

SIMULATION VON WÄRMEPUMPENSYSTEMEN AUF DER GRUNDLAGE VON KORRELATIONSFUNKTIONEN FÜR DIE LEISTUNGSDATEN DER WÄRMEPUMPE

Thomas Kemmler M.Sc. (*), Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas

Hochschule Reutlingen, Alteburgstraße 150, D-72762 Reutlingen,
thomas.kemmler@reutlingen-university.de, 07121-271-1469,
bernd.thomas@reutlingen-university.de, 07121-271-7041, <https://www.reutlingen-university.de/>

Kurzfassung: Um die Nutzung von erneuerbaren Energien nicht nur im Stromsektor voranzutreiben, eignen sich elektrisch angetriebene Wärmepumpen zur Kopplung des Strom- und Wärmesektors. Um die Leistungsfähigkeit und damit das Potential der Geräte in dieser Hinsicht quantitativ bewerten und berechnen zu können, werden Angaben zu den charakteristischen Kenndaten wie elektrische und thermische Leistung sowie COP benötigt. Für diesen Zweck werden in diesem Beitrag Korrelationsgleichungen für diese Größen für Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpen vorgestellt, die auf Basis einer Vielzahl von Herstellerdaten entwickelt wurden. Auf diese Weise ergibt sich eine gute Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit von dieser Art Wärmepumpen im Mittel abzubilden. Die Gleichungen sind in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperatur in einem Bereich von -5 bis 25°C für die Quelltemperatur und von 35 bis 50 bzw. 65°C für die Vorlauftemperatur korreliert. Die mittleren Abweichungen zwischen Herstellerdaten und korrelierten Werten liegen zwischen 2,1% und 6,4%.

Keywords: Wärmepumpe, Korrelationsgleichung, Simulation

1 Einleitung

Das deutsche Energiesystem befindet sich in einem Transformationsprozess. Das Ziel ist es, die im Pariser Abkommen beschlossene Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erreichen, um die globale Erwärmung zu stoppen [1]. Die Devise lautet: Weg von konventionellen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien. Ein spürbarer Anteil der erneuerbaren Energien hat sich bereits etabliert, insbesondere im Stromsektor. Im Jahr 2018 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland 37,8% [2]. Mit dem Ziel „50-80-90“ soll in Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050 der Energiebedarf um 50% reduziert werden, die erneuerbaren Energien sollen zu 80% an der Energieversorgung beteiligt sein, und die Emissionen von Treibhausgasen sollen um 90% sinken [3].

Um diese Ziele zu erreichen, muss unter anderem in der Wärmeversorgung von Gebäuden ein nachhaltiger Umbau stattfinden. Die Kopplung des Wärme- und Stromsektors mit Hilfe von Wärmepumpen spielt dabei eine wichtige Rolle. Um das Potenzial von Wärmepumpen abzuschätzen zu können, kann nicht für jedes Gebäude eine passende Dimensionierung durchgeführt werden. Passender ist stattdessen die Definition von Referenzgebäuden sowie

die Verwendung von mittleren Leistungsdaten von marktüblichen Wärmepumpen. Da Referenzgebäude schon stellenweise in der Literatur vorhanden sind [4], widmet sich dieser Beitrag der Ermittlung der mittleren Leistungsdaten von Wärmepumpen. Dabei werden auf Basis von Herstellerdaten die thermische und die elektrische Leistung sowie die Leistungszahl (COP) in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperatur korreliert. Ziel dieses Beitrags ist es demnach, die Leistungsfähigkeit der am Markt befindlichen Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpen im Mittel abzubilden, um Rechnungen und Simulationen zu unterstützen, bei denen entweder keine spezielle Wärmepumpe im Fokus steht, oder bei denen ein größeres Gebiet wie ein Stadtteil oder eine gesamte Region mit einer Vielzahl von Wärmepumpen analysiert werden soll. Für den anderen Fall, in dem der Einsatz einer speziellen Wärmepumpe untersucht werden soll, erübrigt sich die Verwendung der im Folgenden vorgestellten Korrelationsgleichungen, da direkt auf die Herstellerangaben zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Gerätes zurückgegriffen werden kann.

Auch in der Literatur wird an mehreren Stellen untersucht, wie effizient Wärmepumpen in verschiedenen Gebäuden und Objekten arbeiten. Tangwe et al entwickeln in [5] mittels multipler linearer Regression (MLR) ein Modell zur Berechnung der Leistungszahl (COP) einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP) auf Basis von experimentellen Werten. Diese werden verwendet, um den Einfluss der Außentemperatur und der relativen Feuchte der Luft auf die Leistungen der LWP untersuchen zu können. Im Vergleich zu unserer Veröffentlichung beschränkt sich das hier entwickelte MLR Modell auf eine spezielle LWP. Unsere Gleichungen sind jedoch auf Basis von verschiedenen Herstellerdaten entwickelt worden und bilden somit ein breites Spektrum an Wärmepumpen ab. Zudem werden bei unserer Veröffentlichung auch Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWP) untersucht. Die Studie von Chen et al [6] entwickelt für ein SWP System mittels numerischer Simulation und multipler Regression ein Modell für einen Erdwärmetauscher. Hierfür wurden neun Korrelationsgleichungen entwickelt, die die verschiedenen Charakteristiken des Wärmetauschers abbilden. Diese wurden mittels Messdaten überprüft. Da dieses Paper ebenfalls lediglich ein bestimmtes Modell einer Wärmepumpe bzw. eines Wärmetauschers untersucht, ist der Mehrwert unserer Studie das breite Spektrum an Herstellerdaten für die Ermittlung der Korrelationsgleichungen. Eine weitere interessante Studie sind die Untersuchungen von Simon et al [7]. Ähnlich wie in unserer Studie werden hier mit Hilfe von multipler Regression Korrelationsgleichungen auf Basis von Herstellerdaten für drei SWP entwickelt. Die Abweichungen der entwickelten Gleichungen zu diesen Daten liegen bei 0,21%, 0,95% und 1,02% für die Wärmeleistung der drei Wärmepumpen und bei 2,62%, 4,91% und 3,21% für die COP-Werte.

2 Vorgehensweise

2.1 Datengrundlage, Strukturierung und Datenblattrecherche

Ziel ist es, möglichst viele Wärmepumpen mittels der Korrelationsgleichungen abzubilden. Zu diesem Zweck ist eine Übersicht der am Markt verfügbaren Wärmepumpen erstellt worden, die sich an der Liste „Wärmepumpen mit Prüfnachweis“ des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) orientiert [8]. Diese Liste enthält alle in Deutschland förderfähigen Wärmepumpen und stellt damit eine gute Grundlage für die Erstellung der Korrelationsgleichungen dar. Da der deutsche Wärmepumpenmarkt vornehmlich aus LWP

und SWP besteht [9], beschränken sich die Korrelationsgleichungen sowie die dazu nötige Datenblattrecherche auf diese beiden Typen. Im ersten Schritt ist anhand der Literatur eine grobe Einteilung der Wärmepumpen nach Anwendungstyp durchgeführt worden: Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung zwischen 5 und 18 kW_{th} repräsentieren Anlagen für Einfamilienhäuser (EFH). Anlagen mit einer thermischen Leistung zwischen 18 und 35 kW_{th} werden in Mehrfamilienhäusern (MFH) eingesetzt. Anlagen zwischen 35 und 80 kW_{th} finden Anwendung im gewerblichen Bereich und Anlagen größer 80 kW_{th} stellen Sonderlösungen dar [10]. Damit die Kennwerte der Wärmepumpen über einen breiten Quelltemperaturbereich abgebildet werden können, fokussiert sich die Recherche auf Datenblätter, in denen Leistungskurven oder Leistungstabellen der Wärmepumpe über einen breiten Bereich der Luft- oder Soletemperatur abgebildet sind. Datenblätter, die lediglich Leistungsangaben an den Normbetriebspunkten gemäß der Norm EN 14511 [11], beispielsweise am Betriebspunkt B0/W35 für SWP was einer Quelltemperatur von 0°C und einer Vorlauftemperatur des Heizungsvorlaufs von 35°C entspricht, aufweisen, sind daher ungeeignet.

Als Grenzen für den Quelltemperaturbereich werden Werte zwischen -5 und 25°C festgelegt, welche mit den Korrelationsgleichungen abgebildet werden. Zwar können auch Lufttemperaturen auftreten, die niedriger als -5°C sind, jedoch ist dies nur in wenigen Tagen des Jahres der Fall. Deshalb können die Kennwerte für diese Temperaturbereiche unter Einbußen in der Genauigkeit durch Extrapolation berechnet werden. Wichtig ist jedoch, dass die Korrelationsgleichungen im angegebenen Temperaturbereich zwischen -5 und 25°C möglichst genau sind, da diese Temperaturen über das Jahr verteilt am häufigsten auftreten. Der Bereich für die Vorlauftemperatur liegt zwischen 35 und 65°C; auch hier gilt, dass die Genauigkeit der Korrelationen bei Temperaturen außerhalb dieses Bereiches aufgrund der Extrapolation abnimmt.

2.2 Erstellung der Korrelationsgleichungen

Die Leistungsdaten für die thermische und elektrische Leistung der Wärmepumpe sind anschließend mit dem „Curve-Fitting-Tool“ der Curve-Fitting-Toolbox von MATLAB [12] strukturiert analysiert und korreliert worden. Mit Hilfe der Curve-Fitting-Toolbox von MATLAB lassen sich verschiedenste Datenanalysen durchführen. Zudem können Regressionsanalysen sowohl für lineare und nichtlineare Modelle mit vorhandenen Bibliotheken oder auch mit selbst definierten Gleichungen vorgenommen werden.

Dabei ist wichtig zu erwähnen, dass sich die Herangehensweise bei der Erstellung der Korrelationsgleichungen zwischen SWP und LWP aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheidet. Bei Außentemperaturen zwischen ca. 7 und 10°C neigen die Verdampfungswärmetauscher der LWP dazu, auf ihrer Oberfläche Eis zu bilden. Dies liegt an der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit, die am Verdampfer der Wärmepumpe kondensiert, so dass es bei Wandtemperaturen unterhalb von 0°C zur Eisbildung kommt. Durch die deshalb erforderliche Energie zur Abtauung weisen die Leistungskurven der LWP eine zum Teil stark und zum Teil weniger stark ausgeprägte Nichtlinearität auf, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Um diesen Vorgang in den Korrelationsgleichungen abbilden zu können, werden sie für die LWP abschnittsweise erstellt, und zwar von -5 bis <7°C, von 7 bis 10°C und von >10 bis 25°C Außenlufttemperatur. Dieses Abtauphänomen tritt bei SWP nicht auf. Die Leistungskurven von

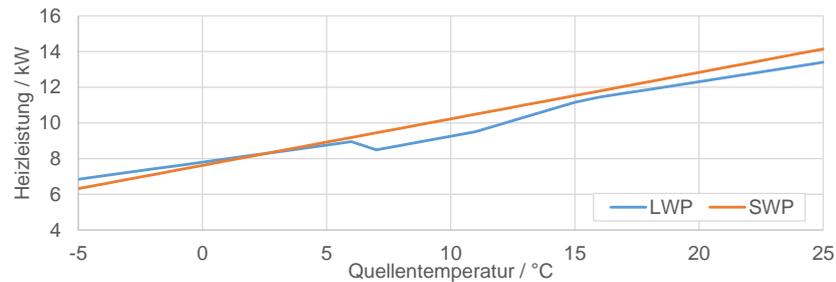


Abbildung 1: Einfluss des Abtaueffekts auf die Heizleistung einer LWP (blau) im Vergleich zur Leistungskurve einer SWP ohne Abtauung (orange)

SWP sind über den Quelltemperaturbereich überwiegend linear (vgl. Abbildung 1). Demgemäß werden die Korrelationsgleichungen für die SWP über den kompletten Quelltemperaturbereich von -5 bis 25°C erstellt. Des Weiteren ist anzumerken, dass die jeweilige Leistung der Wärmepumpe ebenfalls in den Korrelationsgleichungen berücksichtigt wird, in dem die Funktionen auf die Nennleistung für den ausgewählten Betriebspunkt nach Norm (z.B. B0/W35) bezogen oder normiert werden. Neben der elektrischen und thermischen Leistung werden zudem die COP-Werte aus den Datenblättern korreliert. Da der COP dimensionslos ist und nicht von der jeweiligen Nennleistung der einzelnen WP abhängt sowie sich innerhalb der Leistungsklassen ähnlich verhält, können diese Werte direkt in das Curve-Fitting-Tool (CFT) eingespeist werden, ohne normiert werden zu müssen.

Entsprechend der dargelegten Vorgehensweise werden die Korrelationsgleichungen in der Curve-Fitting-Toolbox von MATLAB entwickelt. Als Bewertungskriterium für die Güte der Gleichungen wird das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet. Ein hohes Bestimmtheitsmaß R^2 beschreibt dabei eine zu den Inputdaten gut passende Korrelationsgleichung. Außerdem sind Ergebnisse der Gleichungen nochmals abschließend mit den Herstellerdaten verglichen worden.

3 Ergebnisse

3.1 Datenblätter

Wie zuvor beschrieben, war es bei der Recherche der Datenblätter wichtig, dass diese nicht nur Daten an einzelnen Betriebspunkten enthalten, sondern Leistungskurven oder -tabellen über einen größeren Quellen- und Vorlauftemperaturbereich. Die Liste aus [8] enthält über 2.000 Wärmepumpen unterschiedlicher Leistungen. Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der Datenblätter je Leistungsklasse und Wärmepumpentyp. Der jeweils innere Ring stellt die gesamte Anzahl an gelisteten SWP und LWP in der jeweiligen Leistungsklasse aus [8] dar. Der äußere Ring zeigt die Anzahl der verwertbaren Datenblätter je Kategorie und Typ. Insgesamt wurden 65 aussagekräftige Datenblätter gefunden; 40 für SWP und 25 für LWP in den jeweiligen Kategorien. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, sind sowohl bei den SWP als auch den LWP die meisten Datenblätter für die Leistungsklasse von 5 bis $18 \text{ kW}_{\text{th}}$ verfügbar. Vermutlich liegt dies daran, dass in Wohngebäuden vornehmlich Wärmepumpen dieser Leistungsklasse installiert werden und deshalb hier die höchste Nachfrage und damit die größte Vielfalt an Wärmepumpen vorliegt. Für Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung größer als 80 kW sind nur wenige Informationen in [8] enthalten; für LWP sind in dieser Kategorie keine Geräte gelistet. Es ist offensichtlich, dass die Aussagefähigkeit der abgeleite-

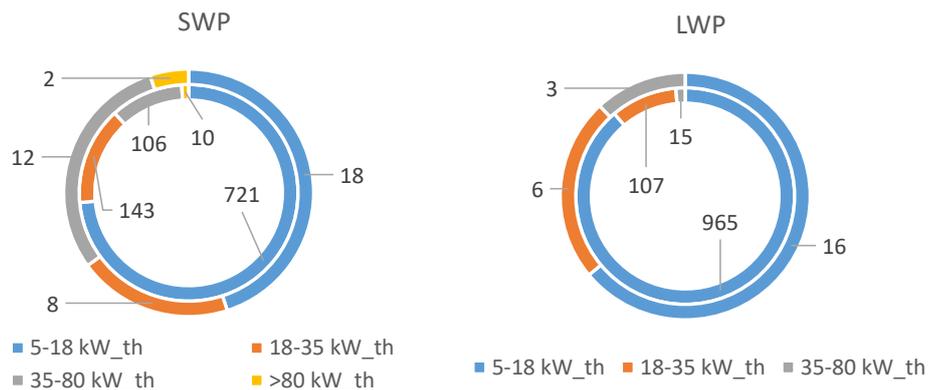


Abbildung 2: Aufteilung der relevanten Datenblätter je Leistungsklasse und Wärmepumpentyp

ten Korrelationsgleichungen mit kleiner werdender Zahl an betrachteten Wärmepumpen geringer wird.

3.2 Korrelationsgleichungen

3.2.1 Korrelationsgleichungen für Sole-Wasser-Wärmepumpen

Wie bereits in Kapitel 2.2 angesprochen, verhalten sich die Kennlinien der SWP überwiegend linear und zwar sowohl in Abhängigkeit der Quelltemperatur als auch der Vorlauftemperatur. Deshalb werden lineare Korrelationsgleichungen gemäß Gl. 1-3 zur Wiedergabe der Kenndaten verwendet, wobei die Nennleistungen \dot{Q}_{thNenn} und P_{elNenn} jeweils auf den Normpunkt B0/W35 bezogen sind. Die Temperaturen T_{VL} und T_{Quelle} sind dabei in der Einheit °C einzusetzen.

$$\dot{Q}_{th,SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot \dot{Q}_{thNenn} \quad (1)$$

$$P_{el,SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot P_{elNenn} \quad (2)$$

$$COP_{SWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \quad (3)$$

Es ist zu erkennen, dass neben den linearen Gliedern für die Quellen- und die Vorlauftemperatur auch ein gemischtes Glied enthalten ist, um eventuelle Interaktionen dieser beiden Temperaturen berücksichtigen zu können. Die zugehörigen Koeffizienten a , b , c und d sind in Tabelle 1 für die drei Kenngrößen und die vier betrachteten Leistungsklassen zusammengestellt. Ebenso ist das Bestimmtheitsmaß R^2 für jede Korrelation angegeben. Über den Vergleich der Koeffizienten b und c kann der Einfluss der Quellen- und der Vorlauftemperatur auf die jeweilige Korrelation und damit auf die entsprechend wiedergegebene Kenngröße betrachtet werden. Wie man sehen kann, hängen danach die thermische Leistung und der COP stärker von der Quelltemperatur im Vergleich zur Vorlauftemperatur ab, während es sich bei der elektrischen Leistung genau umgekehrt verhält. Die Erklärung hierfür ist, dass für eine höhere Vorlauftemperatur der Verdichter in der Wärmepumpe mehr Arbeit verrichten muss und somit mehr elektrischer Strom benötigt wird (vgl. Abbildung 3). Der Einfluss der Quelltemperatur auf die elektrische Leistung ist bei den meisten betrachteten SWP recht gering was ebenfalls in Abbildung 3 zu sehen ist. Die Güte der Korrelationsgleichungen ist bei den SWP durchgehend recht gut, was sich durch ein hohes Bestimmtheitsmaß über 0,91 zeigt. Insbesondere bei der Leistungsklasse $> 80 \text{ kW}_{th}$ darf das

Tabelle 1: Koeffizienten der Korrelationsgleichungen nach Gl. 1-3 für SWP

Solewärmepumpen							
5-18 kW _{th}	\dot{Q}_{th}	P_{el}	COP	35-80 kW _{th}	\dot{Q}_{th}	P_{el}	COP
a / -	1,21865	0,10929	7,68429	a / -	1,10562	0,07925	7,49233
b / 1/°C	-0,00611	0,02536	-0,08818	b / 1/°C	-0,00317	0,02569	-0,08100
c / 1/°C	0,04030	-0,00462	0,25313	c / 1/°C	0,03773	-0,00071	0,18945
d / 1/°C ²	-0,00022	0,00014	-0,00302	d / 1/°C ²	-0,00023	0,00009	-0,00210
R ²	0,9698	0,9405	0,9180	R ²	0,9371	0,9336	0,9626
18-35 kW_{th}				>80 kW_{th}			
a / -	1,13654	0,11708	7,06715	a / -	1,13968	0,15202	7,45334
b / 1/°C	-0,00407	0,02460	-0,07684	b / 1/°C	-0,00415	0,02416	-0,08606
c / 1/°C	0,03898	-0,00359	0,20344	c / 1/°C	0,03389	0,00829	0,15183
d / 1/°C ²	-0,00023	0,00014	-0,00231	d / 1/°C ²	-0,00016	-0,00011	-0,00150
R ²	0,9321	0,9638	0,9162	R ²	0,9994	0,9982	0,9472

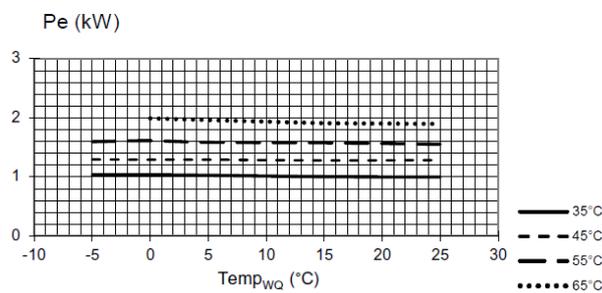


Abbildung 3: Auszug aus dem Datenblatt der SWP „SW 42H3“ der Firma „alpha innotec“ für P_{el} [13]

hohe Bestimmtheitsmaß aber nicht überbewertet werden, da hier nur zwei Wärmepumpen betrachtet werden konnten (vgl. Abbildung 2). Durch die Linearität der Kennlinien bei SWP können die Kennwerte durch die verwendeten Korrelationsgleichungen im Mittel gut abgebildet werden. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsgleichungen für die Heizleistung im Vergleich zu den Herstellerdaten für eine gut und eine weniger gut zu der Korrelation passende Wärmepumpe. Dabei handelt es sich konkret um zwei SWP der Leistungsklasse zwischen 5 und 18 kW_{th}. Die gestrichelten Linien zeigen die Herstellerdaten und die punktierten Linien die korrelierten Werte. Wie im linken Diagramm zu sehen ist, stimmen die berechneten Werte sehr gut mit den Herstellerdaten überein. Die Unterschiede beider Datensätze sind gering mit einer mittleren Abweichung von 1,5% bezogen auf die absolute Differenz zwischen Korrelations- und Herstellerdaten. Die maximale Abweichung liegt bei 2,8%. Für die im rechten Diagramm dargestellten Werte liegt die mittlere Abweichung dagegen bei 8,1% und die maximale Abweichung beträgt sogar 38,2%. Vor allem bei der Vorlauftemperatur von 65°C werden die Daten im rechten Diagramm durch die Korrelationsgleichung schlecht wiedergegeben. Diese Wärmepumpe hat im Vergleich zu den übrigen Geräten offensichtlich eine andere Charakteristik hinsichtlich ihrer thermischen Leistung. Dies zeigt, dass es schwierig ist, ein größere Zahl Wärmepumpen durch eine gemeinsame Korrelationsgleichung abzubilden. Im Mittel sind die Abweichungen der Korrelationsergebnisse von den Herstellerdaten jedoch gering, was zum einen durch das hohe Bestimmtheitsmaß bestätigt wird und zum anderen durch die Boxplots in Abbildung 5 gezeigt wird. In den Boxplots sind die Abweichungen der korrelierten Werte von den Herstellerdaten für alle betrachteten SWP zusammenfasst. Es zeigt sich, dass der Median der Abweichungen für die thermische Leistung bei 2,1% und für die

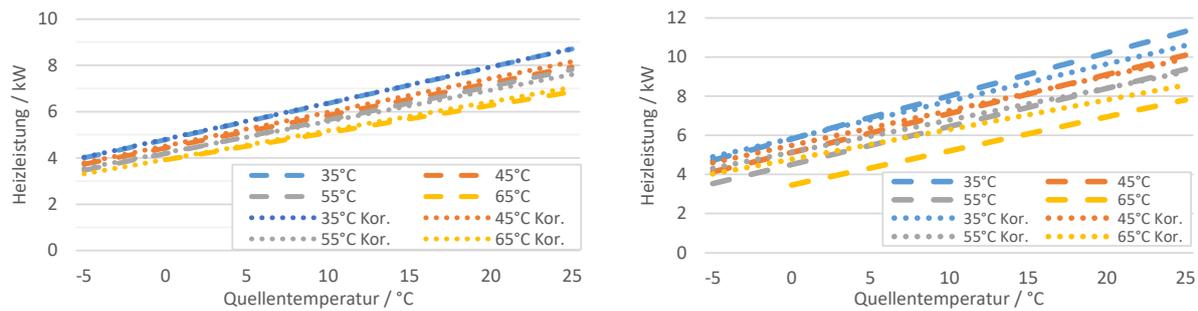


Abbildung 4: Vergleich der Korrelationsergebnisse mit Herstellerwerten für die Heizleistung für eine SWP mit geringen (links) und größeren Abweichungen (rechts)

elektrische Leistung bei 2,6% liegt. Für den COP zeigen die Korrelationen zwar etwas höhere Abweichungen im Vergleich zu den normierten Leistungen, dennoch kann auch der COP aus den Korrelationsgleichungen recht gut wiedergegeben werden; der Median aller Abweichungen liegt bei 4,9%. Dass es durchaus größere Abweichungen beim COP von bis zu 23% und bei den Leistungsdaten sogar von über 30% gibt, wie auch in Abbildung 4 gezeigt, ist an den durch die roten Kreuze gekennzeichneten Ausreißer in den Boxplots zu erkennen. Die Häufigkeit derartiger größerer Abweichungen ist aber per Definition des Boxplots gering, und sie liegt im Bereich von 5,7%. Daraus folgt, dass über 94% der Abweichungen zwischen korrelierten Werten und Herstellerdaten beim COP kleiner als 16,8%, bei P_{el} kleiner als 9,3% und bei \dot{Q}_{th} kleiner als 8,2% sind. 50% der Werte befinden sich per Definition des Boxplots innerhalb des blauen Kastens und liegen wie zu erkennen in einem niedrigen Bereich: Bei \dot{Q}_{th} kleiner als 3,8%, bei P_{el} kleiner als 4,5% und beim COP kleiner als 8,2%.

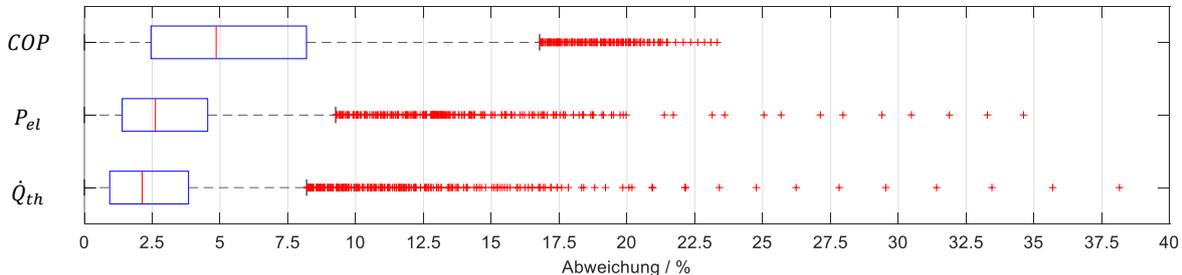


Abbildung 5: Abweichung der korrelierten Werte von den Herstellerdaten für alle untersuchten SWP

3.2.2 Korrelationsgleichungen für Luft-Wasser-Wärmepumpen

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, werden die Korrelationsgleichungen für LWP im Hinblick auf die Quelltemperatur abschnittsweise erstellt, um auf diese Weise das Abtauverhalten besser abbilden zu können. Zudem verhalten sich die Kennwerte für LWP teilweise nicht linear, insbesondere im Bereich der Abtauung. Deshalb werden im Unterschied zu den SWP stellenweise polynomische Funktionen zweiten Grades für die Korrelation verwendet. Einzig die elektrische Leistung kann über den gesamten Bereich der Quelltemperatur mit einer linearen Korrelation, ähnlich wie bei den SWP, wiedergegeben werden.

Im Folgenden sind die Gleichungen für die elektrische und die thermische Leistung sowie für den COP für LWP aufgeführt. Die Nennleistungen \dot{Q}_{thNenn} und P_{elNenn} sind auf den Normpunkt A2/W35 bezogen, und die Temperaturen T_{VL} und T_{Quelle} sind wiederum in der Einheit °C einzusetzen.

$$\dot{Q}_{th,LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} + e \cdot T_{VL}^2 + f \cdot T_{Quelle}^2) \cdot \dot{Q}_{thNenn} \quad (4)$$

$$P_{el,LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}) \cdot P_{elNenn} \quad (5)$$

$$COP_{LWP} = (a + b \cdot T_{VL} + c \cdot T_{Quelle} + d \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} + e \cdot T_{VL}^2 + f \cdot T_{Quelle}^2) \quad (6)$$

Die Koeffizienten a bis f sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengestellt. Es erfolgt wiederum die Unterteilung nach Kenngröße, nach Leistungsklasse, wobei die große Leistungsklasse >80 kW_{th} fehlt, da hier keine verwertbaren Datenblätter recherchiert werden konnten, und nach dem Bereich für die Quelltemperatur, die ja in drei Abschnitte unterteilt wurde, um den Effekt der Abtauung besser berücksichtigen zu können. Außerdem ist wieder das Bestimmtheitsmaß R^2 für jede Korrelation angegeben. Anhand der Bestimmtheitsmaße kann man auch erkennen, dass das physikalische Verhalten einer LWP schwieriger abzubilden ist im Vergleich zu SWP, bzw. dass die Werte für die Wärmepumpen der unterschiedlichen betrachteten Hersteller für diesen Typ stärker streuen. Vor allem im Bereich der Abtauung, also zwischen 7 und 10°C, lassen sich die thermische Leistung und der COP von LWP schlecht mit Hilfe einer gemeinsamen Korrelationsgleichung abbilden, was sich am niedrigen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,32$ für die Leistungsklasse 5 bis 18 kW_{th} und $R^2 = 0,46$ bei 18 bis 35 kW_{th} widerspiegelt. Das Verhalten der untersuchten LWP ist in diesem Bereich nicht einheitlich. Dies zeigt aber auch, dass es wichtig war, die Korrelation abschnittsweise vorzunehmen, da ansonsten der Einfluss der Abtauung die gesamte Korrelationsgleichung zu Ungunsten der Genauigkeit beeinflusst hätte. In den Temperaturbereichen von -5 bis $<7^\circ\text{C}$ und >10 bis 25°C , wird generell ein höheres Bestimmtheitsmaß erreicht als im Bereich der Abtauung, wie Tabelle 2 zu entnehmen ist. Bei Betrachtung der Koeffizienten für das gemischte Glied d und die beiden quadratischen Glieder e und f in Tabelle 2 fällt auf, dass diese teilweise sehr klein oder sogar gleich null sind. Im Fall einer Null wurde der Term bei der Korrelation nicht berücksichtigt. Im Falle sehr kleiner Werte ist der Einfluss des Terms zwar gegeben, aber er ist sehr klein. Daraus lässt sich ableiten, dass die Korrelationsgleichung mit gewissen Genauigkeitseinbußen auch in vereinfachter Form ohne diese Terme ausgewertet werden kann, wenn beispielsweise die Rechenzeit kritisch ist. (Beim Vergleich der Zahlenwerte mit den Koeffizienten a sowie b und c ist zu beachten, dass ein Unterschied aufgrund des unterschiedlichen Bezugs auf die Temperatur oder das Quadrat der Temperatur gegeben ist, der in den quantitativen Vergleich einbezogen werden muss.) Auch für die LWP soll ein Vergleich der Ergebnisse aus den Korrelationsgleichungen mit den Herstellerdaten geführt und diskutiert werden. Abbildung 6 zeigt diesen Vergleich an zwei Beispielen. Wiederum sind im linken Diagramm die Daten einer LWP aufgetragen, die sehr gut über die Korrelationsgleichungen abgebildet werden kann. Die mittlere Abweichung liegt hier bei 1,4% mit einer maximalen Abweichung von 4,8%. Im rechten Diagramm in Abbildung 6 sind dagegen Werte für eine LWP aufgetragen, bei der die Abtauung die Kenndaten stark beeinflusst. Deshalb weichen die korrelierten Werte stärker von den Herstellerdaten ab. Die mittlere Abweichung liegt hier bei 3,6% mit einer maximalen Abweichung von 10,4%. Des Weiteren ist generell anzumerken, dass für LWP im Vergleich zu den SWP nur ein kleinerer Bereich für die Vorlauftemperatur abgebildet werden kann, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Statt eines Bereichs von 35 bis 65°C sind bei LWP lediglich Vorlauftemperaturen zwischen 35 bis 50°C mit den Korrelationsgleichungen verlässlich abbildbar. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen bei Verwendung von Luft als Wärmequelle sind die erreichbaren Vorlauftemperaturen aus Gründen der Effizienz begrenzt. Erschwerend kommt hinzu, dass gemäß Heizkurve höhere Vorlauftemperaturen gerade bei niedrigen Au-

Tabelle 2: Koeffizienten der Korrelationsgleichungen für LWP

Luftwärmepumpen								
5-18 kW _{th}	\dot{Q}_{th}	COP	18-35 kW _{th}	\dot{Q}_{th}	COP	35-80 kW _{th}	\dot{Q}_{th}	COP
-5 - <7°C			-5 - <7°C			-5 - <7°C		
a / -	1,04213	5,39800	a / -	1,03825	4,79304	a / -	1,10902	6,28133
b / 1/°C	-0,00234	-0,05601	b / 1/°C	-0,00223	-0,04132	b / 1/°C	-0,00478	-0,10087
c / 1/°C	0,03152	0,14818	c / 1/°C	0,02272	0,05651	c / 1/°C	0,02136	0,11251
d / 1/°C ²	-0,00019	-0,00185	d / 1/°C ²	0	0	d / 1/°C ²	0,00019	-0,00097
e / 1/°C ²	0	0	e / 1/°C ²	0	0	e / 1/°C ²	0	0,00056
f / 1/°C ²	0	0,00080	f / 1/°C ²	0	0	f / 1/°C ²	0	0,00069
R ²	0,8588	0,7945	R ²	0,7691	0,5986	R ²	0,9290	0,9926
7 - 10°C			7 - 10°C			7 - 10°C		
a / -	1,02701	6,22734	a / -	0,93526	6,34439	a / -	1,08294	6,23384
b / 1/°C	-0,00366	-0,07497	b / 1/°C	-0,00050	-0,10430	b / 1/°C	-0,00438	-0,09963
c / 1/°C	0,03202	0,07841	c / 1/°C	0,03926	0,07510	c / 1/°C	0,03386	0,11295
d / 1/°C ²	0,00003	0	d / 1/°C ²	-0,00021	-0,00016	d / 1/°C ²	0	-0,00061
e / 1/°C ²	0	0	e / 1/°C ²	0	0,00059	e / 1/°C ²	0	0,00052
f / 1/°C ²	0	0	f / 1/°C ²	0	0	f / 1/°C ²	0	0
R ²	0,3208	0,8140	R ²	0,4607	0,5828	R ²	0,7544	0,9916
>10 - 25°C			>10 - 25°C			>10 - 25°C		
a / -	0,81917	5,59461	a / -	0,79796	5,07629	a / -	1,10262	5,00190
b / 1/°C	-0,00301	-0,06710	b / 1/°C	0,00005	-0,04833	b / 1/°C	-0,00316	-0,04138
c / 1/°C	0,06510	0,17291	c / 1/°C	0,05928	0,09969	c / 1/°C	0,02950	0,10137
d / 1/°C ²	-0,00003	-0,00097	d / 1/°C ²	-0,00026	-0,00096	d / 1/°C ²	-0,00009	-0,00112
e / 1/°C ²	0	0	e / 1/°C ²	0	0,00009	e / 1/°C ²	0	0
f / 1/°C ²	-0,00112	-0,00206	f / 1/°C ²	-0,00066	0	f / 1/°C ²	0,00008	0,00027
R ²	0,6681	0,8133	R ²	0,7512	0,5665	R ²	0,7026	0,9885

Tabelle 3: Koeffizienten der Korrelationsgleichungen für P_{el} der LWP

	P _{el}		
	5-18 kW _{th}	18-35 kW _{th}	35-80 kW _{th}
a / -	0,49369	0,43778	0,27628
b / 1/°C	0,01394	0,01611	0,02061
c / 1/°C	-0,00084	0,00228	-0,00112
d / 1/°C ²	0,00021	0,00008	0,00012
R ²	0,8532	0,8470	0,8800

ßentemperaturen erforderlich sind. D.h., der Temperaturhub ist hier am größten, so dass der COP entsprechend gering ausfällt. Daher sind LWP in ihrer Vorlauftemperatur stärker begrenzt, und somit bilden die Korrelationsgleichungen einen geringeren, durch Daten abgesicherten Vorlauftemperaturbereich ab. Zwar können auch hier durch Extrapolation Werte außerhalb der Grenzen berechnet werden, jedoch müssen Einbußen in der Genauigkeit hingenommen werden, und die Ergebnisse sind nicht durch vorhandene Daten abgesichert. Abbildung 7 zeigt die Abweichungen der Korrelationsgleichungen gemäß Gl. 4-6 zu den Herstellerdaten aller untersuchten LWP und alle Temperaturbereiche im Hinblick auf die vorab definierten Bereiche für die Quelltemperatur. Es ist zu erkennen, dass sich der Median der Abweichungen für LWP bei der thermischen Leistung bei 2,6% und bei der elektrischen Leistung bei 3,2% befindet, was als gute Übereinstimmung zu bewerten ist. Dennoch gibt es auch hier Ausreißer. Die maximalen Abweichungen liegen entsprechend bei 18,7% für die thermische und bei 19,6% für die elektrische Leistung. Diese größeren Abweichungen sind ebenso wie bei den SWP der Tatsache geschuldet, dass es vereinzelte LWP gibt, die eine andere Dynamik im Vergleich zu den übrigen untersuchten Geräten aufweisen und dem entsprechend stärker von der mittleren Leistungsfähigkeit der LWP abweichen. Per Definition

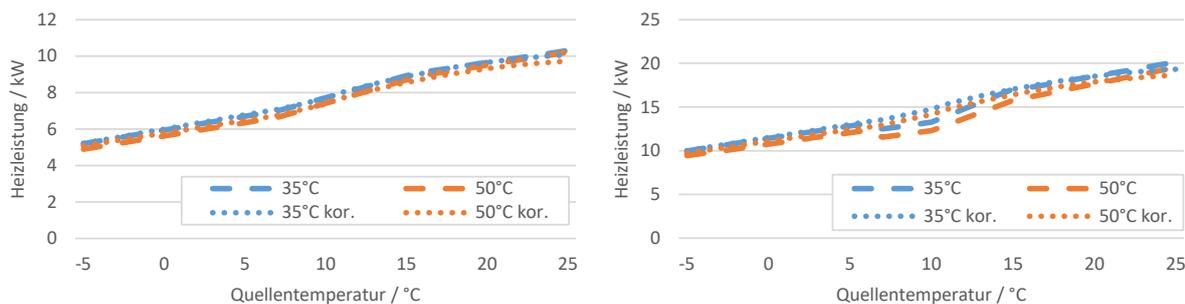


Abbildung 6: Vergleich der Korrelationsergebnisse mit Herstellerwerten für die Heizleistung für eine LWP mit geringen (links) und größeren Abweichungen (rechts)

des Boxplots kann jedoch wieder belegt werden, dass sich die Abweichungen bei den LWP in einem relativ niedrigen Prozentbereich bewegen. Lediglich 3,3% der Werte sind Ausreißer außerhalb der Grenzen der Boxplots.

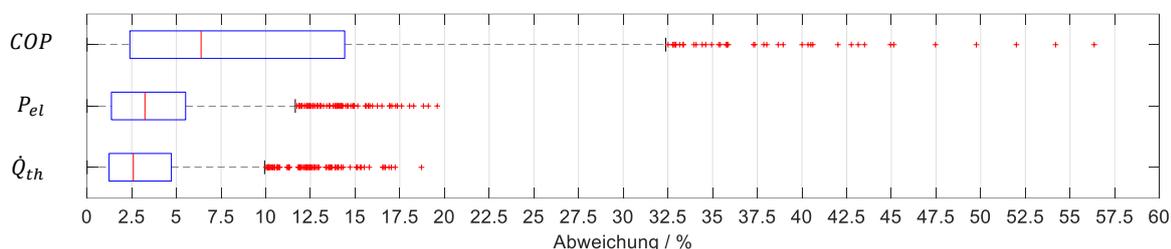


Abbildung 7: Abweichung der korrelierten Werte von den Herstellerdaten für alle untersuchten LWP

Die blauen Kästen, welche 50% der Werte repräsentieren, sind bei \dot{Q}_{th} zwischen 1,2 und 4,7%, bei P_{el} zwischen 1,4 und 5,5% und beim COP zwischen 2,3 und 14,4%. Bei den Abweichungen des korrelierten COP von den Herstellerdaten liegt der Median bei 6,4% und die maximale Abweichung bei 56,4%. Diese maximale Abweichung ergibt sich bei einer LWP, bei der die COP-Kurve in Abhängigkeit der Quellen- und der Vorlauftemperatur sehr flach ausgeprägt ist und somit eine größere Abweichung zu den verhältnismäßig steilen korrelierten Kurven entsteht. Dennoch können die Korrelationsgleichungen gut verwendet werden, um einen „mittleren“ COP für die am Markt befindlichen LWP ableiten zu können. Es ist jedoch auch an dieser Stelle anzumerken, dass sich die vorgestellten Korrelationsgleichungen weniger dazu eignen, den COP und die Leistungsdaten einzelner Wärmepumpen direkt abzubilden.

4 Fazit

Diese Veröffentlichung beschreibt die Entwicklung von Korrelationsgleichungen für die elektrische und thermische Leistung sowie den COP von Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpen. Auf Basis von Herstellerdaten sind Korrelationsgleichungen in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperatur entwickelt worden, die die jeweiligen Charakteristika abbilden. Die Gleichungen wurden mit Hilfe des „Curve-Fitting-Tools“ von MATLAB erstellt und sind in dieser Veröffentlichung explizit mit allen Koeffizienten aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Korrelationsgleichungen die Kennlinien im Mittel gut abbilden können. Bei den SWP beträgt der Median der Abweichungen zwischen Herstellerdaten und berechneten Korrelationswerten für die elektrische Leistung 2,6% und für die thermische Leistung 2,1%. Für die LWP ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Median der Abweichungen liegt hier für die elektrische Leistung bei 3,2% und für die thermische Leistung bei 2,6%. Die Abweichungen

für die Korrelationsgleichungen für die COP-Kennlinien liegen etwas höher: Für SWP liegt der Median bei 4,9% und für LWP bei 6,4%. Die Korrelationsgleichungen eignen sich demnach gut, um die Leistungsfähigkeit von Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpen in Abhängigkeit der Quellen- und Vorlauftemperatur im Mittel abzubilden. Das heißt, immer wenn keine spezielle Wärmepumpe im Fokus steht, oder wenn eine Mehrzahl von Wärmepumpen zur Analyse von Siedlungs- und Netzgebieten analysiert werden sollen, stellen die vorgestellten Korrelationsgleichungen eine gute Möglichkeit dar, die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen im Mittel mit guter Genauigkeit zu berechnen. Um hingegen eine spezielle Wärmepumpe nachzurechnen, sind die Korrelationsgleichungen weniger geeignet. Dies ist aber zumeist auch nicht erforderlich, da in diesem Fall die Herstellerdaten zur Verfügung stehen und direkt verwendet werden können. Dem entsprechend stand dieser Fall auch nicht im Vordergrund der Untersuchungen im Rahmen dieser Veröffentlichung.

5 Literatur

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change, „The Paris Agreement | UNFCCC“, 29 Januar 2016. [Online]. Verfügbar: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/vnd.openxmlformats-officedocument.wordprocessingml.document/cp10a1_en.docx. [Zugriff am 8 Januar 2020]
- [2] Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen“, 15 März 2019. [Online]. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo>. [Zugriff am 02 August 2019]
- [3] Stuttgarter Zeitung, „Kampagne zur Energiewende: 50-80-90 ist das Maß fürs Land“, 10. Mai 2013. [Online]. Verfügbar: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.kampagne-zur-energiewende-50-80-90-ist-das-mass-fuers-land.9e8f01ed-58e7-4773-8533-20de8e106af8.html>. [Zugriff am 5. November 2019]
- [4] M. Blesl, S. Kempe, M. Ohl, U. Fahl, A. König, T. Jenssen und L. Eltrop, „Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen“, 2008
- [5] S. Tangwe, M. Simon und E. Meyer, „Empirical model to determine electricity demand reduction in the South Africa residential sector by retrofitting geysers with air source heat pump“, in *Twenty-Second Domestic Use of Energy*, Kapstadt, 2014
- [6] S. Chen, J. Mao und X. Han, „Heat transfer analysis of a vertical ground heat exchanger using numerical simulation and multiple regression model“, *Energy and Buildings*, Nr. 129, pp. 81-91, 2016
- [7] F. Simon, J. Ordoñez, T. Reddy, A. Girard und T. Muneer, „Developing multiple regression models from the manufacturer's ground-source heat pump catalogue data“, *Renewable Energy*, Nr. 95, pp. 413-421, 2016
- [8] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Liste der Wärmepumpen mit Prüfnachweis“, 20 Dezember 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ee_waermepumpen_anlagenliste.html. [Zugriff am 9 Januar 2020]
- [9] H. Born, S. Schimpf-Willenbrink, H. Lange, G. Bussmann und R. Bracke, „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends - 2. Aktualisierung der Studie“, Bochum, 2017

- [10] M. Platt, S. Exner und R. Bracke, „Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends“, Bochum, 2010
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 14511: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015
- [12] The MathWorks, Inc., „Curve Fitting Toolbox - MATLAB“, The MathWorks, Inc., 2020. [Online]. Verfügbar: <https://de.mathworks.com/products/curvefitting.html>. [Zugriff am 10 Januar 2020]
- [13] Alpha Innotec, „alpha innotec Detailseite“, [Online]. Verfügbar: <https://www.alpha-innotec.de/endkunde/produktkataloge/waermepumpen/produktkatalog/detailseite/sw-42h3.html>. [Zugriff am 24 Januar 2020]