



Solarwärme-Anlage: aufgeständerte Kollektoren auf Flachdach. (Anlagen-Foto: Solarline-Güttinger AG)

Solarwärme: Software für die Anlagen-Dimensionierung

# Effiziente Planung thermischer Solaranlagen mit Polysun<sup>®</sup> und THD

Mit Polysun<sup>®</sup> und THD ist erstmals eine Softwarelösung verfügbar, mit der Solaranlagen effizient und vollständig simulationstechnisch geplant werden können. THD ergänzt die thermodynamische Planung mit Polysun um die Dimensionierung des Rohrnetzes und den Nachweis der Stagnationssicherheit.

Ralph Eismann, FHNW Muttenz\*

THD wurde im Rahmen eines BFE-Projekts für Planer und Installateure entwickelt (Eismann et al. 2017). In der Oktoberausgabe 10/17 von HK-Gebäudetechnik (S.14) wurde der Funktionsumfang von THD bereits vorgestellt (Eismann 2017a). In diesem Beitrag wird der Planungsablauf anhand eines nachvollziehbaren Beispiels Schritt für Schritt erläutert.

## Energetische Planung mit Polysun

Die Planung einer Solaranlage beginnt mit dem Energiekonzept und der Klärung der baulichen Randbedingungen. Bei der thermodynamischen Dimensionierung mit Polysun<sup>®</sup> werden, unter anderem, die Speichergrösse, der Wärmeübertrager sowie Fabrikat und Anzahl der Kollektoren festgelegt. Damit man hier das Beispiel leicht nachvollziehen kann, wurde die «Variante 9h: Raumheizung (Solarthermie, Grossanlage)» für den Standort Rapperswil ohne Änderung übernommen. Die Simulation mit der vorgegebenen Konfiguration ergibt eine erforderliche Anzahl von 49 Kollektoren.

Polysun ab Version 10.0 bietet die Möglichkeit, jene Anlagendaten und Simulationsergebnisse zu exportieren, die für die anschliessende thermohydraulische Dimensionierung benötigt werden. Dazu wählt man in Polysun unter «Varianten» den Befehl «Variante für Thermohydraulik (THD) exportieren» und speichert die generierte Datei im gewünschten Ordner ab.

## Thermohydraulische Planung mit THD

Nach der energetischen Dimensionierung werden die Pumpe, das Rohrnetz und das Expansionsgefäss mit THD dimensioniert. Das Programm ist als Excel/VBA-Code unter Windows lauffähig. THD stellt vier Arbeitsblätter für die Spezifikation des Kreislaufs zur Verfügung. Ausschnitte dieser Arbeitsblätter sind hier auf den nächsten Seiten dargestellt. Daneben gibt es weitere Arbeitsblätter mit Katalogen für Kollektoren, Pumpen, Plattenwärmeübertrager und Armaturen. Diese können durch den Anwender beliebig erweitert werden. Die vier Arbeitsblätter werden der Reihe nach abgearbeitet.

## Arbeitsblatt

### «Kollektorfeld + Betriebsweise»

Die thermohydraulische Dimensionierung beginnt stets mit der Definition des Kollektorfelds und der Betriebsweise der Anlage. Ein Ausschnitt des Arbeitsblatts ist in Abb.1 dargestellt. Die Einträge in den grau hinterlegten Bereichen können importiert werden. Dazu spezifiziert man den Pfad (1), in welchem die mit Polysun generierte Datei liegt. Danach betätigt man die darunterliegende Schaltfläche, um die verfügbaren Dateien anzuzeigen und wählt schliesslich die zu importierende Datei (2) aus. Bei einem neuen Projekt wählt man «überschreiben». Falls nur die Daten in diesem Arbeitsblatt geändert werden sollen, wählt man «aktualisieren».

Bei den Betriebsdaten handelt es sich um Extremwerte aus dem Datensatz der Jahressimulation. Es liegt im Ermessen der Planerin und des Planers, die Werte gegebenenfalls anzupassen und die Simulation unter geänderten Randbedingungen zu wiederholen. In diesem Beispiel wird die maximale Vorlauftemperatur auf 100°C reduziert

und ein Gesamtvolumenstrom von 5000 l/h gewählt. THD schlägt eine Fließgeschwindigkeit in den Vor- und Rücklaufleitungen von mindestens 0.5 m/s vor und berechnet den zugehörigen Innendurchmesser (3) als Vorschlag für die Dimensionierung des Rohrnetzes.

Der Kollektorkatalog in Polysun ist für detaillierte Angaben zur Kollektorhydraulik vorbereitet. In der heutigen Praxis werden diese wichtigen Daten jedoch nicht publiziert und müssen beim Hersteller nachgefragt werden. Beim Import erhält man daher die Meldung, dass das in den Kollektorkatalog von THD importierte Modell noch ergänzt werden muss. Für den Zweck dieses Beispiels ist es ausreichend, mit «Mäander 4 Anschl.» ein Fabrikat zu wählen, bei dem die Spezifikation vollständig ist. Dieser Kollektor besitzt einen Mäanderabsorber mit integrierten Sammelleitungen. Nach der Wahl erscheint im zuvor leeren Bereich (4) der Eintrag «parallel\_horizontal». Dies bedeutet, dass man den Kollektor nur parallel verschalten und in horizontalen Reihen anordnen darf.

Mit THD können verzweigte Kollektorfelder modelliert werden, die aus einer Anzahl m Kollektorreihen mit je n Kollektoren bestehen. Nachteilig ist, dass die Anzahl Kollektoren in THD von der Anzahl in Polysun abweichen kann. Vorteilhaft ist hingegen, dass mehrreihige Felder durch sehr wenige Eingaben realitätsnah abgebildet werden können. In diesem Beispiel wird festgelegt, dass eine Kollektorreihe aus 10 Kollektoren besteht. THD berechnet die erforderliche Zahl identischer Reihen, sodass die Anzahl Kollektoren mindestens gleich der Anzahl aus Polysun ist.

Die Reihenanschlussleitungen können aus zwei unterschiedlichen Abschnitten bestehen, beispielsweise aus einem Welschlauch und einem Stahlrohr. Die Feldleitungen dienen zur Verbindung der Kollektorreihen. Ihre Länge entspricht meist dem Reihenabstand. Der Druckverlust des Kollektorfelds wird mit Hilfe einer Korrelation berechnet, basierend auf dem gemessenen Druckverlust. Die Druckverluste der Feldverrohrung und die Temperaturabhängigkeit der Fluideigenschaften werden berücksichtigt.

**Arbeitsblatt «Druckhaltung»**

Es muss nur die Art der Druckhaltung und das Sicherheitsventil spezifiziert

Abb. 1: Kollektorfeld und Betriebsweise.

Kreislaufelemente	Rohrdim.	Länge m	Wendepunkt m	Parallele Rohre	Anzahl Winkel	Höhendiff. m	Isolation mm	Fläche m²	Druck barg	Durchfluss l/hm²	Polysun l/hm²	Die Summe aller Höhendifferenzen muss null sein:		
												0.0	Dicke	
1 Druckhaltung												spezif. Aussen = a		
2 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	10			4	0	20						2.73	35
3 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	12			2	12	20							
4 Rohr C-Stahl Mapress	42x1.5	5			2	0	20							
5 Kollektorfeld														
6 Rohr C-Stahl Mapress	42x1.5	5			3	0	20							
7 Rohr C-Stahl Mapress	42x1.5	12			2	-12	20							
8 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	10			4	0	20							
9 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	0.5			2	-0.5	20							
10 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	0.5			2	0.5	20							
11 Platten-Wärmetauscher														
12 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	2			4	0	20							
13 Kugelhahn														
14 Pumpe														
15 Kugelhahn														
16 Rückschlagventil														
17 Rohr C-Stahl Mapress	54x1.5	2			4	0	20							

Abb. 2: Spezifikation des Kreislaufs. MAG = Membran-Druckausdehnungsgefäß.

werden. Für die Druckhaltung wird ein Membran-Druckausdehnungsgefäß (MAG) vorgesehen. In diesem Beispiel wird angenommen, dass der Hochpunkt des Kollektorfelds 12 m über dem Sicherheitsventil liegt. Damit das Gefäßvolumen möglichst klein und kostengünstig ist, muss der zulässige Druckbereich so gut wie möglich ausgenutzt werden. Daher wird ein Sicherheitsventil mit einem Ansprechdruck von 7 bar und einer Schliessdruckdifferenz von 0.1 bar gewählt. Interessierte Leser können eine Variante mit einem 6-bar-Sicherheitsventil mit 0.5 bar Schliessdruckdifferenz rechnen und einen Kostenvergleich anstellen. Die Druckhaltung wird nach einem neuen Verfahren berechnet, das auch die Unsicherheiten bei der Einstellung des Vor- und Fülldrucks berücksichtigt. Diese Unsicherheiten sind abhängig von der Güteklasse der Manometer und können ebenfalls spezifiziert werden. Alle weiteren Angaben, die zur Dimen-

sionierung der Druckhaltung erforderlich sind, werden aus den Daten des Kreislaufs automatisch berechnet.

**Arbeitsblatt «Kreislauf»**

Abb.2 zeigt die vervollständigten Einträge für den Kreislauf. Alle Komponentenklassen (1) sind als produktspezifische Kataloge hinterlegt. Dies hat den Vorteil, dass man nur jene Dimensionen wählen kann, die am Markt verfügbar sind. Ausserdem erhält man gleichzeitig eine Stückliste für die Ausführung. Weil man auch die Höhendifferenzen der einzelnen Rohrabschnitte eingeben kann, erhält man automatisch die erforderliche Randbedingung für die Druckhaltung. In der rechten Spalte (2) wird angegeben, ob sich die jeweilige Komponente ausserhalb oder innerhalb des Gebäudes befindet.

Vor dem Eintritt in den Plattenwärmetauscher ist ein Siphon angeordnet, der durch zwei 0.5 m lange Rohrstücke modelliert ist. Der Siphon sorgt dafür, dass



sich der Dampf im Stagnationsfall nicht bis in den Wärmetauscher ausbreiten kann. Mit diesen Angaben ist die Solaranlage vollständig spezifiziert.

Durch Betätigen der Schaltfläche «Kreislauf+MAG» werden Durchfluss, Fließgeschwindigkeit und Druckverlauf im Kreislauf berechnet. Der spezifische Durchfluss und der Druck am Referenzpunkt werden ausgegeben (3). Anhand der drei Diagramme im Arbeitsblatt «Kreislauf» lässt sich feststellen, ob die gewählten Komponenten und deren Dimensionen sinnvoll sind.

Abb.3 zeigt den Druckverlauf entlang des Kreislaufs. Die Länge des Kollektorfelds wird als Länge einer Kollektorreihe dargestellt. Die Feldverrohrung wird vereinfachend als Summe von vier Feldleitungen und einer Reihenanschlussleitung abgebildet. Der Druck in diesen Leitungen ist konstant, weil deren Druckverlust rechnerisch dem Kollektorfeld zugeordnet wird. Damit der Druck am Referenzpunkt der Druckhaltung bestimmt werden kann, wird gleichzeitig auch das MAG dimensioniert. Dessen Volumen hängt unter anderem vom maximalen Dampfvolmen bei Stagnation ab, das in diesem Stadium der Dimensionierung noch nicht bekannt ist. THD berechnet das Gefässvolumen unter der vorläufigen Annahme, dass das Dampfvolmen das 1,5-fache des Kollektorinhalts beträgt.

Abb.4 zeigt die Fließgeschwindigkeit (schwarz) in den entsprechenden Abschnitten des Kreislaufs. Ausserdem ist diejenige Fließgeschwindigkeit (rot) dargestellt, ab der ein Luftvolumen, falls es sich im entsprechenden Rohrabschnitt befindet, in der Strömung abtransportiert wird. Diese Fließgeschwindigkeit heisst daher Selbstentlüftungsgeschwindigkeit. Liegt die Fließgeschwindigkeit über der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit, so kann der Kreislauf im laufenden Betrieb entlüftet werden. In diesem Beispiel macht es Sinn, den automatischen Luftabscheider vor dem Eintritt in den Plattenwärmetauscher anzuordnen.

Im Bereich des Kollektorfelds sind die entsprechenden Geschwindigkeiten im letzten Abschnitt der Feldleitung, in den zwei Abschnitten einer Reihenanschlussleitung und in der ersten Verteil- und Sammelleitung einer Kollektorreihe dargestellt. Naturgemäss gibt es bei parallelgeschalteten Kollektoren stets Bereiche, in denen die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit nicht erreicht werden kann.

### Arbeitsblatt «Stagnation»

Durch Simulation eines Stagnationserignisses wird nachgewiesen, dass der Dampf weder den Wärmeübertrager noch das MAG erreicht. Gleichzeitig wird das Ausdehnungsgefäss dimensioniert, wobei dessen Temperaturanstieg und das effektive Dampfvolmen berücksichtigt werden.

Abb.5 zeigt einen Ausschnitt des Arbeitsblatts «Stagnation». In diesem werden die Ausdehnungsleitung und das Vorschaltgefäss definiert (1). Falls man zulässt, dass der Dampf das Vorschaltgefäss erreicht, kann das Dampfvolmen relativ gross werden. Dies erfordert ein entsprechend grosses und teures MAG. Es ist daher meist günstiger, einen Rippenrohrkühler einzubauen, in dem der Dampf kondensieren kann.

Die rosa hinterlegten Zellen zeigen Simulationsergebnisse an. In diesem Beispiel bleibt die maximale Dampfreichweite (2) auf die Vorlaufleitung bzw. auf den Kondensator beschränkt. Das Volmen des Vorschaltgefässes wurde so gewählt, dass die maximale Temperatur am Eintritt in das MAG (3) 50°C nicht übersteigt. Nachdem der Dampf einen Grossteil der Flüssigkeit aus dem Kollektorfeld in die Anschlussleitungen verdrängt hat, bleibt noch eine Rest-

menge von 5,18 kg zurück. Diese Restmenge wird im Lauf der Stagnation verdampfen, als Dampf in die Anschlussleitungen eindringen und dort kondensieren. Die rote Linie in Abb.6 zeigt den Verlauf der Dampfleistung des Kollektorfelds. Diese nimmt rasch ab, weil die dünnen Absorberrohre rasch austrocknen. Der spezifizierte Kollektortyp besitzt Sammelleitungen, die mit dem Absorberblech verbunden sind. Diese enthalten einen beträchtlichen Anteil der Restmenge, liefern aber nur einen geringen Anteil der Dampfleistung. Daher nimmt die Dampfleistung nach 30 Min. nur langsam ab. Sobald der Dampf nach etwa 27 Min. den Kondensator erreicht, nimmt die Geschwindigkeit der Dampfausbreitung (grüne Linie) stark ab.

Nach rund 29 Min. fällt die Dampfleistung unter die Verlustleistung der dampfgefüllten Rohrleitungen, worauf die Dampfreichweite wieder abnimmt.

Falls man anstelle eines MAG eine Kompressordruckhaltung einsetzt, muss der Systemdruck rund 3 bar höher eingestellt werden! Der Dampf würde sonst den Wärmeübertrager und das Ausdehnungsgefäss erreichen. Näheres zu diesem Fall kann dem Schlussbericht und dem Fachbuch entnommen werden. →

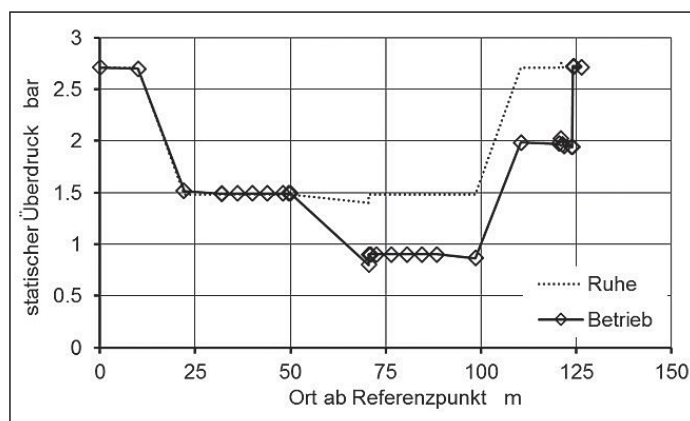


Abb. 3: Druckverlauf im Ruhezustand und im Betrieb.

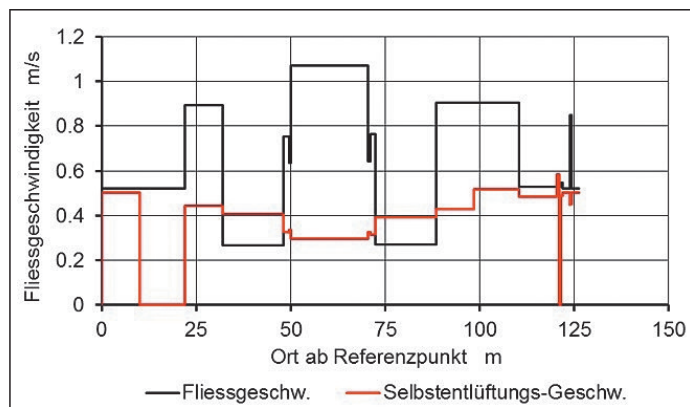


Abb. 4: Fließgeschwindigkeiten und jeweilige Selbstentlüftungsgeschwindigkeit (rot) in den verschiedenen Abschnitten.

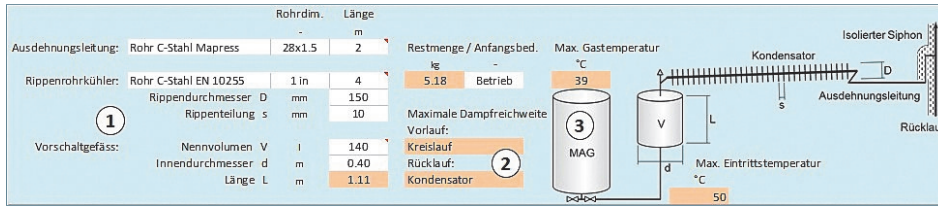


Abb. 5: Ausdehnungsleitung, Kühler und Vorschaltgefäß.

Abb. 7 zeigt drei Diagramme, die zur Inbetriebnahme des MAG und der Anlage dienen. Idealerweise werden die Diagramme ausgedruckt und an das Gefäß geklebt. Weil der Gasdruck in einem geschlossenen Behälter von der Temperatur abhängt, muss die Temperatur des MAG vor dem Einstellen des Vordrucks gemessen werden, beispielsweise mit einem Infrarotthermometer. Im Diagramm auf der rechten Seite werden die Temperatur des MAG eingetragen, beispielsweise 20 °C (1), und der entsprechende Vordruck abgelesen. Nachdem der Vordruck des MAG eingestellt ist, kann der Kreislauf aus einem Vorratstank mit Hilfe einer Jet-Pumpe befüllt und gespült werden. Bis zum Abschluss des Spülvorgangs kann sich der Kreislauf erwärmen haben. In diesem Beispiel wird mit einer mittleren Kreislauftemperatur von 40 °C gerechnet. Diese Temperatur trägt man im linken Diagramm (2) ein. Der maximale Fülldruck (3) von 3.35 bar gilt für den

Fall, dass das MAG eine Temperatur von 10 °C hat. Weil die Temperatur des MAG aber 20 °C beträgt, muss der Druck mit Hilfe des mittleren Diagramms auf den korrekten Wert von 3.47 umgerechnet werden. Mit Hilfe dieser Diagramme kann der Füllzustand der Anlage in jedem beliebigen Betriebszustand kontrolliert werden. Weil das Diagramm die Unsicherheiten bei der Einstellung der Anlagekomponenten berücksichtigt, kann die Anlage auf den maximal zulässigen Druck gefüllt werden. Dadurch erhält man das maximale Reservevolumen Flüssigkeit. Erreicht der Systemdruck die gestrichelte Linie, muss die Anlage gewartet werden.

**Schlussfolgerungen und Ausblick**

Das Planungswerkzeug THD in Kombination mit Polysun® setzt neue Maßstäbe bei der effizienten Dimensionierung von Solaranlagen. Die konsequente Anwendung dieser Werkzeuge ermöglicht nicht nur die rigorose Optimierung der

Anlagenkosten. Durch die hohe Planungssicherheit können auch Fehler bei der Planung und Inbetriebnahme und die dadurch verursachten Fehlerkosten vermieden werden.

THD kann kostenfrei bezogen werden unter <https://sourceforge.net/projects/thd/>.

In dem zugrundeliegenden Fachbuch (Eismann 2017b) sind die Berechnungsverfahren ausführlich hergeleitet. Ausserdem werden praktische Hinweise für die Ausführung und die Inbetriebnahme gegeben.

Gegenwärtig können Solaranlagen mit mäanderförmig von unten nach oben durchströmten Kollektoren sowie Solar Kreise mit einem Kollektorfeld und einem Abnehmer modelliert werden. Bei Bedarf kann das Modell für andere Kollektorhydrauliken erweitert werden. ■

\*Autor: Prof. Dr. Ralph Eismann ist Professor für Gebäudetechnik an der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW in Muttenz, Institut für Energie am Bau, [www.fhnw.ch](http://www.fhnw.ch)

**Literatur:**

- Eismann R. (2017a) THD: Programm zur thermohydraulischen Dimensionierung von Solaranlagen. HK-Gebäudetechnik (10):14; PDF unter [www.hk-gt.ch](http://www.hk-gt.ch) > Dossiers > Solarwärme-Anlagen > 10/17 THD.
- Eismann R. (2017b) Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen : Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Eismann R., Föllner F., Witzig A. (2017) Programm THD: Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

**Software-Download:**

<https://sourceforge.net/projects/thd/>

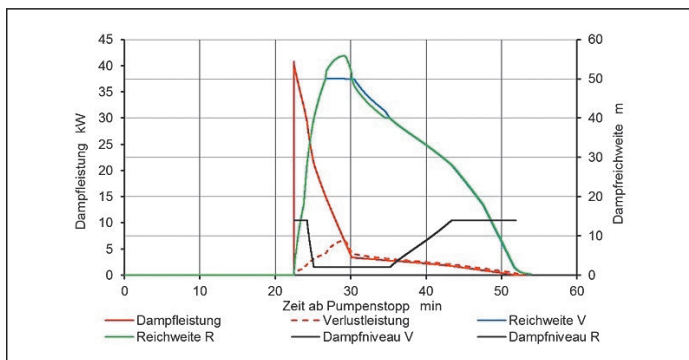


Abb. 6: Dampfleistung und Dampfreichweite.

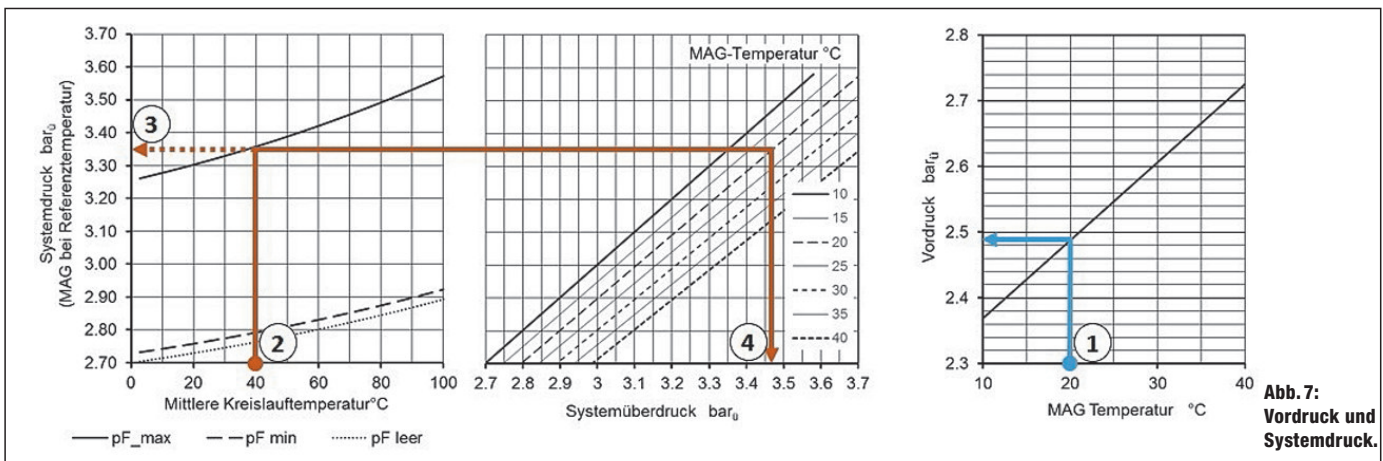


Abb. 7: Vordruck und Systemdruck.