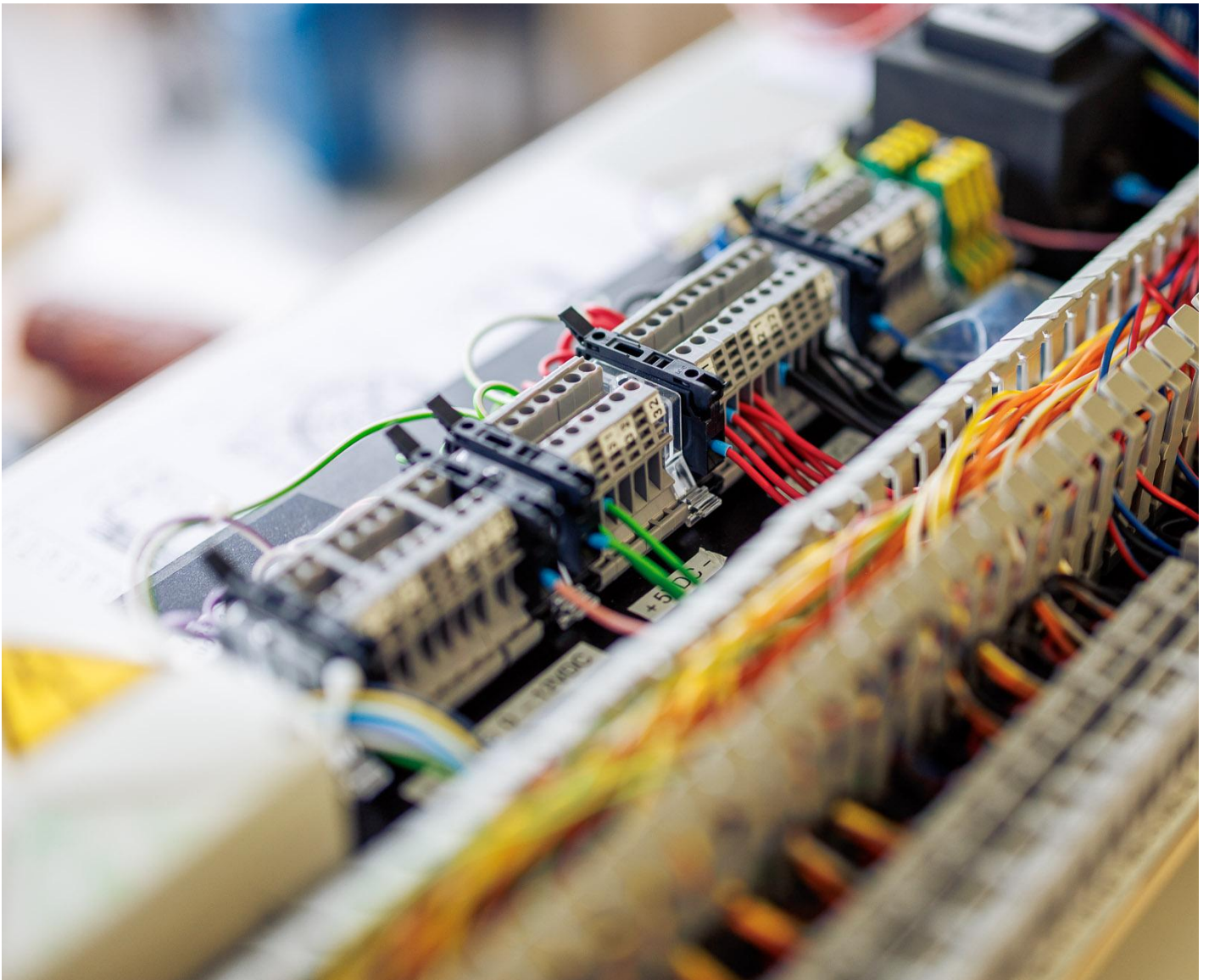


Schlussbericht, 11.08.2026

Monitoring von Wärmepumpen: Vergleich zwischen eingebauten Komponenten und Feldmessdaten



Autoren

Silvan N. Bernal,	Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule
Ugne Potthoff,	D-MTEC, ETH - Eidgenössische Technische Hochschule
Leon P. M. Brendel	Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Abstract DE

Wärmepumpen erfassen bereits heute standardmässig interne Betriebs- und Messdaten. Diese Studie untersucht, ob diese internen Daten (WP) bezüglich Umfang, Zugang und Verlässlichkeit mit kalibrierten Feldmessungen (FM) vergleichbar sind. Dazu wurden von vier Anlagen unterschiedlicher Hersteller aus dem BFE-Feldmessprogramm im Zeitraum von Januar bis April 2026 die internen Daten erfasst und die Messwerte zeitrichtig verglichen.

Die Übereinstimmung ist stark anlagenabhängig. Die Summenabweichung der thermischen Energie liegt zwischen -34.7% und $+0.1\%$, jene der elektrischen Verdichterenergie zwischen -10.5% und -4.6% . Die Temperaturmessungen weichen mehrheitlich weniger als $\pm 1\text{ K}$ ab (Mean Bias Error). Der Datenzugang ist hersteller- und anlagenspezifisch organisiert. Der Aufwand für Export, Dekodierung und Zusammenführung der Daten ist wesentlich und derzeit kaum skalierbar.

Abstract FR

Les pompes à chaleur enregistrent d'ores et déjà, de manière standard, des données internes de fonctionnement et de mesure. Cette étude examine si ces données internes (WP) sont comparables, en termes d'étendue, d'accès et de fiabilité, à des mesures sur site étalonnées (FM). À cette fin, quatre installations de différents fabricants issues du programme de mesures sur site de l'OFEN ont été enregistrées en parallèle entre janvier et avril 2026, et les valeurs mesurées ont été comparées en temps réel.

La concordance dépend fortement de l'installation. L'écart cumulé de l'énergie thermique se situe entre $-34,7\%$ et $+0,1\%$, celui de l'énergie électrique du compresseur entre $-10,5\%$ et $-4,6\%$. Les mesures de température s'écartent pour la plupart de moins de $\pm 1\text{ K}$ (Mean Bias Error). L'accès aux données est organisé en fonction du fabricant et de l'installation. L'effort nécessaire à l'exportation, au décodage et à la consolidation des données est considérable et, à l'heure actuelle, difficilement évolutif.

Abstract IT

Le pompe di calore registrano già oggi di serie i dati interni di funzionamento e di misurazione. Il presente studio esamina se tali dati interni (WP) siano comparabili, in termini di portata, accessibilità e affidabilità, con le misurazioni sul campo calibrate (FM). A tal fine, nel periodo compreso tra gennaio e aprile 2026 sono stati monitorati in parallelo quattro impianti di diversi produttori, provenienti dal programma di misurazioni sul campo dell'UFE, e i valori misurati sono stati confrontati in tempo reale.

La corrispondenza dipende fortemente dall'impianto. Lo scostamento cumulativo dell'energia termica è compreso tra $-34,7\%$ e $+0,1\%$, quello dell'energia elettrica del compressore tra $-10,5\%$ e $-4,6\%$. Le misurazioni della temperatura presentano per lo più scostamenti inferiori a $\pm 1\text{ K}$ (Mean Bias Error). L'accesso ai dati è organizzato in modo specifico per produttore e impianto. L'onere legato all'esportazione, alla decodifica e all'integrazione dei dati è notevole e attualmente difficilmente scalabile.

Abstract EN

Heat pumps already collect internal operating and measurement data by default. This study examines whether internal data (HP) are comparable to calibrated field measurements (FM) in terms of scope, accessibility, and reliability. Internal data from four systems from different manufacturers was compared with SFOE field measurement data for the time period from January through April 2026.

The degree of agreement varies significantly depending on the system. The total deviation for thermal energy ranges from -34.7% to $+0.1\%$, while that for electrical compressor energy ranges from -10.5% to -4.6% . Most temperature measurements deviate by less than $\pm 1\text{ K}$ (Mean Bias Error). Data access is organized on a manufacturer- and system-specific basis. The effort required to export, decode, and consolidate the data is significant and currently hardly scalable.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Zielsetzung	9
1.1 Untersuchungsfragen	9
1.2 Strategische Einordnung	10
2. Übersicht.....	10
2.1 Definitionen.....	10
2.2 Anlagenübersicht	11
2.3 Verfügbare Parameter.....	11
2.4 Datenzugang und Rohdatenformate.....	11
2.5 Messzeitraum	12
2.6 Hydraulik.....	13
3. Methodik	14
3.1 Messunsicherheit	14
3.2 Messstellen.....	14
3.3 Konvention für die Parameterbezeichnung	14
3.4 Bilanzgrenzen / Systemgrenzen	15
3.5 Statistische Kennzahlen	16
4. Ergebnisse Messdatenvergleich.....	17
4.1 Übersicht anhand Energie- und Effizienzvergleich	17
4.2 Detailvergleich nach Messgrösse	19
4.3 Fehlerquellen und Besonderheiten	23
4.4 Übergreifende Erkenntnisse zum Datenzugang.....	28
5. Anwendung der Methoden von Brudermüller et al. (2025) auf die untersuchten Anlagen	30
5.1 Datengrundlage und methodische Übertragung.....	30
5.2 Beobachtete tägliche COP-Werte.....	31
5.3 Modellbasierter saisonaler COP	32
5.4 Temperaturabhängige Auslastung und Dimensionierung	33
5.5 Ergebnisse auf Basis interner Wärmepumpendaten	34
5.6 Einordnung gegenüber Brudermüller et al. (2025)	34
6. Zusammenfassung.....	35
6.1 Wie gross sind die Abweichungen bei zentralen Kenngrössen?	35
6.2 Sind die Abweichungen systematisch oder zufällig?	35

6.3	<i>Welche Rolle spielen zeitliche Auflösung, Bilanzgrenzen und Betriebszustände?</i>	35
6.4	<i>Welche Daten sind über die internen Systeme zugänglich?</i>	35
6.5	<i>Welche Anwendungen sind mit internen Daten belastbar möglich?</i>	36
6.6	<i>Fazit</i>	36
7.	Schlussfolgerung	36
8.	Literaturverzeichnis	37
9.	Anhang	39
9.1	<i>Parameterlisten</i>	40
9.2	<i>Bezeichnungskonvention</i>	45
9.3	<i>Datenzugang und Datenhandling</i>	49
9.4	<i>Ergänzende Abbildungen und Kennzahlen</i>	52
9.5	<i>Umfrage bei den involvierten Fabrikaten</i>	69
9.6	<i>Verdichter-Polynome (Erklärung)</i>	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Messzeitraum und Datenverfügbarkeit	13
Abbildung 2: Hydraulikschema 4 gem. WPSM [WP-Systemmodul, 2020]	13
Abbildung 3: Hydraulikschema 6 gem. WPSM [WP-Systemmodul, 2020]	13
Abbildung 4: Messstellen der Feldmessungen (generalisierte Darstellung)	14
Abbildung 5: Etablierte Bilanzgrenzen/Systemgrenzen JAZ, WNG, SNG und SNG+ in Wärmepumpenanlagen. Siehe auch Genkinger et al. (2026) Seite 9. (Verwendung der Grafik dank freundlicher Genehmigung von A. Genkinger).....	15
Abbildung 6: Summenvergleich der Energien (thermisch & elektrisch) über den Zeitraum von Januar bis April 2026 für alle Anlagen, wobei «(M)» für Monatswerte steht. Alle anderen Anlagen basieren auf der Summe von 1-Minutenwerten.	17
Abbildung 7: Summenvergleich elektrische Energie inkl. Hilfsenergien für alle Anlagen im Zeitraum von Januar bis April 2026	18
Abbildung 8: Vergleich der Effizienz im Zeitraum von Januar bis April 2026. Dunkelorangene Balken beinhalten im Gegensatz zu hellorangenen Balken noch Sekundärverbraucher (Steuerung, Heizstab, Ventilator/Pumpe).	19
Abbildung 9: Zeitreihenvergleich der elektrischen Leistungsaufnahme über einen Tag bei Anlage F024	20
Abbildung 10: Vergleich der Tagesenergien mittels 1:1 Darstellung	20
Abbildung 11: Vergleich der 15min Energie Werte (Anlage F016).....	21
Abbildung 12: Vergleich der 15min Energie Werte (Anlage F017).....	21
Abbildung 13: Messwertvergleich der Temperaturmessungen mittels 1:1 Diagramm (WP vs. FM)	22
Abbildung 14: Vergleich elektrische Energie vor Zeitkorrektur (15min Werte, F024).....	23
Abbildung 15: Vergleich elektrische Energie nach Zeitkorrektur (15min Werte, F024)	23
Abbildung 16: Vergleich der Senkentemperaturen vor Betriebszustandskorrektur (F017).....	24
Abbildung 17: Vergleich der Senkentemperaturen nach Betriebszustandskorrektur (F017)	24
Abbildung 18: Abweichung der thermischen Leistung vs. Messwert der Temperaturdifferenz bei F017	26
Abbildung 19: Abweichung der Senkeneintrittstemperatur vs. Messwert der Senkeneintrittstemperatur bei F017	26
Abbildung 20: Abweichung des Senkendurchfluss vs. Messwert des Senkendurchfluss bei F017	26
Abbildung 21: Abweichung der Quelleneintrittstemperatur vs. Messwert der Quelleneintrittstemperatur bei F017	27
Abbildung 22: Abweichung der Aussentemperatur vs. Messwert der Aussentemperatur bei F017	27
Abbildung 23: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Temperaturdifferenz bei F017 ...	27
Abbildung 24: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Senkenaustrittstemperatur bei F017	27
Abbildung 25: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Senkeneintrittstemperatur bei F017	27
Abbildung 26: Flussdiagramm für Datenzugang (alle Anlagen) (grösser dargestellt im Anhang 9.3).....	28
Abbildung 27: Verteilung und Aussentemperaturabhängigkeit der beobachteten täglichen COP-Werte der Feldmessungen im Vergleich zur Referenzverteilung von Brudemüller et al. (2025).	31
Abbildung 28: Verteilung und Aussentemperaturabhängigkeit der beobachteten täglichen COP-Werte der Feldmessungen im Vergleich zur Referenzverteilung von Brudemüller et al. (2025).	32
Abbildung 29: Einordnung der Wärmepumpendimensionierung anhand der temperaturabhängigen Auslastung.....	33
Abbildung 30: Flussdiagramm zur Übersicht für Datenzugang (alle Anlagen).....	49
Abbildung 31: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F016. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.	52
Abbildung 32: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F017. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.	53
Abbildung 33: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F024. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.	54

Abbildung 34: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F027. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.....	55
Abbildung 35: 1:1 Diagramme für Anlage F016. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.....	56
Abbildung 36: 1:1 Diagramme für Anlage F017. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.....	57
Abbildung 37: 1:1 Diagramme für Anlage F024. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.....	58
Abbildung 38: 1:1 Diagramme für Anlage F027. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.....	59
Abbildung 39: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F016.....	60
Abbildung 40: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F016.....	61
Abbildung 41: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F017.....	62
Abbildung 42: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F017.....	63
Abbildung 43: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F024.....	64
Abbildung 44: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F024.....	65
Abbildung 45: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F027.....	66
Abbildung 46: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F027.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anlagenübersicht.....	11
Tabelle 2: Verfügbarkeit der festgelegten Vergleichsparameter.....	11
Tabelle 3: Übersicht Datenzugang.....	12
Tabelle 4: Übersicht Datenformate.....	12
Tabelle 5: Eigenschaften der Messdatenerfassung.....	12
Tabelle 6: Übersicht Hydraulik.....	13
Tabelle 7: Konvention für die Parameterbezeichnung (hier anhand Feldmessung).....	15
Tabelle 8: Übersicht der Methoden für die Bildung qualitativer Kennzahlen.....	16
Tabelle 9: Summenabweichung bei Energien (gleiche Werte wie in Abbildung 6).....	18
Tabelle 10: Mittelwertabweichungen der Temperaturen (MBE) auf Basis der 1-Min Werte.....	22
Tabelle 11: Übersicht der vorhandenen Betriebszustandserkennungen je Anlage und bei Feldmessungen.....	24
Tabelle 12: Übersicht über die Abweichungen je Anlage, aufgeschlüsselt nach Betriebszustand mit Balkendiagrammen zur Darstellung der Grösse der Abweichung, eingefärbt nach Kategorie (grün: Zeit, gelb: elektrische Energie, rot: thermische Energie, lila: Durchfluss, blau: Temperaturen & Temperaturdifferenz).....	25
Tabelle 13: Erforderliche Eingangsdaten für die Übertragung der Methoden von Brudermüller et al. (2025).....	30
Tabelle 14: Modellierter Wärmepumpenauslastung in Abhängigkeit von der Aussentemperatur sowie daraus abgeleitete orientierende Bewertung der Anlagendimensionierung auf Basis der Feldmessdaten.....	33
Tabelle 15: Vergleich der aus den Feldmessdaten (WPFeld) und den internen Wärmepumpendaten (WP) berechneten Effizienz- und Auslastungskennwerte für die Anlagen F016 und F024.....	34
Tabelle 16: Vollständige Parameterliste für F016.....	40
Tabelle 17: Vollständige Parameterliste für F017 (1-Min-Werte).....	41
Tabelle 18: Vollständige Parameterliste für F017 (Monatswerte).....	42

Tabelle 19: Vollständige Parameterliste für F024.....	43
Tabelle 20: Vollständige Parameterliste für F027.....	44
Tabelle 21: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F016.....	45
Tabelle 22: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F017.....	46
Tabelle 23: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F024.....	47
Tabelle 24: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F027.....	48
Tabelle 25: Übersichtstabelle zu Kennzahlen (MBE, MAE, MRBE, MRAE, Σ -Abweichung (basierend auf 1-Min-Werten)).....	68

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABT	Abtauung (Bezeichnung des Betriebszustands bei Anlage F017)
API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
BFE	Bundesamt für Energie
BWW	Brauchwarmwasser
BZ	Betriebszustand
CH	Schweiz
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
CSV	Comma Separated Values (Dateiformat)
dta	Dateiformat der Herstellersoftware (*.dta)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EU	Europäische Union
FAWA	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (Feldmessprojekt 1996–2003)
FM	Feldmessung bzw. Feldmessdaten (externe, kalibrierte Messinfrastruktur)
fix	Verdichter mit fixer Drehzahl (nicht drehzahl geregelt)
Fxxx	Anlagenbezeichnung im BFE-Feldmessprogramm (z. B. F016)
HK	Heizkreis
HP	Heat Pump (nur im englischen Abstract, entspricht WP)
HZ	Heizen (Betriebszustand)
IBN	Inbetriebnahme
IES	Institut für Energiesysteme, OST
inv	invertergeregelt (drehzahlvariabler Verdichter)
JAZ	Jahresarbeitszahl
LLM	Large Language Model
LoRa-WAN	Long Range Wide Area Network (Funkübertragung)
LW	Luft/Wasser-Wärmepumpe
(M)	Monatswerte
MAE	Mean Absolute Error (mittlerer absoluter Fehler)
MBE	Mean Bias Error (mittlerer vorzeichenbehafteter Fehler)
Modbus	Feldbus-Kommunikationsprotokoll
MRAE	Mean Relative Absolute Error (mittlerer relativer absoluter Fehler)
MRBE	Mean Relative Bias Error (mittlerer relativer vorzeichenbehafteter Fehler)
n.a.	nicht anwendbar bzw. nicht vorhanden
NTB	Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (Vorgängerinstitution der OST)
OFEN	Office fédéral de l'énergie (BFE, nur im französischen Abstract)
OST	OST – Ostschweizer Fachhochschule
QS-WP/QP	Qualitätssicherung Wärmepumpen / Qualitätsprüfung (Feldmessprojekt 2011–2013)
rps	revolutions per second (Verdichterdrehzahl, Umdrehungen pro Sekunde)
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance (jahreszeitbedingte Leistungszahl)
SD-Karte	Secure Digital Card (Speicherkarte)
SFOE	Swiss Federal Office of Energy (BFE, nur im englischen Abstract)

Abkürzung	Bedeutung
SNG	Systemnutzungsgrad
SNG+	Systemnutzungsgrad mit erweiterter Bilanzgrenze
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SW	Sole/Wasser-Wärmepumpe
UFE	Ufficio federale dell'energia (BFE, nur im italienischen Abstract)
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WP	Wärmepumpe bzw. interne Messdaten der Wärmepumpe
WPSM	Wärmepumpen-System-Modul
WPZ	Wärmepumpen-Prüfzentrum Buchs
WW	Warmwasser (Betriebszustand)

Formelzeichen und Parameterkürzel

Kurzname	Bedeutung
n_V	Verdichterdrehzahl bzw. Verdichterstufe
P_{el_tot}	Elektrische Leistungsaufnahme total
P_{el_V}	Elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters
Q_{dot_H}	Thermische Leistung (Heizleistung)
Q_{dot_H_poly}	Thermische Leistung, über Polynom berechnet (Anlage F024)
r	Korrelationskoeffizient
T_{aussen}	Aussentemperatur
T_{Q_ein}/ T_{Q_au}	Quelleneintritts- bzw. Quellenaustrittstemperatur
T_{raum}	Raumtemperatur
T_{S_ein} T_{S_au}	/ Senkeneintrittstemperatur (Rücklauf) bzw. Senkenaustrittstemperatur (Vorlauf)
ΔT_S	Temperaturdifferenz über die Senke
Δ, δ	Abweichung zwischen WP- und FM-Messwert (WP – FM)
Σ	Summe über den Betrachtungszeitraum

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Wärmepumpen spielen eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung des Gebäudeenergiesektors. Sowohl die CO₂-Emissionen als auch der Gesamtenergiebedarf werden mit Wärmepumpen wesentlich reduziert. Es findet damit eine Verschiebung von fossilen Energieträgern, hin zu elektrischer Energie statt. Da Wärmepumpen vorwiegend in den kalten Monaten laufen, erhöht sich die Nachfrage nach Strom in den Wintermonaten besonders ausgeprägt. Genau deshalb besteht ein wesentliches Interesse daran, die Effizienz so hoch, bzw. den Strombedarf von Wärmepumpen vor allem im Winter so gering wie möglich zu halten. Verschiedene Feldmessprojekte haben in der Vergangenheit Optimierungspotenziale aufgezeigt, die heute bereits teilweise in den «Regeln der Technik» (bspw. Wärmepumpen System Modul) verankert wurden.

Die bisherigen Feldmessprojekte in der Schweiz basieren auf eher kleinen Stichprobengrössen (30-300 Anlagen) oder auf begrenzten Messzeiträumen. Was die Projekte gemeinsam haben, ist die Verwendung von zusätzlicher, externer Messinfrastruktur und/oder begrenzter Auflösung. Heute besitzen die meisten Wärmepumpenprodukte bereits standardmässig verbaute Messtechnik. Diese zu nutzen, könnte eine Möglichkeit darstellen, in Zukunft auf zusätzliche Messtechnik zu verzichten, oder deren Einsatz gezielter zu gestalten. Ein Projekt der ETH Zürich [Brudemüller et al, 2025] hat durch die Zusammenarbeit mit einem Wärmepumpenhersteller Zugriff auf einen umfangreichen Datensatz (international, ohne CH) erhalten, der mittels «internen» Messungen erfasst wurde.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob das mit Daten anderer Hersteller reproduzierbar ist und wie gut die Belastbarkeit dieser internen Daten ist. Dazu wurden fünf Anlagen aus den Feldmessungen ausgewählt, die eine Datenerfassung via Wärmepumpe ermöglichen. Die Daten von vier der fünf Anlagen wurden für den Zeitraum zwischen Januar und April 2026 erhoben und mit den Messdaten aus den Feldmessungen verglichen.

1.1 Untersuchungsfragen

Die zentrale Fragestellung dieser Untersuchungen ist, ob die internen Messdaten in Bezug auf Umfang, Zugang und Verlässlichkeit, vergleichbar mit denen der Feldmessungen sind.

Die dazu notwendigen Untersuchungen beantworten unter anderem die nachfolgenden, weiteren Fragen:

- **Wie gross sind die Abweichungen bei zentralen Kenngrössen?** → Kapitel 4.1 - 4.2
 - *Energie (thermisch/elektrisch)*
 - *Temperaturen*
- **Sind die Abweichungen systematisch oder zufällig?** → Kapitel 4.3.4
 - *Korrelation von Abweichungen zu Messwerten*
 - *Korrelation von Abweichungen zu Abweichungen*
- **Welche Rolle spielen zeitliche Auflösung, Bilanzgrenzen und Betriebszustände?** → Kap. 4.3.3
 - *Streuung bei 15min vs. Tageswerte*
 - *Abweichung/Mittelwerte vs. Betriebszustände*
 - *Bilanzgrenze thermische/elektrisch und Einfluss auf COP*
- **Welche Daten sind über die internen Systeme zugänglich?** → Kapitel 3.2, 3.3, 9.1
 - *zentrale Parameter: thermische Energie, elektrische Energie, Senken- und Quellentemperaturen*
 - *Umfangreiche Parameterlisten im Anhang*
- **Welche Anwendungen sind mit internen Daten belastbar möglich?** → Kapitel 6.5
 - *Keine klare Aussage möglich, da grosse Unterschiede zwischen den Anlagen bestehen.*

1.2 Strategische Einordnung

Die vorliegende Untersuchung ist Teil der laufenden Arbeiten des Bundesamtes für Energie zur Weiterentwicklung der Qualitätssicherung für Wärmepumpen im Gebäudebereich (vorgestellt an der FWS-Fachtagung 2025 und an der BFE-Tagung 2026). Es ist anzunehmen, dass im Zuge der Weiterentwicklung des Gebäudeprogramms ab 2028 die reale Anlagenperformance, die Betriebsqualität sowie die Wirksamkeit öffentlicher Fördermittel zunehmend an Bedeutung gewinnen werden. Gleichzeitig werden moderne Wärmepumpensysteme neue Möglichkeiten zur Erfassung betrieblicher Daten und damit zur verbesserten Beurteilung von Effizienz, Betriebsverhalten und Optimierungspotenzialen eröffnen.

Vor diesem strategisch-politischen Hintergrund stellt sich die wissenschaftliche Frage, ob die bereits in Wärmepumpen integrierte Sensorik qualitativ ausreichend ist, um künftig einen Beitrag zur Ermittlung der tatsächlichen Anlagenperformance leisten kann und unter welchen Voraussetzungen solche Daten für Monitoring, Betriebsoptimierung, Qualitätssicherung oder Förderinstrumente nutzbar sind. Die vorliegende Studie soll damit eine technische Grundlage schaffen, um die Rolle interner Messdaten in einem zukünftigen, verhältnismässigen und skalierbaren Qualitätssicherungs-System beurteilen zu können.

2. Übersicht

Es wurden insgesamt fünf Anlagen von fünf verschiedenen Herstellern für diese Untersuchung in Betracht gezogen. Diese Anlagen haben gemeinsam, dass sie Teil des Feldmessprogramms des BFE sind/waren [Bernal et al, 2023]. Das Feldmessprogramm ist darauf ausgelegt, Messdaten in hoher zeitlicher Auflösung (Abtastrate von 100ms, gespeichert als 10s Mittelwerte) und mit kalibrierten Sensoren zu erfassen. Dies ermöglicht es hier die Messwerte der beiden Datensätze zu vergleichen und so eine Aussage zur Verlässlichkeit der internen Messdaten zu machen.

Die Auswahl der Anlagen erfolgte unabhängig der Fabrikate und ist mit nur fünf unterschiedlichen Modellen nicht darauf ausgelegt, den Markt zu repräsentieren. Die Auswertungen sind soweit möglich anonymisiert.

Um einen möglichst repräsentativen Datensatz zu erhalten, wurde der Untersuchungszeitraum so gewählt, dass eine grosse Bandbreite an verschiedenen Betriebszuständen erfasst wird. Die Messungen wurden von Januar bis April 2026 durchgeführt, wobei je nach Anlage beim Start der Erfassung Unterschiede bestehen. Diese sind in Kapitel 2.5 dokumentiert.

2.1 Definitionen

Interne Messdaten → Daten die via Wärmepumpensteuerung erfasst werden. Dies können Messungen und/oder Berechnungen sein. Das effektive Messgerät sowie dessen Platzierung ist nicht zwingend bekannt.

Beispiele für **intern**:

- Die Wärmepumpe hat einen im Gehäuse verbauten Wärme- und Stromzähler und speichert diese Daten auf der Steuerung oder auf einem Server.
- Die Wärmepumpe hat einen ausserhalb des Gehäuses verbauten Wärme- und Stromzähler und speichert diese Daten auf der Steuerung oder auf einem Server.

Externe Messdaten → Daten die mittels zusätzlicher Messinfrastruktur erfasst werden. Mit «zusätzlich» ist gemeint, dass diese keine Regelfunktion im Heizsystem hat und nur Daten erfasst.

Beispiele für **extern**:

- Die Heizungsanlage besitzt einen Wärme- und Stromzähler, der die Energie für die Heizkostenabrechnung erfasst und bspw. via LoRa-WAN an den Betreiber sendet.
- Die Heizungsanlage ist Teil des Feldmess-Programms und besitzt umfangreiche zusätzliche Energie- und Temperaturmessungen und sendet die Daten via Internet an einen Server.

Im weiteren Verlauf des Berichts werden die (internen) Messdaten der Wärmepumpe abgekürzt mit «**WP**» und die Feldmessdaten mit «**FM**» gekennzeichnet.

2.2 Anlagenübersicht

Wie bereits beschrieben, handelt es sich um fünf unterschiedliche Anlagen mit unterschiedlichen Wärmepumpen Fabrikaten.

Tabelle 1: Anlagenübersicht

Anlage	Fabrikat	WP-Typ	Betrieb	IBN Jahr
F016	A	LW, inv	Heizen/WW	2017
F019	B	SW, fix	Heizen	2018
F024	C	LW, inv	Heizen/WW	2019
F017	D	LW, inv	Heizen/WW	2020
F027	E	LW, inv	Heizen/WW	2021

Es handelt sich bei den untersuchten Produkten nicht bei allen Anlagen um die aktuelle Gerätegeneration, da die verbauten Wärmepumpen inzwischen mindestens 5 Jahre alt sind. (siehe auch Anhang 9.5, Frage 2)

2.3 Verfügbare Parameter

Bei Projektstart wurden die Messung der folgenden Parameter in mit minimaler Auflösung von 15 min Werten festgelegt:

Tabelle 2: Verfügbarkeit der festgelegten Vergleichsparameter

Parameter	F016	F017	F019**	F024	F027
Thermische Leistung	X	X & M	O	X	X & M
Elektrische Leistung	X	M	O	X	O
Quellentemperaturen	X	/	X	/	O
Senkentemperaturen	X	X	X	X	X
Aussentemperatur	X	X	X	X	X
Betriebszustand	X	/	O	/	/*
Kompressordrehzahl/Stufe	O	X	O	X	O
Raumtemperatur	O	O	O	O	X

Legende:

X: in gewünschter Auflösung vorhanden

/: nur teilweise vorhanden

M: nur als Monatswerte vorhanden

O: nicht vorhanden

*: Einschränkung, siehe Beschrieb zur Anlage (oder in Parameterliste)

** : Datenerfassung via WP nicht umgesetzt

Bei Anlage F019 wurde versucht, die Messung mittels Gateway, Modbus und Feldmess-SPS umzusetzen, was jedoch nicht die erhofften Daten lieferte und nicht vor Ort installiert wurde. Genauer dazu ist in Kapitel 9.3.3 dokumentiert. Weiter ist es so, dass leider keine der Anlagen alle gewünschten Parameter liefert, jedoch ist die thermische Leistung für alle Anlagen verfügbar oder kann aus den Daten berechnet werden. So ist zumindest für diesen Parameter ein übergreifender Vergleich möglich

2.4 Datenzugang und Rohdatenformate

Der Datenzugang sowie der Umfang der Daten ist für jede Anlage unterschiedlich. Die nachfolgenden Unterkapitel geben eine Übersicht. Der Datenzugang ist je Anlage detailliert im Anhang 9.3 beschrieben.

2.4.1 Datenzugang

Für die Daten der Anlagen F016, F017 und F027 konnte ein Zugriff via Webportal eingerichtet werden. Bei Anlage F024 war ein vor Ort Termin notwendig, um die Datenaufzeichnung zu prüfen und auszulesen.

Tabelle 3: Übersicht Datenzugang

Datenzugang	F016	F017	F024	F027
Hersteller Webportal	X	X		X
Lokaler Speicher			X	

2.4.2 Datenformat

Für die Weiterverarbeitung der Daten ist das Rohdatenformat entscheidend für den Aufwand. Drei Fälle werden exemplarisch in Reihenfolge steigender Komplexität wie folgt beschrieben:

1. Die Daten sind im csv (comma separated values) Format verfügbar. Dieses kann mit einfachen Texteditoren, mit Excel oder mit Programmiersprachen wie bspw. Python geöffnet und weiterverarbeitet werden.
2. Die Datenformate müssen zuerst mit einer spezifischen Software oder Bibliothek geöffnet und umgewandelt werden müssen.
3. Die Rohdaten liegen in proprietären, also Herstellereigenen Datenformaten vor und können auch mit Herstellersoftware nicht in gängige Dateiformate umgewandelt werden.

Tabelle 4: Übersicht Datenformate

Rohdatenformat	F016	F017	F024	F027
csv (comma separated value)	X	M		X
dta		X		
proprietär			X	

2.4.3 Eigenschaften

Wichtig ist zudem die Speicherdauer, sowie der Umfang der Daten. Nachfolgende Tabelle gibt weitere Informationen je Anlage. Die vollständigen Parameterlisten sind je Anlage im Anhang zu finden.

Tabelle 5: Eigenschaften der Messdatenerfassung

Eigenschaften	F016	F017	F024	F027
Speicherdauer online	30 d	30 d	-	Seit IBN 23.11.2021
Speicherdauer lokal	300 d	n.a.	500 d	n.a.
Intervall (minimal)	1 - 30 Min	1 Min	15 Sek	1 Min
Anzahl Parameter (gespeichert)	55	88	109	10*
Datenformat	csv	dta	proprietär	csv
Datenzugang	Webportal	Webportal	SD-Karte	Webportal
Spezielle Software notwendig?	Nein	Ja	Ja	Nein

Es wurden in dieser Studie nur die Parameter aus Tabelle 2 betrachtet. Alle weiteren Parameter wurden weder geprüft, noch untersucht. Es kann sein, dass Werte doppelt vorhanden oder auch unbrauchbar sind.

2.5 Messzeitraum

Für die verschiedenen Anlagen liegen aus unterschiedlichen Gründen leicht andere Zeitbereiche vor. Beispielsweise konnte auf die Daten der Anlage F017 erst ab Ende Februar zugegriffen werden, wobei die Daten rückwirkend für 30 Tage heruntergeladen werden konnten. Ebenfalls gab es kurze Unterbrüche,

teilweise erklärbar durch verspätetes Herunterladen der Daten. Die nachfolgende Darstellung gibt auf Tagesbasis einen Überblick, für welche Zeiträume für welche Anlage die Daten vorliegen.

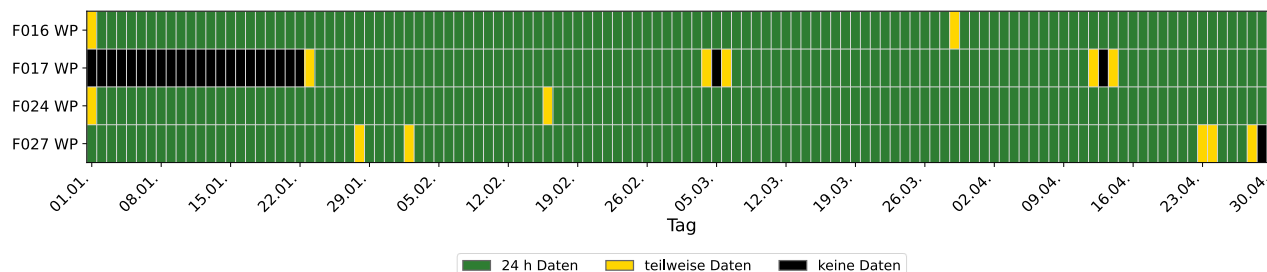


Abbildung 1: Übersicht Messzeitraum und Datenverfügbarkeit

Die Feldmessdaten liegen für alle Anlagen über den ganzen Zeitbereich vor, da die Datenerfassung autonom funktioniert. Für den Vergleich wurden nur Daten verwendet, wenn diese bei beiden Datensätzen zur gleichen Zeit vorliegen. Die teilweise vorhandenen Lücken wurden ausgeschlossen.

2.6 Hydraulik

Für die Beurteilung der Ergebnisse ist die verbaute Hydraulik ebenfalls relevant. Da es sich um einfache Anlagen handelt, wurden die Standard-Schemata des WPSM als Kategorisierung herangezogen [WP-Systemmodul, 2020].

Tabelle 6: Übersicht Hydraulik

Anlage	F016	F017	F024	F027
Hydraulikschema nach WPSM	6	4	6	6
Bemerkung	4-Punkt Pufferspeicher	Vorlaufspeicher (50l)	-	-

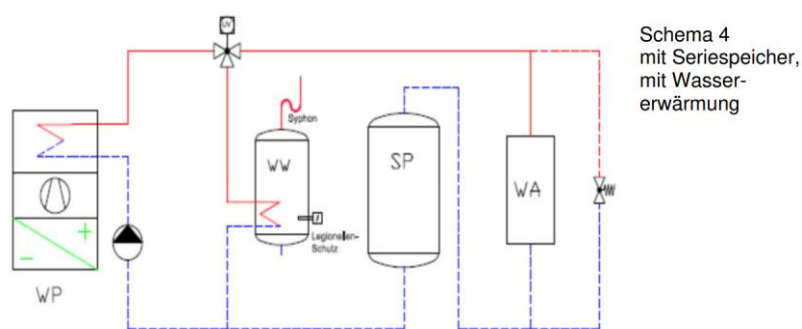


Abbildung 2: Hydraulikschema 4 gem. WPSM [WP-Systemmodul, 2020]

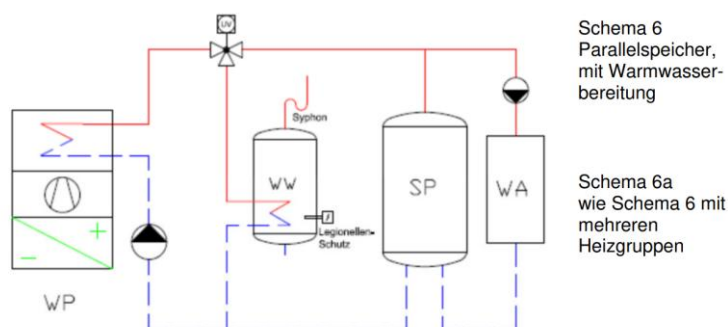


Abbildung 3: Hydraulikschema 6 gem. WPSM [WP-Systemmodul, 2020]

3. Methodik

3.1 Messunsicherheit

Die bei den Feldmessungen eingesetzte Sensorik wurde im Wärmepumpen Prüfzentrum in Buchs (WPZ) zusammen mit der Wärmepumpe kalibriert und danach vor Ort auf der Baustelle durch den Installateur eingebaut. Jede Anlage wurde bei der Aktivierung der Datenerfassung vor Ort nochmals geprüft und dokumentiert.

Die Messunsicherheiten der verbauten Messinfrastruktur betrug bei der Kalibrierung:

- Temperaturen: $\pm 0.2 \text{ K}$
- Elektrische Leistung: $\pm 1 \text{ \%}$ (vom Messwert)
- Thermische Leistung: $\pm 5 \text{ \%}$ (vom Messwert)

Bei den Temperaturen ist noch erwähnenswert, dass im Rohr mit direktem Kontakt zum Medium verbaut sind. Die Temperatursensoren, welche für die Energiebilanz der Senke verwendet werden, sind zusätzlich redundant ausgeführt, so können mögliche Drifts frühzeitig festgestellt werden.

3.2 Messstellen

Nachfolgende Abbildung stellt vereinfacht die verbaute Sensorik im Feldmessungsprojekt dar. Es gibt je nach Hydraulik und Anlage leichte Unterschiede, die aber für diesen Vergleich keinen Einfluss haben. Die relevantesten Parameter für diesen Bericht sind mit rot gekennzeichnet.

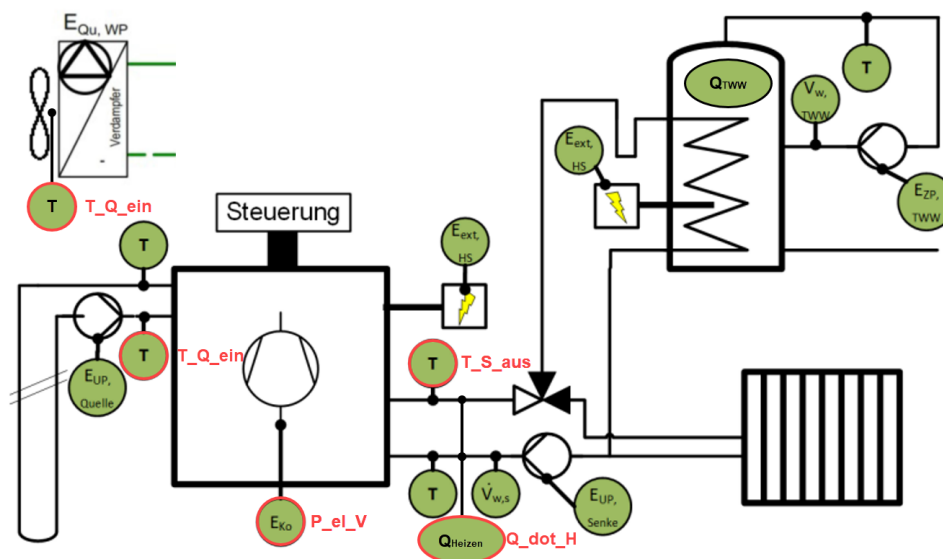


Abbildung 4: Messstellen der Feldmessungen (generalisierte Darstellung)

3.3 Konvention für die Parameterbezeichnung

Jeder Hersteller verwendet für die Parameter eigene Bezeichnungen. Auch die Parameterbezeichnung der Feldmessungen ist nicht intuitiv. Die nachfolgende Tabelle zeigt alle Parameter mit Bezeichnung, Kurzname und Beschreibung. Mit den Spalten «Generelle Bezeichnung» und «Kurzname» wurde eine einheitliche Konvention für diese Studie festgelegt. Die Spalte Parametername gibt die ursprüngliche Bezeichnung aus dem Rohdatensatz an. Die rechte Seite ist spezifisch für den jeweiligen Datensatz (hier für die Feldmessungen, bzw. für die jeweilige Anlage).

Tabelle 7: Konvention für die Parameterbezeichnung (hier anhand Feldmessung)

Generelle Bezeichnung	Kurzname	Parametername	Beschreibung
Thermische Leistung	$Q_{\dot{H}}$	37_PtH + 39_PtA	Thermische Leistung Heizen oder Aufladung (WW) (inkl. Abtattung - ohne Kühlen)
Elektrische Leistung Verdichter	P_{el_V}	27_PelV	Elektrische Leistung Verdichter
Elektrische Leistung Total	P_{el_tot}	25_PelTot	Elektrische Leistung total (inkl. Ventilator/Pumpe, Steuerung, Heizstab)
Quelleneintrittstemperatur	T_{Q_ein}	7_Qein1	Temperatur Quelle Eintritt (Rücklauf) Fühler 1
Quellenaustrittstemperatur	T_{Q_aus}	5_Qaus1	Temperatur Quelle Austritt (Vorlauf) Fühler 1
Senkeneintrittstemperatur	T_{S_ein}	2_Saus2	Temperatur Senke Austritt (Vorlauf) Fühler 2
Senkенаustrittstemperatur	T_{S_aus}	3_Sein1	Temperatur Senke Eintritt (Rücklauf) Fühler 1
Aussentemperatur	T_{ausen}	17_Auss1	Aussentemperatur Fühler 1
Betriebszustand	BZ	47_Dig	Betriebszustände
Kompressordrehzahl/Stufe	n_V	-	Nicht im Datenset enthalten
Raumtemperatur	T_{raum}	-	Nicht im Datenset enthalten

Diese Zuordnung wurde für alle Anlagen durchgeführt. Die Tabellen dazu befinden sich im Anhang.

3.4 Bilanzgrenzen / Systemgrenzen

Für die Feldmessungen ist für jede Messstelle klar, in welcher Systemgrenze sie liegt. Bei den internen Messdaten ist dies nicht immer klar und es mussten Annahmen getroffen werden (Kapitel 3.3). Es wurde entschieden, den Vergleich der thermischen Energie anhand der Messungen am Ein-, bzw. Austritt aus der WP und bei der elektrischen Energie nur anhand der Verdichter Leistungsaufnahme durchzuführen.

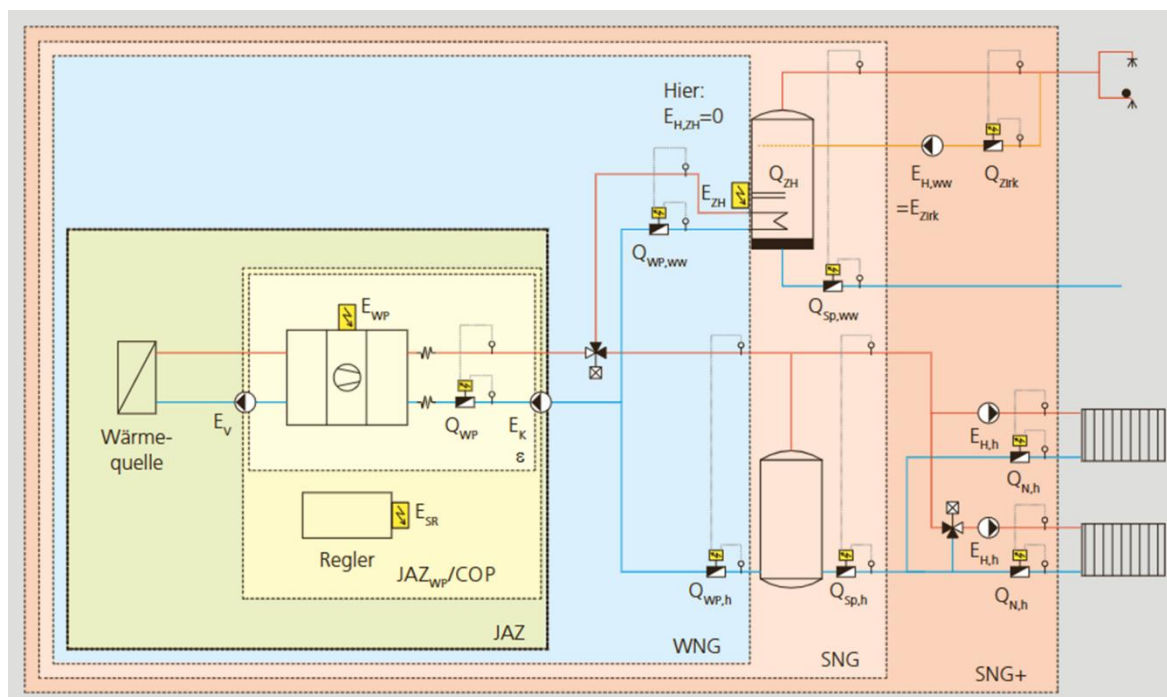


Abbildung 5: Etablierte Bilanzgrenzen/Systemgrenzen JAZ, WNG, SNG und SNG+ in Wärmepumpenanlagen. Siehe auch Genkinger et al. (2026) Seite 9. (Verwendung der Grafik dank freundlicher Genehmigung von A. Genkinger)

3.5 Statistische Kennzahlen

Für den Datenvergleich werden statistische Kennzahlen mit verschiedenen Methoden ermittelt, welche in den nachfolgenden Unterkapiteln kurz beschrieben werden. Die Tabelle 8 zeigt die Übersicht.

Tabelle 8: Übersicht der Methoden für die Bildung qualitativer Kennzahlen

Grösse	Kennzahl	Einheit	Zweck
Temperatur	MBE	K	Systematischer Bias
Temperaturdifferenz	MBE + MAE	K	Systematischer Bias + Streuung
Leistung	MRBE + MRAE	%	Relativer Bias + Streuung
Durchfluss	MBE + MAE	l/h	Systematischer Bias + Streuung
Energie (Summe)	$(\Sigma(WP) - \Sigma(FM)) / \Sigma(FM) * 100 \%$	%	Energetische Gesamtbilanz
Diverse Parameter	r	-	Korrelation

Eine Übersichtstabelle mit diesen Kennwerten je Parameter befindet sich im Anhang 9.4.4.

3.5.1 MBE – Mean Bias Error

Der MBE berechnet den mittleren vorzeichenbehafteten Fehler zwischen WP- und FM-Messwerten. Er quantifiziert einen systematischen Bias: Ein positiver Wert zeigt, dass WP den FM-Wert im Mittel überschätzt, ein negativer Wert unterschätzt. Der MBE gibt keine Auskunft über die Streuung der Einzelabweichungen, da sich positive und negative Abweichungen ausmitteln können.

3.5.2 MAE – Mean Absolute Error

Der MAE berechnet den mittleren absoluten Fehler ohne Berücksichtigung des Vorzeichens. Er gibt die typische Grösse der Einzelabweichungen an, wobei eine Aufhebung positiver und negativer Fehler hier nicht möglich ist. In Kombination mit dem MBE lässt sich beurteilen, ob Abweichungen systematisch oder zufällig verteilt sind.

3.5.3 MRBE – Mean Relative Bias Error

Der MRBE entspricht dem MBE normiert auf den FM-Mittelwert und wird in Prozent ausgedrückt. Die relative Darstellung ist für Leistungen geeignet, da absolute Abweichungen je nach Betriebspunkt (Teil- oder Volllast) unterschiedlich zu gewichten sind. Ein positiver MRBE zeigt eine systematische Überschätzung des Messwerts durch die internen Messdaten (WP) im Vergleich zu den Feldmessdaten (FM), ein negativer Wert genau andersherum.

3.5.4 MRAE – Mean Relative Absolute Error

Der MRAE entspricht dem MAE normiert auf den FM-Mittelwert in Prozent. Er beschreibt die typische relative Streuung der Leistungsabweichungen über den Betrachtungszeitraum. Stillstandsphasen mit Werten von FM ≈ 0 sind von der Berechnung ausgeschlossen.

3.5.5 Energetische Summenabweichung

Die energetische Summenabweichung vergleicht die über den Betrachtungszeitraum aufsummierten Energiemengen beider Messsysteme. Sie wird als relative Abweichung in Prozent ausgedrückt und beantwortet, ob die Gesamtenergiebilanz zwischen WP und FM übereinstimmt, unabhängig von der zeitlichen Verteilung der Einzelwerte und unabhängig vom Betriebszustand.

3.5.6 r – Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient zeigt den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen auf. Je grösser der Betrag vom r-Wert, umso stärker der Zusammenhang. Dieser Kennwert wird verwendet, um Zusammenhänge zwischen den Parametern zu identifizieren.

4. Ergebnisse Messdatenvergleich

Die Beurteilung der Belastbarkeit der internen Messungen via WP erfolgt in dieser Studie mittels des Vergleichs zu den Messdaten aus den Feldmessungen.

Die nachfolgenden Ergebnisse stellen den Vergleich zwischen diesen Datensätzen dar, was nicht mit einer Bestimmung einer Messunsicherheit verwechselt werden darf. Ebenfalls muss bedacht werden, dass zumindest die Temperaturmessungen eine Abhängigkeit von der Platzierung der Sensoren und somit auch der Zeit haben, da thermische Systeme einer Trägheit unterliegen.

Für den Datenvergleich wurden die Messdaten zeitrichtig übereinandergelegt und verglichen (Beispieltag je Anlage im Anhang verfügbar). Nachfolgend werden die Ergebnisse präsentiert, analysiert und interpretiert. Die notwendige Datenverarbeitung ist im Anhang dokumentiert.

4.1 Übersicht anhand Energie- und Effizienzvergleich

Die Energien, bzw. Leistungen wurden über den gesamten Zeitraum summiert (inkl. Stillstandszeit), um einen Überblick bezüglich der groben Übereinstimmung zu haben. Die Abbildung 6 stellt die Energiesummen (thermisch/elektrisch) je Parameter und Anlage als Balken dar. In Blau ist die Messung via WP-System und in orange die Messung via Feldmessung dargestellt. Die grauen Fehlerbalken zeigen die Messunsicherheit aus den Feldmessungen (Kapitel 3.1).

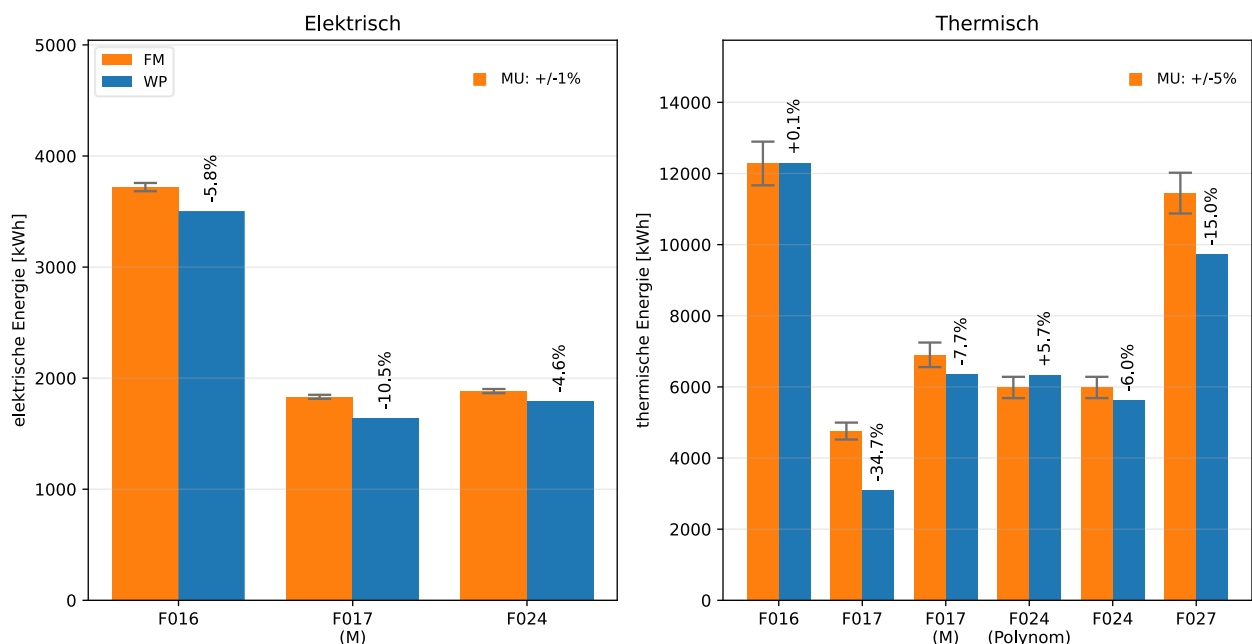


Abbildung 6: Summenvergleich der Energien (thermisch & elektrisch) über den Zeitraum von Januar bis April 2026 für alle Anlagen, wobei «(M)» für Monatswerte steht. Alle anderen Anlagen basieren auf der Summe von 1-Minutenwerten.

Betrachtet man die Differenzen zwischen blau und orange (Abbildung 6), so fallen F017 (thermisch und elektrisch) und F027 (thermisch) besonders auf. Die Werte dieser Anlagen liegen ausserhalb der zu erwartenden Messunsicherheit, wobei F017 wesentlich stärker abweicht. Bei F017 gibt es zusätzlich zu den hochaufgelösten Daten noch in einem separaten Datensatz Monatswerte (M) für thermische und elektrische Energie. Interessant ist, dass die thermische Energie mit den Monatswerten (Januar bis April, vollständig) wesentlich besser übereinstimmt (-7.7%) als mit den 1-Min Werten (-34.7%). Die elektrische Energie bei F017 ist nur in Form von Monatswerten verfügbar. In Tabelle 9 sind die Abweichungen in Prozent angegeben. Ein positiver Wert bedeutet, dass die Messungen via WP-System einen höheren Wert ergeben haben als die Feldmessungen, ein negativer Wert bedeutet umgekehrt, dass die Summe der internen Messungen geringer ist als die der Feldmessungen.

Tabelle 9: Summenabweichung bei Energien (gleiche Werte wie in Abbildung 6)

	P_el_V	P_el_tot	Q_dot_H	Q_dot_H_poly.	Q_dot_H(M)	COP, bzw. AZ
F016	- 5.8 %	- 10.8 %	+ 0.1 %			
F017	- 10.5 %	- 20.7 %	- 34.7 %		- 7.7 %	-
F024	- 4.6 %	- 11.5 %	- 6.0 %	+ 5.7 %		
F027			- 15.0 %			

Werden die einzelnen Abweichungen betrachtet, so ist ersichtlich, dass die Anlagen F016 und F024 eine gute Übereinstimmung aufweisen. Bei F016 ist die gemessene Differenz der thermischen Energie sogar innerhalb der Messunsicherheit der Feldmessungen. Bei F024 gibt es zwei Parameter in den internen Daten zur thermischen Leistung. Die eine davon wird mittels Temperaturdifferenzen und Durchfluss ermittelt (Q_dot_H) die andere (Q_dot_H_poly) wird mittels Polynom, wahrscheinlich basierend auf der Verdichter Drehzahl berechnet. Die gute Übereinstimmung dieses Parameters ist überraschend. Interessant wäre, diese Methode bei weiteren Anlagen zu betrachten, um die Robustheit zu prüfen.

Zur elektrischen Energie muss erwähnt werden, dass zumindest bei Anlage F016 und F024 nur die Leistungen der Verdichter auf den WP-Systemen erfasst wurden. Es liegen keine Messungen der elektrischen Hilfsenergien (Steuerung, Ventilator, Pumpen) vor. Abbildung 7 stellt diese als straffierte Fläche zusätzlich dar. Bei Anlage F017 ist die Bilanzgrenze nicht eindeutig, aber wahrscheinlich ist auch hier nur die Leistungsaufnahme des Verdichters enthalten. Es gibt bei den Monatswerten jedoch einen Parameter mit Zusatz Wärmezeugung (WP Zusatz), dieser enthält wahrscheinlich nur den Heizstab und keine Leistungsaufnahmen für Steuerung, Ventilator oder Pumpen. Auch wenn diese zusätzliche Energie berücksichtigt wird, bleibt eine Abweichung von rund 19 % bestehen.

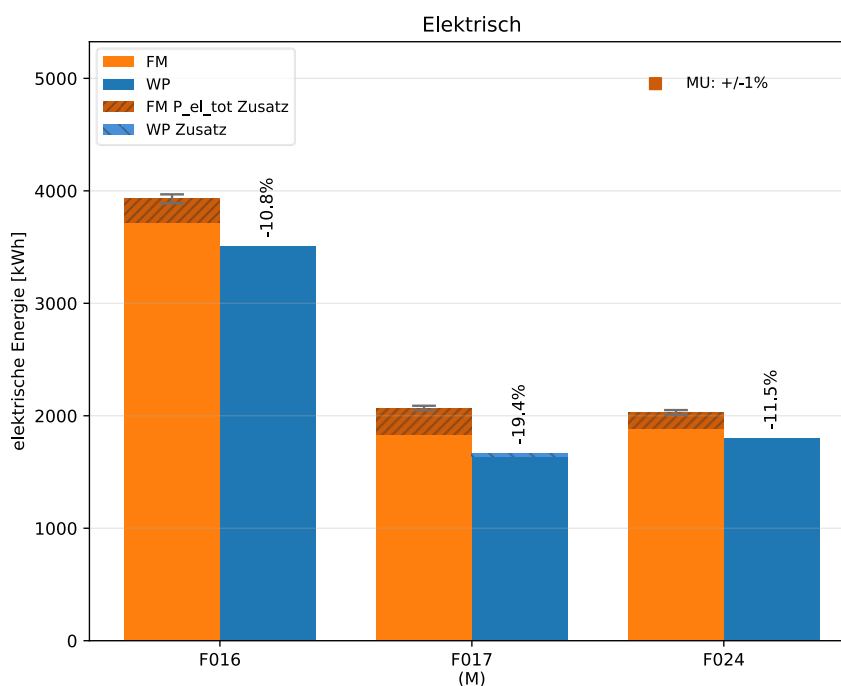


Abbildung 7: Summenvergleich elektrische Energie inkl. Hilfsenergien für alle Anlagen im Zeitraum von Januar bis April 2026

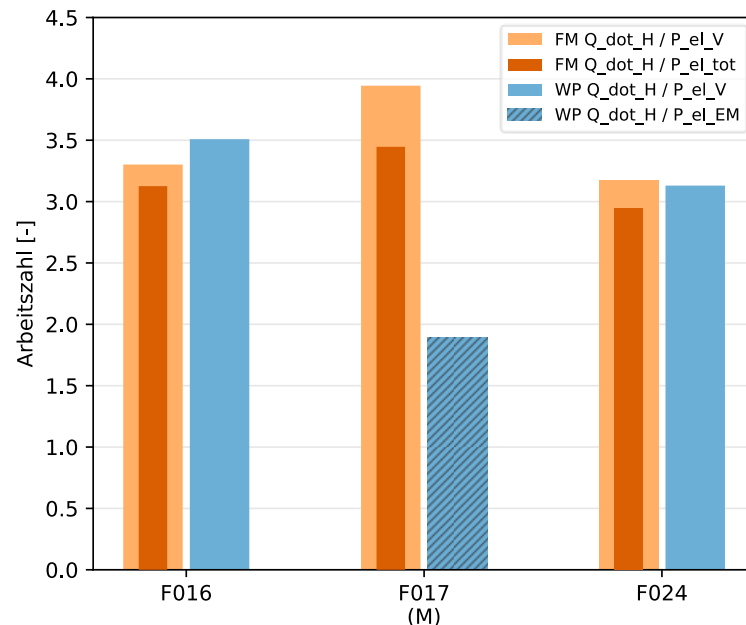


Abbildung 8: Vergleich der Effizienz im Zeitraum von Januar bis April 2026. Dunkelorangene Balken beinhalten im Gegensatz zu hellorangenen Balken noch Sekundärverbraucher (Steuerung, Heizstab, Ventilator/Pumpe).

Ein Vergleich des COP, beziehungsweise der Arbeitszahl (hier von Januar bis April 2026), einmal exkl. und einmal inkl. den Hilfsenergien, zeigt den Unterschied deutlich. Aus den Erfahrungen der FAWA, QS-WP und dem Feldmessprojekt [Erb et al, 2004; Nani et al, 2007; Hubacher & Bernal, 2014, Arpagaus et al, 2017; Prinzing et al, 2018, 2019, 2020, 2021; Berthold et al, 2022, Bernal et al, 2023] ist eindeutig, dass die Anlageneffizienz massgeblich vom System und den Hilfsenergien beeinflusst wird. Vor allem der unerkannte Betrieb von elektrischen Zusatzheizungen verursacht starke Effizienzeinbussen, bzw. hohe vermeidbare elektrische Energiebezüge. Sind diese Energien nicht bekannt, so kann die wahre Effizienz der Heizungsanlage nicht beurteilt werden. Einzig die Effizienz des Gerätes (Wärmepumpe, bzw. Verdichter) wird so gemessen.

4.2 Detailvergleich nach Messgrösse

Um herauszufinden, wie gut die Übereinstimmung der Daten zwischen den externen Feldmessdaten und den internen Wärmepumpendaten ist, wurden diese zeitrichtig je Parameter verglichen. Das bedeutet, dass zu jedem verfügbaren Zeitpunkt der Messwert von den Feldmessungen mit dem Messwert vom System der Wärmepumpe verglichen wird. Als gemeinsames Intervall wurde eine Minute genommen, da die meisten Parameter aus den Systemmessungen dieses Intervall erfüllen können. Das nachfolgende Diagramm zeigt, wie die Daten übereinandergelegt wurden. Dargestellt ist die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters (Anlage F024) über einen Zeitraum von einem Referenztag. In Blau ist die interne Messung und in Orange die Feldmessung dargestellt.

Für jede der Anlagen und Parameter wurde eine solche Darstellung im Anhang zur Information beigelegt.

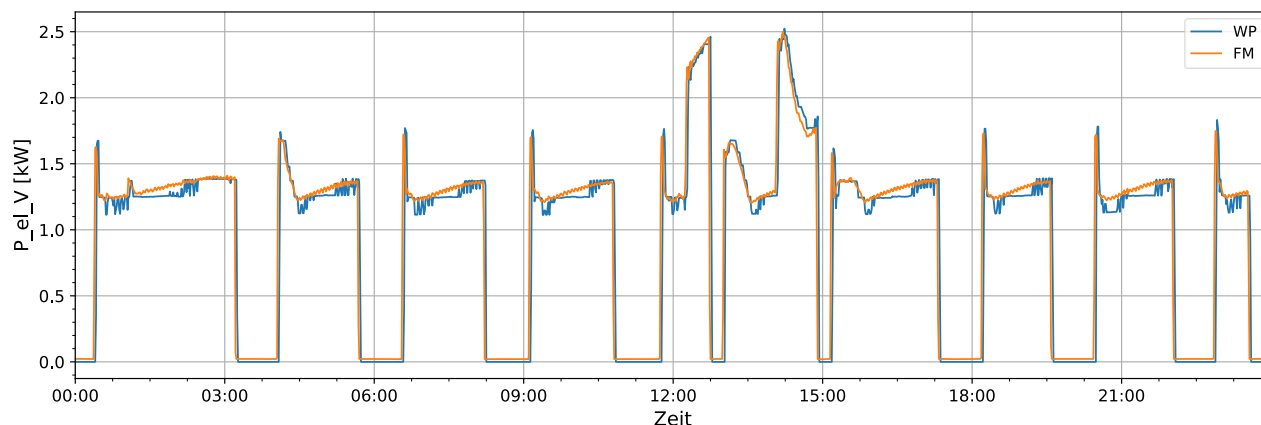


Abbildung 9: Zeitreihenvergleich der elektrischen Leistungsaufnahme über einen Tag bei Anlage F024

4.2.1 Energie (thermisch / elektrisch)

Die Unterschiede der Energiemessungen werden mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen betrachtet. Das nachfolgende Diagramm zeigt den Vergleich der Messwerte anhand von Tagesenergien. Stimmen die Messwerte exakt überein, so liegen diese auf der 1:1 Linie (schwarz gestrichelt). Zusätzlich sind Hilfslinien zur Einordnung bei Abweichungen eingezeichnet (grau gestrichelt). Dargestellt sind die vorhandenen thermischen und elektrischen Tagesenergien der verschiedenen Anlagen zur Übersicht.

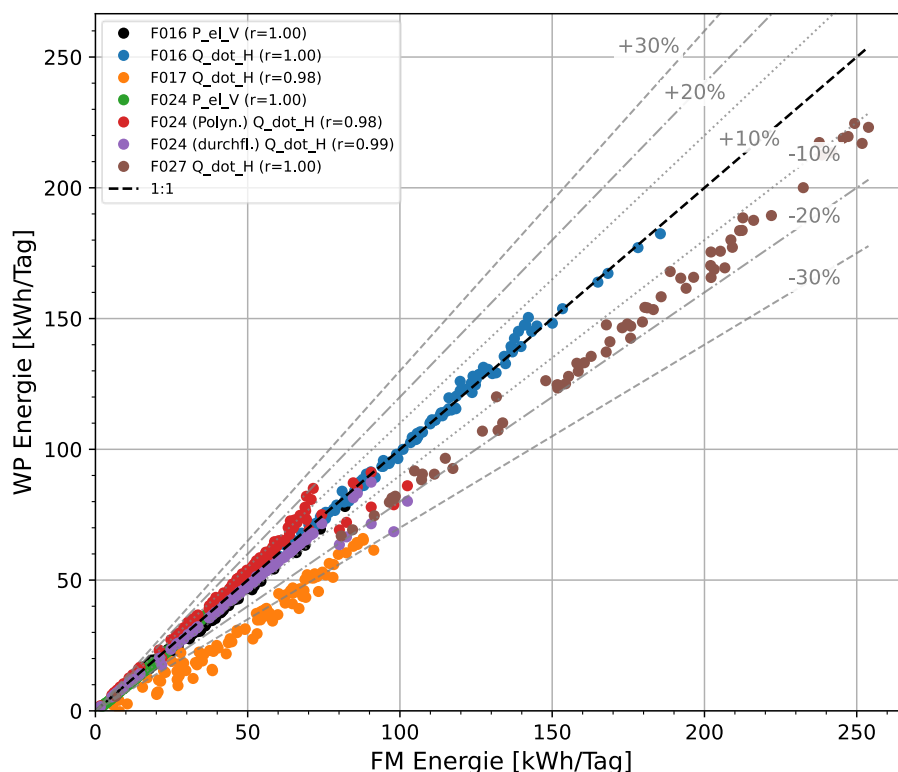


Abbildung 10: Vergleich der Tagesenergien mittels 1:1 Darstellung

Auffällig sind die orangen und braunen Punkte. Wie bereits im Summenvergleich zeigt sich hier bei den Anlagen F017 und F027 eine grössere Differenz zu den Feldmessdaten als bei F016 und F024. Im Anhang sind die Abbildungen mit 15 min Werten je Anlage und Parameter getrennt zu finden.

Diese Betrachtung mittels 1:1 Vergleich wird für die Anlagen F016 und F017 vertiefter, also in feinerer zeitlicher Auflösung gemacht. Die nachfolgenden Abbildungen enthalten 15 Minuten Mittelwerte. Dargestellt sind alle Betriebszustände ohne «Stillstand».

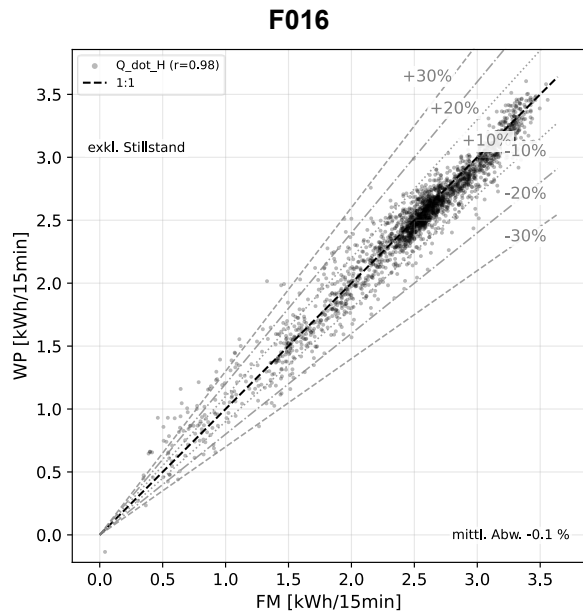


Abbildung 11: Vergleich der 15min Energie Werte
(Anlage F016)

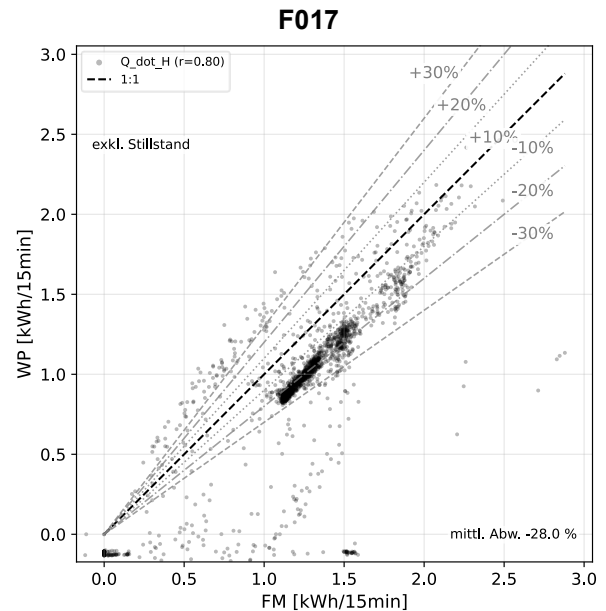


Abbildung 12: Vergleich der 15min Energie Werte
(Anlage F017)

Bei Anlage F017 (rechts) ist eine Häufung zu erkennen, die in etwa bei der 20%-Abweichungslinie liegt. Bei Anlage F016 (links) ist die Mehrheit der Punkte im Bereich der 1:1 Linie (0% Abweichung). Bei beiden Anlagen gibt es Streuungen, wobei diese bei Anlage F017 grösser sind. Auch gibt es mehr Ausreisser bei Anlage F017. Die mittlere Übereinstimmung der Anlage F016 ist sehr gut, jedoch steigen die Abweichungen bei feinerer zeitlicher Auflösung auch hier. Die 15 Minuten Werte der beiden Anlagen können in einzelnen Fällen bis über 30% von den Feldmessungen abweichen.

Dies ist wohl vor allem damit zu begründen, dass hier zwei unterschiedliche Messsysteme mit Unterschieden bei den Sensoren und deren Platzierungen miteinander verglichen werden. Thermische Systeme sind grundsätzlich träge. Diese Differenzen mitteln sich bei gröberer zeitlicher Auflösung aus und sind in Summenvergleichen über grössere Zeiträume aufgrund der Energieerhaltung nicht mehr relevant.

4.2.2 Temperaturen

Die Übereinstimmung der Messwerte wurde nicht nur für die Energie/Leistungsmessungen gemacht, sondern auch für die Temperaturen. Die Übersichtsdarstellung zeigt den 1:1 Vergleich der Temperaturen für alle Anlagen.

Messwertvergleich WP vs. FM - Temperaturen

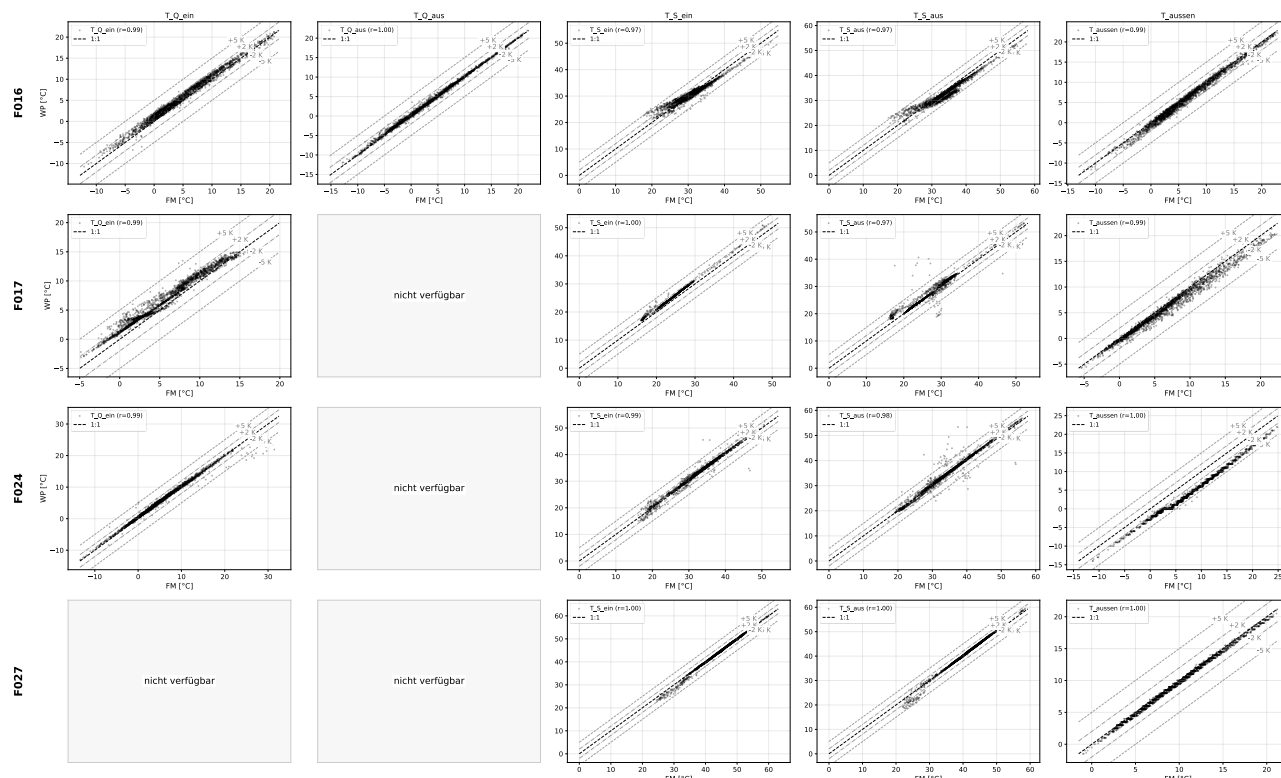


Abbildung 13: Messwertvergleich der Temperaturmessungen mittels 1:1 Diagramm (WP vs. FM)

Die grafische Darstellung lässt nur eine grobe Einordnung zu. Bei Anlage F016 gibt es bei den Senktemperaturen leichte Trends. Beispielsweise ist die Abweichung bei tieferen Temperaturen grösser als bei hohen. Bei Anlage F017 sind mehrere kleine Cluster (Ansammlungen) sichtbar. Und bei Anlage F024 weicht die Aussentemperatur generell etwa 3-4 K ab. Dies könnte allenfalls einem Platzierungsproblem (bspw. ungeschützt vor Fremdwärmeeinfluss, bspw. durch Sonneneinstrahlung und/oder Abwärme) geschuldet sein, was jedoch aus der Ferne nicht abschliessend festgestellt werden kann.

Die mittleren Abweichungen (MBE) der Temperaturen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Sie entsprechen der mittleren vorzeichenbehafteten Differenz zwischen WP- und FM-Messwerten über den gesamten Betrachtungszeitraum und quantifizieren einen allfälligen systematischen Bias je Parameter.

Tabelle 10: Mittelwertabweichungen der Temperaturen (MBE) auf Basis der 1-Min Werte

	T_S_aus	T_S_ein	T_aussen	T_Q_ein	T_Q_aus
F016	- 1.2K	- 0.3 K	- 0.5 K	+ 0.9 K	+ 0.2 K
F017	+ 0.4 K	+ 1.1 K	- 0.7 K	+ 1.2 K	
F024	+ 0.5 K	+ 0.6 K	- 3.4 K	+ 0.3 K	
F027	+ 0.1 K	- 0.2 K	- 0.3 K		

Die Abweichungen der meisten Temperatursensoren liegen im Bereich ± 1 K und entsprechen damit in etwa den Erwartungen. Eine Ausnahme bildet die Aussentemperatur bei F024 mit -3.4 K, was auf eine systematische Abweichung des WP-internen Sensors oder der Feldmessungen hinweist. Bei F016 zeigt «T_S_aus» mit -1.2 K ebenfalls eine erhöhte Abweichung. Die Vorzeichen sind je Installation und Messstelle uneinheitlich, was auf individuelle Sensorcharakteristiken und unterschiedliche Einbausituationen zurückzuführen ist.

4.3 Fehlerquellen und Besonderheiten

4.3.1 Zeitsynchronisierung

Der Datenvergleich basiert darauf, dass die Messungen zeitrichtig übereinandergelegt werden. Die Uhr der Feldmessungen wird regelmässig mit dem zentralen Zeit-Server der ETH Zürich abgeglichen, wodurch konstante Intervalle und Zeitstempel über alle Anlagen für diesen Datensatz möglich sind. Ebenfalls wird bei den Feldmessungen die Winterzeit ganzjährig verwendet.

Bei kleiner Auflösung ist diese Zeit-Synchronisierung wichtiger als bei Summenvergleichen. Der Vergleich bei Anlage F024 auf Basis von 15 Min Werten war zu Beginn der Untersuchungen¹ auffällig, die Abweichung über den gesamten Zeitraum war, bzw. ist nicht besonders (- 6 %), aber bei Betrachtung der nicht synchronisierten 15 Min Mittelwerte, streuen die Abweichungen stark und es sind gewisse Muster/Cluster (rot eingekreist) ersichtlich:

- Zwei diagonale «Linien» unter und über der 1:1 Linie (im Bereich von 0-0.3 kWh/15min)
- Vertikale und horizontale «Linien» bei ca. 0.3 kWh/15min

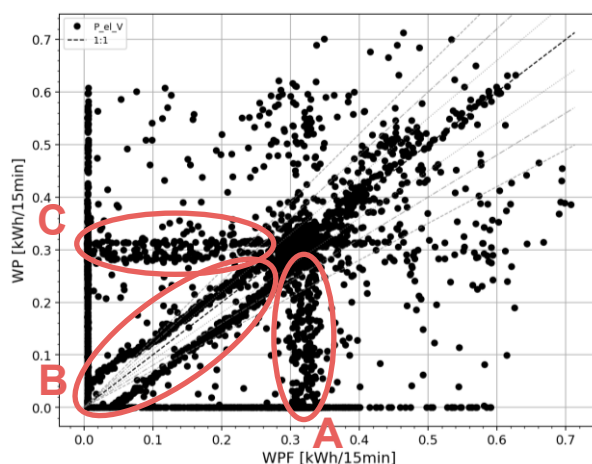


Abbildung 14: Vergleich elektrische Energie vor Zeitkorrektur (15min Werte, F024)

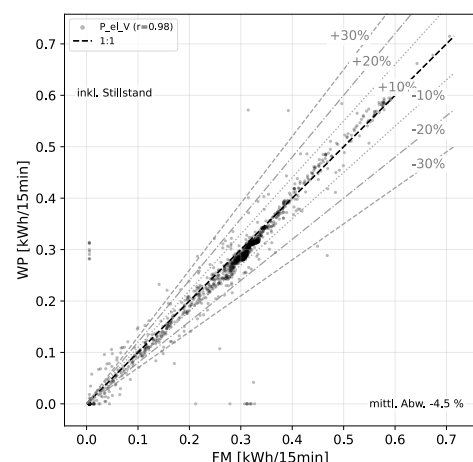


Abbildung 15: Vergleich elektrische Energie nach Zeitkorrektur (15min Werte, F024)

Diese Anlage ist die einzige der untersuchten Anlagen, die keine Internetanbindung hat. Durch eine Kontrolle wurde festgestellt, dass die zeitliche Abweichung vom 01.01.2026 bis 16.02.2026 ca. -66 min beträgt (A). Am 16.02.2026 war anscheinend ein Techniker vor Ort, der die Uhr zurückstellte. Jedoch blieb eine zeitliche Abweichung von ca. -2 min (B) bestehen. Dies änderte sich mit der Zeitumstellung wieder, da die Feldmessungen konstant auf Winterzeit eingestellt sind, wird ab dem 29.03.2026 eine Abweichung von +58 min festgestellt (C). Diese zeitlichen Abweichungen wurden korrigiert¹.

¹ Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Problematik der unkorrigierten Daten. Im restlichen Bericht werden aber konsistent einzig die korrigierten Daten verwendet.

4.3.2 Hydraulik und Sensorplatzierung

Ein Beispiel für den Einfluss der Sensorplatzierung liefern die Senkentemperaturen von Anlage F017. Auch hier gibt es Abweichungen, die ein Muster haben. Dabei ist aufgefallen, dass diese Wärmepumpenanlage einen kleinen internen Vorlauf-Pufferspeicher enthält und es für die Trinkwassererwärmung (in Feldmessungen «Aufladung» genannt) eine separate Leitung mit separatem Temperatursensor (in den Feldmessungen) gibt.

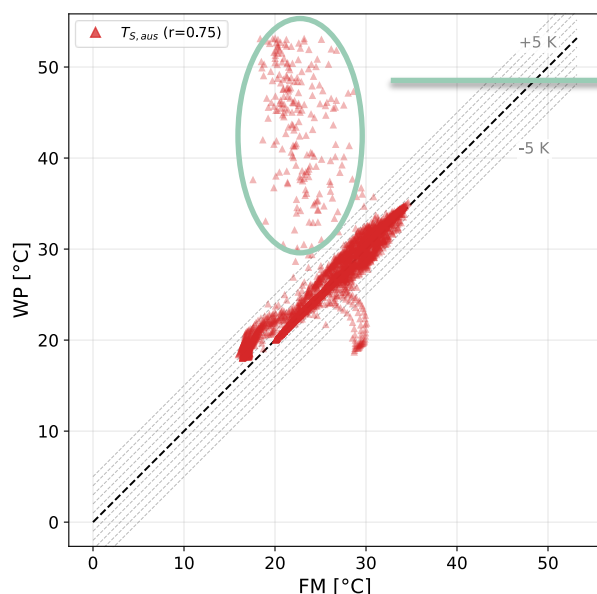


Abbildung 16: Vergleich der Senkentemperaturen vor Betriebszustandskorrektur (F017)

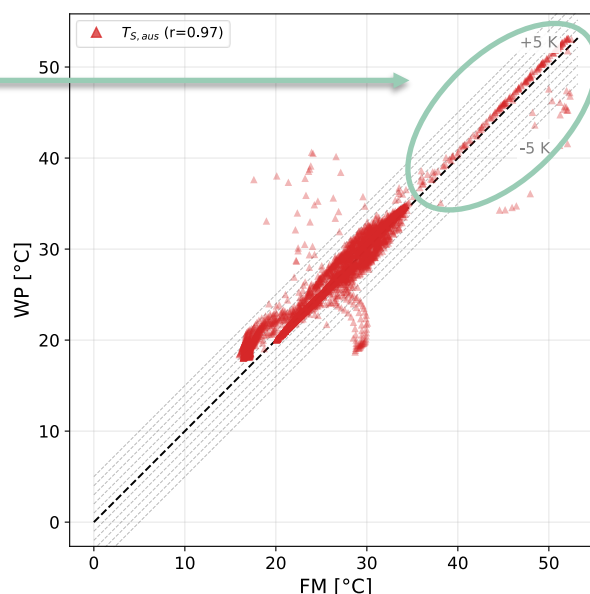


Abbildung 17: Vergleich der Senkentemperaturen nach Betriebszustandskorrektur (F017)

Die Differenz, die durch die Aufladung verursacht wurde, konnte korrigiert werden. Dazu wurde im Betriebszustand «Aufladung» einfach der entsprechende, korrekte Sensor zugewiesen. Es bleibt jedoch ein unbestimmter Einfluss durch den 50 Liter Vorlauf-Pufferspeicher zwischen den Sensoren (sofern der Sensor der Wärmepumpe vor dem Pufferspeicher installiert ist).

4.3.3 Betriebszustände

Bei diesem Messdatenvergleich ist auch interessant, ob sich die Abweichungen bei verschiedenen Betriebszuständen unterschiedlich ausprägen. Die Tabelle 11 stellt dar, welche Betriebszustände bei welcher Anlage via FM und via WP erfasst werden und wie oft diese zeitlich übereinstimmen (in Prozent).

Tabelle 11: Übersicht der vorhandenen Betriebszustandserkennungen je Anlage und bei Feldmessungen

	F016			F017			F024			F027		
	WP	FM	Übereinstimmung	WP	FM	Übereinstimmung	WP	FM	Übereinstimmung	WP	FM	Übereinstimmung
Heizen	✓	✓	44%	✓	✓	59%	✓	✓	64%	✓	✓	51%
Stillstand	✓	✓	29%	— ¹	✓	—	✓	✓	69%	✓	✓	93%
WW/Aufladung	✓	✓	4%	✓	✓	91%	✓	✓	44%	✓	✓	44%
Abtauung	✓	✓	15%	✓	✓	100%	— ²	✓	—	— ²	✓	—
Sperre/EVU	✓	—	—	✓	✓	91%	—	—	—	—	—	—
Kühlen	—	—	—	—	—	—	✓	—	—	—	—	—

¹ F017 WP: Stillstand nicht erkennbar, da event-basierte Datenspeicherung ohne explizites "AUS"-Ereignis (Forward-Fill trägt letzten aktiven Zustand weiter); betrifft 58% der Daten.

² F024/F027 WP: Abtauung nicht implementiert, da keine Information dazu verfügbar; betrifft 0.3% (F024) bzw. 1.4% (F027) der Daten.

Wichtig zu wissen ist hier, dass die Betriebszustände von FM abhängig von gewissen Messwerten erfasst werden. Beispielsweise wird die Abtauung anhand negativer Temperaturdifferenz zwischen Rücklauf und Vorlauf bei der WP erkannt. Das kann ungenau sein. Beispielsweise dann, wenn interne Speicher im Gehäuse der WP verbaut sind (bspw. bei F017). Die Abweichung bei der Abtauung der Anlage F017 ist auch wesentlich grösser als im normalen Betrieb, was diese Ungenauigkeit bestätigt. Die Betriebszustände aus WP basieren wahrscheinlich auf den Steuerungssignalen und sind damit wohl verlässlicher. Da jedoch diese nicht für alle Anlagen und Betriebszuständen gleichermassen vorhanden sind, wird als gemeinsame Basis der Betriebszustand von FM genommen. Der effektive Vergleich der Messdaten, aufgeschlüsselt nach Betriebszustand, ist in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht über die Abweichungen je Anlage, aufgeschlüsselt nach Betriebszustand mit Balkendiagrammen zur Darstellung der Grösse der Abweichung, eingefärbt nach Kategorie (grün: Zeit, gelb: elektrische Energie, rot: thermische Energie, lila: Durchfluss, blau: Temperaturen & Temperaturdifferenz)

Anlage	Betriebszustand	Anteil Zeit [%]	$\delta P_{el} V$ [%]	$\delta Q_{dot} H$ [%]	$\Delta V_{dot} S$ [l/h]	$\Delta T_{Q_{aus}}$ [K]	$\Delta T_{Q_{ein}}$ [K]	$\Delta T_{S_{aus}}$ [K]	$\Delta T_{S_{ein}}$ [K]	ΔT_{ausen} [K]	$\Delta \Delta T_{S}$ [K]
F016	Alle	-	21.1	9.3	-	0.3	0.9	1.6	1.1	0.6	1.1
	ohne Stillstand	100	11.1	5.1	-	0.4	0.6	1.3	1	0.7	0.5
	WW/Aufladung	5.5	5.3	3.8	-	0.3	0.6	1.7	1.5	0.7	0.4
	Heizen	27.2	12.2	4.9	-	0.4	0.6	1.3	0.9	0.7	0.5
	Abtauung	0.2	9.9	80.6	-	1.3	0.9	1.1	1.3	0.5	0.4
	Heizstab	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stillstand	67.2	81.5	32.5	-	0.2	1.2	1.7	1.2	0.6	1.5
F017	Alle	-	-	52.5	62.3	-	1.2	0.6	1.1	0.8	0.7
	ohne Stillstand	100	-	33.8	62.3	-	1.2	0.8	1.2	0.6	0.7
	WW/Aufladung	1.9	-	19.8	47.4	-	0.9	1.8	1.7	1	1.8
	Heizen	33.8	-	28.4	62.5	-	1.2	0.7	1.2	0.6	0.7
	Abtauung	0.1	-	293.9	34.6	-	2.7	1.3	1.2	0.4	1
	Heizstab	0.7	-	107.5	67.9	-	0.8	0.3	1	1.3	0.6
	Stillstand	60.4	-	183.8	62.4	-	1.2	0.6	1	0.9	0.7
F024	Alle	-	7.5	13	28	-	0.5	0.8	0.8	3.4	0.4
	ohne Stillstand	100	6	10.7	41.4	-	0.4	0.7	0.7	3.3	0.2
	WW/Aufladung	4.3	4.9	9.6	30.6	-	0.3	1.6	1	3.5	1
	Heizen	31.2	6.1	10.3	42.5	-	0.5	0.6	0.6	3.2	0.1
	Abtauung	0.2	5.2	21.4	47.3	-	0.8	1.4	1	2.9	0.7
	Heizstab	0	32.5	200.4	75.8	-	0.4	4.3	2	2.7	2.3
	Stillstand	64.3	17.3	25.5	16.2	-	0.5	0.8	0.9	3.6	0.6
F027	Alle	-	-	32.9	295.8	-	-	0.4	0.3	0.3	0.4
	ohne Stillstand	100	-	29.7	313.7	-	-	0.2	0.2	0.3	0.3
	WW/Aufladung	5.2	-	15.3	238.2	-	-	0.2	0.2	0.3	0.2
	Heizen	63.8	-	25.5	318.9	-	-	0.2	0.2	0.3	0.3
	Abtauung	1.3	-	796.3	321.6	-	-	0.4	0.1	0.4	0.5
	Heizstab	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stillstand	26.9	-	49.7	238.4	-	-	0.7	0.5	0.3	0.7

Ersichtlich ist, dass bei Abtauung, Heizstab und Stillstand die Übereinstimmung generell schlecht ist. Dies kann jedoch auch durch Betriebszustandszuordnung bedingt sein und nicht Messabweichungen. Daher ist keine generelle Aussage möglich, ob die Abweichungen von Betriebszustand abhängen. Die Datenlage ist dazu nicht ausreichend bezüglich Verlässlichkeit und Umfang.

4.3.4 Korrelationsanalyse

Untersucht wurde auch, ob Abweichungen mit Messwerten korrelieren. Als Messwertbasis wird hier FM verwendet. Beispielsweise kann so untersucht werden, ob die Abweichung mit dem Messwert eines Parameters zusammenhängt. In nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 18, Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 21 & Abbildung 22) sind mögliche Zusammenhänge mit den 1-min Werten (ohne Stillstand) für Anlage F017 dargestellt.

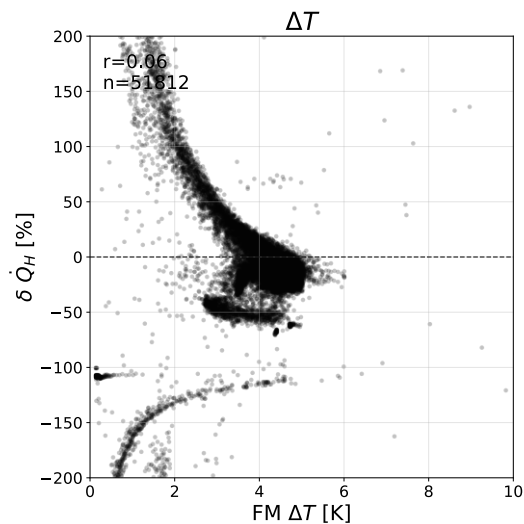


Abbildung 18: Abweichung der thermischen Leistung vs. Messwert der Temperaturdifferenz bei F017

Die Abweichung der thermischen Leistung ist bei kleineren Senken-Temperaturdifferenzen grösser. Dieser Effekt ist wohl nicht nur korrelativ, sondern auch kausal. Denn bei der Berechnung der Wärmeleistung ist die Temperaturdifferenz ein Faktor. Je kleiner die Temperaturdifferenzen, umso grösser ist auch der Einfluss der Messunsicherheit bei den Temperaturmessungen selbst. Abbildung 19 zeigt, dass die Abweichungen bei der Senkeneintrittstemperatur bei höheren Temperaturen grösser ist ($r=+0.63$).

Das gleiche gilt für die Durchflussmessung, dargestellt in Abbildung 20. Auch hier gibt es einen Trend der Abweichung in Richtung höherer Messwerte ($r=+0.67$).

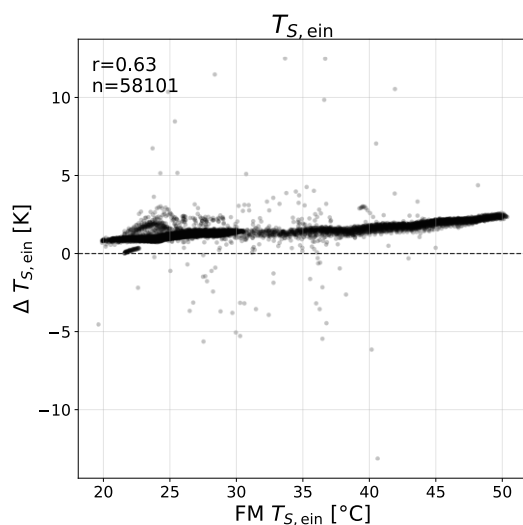


Abbildung 19: Abweichung der Senkeneintrittstemperatur vs. Messwert der Senkeneintrittstemperatur bei F017

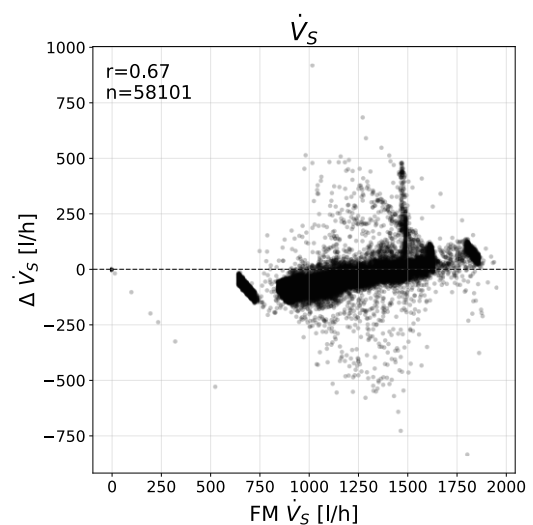


Abbildung 20: Abweichung des Senkendurchfluss vs. Messwert des Senkendurchfluss bei F017

Umgekehrt sieht es bei der Quelleneintritts- und bei der Aussentemperatur aus (Abbildung 21 & Abbildung 22). Diese haben einen negativen Trend ($r=-0.34$, bzw. $r=-0.51$).

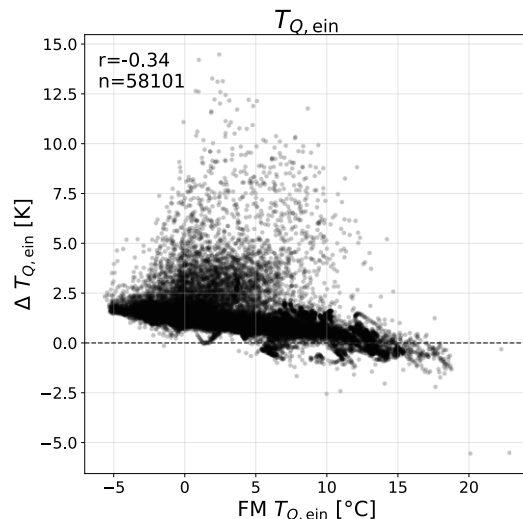


Abbildung 21: Abweichung der Quelleneintrittstemperatur vs. Messwert der Quelleneintrittstemperatur bei F017

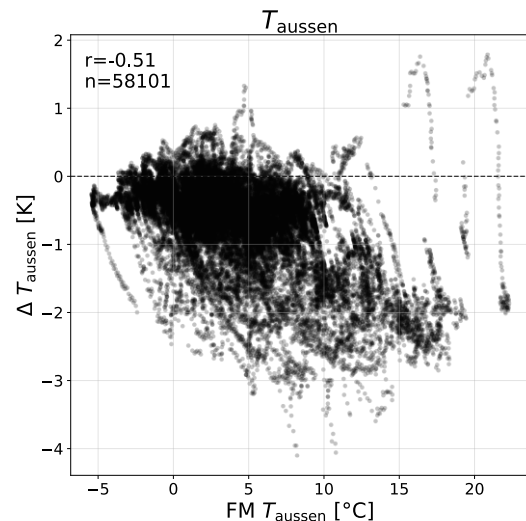


Abbildung 22: Abweichung der Aussentemperatur vs. Messwert der Aussentemperatur bei F017

Relevant ist auch die Betrachtung der Vergleich der Abweichungen gegeneinander. Also die beispielsweise die Abweichung der thermischen Leistung ($\delta \dot{Q}_H$) verglichen mit der Abweichung der Temperaturdifferenz ($\Delta \Delta T_S$), dargestellt in Abbildung 23. Dies weist auch hier auf einen Zusammenhang hin ($r=0.45$). Ebenfalls zeigt sich eine Korrelationen zwischen der Abweichung der Vorlauftemperatur ($\Delta T_{S,aus}$) und der Abweichung der thermischen Leistung ($r=0.75$) (Abbildung 24). Und bei der Rücklauftemperatur ($\Delta T_{S,ein}$) zeigt sich, dass die Abweichung in fast allen Betriebspunkten mindestens ca. 0.8K beträgt, ohne sichtbaren Zusammenhang mit der Abweichung der thermischen Leistung (Abbildung 25). Dies alles beeinflusst dann auch die Berechnung der Temperaturdifferenz und deren Abweichung. Diese Abweichungen spiegeln sich auch in der effektiven thermischen Leistung wider, denn diese ist anhand von Durchfluss, Dichte, spezifischer Wärmekapazität und Temperaturdifferenz berechnet.

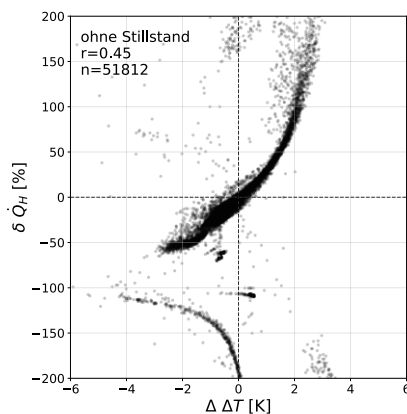


Abbildung 23: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Temperaturdifferenz bei F017

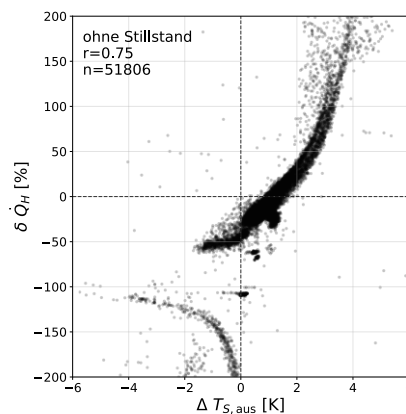


Abbildung 24: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Senkenaustrittstemperatur bei F017

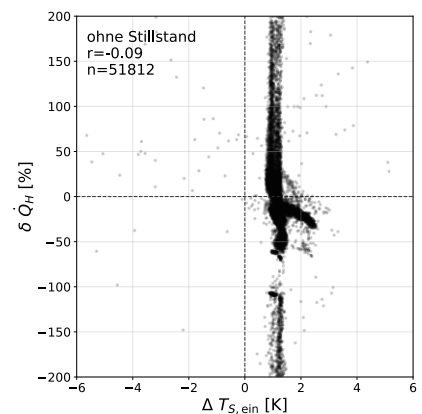


Abbildung 25: Abweichung der thermischen Leistung vs. Abweichung der Senkeneintrittstemperatur bei F017

Der Vergleich der Abweichungen inkl. der Berechnung des Korrelationskoeffizienten r wurde für alle Anlagen und Parameter durchgeführt und ist im Anhang beigefügt.

4.4 Übergreifende Erkenntnisse zum Datenzugang

Die untersuchten Anlagen zeigen, dass der Datenzugang hersteller- und anlagenspezifisch organisiert ist. Es wurden bei fünf Anlagen vier unterschiedliche Zugangsarten beobachtet: Web-Portal mit CSV-Export (2x), Web-Portal mit herstellerspezifischem Zwischenformat, lokale SD-Karte mit proprietärem Datenformat und Gateway/Modbus-Schnittstelle. Diese Unterschiede betreffen nicht nur den Zugriff selbst, sondern auch die Speicherfrist, die Anzahl gleichzeitig verfügbarer Parameter, die Exportlogik, die notwendige Software und den Aufwand zur Überführung in ein analysierbares Datenformat.

Bei F016 und F027 liegen die exportierten Daten grundsätzlich als CSV-Dateien vor. Einschränkungen entstehen dort vor allem durch Parameterlimits, Monatsdownloads und die vorgängige Auswahl der zu loggenden Parameter. Bei F017 ist der Zugriff über ein Web-Portal möglich, die Weiterverarbeitung erfordert jedoch zusätzliche Schritte über herstellerspezifische Software oder eine vergleichbare Verarbeitung der «*.dta»-Dateien. Bei F024 ist kein Fernzugriff vorhanden; der Datenzugang erfolgt lokal über eine SD-Karte im Gerätegehäuse, sodass zuerst das Gehäuse entfernt werden musste. Zudem musste das proprietäre Datenformat dekodiert werden. F019 ergänzt diese Fälle um eine Gateway/Modbus-Variante, bei der die Schnittstelle zwar vorgesehen war, im Test aber keine verwertbaren Werte lieferte.

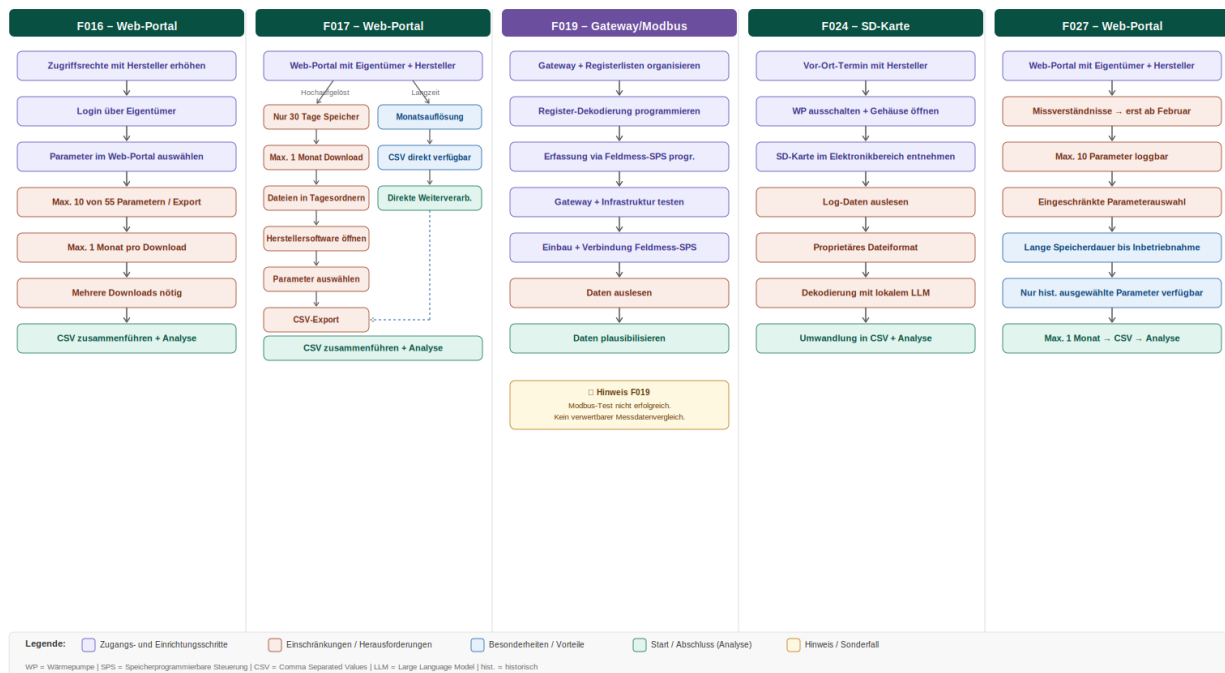


Abbildung 26: Flussdiagramm für Datenzugang (alle Anlagen) (grösser dargestellt im Anhang 9.3)

Aus den untersuchten Fällen ergeben sich mehrere Punkte, die für zukünftige Monitoringkonzepte relevant sind. Erstens sollten Datenzugang und Datenqualität getrennt betrachtet werden: Eine vorhandene Schnittstelle oder ein vorhandener Datenspeicher bedeutet nicht automatisch, dass die Daten für einen Messdatenvergleich leicht zugänglich sind. Zweitens ist die Vergleichbarkeit zwischen Anlagen durch unterschiedliche Parameterumfänge, Sensorik, Exportformate und Bilanzgrenzen begrenzt. Drittens ist der manuelle Aufwand für Aktivierung, Export, Dekodierung und Zusammenführung eine wesentliche Hürde für die praktische Nutzbarkeit interner Monitoring Daten.

Für eine reproduzierbare Nutzung interner Wärmepumpendaten wären aus Sicht der Analyse insbesondere folgende Eigenschaften hilfreich:

- dokumentierte Parameterlisten,

- eindeutige Einheiten und Skalierungen,
- maschinenlesbare Exportformate wie CSV oder eine dokumentierte API,
- nachvollziehbare Zeitstempel,
- ausreichend lange Speicherfristen,
- frei wählbare Parameterlisten,
- dokumentierte Bilanzgrenzen
- Prüfung der Ausgabewerte

Diese Punkte beschreiben keine Bewertung einzelner Anlagen, sondern die beobachteten Voraussetzungen, damit interne Monitoring Daten systematisch mit unabhängigen Feldmessdaten verglichen werden können. Damit eine abschliessende Aussage gemacht werden kann, muss zuerst eine Bewertungslogik mit den notwendigen Messstellen und Sensitivitäten festgelegt werden.

5. Anwendung der Methoden von Brudermüller et al. (2025) auf die untersuchten Anlagen

Brudermüller et al. (2025) entwickelten anhand von Betriebsdaten von 1'023 Wärmepumpen Methoden, mit denen sich die Effizienz und die Dimensionierung installierter Anlagen aus realen Betriebsdaten beurteilen lassen. Der Referenzdatensatz stammt von einem Hersteller, umfasst Anlagen in zehn europäischen Ländern und enthält tägliche Aggregationen aus bis zu zwei Betriebsjahren. Das vorliegende Kapitel führt keinen Messsystem- oder Ländervergleich im statistischen Sinn durch. Es zeigt exemplarisch, wie die dort vorgeschlagenen Auswertungen sich auf die fünf Schweizer Anlagen übertragen lassen.

5.1 Datengrundlage und methodische Übertragung

Alle Kennwerte wurden für den gemeinsamen Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2026 berechnet. Die Abbildungen basieren ausschliesslich auf den unabhängigen Feldmessungen der Ostschweizer Fachhochschule (WPFeld), da diese den vollständigeren und messtechnisch klarer definierten Datensatz darstellen. Die internen Wärmepumpendaten (WP) werden ergänzend tabellarisch ausgewiesen.

Der tägliche COP entspricht der thermischen Heizenergie dividiert durch die elektrische Energie innerhalb der jeweils verfügbaren Bilanzgrenze. Die SCOP-Berechnungen beziehen sich ausschliesslich auf die Raumheizung. Für den SCOP wurde zunächst je Anlage eine lineare Heizkurve und anschliessend ein multiples lineares COP-Modell aus Aussen- und Vorlauftemperatur angepasst. Die Modellwerte bei -7 , $+2$, $+7$ und $+12$ °C wurden mit 24, 320, 326 und 169 gewichtet. Die vier Zahlen entsprechen den Bin-Stunden der ausgewählten Temperaturklassen aus Tabelle A.2. Die vollständige normative Berechnung enthält mehr Temperaturklassen.

Für die Auslastungsanalyse für die Feldmessdaten wird die Verdichterzahl genutzt. Da in den Herstellerdaten keine direkt vergleichbare Verdichterauslastung vorliegt, wurde ein elektrischer Auslastungsproxy gebildet: Die 15-Minuten-Werte von P_{el_V} wurden je Anlage durch das 95. Perzentil von P_{el_V} während aktiver Wärmezeugung ($Q_H > 0$) dividiert. Tagesmittel dieses Proxys wurden mittels linearer Regression gegen die Tagesmitteltemperatur modelliert. Die Werte bei -10 °C und 16 °C sind Modellvorhersagen und werden auf 0–100 % begrenzt.

Tabelle 1 zeigt, welche Eingangsdaten für die drei untersuchten Anwendungen benötigt werden. Nicht jede Auswertung stellt dieselben Anforderungen an die Datenverfügbarkeit.

Tabelle 13. Erforderliche Eingangsdaten für die Übertragung der Methoden von Brudermüller et al. (2025).

Eingangsdaten	COP-Auswertung	Saisonaler Effizienzkennwert	Auslastungs- und Dimensionierungsanalyse
Thermische Heizenergie bzw. Heizleistung	erforderlich	erforderlich	zur Erkennung aktiver Wärmezeugung
Elektrische Energie bzw. Verdichterleistung	erforderlich	erforderlich	erforderlich für den verwendeten Proxy
Aussentemperatur	nicht zwingend	erforderlich	erforderlich
Vorlauftemperatur	nicht zwingend	erforderlich	nicht erforderlich
Betriebszustand Raumheizung	erforderlich	erforderlich	empfohlen
Verdichterzahl oder Modulationsgrad	nicht erforderlich	nicht erforderlich	in der Originalmethode erforderlich

Als Referenzdaten dienen die in Brudermüller et al. (2025) veröffentlichten Betriebsdaten von 1'023 Wärmepumpen in Wohngebäuden aus zehn europäischen Ländern. Für die Referenz in der vorliegenden Studie werden davon die 890 Luft/Wasser-Wärmepumpen betrachtet. Diese stammen von einem einzelnen Hersteller, weisen installierte Heizleistungen von etwa 4 bis 14 kW auf und wurden zwischen März 2021 und

April 2023 über einen Zeitraum von bis zu 777 Tagen erfasst. Für die Analysen wurden Tageswerte aus hochaufgelösten Betriebsdaten gebildet; berücksichtigt wurden insbesondere elektrische und thermische Energie, Aussen- und Vorlauftemperatur sowie der jeweilige Betriebszustand. Je nach Auswertung konnten aufgrund von Datenverfügbarkeit und Modellgüte etwa 600 bis 700 Anlagen berücksichtigt werden.

5.2 Beobachtete tägliche COP-Werte

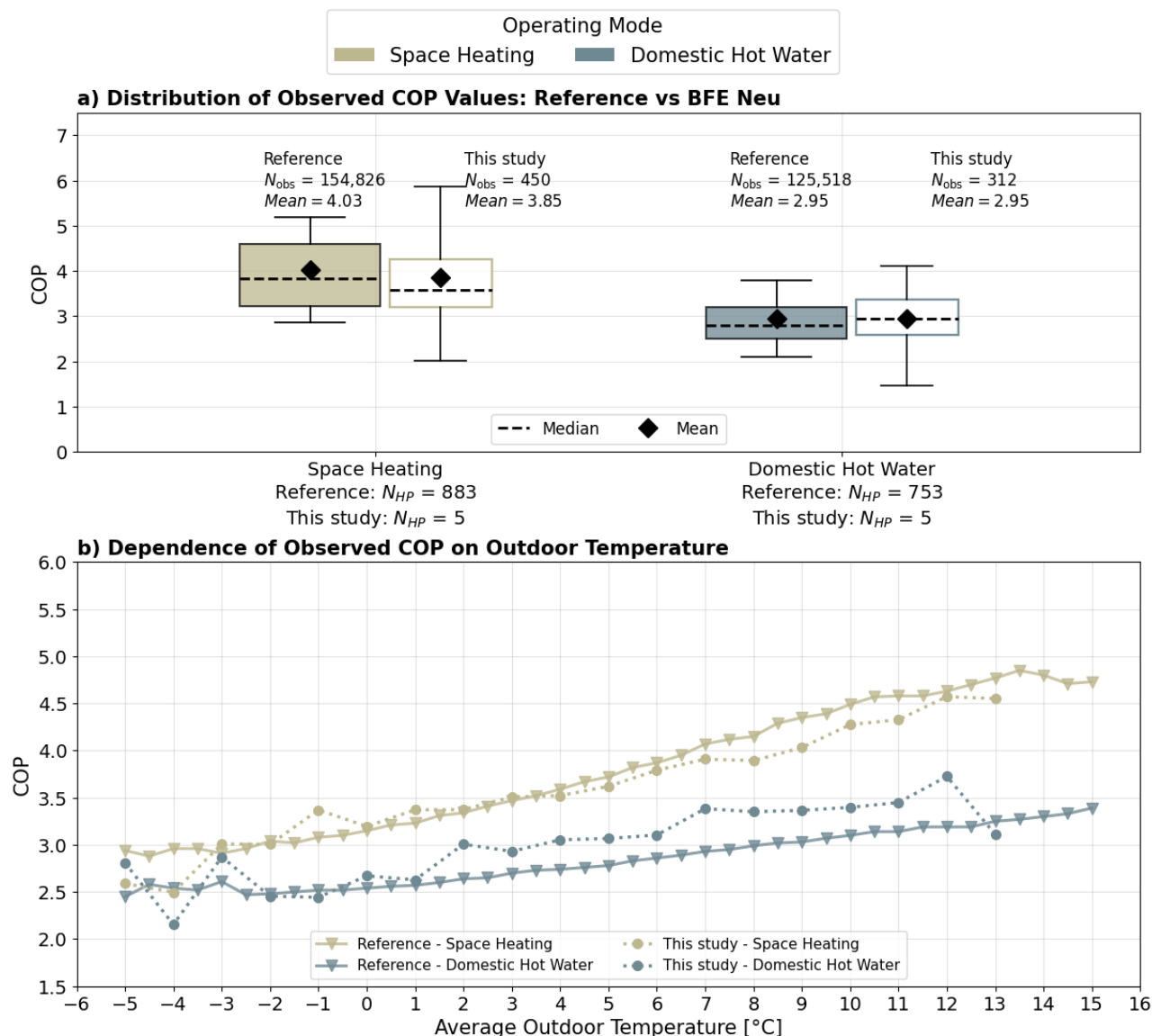


Abbildung 27: Verteilung und Aussentemperaturabhängigkeit der beobachteten täglichen COP-Werte der Feldmessungen im Vergleich zur Referenzverteilung von Brudermüller et al. (2025).

Im Raumheizbetrieb liegt der über alle verfügbaren Anlagentage mittlere COP der fünf Anlagen bei 3.85 und damit nahe am Mittelwert der Luft/Wasser-Wärmepumpen im Referenzdatensatz von 4.03. Für die Warmwasserbereitung sind die entsprechenden Mittelwerte für beide Datensätze nahezu gleich (2.95). Auch die Verteilungen überlappen weitgehend. Dies zeigt, dass die fünf Anlagen hinsichtlich der beobachteten COP-Werte grundsätzlich in einem für die Referenzflotte plausiblen Bereich liegen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Stichprobengrößen - 450 gegenüber 154'826 Tagesbeobachtungen im Heizbetrieb - ist daraus jedoch weder Gleichwertigkeit noch Repräsentativität abzuleiten.

In beiden Datensätzen steigt der Heiz- und Warmwasser COP mit zunehmender Aussentemperatur, während der COP der Warmwasserbereitung auf tieferem Niveau liegt. Dieses Muster ist physikalisch plausibel. Die punktuellen Schwankungen der fünf Anlagen an den Rändern des Temperaturbereichs sind vor allem durch die geringe Zahl verfügbarer Tage je Temperaturklasse zu erklären und sollten nicht als systematische Abweichung von der Referenzkurve interpretiert werden.

5.3 Modellbasierter saisonaler COP

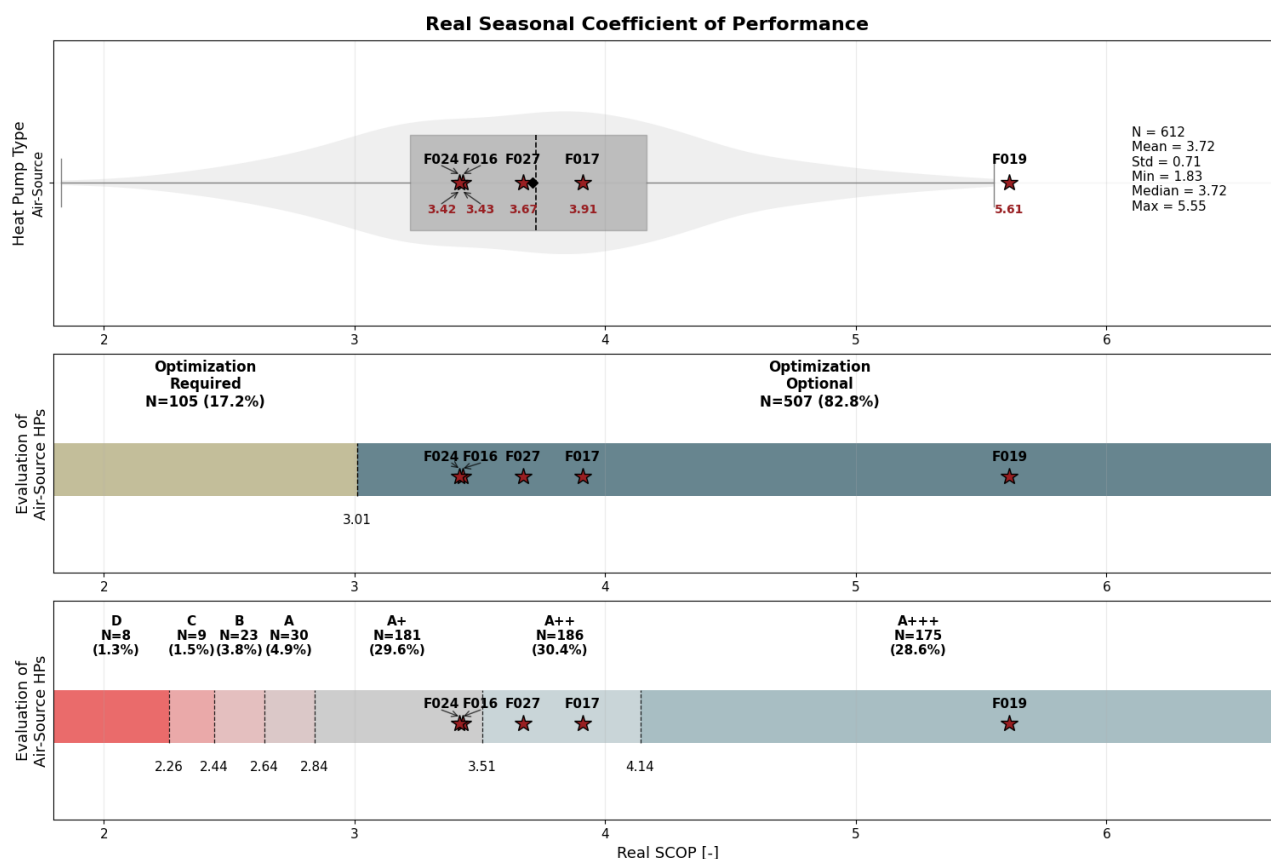


Abbildung 28: Verteilung und Aussentemperaturabhängigkeit der beobachteten täglichen COP-Werte der Feldmessungen im Vergleich zur Referenzverteilung von Brudermüller et al. (2025).

Die modellierten realen SCOP-Werte der Feldmessungen liegen zwischen 3.42 und 5.61. Vier Anlagen befinden sich innerhalb der Verteilung der 612 Luft/Wasser-Wärmepumpen der Referenzanalyse; F019 liegt mit 5.61 knapp oberhalb des dort ausgewiesenen Maximums von 5.55. Der Referenzmittelwert beträgt 3.72.

F024 und F016 liegen in der Klasse A+, F027 und F017 in A++ und F019 in A+++. Diese Kategorien dienen ausschliesslich der methodischen Illustration: Sie wurden aus Prüfanforderungen für Produkte abgeleitet und stellen keine verbindlichen Grenzwerte für den Feldbetrieb dar. Nach dem von Brudermüller et al. (2025) aus europäischen Produkthanforderungen abgeleiteten Schema liegt keine der fünf Anlagen unter dem SCOP Schwellenwert von 3.01, ab dem eine Optimierung als erforderlich eingestuft wird.

Die Aussagekraft der modellierten SCOP-Werte hängt wesentlich von der Güte beider aufeinander aufbauenden Modelle sowie vom beobachteten Temperaturbereich ab. Für F016, F019, F024 und F027 zeigen sowohl die Heizkurvenmodelle mit $R^2 = 0.89 - 0.96$ als auch die COP-Modelle mit $R^2 = 0.87 - 0.99$ eine hohe Anpassungsgüte. Bei F017 fallen dagegen sowohl die Heizkurve ($R^2 = 0.60$) als auch das COP-Modell ($R^2 = 0.58$) deutlich schwächer aus. Der daraus abgeleitete SCOP ist daher für F017 stärker von den Modellannahmen abhängig und entsprechend vorsichtiger zu interpretieren. Unabhängig davon erfordert der auf drei Wintermonate begrenzte Messzeitraum für einzelne Temperaturstützstellen Vorhersagen am Rand oder ausserhalb des tatsächlich beobachteten Temperaturbereichs. Das Bestimmtheitsmass beschreibt

lediglich, wie gut die vorhandenen Messwerte durch das jeweilige Modell erklärt werden; es quantifiziert nicht die zusätzliche Unsicherheit solcher Extrapolationen.

5.4 Temperaturabhängige Auslastung und Dimensionierung

Für die Bewertung der Anlagendimensionierung wird die modellierte Auslastung bei -10 °C und 16 °C betrachtet. Während -10 °C den Auslegungspunkt für das durchschnittliche Klima repräsentiert, entspricht 16 °C der in EN 14825 angesetzten Heizgrenze und dient damit als Plausibilitätsprüfung, ob bei sehr geringer Raumheizlast weiterhin eine hohe Wärmepumpenauslastung auftritt. Da die Verdichterauslastung in der Referenzstudie nicht nach Raumheizung und Warmwasserbereitung getrennt werden konnte, kann eine erhöhte Auslastung bei 16 °C sowohl auf Warmwasserbetrieb als auch auf eine mögliche knappe Dimensionierung hinweisen.

Die linearen Modelle des elektrischen Auslastungsproxies weisen R^2 -Werte von 0.81 bis 0.96 auf. Bei -10 °C werden Auslastungen zwischen 45.5 % und 100 % vorhergesagt; bei 16 °C liegen die begrenzten Vorhersagen nahe 0 % (Tabelle 14 und Abbildung 29). Nach der in der Referenzstudie verwendeten Screening-Logik werden F016, F017, F024 und F027 als plausibel dimensioniert eingeordnet. F019 unterschreitet bei -10 °C die 50%-Grenze und wird deshalb als potenziell überdimensioniert markiert. Diese Einordnung ist als Hypothese für eine vertiefte Prüfung zu verstehen. Sie beruht auf einem Ersatzsignal, auf einer linearen Extrapolation und auf nur drei Wintermonaten; eine belastbare Dimensionierungsdiagnose würde ein direktes Verdichterdrehzahl- oder Leistungsbegrenzungssignal sowie Messdaten nahe der Auslegungstemperatur erfordern.

Tabelle 14. Modellierte Wärmepumpenauslastung in Abhängigkeit von der Aussentemperatur sowie daraus abgeleitete orientierende Bewertung der Anlagendimensionierung auf Basis der Feldmessdaten.

Anlage	Datenquelle	P95 aktiv P _{el,V} [kW]	R2	Wärmepumpen- auslastung bei -10 °C [%]	Wärmepumpen- auslastung bei 16 °C [%]	Bewertung der Wärmepumpen- auslastung
F016	WPFeldme	4.13	0.91	81.50	0.00	normal
F017	WPFeldme	2.16	0.81	80.19	0.00	normal
F019	WPFeldme	2.51	0.84	45.55	0.00	möglicherweise überdimensioniert
F024	WPFeldme	1.99	0.95	93.47	0.99	normal
F027	WPFeldme	5.74	0.96	100.00	0.02	normal

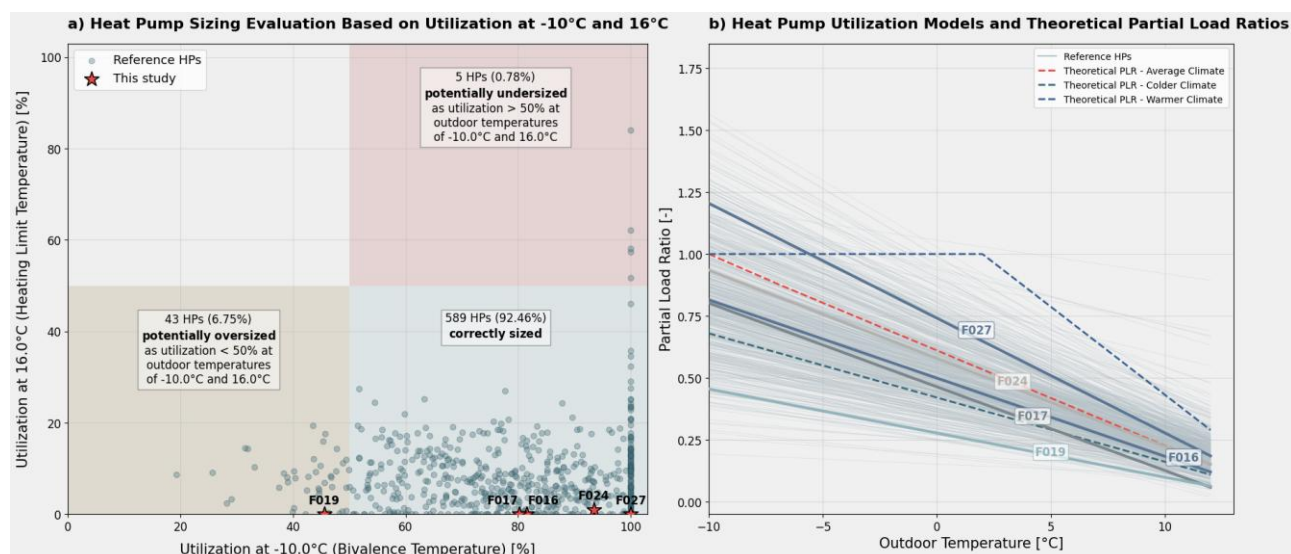


Abbildung 29. Einordnung der Wärmepumpendimensionierung anhand der temperaturabhängigen Auslastung.

5.5 Ergebnisse auf Basis interner Wärmepumpendaten

Die internen WP-Daten werden ergänzend ausgewiesen, um zu prüfen, inwieweit sich dieselben Kennwerte mit den derzeit zugänglichen Herstellerdaten berechnen lassen. Eine vollständige Auswertung war nur für F016 und F024 möglich. Bei den übrigen Anlagen fehlten insbesondere die für die Energieberechnung erforderlichen Signale. Die Ergebnisse aus den Feldmessdaten und den internen WP-Daten sind in Tabelle 15 gegenübergestellt.

Bei F016 liegen die aus den internen WP-Daten berechneten Effizienzwerte durchgehend über den Ergebnissen der Feldmessung. Wie Tabelle 15 zeigt, beträgt der mittlere COP im Heizbetrieb 3.62 ± 0.44 gegenüber 3.27 ± 0.50 und ist damit rund 11 % höher. Auch bei der Warmwasserbereitung ergibt sich mit 3.24 ± 0.44 gegenüber 2.84 ± 0.37 ein um rund 14 % höherer mittlerer COP. Entsprechend liegt der modellierte SCOP der internen Daten mit 3.80 über dem Feldmesswert von 3.43. Die modellierte Auslastung bei -10 °C fällt mit 77.2 % dagegen um 4.3 Prozentpunkte niedriger aus als auf Basis der Feldmessdaten mit 81.5 %.

Für F024 zeigt Tabelle 15 eine nahezu vollständige Übereinstimmung der mittleren COP-Werte im Heizbetrieb mit jeweils 3.35. Auch beim Warmwasser-COP ist die Differenz mit 2.68 ± 0.39 gegenüber 2.65 ± 0.46 gering. Dennoch ergibt sich aus den internen Daten ein deutlich höherer modellierter SCOP von 4.00 gegenüber 3.42 auf Basis der Feldmessung. Gleichzeitig liegt die modellierte Auslastung mit 84.0 % um 9.5 Prozentpunkte unter dem Feldmesswert von 93.5 %.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 15 zeigt, dass eine gute Übereinstimmung der mittleren COP-Werte nicht zwangsläufig zu vergleichbaren modellierten SCOP- oder Auslastungswerten führt. Diese Kennwerte beruhen nicht nur auf den absoluten Energiewerten, sondern auch auf den geschätzten Zusammenhängen mit der Aussen- und Vorlauftemperatur. Unterschiede in der zeitlichen Datenabdeckung, den Bilanzgrenzen, der Betriebszustandserkennung sowie den herstellerspezifischen Mess- und Berechnungsverfahren können deshalb die Modellparameter und insbesondere die Vorhersagen an festgelegten Temperaturpunkten beeinflussen. Eine gute Modellanpassung innerhalb eines Datensatzes gewährleistet daher noch keine Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Messsystemen.

Tabelle 15. Vergleich der aus den Feldmessdaten (WPFeld) und den internen Wärmepumpendaten (WP) berechneten Effizienz- und Auslastungskennwerte für die Anlagen F016 und F024.

	F016		F024	
	WPFeld	WP	WPFeld	WP
COP (Heizen)	3.27 ± 0.50	3.62 ± 0.44	3.35 ± 0.55	3.35 ± 0.59
COP (Warmwasser)	2.84 ± 0.37	3.24 ± 0.44	2.65 ± 0.46	2.68 ± 0.39
SCOP	3.43	3.80	3.42	4.00
Auslastung	81.5%	77.2%	93.5%	84.0%

5.6 Einordnung gegenüber Brudermüller et al. (2025)

Die Fallstudie zeigt, dass die von Brudermüller et al. vorgeschlagenen Analysebausteine - deskriptive COP-Auswertung, temperaturbereinigter saisonaler Effizienzindikator und auslastungsbasierte Dimensionierungsprüfung - grundsätzlich auch auf Daten weiterer Hersteller anwendbar sind. Der Mehrwert liegt nicht in einem direkten Vergleich der fünf Anlagen mit der grossen Referenzflotte, sondern im Nachweis, dass aus standardisierten Betriebsdaten automatisierbare und für Betreiber oder Installateure interpretierbare Kennwerte abgeleitet werden könnten. Die Feldmessdaten dienen dabei als belastbare Referenz, um die Berechnung und die Sensitivität gegenüber unterschiedlichen Messsystemen zu prüfen.

Für eine skalierbare Anwendung sind als nächste Schritte (i) ein herstellerübergreifendes Mindestdatensatz mit eindeutigen Definitionen der Energiesignale, Betriebszustände und Bilanzgrenzen, (ii) ein direkt vergleichbares Auslastungssignal, vorzugsweise Verdichterdrehzahl oder freigegebene Maximalleistung, (iii) ein vollständiger Heizperioden-Datensatz mit ausreichenden Beobachtungen nahe der Auslegungs- und Heizgrenztemperatur, (iv) einheitliche Kriterien für Datenvollständigkeit, physikalische Plausibilität und Modellgüte sowie (v) eine Validierung der internen Daten an einer grösseren, herstellerübergreifenden

Teilstichprobe mit unabhängiger Messtechnik erforderlich. Erst danach sollten feste Schwellenwerte zur Effizienz- oder Dimensionierungsbewertung auf interne Flottendaten angewendet werden. Die fünf Anlagen stellen somit einen Machbarkeitsnachweis dar, nicht eine statistisch belastbare Bewertung der Schweizer Wärmepumpenpopulation.

6. Zusammenfassung

Der Vergleich der beiden Messdatensätze (intern vs. Feldmessungen) zeigt ein gemischtes Bild. Die Übereinstimmung von Messwerten kann sehr gut, aber auch sehr schlecht sein. Weiter ist der Umfang der verfügbaren Daten je nach Anlage sehr gering bis sehr umfangreich. Auch der Aufwand bei der Datenhandhabung unterscheidet sich stark, wobei dieser generell eher hoch ist.

Aufgrund dieser sehr unterschiedlichen Resultate je nach Fragestellung, Anlage oder sogar je nach Parameter ist ein einheitliches Fazit schwierig. Nachfolgend werden die zu beantwortenden Fragen aus Kapitel 1.1 noch einmal hervorgebracht und versucht eine Antwort zu geben.

6.1 Wie gross sind die Abweichungen bei zentralen Kenngrössen?

- | | | | | |
|-------------------------|---------|-----|---------|--|
| ➤ Temperaturen: | 0.3 K | bis | 3.4 K | mittl. Abs. Abweichung (MAE), Anhang 9.4.4 |
| ➤ Thermische Energie: | - 34.7% | bis | + 0.1 % | Summenabweichung (4 Monate), Tabelle 10 |
| ➤ Elektrische Energie*: | - 10.5% | bis | - 4.6 % | Summenabweichung (4 Monate), Tabelle 10 |
| ➤ COP (Heizen)**: | +/- 0 % | bis | + 10 % | Methode Brudermüller et al. (2025), Tabelle 15 |

**Bei elektrischer Energie ist nur der Verdichter enthalten.*

6.2 Sind die Abweichungen systematisch oder zufällig?

- Beides kommt vor. Bei F016 und F024 dominiert die zufällige Streuung um eine gute mittlere Übereinstimmung. Bei F017 ist die Abweichung der thermischen Energie klar systematisch und lässt sich auf Durchfluss und Senkentemperaturen zurückführen (Anhang C.1).
- Eine generelle Aussage über alle Anlagen hinweg ist nicht möglich, die Unterschiede sind zu gross.

6.3 Welche Rolle spielen zeitliche Auflösung, Bilanzgrenzen und Betriebszustände?

- Je feiner die zeitliche Auflösung, desto grösser die Streuung. Auf Tagesbasis ist die Streuung vernachlässigbar, Summenvergleiche über längere Zeiträume sind robust.
- Bilanzgrenzen basieren mangels Dokumentation auf Annahmen. Ohne Erfassung aller relevanten elektrischen Verbraucher (inkl. Heizstab und Hilfsenergien) ist keine Beurteilung der Systemeffizienz möglich, sondern nur der Geräteeffizienz.
- Abweichungen unterscheiden sich je Betriebszustand. Dies ist primär auf die unterschiedliche Betriebszustandserkennung zurückzuführen, die Aufschlüsselung ist daher nur begrenzt aussagekräftig.

6.4 Welche Daten sind über die internen Systeme zugänglich?

- Thermische Energie/Leistung, Aussentemperatur und Senkentemperaturen sind bei allen Anlagen vorhanden oder berechenbar. Der Umfang variiert stark (10 bis 109 gespeicherte Parameter), ebenso Format, Speicherdauer und Exportmöglichkeiten.

6.5 Welche Anwendungen sind mit internen Daten belastbar möglich?

- Diese Frage kann nicht abschliessend beantwortet werden. Informative Anwendungen (Betriebsüberwachung, Plausibilisierung, Trendbeobachtung) sind heute bereits möglich, die erreichbare Genauigkeit ist jedoch anlagenabhängig.
- Für Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen (Effizienznachweis, Garantiefälle, etc.) ist vorgängig zu prüfen, ob die Einschätzung gegenüber den festgestellten Abweichungen robust ist. Andernfalls bleibt kalibrierte externe Messinfrastruktur notwendig.

6.6 Fazit

Interne Wärmepumpendaten sind kein Ersatz für kalibrierte Feldmessungen, aber eine bereits vorhandene und potenziell skalierbare Datenbasis. Ihre Nutzbarkeit wird derzeit weniger durch Messqualität als durch Datenzugang, an fehlender Dokumentation (Parameter, Einheiten, Bilanzgrenzen) und durch manuellen Aufwand behindert. Mit einheitlichen Exportformaten, dokumentierten Bilanzgrenzen und geprüften Ausgabewerten (z.B. mit Kalibration am Prüfstand) könnten interne Daten eine gute Grundlage für grossflächige Felduntersuchungen und Monitoring bilden. Dabei sollte die unabhängige Kontrolle im Feld aber nicht vernachlässigt werden.

7. Schlussfolgerung

Die Untersuchungsfragen (Kapitel 1.1) lassen sich nicht einheitlich beantworten, da die Unterschiede zwischen den Anlagen bezüglich Datenqualität, Datenumfang und Datenzugang zu gross sind. Die Resultate zeigen aber, dass interne Wärmepumpendaten eine gute Übereinstimmung mit kalibrierten Feldmessungen erreichen können. Damit die Daten verlässlich und über verschiedenste Fabrikate hinweg nutzbar werden, sind folgende grundlegende Punkte weiter zu verbessern:

- Datenhandhabung: CSV als Standardformat oder eine dokumentierte API, Export aller Parameter über frei wählbare Zeiträume, nachvollziehbare Zeitstempel, ausreichende Speicherfristen.
- Dokumentation: vollständige Parameterlisten mit Einheiten und Skalierung, Definition der Messstellen und Bilanzgrenzen, Angabe, welche Werte gemessen und welche berechnet werden.
- Vereinheitlichung: Bilanzgrenzen gemäss BFE-Feldmessungen (Schalenmodell vom Verdichter-COP bis zum System-Nutzungsgrad), einheitliche Parameterbezeichnungen, definierte Datenschnittstellen.

Ansätze in diese Richtung bestehen bereits. Das Schweizer Label «SmartGridready» verlangt bei der Produktdeklaration eine dokumentierte, standardisierte Schnittstellenbeschreibung, unter anderem für Wärmepumpen (<https://smartgridready.ch/>). Es deckt allerdings vorwiegend die Steuer- und Kommunikationsschnittstellen ab, nicht die Messdaten, Parameter und Bilanzgrenzen. Weiter sollen im Verlauf des Jahres 2026 die Daten der Feldmessungen mitsamt umfangreicher Dokumentation veröffentlicht werden. Diese kann allenfalls als Vorlage für Bilanzgrenzen und Parameterbezeichnungen dienen.

Für die Beurteilung der Systemeffizienz müssen zusätzlich zum Verdichter mindestens die elektrischen Heizelemente erfasst werden. Relevant sind zudem Steuerung, Ventilatoren und Pumpen. Ohne diese Hilfsenergien wird nur die Effizienz des Gerätes gemessen, nicht jene der Heizungsanlage.

Als nächster Schritt sollte geklärt werden, welche Parameter für die vorgesehenen Anwendungen (Monitoring, Betriebsoptimierung, Qualitätssicherung) notwendig sind und ob diese mit den verfügbaren internen Daten abgedeckt werden können. Mögliche Monitoringvarianten (bezüglich Datenerfassung) werden in einem parallellaufenden Projekt skizziert [Genkinger et al., 2026].

Weiter muss beachtet werden, dass die manuelle Analyse einzelner Anlagen nicht auf eine grosse Anzahl von Anlagen skalierbar ist; einheitliche Datenzugänge und Dokumentationen, sowie möglicherweise automatisierte Auswertungen, sind dafür die Voraussetzung. Ansonsten besteht das Risiko, dass der Aufwand für die Aufbereitung und Interpretation der Daten, die Installationskosten eines externen Messsystems übersteigen.

8. Literaturverzeichnis

- Arpagaus, C.** Berthold, M., & Eschmann, M. (2017). WP-Feldmessung: Wärmepumpen-Anlagen 2015–2018 (Auswertung verlängert bis Dezember 2019) [Jahresbericht]. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB).
https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2017_jahresbericht_feldmessungen.pdf
- Bauer, C., & Imhof, N.** (2026). *Verbesserungspotenziale im Schweizer Wärmepumpenmarkt*. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, 2026
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/energieeffizienz/umgebungswaerme.exturl.html/aH/R0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2Y2ZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxxvYWQvMTI2OTc=.html>
- Bernal, S.** Berthold, M., Bertsch, S., & Eschmann, M. (2023). Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen: Heizsaison 2022/23 [Jahresbericht]. Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule.
https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2023_jahresbericht_feldmessungen.pdf
- Berthold, M.** Uhlmann, M., Bertsch, S., & Eschmann, M. (2022). Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen: Heizsaison 2021/22 [Jahresbericht]. Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule.
https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2022_jahresbericht_feldmessungen.pdf
- Brudermüller, T.** Potthoff, U., Fleisch, E., Wortmann, F., & Staake, T. (2025). Estimation of energy efficiency of heat pumps in residential buildings using real operation data. *Nature Communications*, 16(1), Article 58014. <https://www.nature.com/articles/s41467-025-58014-y>
- Erb, M.** Hubacher, P., & Ehrbar, M. (2004). Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (FAWA) 1996–2003 [Schlussbericht]. Dr. Eicher + Pauli AG; Hubacher Engineering; Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE).
<https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=63566&Load=true>
- Hubacher, P. & Bernal, C.** (2014). QS-WP/QP: Fortsetzung Feldmonitoring von Wärmepumpenanlagen (2011–2013) [Schlussbericht]. Hubacher Engineering. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE).
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/versorgung/energieeffizienz/umgebungswaerme.exturl.html/aH/R0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2Y2ZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxxvYWQvNzY5MA==.html>
- Nani, M. & Hubacher, P.** (2007). Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und ausgewählten Feldmessungen: Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten [Schlussbericht]. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs; Hubacher Engineering. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE). <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=63204&Load=true>
- Prinzing, M.** Berthold, M., & Eschmann, M. (2018). WP-Feldmessungen: Jahresbericht 2018 – Feldmessungen Wärmepumpen-Anlagen 2015–2018 (Auswertung verlängert bis Dezember 2019) [Jahresbericht]. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB).
https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2018_jahresbericht_feldmessungen.pdf
- Prinzing, M.** Berthold, M., Bertsch, S., & Eschmann, M. (2019). Feldmessungen Wärmepumpen-Anlagen 2015–2018 (Auswertung verlängert bis Dezember 2019) [Schlussbericht]. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB).
https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2019_schlussbericht_feldmessungen.pdf
- Prinzing, M.** Berthold, M., Eschmann, M., & Bertsch, S. (2020). Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen: Heizsaison 2019/20 [Jahresbericht]. OST – Ostschweizer Fachhochschule.

https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2020_jahresbericht_feldmessungen.pdf

Prinzing, M. Berthold, M., Bertsch, S., & Eschmann, M. (2021). Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen: Heizsaison 2020/21 [Jahresbericht]. Institut für Energiesysteme (IES), OST – Ostschweizer Fachhochschule.

https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2021_bericht_feldmessungen.pdf

Genkinger, A., Alimpic, Z., Messmer, C., Zraggen, L., & Zogg, D. (2026). *Wärmepumpen – planen, optimieren, betreiben, warten* (6. Aufl.). Faktor Verlag.

Genkinger, A., Messmer, C., Sawant, L., Vulic, N., & Zogg, D. (2026). *Schweizer Wärmepumpen-markt: Fokus auf Energieeffizienz und Flexibilität*. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, 2026 <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/energieeffizienz/umgebungswaerme.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTI2NDk=.html>

WP-Systemmodul. (2020). Funktionsschemata [Downloadbereich]. Abgerufen am 16.07.2026 von <https://www.wp-systemmodul.ch/files/Downloads%20DE/Lieferanten/Funktionsschemata-20200425.pdf>

9. Anhang

9.1 Parameterlisten

- 9.1.1 F016
- 9.1.2 F017 - 1-Min-Werte
- 9.1.3 F017 - Monatswerte
- 9.1.4 F024
- 9.1.5 F027

9.2 Bezeichnungskonvention

- 9.2.1 F016 48
- 9.2.2 F017 49
- 9.2.3 F024 50
- 9.2.4 F027 51

9.3 Datenzugang und Datenhandling

- 9.3.1 Datenzugang F016
- 9.3.2 Datenzugang F017
- 9.3.3 Datenzugang F019 (Spezialfall ModBus)
- 9.3.4 Datenzugang F024
- 9.3.5 Datenzugang F027

9.4 Ergänzende Abbildungen und Kennzahlen

- 9.4.1 Referenztag-Zeitreihen je Anlage
- 9.4.2 1:1 Diagramme
- 9.4.3 Korrelationsplots
- 9.4.4 Übersichtstabelle Kennzahlen

9.5 Umfrage bei den involvierten Fabrikaten

9.6 Verdichter-Polynome (Erklärung)

9.1 Parameterlisten

9.1.1 F016

Tabelle 16: Vollständige Parameterliste für F016

Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ
1	Aktueller Heizsollwert	°C	num	24	Lüfter (KKM-A11 Out5)	–	Text/Zustand	47	Störung PLP (WPM-A1 DI8)	–	Text/Zustand
2	Allgemeiner Störeingang (KKM-A11 DI3)	–	Text/Zustand	25	Mischer MK1 schließen (WPM-A1 NO11)	–	Text/Zustand	48	Störung Power+ (KKM-A11 DI2)	–	Text/Zustand
3	Anzahl Abtauungen	–	num	26	Mischer MK1 öffnen (WPM-A1 NO12)	–	Text/Zustand	49	Umschaltventil Heizen/TWE (WPM-A1 NO1)	–	Text/Zustand
4	Außentemperatur	°C	num	27	Motorstrom	A	num	50	Verdampfungstemperatur	°C	num
5	Betriebsminuten Hz	min	num	28	Niederdruck	barg	num	51	Verdichter (KKM-A11 NO1)	–	Text/Zustand
6	Betriebsminuten TWE	min	num	29	Parallelverschiebung Heizkurve MK1	–	num	52	Verdichterdrehzahl	rps	num
7	Betriebstemperatur Antrieb	°C	num	30	Pufferladepumpe (WPM-A1 NO8)	–	Text/Zustand	53	Verdichterheizung (KKM-A11 Out3)	–	Text/Zustand
8	Durchfluss WP	l/min	num	31	Pumpe MK1 (WPM-A1 NO7)	–	Text/Zustand	54	Vorlauftemperatur WP	°C	num
9	EVU Sperre / Smart Grid 1 (WPM-A1 DI9)	–	Text/Zustand	32	Regelsignal Lüfter (KKM-A11 Y1)	%	num	55	Wärmemenge Hz	kWh	num
10	Energiequellen Austrittstemperatur	°C	num	33	Regelsignal Pufferladepumpe (WPM-A1 Y1)	%	num	56	Wärmemenge TWE	kWh	num
11	Energiequellen Eintrittstemperatur	°C	num	34	Rücklauftemperatur WP	°C	num	57	Überlast Lüfter (KKM-A11 DI1)	–	Text/Zustand
12	Externer WEZ 1 (WPM-A1 NO9)	–	Text/Zustand	35	Saugtemperatur	°C	num	58	Überlast externer WEZ Hz (WPM-A1 DI3)	–	Text/Zustand
13	Externer WEZ 2 (WPM-A1 NO10)	–	Text/Zustand	36	Smart Grid 2 (WPM-A1 DI10)	–	Text/Zustand	59	Überlast externer WEZ TWE (WPM-A1 DI1)	–	Text/Zustand
14	Gemittelter COP Hz	–	num	37	Solltemperatur TWE	°C	num	60	4 Wege-Ventil (KKM-A11 Out4)	–	Text/Zustand
15	Gemittelter COP TWE	–	num	38	Solltemperatur Vorlauf MK1	°C	num	61	Aktuelle Heizleistung	kW	num
16	Heißgastemperatur	°C	num	39	Solltemperatur WP TWE	°C	num	62	Aktuelle Kondensationstemperatur	°C	num
17	Hochdruck	barg	num	40	Status Betriebsart ext. WEZ 1	–	Text/Zustand	63	Aktuelle SSH-Überhitzung	K	num
18	Isttemperatur Puffer	°C	num	41	Status Gesamtanlage	–	Text/Zustand	64	Aktuelle Ventillöffnung	%	num
19	Isttemperatur TWE	°C	num	42	Status TWE	–	Text/Zustand	65	Aktuelle Verdichteraufnahme	kW	num
20	Isttemperatur Vorlauf MK1	°C	num	43	Status Verdichter	–	Text/Zustand	66	Aktuelle Öltemperatur	°C	num
21	Kondensatwannenheizung (KKM-A11 NO6)	–	Text/Zustand	44	Status ext. WEZ 1	–	Text/Zustand	67	Aktueller COP	–	num
22	Leistungsaufnahme Hz	kWh	num	45	Status externer WEZ 1	–	Text/Zustand	68	Aktueller COP Hz	–	num
23	Leistungsaufnahme TWE	kWh	num	46	Status externer WEZ 2	–	Text/Zustand	69	Aktueller COP TWE	–	num

9.1.2 F017 - 1-Min-Werte

Tabelle 17: Vollständige Parameterliste für F017 (1-Min-Werte)

Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ
• Messwerte / Anzeigen				31	Text_THGmax	°C	num	62	Text_FreigZWE_WW	–	num
1	Text_Vorlauf	°C	num	32	Text_Verdampfungstemp	°C	num	63	Text_ShutdownComprTimer	n. dok.	num
2	Text_VL_Soll	°C	num	33	Text_Verflüssigungstemp	°C	num	64	Silent Mode	–	Text/Zustand
3	Text_Rucklauf	°C	num	34	Text_Ueberhitzung	K	num	65	Text_SSP_Zeit	-	Text/Zustand
4	Text_RL_Soll	°C	num	35	Text_Ueberhitzung_Soll	K	num	• Einstellungen (Sollwerte)			
5	Text_Aussent	°C	num	36	Text_UK_Hauptventil	K	num	66	Text_Aussent	°C	num
6	Text_Mitteltemperatur	°C	num	37	EEVH TFL1	°C	num	67	Text_RL_Soll	°C	num
7	Text_BW_Ist	°C	num	38	EEVC TFL2	°C	num	68	Text_MK1VL_Soll	°C	num
8	Text_BW_Soll	°C	num	39	Text_EEV_Heizen	%	num	69	Text_MK2VL_Soll	°C	num
9	Text_MK1_Vorlauf	°C	num	40	Text_EEV_Kuehlen	%	num	70	Text_MK3VL_Soll	°C	num
10	Text_MK1VL_Soll	°C	num	41	Text_Ansaug_Verdichter	°C	num	71	Text_BW_Soll	°C	num
11	Text_PWM_UWP	%	num	42	LA_VD_Soll	–	num	• Betriebsart / Steuerung			
12	Text_ABS_DFS	n. dok.	num	43	Text_ND	n. dok.	num	72	AnzahlVD	–	Text/Zustand
13	LA_DFS_Soll	n. dok.	num	44	Text_HD	n. dok.	num	73	Betriebsart Heizen	–	Text/Zustand
14	AO 1	n. dok.	num	45	Text_Verdichter	–	Text/Zustand	74	Betriebsart Brauchwasser	–	Text/Zustand
15	AO 2	n. dok.	num	46	Text_Ablauventil	–	Text/Zustand	75	Betriebsart MK2	–	Text/Zustand
16	Text_Vorlaufmax	°C	num	47	Text_VD_RPM Text_Aktuell	n. dok.	num	76	Betriebsart MK3	–	Text/Zustand
17	Text_EVU	–	Text/Zustand	48	Text_VD_RPM Text_Sollwert	n. dok.	num	77	Betriebsart Kuehlen	–	Text/Zustand
18	Text_EVU 2	–	Text/Zustand	49	Text_VD_RPM Text_Min	n. dok.	num	78	Betriebsart Schwimmbad	–	Text/Zustand
19	Text_MOT	–	Text/Zustand	50	Text_VD_RPM Text_Max	n. dok.	num	79	Text_Fehlerreset	–	Text/Zustand
20	Text_ASD	–	Text/Zustand	51	LA_PCB_Temp	°C	num	• Ausgänge			
21	Text_HUP	–	Text/Zustand	52	Text_WQ_Ein	°C	num	80	Text_HUP	–	Text/Zustand
22	Text_ZUP	–	Text/Zustand	53	Text_Ven_RPM	n. dok.	num	81	Text_Ventilation	–	Text/Zustand
23	Text_BUP	–	Text/Zustand	54	LA_TargetFanRPM	n. dok.	num	82	Text_ZUP	–	Text/Zustand
24	Text_FUP1	–	Text/Zustand	55	Text_Ventil_BOSUP	–	Text/Zustand	83	Text_BUP	–	Text/Zustand
25	Text_Mischer1Auf	–	Text/Zustand	56	Text_Fehlerspeicher	–	num	84	Text_Ventil_BOSUP	–	Text/Zustand
26	Text_Mischer1Zu	–	Text/Zustand	57	Text_Kapazität	%	num	85	Text_ZIP	–	Text/Zustand
27	Text_ZIP	–	Text/Zustand	58	Text_Defrost_Demand	%	num	86	Text_FUP2	–	Text/Zustand
28	Text_ZWE1	–	Text/Zustand	59	Text_Biv_Sufe	n. dok.	num	87	Text_FUP3	–	Text/Zustand
29	Text_Therm_Desinfekt	–	Text/Zustand	60	Text_Betr_Zust	n. dok.	num	88	Text_SLP	–	Text/Zustand
30	Text_Heissgas	°C	num	61	Text_FreigZWE	n. dok.	num	89	Text_SUP	–	Text/Zustand

9.1.3 F017 - Monatswerte

Tabelle 18: Vollständige Parameterliste für F017 (Monatswerte)

Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ
1	Wärmemenge: Datum (Monat/Jahr)	MM/JJJJ	Text/Zustand
2	Wärmemenge: Ø Aussentemperatur	°C	num
3	Wärmemenge: Heizung – WP	kWh	num
4	Wärmemenge: Heizung – ZWE	kWh	num
5	Wärmemenge: Warmwasser – WP	kWh	num
6	Wärmemenge: Warmwasser – ZWE	kWh	num
7	Wärmemenge: Kühlung – WP	kWh	num
8	Wärmemenge: Schwimmbad – WP	kWh	num
9	Wärmemenge: Gesamt – WP	kWh	num
10	Wärmemenge: Gesamt – ZWE	kWh	num
11	Leistungsaufnahme: Datum (Monat/Jahr)	MM/JJJJ	Text/Zustand
12	Leistungsaufnahme: Ø Aussentemperatur	°C	num
13	Leistungsaufnahme: Heizung – WP	kWh	num
14	Leistungsaufnahme: Heizung – ZWE	kWh	num
15	Leistungsaufnahme: Warmwasser – WP	kWh	num
16	Leistungsaufnahme: Warmwasser – ZWE	kWh	num
17	Leistungsaufnahme: Kühlung – WP	kWh	num
18	Leistungsaufnahme: Schwimmbad – WP	kWh	num
19	Leistungsaufnahme: Gesamt – WP	kWh	num
20	Leistungsaufnahme: Gesamt – ZWE	kWh	num

9.1.4 F024

Tabelle 19: Vollständige Parameterliste für F024

Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ	Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ
1	001_B32 Außentemperatur	°C	num	39	097_Referenzfühler	°C	num	77	385_N2_INV1_MODBUS_TOTAL_TIMEOUTS	–	num
2	002_B33 Wärmepumpenvorlauftemperatur	°C	num	40	098_Referenztemperatur	°C	num	78	386_N2_INV1_MODBUS_CONSECUTIVE_TIMEOUTS	–	num
3	005_B38 Wärmespeichertemperatur	°C	num	41	112_thermische Leistung (basierend auf Polynom)	kW	num	79	387_N2_INV1_MODBUS_VALID_REPLIES	–	num
4	023_B71 Heißgastemperatur 1	°C	num	42	113_Wärmemenge gesamt	kWh	num	80	390_N2_FAN1_MODBUS_TOTAL_TIMEOUTS	–	num
5	026_B37 Ansauglufttemperatur	°C	num	43	119_interne Meldung	–	num	81	391_N2_FAN1_MODBUS_CONSECUTIVE_TIMEOUTS	–	num
6	028_B79 Verdampferaustritt 1	°C	num	44	138_B34 Rücklauffühler	n. dok.	num	82	392_N2_FAN1_MODBUS_VALID_REPLIES	–	num
7	029_B78 Verdampfungsdruck 1	bar	num	45	145_B78 Verdampfungstemp. 1	n. dok.	num	83	395_N2_EVDMINI1_MODBUS_TOTAL_TIMEOUTS	–	num
8	034_Mittelwert Außentem.	n. dok.	num	46	146_B86 Kondensationstemp. 1	n. dok.	num	84	396_N2_EVDMINI1_MODBUS_CONSECUTIVE_TIMEOUTS	–	num
9	036_Externe Anforderung	–	num	47	148_rps	1/s	num	85	397_N2_EVDMINI1_MODBUS_VALID_REPLIES	–	num
10	037_Ext. Umschaltung H/K	–	num	48	149_Invertertemperatur	°C	num	86	406_Elektroheizeinsatz 1kW	–	num
11	038_EW/EVU Sperrkontakt	–	num	49	153_B86 Kondensationsdruck 1	bar	num	87	407_Elektroheizeinsatz 2kW	–	num
12	040_E11 Störung E-Heizstab	–	num	50	164_Inverterstrom	A	num	88	408_Elektroheizeinsatz 3kW	–	num
13	042_B5 Störung Taupunktwärchter	–	num	51	165_Inverterspannung	V	num	89	425_Inverter-Out CosPHI	–	num
14	043_ext. Vorrangladung	–	num	52	180_Ventil 2 Position	%	num	90	426_Phasen Strom U	A	num
15	047_Störung Hochdruck	bar	num	53	181_Leistung	n. dok.	num	91	427_Phasen Strom V	A	num
16	053_M1 Verdichter	–	num	54	182_B87 Flüssigkeitsleit. Temp.	n. dok.	num	92	428_Phasen Strom W	A	num
17	055_M51 4-Wegeventil	–	num	55	186_M73 Ladepumpe	n. dok.	num	93	441_Leistung	n. dok.	num
18	059_2/3. Wärmerezeuger	–	num	56	188_Unterkühlung	K	num	94	454_elektrische Gesamtleistung + PV-Offset (falls kein Wert vom Inverter vorhanden ist, wird jener vom Polynom verwendet)	kW	num
19	060_M63 Ventil Heizen/Vorrang	–	num	57	189_Drehrichtung Ventilator	–	num	95	471_Wärmemenge Warmwasser	kWh	num
20	071_M21 Ladepumpe	n. dok.	num	58	192_Platinentemperatur	°C	num	96	472_Wärmemenge Abtauung	kWh	num
21	073_Siphonheizung	–	num	59	194_Start. Korr. Poly K1 0	–	num	97	476_Wärmemenge E-Heizstab	kWh	num
22	076_Ventilatorumdrehzahl 1	n. dok.	num	60	195_Start. Korr. Poly K1 1	–	num	98	477_Wärmemenge Heizen	kWh	num
23	080_Betriebsart Wärmepumpe	–	num	61	196_Start. Korr. dT1 K1 0	n. dok.	num	99	482_Heizanforderung Ursache	–	num
24	081_Angeforderte Stufen	–	num	62	197_Start. Korr. dT1 K1 1	n. dok.	num	100	483_Kühlanforderung Ursache	–	num
25	082_Heizanforderung	–	num	63	244_Inverter Status Register	–	num	101	484_Vorranganforderung Ursache	–	num
26	083_Kühlanforderung	–	num	64	245_Inverter Speed Register	–	num	102	486_WW-Station Durchfluss Heizungswasser	l/min	num
27	084_Vorranganforderung	–	num	65	256_DC Bus Spannung	V	num	103	487_WW-Station Virt. Temperatur Heizungswasser	°C	num
28	085_Angef. Heiztemperatur	°C	num	66	257_Inverter Status	–	num	104	491_WW-Station Regelungsfreigabe	–	num
29	086_Angef. Kühltemperatur	°C	num	67	258_Ventilatorstatus	–	num	105	492_WW-Station Wärmeübertragungskoeffizient	–	num
30	087_Angef. Vorrangtemperatur	°C	num	68	259_Ventilatorwarnung	–	num	106	495_N2_QSUM_HEATING_POLY	n. dok.	num
31	088_Zeitprogramm aktiv	–	num	69	260_Ventilatorleistung	n. dok.	num	107	496_N2_QSUM_PRIORITY_POLY	n. dok.	num
32	089_Abtaudifferenz	K	num	70	261_Ventilatorumdrehzahl ist	n. dok.	num	108	598_Batterieentladung	–	num
33	090_Referenzmessung:	–	num	71	275_pcmax Kreis 1	n. dok.	num	109	741_Temperatur Abtauende	°C	num
34	091_Überhitzung	K	num	72	277_EVDMINI Alarme	–	num	110	856_EVR-Modus Abtauung K1	–	num
35	093_Ventilposition	%	num	73	328_Summenstörung Regler	–	num	111	857_EVR-Modus Abtauung K2	–	num
36	094_Max. Vorlauftemp. reduziert	n. dok.	num	74	343_TXT_LEER	–	num	112	903_M16 Wärmequellenpumpe	n. dok.	num
37	095_Abweichung Grad&Minuten	–	num	75	364_B2 Durchflusssensor Heizung	l/min	num	113	904_M73 Ladepumpe	n. dok.	num
38	096_Alt. Wärmerezeuger Code	–	num	76	365_thermische Leistung (basierend auf Durchflusssensor)	kW	num	114	905_M15 Grundwasserpumpe	n. dok.	num

9.1.5 F027

Tabelle 20: Vollständige Parameterliste für F027

Nr.	Parameterbezeichnung im Export	Einheit	Typ
1	Datum	TT.MM.JJJJ	Text/Zustand
2	Uhrzeit	hh:mm:ss	Text/Zustand
3	Volumenstrom [Wärmeerzeuger]	m³/h	num
4	Stellung Umschaltventil [Wärmeerzeuger]	–	Text/Zustand
5	Modulation [Wärmeerzeuger]	n. dok.	num
6	Ist Leistung [Wärmeerzeuger]	kW	num
7	Außentemperatur [Wärmeerzeuger]	°C	num
8	Rücklauftemperatur [Wärmeerzeuger]	°C	num
9	Vorlauftemperatur [Wärmeerzeuger]	°C	num
10	Leistungsabgabe [Wärmeerzeuger]	kW (W)	num
11	Warmwassertemperatur [Warmwasser]	°C	num
12	HK 1 Raumtemperatur [Heizkreis 1]	°C	Text/Zustand

9.2 Bezeichnungskonvention

9.2.1 F016

Tabelle 21: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F016

Generelle Bezeichnung	Kurzname	Parametername	Beschreibung
Thermische Leistung	Q_dot_H	Aktuelle Heizleistung	-
Elektrische Leistung Verdichter	P_el_V	Aktuelle Verdichteraufnahme	-
Elektrische Leistung Total	P_el_tot	-	Nicht im Datenset enthalten
Quelleneintrittstemperatur	T_Q_ein	Energiequellen Eintrittstemperatur	-
Quellenaustrittstemperatur	T_Q_aus	Energiequellen Austrittstemperatur	-
Senkeneintrittstemperatur	T_S_ein	Rücklauftemperatur WP	-
Senkenaustrittstemperatur	T_S_aus	Vorlauftemperatur WP	-
Aussentemperatur	T_aussen	Außentemperatur	-
Betriebszustand	BZ	Status Betriebszustände + Status Gesamtanlage	BWW, HZ, Sperre, Abtauung
Kompressordrehzahl/Stufe	n_V	-	Nicht im Datenset enthalten
Raumtemperatur	T_raum	-	Nicht im Datenset enthalten

9.2.2 F017

Tabelle 22: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F017

Generelle Bezeichnung	Kurzname	Parametername	Beschreibung
Thermische Leistung	Q_dot_H	-	Eigene Berechnung aus Durchfluss und Temperaturdiff.
Elektrische Leistung Verdichter	P_el_V	-	Nicht im Datenset enthalten
Elektrische Leistung Total	P_el_tot	-	Nicht im Datenset enthalten
Quelleneintrittstemperatur	T_Q_ein	Wärmequelle-Ein	-
Quellenaustrittstemperatur	T_Q_aus	-	Nicht im Datenset enthalten
Senkeneintrittstemperatur	T_S_ein	Rücklauf	-
Senkenaustrittstemperatur	T_S_aus	Vorlauf	-
Aussentemperatur	T_aussen	Außentemperatur	-
Betriebszustand	BZ	Betriebszustand	Heizen, WW, ABT
Kompressordrehzahl/Stufe	n_V	Verdichterdrehzahl aktuell	
Raumtemperatur	T_raum	-	Nicht im Datenset enthalten

9.2.3 F024

Tabelle 23: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F024

Generelle Bezeichnung	Kurzname	Parametername	Beschreibung
Thermische Leistung	Q_dot_H	thermische Leistung (basierend auf Polynom) oder thermische Leistung (basierend auf Durchflusssensor)	-
Elektrische Leistung Verdichter	P_el_V	Leistung	Nur Inverter
Elektrische Leistung Total	P_el_tot	-	Nicht im Datenset enthalten
Quelleneintrittstemperatur	T_Q_ein	B37 Ansauglufttemperatur	-
Quellenaustrittstemperatur	T_Q_aus	-	Nicht im Datenset enthalten
Senkeneintrittstemperatur	T_S_ein	B34 Rücklauffühler	-
Senkenaustrittstemperatur	T_S_aus	B33 Wärmepumpenvorlaufttemperatur	-
Aussentemperatur	T_aussen	B32 Außentemperatur	-
Betriebszustand	BZ	Betriebsart Wärmepumpe	-
Kompressordrehzahl/Stufe	n_V	rps	-
Raumtemperatur	T_raum	-	Nicht im Datenset enthalten

9.2.4 F027

Tabelle 24: Bezeichnungskonvention für relevante Parameter für F027

Generelle Bezeichnung	Kurzname	Parametername	Beschreibung
Thermische Leistung	Q_dot_H	Ist Leistung [Wärmeerzeuger]	
Elektrische Leistung Verdichter	P_el_V	-	Nicht im Datenset enthalten
Elektrische Leistung Total	P_el_tot	-	Nicht im Datenset enthalten
Quelleneintrittstemperatur	T_Q_ein	-	Nicht im Datenset enthalten
Quellenaustrittstemperatur	T_Q_aus	-	Nicht im Datenset enthalten
Senkeneintrittstemperatur	T_S_ein	Rücklauftemperatur [Wärmeerzeuger]	
Senkенаustrittstemperatur	T_S_aus	Vorlauftemperatur [Wärmeerzeuger]	
Aussentemperatur	T_aussen	Außentemperatur [Wärmeerzeuger]	
Betriebszustand	BZ	-	Nicht im Datenset enthalten
Kompressordrehzahl/Stufe	n_V	-	Nicht im Datenset enthalten
Raumtemperatur	T_raum	HK 1 Raumtemperatur [Heizkreis 1]	

9.3 Datenzugang und Datenhandling

Der Zugriff auf interne Monitoring Daten unterscheidet sich je nach Anlage deutlich. Neben der reinen Verfügbarkeit der Messwerte sind vor allem Zugriffsrechte, Speicherfristen, Exportformate, Anzahl gleichzeitig exportierbarer Parameter, notwendige Herstellersoftware sowie vorhandene Schnittstellen entscheidend. Die untersuchten Anlagen zeigen unterschiedliche Formen des Datenzugangs: Web-Portal, lokaler Datenspeicher, SD-Karte und Gateway/Modbus-Schnittstelle. Für die Nutzung interner Monitoring Daten ist deshalb nicht nur relevant, ob Daten vorhanden sind, sondern auch, wie diese Daten bereitgestellt, exportiert, dekodiert und in eine vergleichbare Form überführt werden können.

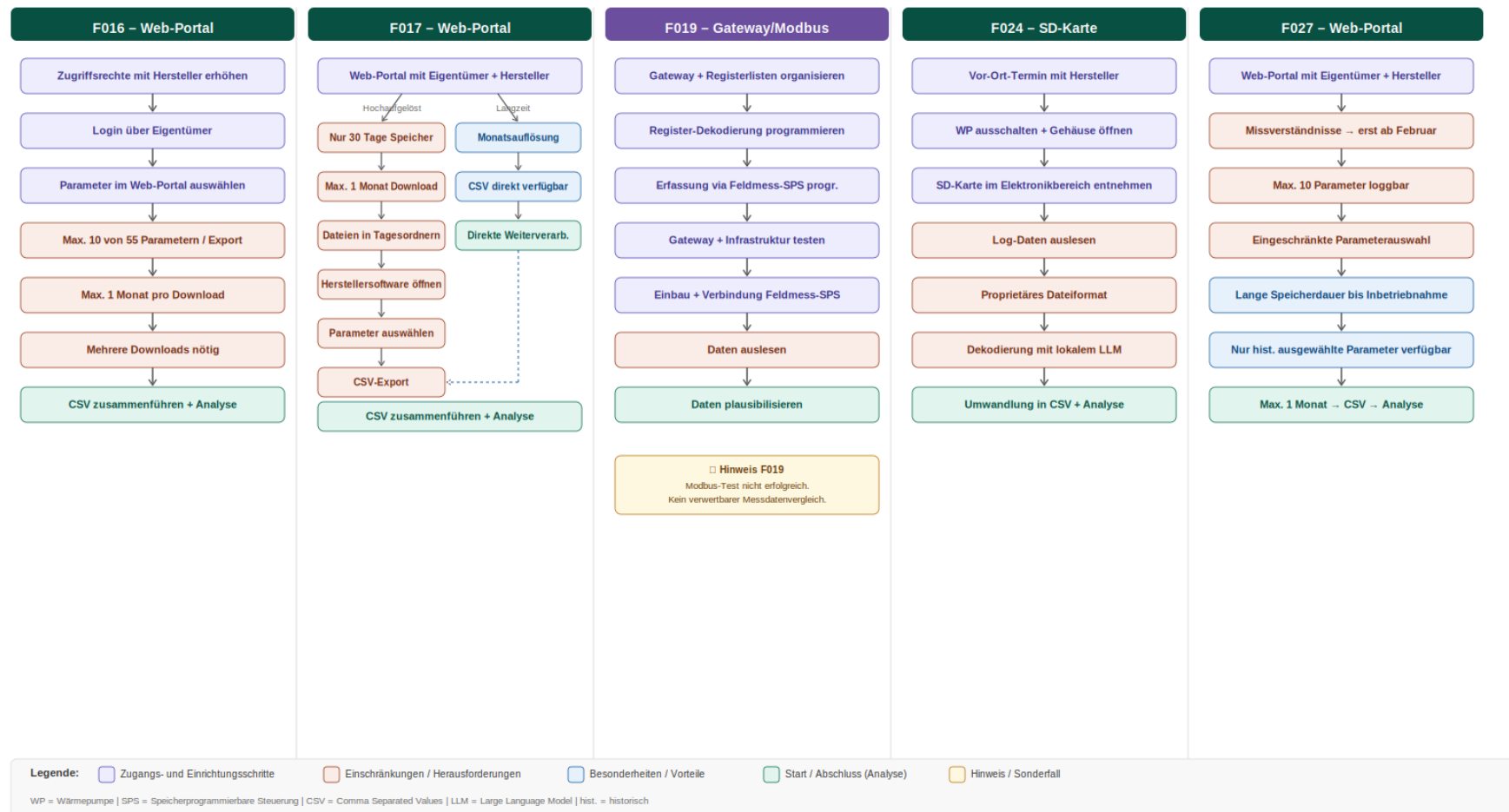


Abbildung 30: Flussdiagramm zur Übersicht für Datenzugang (alle Anlagen)

9.3.1 Datenzugang F016

Bei F016 mussten die Zugriffsrechte zusammen mit dem Hersteller erweitert werden, damit alle relevanten Parameter im Web-Portal sichtbar und exportierbar waren. Der eigentliche Datenzugriff erfolgte anschliessend über den Login des Eigentümers. Die Daten konnten über das Web-Portal heruntergeladen werden. Eine wesentliche Einschränkung besteht darin, dass jeweils nur 10 der insgesamt 55 Parameter gleichzeitig exportiert werden können. Zusätzlich ist der Exportzeitraum bei 10 ausgewählten Parametern auf maximal einen Monat begrenzt. Für längere Messperioden oder grössere Parametersätze sind deshalb mehrere manuelle Downloads notwendig.

9.3.2 Datenzugang F017

Bei F017 wurde der Zugriff gemeinsam mit dem Eigentümer und dem Hersteller über ein Web-Portal eingerichtet. Hochaufgelöste Daten sind nur für 30 Tage gespeichert. Zusätzlich sind Langzeitdaten für Energiewerte in Monatsauflösung vorhanden. Die hochaufgelösten Daten können jeweils für maximal einen Monat heruntergeladen werden. Das Datenformat liegt als ältere .dta-Datei vor und kann nicht direkt weiterverarbeitet werden. Für die Nutzung wäre beispielsweise Stata oder eine vergleichbare Software erforderlich. Die Dateien können auch mit der Herstellersoftware geöffnet und anschliessend als CSV exportiert werden.

Ein zusätzlicher Aufwand entsteht durch die Ordnerstruktur des Downloads. Die Daten liegen nach dem Download in Unterordnern vor, wobei pro Tag ein eigener Ordner mit einer Datei erstellt wird. Für die Weiterverarbeitung müssen diese Dateien entweder einzeln geöffnet und exportiert oder mit einem Python Skript zusammengetragen werden. In der Herstellersoftware müssen die darzustellenden beziehungsweise zu exportierenden Parameter manuell ausgewählt werden. Dafür sind mehrere Bedienungsschritte notwendig. Nach dem Export liegen die hochaufgelösten Daten als CSV-Datei vor. Die Langzeit-Energiedaten sind weniger aufwendig, da sie nach dem Download bereits als CSV-Datei vorliegen und direkt verarbeitet werden können.

9.3.3 Datenzugang F019 (Spezialfall ModBus)

Bei F019 war weder eine Web-Anbindung noch eine lokale Speicherung interner Wärmepumpendaten vorhanden. Ein direkter Download über ein Web-Portal oder über einen lokalen Datenspeicher war deshalb nicht möglich. Als alternative Lösung wurde eine Datenerfassung über ein herstellersizifisches Gateway mit Modbus-Ausgabe vorgesehen. Das Gateway wurde vom Hersteller kostenlos zur Verfügung gestellt. Die vom Gateway bereitgestellten Modbus-Signale sollten über die bestehende Feldmessinfrastruktur geloggt und anschliessend dekodiert werden.

Das Aufsetzen dieser Datenerfassung dauerte länger als ursprünglich geplant. Dadurch konnte an Anlage F019 selbst keine verwertbare Messung vor Ort durchgeführt werden. Um dennoch Erkenntnisse zum Datenzugang und zum praktischen Aufwand zu erhalten, wurde der Datenlog an einer ähnlichen Anlage innerhalb der Infrastruktur der Ostschweizer Fachhochschule getestet. Dieser Test war nicht erfolgreich. Die relevanten Werte waren zwar in der Modbus-Liste des Herstellers aufgeführt, gaben im Test jedoch keine verwertbaren Werte aus. Sie blieben auch bei laufender Maschine auf null.

Die Ursache konnte im Rahmen des Projekts nicht abschliessend geklärt werden. Möglich sind ein Zusammenhang mit der spezifischen Betriebsart der verwendeten Maschine, die manuell über die Leitsoftware angesteuert wurde, oder ein Problem in der Feldimplementierung der WP. Da das getestete Gerät dem bei F019 verbauten Gerät entspricht, wurde aufgrund der fortgeschrittenen Projektlaufzeit und des bereits hohen Aufwands auf eine weiterführende Umsetzung im Feld verzichtet. F019 wird deshalb im direkten WP- vs. FM-Messdatenvergleich nicht als Ergebnisanlage behandelt. Für ein Folgeprojekt könnte eine vertiefte Prüfung der Gateway-/Modbus-Schnittstelle sinnvoll sein, insbesondere mit vorgängiger Validierung der Registerwerte unter definierten Betriebszuständen.

9.3.4 Datenzugang F024

F024 unterscheidet sich von den Anlagen mit Web-Portal, da die Wärmepumpe nicht mit dem Internet verbunden ist. Ein Fernzugriff über ein Web-Portal war deshalb nicht möglich. Die internen Log-Daten befinden sich auf einer SD-Karte im Gerät. Das Auslesen erfolgte vor Ort mit Unterstützung des Herstellers. Dafür musste die Wärmepumpe ausgeschaltet und das Gehäuse teilweise geöffnet werden. Die SD-Karte befindet sich im Elektronikbereich innerhalb des Schaltschranks im Gerätegehäuse.

Die Rohdaten lagen in einem proprietären Dateiformat vor. Dadurch war die Weiterverarbeitung aufwendiger als bei Anlagen mit direktem CSV-Export. Da zur Zeit der Analyse noch kein CSV-Export verfügbar war, wurden die Daten mithilfe eines lokalen LLM dekodiert und in ein CSV-Format überführt. Die Herstellersoftware verfügt seit Juli 2026 über eine CSV-Exportfunktion.

9.3.5 Datenzugang F027

Bei F027 wurde der Zugriff gemeinsam mit dem Eigentümer und dem Hersteller über ein Web-Portal eingerichtet. Aufgrund von Missverständnissen funktionierte die Datenerfassung jedoch erst ab Februar wie vorgesehen. Die Anlage erlaubt das gleichzeitige Logging von maximal 10 Parametern. Zudem ist die Auswahl der verfügbaren Parameter vergleichsweise eingeschränkt.

Positiv für die Datenbeschaffung ist die lange Speicherdauer: Daten können bis zur Inbetriebnahme zurück ausgelesen werden. Dabei sind jedoch nur diejenigen Parameter verfügbar, die zum jeweiligen Zeitpunkt ausgewählt und geloggt wurden. Die ursprünglich ausgewählten Parameter stimmten nicht mit den gewünschten Analyseparametern überein, wodurch die nutzbare Vergleichsbasis eingeschränkt wurde. Der Download ist für Zeiträume bis zu einem Monat möglich. Die exportierten Daten liegen direkt als CSV-Datei vor.

9.4 Ergänzende Abbildungen und Kennzahlen

9.4.1 Referenztag-Zeitreihen je Anlage

1 Tag, alle relevanten Parameter, WP vs. FM parallel

9.4.1.1 F016

F016 - Referenztag-Zeitreihen 02.01.2026

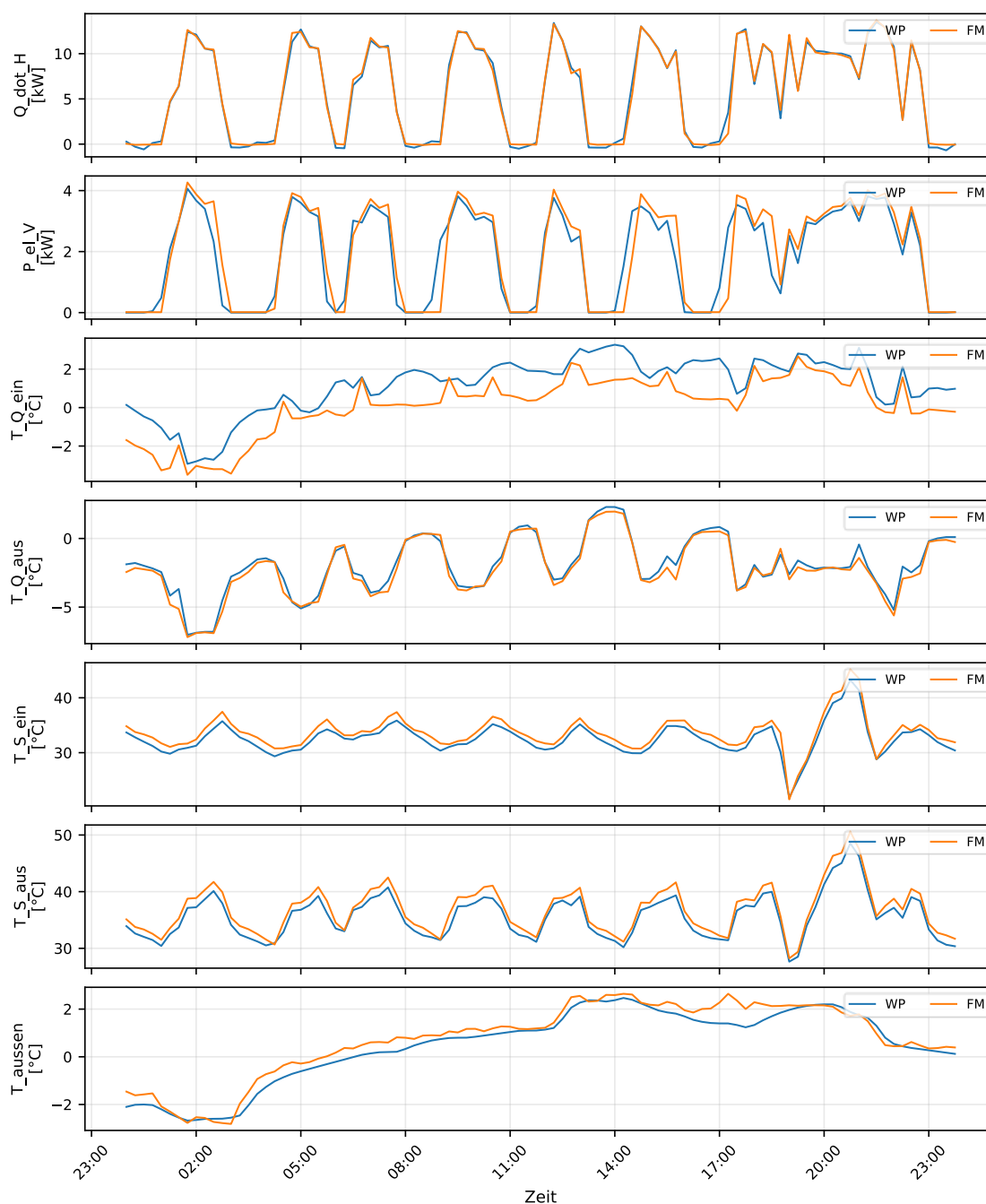


Abbildung 31: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F016. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.

9.4.1.2 F017

F017 - Referenztag-Zeitreihen 24.01.2026

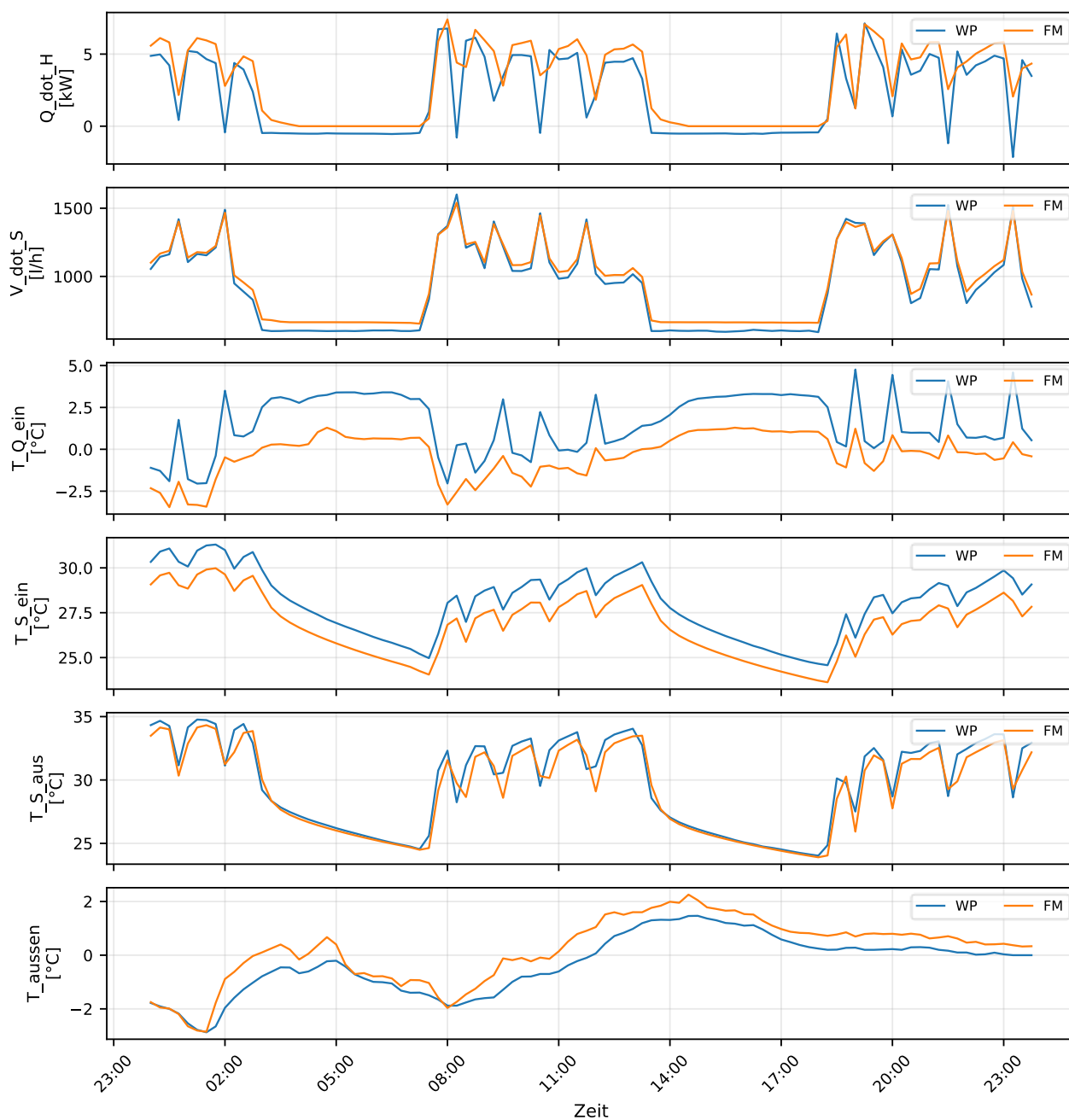


Abbildung 32: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F017. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.

9.4.1.3 F024

F024 - Referenztag-Zeitreihen 02.01.2026

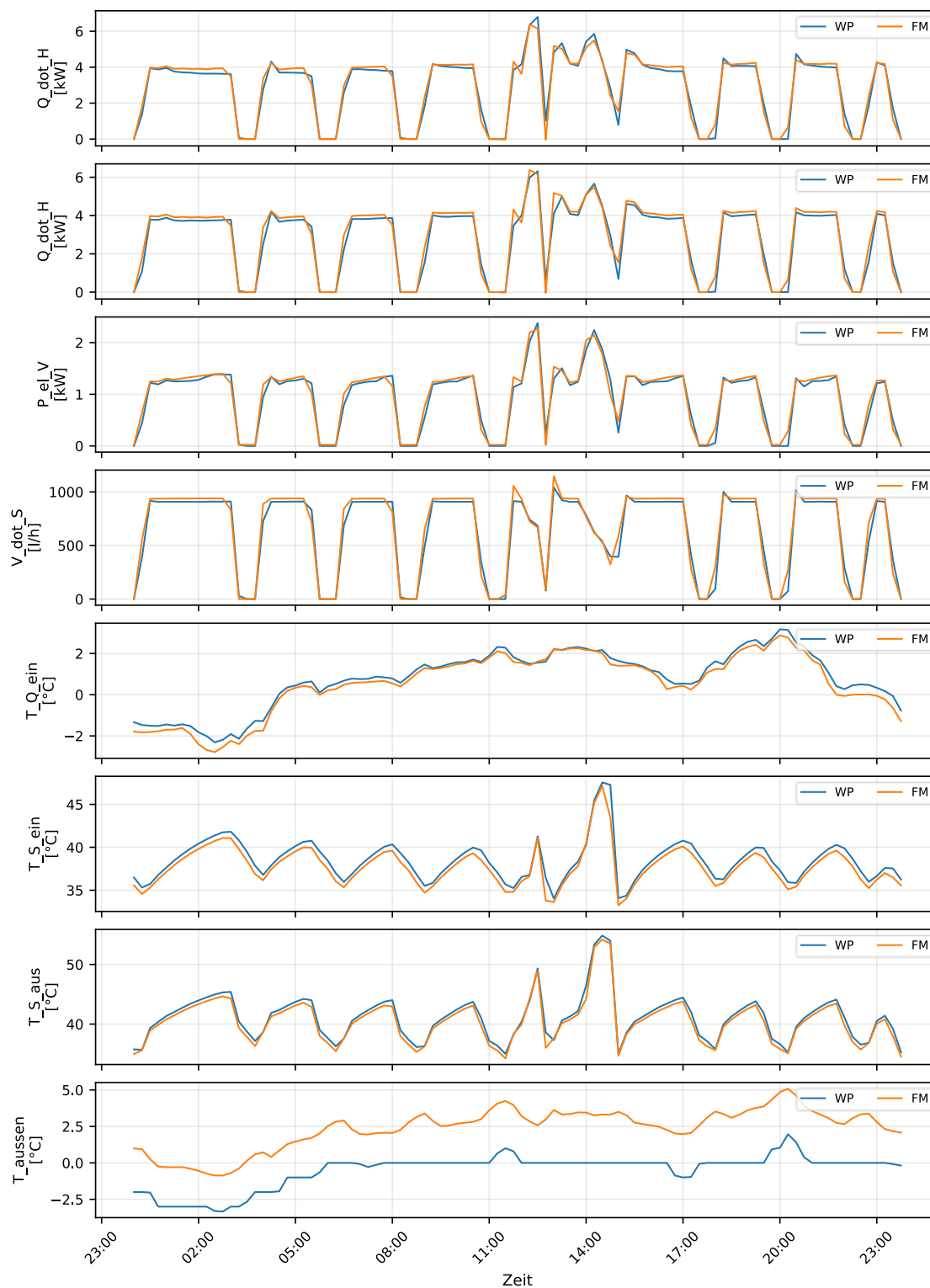


Abbildung 33: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F024. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.

9.4.1.4 F027

F027 - Referenztag-Zeitreihen 21.02.2026

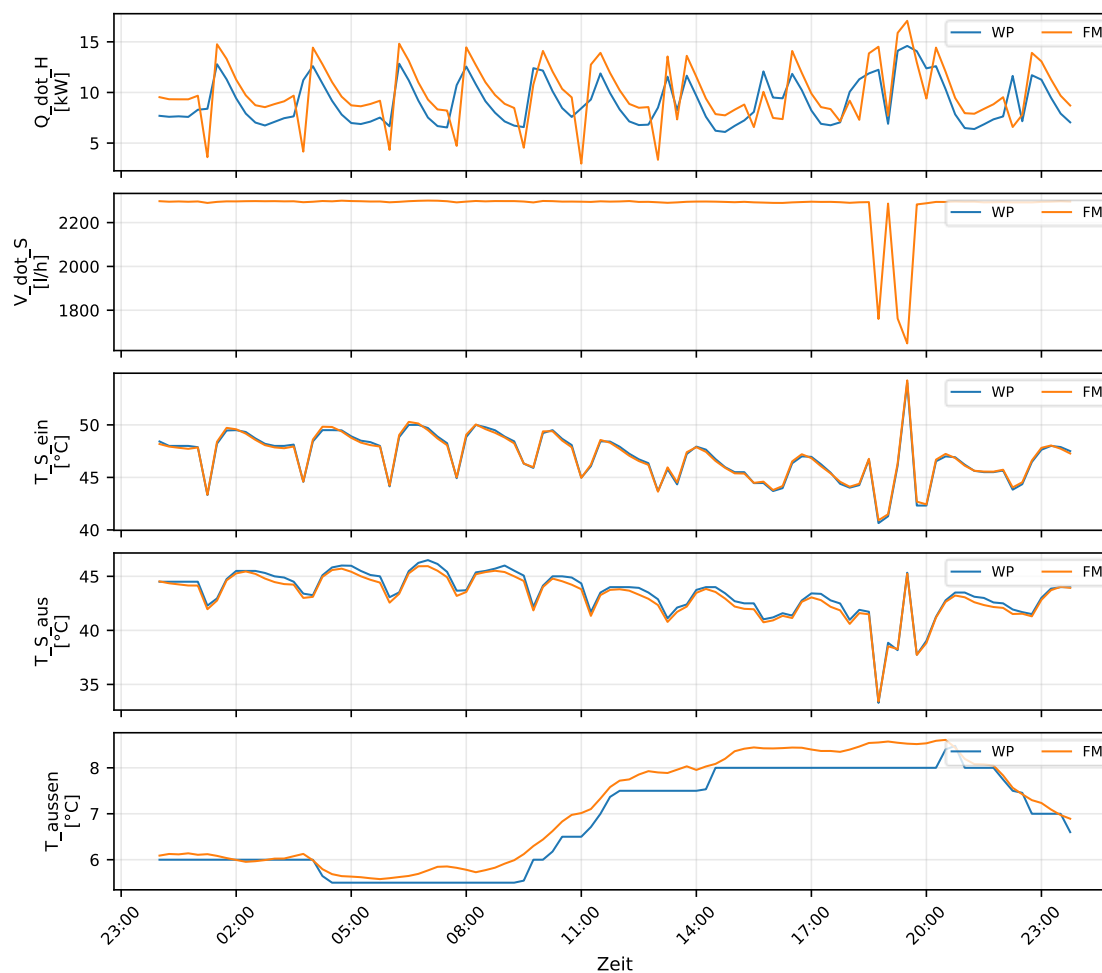


Abbildung 34: Referenztag-Zeitreihen der Vergleichsparameter für Anlage F027. In Blau sind die internen Messungen, in orange die Feldmessungen dargestellt. Die Daten basieren auf den 1-Min-Werten.

9.4.2 1:1 Diagramme

9.4.2.1 F016

F016 - FM vs. WP Messwertvergleich

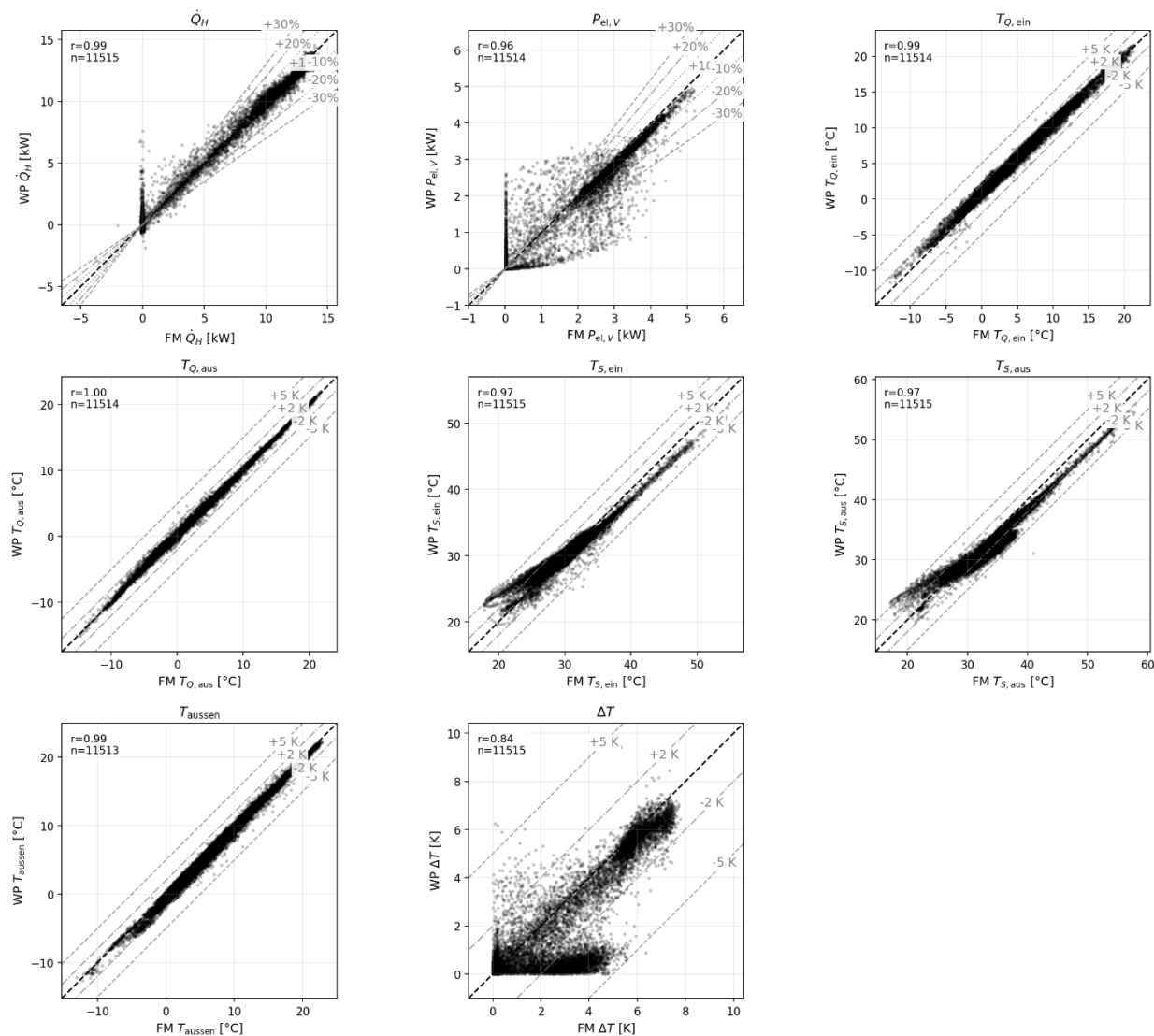


Abbildung 35: 1:1 Diagramme für Anlage F016. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.

9.4.2.2 F017

F017 - FM vs. WP Messwertvergleich

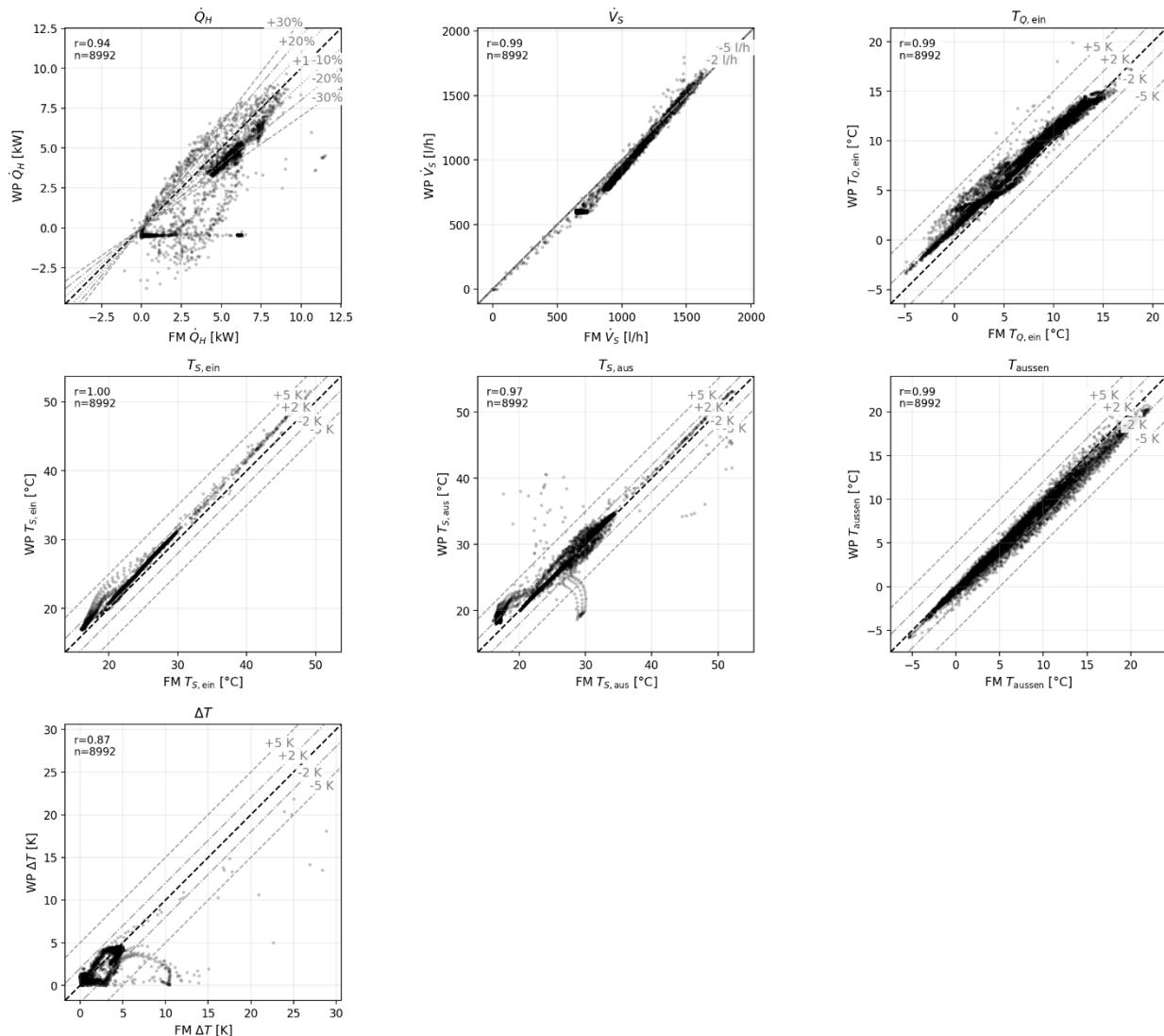


Abbildung 36: 1:1 Diagramme für Anlage F017. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.

9.4.2.3 F024

F024 - FM vs. WP Messwertvergleich

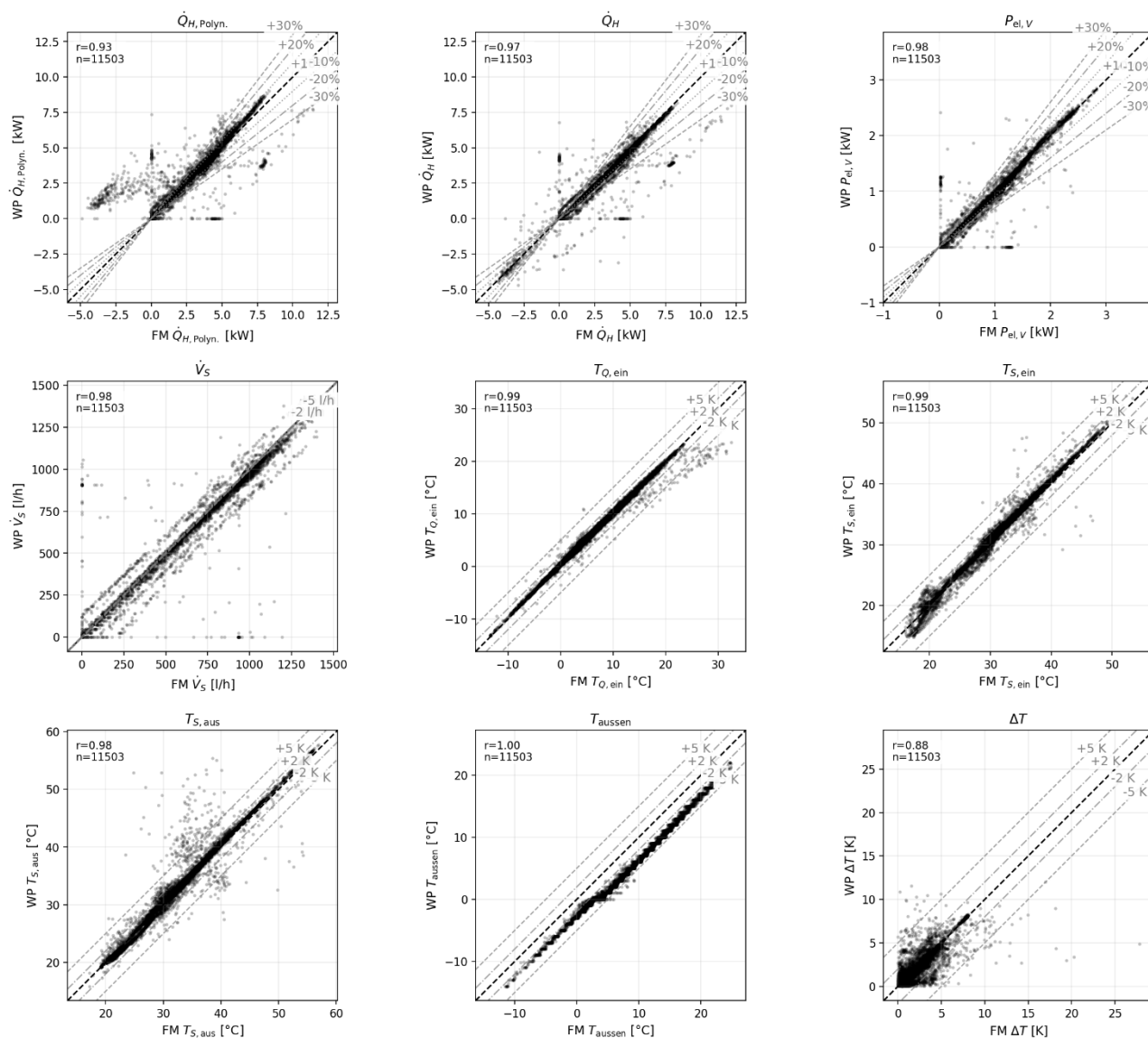


Abbildung 37: 1:1 Diagramme für Anlage F024. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.

9.4.2.4 F027

F027 - FM vs. WP Messwertvergleich

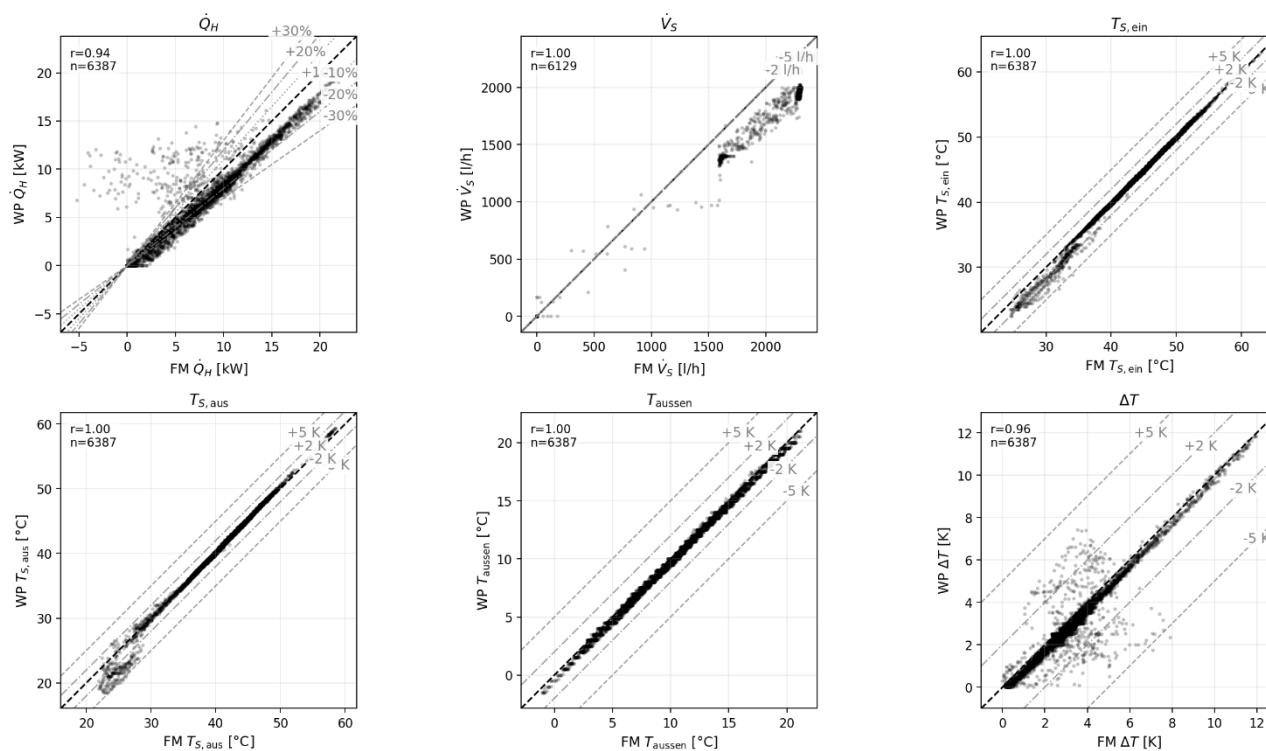


Abbildung 38: 1:1 Diagramme für Anlage F027. Auf der Y-Achse ist jeweils der Messwert von WP und auf der X-Achse der Messwert von FM dargestellt.

9.4.3 Korrelationsplots

1x Abweichungen vs. Messwerte

1x Abweichungen vs. Abweichungen

9.4.3.1 F016

F016 - Abweichung vs. Abweichung

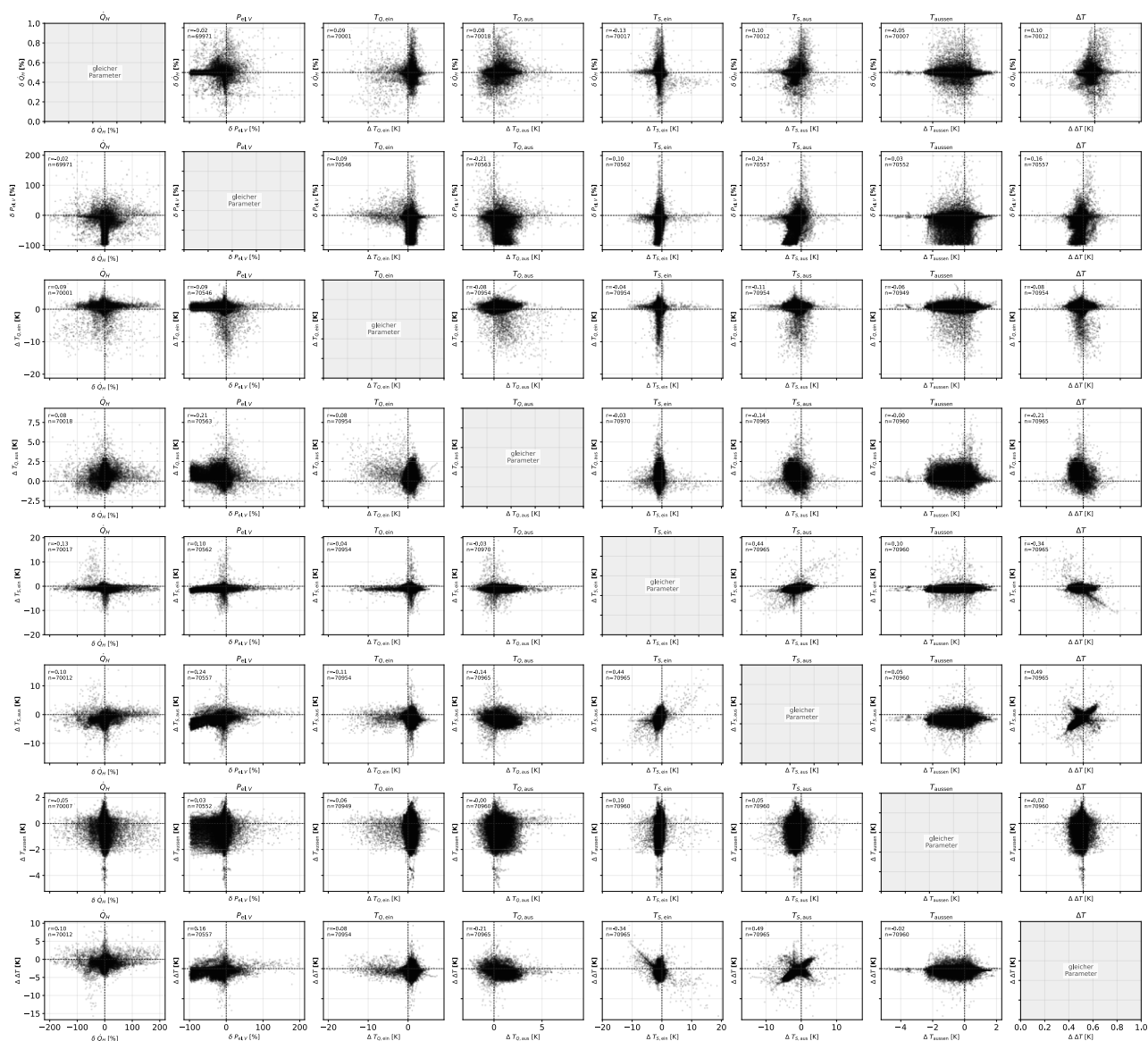


Abbildung 39: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F016

F016 - Abweichung vs. FM-Messwert anderer Parameter

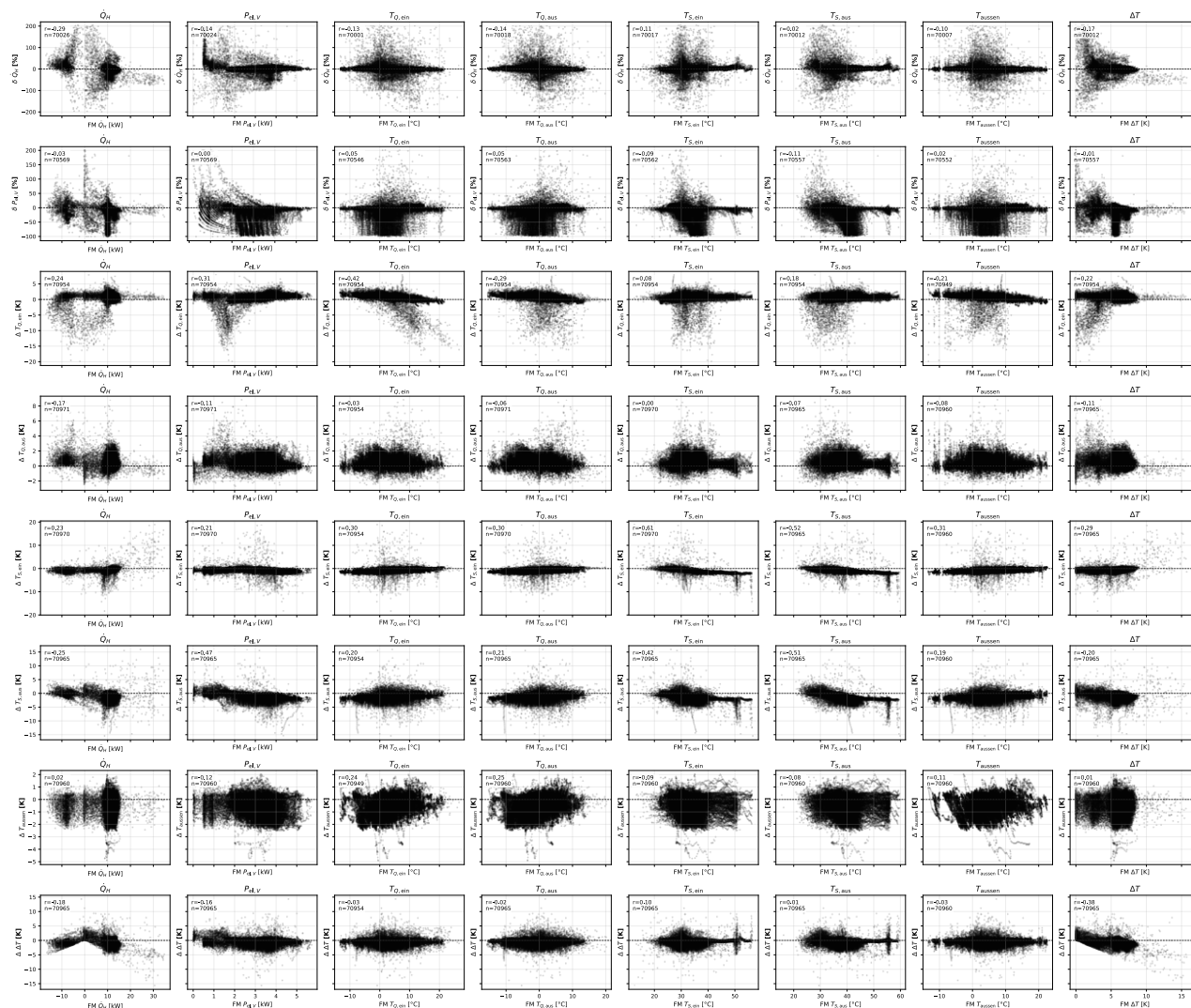


Abbildung 40: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F016

9.4.3.2 F017

F017 - Abweichung vs. Abweichung

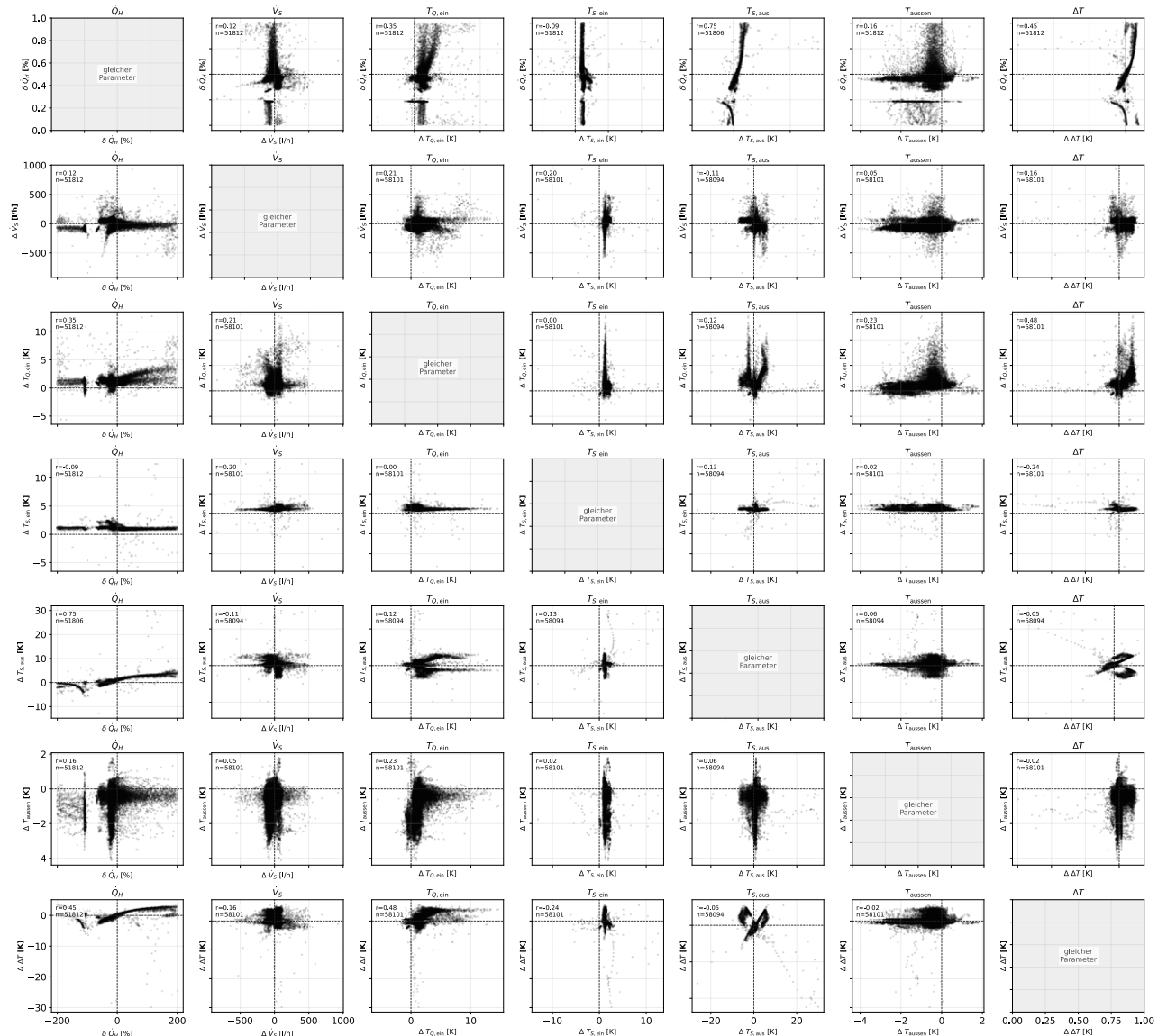


Abbildung 41: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F017

F017 - Abweichung vs. FM-Messwert anderer Parameter

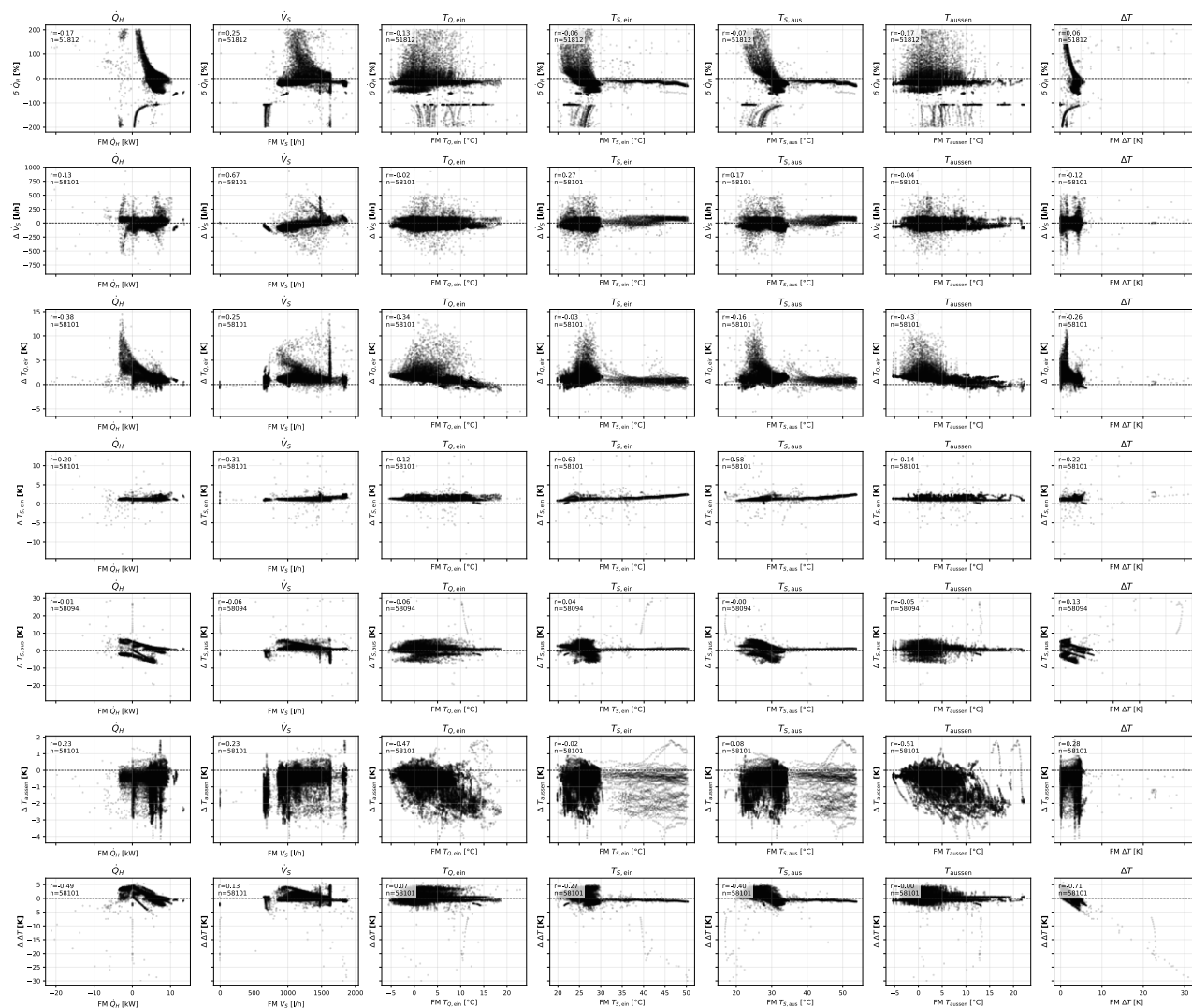


Abbildung 42: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F017

9.4.3.3 F024

F024 - Abweichung vs. Abweichung

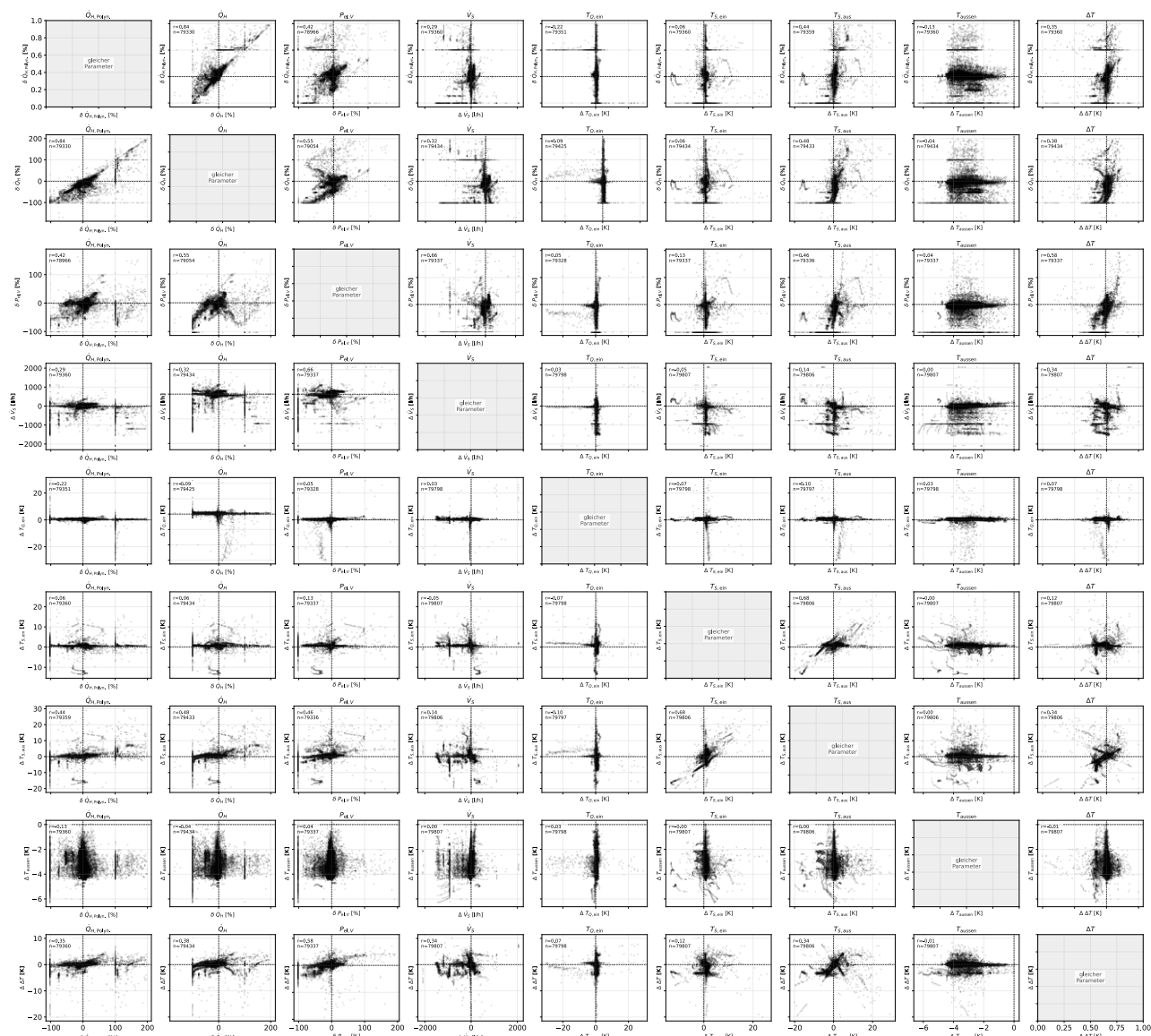


Abbildung 43: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F024

F024 - Abweichung vs. FM-Messwert anderer Parameter

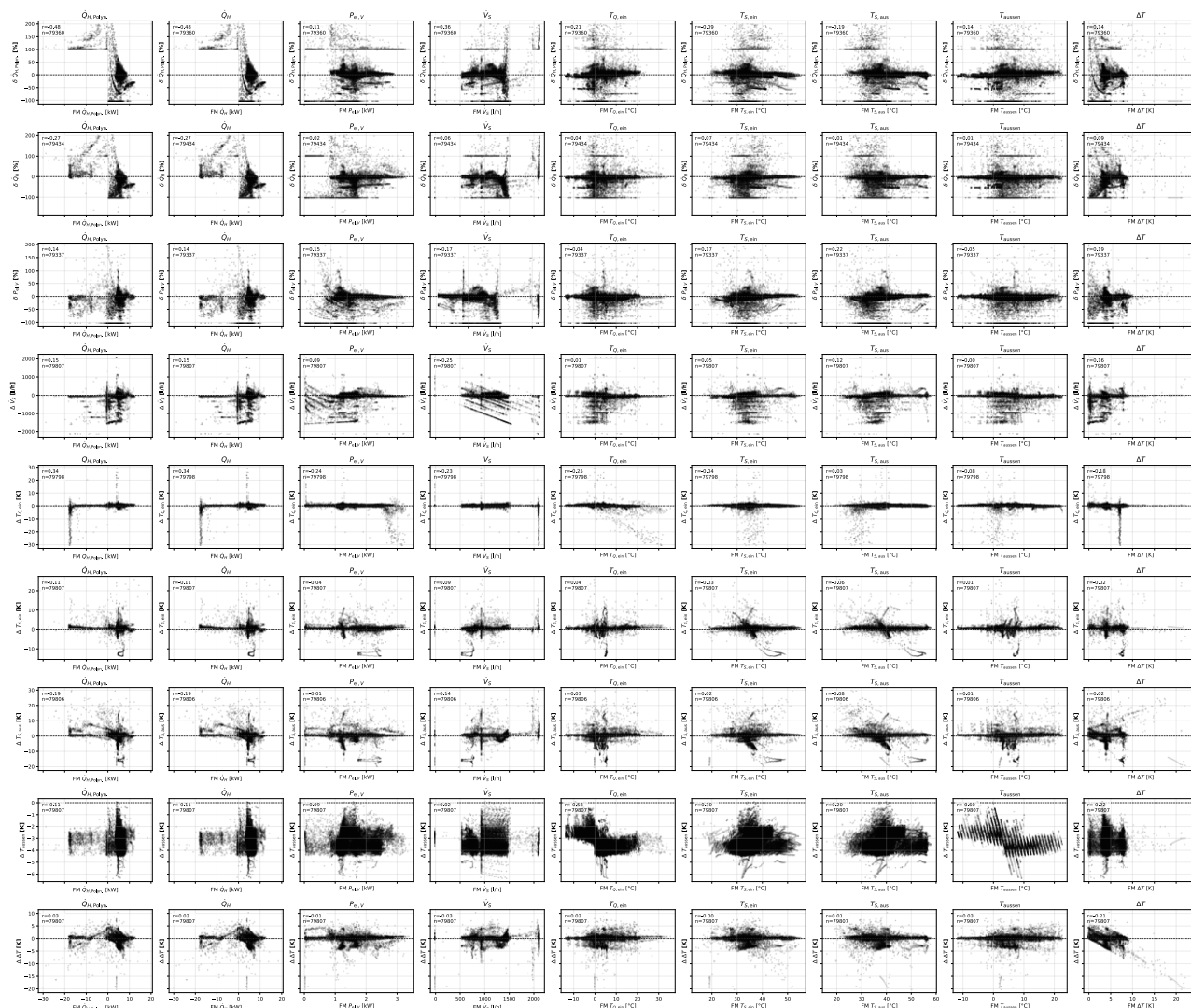


Abbildung 44: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F024

9.4.3.4 F027

F027 - Abweichung vs. Abweichung

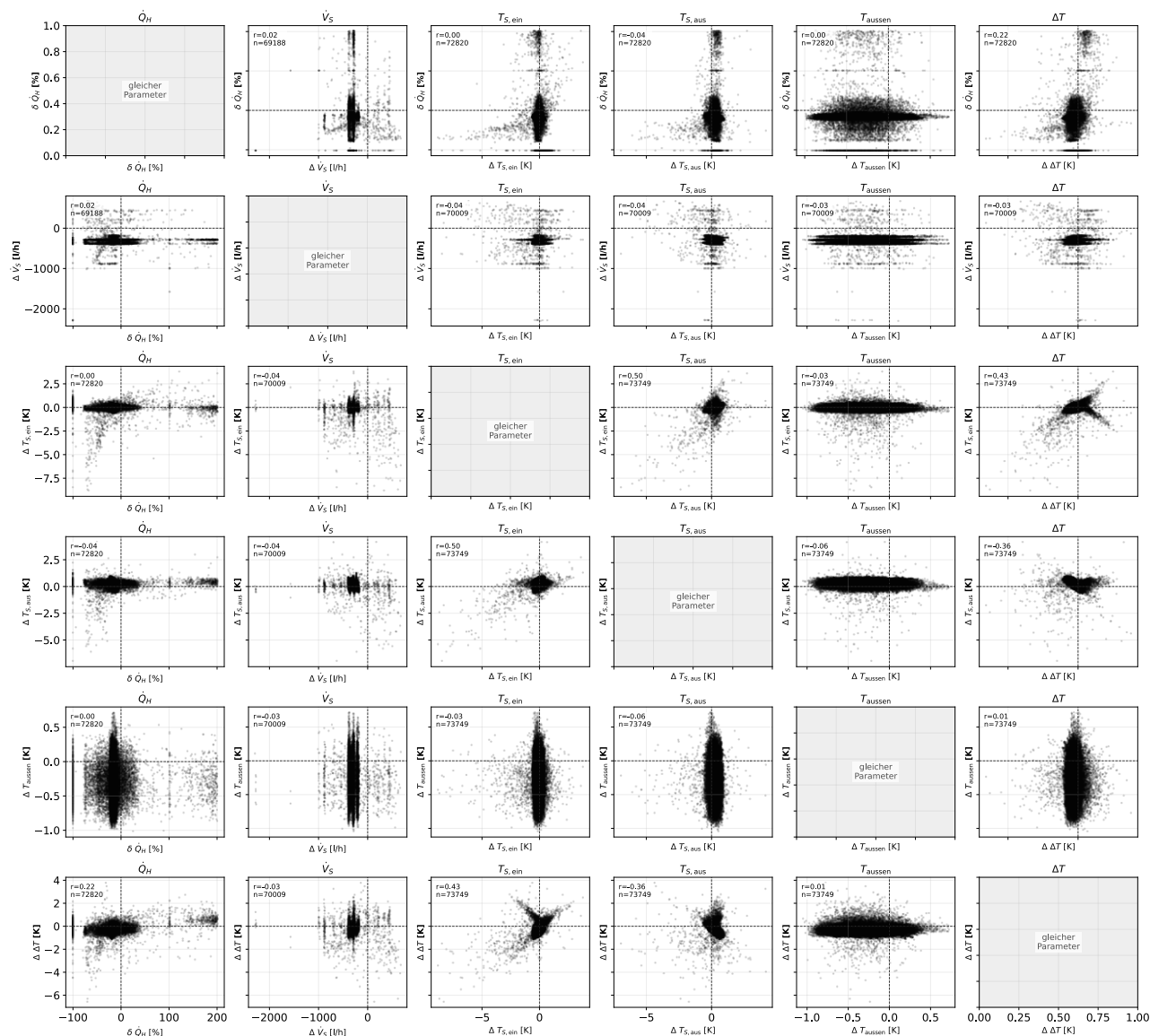


Abbildung 45: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. Abweichung (X-Achse) für Anlage F027

F027 - Abweichung vs. FM-Messwert anderer Parameter

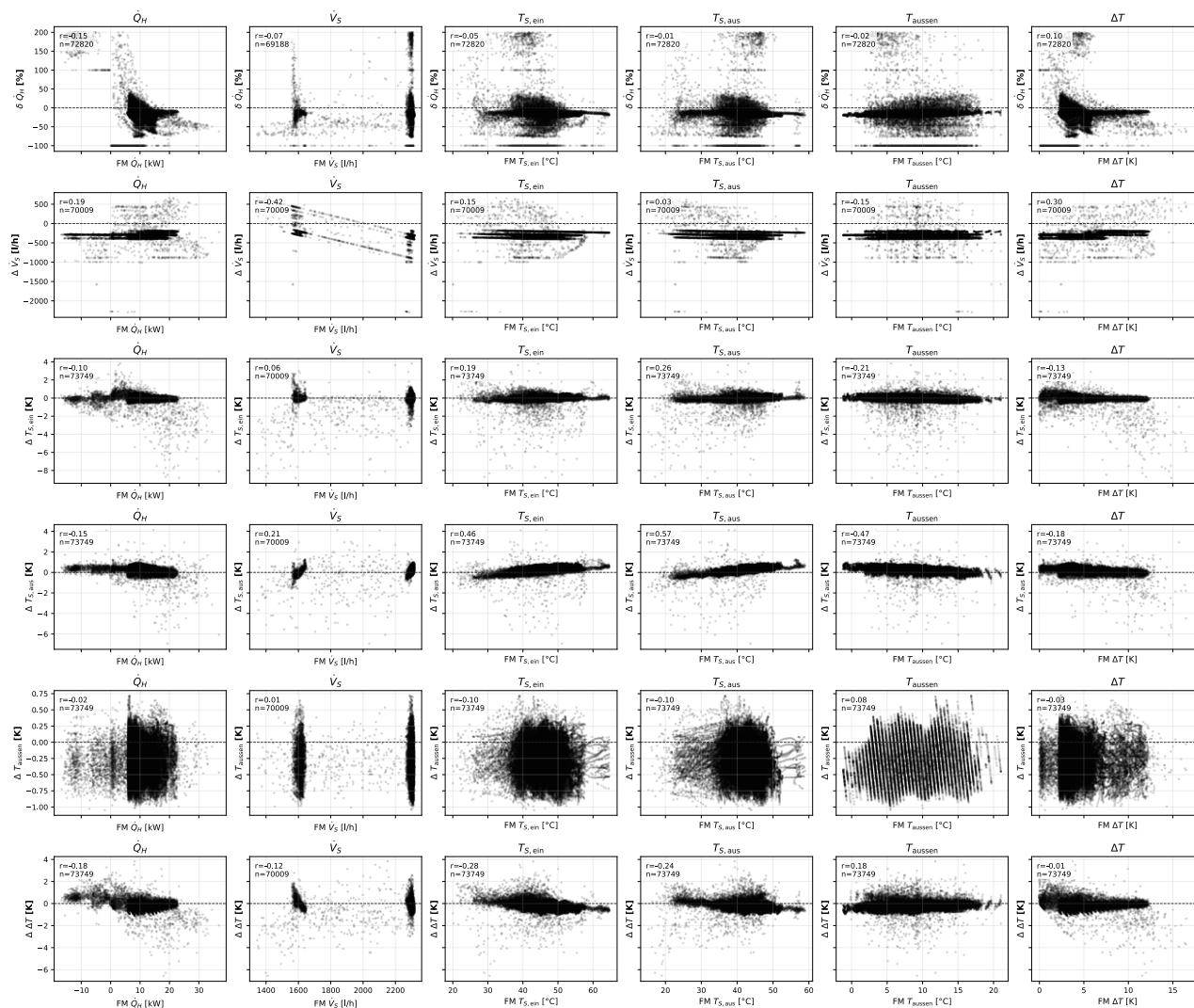


Abbildung 46: Korrelationsanalyse mittels Abweichung (Y-Achse) vs. FM-Messwert (X-Achse) für Anlage F027

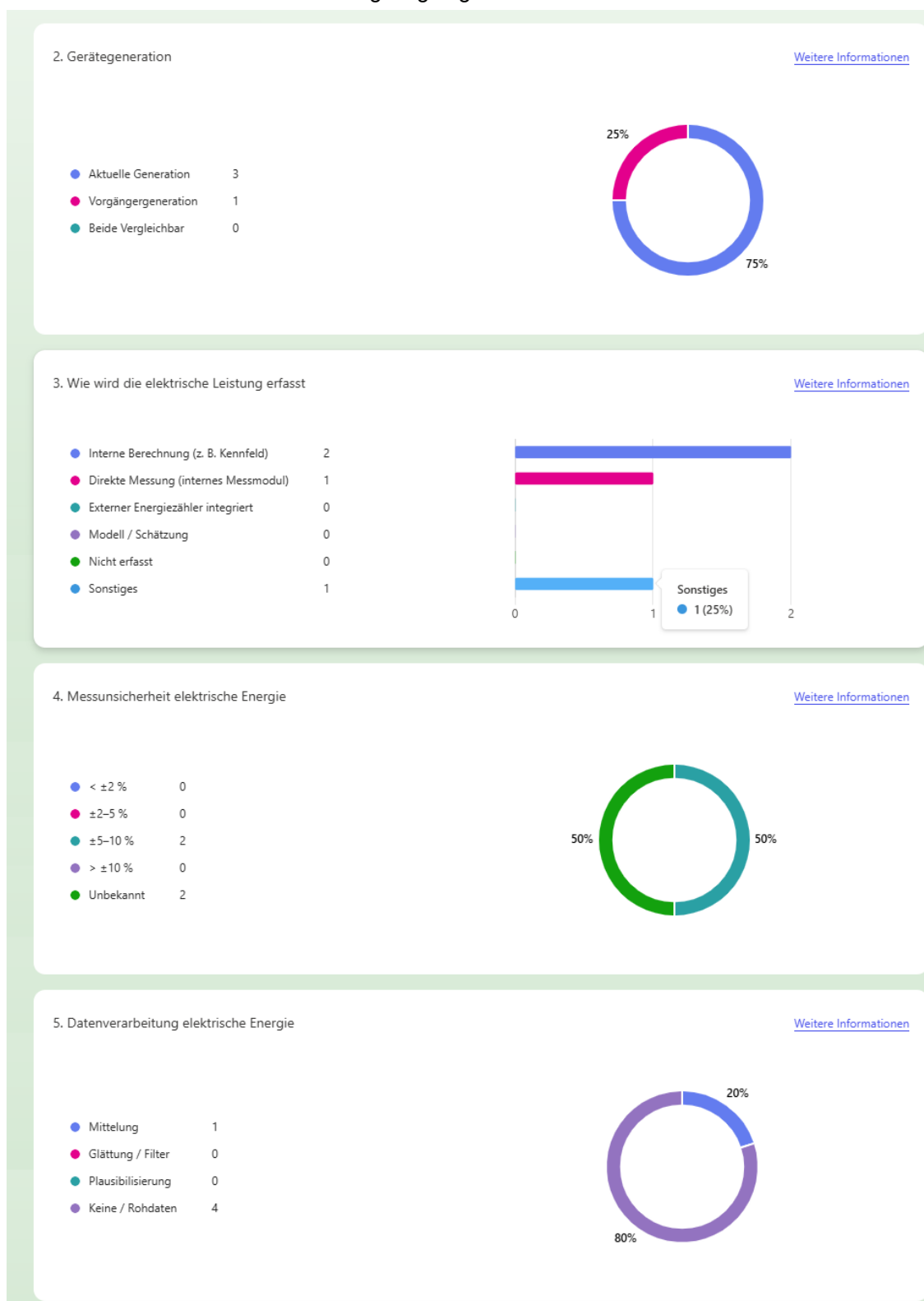
9.4.4 Übersichtstabelle Kennzahlen

Tabelle 25: Übersichtstabelle zu Kennzahlen (MBE, MAE, MRBE, MRAE, Σ -Abweichung (basierend auf 1-Min-Werten))

Anlage	Parameter	MBE	MAE	MRBE	MRAE	Summenabw.
F016	th. Energie			2.1	9.3	0.1
F016	el. Energie			-5.5	21.1	-5.8
F016	T_Q_auß	0.2	0.3			
F016	T_Q_ein	0.9	0.9			
F016	T_S_auß	-1.2	1.6			
F016	T_S_ein	-0.3	1.1			
F016	T_aussen	-0.5	0.6			
F016	delta_T	-0.8	1.1			
F017	th. Energie			-46.0	52.5	-34.7
F017	V_dot_S	-57.6	62.3			
F017	T_Q_ein	1.2	1.2			
F017	T_S_auß	0.4	0.6			
F017	T_S_ein	1.1	1.1			
F017	T_aussen	-0.7	0.8			
F017	delta_T	-0.1	0.7			
F024	el. Energie			-4.5	7.5	-4.6
F024	V_dot_S	-13.0	28.0			
F024	T_Q_ein	0.3	0.5			
F024	T_S_auß	0.5	0.8			
F024	T_S_ein	0.6	0.8			
F024	T_aussen	-3.4	3.4			
F024	delta_T	-0.1	0.4			
F024 (Polyn.)	th. Energie			11.7	19.6	5.7
F024 (durchfl.)	th. Energie			-6.3	13.0	-6.0
F027	th. Energie			-11.3	32.9	-15.0
F027	V_dot_S	-295.3	295.8			
F027	T_S_auß	0.1	0.4			
F027	T_S_ein	-0.2	0.3			
F027	T_aussen	-0.3	0.3			
F027	delta_T	-0.3	0.4			

9.5 Umfrage bei den involvierten Fabrikanten

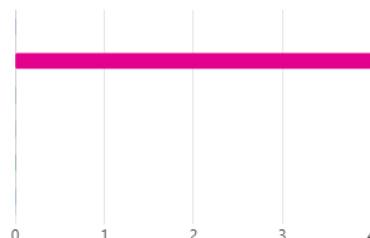
Um mehr über die verbaute Messtechnik zu erfahren wurde eine Umfrage an die Hersteller der Anlagen, bzw. an bekannte Kontaktpersonen bei den Herstellern versendet. Die Antworten haben rein informativen Charakter und sind daher nur hier im Anhang beigelegt.



6. Wie wird die thermische Energie bestimmt?

[Weitere Informationen](#)

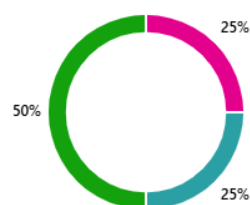
● Wärmemengenzähler (direkt)	0
● ΔT + Volumenstrom (wasserseitig)	4
● Enthalpiedifferenz + Massenstrom gemessen (Kältekreis)	0
● Enthalpiedifferenz + Massenstrom berechnet (Kältekreis)	0
● Modellbasiert	0
● Nicht erfasst	0



7. Messunsicherheit thermische Energie

[Weitere Informationen](#)

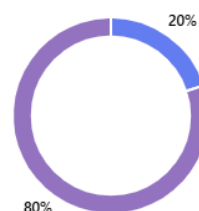
● < ±5 %	0
● ±5–10 %	1
● ±10–20 %	1
● > ±20 %	0
● Unbekannt	2



8. Datenverarbeitung thermische Energie

[Weitere Informationen](#)

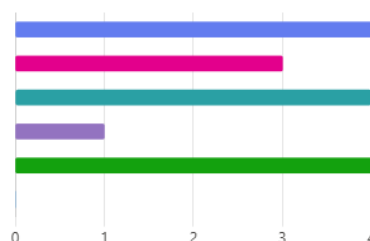
● Mittelung	1
● Glättung / Filter	0
● Plausibilisierung	0
● Keine / Rohdaten	4



9. Welche Temperaturen werden gemessen?

[Weitere Informationen](#)

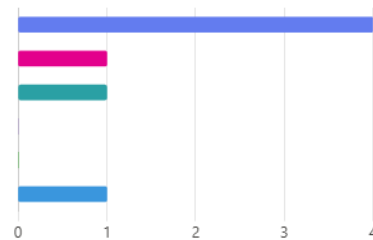
● Quelltemperatur	4
● Senktemperatur	3
● Aussentemperatur	4
● Raumtemperatur	1
● Kältekreis (Verdampfer, Kondensator, Sauggas, Heissgas)	4
● Sonstiges	0



11. Welche elektrischen Verbraucher sind im COP enthalten?

[Weitere Informationen](#)

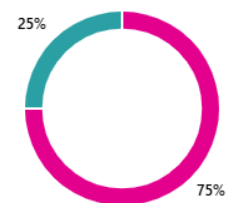
● Verdichter	4
● Ventilatoren	1
● Umwälzpumpen	1
● Steuerung	0
● Zusatzheizung	0
● Sonstiges	1



12. Werden Algorithmen zur Effizienzoptimierung verwendet?

[Weitere Informationen](#)

● Ja	0
● Nein	3
● Unbekannt	1
● Sonstiges	0



13. Falls ja, welche Optimierungen werden damit angestrebt?

0 übermittelte Antworten

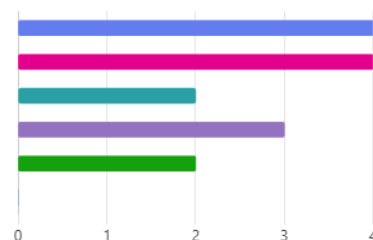
0
Antworten



14. Welche Betriebszustände werden in den Messdaten unterschieden?

[Weitere Informationen](#)

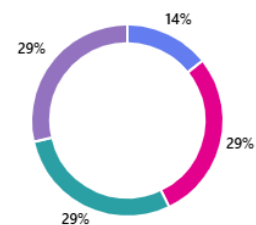
● Heizen	4
● Warmwasser	4
● Abtauen	2
● Kühlen	3
● Standby	2
● keine	0



15. Gab es Änderungen in neueren Gerätegenerationen?

[Weitere Informationen](#)

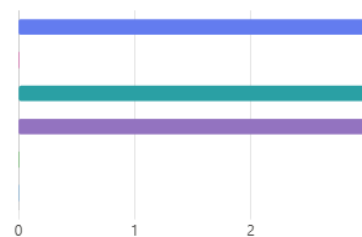
Ja, Sensorik verbessert	1
Ja, Algorithmen verbessert	2
Ja, Schnittstellen verbessert	2
Nein	2
Unbekannt	0



16. Verfügbare Schnittstellen / Datenspeicherung - **Stand Heute**

[Weitere Informationen](#)

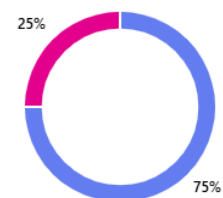
Modbus	3
API / Cloud	0
Hersteller-Portal	3
Lokale Speicherung (Gerät / Gateway)	3
Keine	0
Sonstiges	0



17. Eignung der internen Daten für Qualitätssicherung

[Weitere Informationen](#)

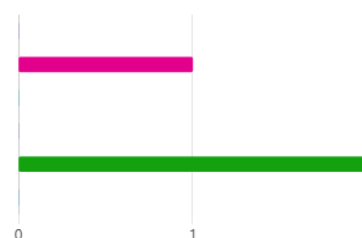
Gut geeignet	3
Eingeschränkt geeignet	1
Nicht geeignet	0
Sonstiges	0



18. Was fehlt für einfacheren Datenaustausch?

[Weitere Informationen](#)

Standardisierte Schnittstelle	0
Zentrale Datenaustausch Plattform	1
Höhere Datenauflösung	0
Bessere Dokumentation	0
Kein Bedarf	2
Sonstiges	0



9.6 Verdichter-Polynome (Erklärung)

Ein Verdichter Polynom ist ein empirisches, herstellerspezifisches Kennfeldmodell, mit dem sich Kälteleistung, Sauggas-Massenstrom und Leistungsaufnahme eines Verdichters als Funktion der Betriebsbedingungen (Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur) approximieren lassen, ohne dass eine physikalische Modellierung des Verdichtungsprozesses nötig ist. Die Koeffizienten werden dabei durch Regression an Herstellerdaten bestimmt und decken jeweils nur den spezifischen Anwendungsbereich ab, ausserhalb dessen keine Extrapolation zulässig ist.

Die in SN EN 12900:2025, Formel (1) (Abschnitt 5.3.1) definierte Polynomform (hier Formel 1) mit zehn Koeffizienten (C_1 – C_{10}) ist der in der Kälte- und Wärmepumpenbranche standardisierte Ansatz für diese Kennfeldbeschreibung.

$$X = C_1 + C_2S + C_3D + C_4S^2 + C_5(SD) + C_6D^2 + C_7S^3 + C_8(DS^2) + C_9(SD^2) + C_{10}D^3 \quad (\text{Formel 1})$$

X: Kälteleistung in Watt (W) oder Sauggas-Massenstrom in kg/s, oder Leistungsaufnahme in Watt (W)

S: Verdampfungstemperatur am Sauggas-Taupunkt in °C

D: Verflüssigungstemperatur am Sauggas-Taupunkt in °C, oder Verflüssigungsdruck in bar

C: Koeffizient

Impressum

Datum

11. August 2026

Verfasst von

Bernal Silvan

OST – Ostschweizer Fachhochschule

Technik/Institut für Energiesysteme

Werdenbergstrasse 4

9471 Buchs, Switzerland

T +41 58 257 31 82

silvan.bernal@ost.ch

www.ost.ch