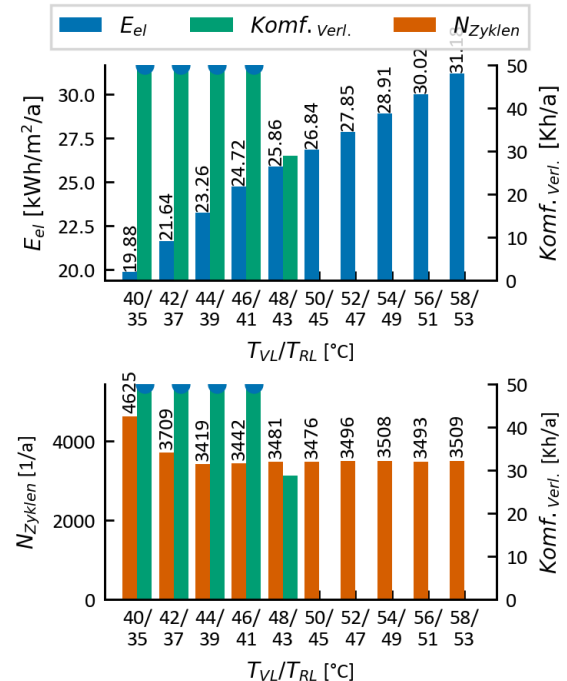
Set: 13 delta p Entladepumpe MFH30



Set: 14 Heizgrenze EFH100

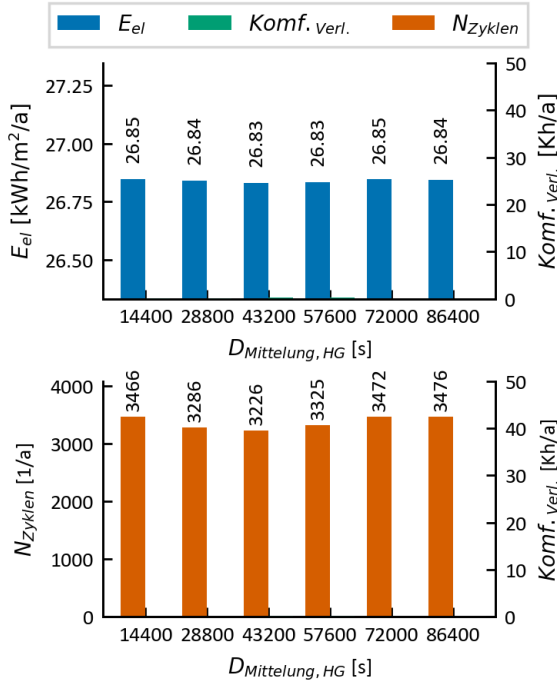


Set: 15 Heizkurve EFH100

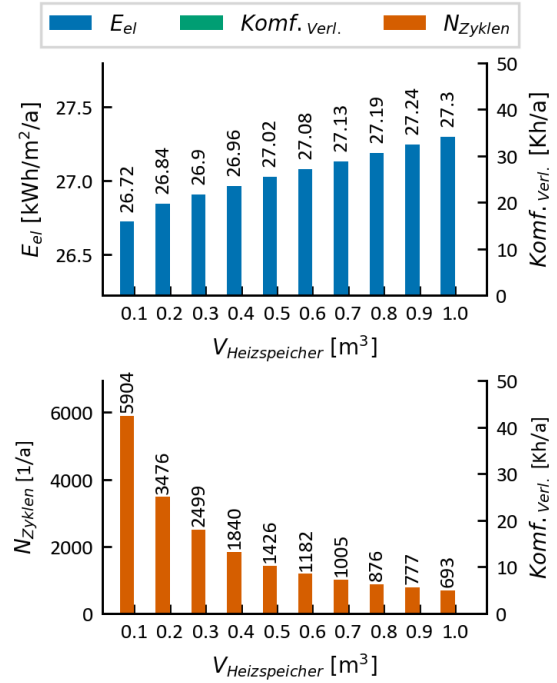




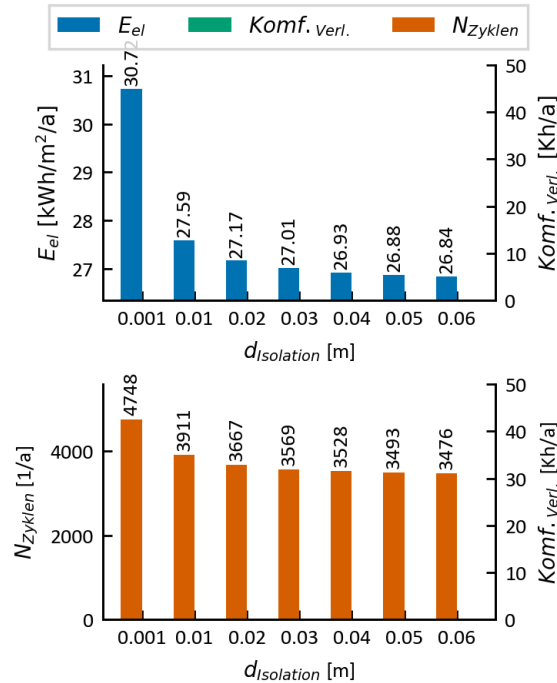
Set: 16 Mittelungsdauer Heizgrenze EFH100



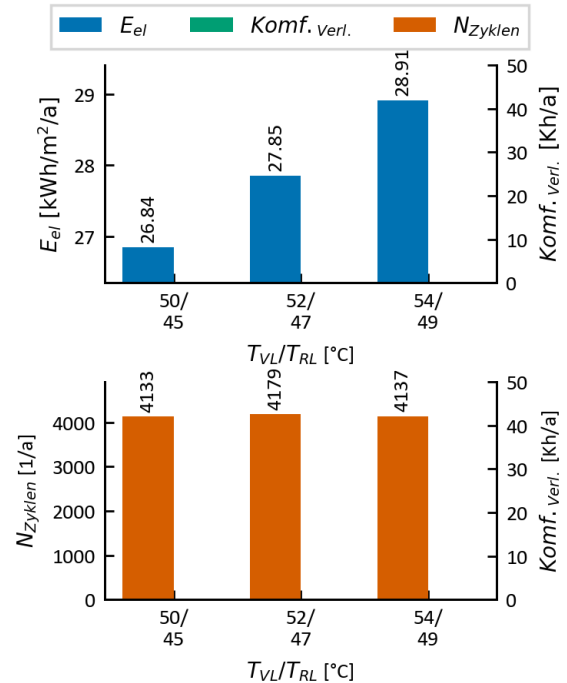
Set: 17 Heizspeicher Volumen EFH100



Set: 18 Isolationsdicke Heizspeicher EFH100

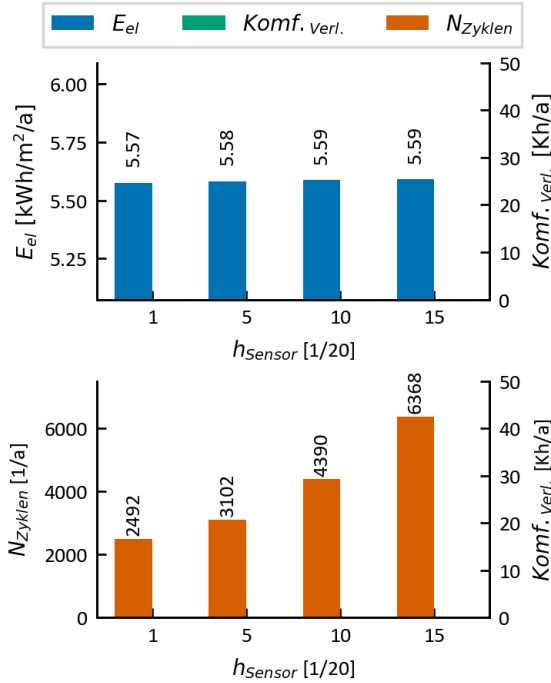


Set: 19 Sperrzeiten (Heizkurve Var) EFH100

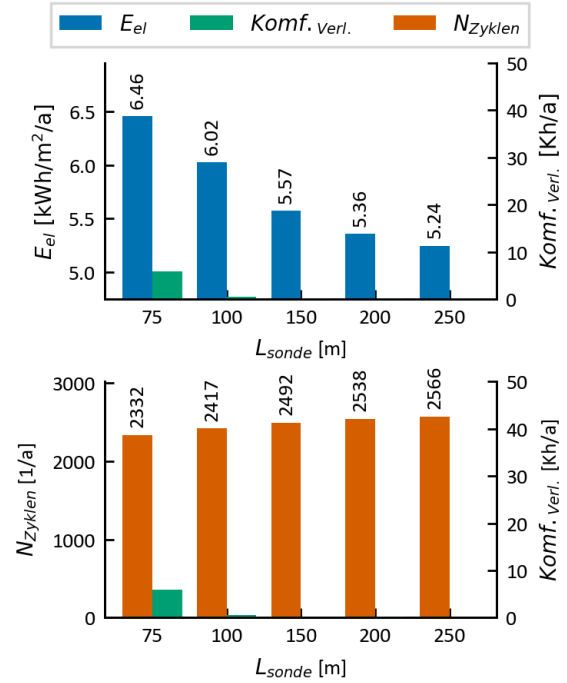




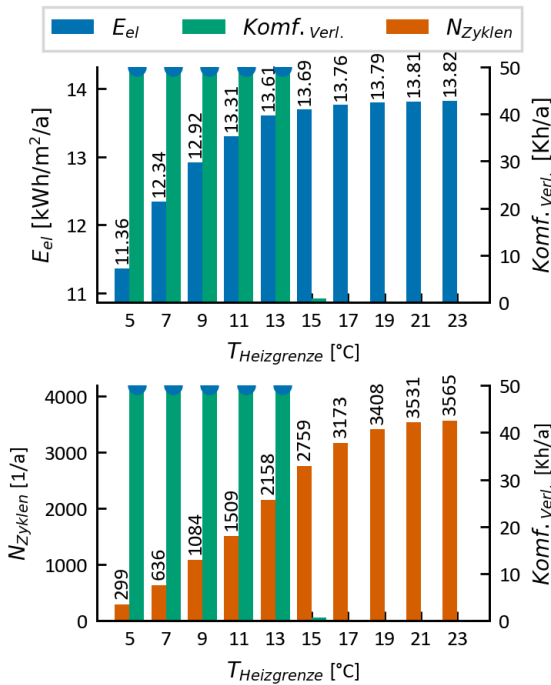
20 Platzierung Sensor Heizspeicher (von Oben in 1/20) MI



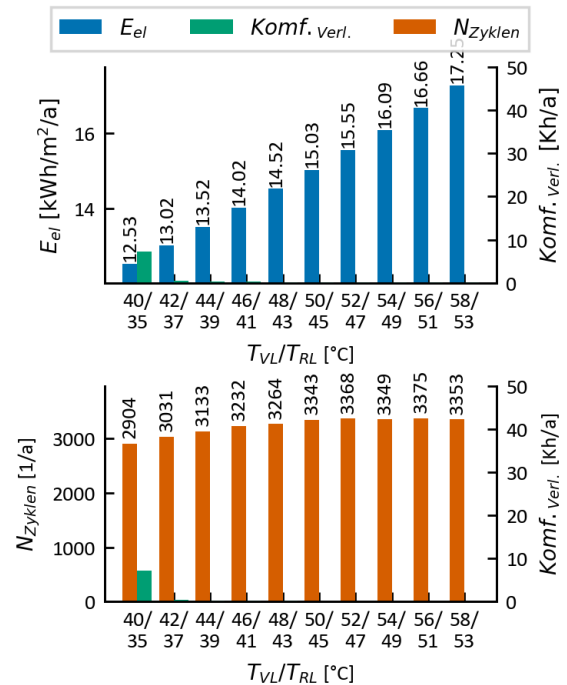
Set: 22 Länge Sonde MFH30



Set: 23 Heizgrenze MFH60

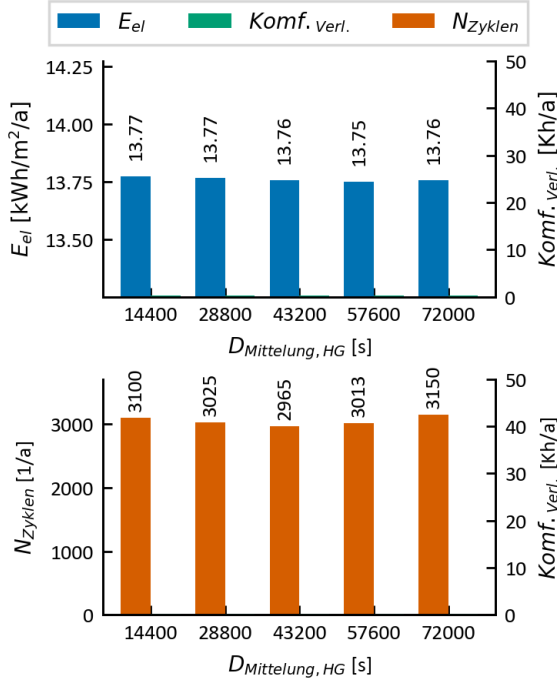


Set: 24 Heizkurve MFH60

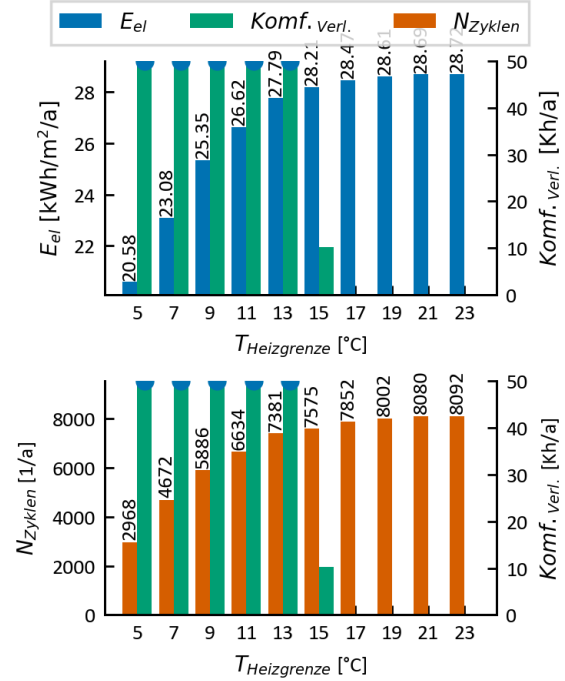




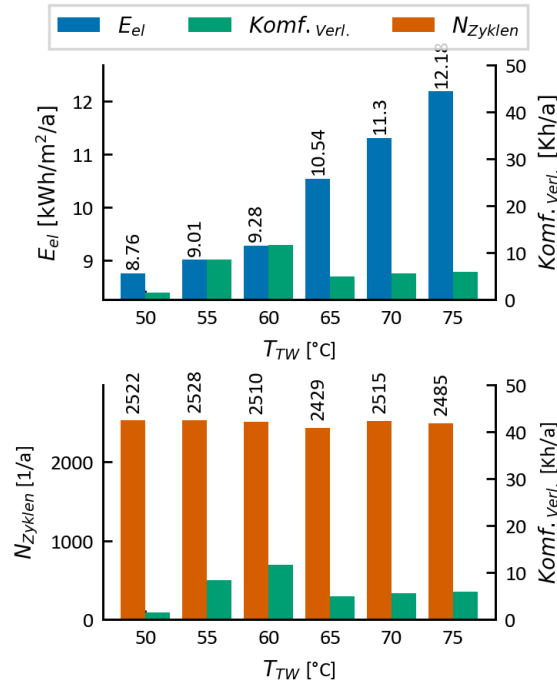
Set: 25 Mittelungsdauer Heizgrenze MFH60



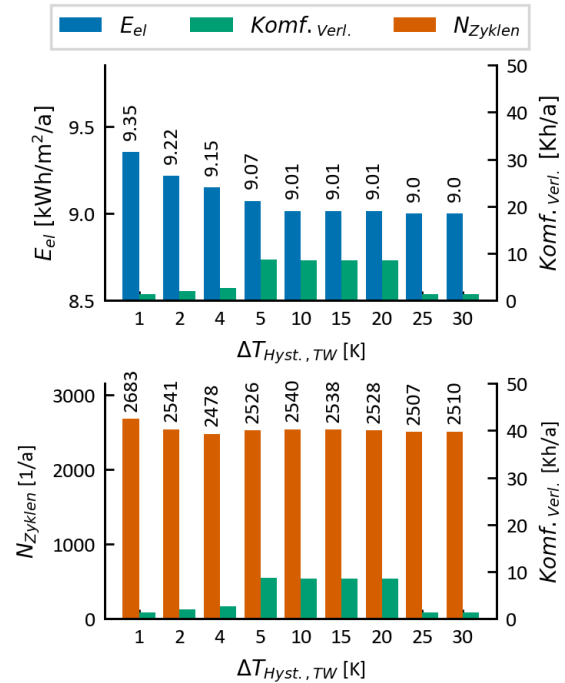
Set: 26 Heizgrenze EFH100 E/A



Set: 27 TW Temperatur MFH30

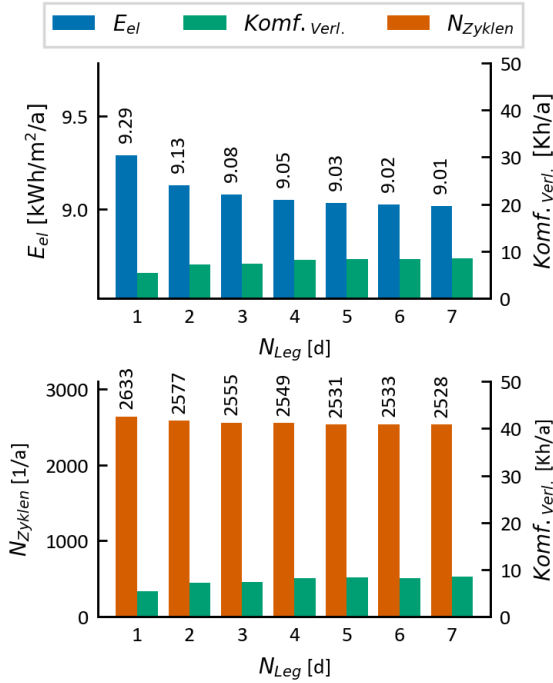


Set: 28 TW Hysterese MFH30

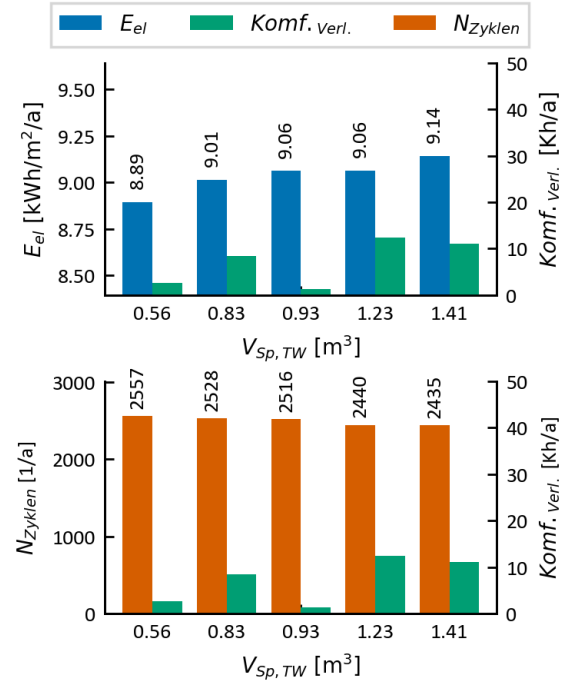




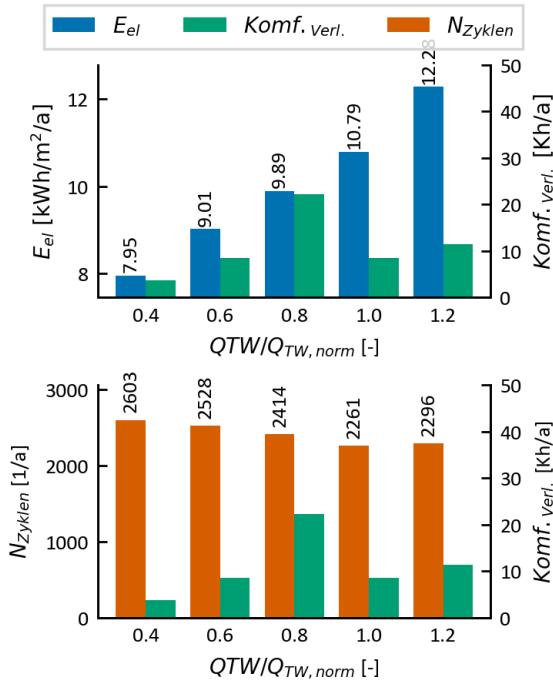
Set: 29 Legionellenschaltung nach N Tagen MFH30



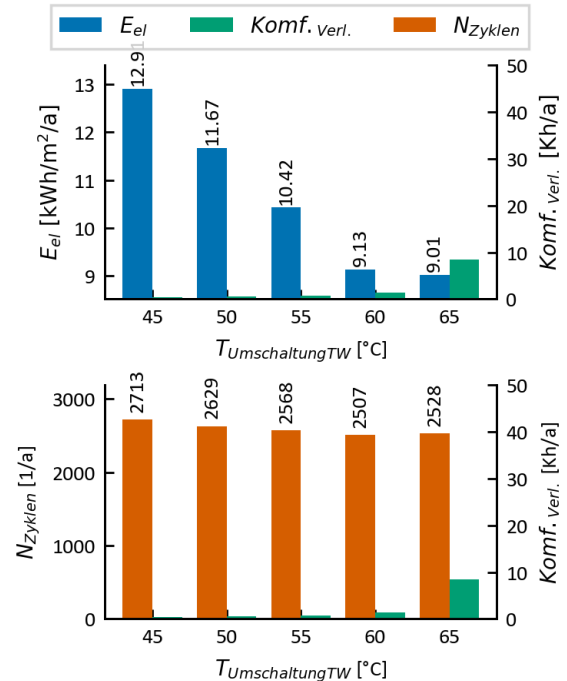
Set: 30 TW Speichervolumen MFH30



Set: 31 TW Bedarf Skalierung MFH30

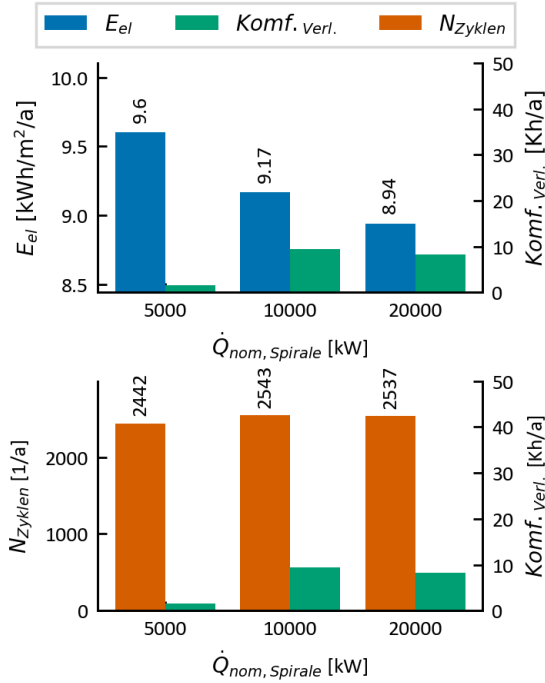


Set: 32 Umschalttemperatur auf Heizstäbe MFH30

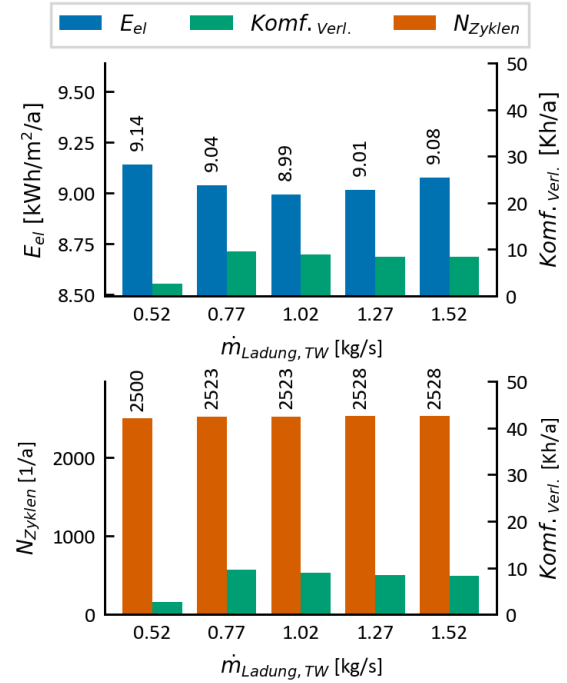




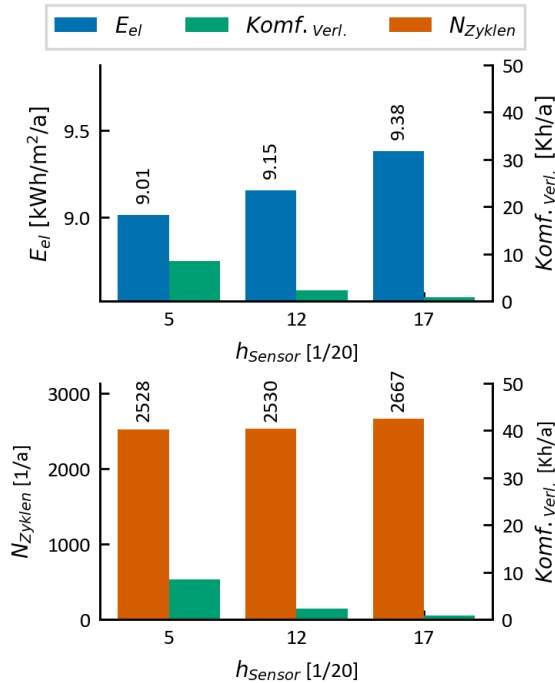
Set: 33 NormLeistung TW-Spirale MFH30



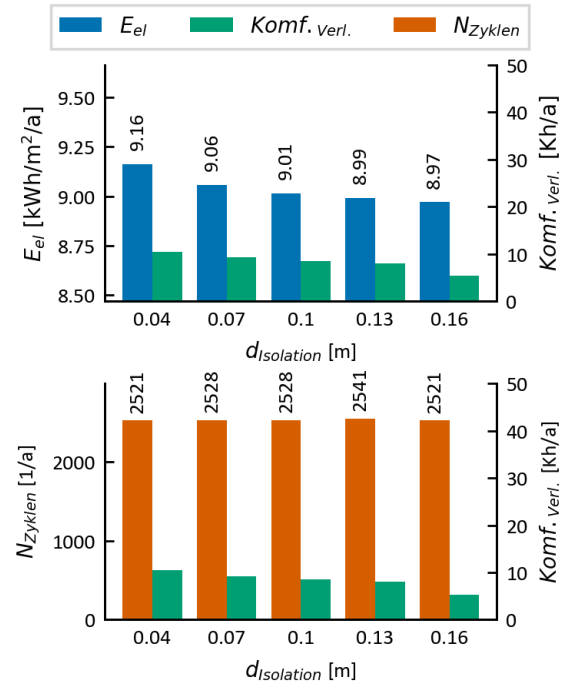
Set: 35 Massenstrom TW Ladung MFH30



Set: 36 Sensorhöhe TW (von Oben in 1/20) MFH30

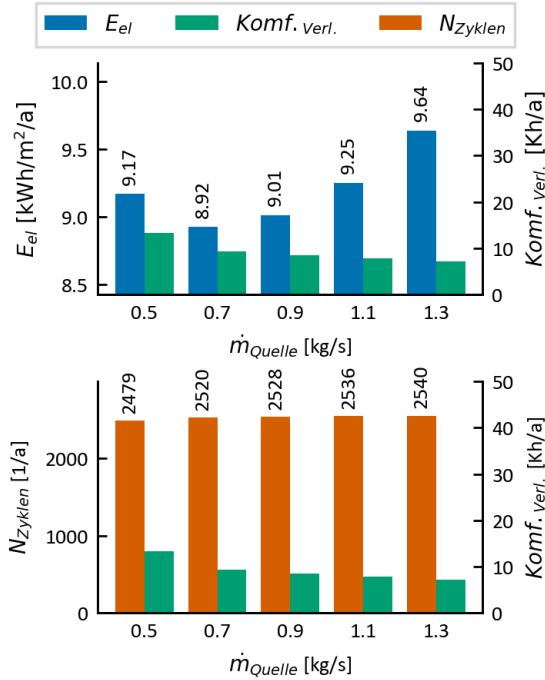


Set: 37 Isolationsdicke TW MFH30

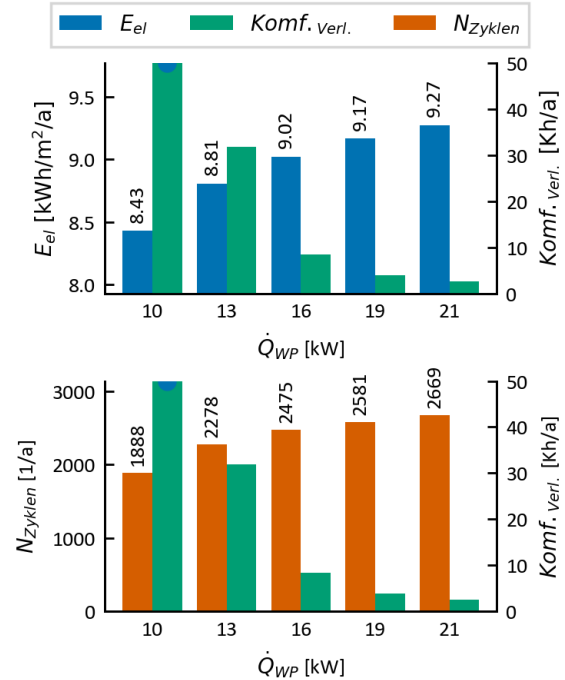




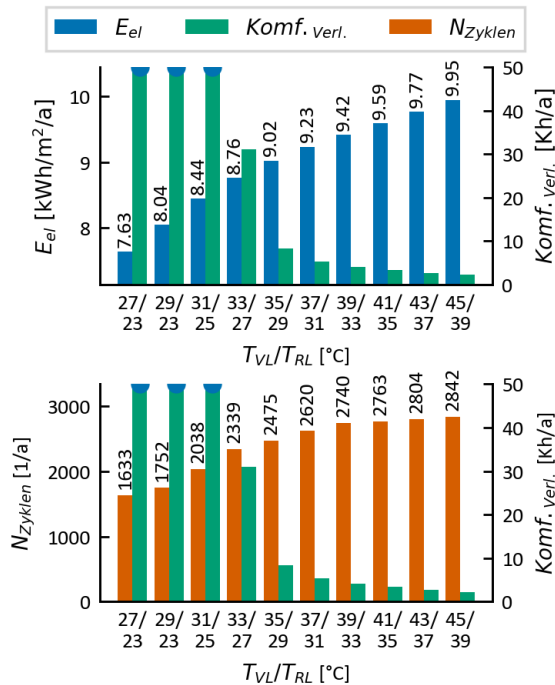
Set: 39 Massenstrom Quellenpumpe TW MFH30



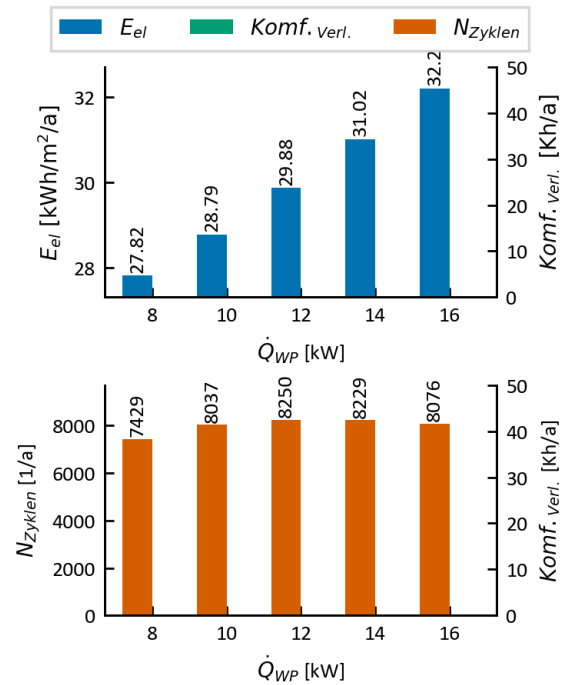
Set: 40 WP Dimensionierung TW MFH30



Set: 41 Heizkurve MFH30

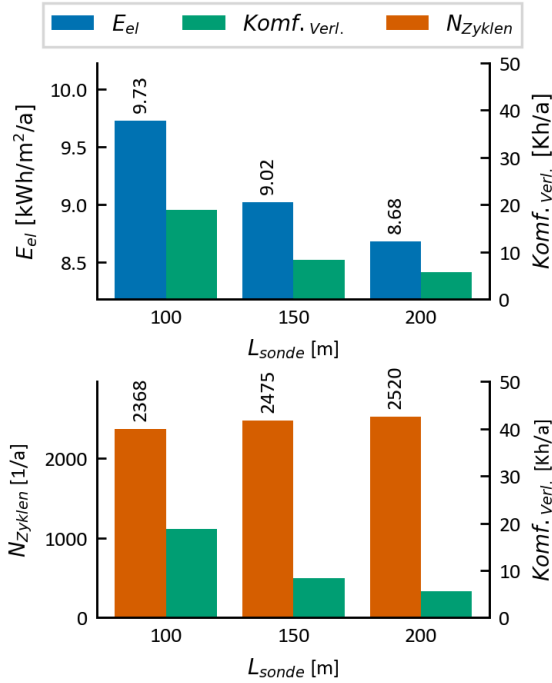


Set: 42 WP Dimensionierung EFH100 E/A

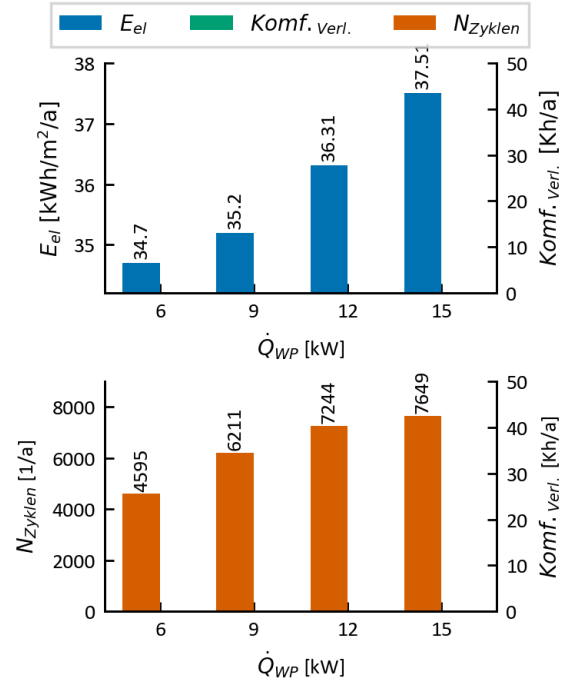




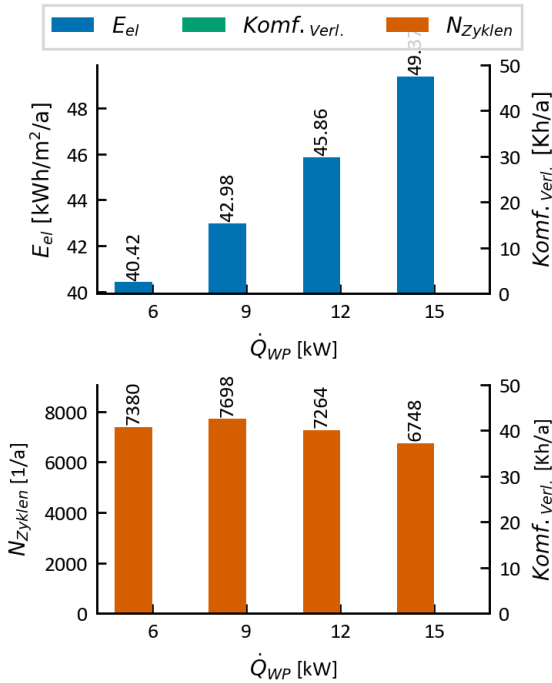
Set: 43 Länge Sonde MFH30



Set: 44 WP Dimensionierung EFH100



Set: 45 WP Dimensionierung EFH100 E/A



Set: 46 Massenstrom Quellenpumpe MFH30 E/A

