Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

SIMULATION VON WÄRMEPUMPEN-SYSTEMEN IN POLYSUN 4

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Jörg Marti, Vela Solaris AG
Stadthausstr. 125 , 8400 Winterthur, joerg.marti@velasolaris.com, www.velasolaris.com

Andreas Witzig, Vela Solaris AG
Stadthausstr. 125 , 8400 Winterthur, andreas.witzig@velasolaris.com, www.velasolaris.com

Arthur Huber, Huber Energietechnik AG
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich, arthur.huber@hetag.ch, www.hetag.ch

Markus Ochs, Huber Energietechnik AG
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich, markus.ochs@hetag.ch, www.hetag.ch

Impressum

Datum: 10. Februar 2009

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter F&E: Thomas Kopp tkopp@hsr.ch

BFE-Bereichsleiter F&E: Andreas Eckmanns andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Projektnummer: 102248

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 2
Abstract 2
1. Ausgangslage 3
2. Ziel der Arbeit 4
3. Lösungsweg 4
4. Diskussion der Ergebnisse 5
5. Schlussfolgerungen und weiterführende Arbeiten 20
Referenzen 21
Anhang 22

Zusammenfassung

Polysun 4 ist ein Programm zur Simulation von Heizungssystemen. Mittels eines Zeitschrittverfahrens werden in einer dynamischen Simulation alle relevanten Systemparameter aufgrund von statistischen Wetterdaten im Verlaufe eines Refernzjahres berechnet. Einerseits zeichnet sich Polysun aus durch seinen physikbasierten und modularen Ansatz, der eine beliebige Anordnung der Systemkomponenten erlaubt, andererseits durch die Komponentenkataloge, welche eine grosse Anzahl kommerziell erhältlicher Komponenten enthält.

Als zusätzliche Heizquelle sind mit diesem Projekt nun auch Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen in Polysun integriert worden. Als Wärmequellen sind die Umgebungsluft, das Erdreich und das Grundwasser implementiert worden. Somit können die verschiedenen Möglichkeiten des Einsatzes von erneuerbaren Energiequellen berechnet und optimiert werden.

Aus Messwerten des COP (gem. EN 255 und 14511) von Wärmepumpen werden durch lineare Interpolation der entsprechende Gütegrade die COP-Werte für beliebige Quellen- und WP-Austrittstemperaturen berechnet und die elektrische Leistungsaufnahme interpoliert.

Die dynamische Simulation der Erdwärmesonde wird mit dem Algorithmus aus dem Programm EWS (Berechnungsmodul für Erdwärmesonden 1997) durchgeführt. Die Grundwassersonden werden aufgrund der Erdreichtemperaturen simuliert.

Die Wärmepumpen und Sonden wurden als eigenständige Komponenten in Polysun implementiert. Sie lassen sich auf der Zeichenfläche frei platzieren und mit anderen hydraulischen Komponenten verbinden. In der Simulation wird für jeden Zeitschritt aufgrund der Quellentemperatur und der Vorlauftemperatur die elektrische Leistungsaufnahme und die Wärmeabgabe an den Kreislauf berechnet. Die Komponentenkataloge wurden entsprechend mit total über 300 Einträgen erweitert. Hydraulische Vorlagen mit den neuen Komponenten in verschiedenen Kombinationen sind erstellt worden.

Die Resultate dieses Projektes wurden am 19. Symposium für thermische Solarenergie als wissenschaftlicher Beitrag präsentiert [3].

Abstract

Polysun 4 is a software program for the simulation of heating systems. The simulation kernel applies a time stepping algorithm and dynamically calculates all relevant system parameters over a one year period, based on statistical weather data. On the one hand Polysun draws out by physics-based simulation scheme and its modularity, which allows any arrangement of the system components. On the other hand, Polysun offers a unique set of component catalogues which cover a large number of comercially available system components.

In this project, three kinds of heat pumps have been integrated in Polysun, namely the air/water, water/water and brine/water heat pumps. Furthermore, the relevant heat sources have been implemented, namely ambient air, soil and groundwater. In consequence, Polysun now covers a larger, and almost complete, range of renewable energy systems.

Simulation parameters are the measured heat pump COP values (in accordance with EN 255 and 14511). A linear interpolation scheme has been developed in this project in order to simulate systems for arbitrary source and heat pump temperatures and to interpolate the power consumption.

For the dynamic simulation of the ground source heat pump, the numerical algorithm from the Program EWS (calculation module developed in 1997) has been integrated into Polysun. Groundwater probes are calculated with respect to the soil temperatures.

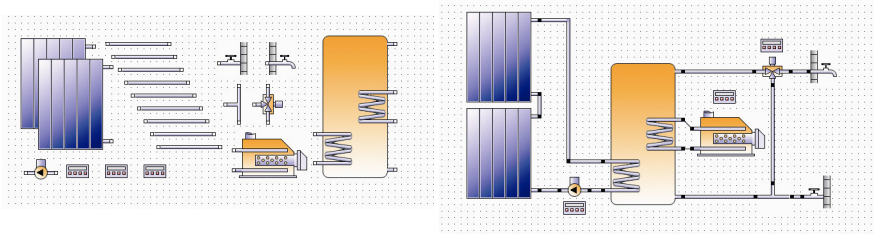
Heat pumps and probes were implemented as independent components in Polysun. In the graphical user interface, they can be arbitrarly placed and connected with other hydraulic components. The timestepping simulation calculates inlet temperature, electric power consumption and heat transfer in the entire system. The Polysun catalogs have been extended accordingly with total over 300 component entries and a number of relevant system templates.

The results of this project have been presented as a scientific contribution at the 19th Symposium for thermal solar energy [3].

1. Ausgangslage

Polysun 4 bietet ein modulares Konzept zum Aufbau von Heizungsanlagen, welches in seiner Flexibilität nur von akademischen Werkzeugen wie TRNSYS erreicht wird, von seiner Bedienerfreundlichkeit jedoch auf die Beratertätigkeit in der Praxis ausgerichtet ist. Es werden verschiedene Benutzerstufen angeboten. In der höchsten Ausbaustufe (Benutzerlevel „Designer“) bietet die Software den Experten die absolute Freiheit im Anlagedesign; insbesondere können die hydraulischen Komponenten mittels einer graphischen Benutzeroberfläche platziert und beliebig kombiniert werden. In einer kostengünstigen Variante (Benutzerlevel „Professional“) wird primär ein Auslegungsassistent angeboten, welcher die Auswahl aus vorgegebenen Hydraulikvorlagen unterstützt und so eine benutzerfreundliche und sehr einfache Bedienung ermöglicht.

Neben der Simulation sind die Datenbanken für Systemkomponenten und Systemvorlagen ein wichtiger Teil von Polysun. Damit erspart sich der Benutzer, die Leistungskenngrössen der Komponenten aus Datenblättern zusammen zu suchen. Die Datenbanken werden von Vela Solaris laufend auf dem neuesten Stand gehalten und per automatischem Internetupdate mit den Benutzerdaten synchronisiert. Damit wird dem Benutzer auch nach dem erstmaligen Kauf der Software ein ausgezeichneter Service geboten und somit sichergestellt, dass die Verwendung von Polysun im Arbeitsprozess eine Zeitersparnis bringt.



Figur 1: Veranschaulichung des modularen Konzepts von Polysun.

Weitere wichtige Voraussetzungen, welche in Polysun bereits realisiert sind:

- Im Programm bereits eingebundene *Wetterdaten*, welche für die Berechnung der Heizlast sowie für die Auslegung z.B. von Luft-Wasser Wärmepumpen wichtig sind. Falls ein Standort noch nicht hinterlegt ist, interpoliert Polysun aus Koordinaten Höhenangabe eines neuen Standorts die Wetterdaten (Meteonorm 6 der Firma Meteotest ist in Polysun integriert).
- *Variabler Zeitschritt*: Eine Jahressimulation kann mit ca. 1 Minute Rechenzeit mit hoher Genauigkeit realisiert werden.
- *Reglerverhalten*: Eine wichtige Komponente in der Systemoptimierung sind Steuerungen und Regelungen. Diese werden in Polysun ebenfalls realitätsnahe abgebildet.
- *Gebäudesimulation*: Polysun 4 beinhaltet eine integrierte Gebäudesimulation zur Bestimmung der dynamischen Gebäudelast (basierend auf Helios, welches an der EMPA entwickelt wurde).
- *Breite bereits bestehende Komponentenauswahl:* Der heutige Funktionsumfang in Polysun umfasst bereits alle wichtigen Komponenten einer Heizungsanlage (Speicher, Kessel, Pumpen, Wärmetauscher, Mischventile, Regelungen, Gebäude).
- *Resultatauswahl und Visualisierung:* In einer ansprechenden graphischen Benutzeroberfläche wird bereits heute eine vielfältige Palette von Resultaten zur Visualisierung angeboten.

Mit der Software *EWS* steht dem Projekt ein weiteres Programm als Grundlage zur Verfügung, welches sich ganz spezifisch auf Erdwärmesonden ausgerichtet hat und welches die entsprechenden Berechnungsformeln und Parametersätze bereits zu einem grossen Teil enthält. Mit den Entwicklern dieses Projektes ist somit auch das Know-How bezüglich Modellierung und die praktischen Kenntnisse im Bereich Wärmepumpen-Systeme im Projekt vorhanden.

2. Ziel der Arbeit

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Wärmepumpen mit verschiedenen Wärmequellen als zusätzliche Energiequelle in die bereits existierende Software Polysun einzubinden. Neben der Erweiterung der Funktionalität von Polysun wird dabei entsprechend dem Polysun Konzept grosser Wert auf die Komponentenkataloge gelegt. Darüber hinaus werden dem Polysun Benutzer Vorlagehydrauliken angeboten, die in einer kostengünstigen Version von Polysun mit einfachster Bedienung einen effizienten Arbeitsablauf ermöglichen.

3. Lösungsweg

3.1 Meilensteine: *Spezifikation / Modellevaluation / Implementation / Validierung / Auslieferung*

Der im Projektgesuch vorgeschlagene Lösungsweg hatte sich bewährt und konnte ohne Modifikationen ausgeführt werden. Als erster Meilenstein wurden die Luft-Wärmetauscher implementiert und im regulären Release im Dezember 2007 ausgeliefert. In der Folge wurde das Erdsondenmodell fertig gestellt und mit dem Softwarerelease vom Juni 2008 an alle Polysun Benutzer ausgeliefert. Als letzter Schritt wurde die Grundwassersonde implementiert sowie einige Verbesserung an den bestehenden Modellen vorgenommen. Zum heutigen Zeitpunkt sind alle Entwicklungsarbeiten abgeschlossen und sind damit bereit, per Ende 2008 in einem weiteren Release ausgeliefert zu werden.

Für jeden Teilaspekt konnte das Projekt sauber aufgeteilt werden. Startpunkt war dabei die Spezifikation, wo aus Kundensicht die Features festgelegt wurden und aus programmtechnischer Sicht wichtige Entscheide gefällt werden konnten. Die Modelle wurden teilweise mit kurzen numerischen Untersuchungen ausserhalb des Polysun-Frameworks evaluiert und im Projektteam eingehend diskutiert. Für die Implementation wurde einerseits der EWS Code in die Programmiersprache Java übersetzt und konnte somit „native“ in den Polysun-Code eingefügt werden, andererseits wurde das Polysun Benutzerinterface und die Datenbanken um die neue Funktionalität und die für die Wärmepumpen relevanten Parameter ergänzt.

Für die Auslieferung wurden die Komponentendatenbank erweitert und entsprechende Hydraulikvorlagen ausgearbeitet. Die Dokumentation wurde sukzessive ergänzt und auch die Vertriebs-/Supportpartner wurden entsprechend geschult. Dabei konnte man sich auf die Standardfunktionalität von Polysun abstützen, so dass sich die Verbreitung der Wärmepumpenfeatures effizient gestalten liess.

Die Veröffentlichung der neuen Features auf Stufe „Designer“ ist bereits relativ früh erfolgt, wobei davon ausgegangen werden konnte, dass nur erfahrene Benutzer die neue Funktionalität nutzen werden. Im vierteljährlichen Releasezyklus wurden dann Hydraulikvorlagen und Dokumentation nachgeliefert, so dass eine breitere Benutzerschicht angesprochen werden konnte.

3.2 Validierung und Testing

Hinsichtlich des Vertrauens, welches die Benutzer einer Simulationssoftware entgegenbringen müssen, geniesst die Modellevaluation und das Testing für alle von Vela Solaris ausgelieferten Features einen hohen Stellenwert. Für die in diesem Projekt implementierten mathematisch-physikalischen Modelle wurde dabei nach dem bereits etablierten und im Projektgesuch beschriebenen Schema vorgegangen: In einem ersten Schritt wurden die Modelle Vela-Solaris intern validiert. Darauf folgend wurde von externen Experten (in diesem Falle der Projektpartner HETAG AG im Unterauftrag) eine Funktionskontrolle mit Überprüfung der quantitativen Resultate vorgenommen. Dabei wurden in diesem Fall speziell auch Vergleichsrechnungen mit der Standardversion der Software EWS durchgeführt.

Die schrittweise Auslieferung hat sich aus technischer und organisatorischer Sicht sehr bewährt, da bereits zu einem frühen Zeitpunkt wertvolle Rückmeldungen von Vertriebspartnern und Polysun Benutzern gesammelt und bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden konnten. Dieses effiziente Vorgehen konnte deshalb realisiert werden, da Polysun als ausgereiftes Produkt bereits funktionstüchtig und auf dem Markt bereits etabliert ist.

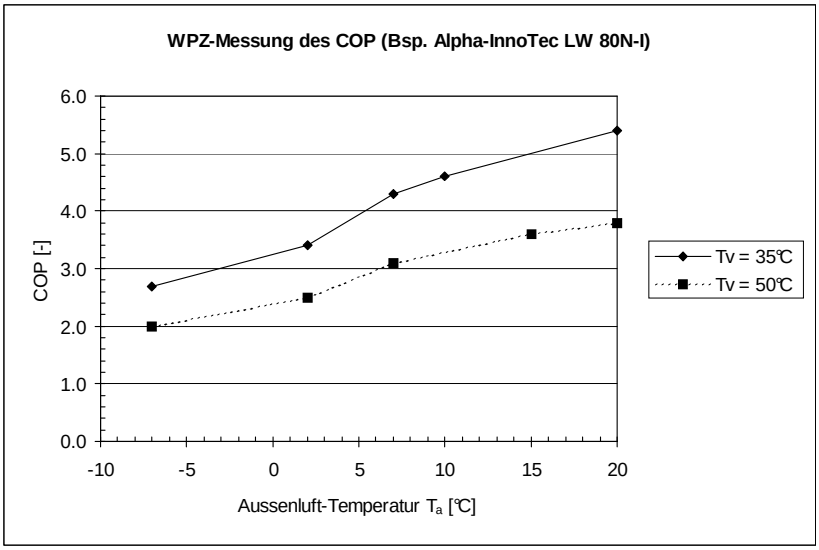
4. Diskussion der Ergebnisse

Numerisches Modell für Luft-WP

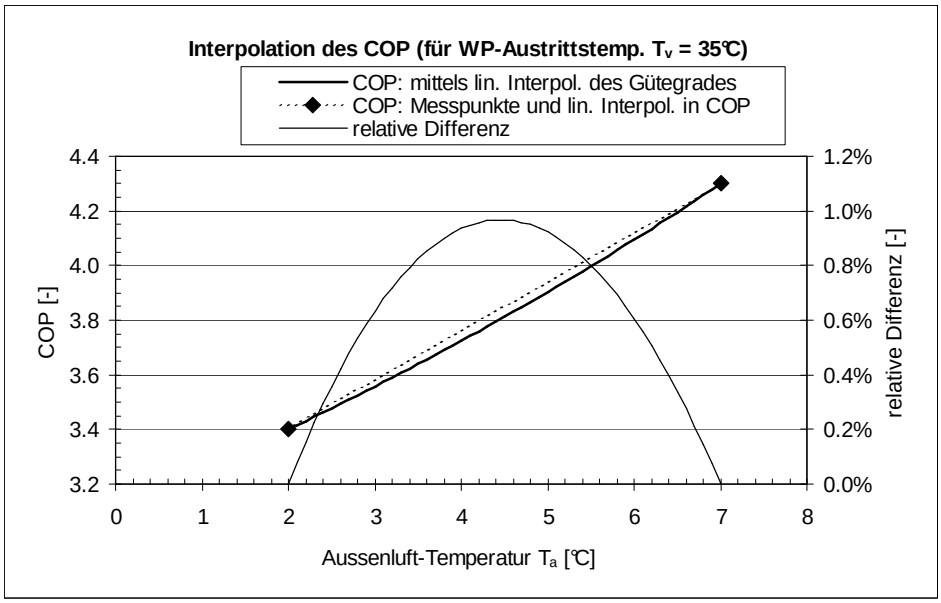
Aus Messwerten des COP (coefficient of performance) von Luft/Wasser-Wärmepumpen werden durch lineare Interpolation der entsprechenden Gütegrade die COP-Werte für beliebige Aussenluft- und WP-Austrittstemperaturen berechnet. Die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Leistung wird direkt durch lineare Interpolation der Messwerte in der Aussenluft- und der WP-Austrittstemperatur berechnet.

Als Ausgangswerte für die Interpolation dienen die standardisierten Messungen des WPZ (Wärmepumpen-Testzentrum) an Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der vom WPZ abgedeckte Messbereich der Aussenluft-Temperatur T_a von -7℃ bis 20℃ soll erweitert werden auf -14℃ bis 30℃. Durch weitere Näherungen können dann die Wärmepumpenkennwerte auch ausserhalb dieses Bereichs für beliebige Aussenluft-Temperaturen ausgewertet werden. In Fig. 2 ist ein Beispiel der interpolierten Werte zu sehen.

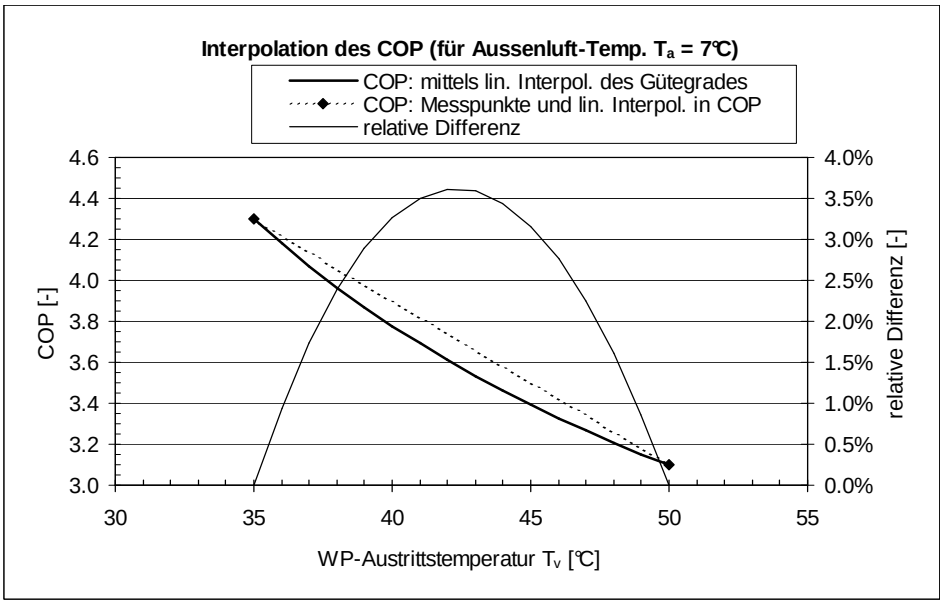
Bei der indirekten Interpolation des *COP* wird der *COP* mit Hilfe des Gütegrades η_c berechnet. Der Gütegrad η_c selber wird dann mittels linearer Interpolation in den Variablen T_a und T_v berechnet. Dazu werden die *COP*-Messwerte umgerechnet in Gütegrade η_c, diese linear interpoliert in T_a und T_v und die Ergebnisse dann zurückgerechnet auf *COP*-Werte. Die verschiedenen Interpolationsmethoden wurden verglichen mit der Erkenntnis, dass die Interpolation des Gütegrads im Allgemeinen zu genaueren *COP*-Werten als die direkte lineare Interpolation der *COP*-Messwerte in T_a und T_v. führt (Fig. 3 und Fig. 4). Die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe wird aus den Messwerten direkt linear interpoliert als Funktion von Aussenluft-Temperatur T_a und WP-Austritts-Temperatur T_v.



Figur 2: Beispiel einer WPZ-Messung des COP an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gemäss EN 255 (WP-Austrittstemperaturen Tv = 35℃ und Tv = 50℃).



Figur 3: Berechnung des COP mittels linearer Interpolation des Gütegrades und Vergleich mit der linearen Interpolation des COP zwischen den beiden Messwerten sowie Darstellung der relativen Differenz der beiden Methoden (für WP-Austrittstemperatur Tv = 35°C).

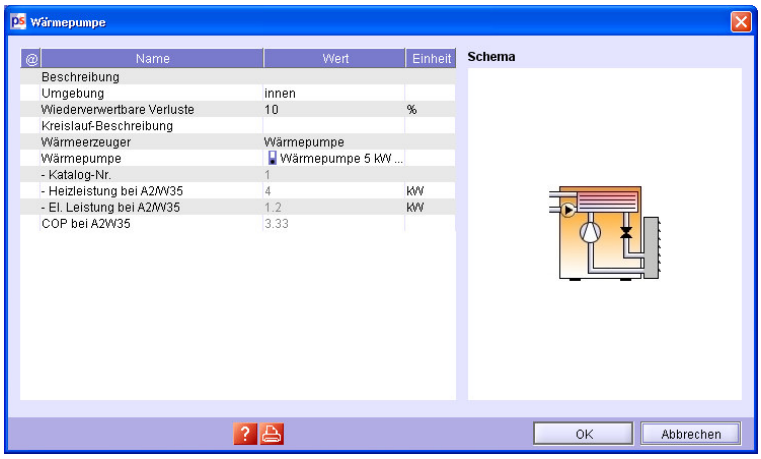


Figur 4: Berechnung des COP mittels linearer Interpolation des Gütegrades und Vergleich mit der linearen Interpolation des COP zwischen den beiden Messwerten sowie Darstellung der relativen Differenz der beiden Methoden (für Aussenluft-Temperatur Ta = 7°C).

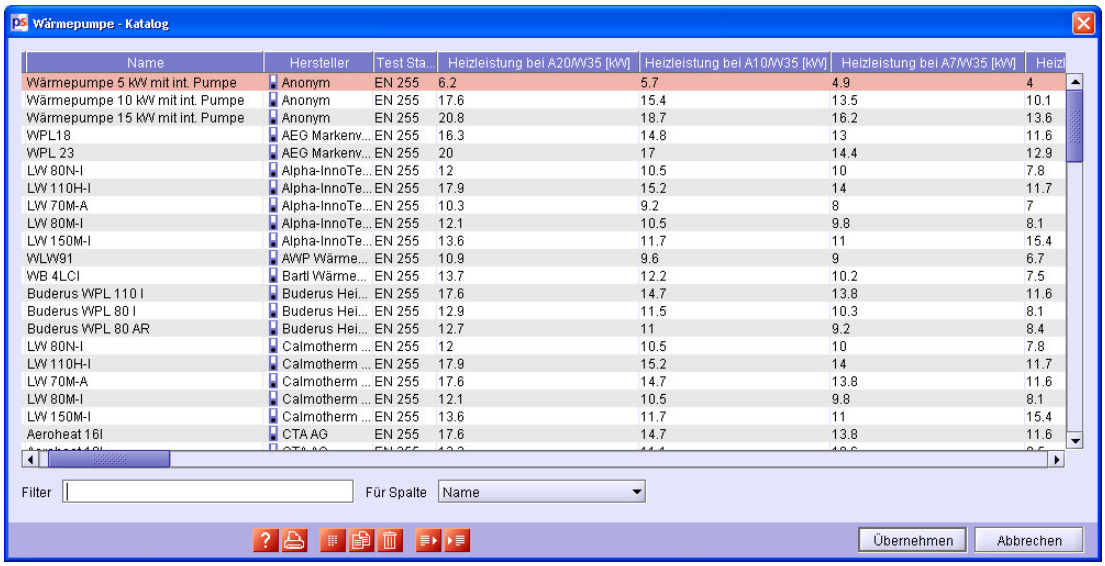
Detaillierte Angaben zum Rechenmodell sind im Anhang II ersichtlich.

Integration der Luft-WP in Polysun

In Polysun wurden die Eingabemasken und Katalogstrukturen zum Erfassen der Wärmepumpenparameter erstellt. In der Eingabemaske (Fig. 5) wird die ausgewählte Wärmepumpe und die wichtigsten Eckdaten angezeigt. Der Katalog (Fig. 6) umfasst im Wesentlichen die Messpunkte gemäss EN 255 und 14511. In Unterkatalogen sind die Hersteller und Energieträger erfasst. Zurzeit umfasst der Luft-WP Katalog 110 Einträge.



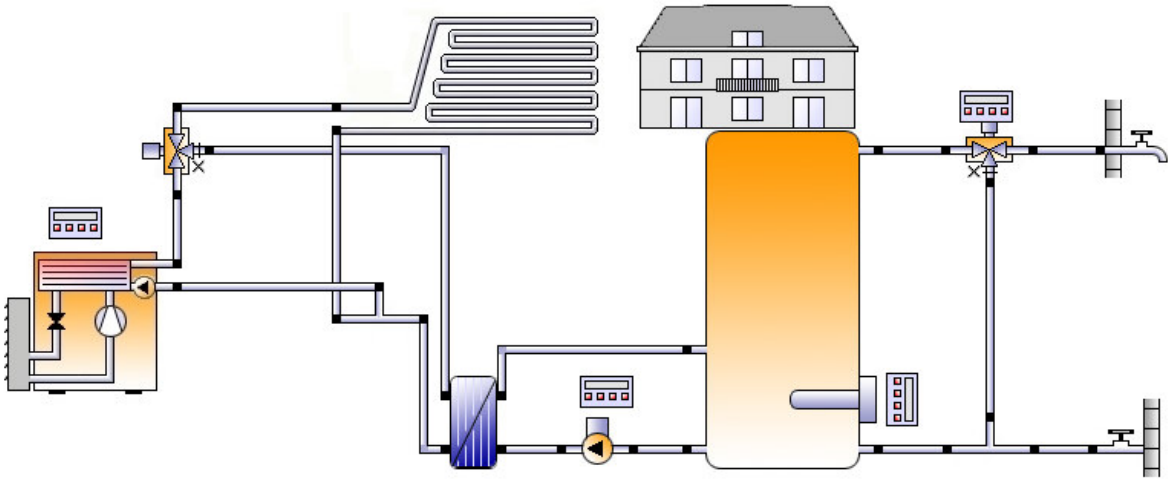
Figur 5: Eingabemaske für Luftwärmepumpe



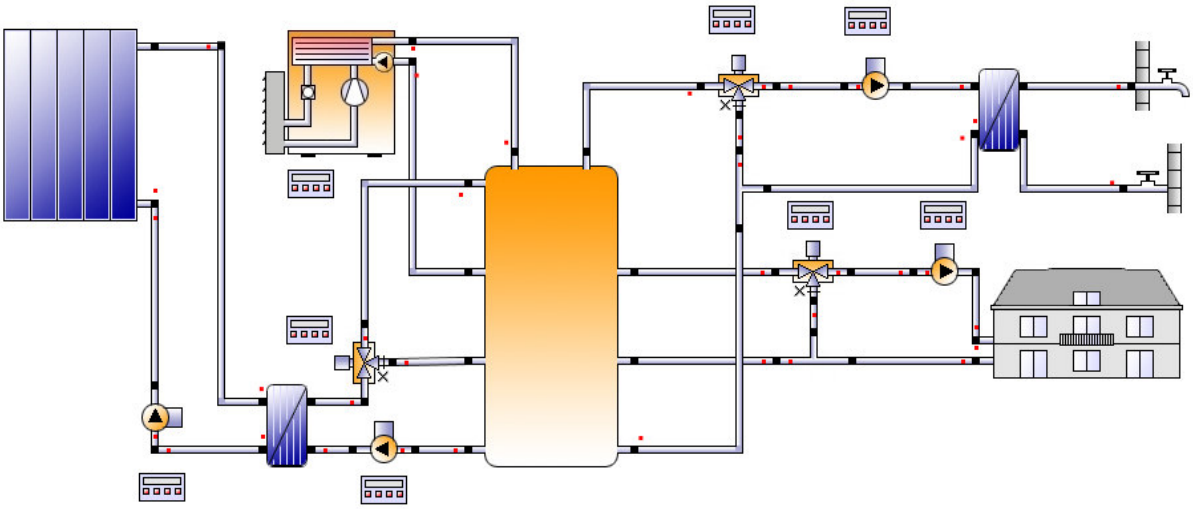
Figur 6: Ausschnitt aus dem Katalog für Luftwärmepumpen

Die Wärmepumpe wurde als eigenständige Komponente implementiert. Diese lässt sich auf der Zeichenfläche platzieren und frei mit anderen hydraulischen Komponenten verbinden. Bestehende Hydraulikvorlagen mit Kesseln können einfach auf Luft-WP umgestellt werden. In der Simulation wird für jeden Zeitschritt aufgrund der Aussentemperatur und der Vorlauftemperatur die elektrische Leistungsaufnahme und die Wärmeabgabe an den Kreislauf berechnet. Die bereits in Polysun vorhandenen statistischen Wetterdaten werden einerseits für die Berechnung der Heizlast verwendet, andererseits werden daraus aber auch die Eingangsparameter für die Luft-Wärmepumpen bestimmt (Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit).

In den Resultaten werden elektrische Leistungsaufnahme, Wärmeabgabe an das Fluid, COP, Temperaturen (Minimal, Maximal und Durchschnitt) auf Stunden, Monats und Jahresbasis angezeigt. In Fig. 7 ist eine einfache Hydraulik für Warmwasser und Gebäudeheizung mit Luft-WP, welche mit Polysun 4 erstellt wurde. Die Fig. 8 zeigt eine komplexere Hydraulik mit Solaranlage. Zurzeit sind 14 Hydrauliken in Polysun als Standard-Vorlagen in verschiedensten Kombinationen integriert: Warmwasser, Gebäudeheizung, Schwimmbad, Solarthemie und Photovoltaik.



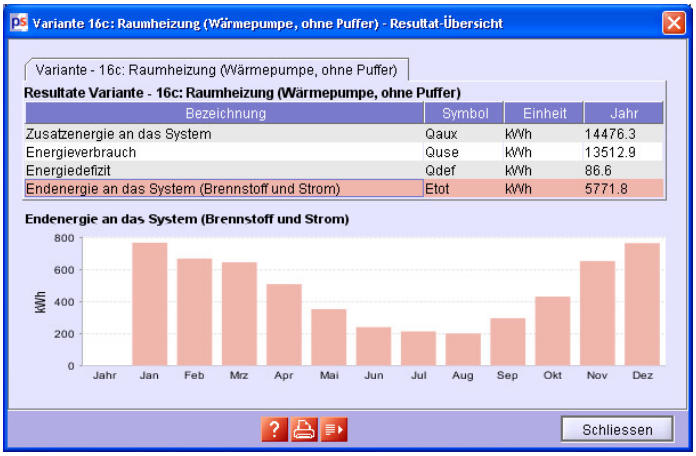
Figur 7: System für Warmwasser und Gebäudeheizung mit Wärmepumpe.



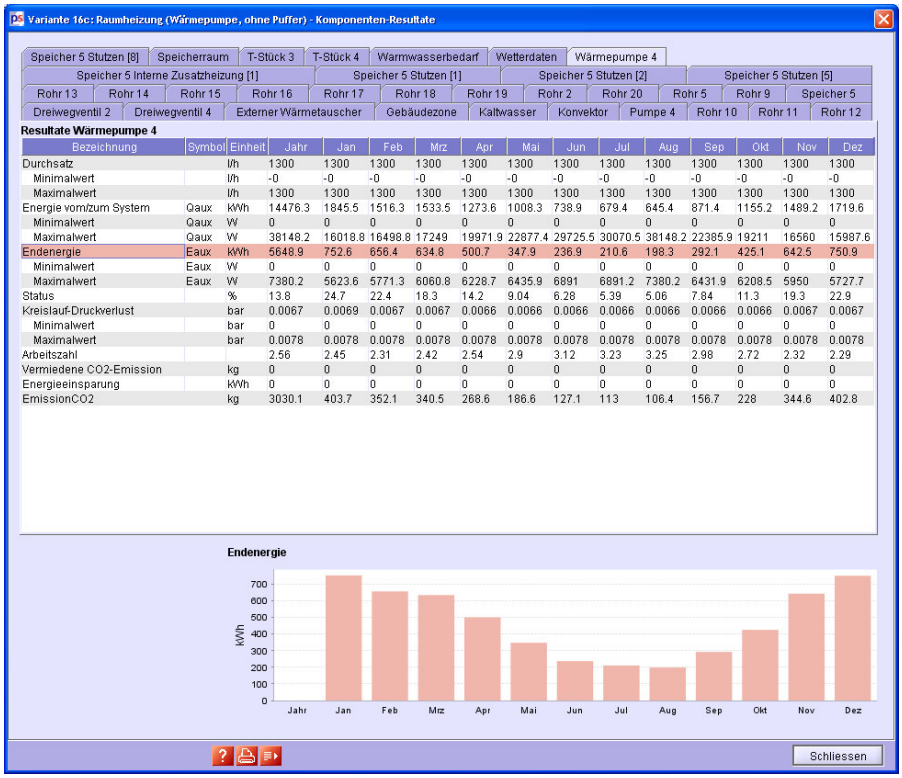
Figur 8: System für Warmwasser und Gebäudeheizung mit Solaranlage und Wärmepumpe.

Die Simulation solcher Systeme dauert ca. 30 bis 180 Sekunden, je nach Komplexität und Rechnerleitung. In der Auswertung sind Resultate auf der Ebene des ganzen Systems ersichtlich (Fig. 9) oder der einzelnen Komponenten (Fig. 10).

Die abgebildeten Resultate (Fig. 9 und 10) gelten für den Standort Rapperswil SG, 200 Liter Warmwasserverbrauch pro Tag bei 50℃ und einem Niedrige nergiehaus mit 150m^2.



Figur 9: Auswertung auf Ebene des ganzen Systems



Figur 10: Auswertung auf Ebene der einzelnen Komponenten, hier ist die Wärmepumpe selektiert

Numerisches Modell für Wasser/Wasser und Sole/Wasser-WP

Als Grundlage für die WP-Datenbank in Polysun dienen die standardisierten Messungen des WPZ (Wärmepumpen-Testzentrum) an Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Die Mehrzahl der momentan beim WPZ aufgeführten Prüfresultate wurden noch nach der alten Norm EN 255 ermittelt. Neu auf den Markt kommende Geräte werden vom WPZ nach der aktuellen Norm EN 14511 getestet.

Die im WPZ-Prüfbericht aufgeführten Wärmepumpen sind als Sole/Wasser-Wärmepumpen getestet, davon einige zusätzlich als Wasser/Wasser-Wärmepumpe. Es gibt keine Wärmepumpen, die nur als Wasser/Wasser-Wärmepumpe, aber nicht als Sole/Wasser-Wärmepumpen getestet wurden.

Für Sole/Wasser-Wärmepumpen sind die Betriebspunkte der Prüfmessungen gemäss alter Norm EN 255 in Tabelle 1 zusammengestellt, diejenigen gemäss aktueller Norm EN 14511 in Tabelle 2.

Für Wasser/Wasser-Wärmepumpen sind die Betriebspunkte der Prüfmessungen gemäss alter Norm EN 255 in Tabelle 3 zusammengestellt, diejenigen gemäss aktueller Norm EN 14511 in Tabelle 4.

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	B-5/W35	B0/W35	B5/W35	B-5/W50	B0/W50	B5/W50
Sole-Temp. T_s [℃]	-5	0	5	-5	0	5
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	35	50	50	50

Tabelle 1: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Sole/Wasser-Wärmepumpen gemäss alter Norm EN 255

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	B0/W35	B5/W35	B-5/W45	B0/W45	B5/W45	B0/W55	B5/W55
Sole-Temp. T_s [℃]	0	5	-5	0	5	0	5
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	45	45	45	55	55

Tabelle 2: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Sole/Wasser-Wärmepumpen gemäss aktueller Norm EN 14511

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	W10/W35	W15/W35	W10/W50	W15/W50
Wasser-Temp. T_s [℃]	10	15	10	15
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	50	50

Tabelle 3: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Wasser/Wasser-Wärmepumpen gemäss alter Norm EN 255

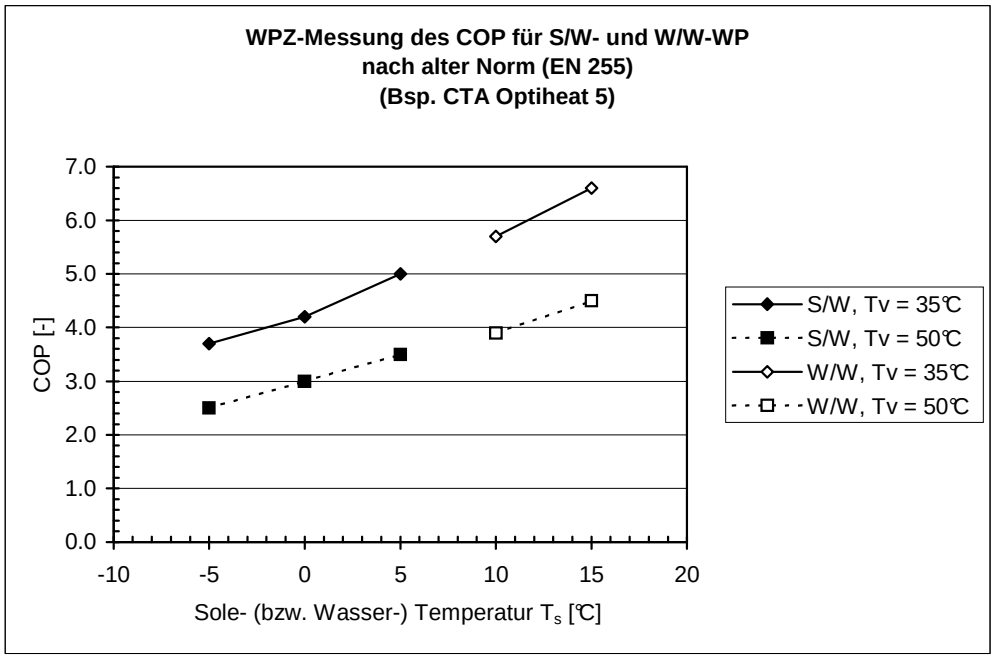
Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	W10/W35	W10/W45	W15/W45	W10/W55	W15/W55
Wasser-Temp. T_s [℃]	10	10	15	10	15
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	45	45	55	55

Tabelle 4: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Wasser/Wasser-Wärmepumpen gemäss aktueller Norm EN 14511

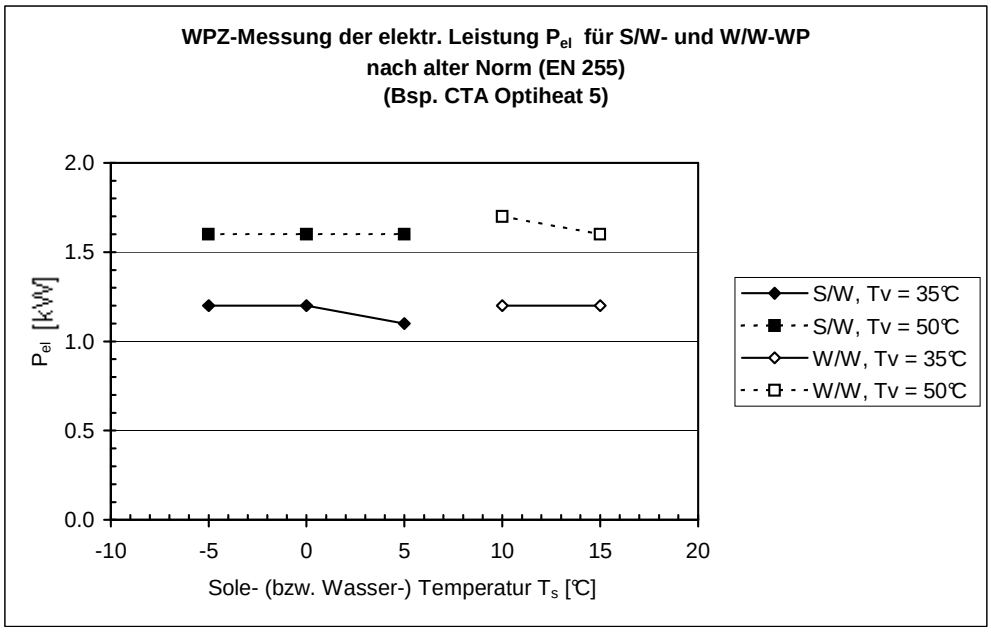
An den angegebenen Betriebspunkten werden die folgenden Messwerte erfasst: *COP* (coefficient of performance), abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ und elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Diese Messungen werden durchgeführt bei einem konstanten Sole-Volumenstrom und einer konstanten Temperaturdifferenz ΔT_{Nutzer} zwischen der Wärmepumpen-Ein- und Austrittstemperatur des Heizkreisfluids.

Im Falle von 2-stufigen Wärmepumpen wird die Umschaltung zwischen den Stufen in den WPZ-Messungen erfasst. Die Umschaltung ist aus den WPZ-Messungen ersichtlich am Sprung der abgegebenen Heizleistung $\dot{Q}_H$ und der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Hingegen wird der *COP* kaum beeinflusst.

In Figur 11 ist als Beispiel eine typische *COP*-Messung gemäss altern Norm EN 255 dargestellt und in Figur 12 eine Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} (beide für eine 1-stufige Wärmepumpe). Die Wärmepumpe dieses Beispiels wurde sowohl als Sole/Wasser-WP als auch als Wasser/Wasser-WP ausgemessen.



Figur 11: Beispiel einer WPZ-Messung des COP an einer Wärmepumpe, die im Sole/Wasser-Betrieb (S/W) und im Wasser/Wasser-Betrieb (W/W) gemäss alter Norm EN 255 ausgemessen wurde (Heizkreis-seitige WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃)

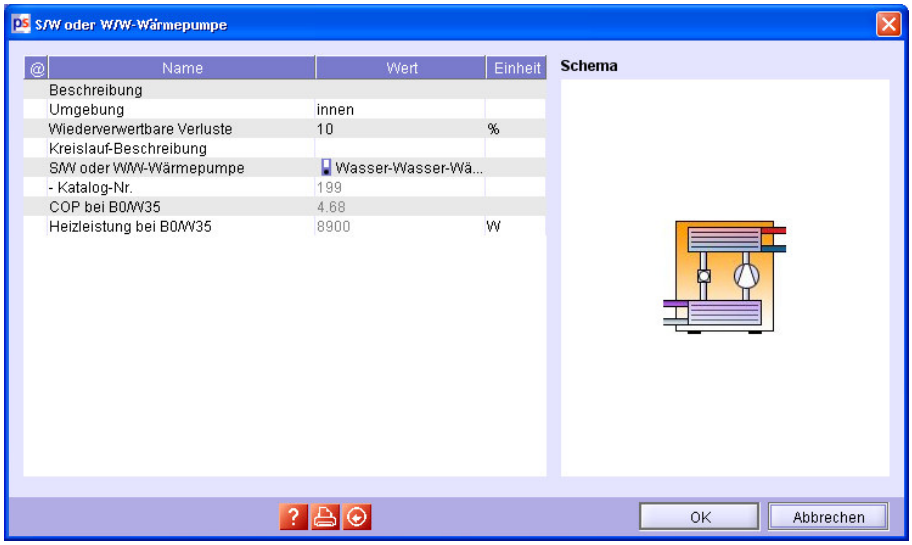


Figur 12: Beispiel einer WPZ-Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} an einer Wärmepumpe die im Sole/Wasser-Betrieb (S/W) und im Wasser/Wasser-Betrieb (W/W) gemäss alter Norm EN 255 ausgemessen wurde (Heizkreis-seitige WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃)

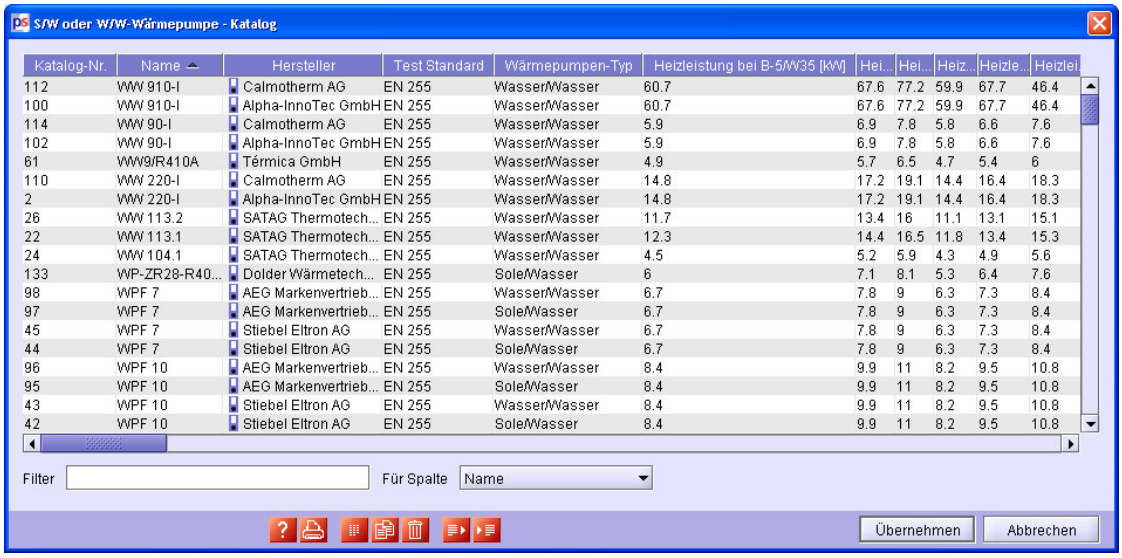
Detaillierte Angaben zum Rechenmodell sind im Anhang II ersichtlich.

Integration der Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-WP in Polysun

Die Integration der Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-WP in Polysun ist analog zu der Luft-WP gelöst worden. Die Wärmepumpe wurde wieder als eigenständige Komponente implementiert, diesmal mit vier hydraulischen Anschlüssen. Die Wärmepumpe lässt sich frei auf der Zeichenfläche platzieren und mit anderen hydraulischen Komponenten verbinden. Der Katalog ist mit über 190 Einträgen sehr umfangreich ausgefallen (Fig. 14).



Figur 13: Eingabemaske der Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-WP



Katalog-Nr.	Name	Hersteller	Test Standard	Wärmepumpen-Typ	Heizleistung bei B-5/W35 [kW]	Hei...	Hei...	Heiz...	Heizle...	Heizlei
112	WW 910-I	Calmotherm AG	EN 255	Wasser/Wasser	60.7	67.6	77.2	59.9	67.7	46.4
100	WW 910-I	Alpha-InnoTec GmbH	EN 255	Wasser/Wasser	60.7	67.6	77.2	59.9	67.7	46.4
114	WW 90-I	Calmotherm AG	EN 255	Wasser/Wasser	5.9	6.9	7.8	5.8	6.6	7.6
102	WW 90-I	Alpha-InnoTec GmbH	EN 255	Wasser/Wasser	5.9	6.9	7.8	5.8	6.6	7.6
61	WW9/R410A	Térmica GmbH	EN 255	Wasser/Wasser	4.9	5.7	6.5	4.7	5.4	6
110	WW 220-I	Calmotherm AG	EN 255	Wasser/Wasser	14.8	17.2	19.1	14.4	16.4	18.3
2	WW 220-I	Alpha-InnoTec GmbH	EN 255	Wasser/Wasser	14.8	17.2	19.1	14.4	16.4	18.3
26	WW 113.2	SATAG Thermotech...	EN 255	Wasser/Wasser	11.7	13.4	16	11.1	13.1	15.1
22	WW 113.1	SATAG Thermotech...	EN 255	Wasser/Wasser	12.3	14.4	16.5	11.8	13.4	15.3
24	WW 104.1	SATAG Thermotech...	EN 255	Wasser/Wasser	4.5	5.2	5.9	4.3	4.9	5.6
133	WP-ZR28-R40...	Dolder Wärmetech...	EN 255	Sole/Wasser	6	7.1	8.1	5.3	6.4	7.6
98	WPF 7	AEG Markenvertrieb...	EN 255	Wasser/Wasser	6.7	7.8	9	6.3	7.3	8.4
97	WPF 7	AEG Markenvertrieb...	EN 255	Sole/Wasser	6.7	7.8	9	6.3	7.3	8.4
45	WPF 7	Stiebel Eltron AG	EN 255	Wasser/Wasser	6.7	7.8	9	6.3	7.3	8.4
44	WPF 7	Stiebel Eltron AG	EN 255	Sole/Wasser	6.7	7.8	9	6.3	7.3	8.4
96	WPF 10	AEG Markenvertrieb...	EN 255	Wasser/Wasser	8.4	9.9	11	8.2	9.5	10.8
95	WPF 10	AEG Markenvertrieb...	EN 255	Sole/Wasser	8.4	9.9	11	8.2	9.5	10.8
43	WPF 10	Stiebel Eltron AG	EN 255	Wasser/Wasser	8.4	9.9	11	8.2	9.5	10.8
42	WPF 10	Stiebel Eltron AG	EN 255	Sole/Wasser	8.4	9.9	11	8.2	9.5	10.8

Figur 14: Ausschnitt aus dem Katalog für Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-WP

Numerisches Modell für die Erdwärmesonde

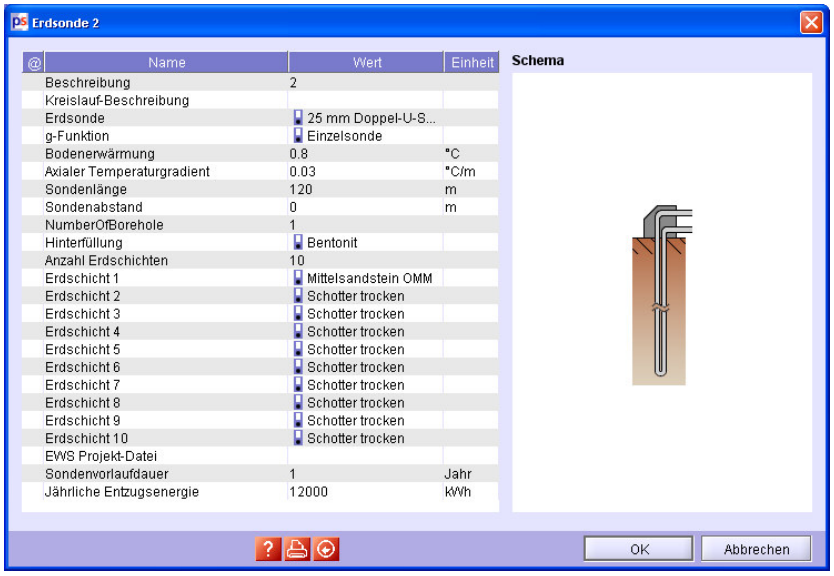
Das mathematische Modell für die Erdwärmesonde wurde von dem Programm EWS (Berechnungsmodul für Erdwärmesonden 1997, Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder 1999) übernommen. Dieses Modell ist gut validiert und hat sich in der Praxis bestens bewährt. Durch die Kompatibilität mit dem Programm EWS gibt es mit Polysun ab der Designer Version die Möglichkeit EWS Projekt-Dateien direkt in Polysun 4 einzulesen.

Der Algorithmus bietet die Möglichkeit einfach-U, doppel-U und koaxial Sonden zu berechnen. Es sind sowohl einzelne Sonden wie auch Sondenfelder simulierbar. Das Erdreich kann mit bis zu 10 Erdschichten definiert werden. Polysun ruft den Sondenalgorithmus alle vier Minuten auf, was zu sehr genauen Endresultaten führt.

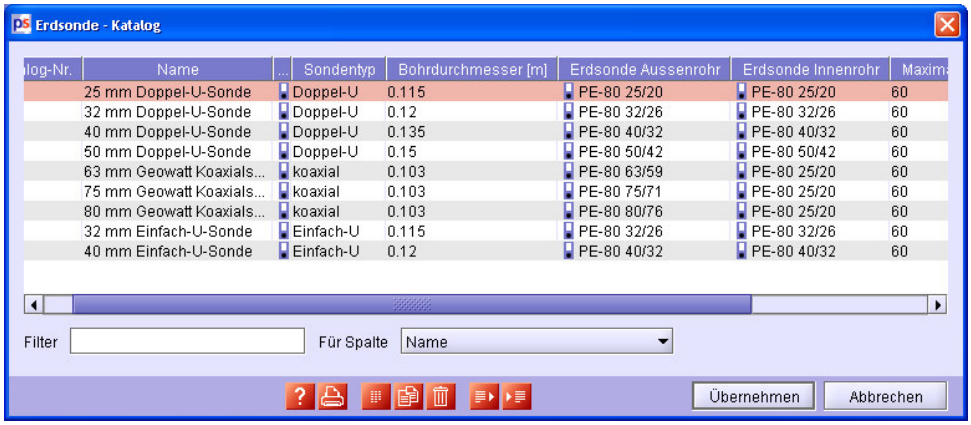
Eine genaue Beschreibung zur Berechung der Sonde bietet die Publikation von Huber Energietechnik AG (Arthur Huber 1997 und 1999).

Integration der Erdwärmesonde in Polysun

Die Erdwärmesonde ist ein eigenständiges Element in Polysun mit zwei hydraulischen Anschlüssen. In der ersten Eingabemaske können die grundlegenden Parameter der Bohrung angegeben werden (Fig. 15). Über Kataloge können die Sondeneigenschaften (Fig. 16) und die Erdeigenschaften (Fig. 17) definiert werden.



Figur 15: Eingabemaske Erdwärmesonde



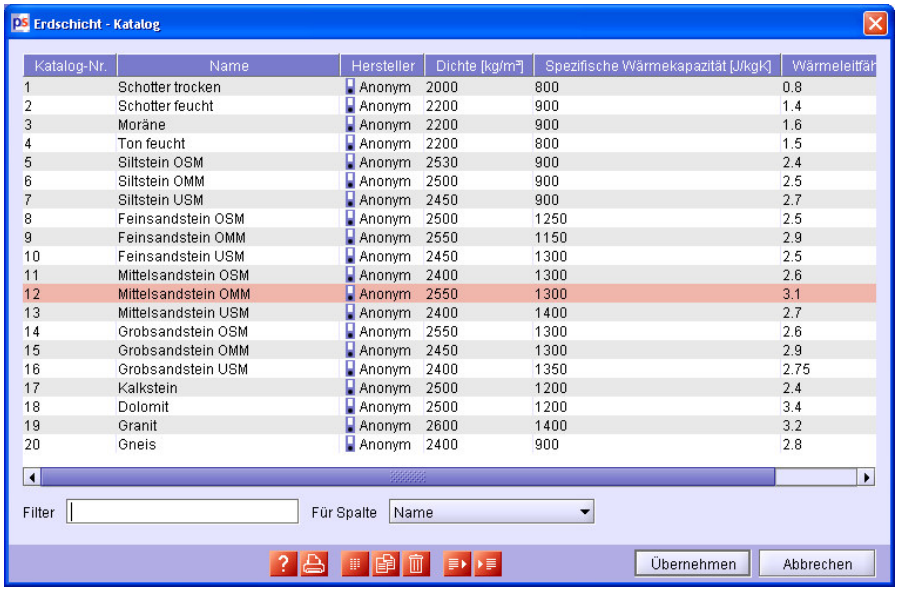
Erdsonde - Katalog

log-Nr.	Name	...	Sondentyp	Bohrdurchmesser [m]	Erdsonde Aussenrohr	Erdsonde Innenrohr	Maxim
	25 mm Doppel-U-Sonde		Doppel-U	0.115	PE-80 25/20	PE-80 25/20	60
	32 mm Doppel-U-Sonde		Doppel-U	0.12	PE-80 32/26	PE-80 32/26	60
	40 mm Doppel-U-Sonde		Doppel-U	0.135	PE-80 40/32	PE-80 40/32	60
	50 mm Doppel-U-Sonde		Doppel-U	0.15	PE-80 50/42	PE-80 50/42	60
	63 mm Geowatt Koaxials...		koaxial	0.103	PE-80 63/59	PE-80 25/20	60
	75 mm Geowatt Koaxials...		koaxial	0.103	PE-80 75/71	PE-80 25/20	60
	80 mm Geowatt Koaxials...		koaxial	0.103	PE-80 80/76	PE-80 25/20	60
	32 mm Einfach-U-Sonde		Einfach-U	0.115	PE-80 32/26	PE-80 32/26	60
	40 mm Einfach-U-Sonde		Einfach-U	0.12	PE-80 40/32	PE-80 40/32	60

Filter Für Spalte Name

Übernehmen Abbrechen

Figur 16: Katalog mit den Eigenschaften der Sonde



Erdschicht - Katalog

Katalog-Nr.	Name	Hersteller	Dichte [kg/m³]	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfäh
1	Schotter trocken	Anonym	2000	800	0.8
2	Schotter feucht	Anonym	2200	900	1.4
3	Moräne	Anonym	2200	900	1.6
4	Ton feucht	Anonym	2200	800	1.5
5	Siltstein OSM	Anonym	2530	900	2.4
6	Siltstein OMM	Anonym	2500	900	2.5
7	Siltstein USM	Anonym	2450	900	2.7
8	Feinsandstein OSM	Anonym	2500	1250	2.5
9	Feinsandstein OMM	Anonym	2550	1150	2.9
10	Feinsandstein USM	Anonym	2450	1300	2.5
11	Mittelsandstein OSM	Anonym	2400	1300	2.6
12	Mittelsandstein OMM	Anonym	2550	1300	3.1
13	Mittelsandstein USM	Anonym	2400	1400	2.7
14	Grobsandstein OSM	Anonym	2550	1300	2.6
15	Grobsandstein OMM	Anonym	2450	1300	2.9
16	Grobsandstein USM	Anonym	2400	1350	2.75
17	Kalkstein	Anonym	2500	1200	2.4
18	Dolomit	Anonym	2500	1200	3.4
19	Granit	Anonym	2600	1400	3.2
20	Gneis	Anonym	2400	900	2.8

Filter Für Spalte Name

Übernehmen Abbrechen

Figur 17: Katalog mit den Eigenschaften der Erdschichten

Numerisches Modell für die Grundwassersonde

Das Modell deckt den Fall der Grundwasserförderung ab. Es wird angenommen, dass das Grundwasser in einer bestimmten Tiefe *x* die gleiche Temperatur hat wie das Erdreich in der gleichen Tiefe *x*.

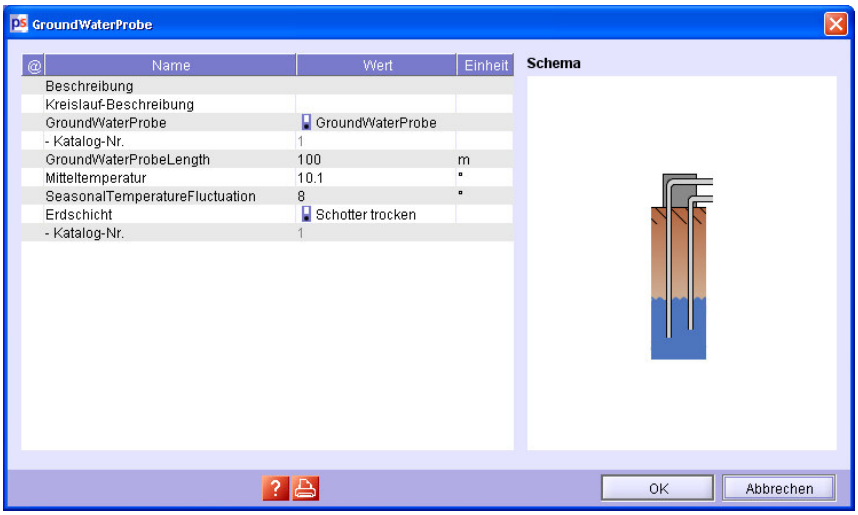
Die Erdreichtemperatur $\theta(x,t)$ in Abhängigkeit der Tiefe *x* im Erdreich und der Zeit *t* ändert sich unter dem Einfluss des Jahreszeitverlaufs der Temperatur des Aussenklimas. Es werden folgende Näherungen getroffen:

- Der zeitliche Temperaturverlauf $\theta(x=0,t)$ an der Erdoberfläche sei gegeben durch den Jahresverlauf der Aussenluft-Temperatur, welche in Polysun über die statistischen Wetterdaten bereits weltweit vorhanden sind.
- Das Maximum der Aussenluft-Temperatur werde Mitte Juli erreicht bzw. das Minimum Mitte Januar (dies trifft für europäische Klimazonen bis auf wenige Tage zu) und der Verlauf der Aussenluft-Temperatur sei sinus- bzw. cosinusförmig.

Detaillierte Angaben zum Rechenmodell sind im Anhang III ersichtlich.

Integration der Grundwassersonde in Polysun

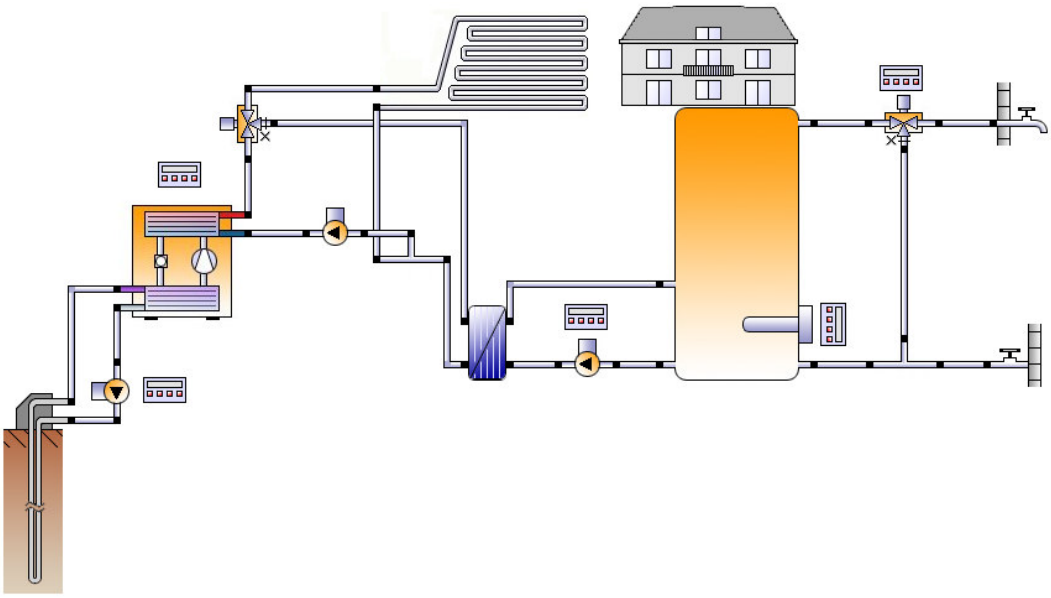
Die Grundwassersonde wurde analog zur Erdwärmesonde in Polysun integriert. Sie ist ein eigenständiges Element mit zwei hydraulischen Anschlüssen. In der ersten Eingabemaske können die grundlegenden Parameter der Bohrung angegeben werden (Fig. 18).



Figur 18: Eingabemaske der Grundwassersonde

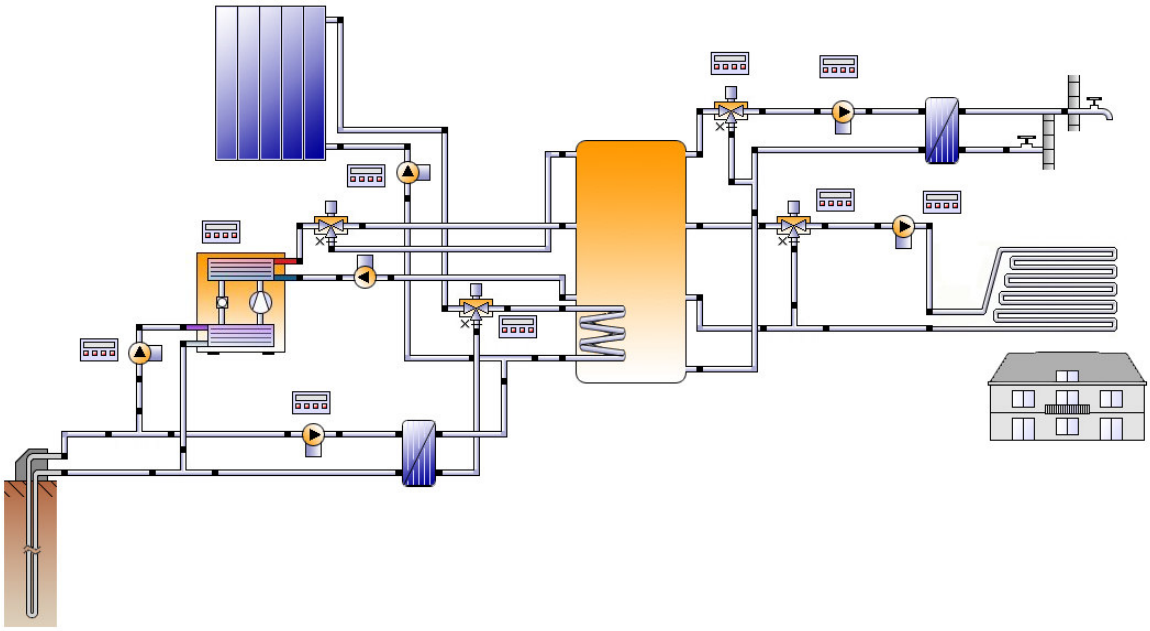
Kombination Sonden und Wärmepumpe

Dank der grossen Flexibilität von Polysun und der modularen Integration der neuen Komponenten können verschiedene Hydrauliken realisiert werden. Zuzeit sind 7 Vorlagen in Polysun integriert. Die Fig. 19 zeigt eine einfache Hydraulik mit Erdwärmesonde, wie sie in konventionellen Systemen bereits vielfach eingesetzt wird.



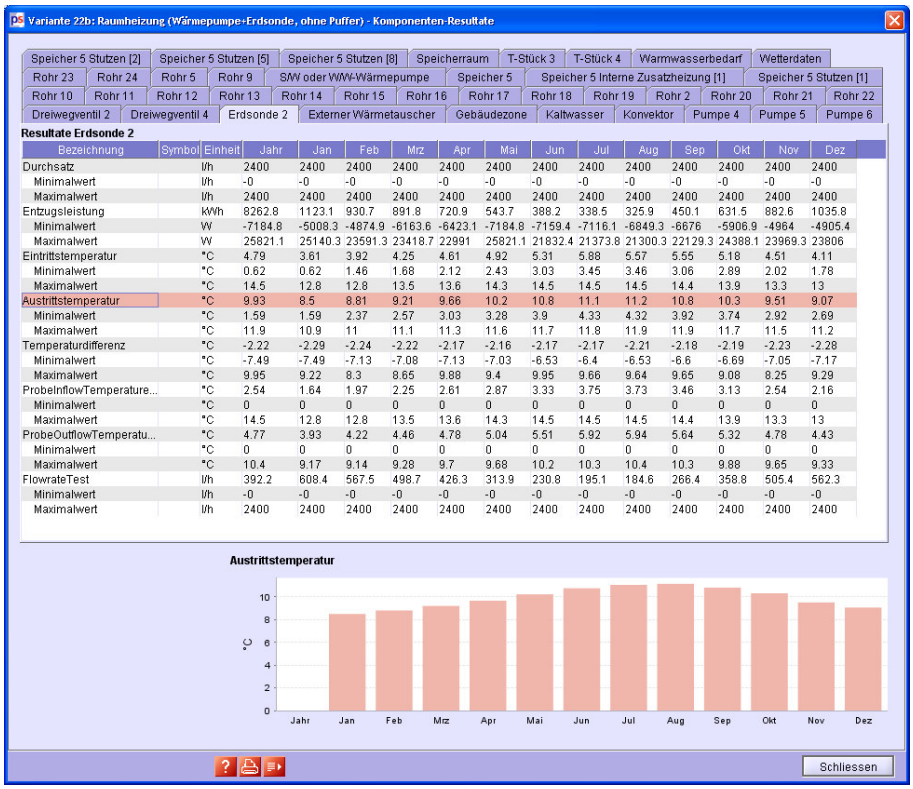
Figur 19: System für Warmwasser und Gebäudeheizung mit Erdwärmesonde

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnte mit der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen bereits ein Beitrag an einer Fachkonferenz platziert werden [3]. Die Rückmeldungen zu dieser Publikation waren überaus zahlreich und zeugen vom grossen Interesse an dieser Kombination von verschiedenen erneuerbaren Energiequellen. Die Planung und Auslegung solcher Systeme lässt sich oft nicht mehr nach einfachen Faustregeln durchführen, und insbesondere auch aus den Entwicklungsabteilungen grosser Systemhersteller wurde der Einsatz von Polysun auch für die Produktentwicklung in Betracht gezogen.

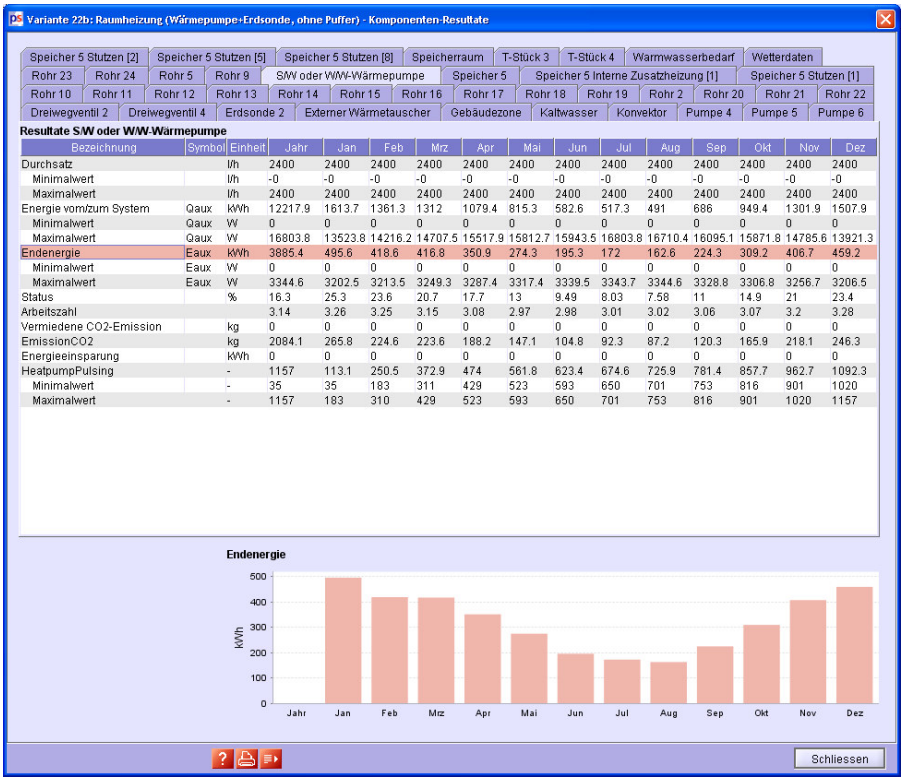


Figur 20: Komplexes System für Warmwasser und Gebäudeheizung mit Erdwärmesonde und Solarthermie

Die Resultate sind wiederum auf System- oder Komponentenebene ausgewertet. Die Resultate der Erdwärmesonde zeigen Durchsatz, Temperaturen und Leistungen (Fig. 21). Bei der Wärmepumpe werden elektrische Leistungsaufnahme, Wärmeabgabe an das Fluid, COP, Temperaturen (Minimal, Maximal und Durchschnitt) angezeigt (Fig. 22).

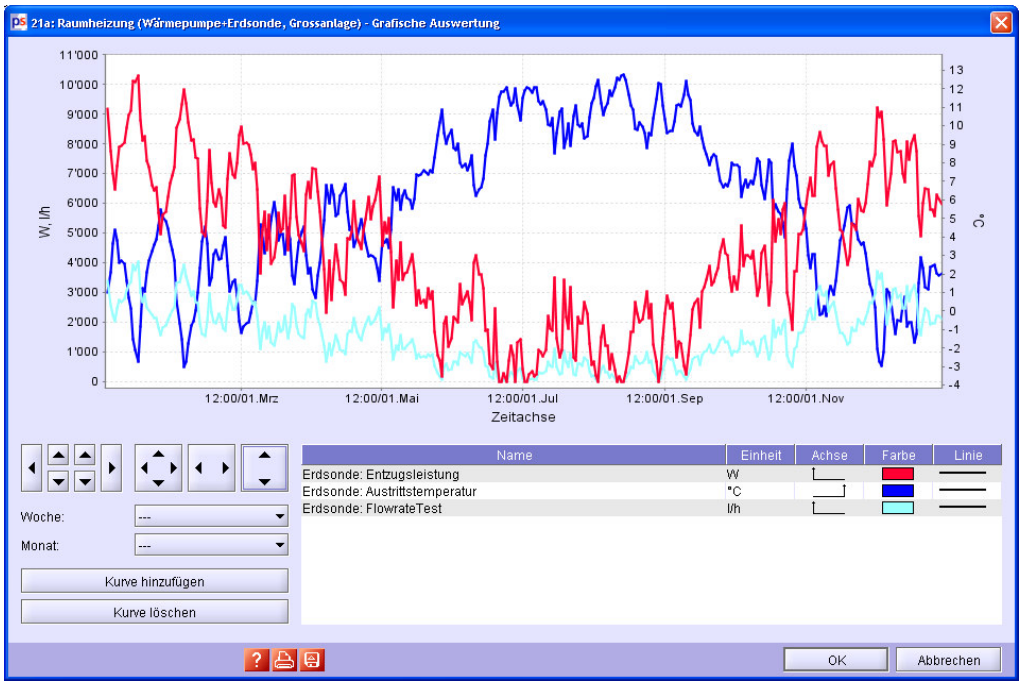


Figur 21: Auswertung auf Ebene der einzelnen Komponenten: Erdwärmesonde



Figur 22: Auswertung auf Ebene der einzelnen Komponenten: Wärmepumpe

Die Resultate sind auch graphisch als Stundenwerte darstellbar, war sehr detaillierte Auswertungen ermöglicht (Fig. 23).



Figur 23: Graphische Auswertung mit Stundenwerten

5. Schlussfolgerungen und weiterführende Arbeiten

Im vorliegenden Projekt wurde die Wärmepumpe als zusätzliche Energiequelle in die bereits existierende Software Polysun eingebunden.

Die numerischen Modelle für die Wärmepumpen und Wärmequellen wurden erfolgreich erstellt und in Polysun implementiert. Die Simulation läuft mit der erwarteten Performance und liefert korrekte Resultate. Dank der Modularität eröffnet sich riesiges Feld an verschiedenst kombinierten Hydrauliken.

Neben der Erweiterung der Funktionalität von Polysun wurde dabei entsprechend dem Polysun Konzept grosser Wert auf die Komponentenkataloge gelegt. Darüber hinaus wurden Vorlagehydrauliken erstellt, welche in der höchsten Ausbaustufe typischerweise als Startpunkt für das Erstellen eines neuen Projektes dienen. In der kostengünstigen Version von Polysun (Benutzerstufe „Professional“) erlauben diese Vorlagen einen effizienten Arbeitsablauf mit einfachster Bedienungsführung

Durch die neuen Möglichkeiten kommen auch neue Fragestellungen auf. Im Markt und in den Entwicklungsabteilungen der Systemhersteller werden einige wichtige Anwendungsfälle immer noch kontrovers diskutiert. Eine allseitig akzeptierte Systematik von Heizungsanlagen fehlt zurzeit noch, und oft werden Voraussagen ohne dynamische Jahressimulation vorgenommen. Systemsimulation wird derzeit häufig noch in akademischen Projekten durchgeführt (Simulationstool TRNSYS). In Polysun erstellte Hydraulikvorlagen würden dabei zur Klärung beitragen und wären für die Planung und Optimierung von Heizsystemen extrem hilfreich.

Zu folgenden Themen sollten vertiefte und auf die Praxis bezogene Untersuchungen gemacht werden. Eine Auslieferung von Vorlagen in Polysun könnte dabei helfen, die Resultate aus dieser Diskussion einem grossen Anwenderkreis zugänglich zu machen.

- Gebäudekühlung mit Erdwärmesonden (Freecooling)
- Gebäudekühlung mit konventionellen Kompressorkühlmaschinen
- Gebäudekühlung mit solarthermischen Kühlanlagen
- Gebäudeheizung direkt ab Erdwärmesondenfeld, welches über Solarthermie regeneriert wird
- Wärmepumpe direkt mit Solarthermie kombiniert
- Latentwärmespeicher als Wärmequelle für die Wärmepumpe
- Verwendung von Erdregistern.

Zu einigen der hier aufgeführten Anwendungsbereiche können bereits mit der heutigen Polysun Funktionalität Hydraulikvorlagen erstellt werden. Allerdings kann wegen der grossen Verbreitung von Polysun mit der *Auswahl* der Hydraulikvorlagen stark Einfluss genommen werden auf den Markt. Es ist deshalb wichtig, dass bei einer Erweiterung des Hydraulikkataloges die Expertenmeinung einfliesst. Vela Solaris strebt dafür Partnerschaften mit wichtigen Branchenorganisationen an.

In gewissen Fällen kann eine Erweiterung der Benutzerführung (neue Assistenten, angepasste Eingabemasken) in Betracht gezogen werden, oder es müssen weitere Features implementiert werden. Im vorliegenden Projekt konnte gezeigt werden, dass solche Erweiterungen effizient durchgeführt werden können und dass sie zusammen mit dem modularen Grundkonzept von Polysun mit kleinem Aufwand eine grosse Vielfalt von Kombinationsmöglichkeiten eröffnen.

Referenzen

[1] Huber, A.; Schuler, O. (1997): **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden**
Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung. Bundesamt für Energie, Bern.
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000005132.pdf&name=000000195115.pdf

[2] Huber, A.; Pahud, D. (1999): **Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder**
Erweiterung des Programms EWS für Erdwärme-sondenfelder. Schlussbericht. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
www.hetag.ch/huber/download/Hu_EWS2_SB.pdf

[3] Huber, A. (2008): **Benutzerhandbuch zum Programm EWS**. Version 4.0 / Oktober
http://www.hetag.ch/huber/download/Bed_EWS40.pdf

[4] *Witzig, A.; Marti, J; Brüllmann, T; Huber, A (2008),* **Systemoptimierung der Kombination von Solarkollektoren mit Wärmepumpenanlagen**
Präsentation im wissenschaftlichen Teil des 19. Symposiums für thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland, sowie im Tagungsband des Symposiums. Siehe Anhang I

[5] Ochs M., Huber A. (2008): **Berechnung des COP von Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen durch Interpolation von Messwerten**
Huber Energietechnik AG, siehe Anhang II

[6] Ochs M., Huber A. (2008): **Brunnen-Modell für Wasser/Wasser-Wärmepumpen**
Huber Energietechnik AG, siehe Anhang III

Anhang I: Publikation am 19. Symposium für thermische Solarenergie

Systemoptimierung der Kombination von Solarkollektoren mit Wärmepumpenanlagen

Dynamische Simulationen mit Polysun 4

Andreas Witzig (andreas.witzig@velasolaris.com) [1)]
Jörg Marti (joerg.marti@velasolaris.com) [1)]
Timon Brüllmann (timon.bruellmann@velasolaris.com) [1)]
Arthur Huber (arthur.huber@huberenergie.ch) [2)]

[1)] Vela Solaris AG, Herrenberg 35, CH-8640 Rapperswil-Jona, Schweiz
[2)] Huber Energietechnik AG, Jupiterstr. 26, CH-8032 Zürich, Schweiz

1. Einleitung

Der Einsatz von Simulationswerkzeugen hat sich einerseits für die Auslegung von Solarsystemen andererseits auch für die Wärmepumpendimensionierung inzwischen etabliert. Während detaillierte dynamische Berechnungsverfahren für die einzelnen Systeme bereits ausgereift sind, werden physikbasierte, voll gekoppelte Simulationen bisher nur im akademischen Bereich oder in kommerziellen Grossprojekten eingesetzt. Mit der Integration der Wärmepumpen-Komponente in Polysun 4 wird die Vielfalt der Analysemöglichkeiten mit dem effizienten numerischen Verfahren kombiniert. Damit wird die vergleichende Jahressimulation für die Kombination Solar & Wärmepumpen einem grossen Anwenderkreis zugänglich gemacht.

Das modulare Hydraulikkonzept sowie die Ausrichtung auf real erhältliche Komponenten erlauben den Einsatz von Polysun 4 in der frühen Planungsphase, als Planungswerkzeug für die Auslegung von Heizsystemen, sowie für die Optimierung von Systemkomponenten und Regelstrategien. Die Wärmepumpen werden dabei mit Einbezug von Erdsonden detailgetreu abgebildet und stehen dem Benutzer in Komponentenkatalogen zur Verfügung.

2. Numerische Modelle

Ein verbreiteter Ansatz zur numerischen Behandlung komplexer Systeme ist das Aufstellen und implizite Lösen eines Gleichungssystems. Die entsprechenden Simulationsansätze sind ausgereift und werden bereits erfolgreich in der Solartechnik [TRNSYS] und Gebäudesimulation [IDA-ICE] eingesetzt. Polysun verfolgt alternativ dazu ein direktes Lösungsverfahren, das sich bei den in der Solarthermie vorkommenden physikalischen Gleichungen als sehr effizient erwiesen hat. Wie in [SM07] im Detail beschrieben, ist es in Polysun gelungen, ein effizientes und trotzdem genügend allgemeines Verfahren zu implementieren, welches die modulare Systemdefinition erlaubt und trotzdem in der numerischen Performanz die Vergleichsprogramme bei weitem übertrifft. In Polysun werden dazu in einem ersten Schritt die zusammenhängenden Komponenten analysiert. Im Gegensatz zu vergleichbaren Simulationsprogrammen wird in Polysun 4 nicht jede Systemvorlage mit einer eigenen Berechnungsformel abgebildet (welche zum Beispiel die Solarenergie an den Speicher aus der Kollektoreinstrahlung, den Leitungs-, der Speicher- und Aussentemperatur in einem Schritt berechnet). In Polysun 4 wird jede Komponente als eigenständiges Objekt abgebildet, welche nur ihre unmittelbaren Nachbarn kennt und zu diesen über entsprechende Schnittstellen Wärmeträgerflüssigkeit oder Energie austauschen kann. Dabei kommt den Steuerungen ein grosses Gewicht zu. Diese können auf die Eigenschaften (Temperatur, Durchsatz, etc.) aller Komponenten der Anlage zugreifen und mit diesen Eingangsgrössen beliebige Aktoren wie Pumpen, Zusatzheizungen oder Ventile steuern [SM07].

In Zusammenarbeit mit den Entwicklern der Software EWS [AH97] wird Polysun zurzeit im ein modernes Wärmepumpenmodell erweitert. Dabei werden numerische Algorithmen verwendet, welche sowohl die Physik angemessen abbilden (Detaillierte Abbildung der Kennlinienschar), sich aber aus den verfügbaren Komponentendaten (Parameter aus Datenblättern, Normen, örtliche Bodenbeschaffung) ermitteln lassen.

3. Simulations-Setup verschiedener Systemkonzepte

In der Praxis geschieht die Wahl des Energieträgers für Neu- und Umbauten in einer frühen Planungsphase. Die Auslegung der möglichen Heizsysteme sowie der Vergleich der verschiedenen Alternativen sind dabei von grosser Wichtigkeit. Man erkennt dabei verschiedene Einflussfaktoren

- Standort: Wetterdaten für Aussentemperatur, Feuchtigkeit, Solare Einstrahlung, Wind
- Verbrauchsmenge und -profil des Warmwasser
- Gebäudehülle, interne Wärmequellen, Solare Einstrahlung durch Fenster

Die detaillierte Jahressimulation weist Jahresertrag, CO2-Einsparung und Systemnutzungsgrad zweifelsfrei nach. Das Zeitschrittverfahren von Polysun 4 erlaubt mit seiner feinen Auflösung aber auch den Blick aufs Detail, wie zum Beispiel die Temperaturverhältnisse im Schichtenspeicher. Insbesondere werden auch Steuerungskonzepte in ihrer vollen Zeitabhängigkeit realistisch abgebildet, was gerade in der Kombination von Solarkollektor und Wärmepumpe sehr wichtig ist (Betrieb der Wärmepumpe in der Niedertarif Zeitspanne). Somit erlaubt Polysun die Optimierung von Reglerkonzepten in Bezug auf die ökonomische Wirtschaftlichkeit, Systemeffizienz und Hygiene (Legionellenproblematik

3.1 Vergleich von Solar- und Wärmepumpen-Heizsysteme

Mit dem erweiterten Polysun können Solarsysteme direkt mit Wärmepumpen-Heizsystemen verglichen werden. Für einen Vergleich der CO2 Bilanzen muss dabei der lokale Strommix und die daraus abgeleiteten Emissionsfaktoren berücksichtigt werden. Für den Vergleich der Kosten besteht zudem eine Unsicherheit bezüglich des zukünftigen Strompreises.

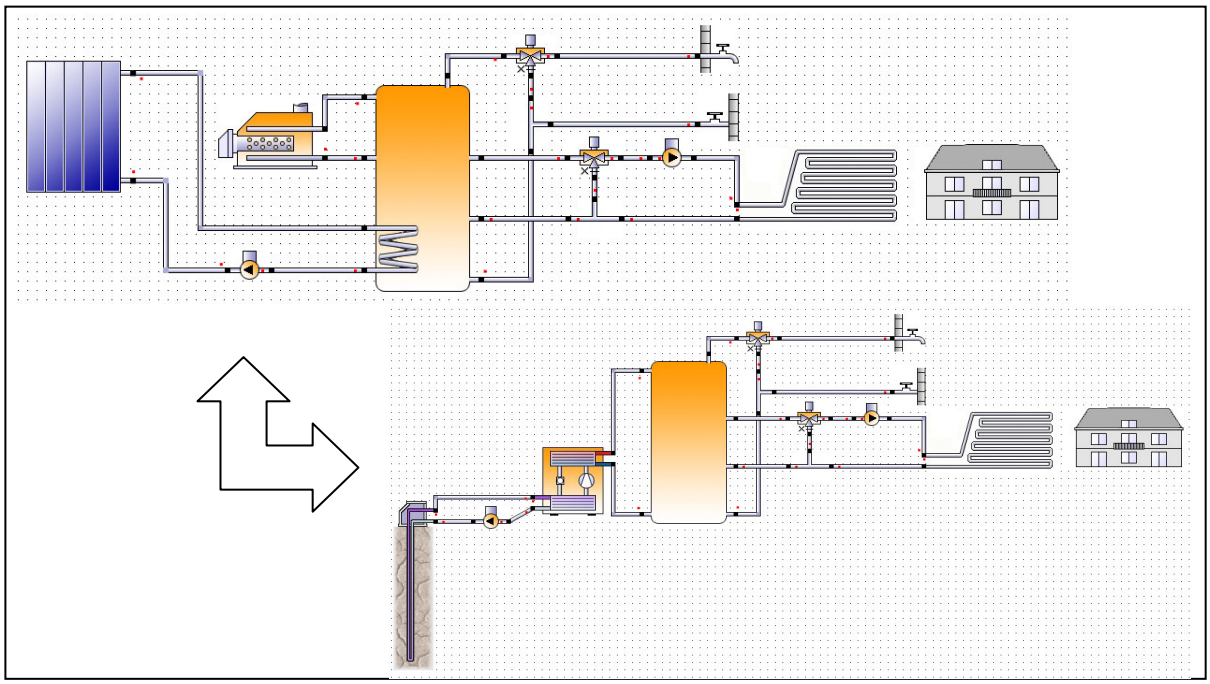


***Abbildung 1**: Vergleich von Solarsystem mit fossiler Zusatzheizung mit einem System mit Luft-Wärmepumpe*

3.2 Kombination von Solar und Wärmepumpen

Für die Kombination von Solarkollektoren und Wärmepumpen sind kürzlich mehrere neue Systemkombinationen auf den Markt gekommen.

Ersatz der fossilen Zusatzheizung durch eine Luftwärmepumpe

Die einfachste Kombination besteht darin, dass als Zusatzheizung eine Luftwärmepumpe anstelle einer Öl- oder Gasheizung eingesetzt wird (siehe Abbildung 2).

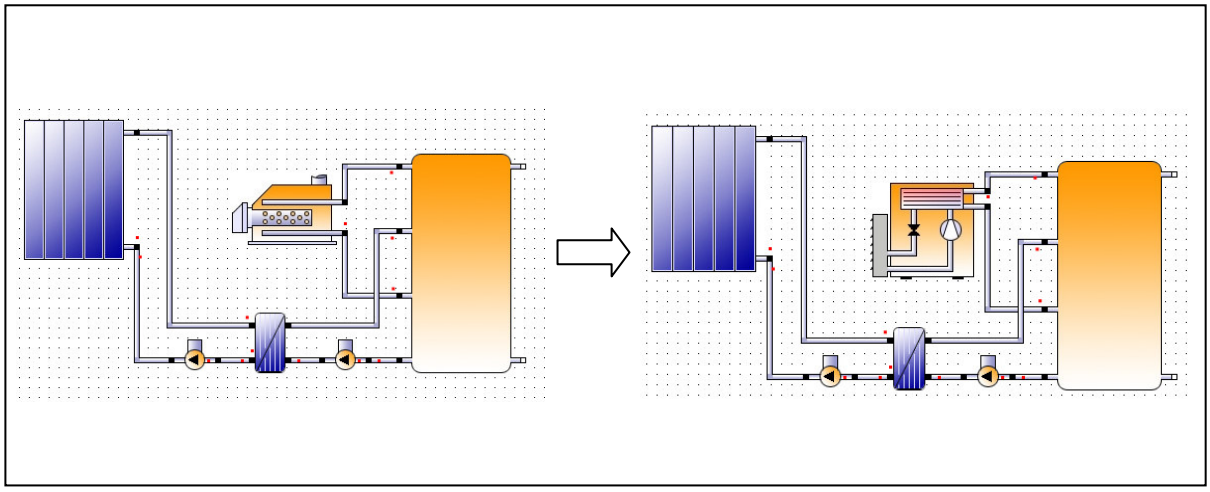


***Abbildung 2**: Einsatz einer Luftwärmepumpe als Ersatz für die fossile Zusatzheizung*

Sonnenkollektoren direkt an Wärmepumpe angeschlossen

Die Solarenergie kann jedoch noch viel effizienter genutzt werden, wenn die Sonnenkollektoren direkt mit einer Wärmepumpe kombiniert werden, um damit das Temperaturniveau der Wärmequellenseite (Verdampfer) einer Wärmepumpe anzuheben und somit die Leistungszahl zu verbessern (mögliche Anordnung in Abbildung 3). Die Solarenergie wird in diesen Systemen gerade bei geringer Einstrahlung als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt und kann auch dann verwertet werden, wenn die Vorlauftemperaturen aus dem Kollektor unter der Speichertemperatur liegt. Oft kann damit dann auf eine Erdsonde verzichtet und bei gleichbleibender Effizienz der Systemaufwand reduziert werden [HS06].

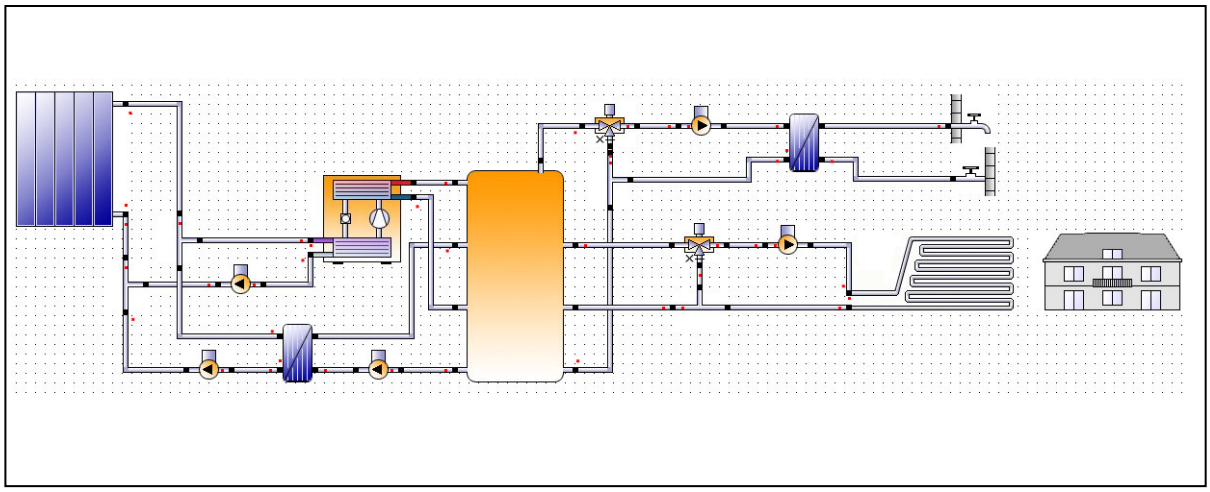


***Abbildung 3**: Betrieb der Solarkollektoren bei niedrigen Temperaturen*

Solare Vorwärmung für Erdwärmesondenfelder

Ein weiteres mögliches Systemkonzept besteht darin, dass die Solarenergie aus den Kollektoren in die Erdwärmesondenfelder geführt und so gespeichert wird (siehe Abbildung 4) [AH99]. Eine entsprechende Erweiterung von Polysun 4 ist geplant, befindet sich jedoch noch in Entwicklung.

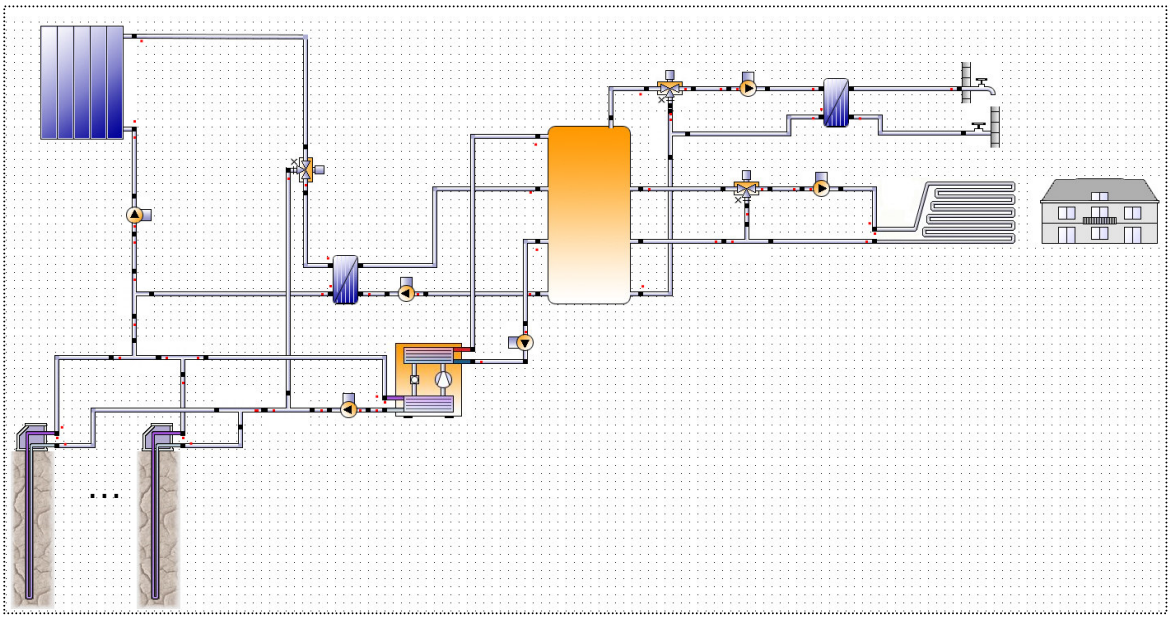


***Abbildung 4**: Aufladen von Edrsondenfelder durch Solarenergie*

Die Komponentenauswahl (z.B. nicht abgedeckte Kollektoren) sowie die Steuerungskonzepte (z.B. Vorrang der Speicherbeladung) bieten eine grosse Vielfalt an Systemen, unter welchen je nach Standort und Gegebenheiten wie Verbraucheranforderungen eine optimale Lösung gefunden werden muss.

Weitere Systemkonfigurationen wie zum Beispiel der Einsatz von Erdwärmesonden als Wärmequelle und Rückkühlung sind, gerade im gewerblichen Bereich, denkbar und mit dem erweiterten Polysun 4 abbildbar.

4. Schlussfolgerung

Die Freiheit im Anlagedesign erlaubt die Gegenüberstellung der verschiedenen Lösungskonzepte, was vor allem bei der Kombination von verschiedenen Energielieferanten wie im vorliegenden Beispiel Wärmepumpen & Solar eine wichtige Rolle spielt.

Weitere wichtige Voraussetzungen, welche in Polysun bereits realisiert sind:

- Im Programm bereits eingebundene Wetterdaten, welche für die Berechnung der Heizlast sowie für die Auslegung z.B. von Luft-Wasser Wärmepumpen wichtig sind (Aussentemperatur, Luftfeuchtigkeit). Falls ein Standort noch nicht hinterlegt ist, interpoliert Polysun aus Koordinaten Höhenangabe eines neuen Standorts die Wetterdaten (Meteonorm 6 der Firma Meteotest ist in Polysun integriert).
- Variabler Zeitschritt: Eine Jahressimulation kann mit ca. 1 Minute Rechenzeit mit hoher Genauigkeit realisiert werden.
- Reglerverhalten: Eine wichtige Komponente in der Systemoptimierung sind Steuerungen und Regelungen. Diese werden in Polysun ebenfalls realitätsnahe abgebildet.
- Gebäudesimulation: Polysun 4 beinhaltet eine integrierte Gebäudesimulation zur Bestimmung der dynamischen Gebäudelast (basierend auf Helios, welches an der EMPA entwickelt wurde).

- Breite bereits bestehende Komponentenauswahl: Der heutige Funktionsumfang in Polysun umfasst bereits alle wichtigen Komponenten einer Heizungsanlage (Speicher, Kessel, Pumpen, Wärmetauscher, Mischventile, Regelungen, Gebäude).
- Resultatauswahl und Visualisierung: In einer ansprechenden graphischen Benutzeroberfläche wird bereits heute eine vielfältige Palette von Resultaten zur Visualisierung angeboten.

Polysun 4 bietet ein modulares Konzept zum Aufbau von Heizungsanlagen, welches die Computergestützte Untersuchung verschiedener Anlagetypen erlaubt.

5. Referenzen

[TRNSYS] S. A. Klein, B. Beckmann, J. Duffie: TRNSYS, A Transient System Simulation Program, Program Manual. Solar Laboratory, Madison, Wisconsin.

[IDA-ICE] M. Vuolle, P. Sahlin: IDA Indoor Climate and Energy Application. EQUA Simulation Technology, http://www.equa.se.

[SM07] S. A. Mathez. Polysun 4: Simulation von Systemen mit komplexer Hydraulik. Proceedings der Otti-Konferenz, Mai 2007.

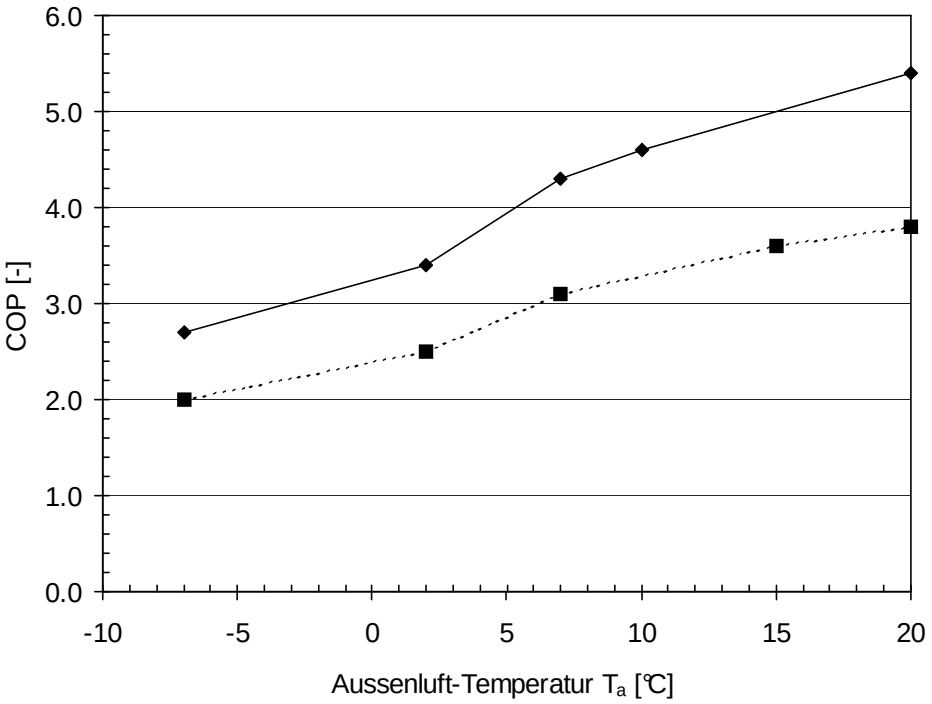
[HS06] Integrierte Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung: Neues Konzept zur Wärmeerzeugung für Niedrigenergie-häuser, Henning Schmidt, HLH Bd. 57, Heft 2, Februar 2006, S. 22 – 29.

[AH97] Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Arthur Huber und Othmar Schuler. Forschungsprojekt des Schweizerischen Bundesamtes für Energiewirtschaft (Schlussbericht). September 1997. Siehe auch http://www.hetag.ch → Referenzen → Forschungsprojekte: Erdwärmesonden

[AH99] Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Arthur Huber und Daniel Pahud. Forschungsprojekt des Schweizerischen Bundesamtes für Energiewirtschaft (Schlussbericht). Dezember 1999.

Anhang II: Markus Ochs, Arthur Huber: Berechnung des COP von Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen durch Interpolation von Messwerten, Februar 2009

Berechnung des COP von Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen durch Interpolation von Messwerten



Markus Ochs, Arthur Huber 10. Februar 2009

Huber Energietechnik AG
Ingenieur- und Planungsbüro
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Tel. 044 422 79 78 Fax 044 422 79 53
http://www.hetag.ch Email: huber@hetag.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung 4

2 Definitionen von COP, Gütegrad und Heizkreistemperaturen 6
2.1 COP und Gütegrad 6
2.2 Definition der relevanten Temperaturen für Luft/Wasser-Wärmepumpen 7

3 Luft/Wasser-WP: Prüfmessungen des WPZ 8
3.1 Prüfmessungen nach alter und nach aktueller Norm 8
3.2 Umrechnung der Prüfmessungen von aktueller Norm auf alte Norm 10
3.3 Diskussion der Berechnung der Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 14

4 Luft/Wasser-WP: Berechnung von weiteren Stützwerten von *COP* und P_{el} 18
4.1 Stützwerte innerhalb des WPZ-Messbereichs 18
4.2 Stützwerte ausserhalb des WPZ-Messbereichs 19
4.2.1 Zusätzliche Stützstelle bei der Aussenluft-Temperatur T_a = -14°C 19
4.2.2 Zusätzliche Stützstelle bei der Aussenluft-Temperatur T_a = 60°C 20
4.3 Beispiel für die Berechnung von weiteren Stützwerten 20

5 Luft/Wasser-WP: Berechnung von *COP* und P_{el} bei beliebigen Temperaturen 21
5.1.1 Allgemeines Vorgehen 21
5.1.2 Aussenluft-Temperatur liegt im Stützstellenbereich -14°C $\leq T_a \leq$ 60°C 21
5.1.3 Aussenluft-Temperatur T_a < -14°C 23

6 Sole/Wasser und Wasser/Wasser-WP: Prüfmessungen des WPZ 24
6.1 Definition der relevanten Temperaturen 24
6.2 Prüfmessungen nach alter und nach aktueller Norm 24
6.3 Umrechnung der Prüfmessungen von aktueller Norm auf alte Norm 28

7 S/W- und W/W-WP: Berechnung von weiteren Stützwerten von *COP* und P_{el} 33
7.1 Zusätzliche Stützstelle bei tiefer Sole-Temperatur 33
7.2 Zusätzliche Stützstellen bei hoher Sole-Temperatur 34
7.2.1 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb vorhanden 34
7.2.2 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb nicht vorhanden 34
7.3 Beispiele für die Berechnung von weiteren Stützwerten 35
7.3.1 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb vorhanden 35
7.3.2 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb nicht vorhanden 35

8 S/W- und W/W-WP: Berechnung von *COP* und P_{el} bei beliebigen Temperaturen 37
8.1 Allgemeines Vorgehen 37
8.2 Sole-Temperatur liegt im Stützstellenbereich $T_{sCOP1} \leq T_s \leq$ 30°C 37
8.3 Sole-Temperatur $T_s < T_{sCOP1}$ 38

8.4 Hochdruck- und Tiefdruck-Störungen bei Sole/Wasser-WP 39

9 Anhang: Interpolationsmethode 40
9.1 Lineare Interpolation einer Funktion $y(T_a,T_v)$ aus vier Messwerten 40
9.2 Interpolation der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} 42
9.3 Direkte Interpolation des *COP* 42
9.4 Indirekte Interpolation des *COP* mit Hilfe des Gütegrades η_c 43
9.5 Beispiele für die Interpolationsmethode 45

10 Symbolverzeichnis 46
10.1 Lateinische Symbole 46
10.2 Griechische Symbole 46
10.3 Abkürzungen 46

1 Kurzfassung

Aus Messwerten des COP (coefficient of performance) von Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen werden durch lineare Interpolation der entsprechenden Gütegrade die COP-Werte berechnet.

Die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Leistung wird direkt durch lineare Interpolation der Messwerte der elektrischen Leistung berechnet.

Die Berechnungen gelten unter folgenden Randbedingungen:

- Taktende WP (keine Drehzahl-variablen WP)
- Anfahrverluste sind nicht berücksichtigt
- Keine Kompakt-WP/Abluft-WP
- Vereisung und Abtauverhalten ist berücksichtigt in den WPZ-Messungen nach EN 255
- 1- und 2-stufige WP (2-stufiger Betrieb ist in den WPZ-Messungen nach EN 255 erfasst und wird im vorliegenden Bericht in der Interpolation der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} berücksichtigt).

In Abb. 1.1 ist eine zusammenfassenden Darstellung aufgeführt, die den Ablauf der Berechnungen der verschiedenen Grössen für den Fall der Luft/Wasser-Wärmepumpen zeigt und die Stellen im Bericht, an denen diese Berechnungen beschrieben werden.

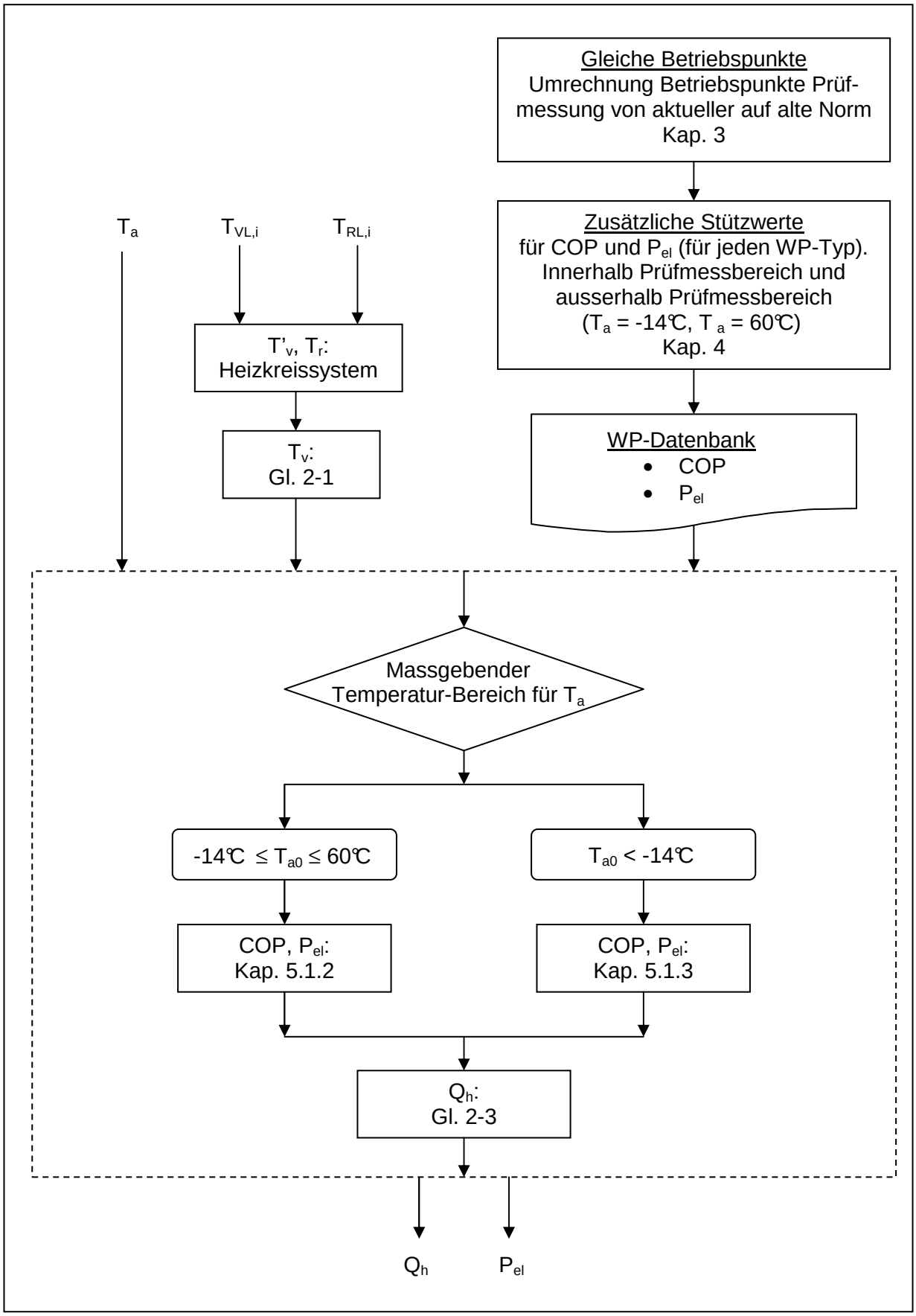


Abb. 1.1: Zusammenfassende Darstellung über den Ablauf der zu berechnenden Grössen und den Stellen im Bericht, an denen die Berechnungen beschrieben werden (für den Fall von Luft/Wasser-Wärmepumpen).

2 Definitionen von COP, Gütegrad und Heizkreistemperaturen

2.1 COP und Gütegrad

Der theoretisch maximal erreichbare (ideale) Wirkungsgrad einer Wärmepumpe entspricht dem Carnot-Wirkungsgrad COP_c. Er hängt nur ab von der Kondensationstemperatur T_v („T_{warm}“) (im WP-Kondensator) und von der Verdampfungstemperatur T_a („T_{kalt}“) (im WP-Verdampfer) des Kältemittels:

$$COP_c = \frac{T_v}{T_v - T_a} \qquad \text{Gl. 2-1}$$

In der vorliegenden Arbeit wird mit folgender Näherung gearbeitet:

- Die Temperatur T_v wird angenähert durch die Wärmepumpen-Austrittstemperatur T_{VL} ("Vorlauf-Temperatur") des Heizkreisfluids (vgl. auch Kap. 2.2):

$$T_v \approx T_{VL} \qquad \text{Gl. 2-2}$$

- Die Temperatur T_a wird im Fall von Luft/Wasser-WP angenähert mit der Aussenluft-Temperatur T_{air} und im Fall von Sole/Wasser- (bzw. Wasser/Wasser-WP) mit der Sole- (bzw. Wasser-) Temperatur T_s:

$$T_a \approx T_{air} \qquad \text{für Luft/Wasser-WP} \qquad \text{Gl. 2-3}$$

$$T_a \approx T_s \qquad \text{für Sole/Wasser-WP und Wasser/Wasser-WP} \qquad \text{Gl. 2-4}$$

Wenn die Wärmepumpen stark ausserhalb des empfohlenen Bereichs betrieben werden (z.B. bei sehr kleinen Durchsätzen), dann müsste möglicherweise ein genaueres Modell eingesetzt werden. Ein mögliches Modell bestünde z.B. darin, die beiden Temperaturen T_v und T_a mittels der sog. logarithmischen Mitteltemperatur aus der Theorie der Wärmetauscher anzunähern. Darin wird T_v mittels der logarithmischen Mitteltemperatur im Kondensator und T_a mittels der logarithmischen Mitteltemperatur im Verdampfer berechnet.

Der (reale) COP von Wärmepumpen ist definiert als Quotient von abgegebener Heizleistung $\dot{Q}_H$ zur elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe.

$$COP = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \qquad \text{Gl. 2-5}$$

Bei bekanntem COP und bekannter elektrischer Leistungsaufnahme P_{el} (diese beiden Grössen werden in den folgenden Kapiteln durch Interpolation berechnet) ergibt sich die abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ zu:

$$\dot{Q}_H = COP \cdot P_{el} \qquad \text{Gl. 2-6}$$

Der Gütegrad η_c gibt das Verhältnis des realen zum idealen COP an:

$$\eta_c = \frac{COP}{COP_c} \qquad \text{Gl. 2-7}$$

Somit ergibt sich der Gütegrad an einem bestimmten Betriebspunkt wie folgt aus dem COP-Messwert:

$$\eta_c = COP \frac{T_v - T_a}{T_v} \qquad \text{Gl. 2-8}$$

2.2 Definition der relevanten Temperaturen für Luft/Wasser-Wärmepumpen

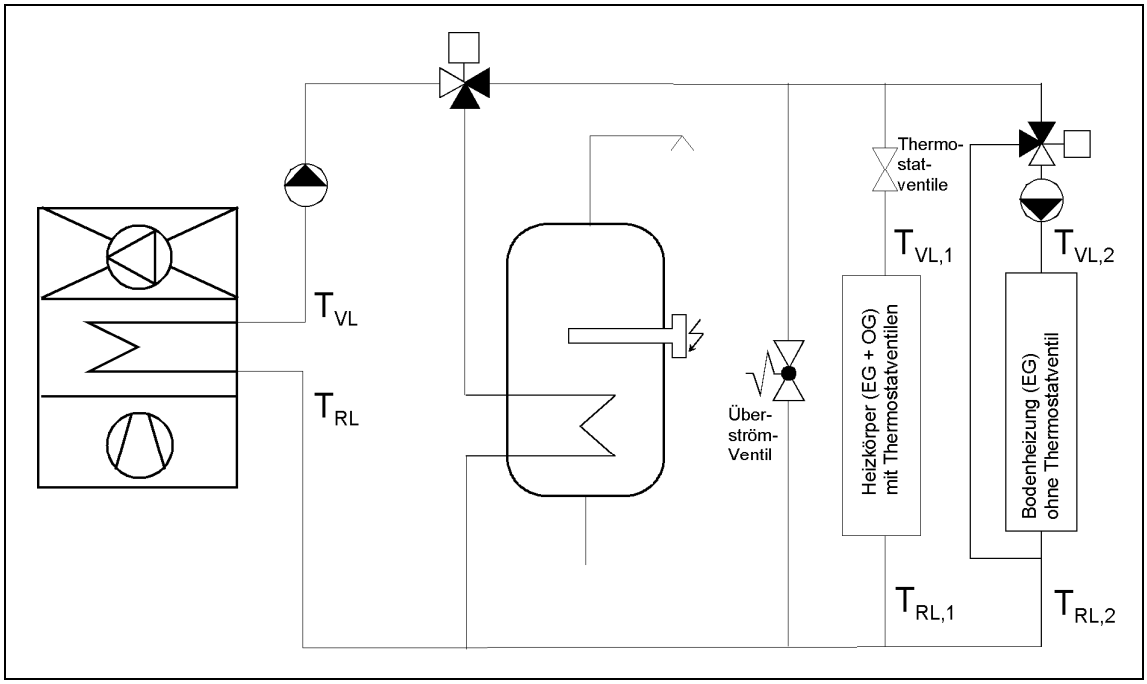


Abb. 2.1: Definition der relevanten Heizkreistemperaturen anhand eines typischen Heizungsschemas mit einer Luft/Wasser-WP.

Die relevanten Heizkreistemperaturen sind in Abb. 2.1 dargestellt. Die Wärmepumpen-Austrittstemperatur des Heizkreisfluids wird mit T_{VL} ("Vorlauf-Temperatur") bezeichnet. Als eigentliche Vorlauf-Temperatur $T_{VL,i}$ wird die Temperatur vor dem Eintritt ins Wärmeabgabesystemen i bezeichnet (nach allfälligen Mischern). Die Rücklauf-Temperatur $T_{RL,i}$ ist die Temperatur beim Austritt aus dem Wärmeabgabesystemen i. T_{RL} ist die Eintrittstemperatur des Heizkreisfluids in die Wärmepumpe.

Die Differenz zwischen der Wärmepumpen-Austrittstemperatur T_{VL} und der Eintrittstemperatur T_{RL} muss dem in den WPZ-Prüfmessungen angegebenen Wert ΔT_{Nutzer} entsprechen:

$$\Delta T_{Nutzer} = T_{VL} - T_{RL} \qquad \text{Gl. 2-9}$$

3 Luft/Wasser-WP: Prüfmessungen des WPZ

3.1 Prüfmessungen nach alter und nach aktueller Norm

Als Grundlage für die WP-Datenbank in Polysun dienen die standardisierten Messungen des WPZ (Wärmepumpen-Testzentrum) an Luft/Wasser-Wärmepumpen. Die Mehrzahl der momentan beim WPZ aufgeführten Prüfresultate wurden noch nach der alten Norm EN 255 ermittelt. Neu auf den Markt kommende Geräte werden vom WPZ nach der aktuellen Norm EN 14511 getestet.

Die Normen legen den experimentellen Aufbau und die Messbedingungen fest. Die Betriebspunkte selber, an denen die Wärmepumpen ausgemessen werden sollen, werden von den Verbänden EHPA (European Heat Pump Association) und D-A-CH in einem Prüfungsreglement festgelegt. Kürzlich wurde ein neues Prüfungsreglement verabschiedet, in welchem einige Betriebspunkte weggefallen sind: „EHPA-DACH Prüfreglement. Prüfung von Luft/Wasser-Wärmepumpen", Version 1.2, Ausgabe 20.8.2008“ (www.wpz.ch → Wärmepumpen-Prüfungen → Prüfreglemente.) Gegenüber dem vorhergehenden/alten Reglement werden neu folgende Betriebspunkte nicht mehr ausgemessen:

A10/W35

A20/W35.

Momentan sind in den WPZ-Testberichten für alle nach EN 14511 ausgemessenen Wärmepumpen diese beiden Betriebspunkte noch enthalten, da die Tests noch nach altem Reglement durchgeführt wurden. Zukünftig werden jedoch die beiden Betriebspunkte nicht mehr ausgemessen.

Bem.: Der Einfachheit halber wird im Folgenden manchmal statt von „Prüfmessungen gemäss aktueller Norm EN 14511 und neuem EHPA-DACH Prüfungsreglement“ nur von „Betriebspunkten gemäss aktueller Norm“ gesprochen. Und statt von „Prüfmessungen gemäss alter Norm EN 255 und altem EHPA-DACH Prüfungsreglement“ nur von „Betriebspunkten gemäss alter Norm“.

Die Messungen gemäss alter Norm EN 255 erfolgten an den in Tabelle 1 angegebenen Betriebspunkten:

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	A-7/W35	A2/W35	A7/W35	A10/W35	A20/W35	A-7/W50	A2/W50	A7/W50	A15/W50	A20/W50
Aussenluft-Temp. T_a [℃]	-7	2	7	10	20	-7	2	7	15	20
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	35	35	35	50	50	50	50	50
rel. Feuchte [%]	75	93	89	78	40	75	93	89	71	40

Tabelle 1: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Luft/Wasser-Wärmepumpen gemäss alter Norm EN 255 (und altem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

Die Messungen gemäss aktueller Norm EN 14511 erfolgen an den in Tabelle 2 angegebenen Betriebspunkten:

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	A-7/W35	A-7/W35	A2/W35	A7/W35	A-15/W45	A-7/W45	A2/W45	A7/W45	A-7/W55	A7/W55	A20/W55
Aussenluft-Temp. T_a [℃]	-15	-7	2	7	-15	-7	2	7	-7	7	20
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	35	35	45	45	45	45	55	55	55
rel. Feuchte [%]	-	75	84	89	-	75	84	89	75	89	40

Tabelle 2: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Luft/Wasser-Wärmepumpen gemäss aktueller Norm EN 14511 (und neuem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

An den angegebenen Betriebspunkten werden die folgenden Messwerte erfasst: *COP* (coefficient of performance), abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ und elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Diese Messungen werden durchgeführt bei einem konstanten Aussenluft-Volumenstrom und einer konstanten Temperaturdifferenz ΔT_{Nutzer} zwischen der Wärmepumpen-Ein- und Austrittstemperatur des Heizkreisfluids (vgl. Gl. 2-9). (Hier ist auch der Hauptunterschied der Prüfmessungen nach alter und neuer Norm zu finden: Nach alter Norm EN 255 wird mit ΔT_{Nutzer} = 10℃ gemessen, nach neuer Norm EN 14511 mit ΔT_{Nutzer} = 5℃.)

Im Falle von 2-stufigen Wärmepumpen wird die Umschaltung zwischen den Stufen in den WPZ-Messungen erfasst. Die Umschaltung ist aus der WPZ-Messungen ersichtlich am Sprung der abgegebenen Heizleistung $\dot{Q}_H$ und der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Hingegen wird der *COP* kaum beeinflusst.

In Abb. 3.1 ist als Beispiel eine typische *COP*-Messung gemäss EN 255 dargestellt und in Abb. 3.2 eine Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} (beide für eine 1-stufige Wärmepumpe).

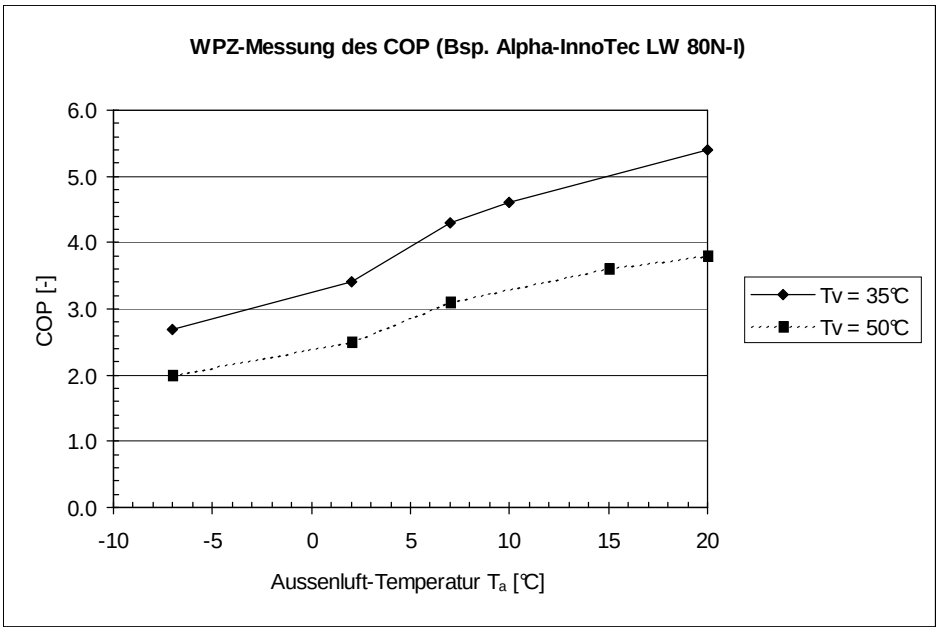


Abb. 3.1: Beispiel einer WPZ-Messung des COP an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gemäss EN 255 (WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃).

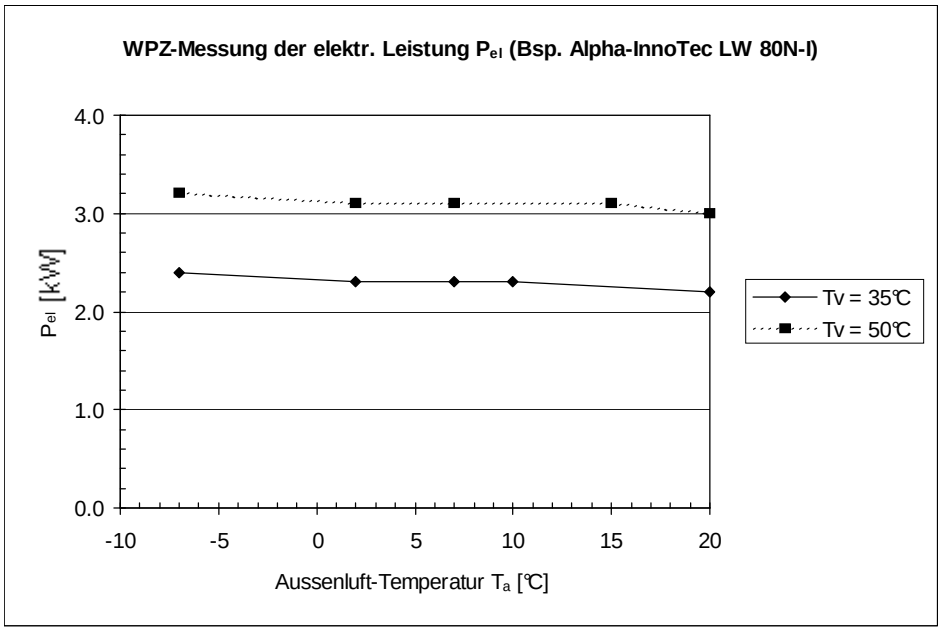


Abb. 3.2: Beispiel einer WPZ-Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gemäss EN 255 (WP-Austrittstemperaturen T_v = 35°C und T_v = 50°C).

3.2 Umrechnung der Prüfmessungen von aktueller Norm auf alte Norm

Die WP-Datenbank in Polysun soll auf identischen Stützstellen (Betriebspunkten) für alle Luft-Wasser-Wärmepumpen basieren. Es wurde entschieden, dazu die Betriebspunkte der Prüfmessungen nach alter Norm EN 255 (Tabelle 1) zu verwenden und die Prüfmessungen nach aktueller Norm auf die Betriebspunkte nach alter Norm umzurechnen.

In Kap. 4 wird dann dieses Set von Betriebspunkten ergänzt mit weiteren Betriebspunkten (Stützstellen) und den zugehörigen Stützwerten, um einen regelmässigen Raster von Betriebspunkten zu erhalten und um einen grösseren Aussenluft-Temperatur-Bereich abzudecken. Diese aufbereiteten Daten bilden die eigentliche WP-Datenbank von Polysun.

In Kap. 5 wird auf der Grundlage dieses regelmässigen Rasters von Betriebszuständen in der so generierten WP-Datenbank der *COP* und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe an beliebigen Betriebspunkten mittels Interpolation berechnet.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Prüfmessungen nach aktueller Norm EN 14511 (Tabelle 2) umgerechnet werden auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255 (Tabelle 1). Grundsätzlich geschieht die Umrechnung mittels linearer Interpolation und linearer Extrapolation. Für die Umrechnung des *COP* auf andere Betriebspunkte wird Gl. 9-113 verwendet (direkte Interpolation des COP, nicht indirekt über den Gütegrad), für die Umrechnung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe Gl. 9-107. (Bem.: Unterschiede in den relativen Feuchten der Betriebspunkte werden im Folgenden nicht berücksichtigt.)

Für die heizkreisseitige WP-Austrittstemperatur T_v = 35℃ stimmen drei Betriebspunkte von alter und aktueller Norm überein, d.h. es wird bei den gleichen Sole-Temperaturen T_s gemessen. Diese drei Betriebspunkte können übernommen werden:

A-7/W35

A2/W35

A7/W35.

Die beiden in Kap. 3.1 erwähnten, in Zukunft nicht mehr ausgemessenen Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 werden wie folgt berechnet: Es wird angenommen, dass der *COP* bzw. P_{el} (in Funktion der Aussenluft-Temperatur T_a) zwischen T_a = 7℃ und T_a = 20℃ für T_v = 35℃ die gleiche Steigung hat wie für T_v = 50℃ (vgl. Abb. 3.3). Diese Steigung *s* ist für T_v = 55℃ aus den Prüfmessungen bei T_{a1} = 7℃ (A7/W55) und T_{a2} = 20℃ (A20/W55) bekannt und beträgt:

$$s_{COP} = \frac{COP_{20/55} - COP_{7/55}}{T_{a2} - T_{a1}} = \frac{COP_{20/55} - COP_{7/55}}{13K} \qquad \text{Gl. 3-10}$$

$$s_{P_{el}} = \frac{P_{el,20/55} - P_{el,7/55}}{T_{a2} - T_{a1}} = \frac{P_{el,20/55} - P_{el,7/55}}{13K} \qquad \text{Gl. 3-11}$$

mit T_{a1} = 7℃, T_{a2} = 20℃

Der *COP* und die elektrische Leistung P_{el} lassen sich somit an den beiden Betriebspunkten A10/W35 und A20/W35 wie folgt berechnen (analog zu Gl. 9-98):

$$COP_{10/35} = COP_{7/35} + s_{COP} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = COP_{7/35} + (COP_{20/55} - COP_{7/55}) \cdot 3/13 \qquad \text{Gl. 3-12}$$

$$P_{el,10/35} = P_{el,7/35} + s_{P_{el}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = P_{el,7/35} + (P_{el,20/55} - P_{el,7/55}) \cdot 3/13 \qquad \text{Gl. 3-13}$$

mit T_{a0} = 10℃, T_{a1} = 7℃

$$COP_{20/35} = COP_{7/35} + s_{COP} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = COP_{7/35} + (COP_{20/55} - COP_{7/55}) \qquad \text{Gl. 3-14}$$

$$P_{el,20/35} = P_{el,7/35} + s_{P_{el}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = P_{el,7/35} + (P_{el,20/55} - P_{el,7/55}) \qquad \text{Gl. 3-15}$$

mit T_{a0} = 20℃, T_{a1} = 7℃

Bem.: Die obige Annahme zur Berechnung der beiden Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 wird im Kap. 3.3 diskutiert.

Anders ist die Situation bei höheren WP-Austrittstemperaturen T_v. Hier gibt es keine gemeinsamen Betriebspunkte zwischen den beiden Normen. Die Betriebspunkte gemäss alter Norm EN 255 liegen alle bei T_v = 50℃, die Betriebspunkte gemäss aktueller Norm E N 14511 aber bei T_v = 45℃ und bei T_v = 55℃.

Das Vorgehen für die Umrechnungen auf T_v = 50℃ ist in Abb. 3.3 dargestellt. Die Pfeile geb en an, welche zwei Betriebspunkte für eine Interpolation verwendet werden. Der gestrichelte Pfeil bezeichnet die Interpolationen für den Hilfs-Betriebspunkt A2/W55. Die gepunkteten Linien verbinden Punkte, für welche als Näherung angenommen wird, dass sie die gleiche Steigung

haben wie die ursprüngliche Gerade zwischen den Betriebspunkten A7/W55 und A20/W55. (Bem.: Der Betriebspunkt A-15/W45 ist in der Graphik nicht berücksichtigt, da er für die Berechnungen im Folgenden nicht benötigt wird.)

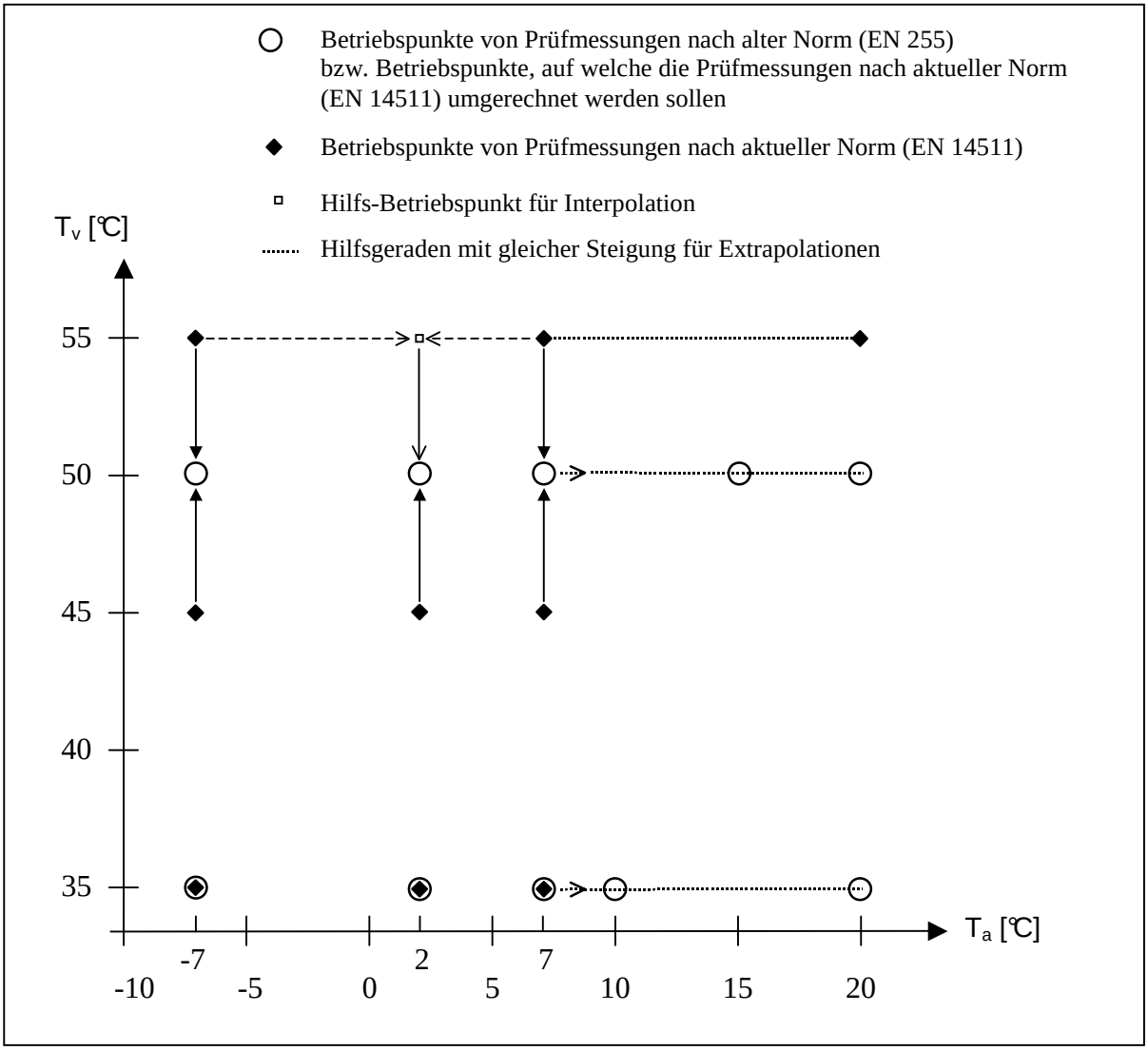


Abb. 3.3: Vorgehen für die Umrechnung der Betriebspunkte der Prüfmessungen nach aktueller Norm (EN 14511) auf die Betriebspunkte nach alter Norm (EN 255).

Der <u>Betriebspunkt A-7/W50</u> (alte Norm EN 255) lässt sich direkt berechnen aus den Betriebspunkten A-7/W45 und A-7/W55 (aktuelle Norm EN 14511):

$$COP_{-7/50} = COP_{-7/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{-7/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-16}$$

$$P_{el,-7/50} = P_{el,-7/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,-7/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-17}$$

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

Zur Berechnung des Betriebspunktes A2/W50 (alte Norm EN 255) wird ein zusätzlicher Hilfs-Betriebspunkt A2/W55 benötigt. Dieser wird berechnet aus den ausgemessenen Betriebspunkten A-7/W55 und A7/W55 (aktuelle Norm EN 14511):

$$COP_{2/55} = COP_{-7/55} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + COP_{7/55} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-18}$$

$$P_{el,2/55} = P_{el,-7/55} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + P_{el,7/55} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-19}$$

mit T_{a0} = 2℃, T_{a1} = -7℃, T_{a2} = 7℃

Mit diesem Hilfs-Betriebspunkt A2/W55 und dem ausgemessenen Betriebspunkt A2/W45 (aktuelle Norm EN 14511) lässt sich nun durch lineare Interpolation der gesuchte Betriebspunkt A2/W50 berechnen:

$$COP_{2/50} = COP_{2/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{2/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-20}$$

$$P_{el,2/50} = P_{el,2/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,2/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-21}$$

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

Der Betriebspunkt A7/W50 (alte Norm EN 255) lässt sich direkt berechnen aus den Betriebspunkten A7/W45 und A7/W55:

$$COP_{7/50} = COP_{7/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{7/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-22}$$

$$P_{el,7/50} = P_{el,7/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,7/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 3-23}$$

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

Die beiden Betriebspunkte A15/W50 und A20/W50 lassen sich durch Extrapolation aus dem Betriebspunkt A7/W50 berechnen unter der Annahme, dass die Steigung zwischen A7/W50 und A20/W50 gleich ist wie die (bekannte) Steigung zwischen zwischen A7/W55 und A20/W55 (Gl. 3-10 und Gl. 3-11):

$$COP_{15/50} = COP_{7/50} + s_{COP} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = COP_{7/50} + (COP_{20/55} - COP_{7/55}) \cdot 8/13 \qquad \text{Gl. 3-24}$$

$$P_{el,15/50} = P_{el,7/50} + s_{P_{el}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = P_{el,7/50} + (P_{el,20/55} - P_{el,7/55}) \cdot 8/13 \qquad \text{Gl. 3-25}$$

mit T_{a0} = 15℃, T_{a1} = 7℃

$$COP_{20/50} = COP_{7/50} + s_{COP} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = COP_{7/50} + (COP_{20/55} - COP_{7/55}) \qquad \text{Gl. 3-26}$$

$$P_{el,20/50} = P_{el,7/50} + s_{P_{el}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) = P_{el,7/50} + (P_{el,20/55} - P_{el,7/55})$$ Gl. 3-27

mit T_{a0} = 20℃, T_{a1} = 7℃

In Abb. 3.4 ist als Beispiel eine WPZ-Prüfmessung des *COP* nach aktueller Norm EN 14511 dargestellt sowie die Umrechnung auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255.

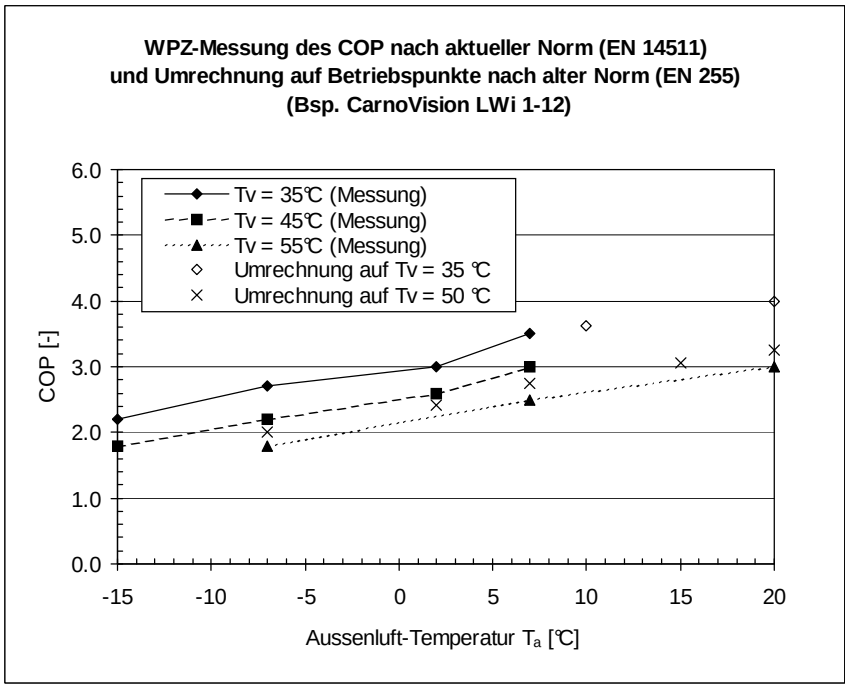


Abb. 3.4: Beispiel für die WPZ-Prüfmessung des COP für Luft/Wasser-WP nach aktueller Norm EN 14511 und die Umrechnung auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255.

3.3 Diskussion der Berechnung der Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35

Die im Kapitel 3.2 beschriebene Berechnung der in Zukunft nicht mehr ausgemessenen Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 (Gl. 3-12 und Gl. 3-14) erfolgte unter der folgenden Annahme: Der *COP* bzw. P_{el} (in Funktion der Aussenluft-Temperatur T_a) zwischen T_a = 7℃ und T_a = 20℃ hat für T_v = 35℃ die gleiche Steigung wie für T_v = 50℃. Im folgenden soll gezeigt werden, dass die s eine konservative Annahme ist, d.h. dass der *COP* dadurch tiefer berechnet wird als er in Realität ist, sowie dass eine Extrapolation über den Gütegrad η_c eher nicht praktikabel ist.

Es wird im folgenden von zwei einstufigen und einer zweistufigen Luft/Wasser-Wärmepumpe der Verlauf des *COP* sowie des Gütegrades η_c dargestellt. In Abb. 3.5 und Abb. 3.7 sind von zwei Wärmepumpen einerseits die WPZ-Messungen des *COP* nach neuer Norm EN 14511 und altem EHPA-DACH-Prüfungsreglement gezeigt (inklusive der nach altem Prüfungsreglement noch ausgemessenen Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35) und anderseits diese beiden Betriebspunkte berechnet nach der Extrapolationsmethode (Gl. 3-12 und Gl. 3-14) sowie in Abb. 3.6 und Abb. 3.8 der sich aus den Messungen ergebende Gütegrad η_c (Gl. 2-8). Es ist ersichtlich, dass die *COP*-Werte, die mittels der Extrapolationsmethode berechnet wurden, kleiner sind als die *COP*-Messwerte. Somit ist die Extrapolationsmethode konservativ und ihr Einsatz daher gerechtfertigt. Zudem ist ersichtlich, dass der Gütegrad bei T_a = 7℃ tendenziell ein schwaches lokales Maximum

hat und danach für steigende T_a sinkt. Die beiden Abbildungen zeigen, dass der Gütegrad eher nicht geeignet ist, um die Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 zu berechnen.

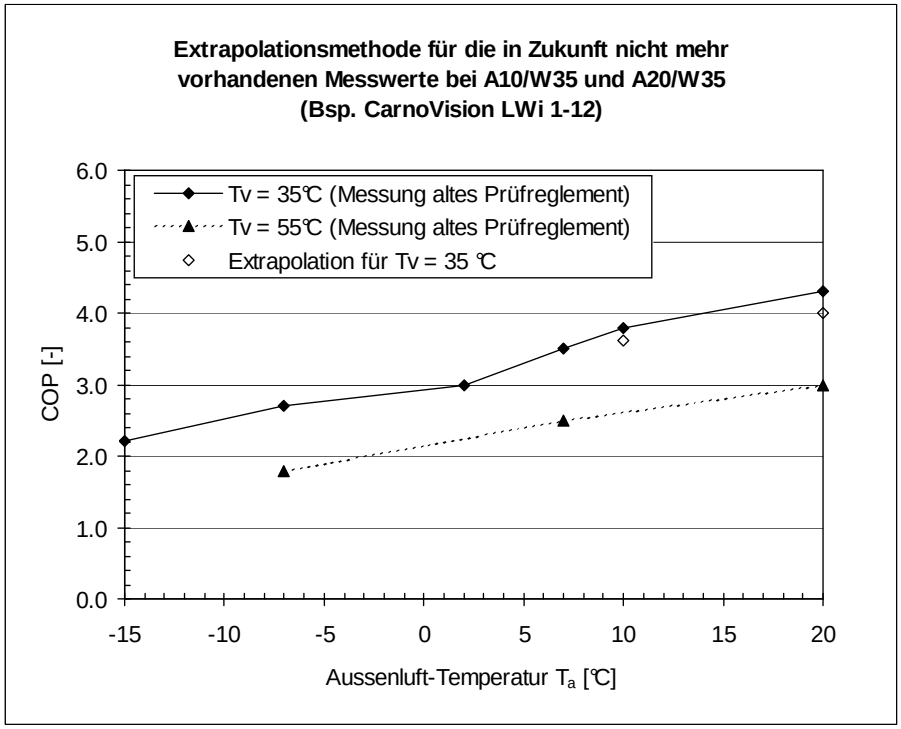


Abb. 3.5: Vergleich der WPZ-Messwerte des COP mit den mittels der beschriebenen Extrapolationsmethode berechneten COP's der Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 (am Beispiel der Luft/Wasser-Wärmepumpe CarnoVision LWi 1-12).

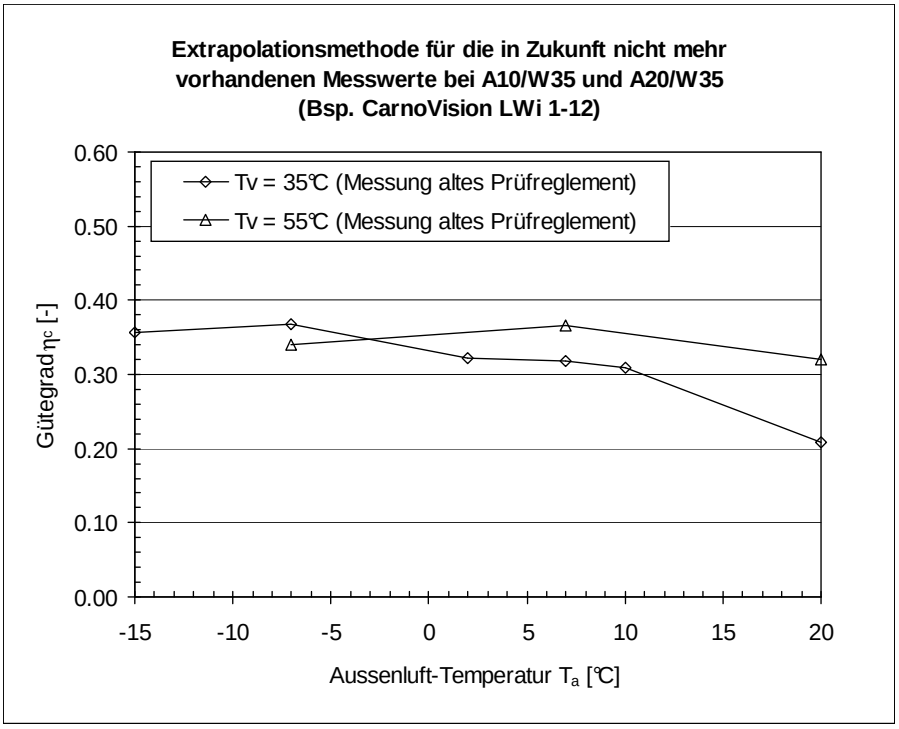


Abb. 3.6: Verlauf des Gütegrades η_c berechnet aus den COP-Messwerten des WPZ (am Beispiel der Luft/Wasser-Wärmepumpe CarnoVision LWi 1-12).

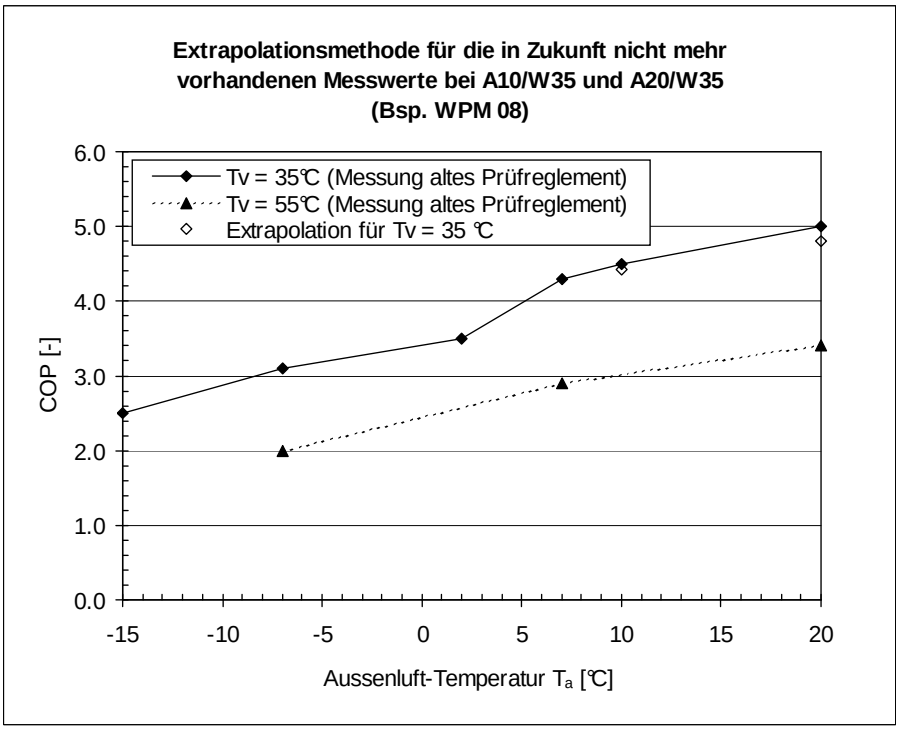


Abb. 3.7: Vergleich der WPZ-Messwerte des COP mit den mittels der beschriebenen Extrapolationsmethode berechneten COP's der Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 (am Beispiel der Luft/Wasser-Wärmepumpe WPM 08).

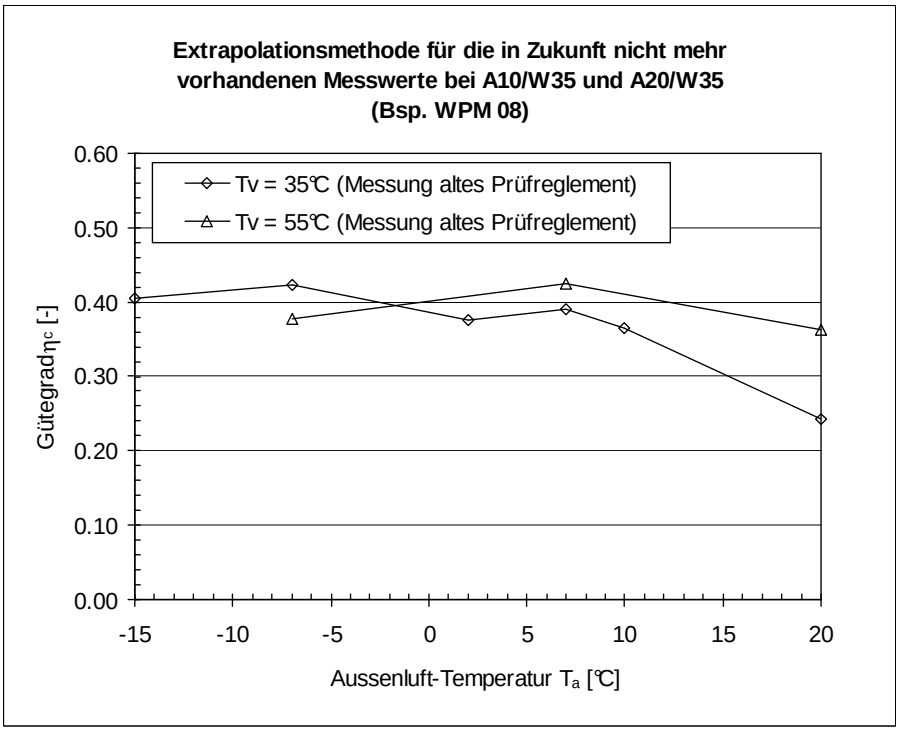


Abb. 3.8: Verlauf des Gütegrades η_c berechnet aus den COP-Messwerten des WPZ (am Beispiel der Luft/Wasser-Wärmepumpe WPM 08).

In den Abb. 3.9 und Abb. 3.10 ist der *COP* und der Gütegrad η_c dargestellt für eine zweistufige Wärmepumpe. Der Gütegrad sinkt auch hier für Aussenluft-Temperaturen T_a > 7℃. Weil das Expansionsventil nicht elektronisch geregelt ist, nimmt der Gütegrad η_c im allgemeinen für zunehmende Aussenluft-Temperaturen T_a > 7℃ ab.

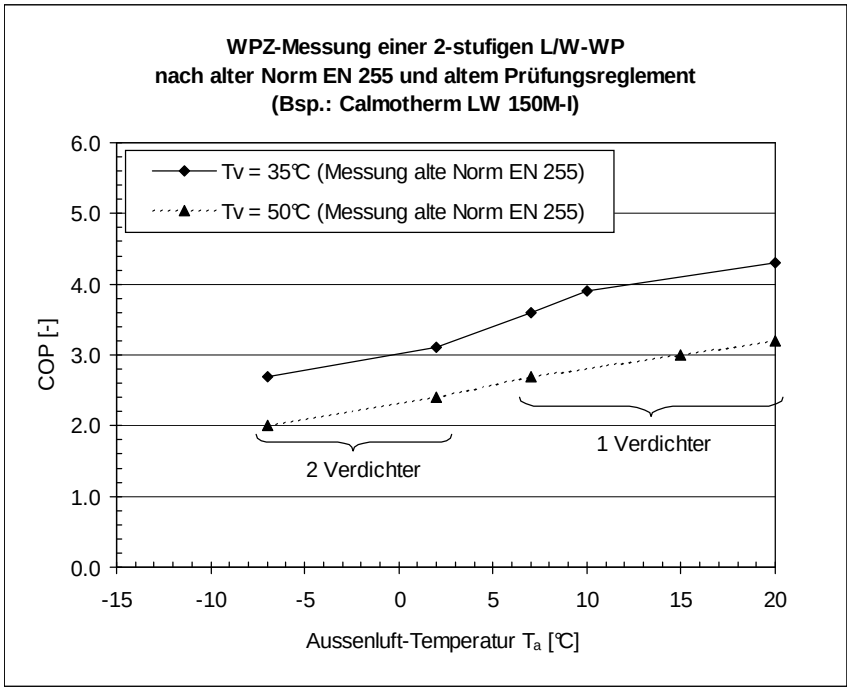


Abb. 3.9: Vergleich der WPZ-Messwerte des COP mit den mittels der beschriebenen Extrapolationsmethode berechneten COP's der Betriebspunkte A10/W35 und A20/W35 (am Beispiel der 2-stufigen Luft/Wasser-Wärmepumpe Calmotherm LW 150M-I).

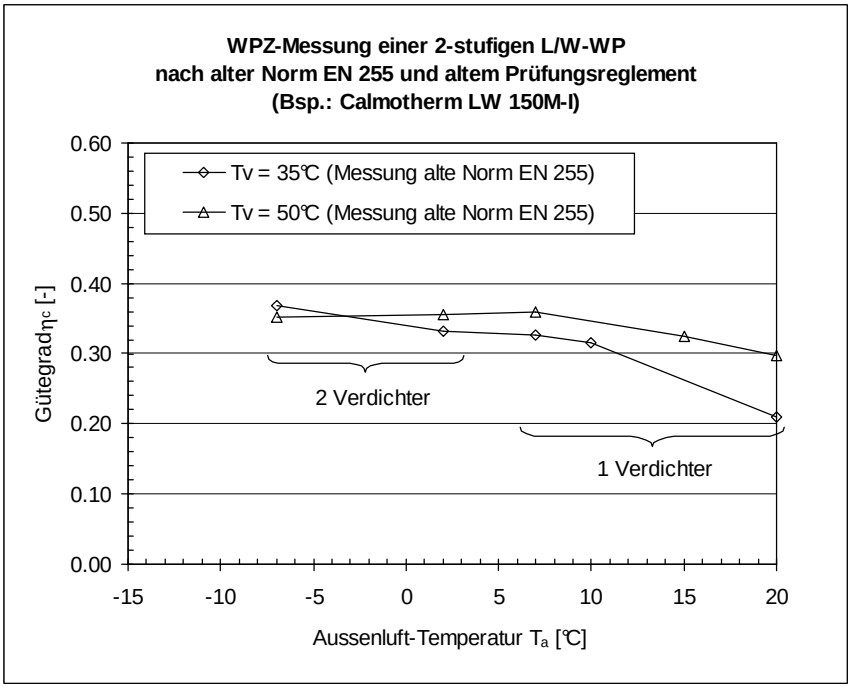


Abb. 3.10: Verlauf des Gütegrades η_c berechnet aus den COP-Messwerten des WPZ (am Beispiel der 2-stufigen Luft/Wasser-Wärmepumpe Calmotherm LW 150M-I).

4 Luft/Wasser-WP: Berechnung von weiteren Stützwerten von *COP* und P_{el}

Die Berechnung von weiteren Stützwerten hat zwei Ziele:

- Der vom WPZ abgedeckte Messbereich der Aussenluft-Temperatur T_a von -7℃ bis 20℃ soll erweitert werden auf -14℃ bis 60℃, vgl. 4.2. (Durch weitere Näherungen in Kap. 5.1.3 können dann die Wärmepumpenkennwerte auch ausserhalb dieses Bereichs für kleinere Aussenluft-Temperaturen ausgewertet werden. Zudem wird angenommen, dass keine Aussenluft-Temperaturen grösser als 60℃ vorkommen.)
- Die in Kap. 6 beschriebene Interpolationsmethode benötigt für beide WP-Austrittstemperaturen T_{v1} und T_{v2} identische Stützstellen in T_a. Da dies bei den WPZ-Messungen nicht durchgehend der Fall ist, müssen die fehlenden Stützstellen ergänzt werden (Kap. 4.1).

4.1 Stützwerte innerhalb des WPZ-Messbereichs

Die Stützstellen der WPZ-Messungen unterscheiden sich für die beiden WP-Austrittstemperaturen T_{v1} und T_{v2} an den Stellen T_a = 10℃ und T_a = 15℃ (vgl. Tabelle 1 und die Beispiele in Abb. 3 .1 und Abb. 3.2). Um mit identischen Stützstellen arbeiten zu können, werden die beiden Messkurven je mit einem durch lineare Interpolation erzeugten Zwischen-Stützwert ergänzt:

- WP-Austrittstemperatur T_{v0} = 35℃: Die Messungen werden mittels linearer Inte rpolation ergänzt mit einem *COP*-Wert und einem Wert für die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} an der Stelle T_{a0} = 15℃. Die beiden massgebenden benachbarten Stütz stellen sind somit T_{a1} = 10℃ und T_{a2} = 20℃. Aus Gl. 9-113 bzw. Gl. 9-107 folgt mit $T_{v0} = T_{v1}$ der neue Stützwert für den *COP* bzw. für P_{el} an der Stützstelle T_{a0} = 15℃, T_{v0} = 35℃:

$$COP_{15/35} = COP_{10/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + COP_{20/35} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-28}$$

$$P_{el,15/35} = P_{el,10/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + P_{el,20/35} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-29}$$

Die Abkürzungsdefinitionen entsprechen Gl. 9-108 bis Gl. 9-112 bzw. Gl. 9-102 bis Gl. 9-106:

$$COP_{aivj} := COP(T_{ai}, T_{vj}) \qquad \text{Gl. 4-30}$$

$$P_{el,aivj} := P_{el}(T_{ai}, T_{vj}) \qquad \text{Gl. 4-31}$$

- WP-Austrittstemperatur T_{v0} = 50℃: Die Messungen werden mittels linearer Inte rpolation ergänzt mit einem *COP*-Wert und einem Wert für die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} an der Stelle T_{a0} = 10℃. Die beiden massgebenden benachbarten Stütz stellen sind somit T_{a1} = 7℃ und T_{a2} = 15℃. Aus Gl. 9-113 bzw. Gl. 9-107 folgt mit $T_{v0} = T_{v1}$ der neue Stützwert für den *COP* bzw. für P_{el} an der Stützstelle T_{a0} = 10℃, T_{v0} = 50℃:

$$COP_{10/50} = COP_{7/50} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + COP_{15/50} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-32}$$

$$P_{el,10/50} = P_{el,7/50} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + P_{el,15/50} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-33}$$

4.2 Stützwerte ausserhalb des WPZ-Messbereichs

Die WPZ-Messungen decken einen Bereich der Aussenluft-Temperaturen T_a von –7℃ bis 20℃ ab. Im Folgenden wird dieser Bereich beidseitig erweitert durch Einführung zweier Stützstellen bei T_a = -14℃ und T_a = 60℃.

4.2.1 *Zusätzliche Stützstelle bei der Aussenluft-Temperatur T_a = -14℃*

Unterhalb des letzten Messwertes bei T_a = -7℃ wird bei T_a = -14℃ eine zusätzliche Stützstelle eingefügt. Mit Hilfe einer linearen Extrapolation wird daraus ein weiterer Stützwert (für den *COP* und P_{el}) berechnet. (Unterhalb von T_a = -14℃ wird danach ein konstanter Wert für η_c, COP und P_{el} angenommen, vgl. Kap. 5.1.3).

Im Sinne einer konservativen Abschätzung böte es sich an, das Abfallen des *COP* mit sinkender Aussenluft-Temperatur T_a aus einer linearen Extrapolation der letzten beiden Messwerte bei T_{a1} = -7℃ und T_{a2} = 2℃ zu berechnen.

Dazu ist jedoch anzumerken, dass beim Messpunkt T_a = 2℃ mit einer sehr hohen relativen Luftfeuchte von 93% gefahren wird, bei der häufig Vereisung auftritt, was den *COP* senkt. Dadurch würde die Extrapolationsgerade flacher, was für T_a < -7℃ zu eher zu hohen *COP*'s führen würde.

Daher werden im Sinne einer (noch) konservativeren Abschätzung für die lineare Extrapolation die Messwerte bei T_{a1} = -7℃ und T_{a2} = 7℃ verwendet. Somit ergeben sich mit Gl. 9-113 die beiden zusätzlichen *COP*-Stützwerte bei der Aussenluft-Temperatur T_{a0} = -14℃ und den beiden WP-Austritts-Temperaturen T_{v1} = 35℃ und T_{v2} = 50℃ (mit den Definitionen aus Gl. 4-30 und Gl. 4-31):

$$COP_{-14/35} = COP_{-7/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + COP_{+7/35} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-34}$$

$$COP_{-14/50} = COP_{-7/50} \cdot \left(1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) + COP_{+7/50} \cdot \left(\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}}\right) \qquad \text{Gl. 4-35}$$

Diese Interpolationsformel kann auch bei 2-stufigem Betrieb angewendet werden, da sich der *COP* als Funktion der Aussenluft-Temperatur T_a kaum ändert, wie die WPZ-Messungen zeigen.

Für die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} muss hingegen der 2-stufige Betrieb beachtet werden, weil P_{el} am Umschaltpunkt einen Sprung aufweist. Es kann bei einer 2-stufigen Wärmepumpe sicher davon ausgegangen werden, dass sie bei T_a = -7℃ im 2-stufigen Betrieb läuft. Da der Verlauf von P_{el} innerhalb des 2-stufigen Betriebes als Funktion von T_a relativ konstant verläuft (gleich wie im 1-stufigen Betrieb, vgl. Abb. 3.2), wird angenommen, dass P_{el} bei T_a = -14℃ angenähert werden kann durch den letzten Messwert von P_{el} bei T_a = -7℃:

$$P_{el,-14/35} = P_{el,-7/35} \qquad \text{Gl. 4-36}$$

$$P_{el,-14/50} = P_{el,-7/50} \qquad \text{Gl. 4-37}$$

4.2.2 *Zusätzliche Stützstelle bei der Aussenluft-Temperatur T_a = 60℃*

Oberhalb des letzten Messwertes bei T_a = 20℃ wird bei T_a = 60℃ eine zusätzliche Stützstelle eingefügt. Es wird angenommen, dass keine Aussenluft-Temperaturen grösser als 60℃ vorkommen.

Zur Berechnung des *COP*-Stützstellenwertes wird konservativ angenommen, dass der *COP* bis zu T_a = 60℃ auf den bei T_a = 20℃ gemessenen Werten $COP_{20/35}$ bzw. $COP_{20/50}$ konstant bleibt.

Für die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} kann mit Hilfe der Überlegungen aus Kap. 4.2.1 ebenfalls angenommen werden, dass P_{el} durch die Werte bei T_a = 20℃ angenähert werden kann.

$$COP_{60/35} = COP_{20/35} \quad \text{Gl. 4-38}$$

$$COP_{60/50} = COP_{20/50} \quad \text{Gl. 4-39}$$

$$P_{el,60/35} = P_{el,20/35} \quad \text{Gl. 4-40}$$

$$P_{el,60/50} = P_{el,20/50} \quad \text{Gl. 4-41}$$

4.3 Beispiel für die Berechnung von weiteren Stützwerten

In Abb. 4.1 ist für das Beispiel aus Abb. 3.1 die Berechnung von weiteren Stützwerten innerhalb und ausserhalb des WPZ-Messbereichs gezeigt. Innerhalb des WPZ-Messbereichs wurden die *COP*-Stützwerte an den Stützstellen T_a = 10℃ und T_a = 15℃ ergänzt (Kap. 4.1). Ausserhalb des WPZ-Messbereichs wurden zusätzliche *COP*-Stützwerte berechnet gemäss den konservativen Methoden in Kap. 4.2.

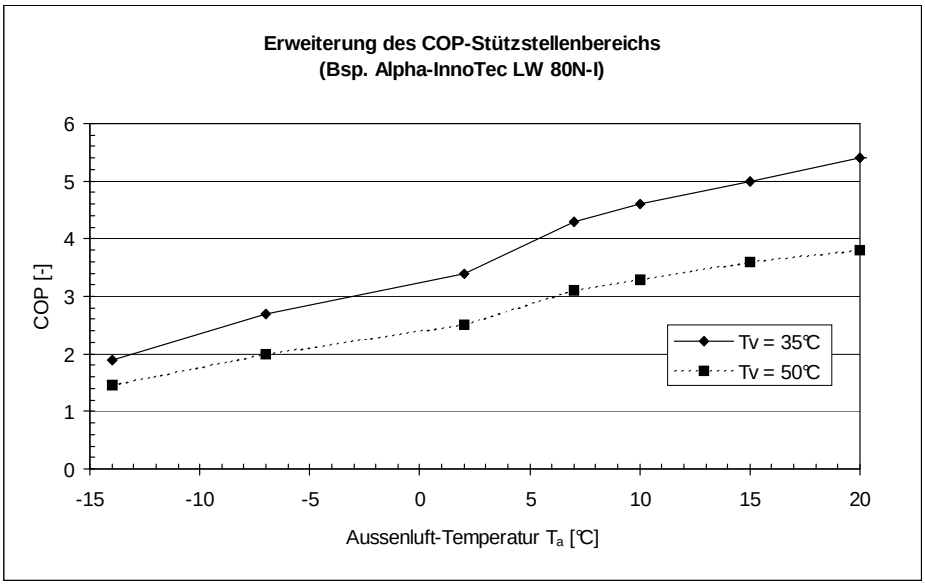


Abb. 4.1: Beispiel für die Berechnung von weiteren Stützwerten in Ergänzung zum WPZ-Messbereich mittels den konservativen Abschätzungsmethoden aus Kap. 4.2. (Luft/Wasser-Wärmepumpe mit WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃.)

5 Luft/Wasser-WP: Berechnung von *COP* und P_{el} bei beliebigen Temperaturen

5.1.1 *Allgemeines Vorgehen*

Das Ziel ist es, den *COP* und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe in einem beliebigen Betriebszustand der Aussenluft-Temperatur T_a und der WP-Austritts-Temperatur T_v aus Stützwerten zu berechnen.

Dazu werden die *COP*-Messwerte umgerechnet in Gütegrade η_c, diese linear interpoliert in T_a und T_v und die Ergebnisse dann zurückgerechnet auf *COP*-Werte. Diese Methode führt im allgemeinen zu genaueren *COP*-Werten als die direkte lineare Interpolation der *COP*-Messwerte in T_a und T_v.

Die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe wird aus den Messwerten direkt linear interpoliert als Funktion von Aussenluft-Temperatur T_a und WP-Austritts-Temperatur T_v.

Bem. zu P_{el}: Anstelle von P_{el} könnte an sich auch die abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ interpoliert werden. Da sich die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} in Abhängigkeit der Aussenluft-Temperatur T_a weniger stark ändert als die abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$, wurde P_{el} zur Interpolation gewählt.

Aus den berechneten *COP*- und P_{el}-Werten kann mit Gl. 2-6 die abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ berechnet werden.

Durch die Erzeugung von weiteren Stützstellen (vgl. Kap. 4.2) wurde der WPZ-Messbereich erweitert. Der gesamte Aussenluft-Temperatur-Bereich, der durch lineare Interpolation abgedeckt werden kann, erstreckt sich nun von T_a = -14°C bis 60°C. In den folgenden Kapiteln werden Fallunterscheidungen gemacht, ob die Aussenluft-Temperatur T_a innerhalb oder unterhalb dieses Stützstellenbereichs liegt. Es wird angenommen, dass die Aussenluft-Temperatur T_a nicht grösser als 60°C ist. (Die verwendeten Meteodaten müssten wohl vorgängig daraufhin überprüft werden.) Falls dies nicht der Fall wäre, könnte die Stützstellen-Temperatur noch grösser gewählt werden oder höhere Temperaturen könnten softwaremässig abgefangen werden.

Für die WP-Austrittstemperaturen T_v werden keine entsprechenden Fallunterscheidungen eingeführt. Hier wird für alle WP-Austritts-Temperaturen T_v angenommen, dass die gesuchten Grössen (η_c und P_{el}) linear in T_v interpoliert bzw. linear in T_v extrapoliert werden können aus den Messwerten der Grössen bei den WP-Austrittstemperaturen T_v = 35°C und T_v = 50°C.

5.1.2 *Aussenluft-Temperatur liegt im Stützstellenbereich* -14°C $\leq T_a \leq$ 60°C

Das in Kap. 5.1.1 beschriebene Vorgehen lässt sich in diesem Bereich direkt einsetzen.

- Es werden die beiden Stützstellen-Temperaturen T_{a1} und T_{a2} bestimmt, innerhalb derer die auszuwertende Temperatur T_{a0} am nächsten liegt ($T_{a1} \leq T_{a0} \leq T_{a2}$, vgl. Abb. 9.1). Für T_{v0} erübrigt sich dies, da nur die beiden Stützstellen-Temperaturen T_{v1} und T_{v2} vorhanden sind.

- Die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el}(T_{a0},T_{v0})$ wird berechnet mit Gl. 9-107 (mit den Abkürzungsdefinitionen aus Gl. 9-102 bis Gl. 9-106):

$$
\begin{aligned}
P_{el,a0v0} \quad = \quad & P_{el,a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} + \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,a2v2} \cdot \left[\frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right]
\end{aligned}
$$

- Die den Stützstellen-Temperaturen entsprechenden 4 *COP*-Messwerte $COP(T_{ai},T_{vi})$ werden mit Gl. 9-119 bis Gl. 9-122 umgerechnet in 4 Gütegrade $\eta_c(T_{ai},T_{vi})$:

$$
\begin{aligned}
\eta_{a1v1} &= COP_{a1v1} \frac{T_{v1}-T_{a1}}{T_{v1}} \\
\eta_{a2v1} &= COP_{a2v1} \frac{T_{v1}-T_{a2}}{T_{v1}} \\
\eta_{a1v2} &= COP_{a1v2} \frac{T_{v2}-T_{a1}}{T_{v2}} \\
\eta_{a2v2} &= COP_{a2v2} \frac{T_{v2}-T_{a2}}{T_{v2}}
\end{aligned}
$$

Die Abkürzungsdefinitionen sind gegeben in Gl. 9-108 bis Gl. 9-112 und Gl. 9-114 bis Gl. 9-118.

- Aus den 4 Gütegraden wird mit linearer Interpolation der Gütegrad $\eta_c(T_{a0},T_{v0})$ mit Gl. 9-123 berechnet.

$$
\begin{aligned}
\eta_{a0v0} \quad = \quad & \eta_{a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} + \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + \eta_{a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + \eta_{a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + \eta_{a2v2} \cdot \left[\frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right]
\end{aligned}
$$

- Der gesuchte $COP_{\eta}(T_{a0},T_{v0})$ wird berechnet mit Gl. 9-125.

$$COP_{\eta,a0v0} = \eta_{a0v0} \cdot \frac{T_{v0}}{T_{v0} - T_{a0}}$$

mit COP_{max} = 10

Bemerkungen:

- Es ist zu gewährleisten, dass im Programmablauf immer $T_{v0} > T_{a0}$ ist.
- Im Fall kleiner Differenzen T_{v0} - T_{a0} kann der *COP* unrealistisch hohe Werte annehmen. Daher wird eine obere Schranke für den *COP* definiert: COP_{max} = 10.

5.1.3 *Aussenluft-Temperatur T_a < -14℃*

Unterhalb einer Aussenluft-Temperatur von T_{a0} = -14℃ wird als Näherung angenommen, dass der Gütegrad η_c und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} nicht mehr von T_a abhängen, sondern konstant bleiben auf ihrem Wert an der Stelle T_{a0} = -14℃, d.h.

$$\eta_c(T_a,T_v) = \eta_c(T_{a0} = -14°C, T_v) \quad \text{für } T_a < -14℃ \qquad \text{Gl. 5-42}$$

$$P_{el}(T_a,T_v) = P_{el}(T_{a0} = -14°C, T_v) \quad \text{für } T_a < -14℃ \qquad \text{Gl. 5-43}$$

Der Übersichtlichkeit wegen werden die folgenden Abkürzungen definiert:

$$\eta_{c,-14}(T_v) := \eta_c(T_{a0} = -14°C, T_v) \qquad \text{Gl. 5-44}$$

$$P_{el,-14}(T_v) := P_{el}(T_{a0} = -14°C, T_v) \qquad \text{Gl. 5-45}$$

Der Gütegrad $\eta_{c,-14}(T_v)$ lässt sich aus Gl. 9-123 berechnen. Mit $T_{a0} = T_{a1}$ = -14℃, T_{a2} = -7℃ (T_{v1} = 35℃, T_{v2} = 50℃) ergibt sich:

$$\eta_{c,-14}(T_v) = \eta_{a1v1} \cdot \left(1 - \frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + \eta_{a1v2} \cdot \left(\frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \quad \text{für } T_a < -14℃ \qquad \text{Gl. 5-46}$$

Daraus lässt sich der *COP* mit Hilfe von Gl. 2-8 berechnen. Es wird als Näherung angenommen, dass der *COP* nicht mehr von T_a abhängen soll, sondern konstant bleiben auf dem Wert, der sich aus Gl. 2-8 an der Stelle $T_a = T_{a0}$ = -14℃ ergibt:

$$COP(T_a,T_v) = \eta_{c,-14} \cdot \frac{T_v}{T_v - T_{a0}} \quad \text{für } T_a < -14℃ \qquad \text{Gl. 5-47}$$

Bemerkung:

- Es ist zu gewährleisten, dass im Programmablauf immer $T_v > T_{a0}$ ist.
- Da der *COP* auch hier über den Gütegrad berechnet wird, ist sichergestellt, dass der *COP* beim Übergangspunkt T_a = -14℃ stetig verläuft.

Die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el,-14}(T_v)$ lässt sich aus Gl. 9-107 berechnen. Mit $T_{a0} = T_{a1}$ = -14℃, T_{a2} = -7℃ (T_{v1} = 35℃, T_{v2} = 50℃) ergibt sich:

$$P_{el,-14}(T_v) = P_{el,a1v1} \cdot \left(1 - \frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,a1v2} \cdot \left(\frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 5-48}$$

6 Sole/Wasser und Wasser/Wasser-WP: Prüfmessungen des WPZ

6.1 Definition der relevanten Temperaturen

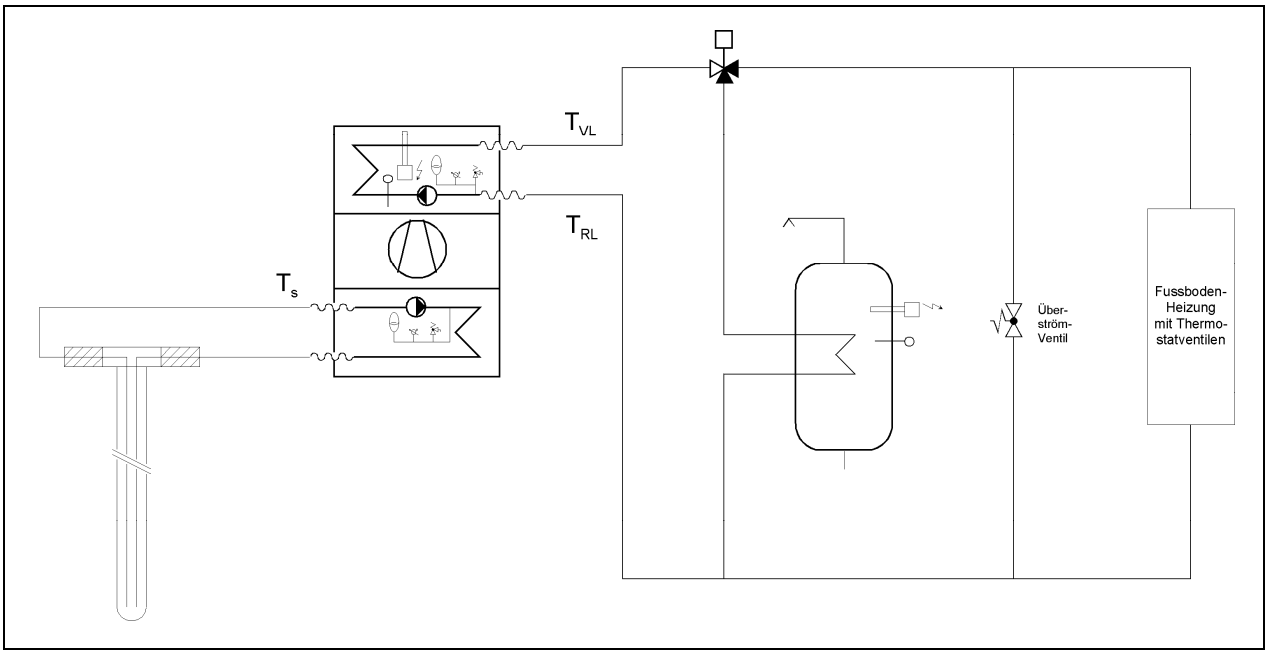


Abb. 6.1: Definition der relevanten Temperaturen für Sole/Wasser-WP anhand eines typischen Heizungsschemas.

Die relevanten Temperaturen für den Fall der Sole/Wasser-Wärmepumpen sind in Abb. 6.1 anhand eines typischen Heizungsschemas dargestellt. Wie im Fall der Luft/Wasser-Wärmepumpe (Abb. 2.1) wird die Eintrittstemperatur des Heizkreisfluids in die Wärmepumpe mit T_{RL} bezeichnet, die Wärmepumpen-Austrittstemperatur des Heizkreisfluids mit T_{VL}. Erdsondenseitig wird die Wärmepumpen-Eintrittstemperatur der Sole (bzw. des Wassers bei Wasser/Wasser-WP) in die Wärmepumpe mit T_s bezeichnet.

6.2 Prüfmessungen nach alter und nach aktueller Norm

Als Grundlage für die WP-Datenbank in Polysun dienen die standardisierten Messungen des WPZ (Wärmepumpen-Testzentrum) an Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen. Die Mehrzahl der momentan beim WPZ aufgeführten Prüfresultate wurden noch nach der alten Norm EN 255 ermittelt. Neu auf den Markt kommende Geräte werden vom WPZ nach der aktuellen Norm EN 14511 getestet.

Wie bereits in Kap. 3.1 erwähnt legen die Normen den experimentellen Aufbau und die Messbedingungen fest, während das Prüfungsreglement von EHPA und D-A-CH Betriebspunkte der Prüfmessungen definiert. Auch hier wurde kürzlich ein neues Prüfungsreglement verabschiedet, in welchem einige Betriebspunkte weggefallen sind: „EHPA-DACH Prüfreglement. Prüfung von Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen", Version 1.2, Ausgabe 20.8.2008“ (www.wpz.ch → Wärmepumpen-Prüfungen → Prüfreglemente.) Gegenüber dem vorhergehenden Reglement werden folgende Betriebspunkte neu nicht mehr ausgemessen:

B-5/W35 (Sole/Wasser)

W15/W35 (Wasser/Wasser).

Die im WPZ-Prüfbericht aufgeführten Wärmepumpen sind als Sole/Wasser-Wärmepumpen getestet, davon einige zusätzlich als Wasser/Wasser-Wärmepumpe. Es gibt keine Wärmepumpen, die nur als Wasser/Wasser-Wärmepumpe, aber nicht als Sole/Wasser-Wärmepumpen getestet wurden.

Für Sole/Wasser-Wärmepumpen sind die Betriebspunkte der Prüfmessungen gemäss alter Norm EN 255 in Tabelle 3 zusammengestellt, diejenigen gemäss aktueller Norm EN 14511 und neuem EHPA-DACH Prüfungsreglement in Tabelle 4.

Für Wasser/Wasser-Wärmepumpen sind die Betriebspunkte der Prüfmessungen gemäss alter Norm EN 255 in Tabelle 5 zusammengestellt, diejenigen gemäss aktueller Norm EN 14511 und neuem EHPA-DACH Prüfungsreglement in Tabelle 6.

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	B-5/W35	B0/W35	B5/W35	B-5/W50	B0/W50	B5/W50
Sole-Temp. T_s [℃]	-5	0	5	-5	0	5
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	35	50	50	50

Tabelle 3: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Sole/Wasser-Wärmepumpen gemäss alter Norm EN 255 (und altem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	B0/W35	B5/W35	B-5/W45	B0/W45	B5/W45	B0/W55	B5/W55
Sole-Temp. T_s [℃]	0	5	-5	0	5	0	5
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	45	45	45	55	55

Tabelle 4: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Sole/Wasser-Wärmepumpen gemäss aktueller Norm EN 14511 (und neuem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	W10/W35	W15/W35	W10/W50	W15/W50
Wasser-Temp. T_s [℃]	10	15	10	15
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	35	50	50

Tabelle 5: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Wasser/Wasser-Wärmepumpen gemäss alter Norm EN 255 (und altem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

Bezeichnung der Messung / Randbedingungen	W10/W35	W10/W45	W15/W45	W10/W55	W15/W55
Wasser-Temp. T_s [℃]	10	10	15	10	15
WP-Austrittstemp. T_v [℃]	35	45	45	55	55

Tabelle 6: Betriebspunkte der Prüfmessungen an Wasser/Wasser-Wärmepumpen gemäss aktueller Norm EN 14511 (und neuem EHPA-DACH-Prüfungsreglement).

An den angegebenen Betriebspunkten werden die folgenden Messwerte erfasst: *COP* (coefficient of performance), abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_H$ und elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Diese Messungen werden durchgeführt bei einem konstanten Sole-Volumenstrom und einer konstanten Temperaturdifferenz ΔT_{Nutzer} zwischen der Wärmepumpen-Ein- und Austrittstemperatur des Heizkreisfluids (vgl. Gl. 2-9). (Hier ist auch der Hauptunterschied der Prüfmessungen nach alter und neuer Norm zu finden: Nach alter Norm EN 255 wird mit ΔT_{Nutzer} = 10℃ gemessen, nach neuer Norm EN 14511 mit ΔT_{Nutzer} = 5℃.)

Im Falle von 2-stufigen Wärmepumpen wird die Umschaltung zwischen den Stufen in den WPZ-Messungen erfasst. Die Umschaltung ist aus der WPZ-Messungen ersichtlich am Sprung der abgegebenen Heizleistung $\dot{Q}_H$ und der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe. Hingegen wird der *COP* kaum beeinflusst.

In Abb. 6.2 ist als Beispiel eine typische *COP*-Messung gemäss altern Norm EN 255 dargestellt und in Abb. 6.3 eine Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} (beide für eine 1-stufige Wärmepumpe). Die Wärmepumpe dieses Beispiels wurde sowohl als Sole/Wasser-WP als auch als Wasser/Wasser-WP ausgemessen.

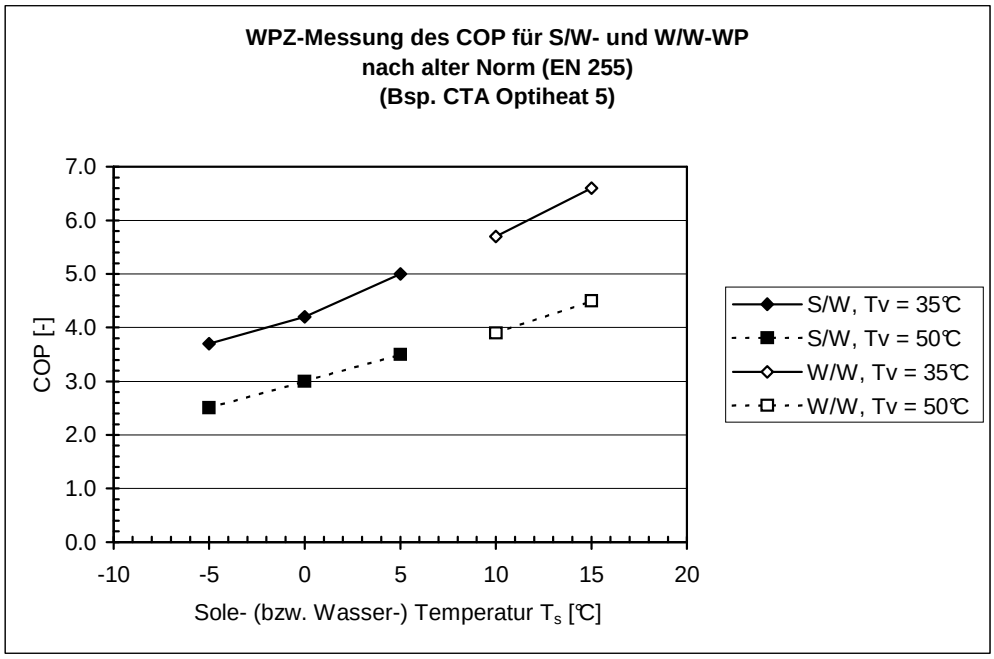


Abb. 6.2: Beispiel einer WPZ-Messung des COP an einer Wärmepumpe, die im Sole/Wasser-Betrieb (S/W) und im Wasser/Wasser-Betrieb (W/W) gemäss alter Norm EN 255 ausgemessen wurde (heizkreisseitige WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃).

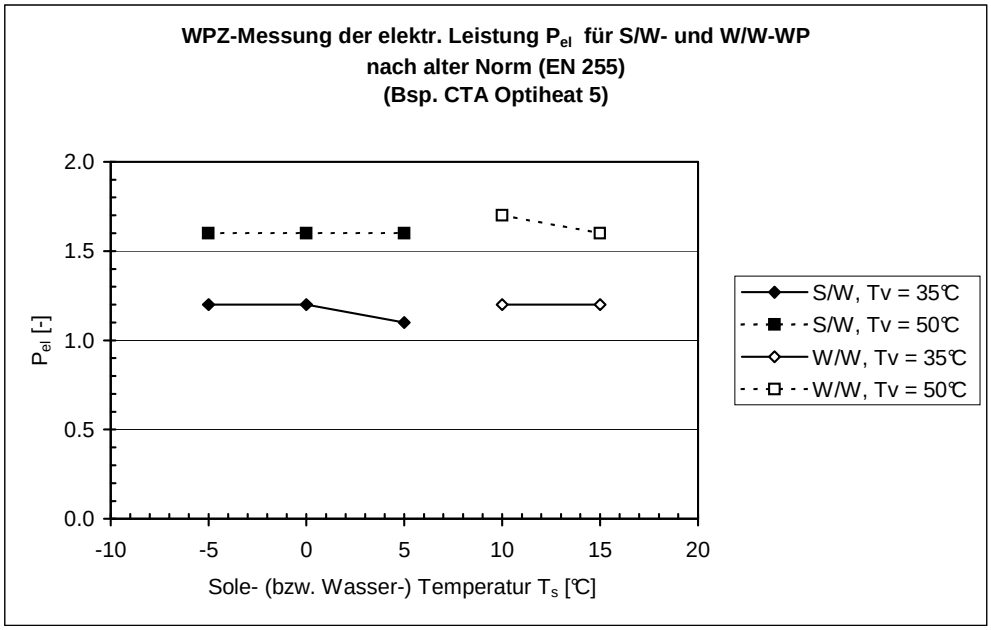


Abb. 6.3: Beispiel einer WPZ-Messung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} an einer Wärmepumpe die im Sole/Wasser-Betrieb (S/W) und im Wasser/Wasser-Betrieb (W/W) gemäss alter Norm EN 255 ausgemessen wurde (heizkreisseitige WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃).

6.3 Umrechnung der Prüfmessungen von aktueller Norm auf alte Norm

Die WP-Datenbank in Polysun soll auf identischen Stützstellen (Betriebspunkten) für alle Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen basieren. Es wurde entschieden, dazu die Betriebspunkte der Prüfmessungen nach alter Norm EN 255 und altem EHPA-DACH-Prüfungsreglement (Tabelle 3) zu verwenden und die Prüfmessungen nach aktueller Norm EN 14511 auf die Betriebspunkte nach alter Norm umzurechnen.

In Kap. 7 wird dieses Set von Betriebspunkten ergänzt mit weiteren Betriebspunkten (Stützstellen) und den zugehörigen Stützwerten, um einen grösseren Sole-Temperatur-Bereich abzudecken. Diese aufbereiteten Daten bilden die eigentliche WP-Datenbank von Polysun.

In Kap. 8 kann auf der Grundlage dieses regelmässigen Rasters von Betriebszuständen in der so generierten WP-Datenbank der *COP* und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe an beliebigen Betriebspunkten mittels Interpolation berechnet werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Prüfmessungen nach aktueller Norm EN 14511 (Tabelle 4 bzw. Tabelle 6) umgerechnet werden auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255 (Tabelle 3 bzw. Tabelle 5). Grundsätzlich geschieht die Umrechnung mittels linearer Interpolation. Für die Umrechnung des *COP* auf andere Betriebspunkte wird Gl. 9-113 verwendet (direkte Interpolation des COP, nicht indirekt über den Gütegrad), für die Umrechnung der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} der Wärmepumpe Gl. 9-107.

Für die heizkreisseitige WP-Austrittstemperatur T_v = 35°C stimmen drei Betriebspunkte von alter und aktueller Norm überein, d.h. es wird bei den gleichen Sole-Temperaturen T_s gemessen. Diese drei Betriebspunkte können übernommen werden:

B0/W35

B5/W35

W10/W35.

Die fehlenden zwei Betriebspunkte B-5/W35 und W15/W35 können aus zwei benachbarten Messpunkten extrapoliert werden. Das Vorgehen für die Extrapolation bei T_v = 35°C ist in Abb. 6.4 dargestellt. Die Pfeile geben an, welche zwei Betriebspunkte für die Extrapolation verwendet werden.

Für die zwei <u>Betriebspunkte B-5/W35 und W15/W35</u> ergibt sich:

$$\begin{aligned} COP_{-5/35} &= COP_{0/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + COP_{5/35} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) \\ &= 2\,COP_{0/35} - COP_{5/35} \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-49}$$

$$\begin{aligned} P_{el,-5/35} &= P_{el,0/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + P_{el,5/35} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) \\ &= 2\,P_{el,0/35} - P_{el,5/35} \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-50}$$

mit T_{s0} = -5°C, T_{s1} = 0°C, T_{s2} = 5°C (T_v = 35°C)

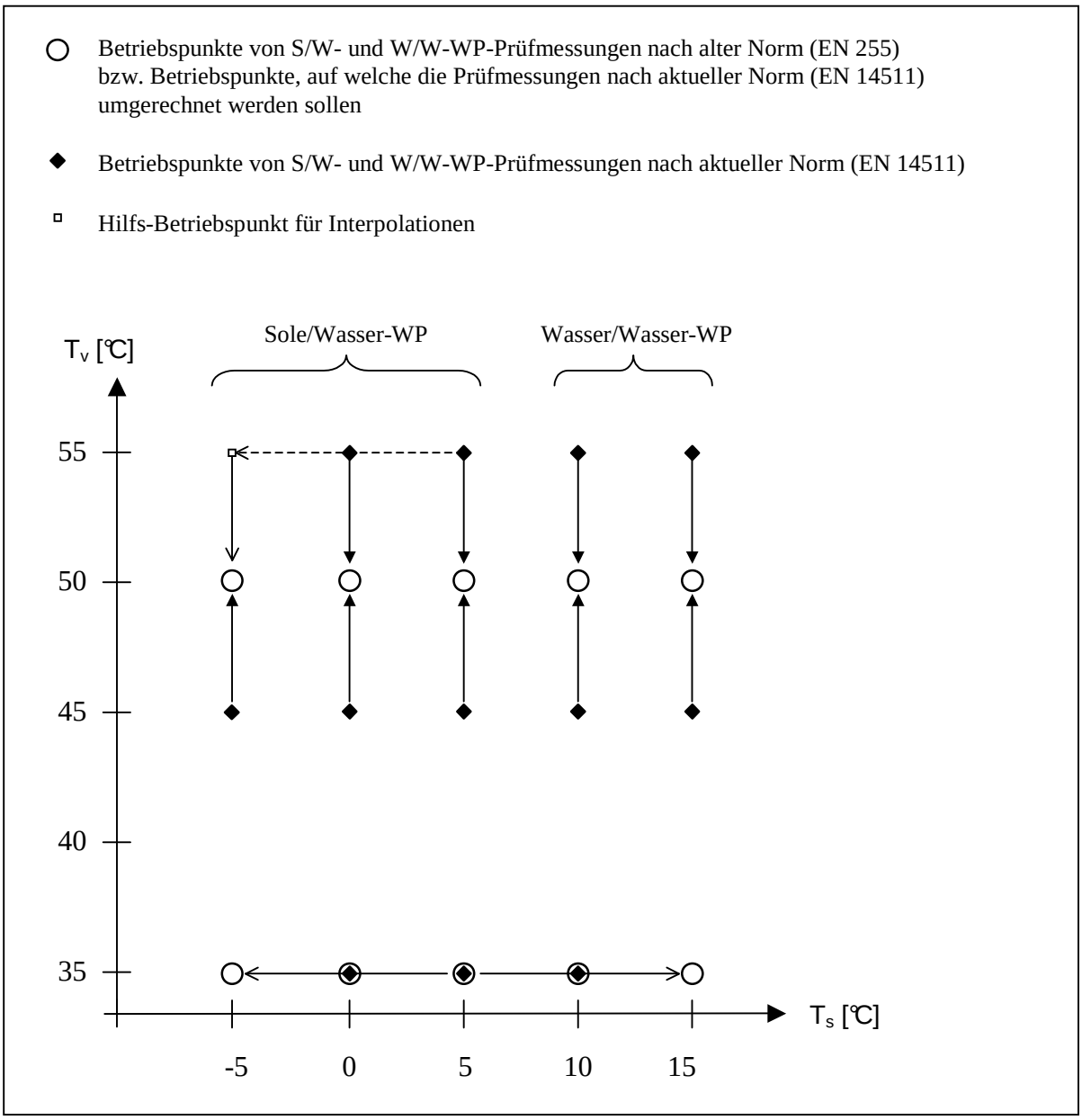


Abb. 6.4: Vorgehen für die Umrechnung der Betriebspunkte der Prüfmessungen von Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-WP nach aktueller Norm (EN 14511) auf die Betriebspunkte der Prüfmessungen nach alter Norm (EN 255).

$$COP_{15/35} = COP_{5/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + COP_{10/35} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) = 2\,COP_{10/35} - COP_{5/35} \qquad \text{Gl. 6-51}$$

$$P_{el,15/35} = P_{el,5/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + P_{el,10/35} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) = 2\,P_{el,10/35} - P_{el,5/35} \qquad \text{Gl. 6-52}$$

mit T_{s0} = 15°C, T_{s1} = 5°C, T_{s2} = 10°C (T_v = 35°C)

Bem.: Gl. 6-49 lässt sich auch ausdrücken als $COP_{-5/35} = COP_{0/35} - (COP_{5/35} - COP_{0/35})$ und Gl. 6-51 als $COP_{15/35} = COP_{10/35} + (COP_{10/35} - COP_{5/35})$, was beides anschaulich zu interpretieren ist mit Hilfe von Abb. 6.5.

Bei höheren WP-Austrittstemperaturen T_v gibt es keine gemeinsamen Betriebspunkte zwischen den beiden Normen: Die Betriebspunkte gemäss alter Norm EN 255 liegen alle bei T_v = 50℃, die Betriebspunkte gemäss aktueller Norm EN 14511 aber bei T_v = 45℃ und bei T_v = 55℃.

Das Vorgehen für die Umrechnungs-Interpolationen auf T_v = 50℃ ist in Abb. 6.4 dargestellt. Die Pfeile geben an, welche zwei Betriebspunkte für eine Interpolation verwendet werden. Der gestrichelte Pfeil bezeichnet die Extrapolation auf den Hilfs-Betriebspunkt.

Zur Berechnung des <u>Betriebspunktes B-5/W50</u> (alte Norm EN 255) wird der Hilfs-Betriebspunkt B-5/W55 benötigt. Dieser wird mittels linearer Extrapolation berechnet aus den ausgemessenen Betriebspunkten B0/W55 und B5/W55 (aktuelle Norm EN 14511):

$$\begin{aligned} COP_{-5/55} &= COP_{0/55} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + COP_{5/55} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) \\ &= 2\,COP_{0/55} - COP_{5/55} \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-53}$$

$$\begin{aligned} P_{el,-5/55} &= P_{el,0/55} \cdot \left(1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) + P_{el,5/55} \cdot \left(\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}}\right) \\ &= 2\,P_{el,0/55} - P_{el,5/55} \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-54}$$

mit T_{s0} = -5℃, T_{s1} = 0℃, T_{s2} = 5℃

Bem.: Gl. 6-53 lässt sich auch ausdrücken als $COP_{-5/55} = COP_{0/55} - (COP_{5/55} - COP_{0/55})$, was anschaulich zu interpretieren ist (vgl. auch Abb. 6.5).

Aus diesem Hilfs-Betriebspunkt B-5/W55 und dem ausgemessenen Betriebspunkt B-5/W45 (aktuelle Norm EN 14511) lässt sich nun der gesuchte Betriebspunkt B-5/W50 berechnen:

$$\begin{aligned} COP_{-5/50} &= COP_{-5/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{-5/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(COP_{-5/45} + COP_{-5/55}\right) \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-55}$$

$$\begin{aligned} P_{el,-5/50} &= P_{el,-5/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,-5/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(P_{el,-5/45} + P_{el,-5/55}\right) \end{aligned} \qquad \text{Gl. 6-56}$$

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

Alle übrigen Betriebspunkte bei T_v = 50℃ (B0/W50, B5/W50, W10/W50, W15/W50) lassen sich direkt mittels linearer Interpolation berechnen aus den entsprechenden Betriebspunkten bei T_v = 45℃ und bei T_v = 55℃.

$$COP_{0/50} = COP_{0/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{0/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(COP_{0/45} + COP_{0/55}\right)$$ Gl. 6-57

$$P_{el,0/50} = P_{el,0/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,0/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(P_{el,0/45} + P_{el,0/55}\right)$$ Gl. 6-58

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

$$COP_{5/50} = COP_{5/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{5/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(COP_{5/45} + COP_{5/55}\right)$$ Gl. 6-59

$$P_{el,5/50} = P_{el,5/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,5/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(P_{el,5/45} + P_{el,5/55}\right)$$ Gl. 6-60

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

$$COP_{10/50} = COP_{10/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{10/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(COP_{10/45} + COP_{10/55}\right)$$ Gl. 6-61

$$P_{el,10/50} = P_{el,10/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,10/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(P_{el,10/45} + P_{el,10/55}\right)$$ Gl. 6-62

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

$$COP_{15/50} = COP_{15/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + COP_{15/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(COP_{15/45} + COP_{15/55}\right)$$ Gl. 6-63

$$P_{el,15/50} = P_{el,15/45} \cdot \left(1 - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,15/55} \cdot \left(\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) = \frac{1}{2}\left(P_{el,15/45} + P_{el,15/55}\right)$$

Gl. 6-64

mit T_{v0} = 50℃, T_{v1} = 45℃, T_{v2} = 55℃

In Abb. 6.5 ist als Beispiel eine WPZ-Prüfmessung des COP nach aktueller Norm EN 14511 dargestellt sowie die Umrechnung der Messergebnisse auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255.

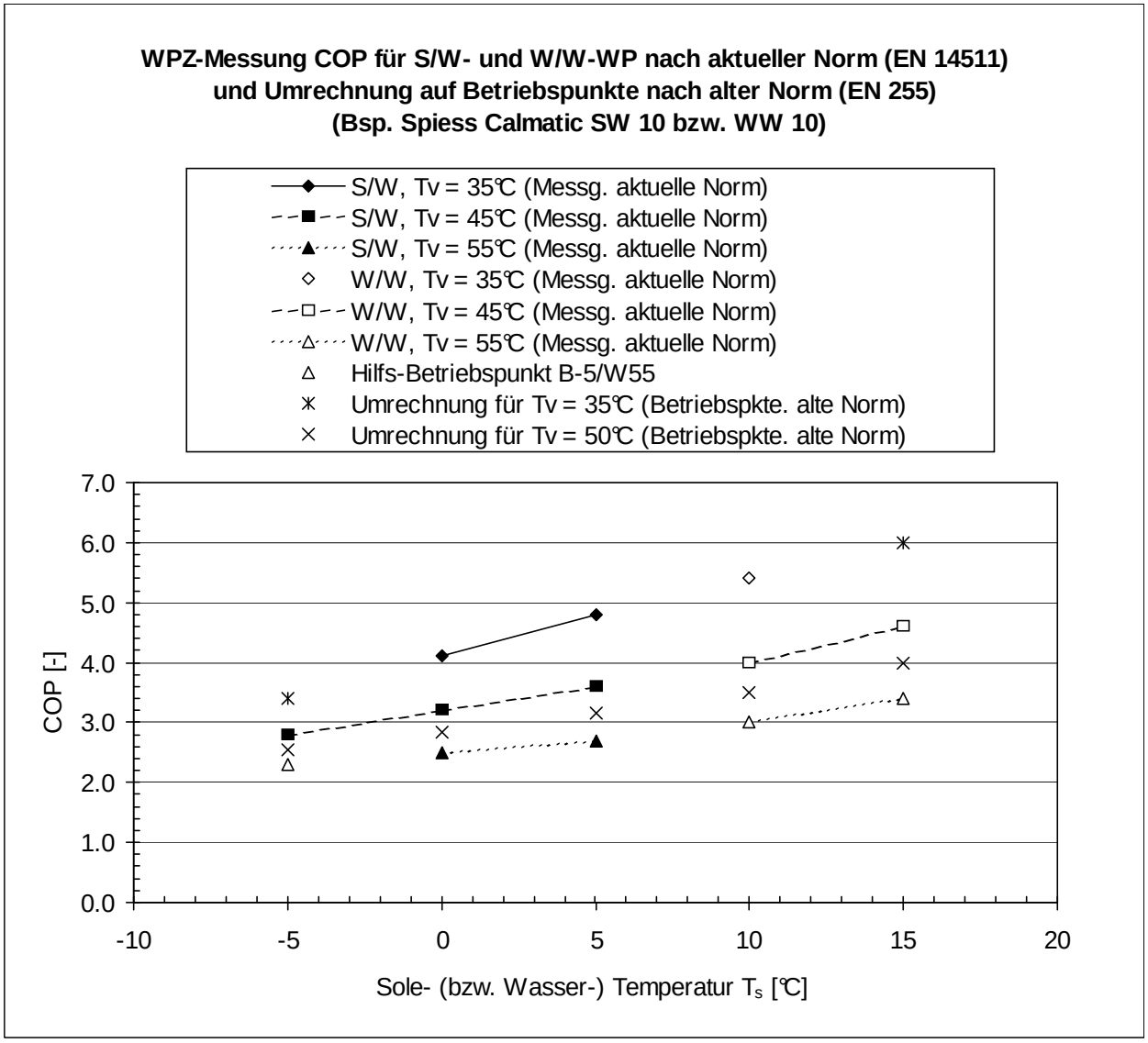


Abb. 6.5: Beispiel für die WPZ-Prüfmessung des COP für Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-WP nach aktueller Norm EN 14511 und die Umrechnung auf die Betriebspunkte nach alter Norm EN 255.

7 S/W- und W/W-WP: Berechnung von weiteren Stützwerten von *COP* und P_{el}

Die Prüfmessungen decken im Sole/Wasser-Betrieb einen Bereich der Sole-Temperaturen T_s von -5℃ bis 5℃ ab und im Wasser/Wasser-Bereich einen Bereich der Wasser-Temperatur von 10℃ bis 15℃ ab. Im Folgenden wird dieser Bereich mitte ls Abschätzungen beidseitig erweitert.

Allerdings ist allgemein zu beachten, dass es bei hohen und tiefen Sole- bzw. Wasser-Temperaturen (ebenso wie bei hohen Heizrücklauftemperaturen) zu Wärmepumpen-Störungen kommen kann (vgl. dazu Kap. 8.4).

7.1 Zusätzliche Stützstelle bei tiefer Sole-Temperatur

Unterhalb des letzten Messwertes bei T_s = -5℃ wird für die Sole-Temperatur eine zusätzlic he Stützstelle T_{sCOP1} eingeführt bei derjenigen Temperatur, an welcher der *COP* für die WP-Austritts-Temperatur T_{v0} = 50℃ auf den Wert *COP* = 1 gefallen ist.

$$COP_{sCOP1/50} = 1 \qquad \text{Gl. 7-65}$$

Zur Berechnung von T_{sCOP1} wird für den *COP* als Funktion der Sole-Temperatur T_s eine lineare Extrapolation des COP aus T_{s1} = -5℃ und T_{s2} = 0℃ verwendet. Es ergibt sich (z. B. mit Hilfe d er Geradengleichung Gl. 9-99):

$$T_{sCOP1} = T_{s1} - \left(\frac{COP_{-5/50} - 1}{COP_{0/50} - COP_{-5/50}} \right) \cdot \left(T_{s2} - T_{s1} \right) \qquad \text{Gl. 7-66}$$

mit T_{s1} = -5℃, T_{s2} = 0℃, T_{v0} = 50℃

Die zugehörige elektrische Leistung für die WP-Austritts-Temperatur T_{v0} = 50℃ an der Stützstelle T_{sCOP1} wird mittels linearer Extrapolation zu:

$$P_{el,sCOP1/50} = P_{el,-5/50} \cdot \left(1 - \frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) + P_{el,0/50} \cdot \left(\frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) \qquad \text{Gl. 7-67}$$

mit T_{s1} = -5℃, T_{s2} = 0℃

Für die WP-Austritts-Temperatur T_{v0} = 35℃ an der oben berechneten Stützstelle T_{sCOP1} ergeben sich der *COP* und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} mittels linearer Extrapolation zu:

$$COP_{sCOP1/35} = COP_{-5/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) + COP_{0/35} \cdot \left(\frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) \qquad \text{Gl. 7-68}$$

$$P_{el,sCOP1/35} = P_{el,-5/35} \cdot \left(1 - \frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) + P_{el,0/35} \cdot \left(\frac{T_{sCOP1} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} \right) \qquad \text{Gl. 7-69}$$

mit T_{s1} = -5℃, T_{s2} = 0℃

7.2 Zusätzliche Stützstellen bei hoher Sole-Temperatur

Die Wärmepumpen werden vom WPZ immer im Sole/Wasser-Betrieb ausgemessen und falls gewünscht auch im Wasser/Wasser-Betrieb. (Es kommt nicht vor, dass nur im Wasser/Wasser-Betrieb geprüft wurde, aber nicht im Sole/Wasser-Betrieb.)

Im Folgenden werden für die WP-Datenbank in Polysun die WPZ-Prüfmessungen für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei den Betriebspunkten T_s = 10℃ und T_s = 15℃ mit weiteren Stützwerten ergänzt.

7.2.1 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb vorhanden

Falls für die Wärmepumpe Prüfmessungen im Wasser/Wasser-Betrieb vorliegen, wird als Näherung angenommen, dass die Prüfdaten der beiden Betriebsarten (S/W und W/W) zusammengeführt werden können und für beide Betriebsarten verwendet werden dürfen. Das heisst, die Messergebnisse für den Wasser/Wasser-Betrieb an den Betriebspunkten T_s = 10℃ und T_s = 15℃ werden für den Sole/Wasser-Betrieb übernommen.

Beispielsweise bedeutet dies für das Beispiel aus Abb. 6.2 und Abb. 6.3, dass alle 10 Messpunkte als Stützstellen bzw. Stützwerte sowohl für den Sole/Wasser-Betrieb als auch für den Wasser/Wasser-Betrieb verwendet werden.

Für noch höhere Sole- bzw. Wasser-Temperaturen wird bei T_s = 30℃ eine zusätzliche Stützstelle eingefügt. Es wird angenommen, dass keine Sole- bzw. Wasser-Temperaturen grösser als 30℃ vorkommen. Zur Berechnung des *COP*-Stützstellenwertes wird konservativ angenommen, dass der *COP* bis zu T_s = 30℃ auf dem *COP*-Wert bei T_s = 15℃ konstant bleibt. Das Gleiche wird für die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} angenommen.

$$COP_{30/35} = COP_{15/35} \qquad \text{Gl. 7-70}$$

$$COP_{30/50} = COP_{15/50} \qquad \text{Gl. 7-71}$$

$$P_{el,30/35} = P_{el,15/35} \qquad \text{Gl. 7-72}$$

$$P_{el,30/50} = P_{el,15/50} \qquad \text{Gl. 7-73}$$

7.2.2 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb nicht vorhanden

Da keine Messwerte an den Betriebspunkten T_s = 10℃ und T_s = 15℃ vorhanden sind, wird konservativ angenommen, dass der *COP* auf den bei T_s = 5℃ gemessenen Werten $COP_{5/35}$ bzw. $COP_{5/50}$ konstant bleibt. Das Gleiche wird für die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} angenommen. Damit der Raster der Betriebspunkte der gleiche ist wie in Kap. 7.2.1, werden die Messwerte bei T_s = 5℃ übernommen für Betriebspunkte die T_s = 10℃, 15℃ und 30℃. Wiederum wird angenommen, dass keine Sole- bzw. Wasser-Temperaturen grösser als 30℃ vorkommen.

$COP_{10/35} = COP_{5/35}$	Gl. 7-74
$COP_{15/35} = COP_{5/35}$	Gl. 7-75
$COP_{30/35} = COP_{5/35}$	Gl. 7-76
$COP_{10/50} = COP_{5/50}$	Gl. 7-77
$COP_{15/50} = COP_{5/50}$	Gl. 7-78
$COP_{30/50} = COP_{5/50}$	Gl. 7-79
$P_{el,10/35} = P_{el,5/35}$	Gl. 7-80
$P_{el,15/35} = P_{el,5/35}$	Gl. 7-81
$P_{el,30/35} = P_{el,5/35}$	Gl. 7-82
$P_{el,10/50} = P_{el,5/50}$	Gl. 7-83
$P_{el,15/50} = P_{el,5/50}$	Gl. 7-84
$P_{el,30/50} = P_{el,5/50}$	Gl. 7-85

7.3 Beispiele für die Berechnung von weiteren Stützwerten

7.3.1 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb vorhanden

In Abb. 7.1 ist für das Beispiel aus Abb. 6.2 die Berechnung von weiteren Stützwerten gemäss Kap. 7.2.1 dargestellt. Für die im Beispiel verwendete Wärmepumpe ergab sich mit Gl. 7-66 für den Stützstellenwert T_{sCOP1} = -20℃.

7.3.2 Prüfdaten für Wasser/Wasser-Betrieb nicht vorhanden

In Abb. 7.2 ist ein Beispiel einer Wärmepumpe gezeigt, für welche nur Prüfmessungen im Sole/Wasser-Betrieb vorliegen, aber keine im Wasser/Wasser-Betrieb. Die Berechnung der Stützstellen erfolgt wie in Kap. 7.2.2 beschrieben. Für die im Beispiel verwendete Wärmepumpe ergab sich mit Gl. 7-66 für den Stützstellenwert T_{sCOP1} = -19℃.

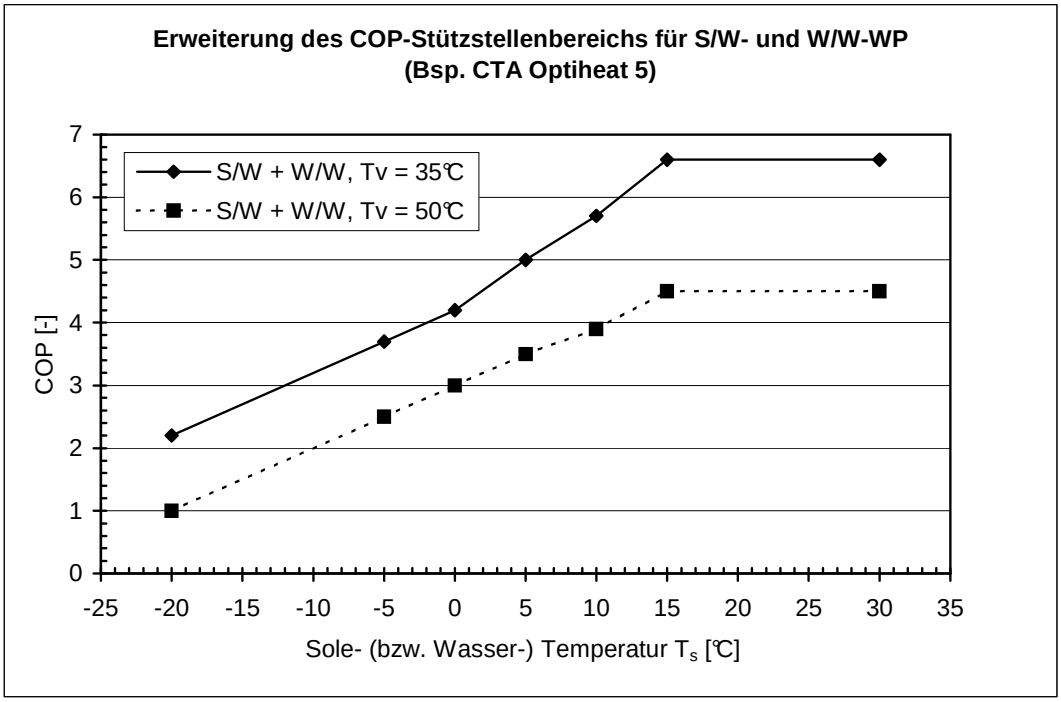


Abb. 7.1: Beispiel für die Berechnung von weiteren Stützwerten für eine Wärmepumpe, für welche Prüfmessungen auch im Wasser/Wasser-Betrieb vorliegen (WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃).

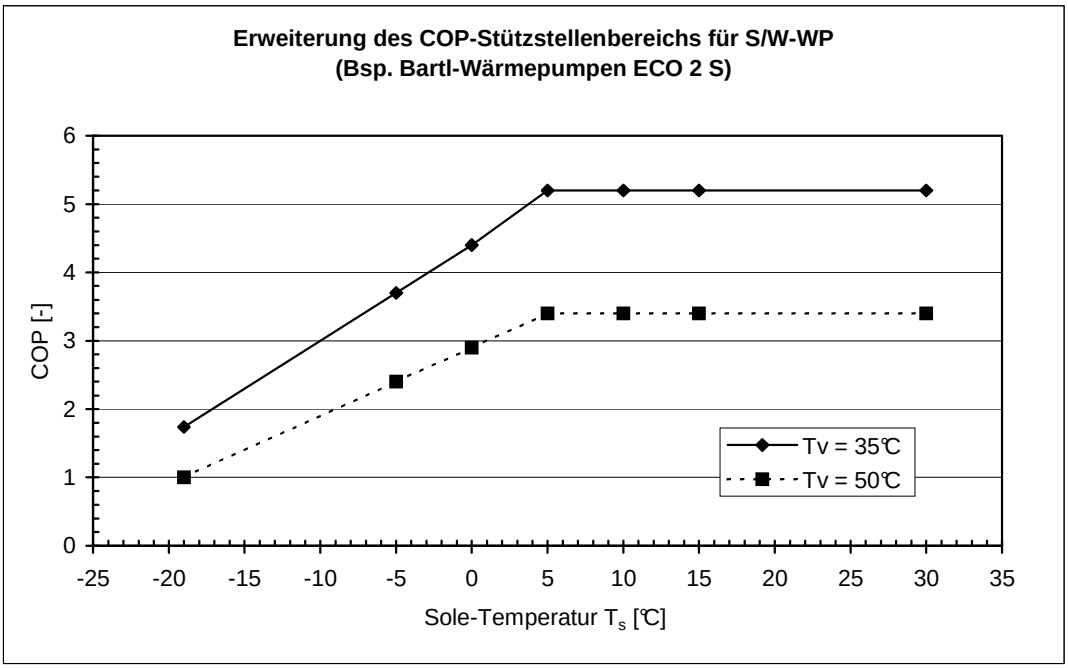


Abb. 7.2: Beispiel für die Berechnung von weiteren Stützwerten für eine Wärmepumpe, für welche keine Prüfmessungen im Wasser/Wasser-Betrieb vorliegen (WP-Austrittstemperaturen T_v = 35℃ und T_v = 50℃).

8 S/W- und W/W-WP: Berechnung von *COP* und P_{el} bei beliebigen Temperaturen

8.1 Allgemeines Vorgehen

Das allgemeine Vorgehen ist völlig identisch mit demjenigen bei Luft/Wasser-Wärmepumpen, das in Kap. 5.1.1 beschrieben ist. Der einzige Unterschied ist, dass anstelle der dortigen Aussenluft-Temperatur T_a hier nun die Sole-Temperatur T_s relevant ist. Neu hinzu kommen die zusätzlichen möglichen Störungsmeldungen bei Sole/Wasser-WP (Kap. 8.4).

8.2 Sole-Temperatur liegt im Stützstellenbereich $T_{sCOP1} \leq T_s \leq 30°C$

Wiederum ist das Vorgehen analog zu dem in Kap. 5.1.2 beschriebenen. Es gelten alle dort hergeleiteten Formeln. Da hier die Sole-Temperatur T_s relevant ist (und nicht die Aussenluft-Temperatur T_a), müssen lediglich die Indizes a0, a1, a2 und ai ersetzt werden durch die Indizes s0, s1, s2 und si. Der Vollständigkeit halber wird das Vorgehen und die angepassten Formeln hier nochmals aufgeführt.

- Es werden die beiden Stützstellen-Temperaturen T_{s1} und T_{s2} bestimmt, innerhalb derer die auszuwertende Temperatur T_{s0} am nächsten liegt ($T_{s1} \leq T_{s0} \leq T_{s2}$, vgl. Abb. 9.1). Für T_{v0} erübrigt sich dies, da nur die beiden Stützstellen-Temperaturen T_{v1} und T_{v2} vorhanden sind.
- Die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el}(T_{s0},T_{v0})$ wird berechnet mit Gl. 9-107 (mit den Abkürzungsdefinitionen aus Gl. 9-102 bis Gl. 9-106):

$$
\begin{aligned}
P_{el,s0v0} = \; & P_{el,s1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{s0}-T_{s1}}{T_{s2}-T_{s1}} - \frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} + \frac{(T_{s0}-T_{s1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{s2}-T_{s1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,s2v1} \cdot \left[\frac{T_{s0}-T_{s1}}{T_{s2}-T_{s1}} - \frac{(T_{s0}-T_{s1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{s2}-T_{s1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,s1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} - \frac{(T_{s0}-T_{s1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{s2}-T_{s1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\
& + P_{el,s2v2} \cdot \left[\frac{(T_{s0}-T_{s1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{s2}-T_{s1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right]
\end{aligned}
$$

- Die den Stützstellen-Temperaturen entsprechenden 4 *COP*-Messwerte $COP(T_{si},T_{vi})$ werden mit Gl. 9-119 bis Gl. 9-122 umgerechnet in 4 Gütegrade $\eta_c(T_{si},T_{vi})$:

$$\eta_{s1v1} = COP_{s1v1} \frac{T_{v1}-T_{s1}}{T_{v1}}$$

$$\eta_{s2v1} = COP_{s2v1} \frac{T_{v1}-T_{s2}}{T_{v1}}$$

$$\eta_{s1v2} = COP_{s1v2} \frac{T_{v2}-T_{s1}}{T_{v2}}$$

$$\eta_{s2v2} = COP_{s2v2} \frac{T_{v2} - T_{s2}}{T_{v2}}$$

Die Abkürzungsdefinitionen sind gegeben in Gl. 9-108 bis Gl. 9-112 und Gl. 9-114 bis Gl. 9-118.

- Aus den 4 Gütegraden wird mit linearer Interpolation der Gütegrad $\eta_c(T_{s0}, T_{v0})$ mit Gl. 9-123 berechnet.

$$\begin{aligned}
\eta_{s0v0} &= \eta_{s1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} + \frac{(T_{s0} - T_{s1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{s2} - T_{s1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
&+ \eta_{s2v1} \cdot \left[\frac{T_{s0} - T_{s1}}{T_{s2} - T_{s1}} - \frac{(T_{s0} - T_{s1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{s2} - T_{s1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
&+ \eta_{s1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} - \frac{(T_{s0} - T_{s1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{s2} - T_{s1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
&+ \eta_{s2v2} \cdot \left[\frac{(T_{s0} - T_{s1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{s2} - T_{s1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right]
\end{aligned}$$

- Der gesuchte $COP_{\eta}(T_{s0}, T_{v0})$ wird berechnet mit Gl. 9-125.

$$COP_{\eta,s0v0} = \eta_{s0v0} \cdot \frac{T_{v0}}{T_{v0} - T_{s0}}$$

mit $COP_{max} = 10$

Bemerkungen:

- Es ist zu gewährleisten, dass im Programmablauf immer $T_{v0} > T_{s0}$ ist.
- Im Fall kleiner Differenzen $T_{v0} - T_{s0}$ kann der *COP* unrealistisch hohe Werte annehmen. Daher wird eine obere Schranke für den *COP* definiert: $COP_{max} = 10$.

8.3 Sole-Temperatur $T_s < T_{sCOP1}$

Unterhalb einer Sole-Temperatur von $T_{s0} = T_{sCOP1}$ (mit T_{sCOP1} aus Gl. 7-66) wird als Näherung angenommen, dass der Gütegrad η_c und die elektrische Leistungsaufnahme P_{el} nicht mehr von T_s abhängen, sondern konstant bleiben auf ihrem Wert an der Stelle $T_{s0} = T_{sCOP1}$, d.h.

$$\eta_c(T_s, T_v) = \eta_c(T_{s0} = T_{sCOP1}, T_v) \quad \text{für } T_s < T_{sCOP1} \qquad \text{Gl. 8-86}$$

$$P_{el}(T_s, T_v) = P_{el}(T_{s0} = T_{sCOP1}, T_v) \quad \text{für } T_s < T_{sCOP1} \qquad \text{Gl. 8-87}$$

Der Übersichtlichkeit wegen werden die folgenden Abkürzungen definiert:

$$\eta_{c,sCOP1}(T_v) := \eta_c(T_{s0} = T_{sCOP1}, T_v) \qquad \text{Gl. 8-88}$$

$$P_{el,sCOP1}(T_v) := P_{el}(T_{s0} = T_{sCOP1}, T_v) \qquad \text{Gl. 8-89}$$

Der Gütegrad $\eta_{c,sCOP1}(T_v)$ lässt sich aus Gl. 9-123 berechnen. Mit $T_{s0} = T_{s1} = T_{sCOP1}$, T_{s2} = -5℃ (T_{v1} = 35℃, T_{v2} = 50℃) ergibt sich:

$$\eta_{c,sCOP1}(T_v) = \eta_{s1v1} \cdot \left(1 - \frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + \eta_{s1v2} \cdot \left(\frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \quad \text{für } T_s < T_{sCOP1} \qquad \text{Gl. 8-90}$$

Daraus lässt sich der *COP* mit Hilfe von Gl. 2-8 berechnen. Es wird als Näherung angenommen, dass der *COP* nicht mehr von T_s abhängen soll, sondern konstant bleiben auf dem Wert, der sich aus Gl. 2-8 an der Stelle $T_s = T_{s0} = T_{sCOP1}$ ergibt:

$$COP(T_s, T_v) = \eta_{c,sCOP1} \cdot \frac{T_v}{T_v - T_{sCOP1}} \quad \text{für } T_s < T_{sCOP1} \qquad \text{Gl. 8-91}$$

Bemerkung:

- Es ist zu gewährleisten, dass im Programmablauf immer $T_v > T_{s0}$ ist.
- Da der *COP* auch hier über den Gütegrad berechnet wird, ist sichergestellt, dass der *COP* beim Übergangspunkt $T_s = T_{sCOP1}$ stetig verläuft.

Die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el,sCOP1}(T_v)$ lässt sich aus Gl. 9-107 berechnen. Mit $T_{s0} = T_{s1} = T_{sCOP1}$, T_{s2} = -5℃ (T_{v1} = 35℃, T_{v2} = 50℃) ergibt sich:

$$P_{el,sCOP1}(T_v) = P_{el,s1v1} \cdot \left(1 - \frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) + P_{el,s1v2} \cdot \left(\frac{T_v - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}}\right) \qquad \text{Gl. 8-92}$$

Bemerkung: Es ist anzunehmen, dass die Sole/Wasser-Wärmepumpe bei solch tiefen Sole-Temperaturen ($T_s < T_{sCOP1}$) bereits auf Störung gegangen ist und/oder dass die Bohrloch-Hinterfüllung geschädigt werden kann.

8.4 Hochdruck- und Tiefdruck-Störungen bei Sole/Wasser-WP

Die Wärmepumpe kann nicht im ganzen erweiterten Temperaturbereich betrieben werden. Bei sehr hohen oder sehr tiefen Sole-Temperaturen, ebenso wie bei hohen Heizrücklauftemperaturen kann es zu Störungen kommen.

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen gibt es drei Arten von Störungen:

- Tiefdruckstörung: Die Sole-Temperatur T_s ist zu tief. Tritt häufig bei T_s ca. -5 bis -10℃ auf. Zudem kann bei länger andauerndem Betrieb mit Sole-Temperaturen unter 0℃ die Bohrloch-Hinterfüllung (und damit ev. auch die Sonde) Schaden nehmen.
- Hochdruckstörung 1. Art: Die Sole-Temperatur T_s ist zu hoch. Tritt häufig bei T_s ca. 20 bis 25℃ auf.
- Hochdruckstörung 2. Art: Die Wärmepumpen-Eintrittstemperatur T_r des Heizkreisfluids in die Wärmepumpe ist zu hoch. (Diese Störung kann auch bei Luft/Wasser-WP auftreten.)

Weil diese Störungsarten teilweise nicht vom Kältemittel abhängen, sondern von der Maschinenkonstruktion und gewissen Einstellungen, wird vorgeschlagen, dass der zulässige Temperaturbereich vom Benutzer eingegeben werden kann und zur Unterstützung des Benutzers Vorschlagswerte hinterlegt sind.

9 Anhang: Interpolationsmethode

Es wird zunächst allgemein dargestellt, wie aus vier Messwerten einer Grösse $y(T_a,T_v)$, welche von den beiden Variablen T_a (Aussenluft-Temperatur) und T_v (WP-Austrittstemperatur) abhängt, durch lineare Interpolation der Wert an einer beliebigen Stelle berechnet werden kann. Danach wird das Ergebnis angewendet auf die konkret gesuchten Grössen η_c, P_{el} und *COP*.

Bem.: Anstelle der Aussenluft-Temperatur T_a im Falle von Luft/Wasser-WP kann für den Fall der Sole/Wasser-WP natürlich auch die Sole-Temperatur T_s verwendet werden.

9.1 Lineare Interpolation einer Funktion $y(T_a,T_v)$ aus vier Messwerten

Die Funktion $y(T_a,T_v)$ sei an den vier Messstellen (Stützstellen) $[T_{a1},T_{v1}]$, $[T_{a2},T_{v1}]$, $[T_{a1},T_{v2}]$ und $[T_{a2},T_{v2}]$ bekannt. Mittels linearer Interpolation in den beiden Variablen T_a und T_v soll $y(T_{a0},T_{v0})$ an einer beliebigen Stelle $[T_{a0},T_{v0}]$ berechnet werden.

Bem.: Falls $[T_{a0},T_{v0}]$ innerhalb des Messbereichs liegt, wird von einer Interpolation gesprochen, falls sie ausserhalb des Messbereichs liegt, von einer Extrapolation. Die im Folgenden hergeleitete Methode gilt auch für die Extrapolation von Daten. Der Einfachheit halber wird im Folgenden für beide Fälle der Begriff „Interpolation“ verwendet.

Der Übersichtlichkeit wegen werden folgende Definitionen eingeführt:

- Bekannte Messwerte (Stützwerte) von $y(T_a,T_v)$ an den vier Messstellen (Stützstellen):

$$y_{a1v1} := y(T_{a1},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-93}$$

$$y_{a2v1} := y(T_{a2},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-94}$$

$$y_{a1v2} := y(T_{a1},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-95}$$

$$y_{a2v2} := y(T_{a2},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-96}$$

- Gesuchtes $y(T_{a0},T_{v0})$:

$$y_{a0v0} := y(T_{a0},T_{v0}) \qquad \text{Gl. 9-97}$$

Die Ausgangslage sowie das weitere Vorgehen sind in Abb. 9.1 dargestellt.

In einem ersten Schritt wird für konstante WP-Austrittstemperatur T_v der Gütegrad zwischen T_{a1} und T_{a2} auf die Temperatur $T_a = T_{a0}$ linear interpoliert. Für die WP-Austrittstemperaturen T_{v1} bzw. T_{v2} ergeben sich aus der Geradengleichung:

$$y_{a0v1} = y_{a1v1} + \frac{y_{a2v1} - y_{a1v1}}{T_{a2} - T_{a1}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) \qquad \text{Gl. 9-98}$$

bzw.

$$y_{a0v2} = y_{a1v2} + \frac{y_{a2v2} - y_{a1v2}}{T_{a2} - T_{a1}} \cdot (T_{a0} - T_{a1}) \qquad \text{Gl. 9-99}$$

In einem zweiten Schritt wird nun für die Luft-Temperatur T_{a0} der Gütegrad zwischen T_{v1} und T_{v2} auf die Temperatur $T_v = T_{v0}$ linear interpoliert:

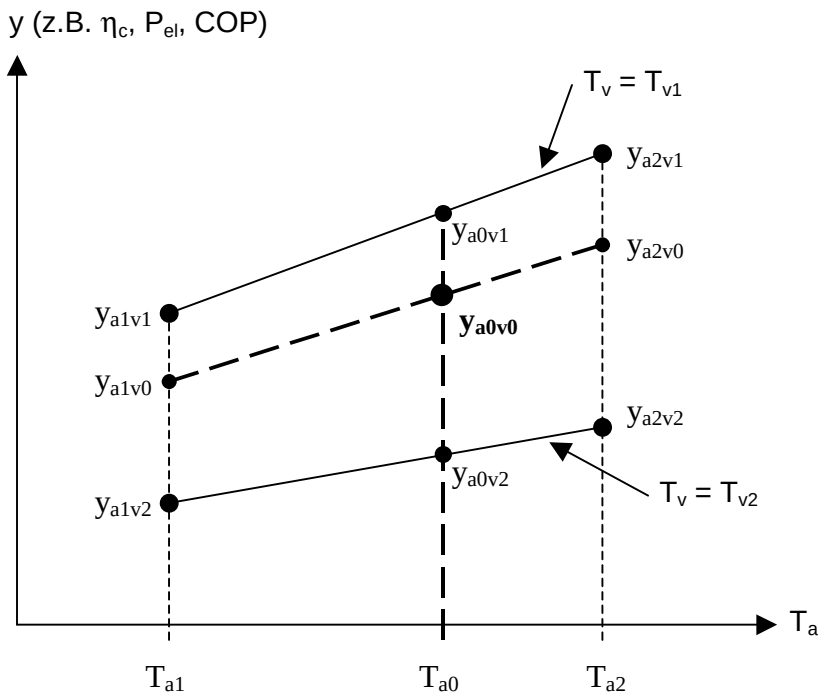


Abb. 9.1: Vorgehen bei der Interpolation von 4 Messwerten

$$y_{a0v0} = y_{a0v1} + \frac{y_{a0v2} - y_{a0v1}}{T_{v2} - T_{v1}} \cdot \left(T_{v0} - T_{v1}\right) \qquad \text{Gl. 9-100}$$

Einsetzen von Gl. 9-98 und Gl. 9-99 in Gl. 9-100 ergibt:

$$\begin{aligned} y_{a0v0} = {} & y_{a1v1} + \frac{y_{a2v1} - y_{a1v1}}{T_{a2} - T_{a1}} \cdot \left(T_{a0} - T_{a1}\right) \\ & + \left\{ \left[y_{a1v2} + \frac{y_{a2v2} - y_{a1v2}}{T_{a2} - T_{a1}} \cdot \left(T_{a0} - T_{a1}\right) \right] - \left[y_{a1v1} + \frac{y_{a2v1} - y_{a1v1}}{T_{a2} - T_{a1}} \cdot \left(T_{a0} - T_{a1}\right) \right] \right\} \\ & \cdot \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} \end{aligned}$$

Ausmultiplizieren ergibt das gesuchte y_{a0v0}:

$$\boxed{\begin{aligned} y_{a0v0} = {} & y_{a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} + \frac{\left(T_{a0} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v0} - T_{v1}\right)}{\left(T_{a2} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v2} - T_{v1}\right)} \right] \\ & + y_{a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} - \frac{\left(T_{a0} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v0} - T_{v1}\right)}{\left(T_{a2} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v2} - T_{v1}\right)} \right] \\ & + y_{a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} - \frac{\left(T_{a0} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v0} - T_{v1}\right)}{\left(T_{a2} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v2} - T_{v1}\right)} \right] \\ & + y_{a2v2} \cdot \left[\frac{\left(T_{a0} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v0} - T_{v1}\right)}{\left(T_{a2} - T_{a1}\right) \cdot \left(T_{v2} - T_{v1}\right)} \right] \end{aligned}} \qquad \text{Gl. 9-101}$$

Bemerkungen zu Gl. 9-101:

- Es lässt sich zeigen, dass sich das gleiche Resultat ergibt, wenn die Reihenfolge der beiden Herleitungsschritte vertauscht wird, d.h. wenn in einem ersten Schritt für konstante Luft-Temperatur T_a der Gütegrad zwischen T_{v1} und T_{v2} auf die Temperatur $T_v = T_{v0}$ linear interpoliert wird und in einem zweiten Schritt für die WP-Austrittstemperatur T_{v0} der Gütegrad zwischen T_{a1} und T_{a2} auf die Temperatur $T_a = T_{a0}$ linear interpoliert wird.
- Die Gleichung gilt auch für die Spezialfälle (an den Rändern des Messbereichs): $T_{a0} = T_{a1}$ oder $T_{a0} = T_{a2}$ sowie $T_{v0} = T_{v1}$ oder $T_{v0} = T_{v2}$. Die sich daraus ergebenden Formeln entsprechen einer linearen Interpolation in einer Variablen (Geradengleichung).
- Es muss immer gelten: $T_{a1} \neq T_{a2}$ und $T_{v1} \neq T_{v2}$. Dies ist bei den nachfolgenden Anwendungen sichergestellt durch die diskreten Stützstellen.

Im Folgenden wird nun dieses allgemeine Ergebnis angewendet auf die gesuchten Grössen Gütegrad η_c, elektrische Leistungsaufnahme P_{el} und *COP*.

9.2 Interpolation der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el}

Die zu Gl. 9-93 bis Gl. 9-97 analogen Definition für die bekannten Messwerte (Stützwerte) von $P_{el}(T_a,T_v)$ an den vier Messstellen (Stützstellen) sowie für das gesuchte $P_{el}(T_{a0},T_{v0})$ lauten:

$$P_{el,a1v1} := P_{el}(T_{a1},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-102}$$

$$P_{el,a2v1} := P_{el}(T_{a2},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-103}$$

$$P_{el,a1v2} := P_{el}(T_{a1},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-104}$$

$$P_{el,a2v2} := P_{el}(T_{a2},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-105}$$

$$P_{el,a0v0} := P_{el}(T_{a0},T_{v0}) \qquad \text{Gl. 9-106}$$

Die zu Gl. 9-101 analoge Gleichung für das gesuchte $P_{el,a0v0}$ lautet:

$$\begin{aligned} P_{el,a0v0} = \; & P_{el,a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} + \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + P_{el,a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + P_{el,a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + P_{el,a2v2} \cdot \left[\frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \end{aligned} \qquad \text{Gl. 9-107}$$

9.3 Direkte Interpolation des *COP*

Bei der direkten Interpolation des *COP* wird, wie in Kap. 9.1 beschrieben, der *COP* in den Variablen T_a und T_v interpoliert.

Die zu Gl. 9-93 bis Gl. 9-97 analogen Definition für die bekannten Messwerte (Stützwerte) von $COP(T_a,T_v)$ an den vier Messstellen (Stützstellen) sowie für das gesuchte $COP(T_{a0},T_{v0})$ lauten:

$$COP_{a1v1} := COP(T_{a1},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-108}$$

$$COP_{a2v1} := COP(T_{a2},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-109}$$

$$COP_{a1v2} := COP(T_{a1},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-110}$$

$$COP_{a2v2} := COP(T_{a2},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-111}$$

$$COP_{a0v0} := COP(T_{a0},T_{v0}) \qquad \text{Gl. 9-112}$$

Die zu Gl. 9-101 analoge Gleichung für das gesuchte COP_{a0v0} lautet:

$$\begin{aligned} COP_{a0v0} = {} & COP_{a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} + \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + COP_{a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0}-T_{a1}}{T_{a2}-T_{a1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + COP_{a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0}-T_{v1}}{T_{v2}-T_{v1}} - \frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \\ & + COP_{a2v2} \cdot \left[\frac{(T_{a0}-T_{a1})\cdot(T_{v0}-T_{v1})}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot(T_{v2}-T_{v1})} \right] \end{aligned} \qquad \text{Gl. 9-113}$$

Bem.: Diese Gleichung für den linear interpolierten *COP* wird nur gebraucht für die Erzeugung von weiteren COP-Stützwerten (vgl. Kap. 4). Es ist zu beachten, dass sich diese Berechnung unterscheidet von der Berechnung des *COP* aus dem linear interpolierten Gütegrad η_c (vgl. Kap. 9.4).

9.4 Indirekte Interpolation des *COP* mit Hilfe des Gütegrades η_c

Bei der indirekten Interpolation des *COP* wird der *COP* mit Hilfe des Gütegrades η_c berechnet. Der Gütegrad η_c selber wird dann mittels linearer Interpolation in den Variablen T_a und T_v berechnet.

Die zu Gl. 9-93 bis Gl. 9-97 analogen Definition für die Stützwerte von $\eta_c(T_a,T_v)$ an den vier Stützstellen sowie für das gesuchte $\eta_c(T_{a0},T_{v0})$ lauten:

$$\eta_{a1v1} := \eta_c(T_{a1},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-114}$$

$$\eta_{a2v1} := \eta_c(T_{a2},T_{v1}) \qquad \text{Gl. 9-115}$$

$$\eta_{a1v2} := \eta_c(T_{a1},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-116}$$

$$\eta_{a2v2} := \eta_c(T_{a2},T_{v2}) \qquad \text{Gl. 9-117}$$

$$\eta_{a0v0} := \eta_c(T_{a0},T_{v0}) \qquad \text{Gl. 9-118}$$

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Kapiteln sind die Stützwerte von $\eta_c(T_a,T_v)$ an den vier Stützstellen nicht durch Messungen bekannt. Die vier Stützwerte können jedoch aus den vier *COP*-Messwerten (Gl. 9-108 bis Gl. 9-110) mit Gl. 2-8 berechnet werden:

$$\eta_{a1v1} = COP_{a1v1} \frac{T_{v1} - T_{a1}}{T_{v1}} \qquad \text{Gl. 9-119}$$

$$\eta_{a2v1} = COP_{a2v1} \frac{T_{v1} - T_{a2}}{T_{v1}} \qquad \text{Gl. 9-120}$$

$$\eta_{a1v2} = COP_{a1v2} \frac{T_{v2} - T_{a1}}{T_{v2}} \qquad \text{Gl. 9-121}$$

$$\eta_{a2v2} = COP_{a2v2} \frac{T_{v2} - T_{a2}}{T_{v2}} \qquad \text{Gl. 9-122}$$

Die zu Gl. 9-101 analoge Gleichung für η_{a0v0} lautet:

$$\begin{aligned}
\eta_{a0v0} = \; & \eta_{a1v1} \cdot \left[1 - \frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} - \frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} + \frac{(T_{a0} - T_{a1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{a2} - T_{a1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
+ \; & \eta_{a2v1} \cdot \left[\frac{T_{a0} - T_{a1}}{T_{a2} - T_{a1}} - \frac{(T_{a0} - T_{a1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{a2} - T_{a1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
+ \; & \eta_{a1v2} \cdot \left[\frac{T_{v0} - T_{v1}}{T_{v2} - T_{v1}} - \frac{(T_{a0} - T_{a1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{a2} - T_{a1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right] \\
+ \; & \eta_{a2v2} \cdot \left[\frac{(T_{a0} - T_{a1}) \cdot (T_{v0} - T_{v1})}{(T_{a2} - T_{a1}) \cdot (T_{v2} - T_{v1})} \right]
\end{aligned} \qquad \text{Gl. 9-123}$$

Daraus lässt sich mit Gl. 2-8 der gesuchte *COP* berechnen. Um diesen *COP*-Wert, der mit Hilfe einer linearen Interpolation von η_c berechnet wurde, vom *COP*-Wert zu unterscheiden, der mittels direkter linearer Interpolation in T_a und T_v berechnet wurde (Kap. 9.3), wird der vorliegende *COP*-Wert mit einem Index η gekennzeichnet. Es wird folgende Abkürzung definiert:

$$COP_{\eta,a0v0} := COP_{\eta}(T_{a0}, T_{v0}) \qquad \text{Gl. 9-124}$$

Mit Gl. 2-8 lässt sich nun der gesuchte *COP* berechnen:

$$COP_{\eta,a0v0} = \eta_{a0v0} \cdot \frac{T_{v0}}{T_{v0} - T_{a0}} \qquad \text{Gl. 9-125}$$

Bemerkungen:

- Bei dieser Gleichung ist darauf zu achten, dass im Programmablauf gewährleistet ist, dass immer $T_{v0} > T_{a0}$ ist.
- Im Fall kleiner Differenzen $T_{v0} - T_{a0}$, d.h. wenn die WP-Austrittstemperatur nur wenig grösser ist als die Aussenluft-Temperatur, kann der COP unrealistisch hohe Werte annehmen. Es ist daher wahrscheinlich empfehlenswert, programmtechnisch eine obere Schranke für den COP einzubauen (z.B. COP_{max} = 10).

9.5 Beispiele für die Interpolationsmethode

Als kurze Illustration seien zwei Beispiele angefügt. Sie beruhen auf den Daten der in Abb. 3.1 dargestellten Wärmepumpen-Messung. In den Abb. 9.2 und Abb. 9.3 ist jeweils das Ergebnis gezeigt für die Berechnung des COP mittels linearer Interpolation des Gütegrades sowie als Vergleich dazu mittels direkter linearer Interpolation des COP zwischen den beiden eingezeichneten Messwerten. Zusätzlich ist die relative Abweichung der beiden Methoden dargestellt.

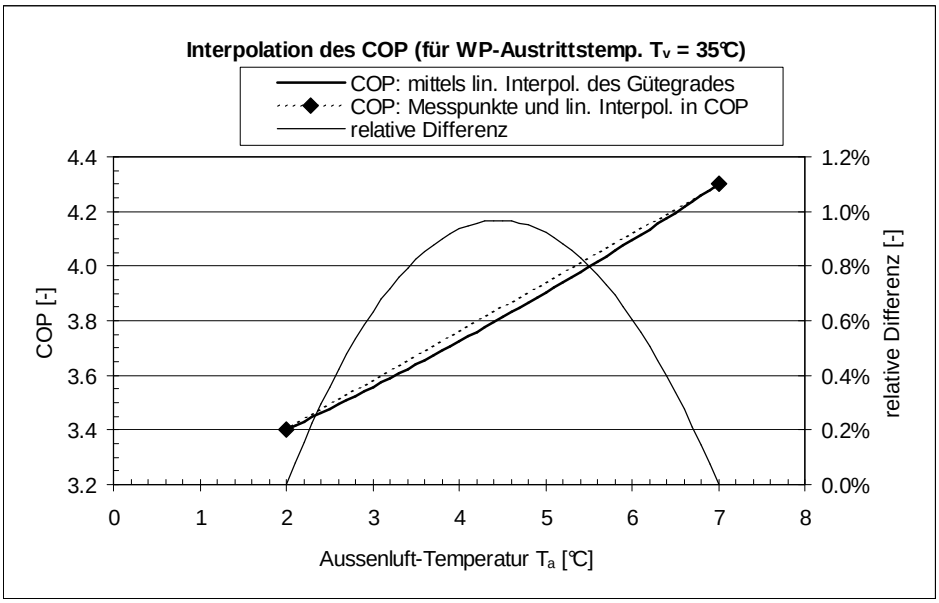


Abb. 9.2: Berechnung des COP mittels linearer Interpolation des Gütegrades und Vergleich mit der linearen Interpolation des COP zwischen den beiden Messwerten sowie Darstellung der relativen Differenz der beiden Methoden (für WP-Austrittstemperatur T_v = 35°C).

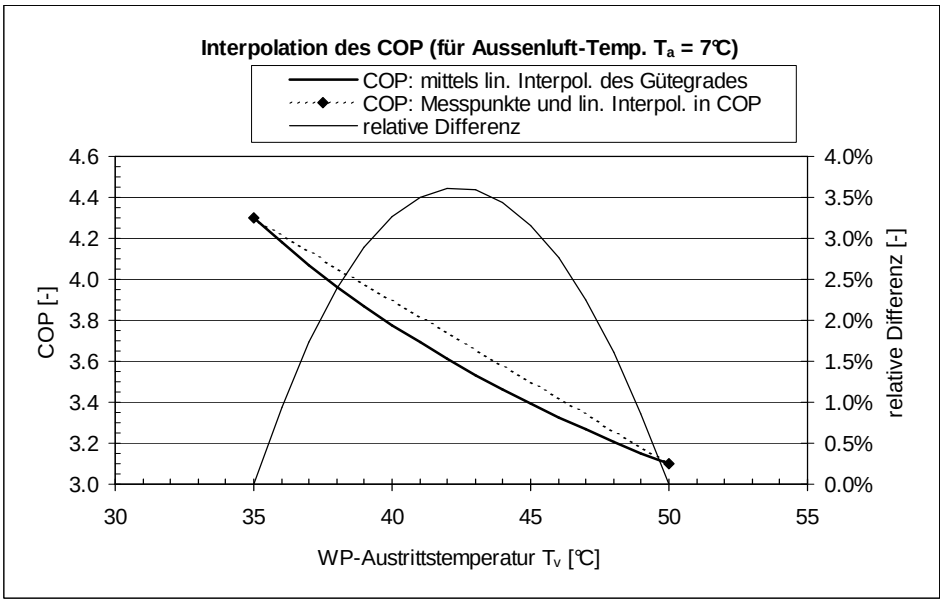


Abb. 9.3: Berechnung des COP mittels linearer Interpolation des Gütegrades und Vergleich mit der linearen Interpolation des COP zwischen den beiden Messwerten sowie Darstellung der relativen Differenz der beiden Methoden (für Aussenluft-Temperatur T_a = 7°C).

10 Symbolverzeichnis

10.1 Lateinische Symbole

COP	Leistungszahl der Wärmepumpe (coefficient of performance)	[-]
COP_c	Carnot-Wirkungsgrad der Wärmepumpe	[-]
$\dot{Q}_H$	abgegebene Heizleistung der Wärmepumpe	[W]
P_{el}	elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe	[W]
T_a	Verdampfungstemperatur im WP-Verdampfer (angenähert durch T_{air} bzw. T_s)	[K]
T_{air}	Aussenluft-Temperatur	[K]
T_{RL}	Eintrittstemperatur des Heizkreisfluids in die Wärmepumpe ("Rücklauf-Temperatur")	[K]
$T_{RL,i}$	Rücklauf-Temperatur des Heizkreisfluids nach Austritt aus Wärmeabgabesystem i	[K]
T_s	Eintrittstemperatur der Sole bzw. des Wassers in die WP (Verdampfer-seitig)	[K]
T_v	Kondensationstemperatur im WP-Kondensator (Heizkreis-seitig)	[K]
T_{VL}	Austrittstemperatur des Heizkreisfluids aus der Wärmepumpen ("Vorlauf-Temperatur")	[K]
$T_{VL,i}$	Eintrittstemperatur des Heizkreisfluids in das Wärmeabgabesystem i nach allfälligen Mischern (Vorlauf-Temperatur des Wärmeabgabesystems i)	[K]

10.2 Griechische Symbole

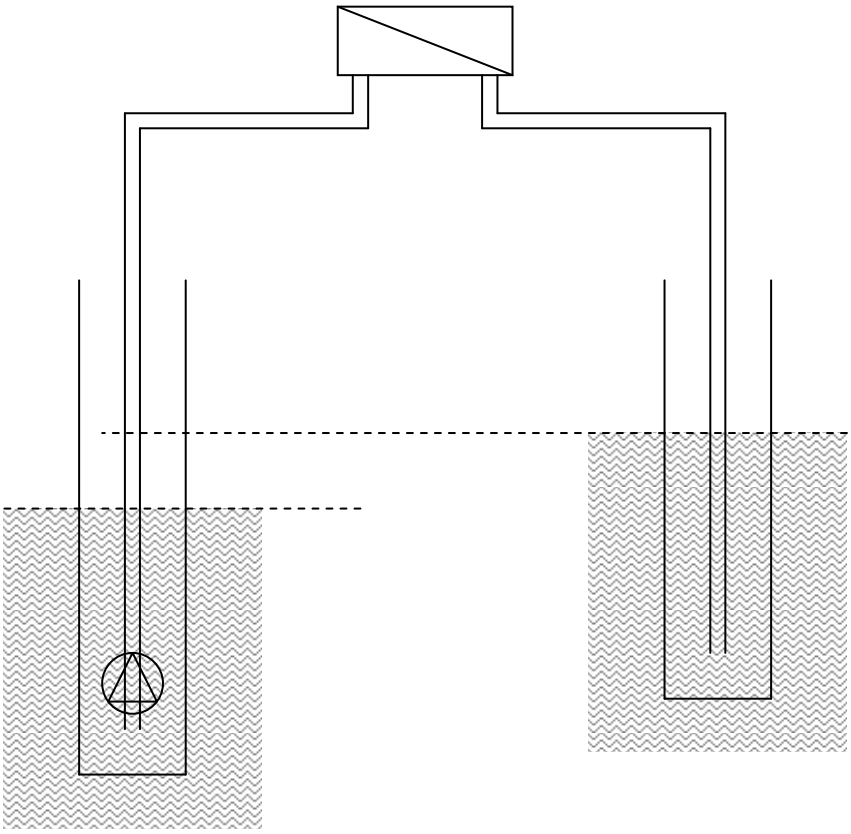
η_c	Gütegrad der Wärmepumpe	[-]

10.3 Abkürzungen

A	Luft (air), für Bezeichnung des Betriebspunktes einer Luft/Wasser-WP, z.B. A7/W50
B	Sole (brine), für Bezeichnung des Betriebspunktes einer Sole/Wasser-WP, z.B. B5/W35
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
S/W-WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
W	Wasser (z.B. für Bezeichnung des Betriebspunktes der WP oder Betriebsart der WP, z.B. W/W-WP)
W/W-WP	Wasser/Wasser-Wärmepumpe
WP	Wärmepumpe
WPZ	Wärmepumpen-Testzentrum (für Wärmepumpen-Messungen)

Anhang III: Markus Ochs, Arthur Huber: Brunnen-Modell für Wasser/Wasser-Wärmepumpen, Juni 2008

Brunnen-Modell für Wasser/Wasser-Wärmepumpen



Markus Ochs, Arthur Huber 12. Juni 2008

Huber Energietechnik AG
Ingenieur- und Planungsbüro
Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich
Tel. 044 422 79 78 Fax 044 422 79 53
http://www.hetag.ch Email: huber@hetag.ch

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung 3

2 Aufzubringender statischer Druck und Druckverluste 3
2.1 Statischer Druck 3
2.1.1 Rückgabeleitung in Wasser eingetaucht 3
2.1.2 Rückgabeleitung nicht in Wasser eingetaucht 5
2.2 Dynamischer Druck / Druckverluste 6

3 Temperatur des Grundwassers 6

4 Literaturverzeichnis 9

5 Symbolverzeichnis 9
5.1 Lateinische Symbole 9
5.2 Griechische Symbole 9

1 Kurzfassung

Die brunnenseitigen Druckverhältnisse bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Anlagen wurden untersucht.

Für Grundwasseranlagen wurde die Temperatur des Grundwassers in Abhängigkeit der Tiefe berechnet.

2 Aufzubringender statischer Druck und Druckverluste

Die relevanten Temperaturen für Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Anlagen wurden im Bericht "COP-Berechnung durch Interpolation" im Kapitel über Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen definiert.

Bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Anlagen wird das Wasser, dem Wärme entzogen werden soll, in einem Entnahmebrunnen (auch Saugbrunnen genannt) gefördert und dessen Wärme in der Regel mittels einem Wärmetauscher/Zwischenkreislauf auf die Wärmepumpe gebracht. Das geförderte Wasser wird danach durch den Rückgabebrunnen (auch Schluckbrunnen genannt) wieder dem Grundwasser zugeführt. Entnahme- und Rückgabebrunnen sollten mindestens 10 - 15 m auseinanderliegen. Als Wärmequelle können z. B. Grundwasser, Seewasser, Flusswasser oder Abwasser dienen.

Ein Unterschied zu einer Sole/Wasser-WP-Anlage besteht darin, dass das Wasser von einer Tauchpumpe gefördert wird, die sich unten im Saugbrunnen befindet.

2.1 Statischer Druck

Wenn das zu fördernde Wasser (Dichte ρ) eine Höhendifferenz ΔH zu überwinden hat, so muss die Tauchpumpe dazu folgende statische Druckdifferenz Δp_{st} aufbringen (g die Fallbeschleunigung):

$$\Delta p_{stat} = \rho \, g \, \Delta H \qquad \text{Gl. 2-1}$$

Zur Ermittlung der Höhendifferenz ΔH ist zu unterscheiden, ob die Rückgabeleitung ins Rückgabe-Wasserreservoir eingetaucht ist oder nicht.

2.1.1 Rückgabeleitung in Wasser eingetaucht

Wenn die Rückgabeleitung vollständig in das Rückgabewasserreservoir eingetaucht ist, so ist die für die statische Druckdifferenz massgebende Höhendifferenz ΔH gegeben durch die Höhendifferenz zwischen dem rückgabeseitigen Wasserspiegel und dem entnahmeseitigen Wasserspiegel. Die Situation ist dargestellt in Abb. 2.1.

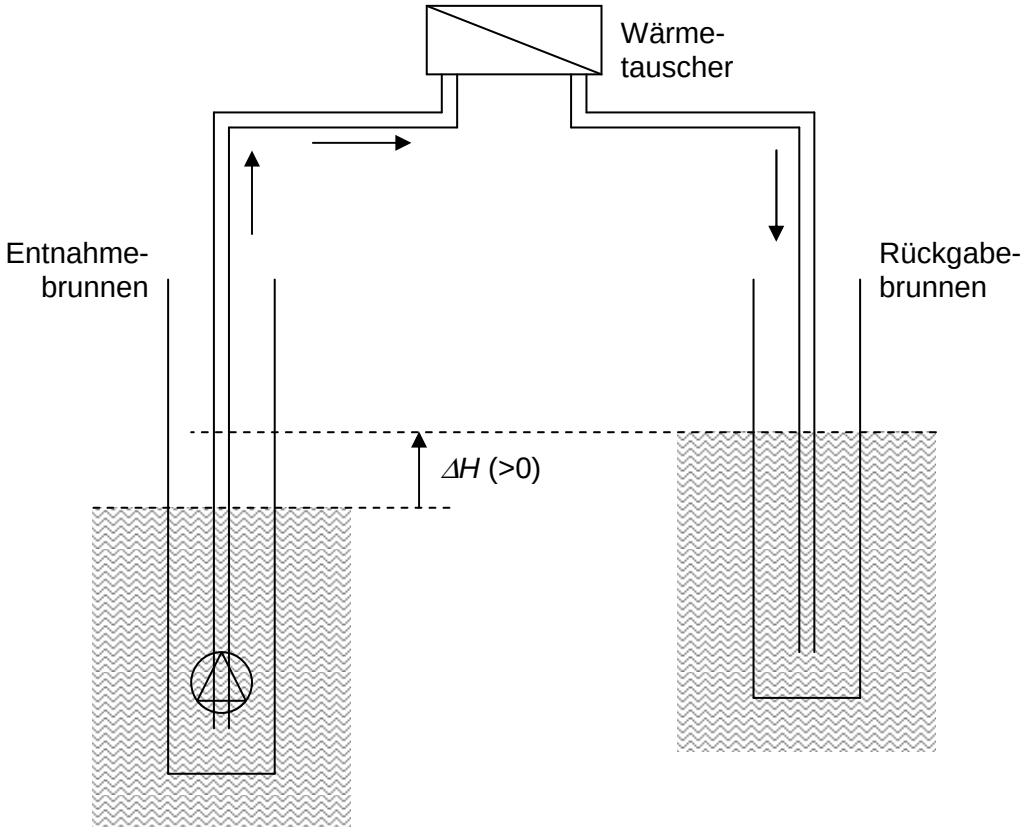


Abb. 2.1: Zu überwindende Höhendifferenz ΔH für den Fall, dass die Rückgabeleitung in Wasser getaucht ist.

Liegt der rückgabeseitige Wasserspiegel tiefer als der entnahmeseitige Wasserspiegel, so wird ΔH negativ. Damit wird die Tauchpumpe um den statischen Druck Δp_{st} entlastet.

Im folgenden einige Bemerkungen zur Bestimmung der Höhendifferenz ΔH bei den verschiedenen Nutzungstypen.

Seewasser-Nutzung: Sind Entnahme- und der Rückgabeleitung beide im See eingetaucht, so ist im Normalbetrieb keine Höhendifferenz zu überwinden und kein statischer Druck aufzubringen. (Nur bei der Inbetriebnahme der Anlage muss zum Füllen der Leitung eine Höhendifferenz überwunden werden.)

Flusswasser-Nutzung: Häufig liegen Entnahme- und Rückgabeleitung nicht weit auseinander, sodass der Höhenunterschied durch das Gefälle des Flusses im allgemeinen vernachlässigt werden kann.

Grundwasser-Nutzung: Einerseits hat ein Grundwasserstrom meist ein Gefälle, ähnlich einem Fluss. Dieser Höhenunterschied ist aber im allgemeinen vernachlässigbar. Denn der folgende Effekt führt zu einem erheblich grösseren Höhenunterschied: Wegen der Porosität des Lockergesteins, durch welches das Grundwasser fliesst, ergibt sich eine gewisse Durchlässigkeit (Strömungswiderstand) des Lockergesteins. Das hat zur Folge, dass sich um die Entnahmeleitung herum der Wasserspiegel senkt, solange bis der Gradient gross genug ist, dass der Zustrom des

radial nachfliessenden Wassers gleich gross ist wie der des nach oben geförderten Wassers. Analog kommt es um die Rückgabeleitung herum zu einer Erhöhung des Wasserspiegels, weil sich das ausströmende Wasser wegen der begrenzten Durchlässigkeit des Lockergesteins zu stauen beginnt. Dies wiederum solange, bis der Gradient gross genug ist, dass der Strom des radial wegfliessenden Wassers gleich gross ist wie der des nach unten geförderten Wassers. Somit stellt sich die massgebende stationäre Höhendifferenz ΔH zwischen dem erhöhten rückgabeseitigen Wasserspiegel und dem gesenkten entnahmeseitigen Wasserspiegel erst nach einer gewissen Zeit ein. ΔH muss im allgemeinen durch eine Modellierung abgeschätzt werden.

2.1.2 Rückgabeleitung nicht in Wasser eingetaucht

Wenn die Rückgabeleitung nicht in Wasser getaucht ist, sondern in Luft endet, so ist die für die statische Druckdifferenz massgebende Höhendifferenz ΔH gegeben durch die Höhendifferenz zwischen dem Ende der Rückgabeleitung und dem entnahmeseitigen Wasserspiegel. Die Situation ist dargestellt in Abb. 2.2.

Liegt das Ende der Rückgabeleitung tiefer als der entnahmeseitige Wasserspiegel, so wird ΔH negativ. In diesem Fall wird wiederum die Tauchpumpe um den statischen Druck Δp_{st} entlastet.

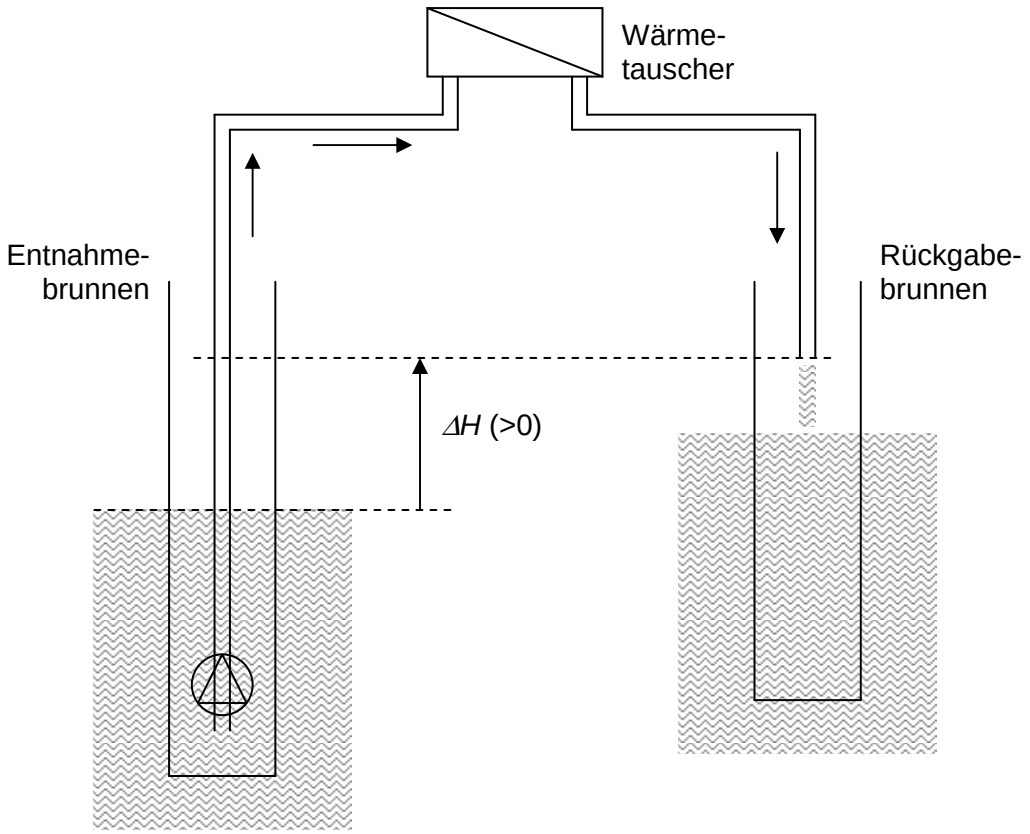


Abb. 2.2: Zu überwindende Höhendifferenz ΔH für den Fall, dass die Rückgabeleitung nicht in Wasser getaucht ist.

2.2 Dynamischer Druck / Druckverluste

Zur Förderung des Wassers vom Entnahmebrunnen bis zum Rückgabebrunnen muss zudem der Druckverlust überwunden werden, der sich durch Reibung, Ablösung etc. im Leitungssystem ergibt (Entnahmeleitung, Wärmetauscher bzw. Verdampfer, Rückgabeleitung). Bei den Leitungen ist für die Druckverlustberechnung die gesamte Leitungslänge zu berücksichtigen, also auch derjenige Teil der Leitungen, der entnahme- und rückgabeseitig in Wasser eingetaucht ist. Massgebend für die Druckverlustberechnungen ist wie üblich der dynamische Druck p_{dyn}:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2}\rho v^2 \qquad \text{Gl. 2-2}$$

3 Temperatur des Grundwassers

Es soll für den Programmbenutzer ein Vorschlagswert angezeigt werden für die monatlichen Temperaturen des zu fördernden Wassers. Dabei soll nur der Fall der Grundwasserförderung betrachtet werden.

Es wird angenommen, dass das Grundwasser in einer bestimmten Tiefe x die gleiche Temperatur hat wie das Erdreich in der gleichen Tiefe x.

Die Erdreichtemperatur $\theta(x,t)$ in Abhängigkeit der Tiefe x im Erdreich und der Zeit t ändert sich unter dem Einfluss des Jahreszeitverlaufs der Temperatur des Aussenklimas. Es werden folgende Näherungen getroffen:

- Der zeitliche Temperaturverlauf $\theta(x=0,t)$ an der Erdoberfläche sei gegeben durch den Jahresverlauf der Aussenluft-Temperatur.
- Das Maximum der Aussenluft-Temperatur werde Mitte Juli erreicht bzw. das Minimum Mitte Januar (dies trifft für europäische Klimazonen bis auf wenige Tage zu, vgl. Zürcher und Frank (1998), p. 118) und der Verlauf der Aussenluft-Temperatur sei sinus- bzw. cosinusförmig.

Damit wird:

$$\theta(x=0,t) = \theta_m - \theta_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \qquad \text{Gl. 3-3}$$

Darin ist θ_m die Jahresmitteltemperatur der Aussenluft und θ_0 die Amplitude der Jahrestemperaturschwankung. T ist die Zeitperiode, d. h. T = 1 a = $3.1536 \cdot 10^7$ s.

Der Zeitnullpunkt t = 0 in Gl. 3-3 entspricht Mitte Januar. Die Monatsmitten entsprechen folgenden Zeitpunkten t:

t/T = 0 ≙ Mitte Januar
t/T = 1/12 ≙ Mitte Februar
t/T = 2/12 ≙ Mitte März
t/T = 3/12 ≙ Mitte April
...
t/T = 11/12 ≙ Mitte Dezember

In Abb. 3.1 ist als Beispiel der Temperaturverlauf $\theta(x=0,t)$ dargestellt für eine Jahresmitteltemperatur θ_m = 10°C und eine Amplitude der Temperaturschwankung θ_0 = 8°C.

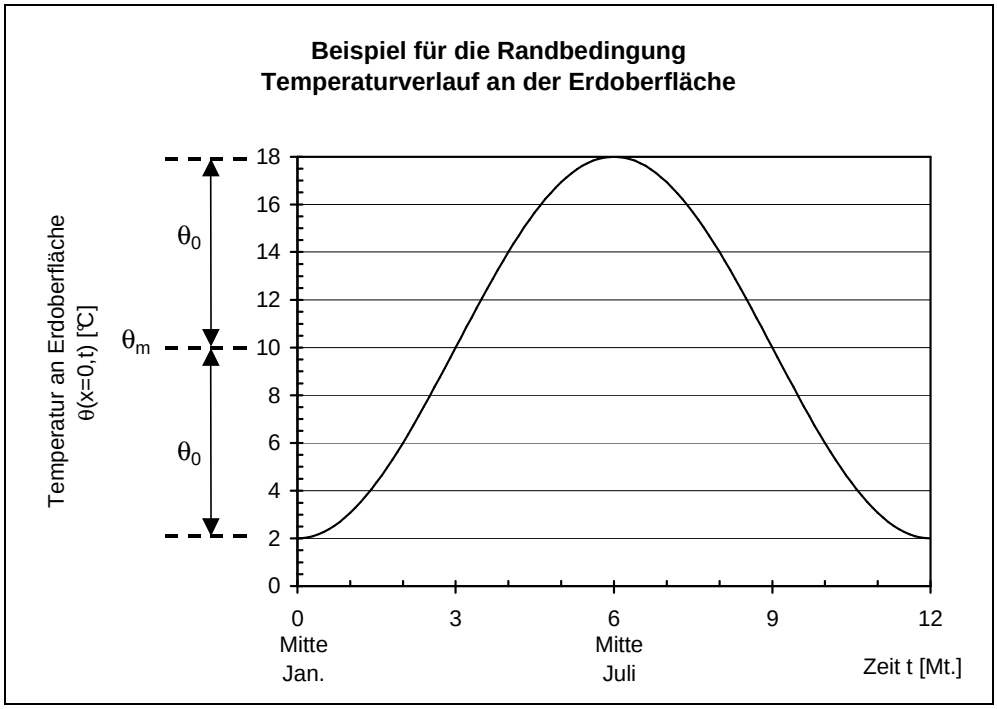


Abb. 3.1: Beispiel für den Temperaturverlauf an der Erdoberfläche (mit den Annahmen θ_m = 10°C und θ_0 = 8°C).

Sind die Jahresmitteltemperatur θ_m und die Amplitude θ_0 der Jahrestemperaturschwankung nicht aus den Klimadaten bekannt, so können sie näherungsweise wie folgt berechnet werden (unter der Annahme, dass Januar der kälteste Monat ist und Juli der wärmste):

$$\theta_m \approx \frac{\theta_{Jan} + \theta_{Juli}}{2} \qquad \text{Gl. 3-4}$$

$$\theta_0 \approx \frac{\theta_{Juli} - \theta_{Jan}}{2} \qquad \text{Gl. 3-5}$$

Die Erdreichtemperatur $\theta(x,t)$ in Abhängigkeit der Tiefe x im Erdreich und der Zeit t ist (vgl. Zürcher und Frank (1998), p.8):

$$\theta(x,t) = \theta_m - \theta_0 \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot T}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t - x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot T}}\right) \qquad \text{Gl. 3-6}$$

Die Temperaturleitfähigkeit a ist definiert als:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \qquad \text{Gl. 3-7}$$

Darin ist λ die Wärmeleitfähigkeit der Erde, ρ deren Dichte und c_p deren spezifische Wärmekapazität.

Zur Berechnung von konkreten Vorschlagswerten der monatlichen Temperaturen des zu fördernden Grundwassers können z. B. folgende Annahmen getroffen werden:

- Klima: Es wird die Klimastation Zürich SMA gewählt:

  Jahresmitteltemperatur θ_m = 9.4 °C

  Amplitude der Temperaturschwankung θ_0 = 9.0 °C

- Stoffdaten des Erdreichs: Es wird Moräne gewählt:

  Wärmeleitfähigkeit λ = 1.6 W/(m·K)

  Dichte ρ = 2'200 kg/m^3

  spezifische Wärmekapazität c_p = 900 J/(kg·K)

  Daraus ergibt sich die Temperaturleitfähigkeit $a = 8.08 \cdot 10^{-7}$ m^2/s

Mit diesen Annahmen können nun mit Gl. 3-6 die monatlichen Erdreich- bzw. Grundwassertemperaturen $\theta(x,t)$ in Abhängigkeit der Tiefe x berechnet werden.

Als Beispiel sind in Tabelle 1 die monatlichen Grundwassertemperaturen berechnet für eine Erdreichtiefe x = 5 m:

Monat	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Grundwassertemp. [°C]	9.7	8.9	8.2	7.9	7.9	8.4	9.1	9 .9	10.6	10.9	10.9	10.4

Tabelle 1: Monatliche Grundwassertemperaturen in einer Tiefe von x = 5 m.

Bei einer Grundwassertiefe ab ca. 10 - 15 m und tiefer kann in guter Näherung angenommen werden, dass die Grundwassertemperatur übers Jahr konstant bleibt und der Jahresmitteltemperatur θ_m des Aussenklimas entspricht (Gl. 3-6 für grosse x).

4 Literaturverzeichnis

Zürcher, C.; Frank, T. (1998): "Bauphysik. Bau und Energie", vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B. G. Teubner Stuttgart.

5 Symbolverzeichnis

5.1 Lateinische Symbole

a	Temperaturleitfähigkeit, $a=\lambda/(\rho \cdot c_p)$	[m²/s]
c_p	spezifische Wärmekapazität	[J/(kg·K)]
g	Fallbeschleunigung (9.81 m/s²)	[m/s²]
ΔH	Höhendifferenz	[m]
p_{dyn}	dynamischer Druck	[N/m²]
p_{st}	statischer Druck	[N/m²]
t	Zeit	[s]
T	Periodendauer	[s]
x	Tiefe im Erdreich	[m]

5.2 Griechische Symbole

λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
ρ	Dichte	[kg/m³]
θ	Temperatur	[K]
θ_m	Jahresmitteltemperatur der Aussenluft	[K]
θ_0	Amplitude der Temperatur der Aussenluft	[K]