



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Schlussbericht

Programm THD - Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen



Datum: 01. März 2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solarwärme
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

ETH Zürich / IET-LKE, Prof. H.-M. Prasser
Sonneggstrasse 3
CH-8092 Zürich
<http://www.lke.mavt.ethz.ch/de>

ZHAW Winterthur
Institute of Computational Physics ICP
Wildbachstrasse 21
CH-8400 Winterthur
<https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/icp/>

Autoren:

Ralph Eismann, ETHZ, eismann@lke.mavt.ethz.ch
Andreas Witzig, ZHAW, andreas.witzig@zhaw.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Jean-Christophe Hadorn, jchadorn@baseconsultants.com
BFE-Vertragsnummer: SI/501387-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
Summary	5
1 Einleitung	6
1.1 Motivation und Ziel	6
1.2 Thermohydraulik – eine kurze Definition	6
1.3 Grundlagen	7
1.4 Dank	7
2 Planung mit Polysun und Datenexport	8
3 Thermohydraulische Planung mit THD	9
3.1 Spezifikation des Kollektorfeldes	9
3.2 Dimensionierung des Kreislaufs	13
3.2.1 Rohr- und Pumpendimensionierung	14
3.2.2 Nachweis der Entlüftbarkeit	17
3.3 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes	17
3.4 Nachweis der Dampfreichweite	20
3.4.1 Ablauf der Stagnation	20
3.4.2 Modellierung	21
3.5 Anlagenvariante für high-flow Betrieb	25
3.5.1 Glattrohr-Wärmetauscher und zöllige Rohre für den Kreislauf	25
3.5.2 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes	27
3.5.3 Nachweis der Dampfreichweite	27
3.5.4 Einfluss der Wärmekapazität des Rohres auf die Dampfreichweite	29
3.5.5 Einfluss der Druckhaltung auf die Dampfreichweite	30
4 Komponentenkataloge	33
5 Diskussion und Ausblick	35
5.1 Diskussion	35
5.2 Validierungsbedarf	36
5.3 Schlussfolgerungen	37
6 Literatur	38



Abkürzungsverzeichnis

MAG	Membran-Druckausdehnungsgefäß
THD	Thermo-Hydraulische Dimensionierung
VBA	Visual Basic for Applications
XML	Extended Mark up Language



Zusammenfassung

Die thermische Solarenergie bietet effiziente Lösungen für zahlreiche wärmetechnische Anwendungen. Ihr Potenzial kann jedoch nur ausgeschöpft werden, wenn es gelingt, die Kosten signifikant zu senken. In diesem durch das Bundesamt für Energie BFE geförderten Projekt wurde ein einfach zu bedienendes thermohydraulisches Rechenprogramm entwickelt. Dieses umfasst die folgenden Funktionen:

- Rohrnetz- und Pumpendimensionierung
- Nachweis der Entlüftbarkeit
- Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes
- Nachweis der Stagnationssicherheit

Die Anwendung des Programms ermöglicht nicht nur die kostenoptimale Gestaltung des Kreislaufs, sondern vermeidet zudem durch Planungsfehler verursachte Betriebsstörungen und Schadenfälle. Eine Schnittstelle zum Simulationsprogramm Polysun ermöglicht außerdem die nahtlose Integration in den etablierten Planungsprozess.

Summary

Solar thermal energy offers efficient solutions for many thermal applications. However, as a prerequisite for the realization of its potential, the costs have to be reduced significantly. In a project funded by the Swiss Federal Office of Energy SFOE a thermal-hydraulic software tool has been developed. The tool offers the following features:

- Dimensioning of pipe network and pump
- Proof of de-aeration capability.
- Dimensioning of membrane expansion vessels
- Proof of stagnation safety

The application of the software allows to cost-optimize solar circuits and at the same time prevents malfunctions and defects caused by design errors. An interface to the simulation tool Polysun provides a seamless integration into the established planning process.



1 Einleitung

Damit die Solarthermie ihr Potenzial im Zuge der Energiewende entfalten kann, müssen die Anlagenkosten signifikant gesenkt werden.

1.1 Motivation und Ziel

Während für die energetische Dimensionierung leistungsfähige Simulationsprogramme zur Verfügung stehen, fehlen die entsprechenden Programme zur thermohydraulischen Dimensionierung weitgehend. Es war bisher nicht möglich, die Rohrdimensionen und die Pumpe des Solarkreislaufs präzise und kostenoptimal auszulegen. Auch konnten die Stagnationssicherheit und die Entlüftbarkeit nicht rechnerisch nachgewiesen werden. Es gibt daher ein beträchtliches Einsparpotenzial, sowohl bei den Gesteungskosten von Solaranlagen und durch die Vermeidung von Fehlerkosten als auch beim Planungsaufwand.

Im Rahmen dieses Projektes wurde das thermohydraulische Rechenprogramm THD in VBA unter Excel entwickelt. Die Anwendung des Programms ermöglicht nicht nur die kostenoptimale Gestaltung des Kreislaufs sondern vermeidet zudem durch Planungsfehler verursachte Betriebsstörungen und Schadenfälle. Außerdem wurden sowohl das Simulationsprogramm Polysun als auch THD mit einer Schnittstelle versehen. Über diese Schnittstelle können die Anlagendaten und die Eckdaten der thermodynamischen Simulation an THD übertragen und für die thermohydraulische Dimensionierung nutzbar gemacht werden.

1.2 Thermohydraulik – eine kurze Definition

Der Begriff Thermohydraulik bedeutet im Wesentlichen folgendes: Ein thermohydraulisches System umfasst alle flüssigkeitsgefüllten Komponenten eines Kreislaufes inklusive ihrer hydraulischen und thermischen Eigenschaften. Die Erhaltungssätze der Energie, des Impulses und der Masse bilden die theoretische Grundlage zur Beschreibung von Prozessen, die in diesem System ablaufen. Für die praktische Bewältigung von Dimensionierungsaufgaben sind diese Erhaltungssätze als eindimensionale partielle Differentialgleichungen formuliert. Diese bilden zusammen mit zahlreichen Konstitutivgleichungen, beispielsweise für die Druckverluste und die Wärmeübertragung, ein Gleichungssystem. Die Gleichungen dieses Systems sind gekoppelt, weil dieselben Zustandsgrößen, beispielsweise die Drücke und die Temperaturen, gleichzeitig in mehreren Gleichungen auftreten. Entsprechend sind auch die einzelnen Dimensionierungsaufgaben voneinander abhängig.

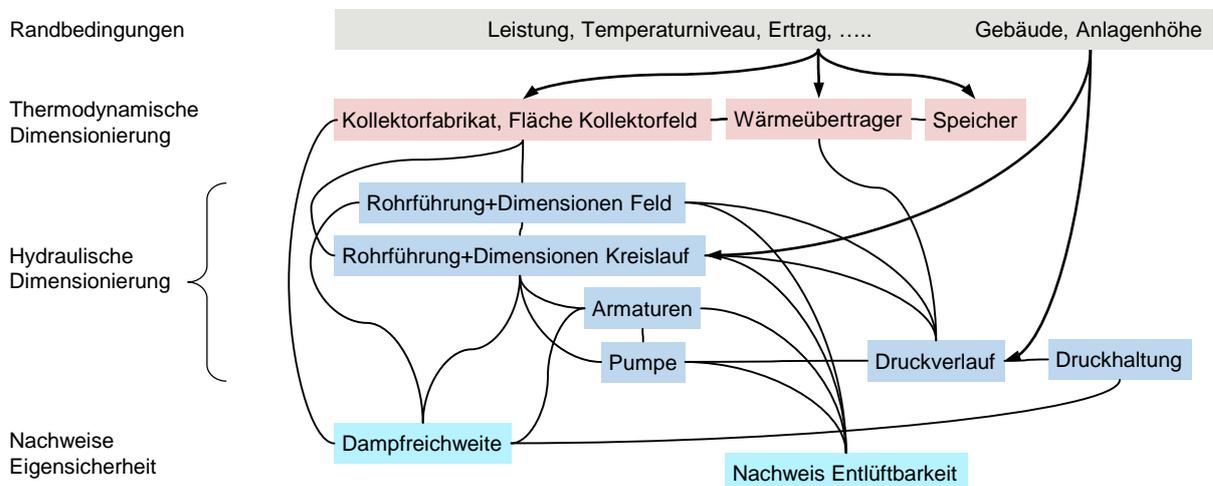


Abbildung 1-1 Abhängigkeiten bei der Dimensionierung von Solaranlagen. Wechselseitige Abhängigkeiten sind ohne Pfeile dargestellt.



Die wichtigsten Abhängigkeiten sind in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt. Die Theorie, die von grundsätzlich gekoppelten, eindimensionalen Gleichungen ausgeht, heißt Thermohydraulik.

Die Vorteile dieses Ansatzes sind vielfältig. Einerseits können die Anlagenkosten durch zielgenaue Dimensionierung minimiert werden. Andererseits können Betriebsstörungen einer Solaranlage, beispielsweise durch freie Gase, ungenügenden Durchfluss oder zu große Dampfreichweite durch entsprechende Nachweise vermieden werden.

Damit die thermohydraulische Dimensionierung vollständig rechnerbasiert und durch numerische Verfahren weitgehend automatisiert durchgeführt werden kann, wurden sämtliche Komponenten des Kreislaufes durch mathematische Modelle abgebildet. Alle Modelle wurden als stetige Funktionen ihrer Zustandsgrößen formuliert. Dadurch wird erreicht, dass die numerischen Verfahren zur Lösung der Gleichungssysteme konvergieren.

Die thermohydraulische Methode stammt aus der Nukleartechnik und wird in fortschrittlichen Programmen zum Nachweis der Störfallsicherheit von Kernkraftwerken eingesetzt. Der Einsatz in der Solarthermie ist neu und bietet gegenüber der bisherigen Praxis entscheidende Vorteile. Der Hauptvorteil ist die hohe Planungssicherheit. Dadurch können Anlagenkosten minimiert und Fehlerkosten vermieden werden. Die thermohydraulische Methode kann auch zur Analyse von Störfällen eingesetzt werden. Durch die Kopplung und Automatisierung der Dimensionierungsaufgaben ist die Planungsarbeit selbst sehr effizient und damit kostengünstig. Es ist ohne weiteres möglich und auch wünschbar, diese Methode in anderen Gebieten der Gebäudetechnik einzusetzen.

1.3 Grundlagen

Dieses Projekt wurde unter Leitung der ETHZ gemeinsam mit den Projektpartnern ZHAW und der Vela Solaris AG durchgeführt. Der Schlussbericht basiert auf den Konferenzbeiträgen der Autoren [1], [2] und [3] aus dem Jahr 2016. Die dem Programm THD zugrundeliegenden Modelle und Rechenverfahren sind in dem soeben erschienenen Fachbuch [4] ausführlich dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden die Module des Programms in der Reihenfolge dargestellt, die sich bei der Planung einer Solaranlage ergibt.

1.4 Dank

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie für die Finanzierung dieses Projektes und den Herren Andreas Eckmanns und Jean-Christophe Hadorn für das entgegengebrachte Vertrauen.



2 Planung mit Polysun und Datenexport

Die Planung einer Solaranlage beginnt mit der Entwicklung eines Energiekonzeptes, der Abklärung der baulichen Gegebenheiten und der energetischen Dimensionierung, beispielsweise mit Polysun. Die soeben veröffentlichte Polysun Version bietet die Möglichkeit, sämtliche Anlagendaten sowie die für die thermohydraulische Dimensionierung benötigten Eckdaten aus dem Datensatz der Simulation als XML-Datei zu exportieren.

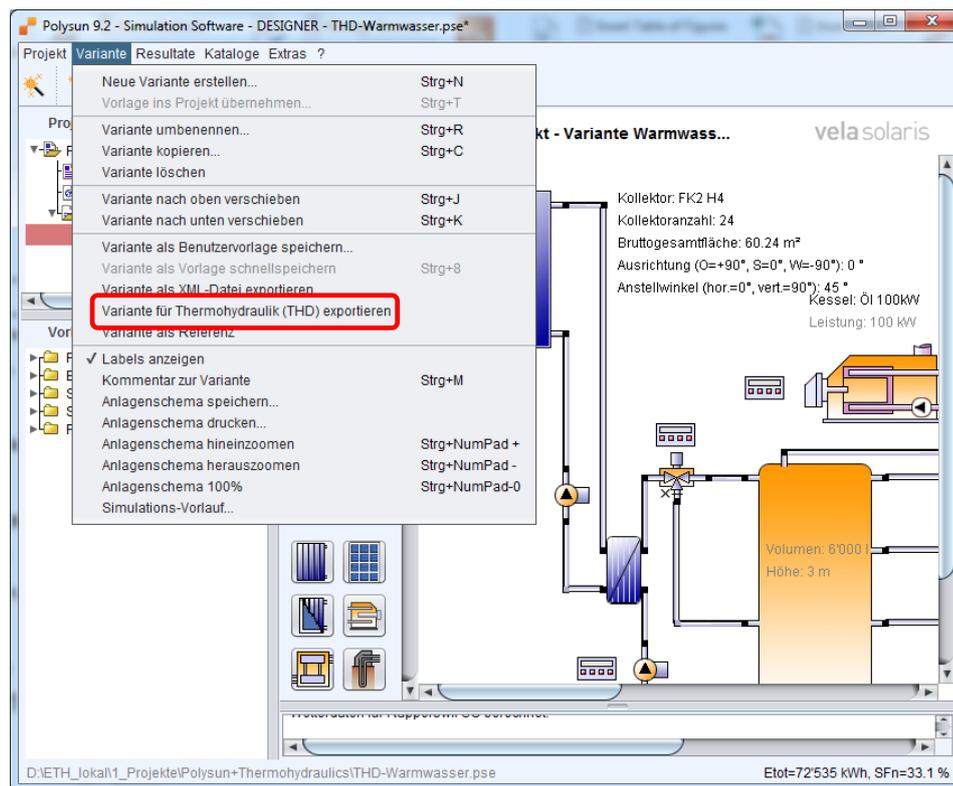


Abbildung 1-1 Polysun Menu für den Datenexport

Abbildung 2-1 zeigt das Menu in Polysun zum Datenexport. Die XML-Datei enthält folgende Daten:

- Projektdaten: Projektname, Ort, Höhe über Meeresniveau.
- Kollektorfeld: Kollektortyp, Anzahl Kollektoren, Neigung der Kollektoren, Leistungsdaten, Kollektorfläche, Kollektorvolumen, Durchmesser und Länge eines Absorberrohres, Anzahl paralleler Absorberrohre.
- Rohrleitungen: Dimension und Länge der Rohrsegmente, Dicke der Wärmedämmung sowie die Information, ob das Rohrelement innerhalb oder außerhalb des Gebäudes liegt.
- Glattröhrwärmetauscher: Fläche, Rohrdimension, Anzahl paralleler Rohre sowie Höhendifferenz zwischen Ein- und Austritt.
- Plattenwärmetauscher: Fläche und spezifische Übertragerleistung.
- Pumpe: Bezeichnung sowie neun Punkte der Pumpenkennlinie.
- Betriebsdaten: Maximale Bestrahlungsstärke, maximale Vorlauftemperatur, maximale und minimale Außentemperatur.



3 Thermohydraulische Planung mit THD

Das Vorgehen bei der thermohydraulischen Planung wird anhand des Beispiels nach Abbildung 3-1 dargestellt. Die Anlage besteht aus 24 Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern und integrierten Sammelleitungen sowie einem Speicher mit 4000 l Inhalt. Zwei Varianten werden diskutiert. In der Variante 1 erfolgt die Beladung des Speichers über einen externen Plattenwärmetauscher im Low-Flow Betrieb. Die Variante 2 soll als high-flow Anlage betrieben werden. Sie besitzt anstelle des Plattenwärmetauschers einen Glattrohrwärmetauscher im unteren Bereich des Speichers.

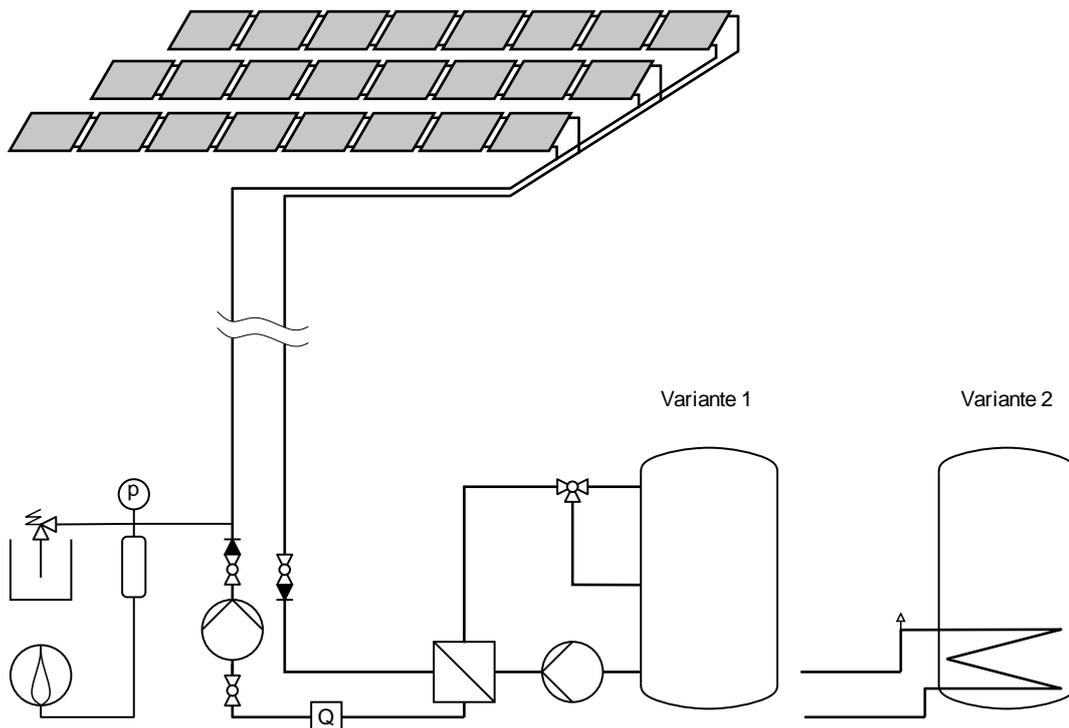


Abbildung 3-1 Solaranlage, Variante 1 low-flow, Variante 2 high-flow.

3.1 Spezifikation des Kollektorfeldes

Für die thermohydraulische Planung stellt THD vier Tabellenblätter zur Verfügung. Diese werden in der Reihenfolge besprochen, in der sie bei der Dimensionierung abgearbeitet werden. Abbildung 3-2 zeigt die vollständige Eingabemaske des Tabellenblattes *Kollektorfeld+Betriebsweise*.

Weißer Felder dienen zur Dateneingabe durch den Nutzer. Orange hinterlegte Zellen sind Rechenwerte. Graue Zellen stellen Werte dar, die aus Polysun bzw. aus den in THD hinterlegten Katalogen importiert werden können. Die in Klammern gesetzten Zahlen stellen den Bezug zum Text her und sind in THD nicht sichtbar. Es gibt fünf Bereiche. Der Importbereich (1) ermöglicht den Datenimport aus Polysun. Im Bereich (2) sind die Projektdaten dargestellt. Im Bereich (3) sind der Kollektortyp, die Leistungsdaten und die Anzahl Kollektoren spezifiziert. Im Bereich (4) werden



die Anordnung der Kollektoren und die Feldverrohrung festgelegt. Die Eckdaten des Betriebs und des Ruhezustands sind im Bereich (5) festgelegt.

THD Version: 27.02.2017

Objekt THD+Polysun (2)

Ort Rapperswil SG Höhenlage über Meeresebene m 417

Kollektorfeld (3)		Hydraulische Verschaltung (4)	
Kollektortyp	FK2 H4	Möglichkeit der Verschaltung	parallel_horizontal m ² 55.9
Anzahl Kollektoren aus Polysun	24	Serieschaltung	Anzahl serielle Kollektoren pro Strang 1
Konversionsfaktor	0.814	Parallelschaltung	Anzahl Kollektorstränge pro Reihe 8
Verlustkoeffizient a1	W/m ² K 3.527	Parallelschaltung	Anzahl identischer Reihen 3
Verlustkoeffizient a2	W/m ² K ² 0.012		Anzahl Kollektoren in THD 24
Fläche eines Kollektorelements	m ² 2.33		Differenz zur Vorgabe aus Polysun 0
Länge in Neigungsrichtung	m 1.2		Kollektorfläche in THD m ² 55.9
Neigungswinkel	Grad 45		
Vertikale Ausdehnung des Kollektorfeldes	m 0.85		
Wärmekapazität des Kollektors	J/K 20597		
Stagnationstemperatur bei Normbedingungen	°C 201		

Reihenanschlussleitung	Rohrdimension	Rohrdim.	Länge	Winkel	Isolat.
Reihenanschlussleitung 1	Wellschlauch RS 341	DN 20	0.5	1	25 an Kollektor
Reihenanschlussleitung 2	Rohr C-Stahl Optipress	22x1.5	1	3	25 an Feldleitung

Feldleitungen	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	4	0	25
---------------	------------------------	--------	---	---	----

Betriebsbedingungen (5)		Import aus Polysun (1)	
Wärmeträgermedium	Tyfofor_LS	Aktueller Pfad	D:\ETH_lokal\1_Projekte\Polysun+Thermohydraulics
Maximale Bestrahlungsstärke	W/m ² 1112	Zu importierende Variante	THD-Warmwasser_Controllers_System6.xml
Maximale Vorlauftemperatur	°C 103	Was geschieht mit dem aktuellen Projekt?	Überschreiben
Maximale Umgebungstemperatur	°C 30	Überschreiben	
Minimale Umgebungstemperatur	°C -9	Verfügbare Dateien	THD+Polysun_Controllers_9a_TankInTank.xml
Gesamter Volumenstrom	l/h 839		THD+Polysun_Controllers_9h_SwitchingValve_largescale.xml
Temperaturhub bei max. Bestrahlungsstärke	K 43		THD+Polysun_Controllers_Schweizer_Metallbau_k.xml
maximale mittlere Fluidtemperatur	°C 81		THD+Polysun_Controllers_WW+HU 2 Glattrrohrwendel.xml
Maximale Rücklauftemperatur	°C 60		THD-Warmwasser_Controllers_System6.xml
Wirkungsgrad des Kollektorfeldes	- 0.62		
Leistung des Kollektorfeldes	kW 39		
Abschätzen des erforderlichen Rohrquerschnitts	mm 25		
Fliessgeschwindigkeit	m/s 0.47		

Abbildung 3-2 Tabellenblatt für den Import aus Polysun und für die Eingabe von Anlagendaten.

Diese Bereiche werden nachfolgend besprochen. Im Importbereich, der in Abbildung 3-3 vergrößert dargestellt ist, wird zunächst der Pfad spezifiziert, in welchem sich die durch Polysun generierten XML-Dateien befinden. Durch betätigen der Schaltfläche „Dateien anzeigen“ werden die verfügbaren Dateien aufgelistet und stehen als Menu im zweitobersten Eingabefeld zur Verfügung. Im drittobersten Feld kann man festlegen, ob das bestehende Projekt durch den Import vollständig überschrieben wird, oder ob nur die Daten im Tabellenblatt *Kollektorfeld+Betriebsweise* aktualisiert werden. Durch betätigen der untersten Schaltfläche werden die Daten importiert. Die Abbildung 3-4 zeigt die

Import aus Polysun

Aktueller Pfad
D:\ETH_lokal\1_Projekte\Polysun+Thermohydraulics Pfad auswählen

Zu importierendes Pojekt
THD-Warmwasser_Controllers_System6.xml Dateien anzeigen

Was geschieht mit dem aktuellen Projekt?
Aktualisieren Daten importieren

Verfügbare Dateien

THD+Polysun_Controllers_9a_TankInTank.xml			
THD+Polysun_Controllers_9h_SwitchingValve_largescale.xml			
THD+Polysun_Controllers_Schweizer_Metallbau_k.xml			
THD+Polysun_Controllers_WW+HU 2 Glattrrohrwendel.xml			
THD-Warmwasser_Controllers_System6.xml			

Abbildung 3-3 Eingabefelder und Schaltflächen für den Datenimport



Objektdaten. Die Höhenlage über Meeresniveau wird sowohl für die Dimensionierung der Druckhaltung als auch zur Berechnung des Zulaufdruckes der Pumpe benötigt.

Objekt	Projekt THD+Polysun		
Variante			
Ort	Rapperswil SG	Höhenlage über Meeresniveau	m 417

Abbildung 3-4 Objektdaten

Beim Datenimport aus Polysun wird die Typenbezeichnung des Kollektors, dessen Kenndaten sowie die Anzahl Kollektoren und die Kollektorneigung in den Bereich nach Abbildung 3-5 übertragen. Falls der Kollektortyp im Kollektorkatalog von THD noch nicht hinterlegt ist, wird ein neues Modell angelegt. Gegenwärtig stellt Polysun nicht alle Daten zu Verfügung, die für die Rohrnetzberechnung erforderlich sind. Es erscheint daher eine Meldung mit der Aufforderung, den neu angelegten Datensatz zu ergänzen. In der Zelle (a) ist ein Menu hinterlegt, in dem alle verfügbaren Kollektortypen aufgelistet sind. Der Kollektortyp kann auch aus diesem Menu festgelegt werden.

Kollektorfeld		
Kollektortyp		(a) FK2 H4
Anzahl Kollektoren aus Polysun	-	24
Konversionsfaktor	-	0.814
Verlustkoeffizient a1	W/m ² K	3.527
Verlustkoeffizient a2	W/m ² K ²	0.012
Fläche eines Kollektorelements	m ²	2.33
Länge in Neigungsrichtung	m	1.2
Neigungswinkel	Grad	45
Vertikale Ausdehnung des Kollektorfeldes	m	0.85
Wärmekapazität des Kollektors	J/K	20597
Stagnationstemperatur bei Normbedingungen	°C	201

Abbildung 3-5 Kollektordaten und Anzahl Module

Der Kollektortyp FK2 H4 ist ein Flachkollektor mit Mäanderabsorber und integrierten Verteil- und Sammelleitungen. Wie die Absorberrohre sind auch die Verteil- und Sammelleitungen mit dem Absorberblech durch Laserschweißen verbunden. Bis zu zehn Kollektoren können in horizontalen, einseitig angeschlossenen Reihen angeordnet werden.

Für die thermodynamische Dimensionierung ist die Spezifikation des Kollektorfeldes durch die Daten in den grau gefärbten Zellen in Abbildung 3-5 ausreichend. Für die thermohydraulische Dimensionierung muss zusätzlich die Anordnung der Kollektoren, deren Verschaltung sowie die Dimensionen der Feldverrohrung spezifiziert werden. Die Dimensionen der hydraulischen Verschaltung innerhalb des Kollektorelements sind in den Datenblättern der Hersteller nicht vollständig oder gar nicht offengelegt. Diese Angaben wären aber für eine regelrechte Rohrnetzberechnung erforderlich. Um dieses Problem zu lösen wurde eine Korrelation hergeleitet, die den Druckverlust eines verzweigten Kollektorfeldes in guter Näherung auf der Basis gemessener Druckverluste berechnet [4]. Diese Messungen werden durch akkreditierte Prüfinstitute im Rahmen der Kollektorprüfung durchgeführt. Durch Vergleiche mit detaillierten Rohrnetzberechnungen wurde nachgewiesen, dass die Druckverluste bei einseitigem Anschluss und beim Anschluss nach Tichelmann praktisch gleich sind. Beide Fälle können daher durch dieselbe Korrelation abgebildet werden. Die Korrelation berücksichtigt die Fluideigenschaften und beinhaltet die Anzahl n Kollektoren pro Reihe und die Anzahl m identischer Reihen im Kollektorfeld als Parameter. Die Druckverluste der Reihenanschlussleitungen und der Feldverrohrung werden ebenfalls berechnet. Durch die Form der Korrelation ist die Anzahl Kollektoren in THD stets durch das Produkt $n \times m$ definiert. Daher kann es zu Abweichungen gegenüber der in Polysun definierten Anzahl kommen. Solange das Kollektorfeld mit derselben Anzahl Reihen ausgeführt wird, ist die Auswirkung auf die Druckverlust vernachlässigbar. Der Vorteil für den Anwender ist, dass auch



ein großes Kollektorfeld durch sehr wenige Angaben spezifiziert werden kann. Dies geschieht im Bereich nach Abbildung 3-6. Es ist sinnvoll, zunächst die Begriffe Strang und Reihe zu definieren:

- Ein Strang besteht aus einem oder mehreren in Serie geschalteten Absorbern oder Kollektoren.
- Mehrere Stränge können in einer Reihe angeordnet und über Verteil- und Sammelleitungen parallel geschaltet werden.

Bei Flachkollektoren des spezifizierten Typs FK2 H4 besteht der Strang aus einem einzigen Absorber. Mehrere Kollektoren lassen sich über die integrierten Verteil- und Sammelleitungen parallel schalten und als horizontale Reihe anordnen. Diese Information ist im Kollektorkatalog hinterlegt und wird zur Information für den Nutzer dargestellt (a). Falls man beim Eintrag „Anzahl serielle Kollektoren pro Strang“ beispielsweise versucht, zwei Kollektoren in Serie zu schalten, gibt das Programm eine Fehlermeldung und setzt in (b) den korrekten Wert von 1 ein. Als nächstes gibt man die Anzahl Kollektoren pro Reihe ein. THD berechnet die minimale Anzahl identischer Reihen so, dass die berechnete Anzahl Kollektoren pro Feld gleich oder grösser ist als die Anzahl aus Polysun.

Hydraulische Verschaltung							
Möglichkeit der Verschaltung	parallel_horizontal	(a)	m ²	55.9			
Serieschaltung	Anzahl serielle Kollektoren pro Strang			1	(b)		
Parallelschaltung	Anzahl Kollektorstränge pro Reihe			8			
Parallelschaltung	Anzahl identischer Reihen		-	3			
	Anzahl Kollektoren in THD			24			
	Differenz zur Vorgabe aus Polysun		-	0			
	Kollektorfläche in THD		m ²	55.9			
			Rohrdim.	Länge	Winkel	Isolat.	
(c)	Rohrdimension		-	m	-	mm	
Reihenanschlussleitung 1	Wellschlauch RS 341		DN 20	0.5	1	25	
Reihenanschlussleitung 2	Rohr C-Stahl Optipress		22x1.5	1	3	25	
(d)	Feldleitungen		Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	4	0	25

Abbildung 3-6 Verschaltung der Kollektoren

Anschließend wird die Reihenanschlussleitung (c) definiert. Diese besteht häufig aus einem Stück Wellschlauch und einem längeren Stück Glattrohr. Die Anzahl Winkel definieren lokale Druckverluste durch 90° Richtungsänderungen. In diesem Beispiel werden auch Feldleitungen (d) benötigt, mit denen die drei Kollektorreihen parallel geschaltet werden. Die Rohrlänge ist grösser oder gleich dem Abstand der Kollektorreihen.

Schließlich werden in dem Bereich nach Abbildung 3-7 die Eckdaten des Betriebs aus der Jahres-simulation übertragen oder manuell vorgegeben. Aus diesen Daten wird die maximale Rücklauf-temperatur automatisch berechnet. Die Eckdaten des Betriebs werden für die Dimensionierung der Druckhaltung (MAG oder Kompressor) und den Nachweis der Dampfreichweite verwendet. Das Wärmeträgermedium muss durch den Anwender spezifiziert werden. Eine einfache aber sehr wertvolle Funktion ist die Berechnung Fließgeschwindigkeit bei der Eingabe eines Innendurchmessers.

Die Fließgeschwindigkeit in abwärts führenden Rohren sollte grösser als 0.5 m/s sein, aber 1 m/s möglichst nicht überschreiten. Auf der Grundlage dieser Abschätzung kann der Kreislauf modelliert werden.



Betriebsbedingungen		
Wärmeträgermedium		Tyfocor_LS
Maximale Bestrahlungsstärke	W/m ²	1112
Maximale Vorlauftemperatur	°C	91
Maximale Umgebungstemperatur	°C	30
Minimale Umgebungstemperatur	°C	-9
Gesamter Volumenstrom	l/h	839
Temperaturhub bei max. Bestrahlungsstärke	K	48
maximale mittlere Fluidtemperatur	°C	67
Maximale Rücklauftemperatur	°C	43
Wirkungsgrad des Kollektorfeldes	-	0.68
Leistung des Kollektorfeldes	kW	42
Abschätzen des erforderlichen Rohrquerschnitts	mm	25
Fließgeschwindigkeit	m/s	0.47

Abbildung 3-7 Eckdaten aus der Jahressimulation

3.2 Dimensionierung des Kreislaufs

In Polysun ist der Kreislauf symbolisch dargestellt. In der Praxis werden nur so viele Rohre modelliert, wie zur logischen Verbindung der Elemente erforderlich sind. Die in Polysun graphisch dargestellten Rohrlängen entsprechen daher nicht den tatsächlichen Verhältnissen. Polysun erlaubt jedoch, die den Rohrelementen zugeordneten Längen sowie die Querschnitte und die Dicke der Wärmedämmung der realen Situation entsprechend zu definieren. Für eine detaillierte Analyse können so in der Jahres-simulation die thermische Trägheit und die Wärmeverluste an die Umgebung korrekt berechnet werden. Die in Polysun gemachten Eingaben werden über die neu geschaffene Exportfunktion in eine XML-Datei geschrieben und von THD gelesen. Abbildung 3-8 zeigt einen Ausschnitt des THD-Tabellenblattes *Kreislauf* mit den Komponenten des Solarkreislaufs aus Polysun in der korrekten Reihenfolge, ausgehend vom Referenzpunkt der Druckhaltung. Die Rohre sind mit der in Polysun hinterlegten Bezeichnung, der Länge und der Dämmstärke dargestellt. Außerdem wird in der rechten Spalte durch den Eintrag „a“ angegeben, welche der Komponenten sich außerhalb der Gebäudehülle befindet.

Version: 09.02.2017							Kreislauf		Kreislauf+MAG			
Kreislaufelemente	Rohrdim.	Länge m	Wendel- Durchm. m	Parallele Rohre	Anzahl Winkel	Höhen - diff. m	Isolation mm	Fläche m ²	Druck bar ₀	Durchfluss l/hm ²	spezif. Polysun l/hm ²	Aussen = a
1 Druckhaltung	Die Summe aller Höhendifferenzen muss null sein: 0.0					2	Dicke am Referenzpunkt:				15	
2 Rohr	Gasrohr_1"	10					20					
3 Kollektorfeld												
4 Rohr	ferrohr_28:	10					20					a
5 Rohr	CNW_30_34	5					25					a
6 Platten-Wärmetauscher												
7 Rohr	Gasrohr_1"	5					25			32CNTB		
8 Pumpe	Regelparameter 0-1 (1 = max. Drehzahl):							1.0	Wilo-Star-ST 25/7			

Abbildung 3-8 Spezifikation des Kreislaufs nach Datenimport

Der durch Polysun berechnete spezifische Durchfluss von 15 l/hm² ist auf der Zeile 1 ganz rechts eingetragen. Er dient als Referenzwert.

In THD sind alle Elemente, also auch die Rohre, herstellerepezifisch definiert. Dies hat den Vorteil, dass man nur Dimensionen wählen kann, die auch verfügbar sind. Außerdem erhält man so gleichzeitig eine Stückliste für die Ausführung. In Polysun sind die Programmstrukturen für eine herstellerepezifische Katalogisierung der Rohre zwar auch gegeben. In der aktuellen Version sind diese Daten jedoch unvollständig. Die aus Polysun übertragenen Rohrdaten müssen daher in der Regel noch geändert werden.



Die Dateneingabe in THD ist vollständig ereignisgesteuert. Dies bedeutet, dass sich Formate sowie Inhalte von Kontextmenüs in Abhängigkeit der Eingabe ändern. Die Zellen in der Spalte *Kreislaufelemente* enthalten ein Menü folgender Komponentenklassen:

- Rohrfabrikate verschiedener Hersteller
- Absperrarmaturen
- Rückschlagventile
- Pumpen
- Glatrohr-Wärmeübertrager
- Plattenwärmeübertrager
- Durchflussmesser

Durch die Wahl einer Komponentenklasse werden alle Felder in derselben Zeile, die keine Eingabe erfordern, dunkelgrau gefärbt. Weil man unter den Komponentenklassen der Rohre auch ein bestimmtes Produkt wählt, werden im Eingabefeld rechts neben dem ausgewählten Rohrfabrikat nur die zugehörigen Dimensionen zur Auswahl gestellt. Dadurch ist die Dateneingabe sehr sicher und komfortabel. Die Tabelle muss durch den Anwender in Übereinstimmung mit dem Gebäudeplan ergänzt werden. Es können Zeilen eingefügt, gelöscht oder fortlaufend ergänzt werden. Das Programm nummeriert die Komponenten nach dem Berechnungsstart neu.

3.2.1 Rohr- und Pumpendimensionierung

Abbildung 3-9 zeigt die Tabelle, die in Übereinstimmung mit dem Gebäudeplan vervollständigt wurde. In der Spalte Kreislaufelemente sind alle Komponenten des Kreislaufes aufgelistet. Mit dem Rohrfabrikat sind auch die Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit, der thermische Ausdehnungskoeffizient und die Rauigkeit der Rohrwand festgelegt. Neben Rohrdimension und Rohrlänge müssen auch die Anzahl 90° Winkel sowie die Höhendifferenz zwischen Austritt und Eintritt des Rohrelementes spezifiziert werden. Die Entlüftbarkeit im durchströmten Zustand ist vom Neigungswinkel abhängig. Dieser wird aus der Höhendifferenz und der Rohrlänge berechnet. Bei der Eingabe prüft das Programm, ob der Kreislauf geschlossen ist: Die Summe aller Höhendifferenzen (a) muss null geben.

Version: 27.02.2017										Kreislauf		Kreislauf+MAG		Aussen = a	
Kreislaufelemente	Rohrdim.	Länge m	Durchm. m	Rohre	Winkel	Anzahl	Höhen-diff. m	Isolation mm	Fläche m ²	Druck bar ₀	spezif. Durchfluss l/hm ²	Polysun l/hm ²	Die Summe aller Höhendifferenzen muss null sein: 0.0 (a)		
													Wendel-	Parallele	
5 Druckhaltung	Höhe Referenzpunkt bezüglich MAG Anschluss										(b) 2	am Referenzpunkt:	1.90	18 (d)	15
6 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2				4	0	25							
7 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	10				1	10	25							
8 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	5				0	0	25							
9 Kollektorfeld														a	
10 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	5				0	0	25							
11 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	10				1	-10	25							
12 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2				4	0	25							
13 Kugelhahn														Trigriss RB17 DN 25	
14 Rückschlagventil														Trigriss DN 25	
15 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1.5				2	-1.5	25							
16 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1				2	0.5	25							
17 Platten-Wärmetauscher														WPL 7W1-GG-60	
18 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2				2	0	25							
19 Durchflussmesser														GWF MTW 25-3.5	
20 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1				2	0	25							
21 Kugelhahn														Trigriss RB17 DN 25	
22 Pumpe													Regelparameter 0-1 (1 = max. Drehzahl): (c)	0.7	Biral Redline A12
23 Kugelhahn														Trigriss RB17 DN 25	
24 Rückschlagventil														Trigriss DN 25	
25 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2				1	2	25							

Abbildung 3-9 Vollständige Spezifikation des Solarkreislaufs



Sehr wichtig ist die Höhenangabe des Referenzpunktes bezüglich dem Anschlussnippel des Ausdehnungsgefäßes (b). Der Grund wird im Kapitel Stagnation erläutert. Bei der Pumpenwahl kann zusätzlich ein Regelparameter zwischen null und eins definiert werden.

Dieser Detaillierungsgrad erlaubt es, den Druckverlauf entlang des Kreislaufs im Ruhezustand, im Betrieb und bei Stagnation zu berechnen. Außerdem wird bei der Simulation des Stagnationsverhaltens ermittelt, welche Kreislaufkomponente von Dampf erreicht wird.

Die Komponenten Druckhaltung, Kollektorfeld und Pumpe werden zur besseren Orientierung für den Anwender hervorgehoben. Anhand dieser Reihenfolge stellt das Programm automatisch fest, ob es sich bei der Druckhaltung um eine Saugdruckhaltung oder um eine Nachdruckhaltung handelt. Diese Information wird zur Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes verwendet. Durch die Wahl der Komponentenklassen Kugelhahn, Rückschlagventil, Durchflussmesser, Platten-Wärmetauscher wird in den freien Zellen rechts ein Menu zur Auswahl gestellt, das die Komponenten der jeweiligen Klasse enthält. Falls man aus dem Menu zur Pumpenwahl *Vorgegebener Durchfluss* wählt, wird der manuell eingegebene oder aus der vorangegangenen Berechnung vorhandene Wert (d) übernommen. In diesem Beispiel wurde der von Polysun vorgeschlagene Pumpentyp durch einen weniger leistungsfähigen Typ aus dem Pumpenkatalog von THD übernommen. Zusätzlich hat man die Möglichkeit, einen Drehzahlparameter (c) zwischen null und eins vorzugeben.

Mit diesen Angaben ist der Kreislauf vollständig bestimmt. Alle weiteren Größen, beispielsweise die Anlagenhöhe und das Anlagenvolumen, die Wärmekapazitäten und die Wärmedurchgangskoeffizienten der Rohre, berechnet das Programm aus den bereits eingegebenen Daten sowie aus den Katalogdaten, die den Modellen der Kreislaufkomponenten hinterlegt sind. Durch betätigen der Schaltfläche *Kreislauf+MAG* führt das Programm in einem iterativen Prozess die Dimensionierung des Membran-Druckausdehnungsgefäßes (MAG) und die Berechnung des Druckverlaufs bei Ruhe und im Betrieb durch. Dabei werden gleichzeitig folgende Druckrandbedingungen festgelegt bzw. geprüft.

- Der Druck am Hochpunkt des Kollektorfeldes ist stets grösser oder gleich dem erforderlichen Druck.
- Der Druck am Hochpunkt der Anlage ist stets grösser oder gleich dem erforderlichen Druck.
- Der Druck am Saugstutzen der Pumpe ist grösser oder gleich dem erforderlichen Zulaufdruck.
- Der Maximaldruck bleibt unter dem Ansprechdruck des Sicherheitsventils abzüglich dessen Schliessdruckdifferenz.

Mit dieser Prüfung ist auch der Fall abgedeckt, wo das Kollektorfeld unterhalb der Pumpengruppe angeordnet ist.

Abbildung 3-10 zeigt die vollständige Tabelle Kreislauf sowie den erforderlichen Druck am Referenzpunkt (a) und den auf die Aperturfläche des Kollektors bezogene Durchfluss (b) bei maximaler Vorlauftemperatur gemäß Abbildung 3-7. Der Wert von 19 l/hm² ist geringfügig höher als die Vorgabe von 15 l/hm².

Wenn man im Tabellenblatt *Kollektorfeld+Betriebsweise* die Vorlauftemperatur probeweise auf eine für die Warmwasserbereitung realistische Zieltemperatur von 70 °C ändert und den Drehzahlparameter 0.8 wählt, erhält man den Vorgabewert 15 l/hm². Die Diagramme rechts neben der Tabelle dienen der Übersicht und werden durch das Programm dynamisch angepasst.

Das obere Diagramm zeigt den Druckverlauf entlang des Kreislaufs bei Ruhe (c) und im Betrieb (d) bei maximaler Vorlauftemperatur. Anhand dieser Darstellung erkennt man, dass bei der hier vorliegenden druckseitigen Einbindung des MAG der Druck am Hochpunkt des Kollektorfeldes im Betrieb kleiner ist als im Ruhezustand. Wie erwartet, tritt am Kollektorfeld der größte Druckabfall auf. Ein „Flaschenhals“ durch die Wahl einer zu klein dimensionierten Komponente würde sofort auffallen.

Anhand der Anlagen- und Pumpenkennlinie im unteren Diagramm lässt sich beurteilen, ob die Förderleistung der Pumpe an die Anforderung der Anlage angepasst ist.



Version: 27.02.2017										Kreislauf		Kreislauf+MAG		Ausßen = a		
Die Summe aller Höhendifferenzen muss null sein:										0.0	Dicke	spezif.				
										Isolation	Druck	Durchfluss	Polysun			
										mm	bar _s	l/hm ²	l/hm ²			
										Fläche						
										m ²						
										am Referenzpunkt:	1.90	18	15			
										(a)	(b)					
Kreislaufelemente										Höhe	Referenzpunkt	bezüglich	MAG	Anschluss	2	
Rohrdim.	Länge	Wendel-	Parallele	Anzahl	Höhen-	Isolation	Fläche	Druck	Durchfluss	spezif.						
m	m	m	m	Winkel	diff. m	mm	m ²	bar _s	l/hm ²	Polysun						
5	Druckhaltung	28x1.5	2	4	0	25					a					
6	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	10	1	10	25					a					
7	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	5	0	0	25					a					
8	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2	0	0	25					a					
9	Kollektorfeld	28x1.5	5	0	0	25					a					
10	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	10	1	-10	25					a					
11	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2	4	0	25					a					
12	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1	2	-2	25										
13	Kugelhahn	28x1.5	1	2	0	25										
14	Rückschlagventil	28x1.5	1	2	0	25										
15	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1	2	0	25										
16	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1	2	0	25										
17	Platten-Wärmetauscher	28x1.5	2	2	0	25										
18	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1	2	0	25										
19	Durchflussmesser	28x1.5	1	2	0	25										
20	Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2	1	2	25										
21	Kugelhahn	28x1.5	2	1	2	25										
22	Pumpe	Regelparameter 0-1 (1 = max. Drehzahl): 0.9														
23	Kugelhahn															
24	Rückschlagventil															
25	Rohr C-Stahl Optipress															

Abbildung 3-10 Spezifikation des Kreislaufs und Resultate

Abbildung 3-11 zeigt den Druckverlauf im Ruhezustand und im Betrieb. Ebenfalls dargestellt sind die Druckverläufe des Kollektorfeldes und der Pumpe. Bei der Druckhaltung handelt es sich um eine Nachdruckhaltung, bei der der Referenzpunkt auf der Druckseite der Pumpe liegt. Aus diesem Grund ist der Druck am Hochpunkt im Betrieb um die Summe der Druckverluste reduziert. Dieses Diagramm dient gleichzeitig zur Orientierung für das folgende Diagramm zur Fließ- und Selbstentlüftungsgeschwindigkeit.

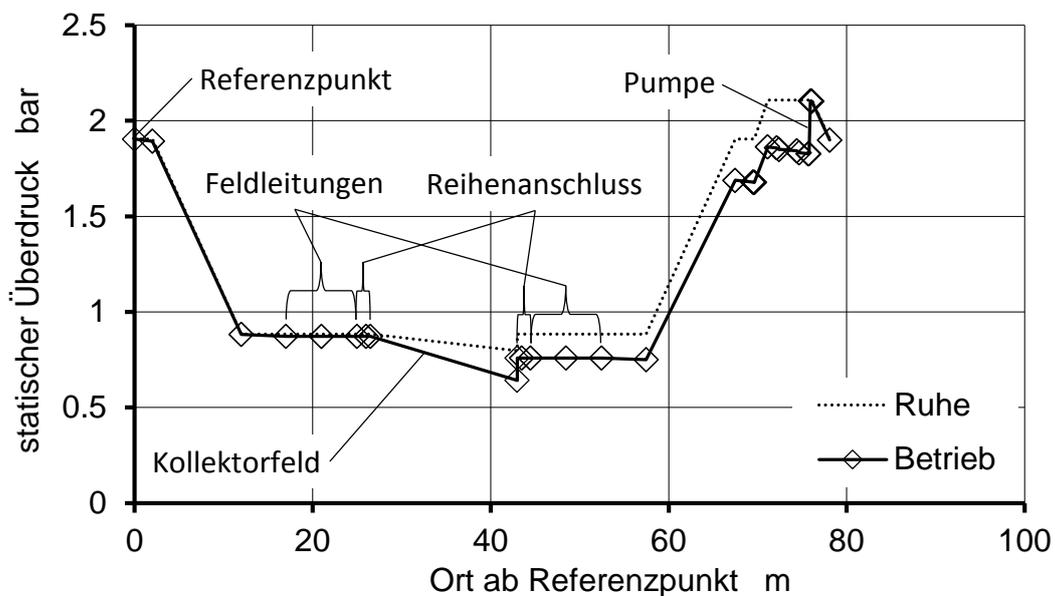


Abbildung 3-11 Druckverlauf im Ruhezustand und im Betrieb.



3.2.2 Nachweis der Entlüftbarkeit

Das mittlere Diagramm, dargestellt in der Abbildung 3-12, ist eine wertvolle Hilfe bei der Beurteilung der gewählten Querschnitte. Die schwarze Linie zeigt die Fließgeschwindigkeit entlang des Kreislaufes. Diese sollte in Rohrleitungen 1 m/s nicht überschreiten. Die rote Linie zeigt die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit, ab der Luft in der Strömung mitgefördert wird. Über- und Unterdimensionierung von Rohren und Komponenten wäre auch in diesem Diagramm sofort ersichtlich. Im Bereich des Kollektorfeldes sind nur die entsprechenden Geschwindigkeiten in der Feldverrohrung, den Reihenanschlussleitungen und in der ersten Verteil- und Sammelleitung einer Kollektorreihe dargestellt. Naturgemäß gibt es bei parallelgeschalteten Kollektoren stets Bereiche, in denen die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit nicht erreicht wird.

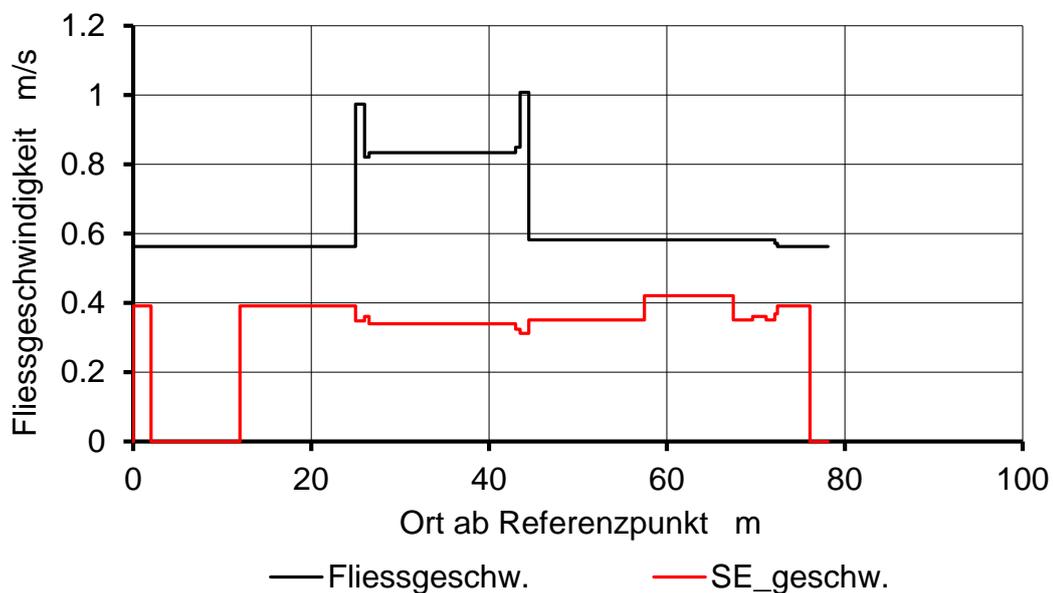


Abbildung 3-12 Fließ- und Selbstentlüftungsgeschwindigkeit

3.3 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes

Abbildung 3-13 zeigt das Tabellenblatt zur Dimensionierung der Druckhaltung. Es muss lediglich spezifiziert werden, ob Membran-Druckausdehnungsgefäß (MAG) oder eine Kompressordruckhaltung vorgesehen ist. Zusätzliche Angaben sind nicht erforderlich. Man kann jedoch alle Angaben auch von Hand eintragen und das MAG durch betätigen der Schaltfläche berechnen, unabhängig von der Rohrnetzberechnung. Die Referenztemperatur des Ausdehnungsgefäßes kann willkürlich festgelegt werden. Sie hat keinen Einfluss auf die Dimensionierung. Standardmäßig wird die Referenztemperatur auf 10 °C gesetzt. Das bei Stagnation entstehende Dampfvolmen ist jedoch unbekannt und kann erst beim Nachweis der Dampfreichweite berechnet werden. Für die erste Iteration trifft das Programm die Annahme, dass das Dampfvolmen das 1.5-fache der Summe aller Kollektorinhalte ist.



Version: 27.02.2017		Berechnen	
Höhenlage der Anlage über Meer	m	417	Mittlere Temperatur im Ruhezustand °C 1.1
Wärmeträgermedium	-	Tyfocon_LS	Wasservorlage minimal, Anteil des Gefäßsvolumens - 0.01
Anlageninhalt bei Referenzbedingungen	l	173.5	Reservevolumen minimal 3
Anlageninhalt bei Referenzbedingungen ohne Wasservorlage	l	167.6	Reservevolumen als Anteil des Kreislaufinhaltes - 0.02
Volumen des der Kollektorfeldes	l	41.3	Reservevolumen 3.4
Volumen der Vorlaufleitungen ausserhalb des Gebäudes	l	18.3	Wasservorlage gesamt l 5.9
Volumen der Vorlaufleitungen innerhalb des Gebäudes	l	7.1	
Volumen Rücklaufleitungen ausserhalb des Gebäudes	l	18.3	erforderlicher Zulaufdruck der Pumpe bar_ü -0.028
Volumen Rücklaufleitungen innerhalb des Gebäudes	l	28.8	Zuschlag zu Minimaldrücken im Kreislauf Δp_{z0} bar 0.1
Volumen des Wärmeübertragers	l	1.8	Vordruckreserve Teildruckzuschlag Δp_{z1} nach VDI 4708 bar 0.2
Dampfvolumen bei Stagnation	l	73	Unsicherheit Vordruck bar 0.2
Volumen Vorschaltgefäß	l	50	Unsicherheit Füll- bzw. Referenzdruck bar 0.1
Höhendifferenz MAG-Hochpunkt Anlage	m	10.8	
Höhendifferenz MAG-Hochpunkt Kollektorfeld	m	12.8	
Höhendifferenz MAG-Tiefpunkt Kollektorfeld	m	12.0	
Höhendifferenz MAG-Sicherheitsventil (Referenzpunkt)	m	2.0	
Höhendifferenz MAG-Saugseite Pumpe	m	0.0	
Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Hochpunkt Kollektor	bar	0.19	
Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Hochpunkt Anlage	bar	0.19	
Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Pumpe	bar	-0.01	
Pumpendruck	bar	0.28	
Anspruchdruck des Sicherheitsventils	bar_ü	6	
Schliessdruckdifferenz des Sicherheitsventils	bar	0.3	
Tiefste Temperatur ausserhalb des Gebäudes	°C	-9	
Referenztemperatur innerhalb des Gebäudes	°C	10	
Maximal zulässige Rücklauftemperatur	°C	59.5	
Maximal zulässige Vorlauftemperatur	°C	103.0	
Max. Temperaturdiff zwischen Kollektorausstritt und Vorlauf	°C	0	
Max. Koll.temperatur beim Anfahren aus dem kalten Zustand	°C	70	
Max. Temperatur des Gasraumes bei Stagnation	°C	41	
Referenzpunkt saug- oder druckseitig	-	druckseitig	Art der Druckhaltung (a) MAG
Membran-Druckausdehnungsgefäß MAG	-	automat.	Kompressor-druckhaltung
Minimal erforderliches Gefäßsvolumen	l	158	Fülldruck konstant bar_ü 3.00
Vordruck zum minimal erforderlichen Gefäßsvolumen	bar_ü	1.73	
Nennvolumen	l	250	(c) optimieren

Abbildung 3-13 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes

Abbildung 3-14 zeigt einen Ausschnitt des Tabellenblattes *Druckhaltung*. Die Dimensionierung des Membran-Druckausdehnungsgefäßes erfolgt nach einer neuen Methode, die in [4] ausführlich beschrieben ist. Gegenüber der VDI 4708 [5], auf der die heutigen Dimensionierungsverfahren beruhen, wurde das Berechnungsverfahren in dreierlei Hinsicht verbessert und für die Anwendung in der Solarthermie optimiert: Die die Wasservorlage und das Reservevolumen werden explizit definiert (a). Die Unsicherheiten beim Messen und Einstellen des Vor- und Fülldrucks werden berücksichtigt (b). Der zulässige Bereich des Fülldrucks wird als Funktion der mittleren Kreislauftemperatur in einem anlagenspezifischen Diagramm dargestellt. Der Einfluss der Gefäßtemperatur auf den Fülldruck wird ebenfalls berücksichtigt. Der Vordruck wird als Funktion der Gefäßtemperatur dargestellt.

Mittlere Temperatur im Ruhezustand	°C	1.1
Wasservorlage minimal, Anteil des Gefäßsvolumens	-	0.01
Reservevolumen minimal	(a)	3
Reservevolumen als Anteil des Kreislaufinhaltes	-	0.02
Reservevolumen		3.4
Wasservorlage gesamt	l	5.9
erforderlicher Zulaufdruck der Pumpe	(c) bar_ü	-0.028
Zuschlag zu Minimaldrücken im Kreislauf Δp_{z0}	bar	0.1
Vordruckreserve Teildruckzuschlag Δp_{z1} nach VDI 4708	(b) bar	0.2
Unsicherheit Vordruck	bar	0.2
Unsicherheit Füll- bzw. Referenzdruck	bar	0.1

Abbildung 3-14 Wasservorlage, Reservevolumen und Unsicherheiten

Der erforderliche Zulaufdruck der Pumpe wird aus den Daten des Pumpenmodells für die maximale Rücklauftemperatur berechnet, unter Berücksichtigung des Luftdrucks am Ort der Anlage. Der Luftdruck wird mit der internationalen Höhenformel für Höhe des Ortes über Meer berechnet.

Abbildung 3-15 zeigt einen Ausschnitt unten links aus dem Tabellenblatt *Druckhaltung*. Wenn man automatische Berechnung zulässt, wird das geeignete Nennvolumen aus der üblichen Normreihe ausgegeben. Für diese Anlage ist ein 250 l Gefäß erforderlich. Bei manueller Eingabe hat man die Möglichkeit, den Vordruck manuell einzustellen.



Minimal erforderliches Gefäßsvolumen	l	158
Vordruck zum minimal erforderlichen Gefäßsvolumen	bar _ü	1.73
Nennvolumen	l	250

Abbildung 3-15 Nennvolumen des MAG

Der Installateur muss außerdem konkrete Angaben über den Vordruck (den Gasdruck im MAG vor der Befüllung der Anlage) und den Fülldruck erhalten. Diese erhält er in Form von drei gekoppelten, anlagenspezifischen Diagrammen nach Abbildung 3-16.

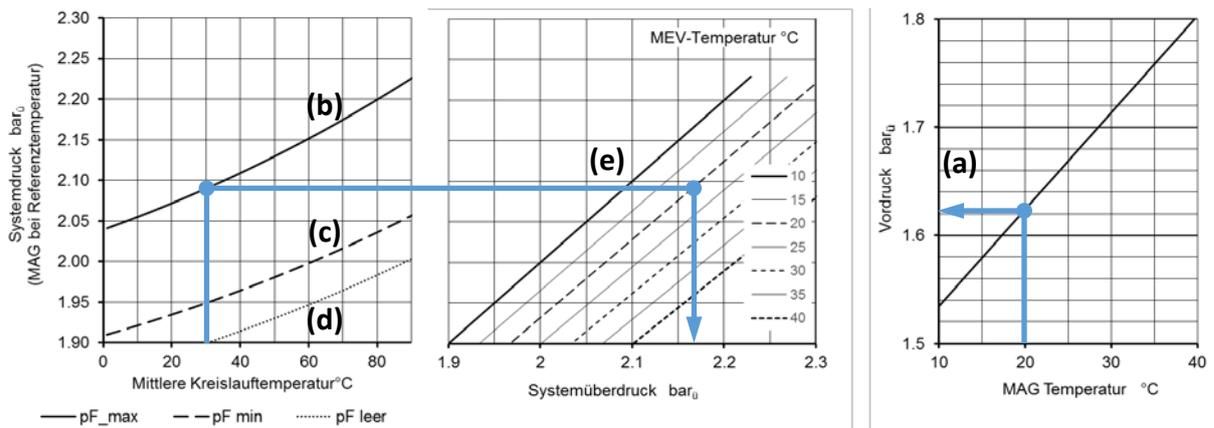


Abbildung 3-16 Diagramme für den Vor- und Fülldruck. Ablesen der Diagramme bei der Inbetriebnahme.

Als Erstes bestimmt der Installateur die Temperatur des MAG. Diese zeichnet er im rechten Diagramm ein, überträgt den Schnittpunkt mit der Geraden (a) auf die vertikale Achse und liest dort den Vordruck ab. Diesen Vordruck stellt er am Gefäß ein. Danach befüllt und spült er den Kreislauf. Nach dem der Kreislauf hinreichend entlüftet ist, stellt der Installateur den erforderlichen Systemdruck ein. Dieser ist vom aktuellen Ausdehnungsvolumen und damit von der mittleren Kreislauftemperatur abhängig. Die mittlere Kreislauftemperatur bestimmt er als Mittelwert der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur, die er von den Thermometern abliest. Diese zeichnet er im linken Diagramm ein. Der Schnittpunkt mit der Kurve (b) bezeichnet den maximalen Systemdruck für den Fall, dass die Temperatur des MAG 10 °C beträgt. Diesen Druck überträgt er auf das mittlere Diagramm bis zur gestrichelten Geraden für die aktuelle Temperatur des MAG von 20 °C. Den Schnittpunkt überträgt er auf die horizontale Achse und liest dort den einzustellenden Fülldruck ab.

Diese Diagramme gehören zur Dokumentation der Anlage, weil sie nicht nur zur Inbetriebnahme dienen, sondern auch die Kontrolle des Füllzustandes zu einem späteren Zeitpunkt ermöglichen. Bei der Kontrolle geht der Installateur nach Abbildung 3-17 folgendermaßen vor. Als Erstes bestimmt er die Temperatur des MAG. Diese beträgt beispielsweise 30 °C. Danach liest er den Systemdruck am Manometer ab und zeichnet ihn im mittleren Diagramm ein. Den Schnittpunkt mit der Geraden für die aktuelle Temperatur des MAG überträgt er in das linke Diagramm und erhält so den Systemdruck für den Fall, dass sich die Temperatur des MAG auf der Referenztemperatur von 10 °C befindet. Dann bestimmt er die mittlere Kreislauftemperatur als Mittelwert der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur, die er von den Thermometern abliest. Diese zeichnet er im linken Diagramm ein. Der Schnittpunkt dieser Temperatur mit dem soeben bestimmten Systemdruck bezeichnet den aktuellen Füllzustand der Anlage. Dieser muss im zulässigen Bereich zwischen den beiden Kurven (b) und (c) liegen.

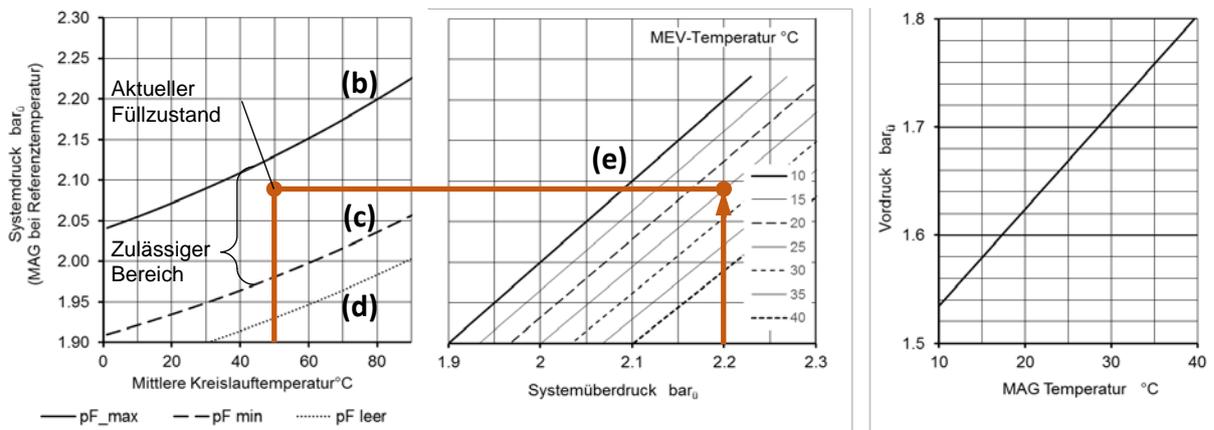


Abbildung 3-17 Diagramme für den Vor- und Fülldruck. Ablesen der Diagramme bei der Kontrolle des Füllzustandes.

Befindet sich der Zustand auf der Kurve (b), so würde bei Stagnation höchstens der Ansprechdruck des Sicherheitsventils abzüglich seiner Schließdruckdifferenz erreicht. Bei einem Zustand auf der Kurve (c) ist noch das gesamte Reservevolumen vorhanden. Ein Zustand auf der Kurve (d) zeigt dringenden Wartungsbedarf an. Das Reservevolumen ist aufgebraucht und das Gefäß enthält gerade noch die minimale Wasservorlage. Bei allen Rechnungen sind die Messunsicherheiten des Vordrucks und des Füll- bzw. Systemdrucks berücksichtigt.

3.4 Nachweis der Dampfreichweite

Stagnation ist ein komplexes Phänomen, bei dem Zweiphasenströmungen mit Phasenwechsel auftreten. Beim Nachweis der Stagnationssicherheit einer Solaranlage stellen sich zwei Aufgaben. Einerseits muss das dem Dampfvolumen entsprechende Flüssigkeitsvolumen im Ausdehnungsgefäß Platz finden, ohne dass der Druck die zulässige Grenze überschreitet. Andererseits darf der Dampf auf keinen Fall Kreislaufkomponenten erreichen, die durch die hohen Temperaturen zerstört werden können.

3.4.1 Ablauf der Stagnation

Die Temperatur eines Absorbers steigt im Lauf der Stagnation so lange an, bis sein Wärmeverlust an die Umgebung gleich groß ist wie die Leistung der absorbierten Strahlung. Mit modernen selektiv beschichteten Absorberschichten werden sehr hohe Temperaturen erreicht. Flachkollektoren mit einfacher Abdeckung erreichen rund 200 °C, Vakuum-Röhrenkollektoren weit über 300 °C. Bei üblichen Systemdrücken beginnt die Flüssigkeit jedoch bereits bei 130-140 °C zu siedeln. Stagnation ist daher immer mit Dampfbildung verbunden. Der entstehende Dampf verdrängt einen großen Teil der Flüssigkeit aus den Absorbern in die Rohrleitungen des Solarkreislaufes. Dabei wird ein entsprechendes Volumen Flüssigkeit aus den Rohrleitungen in das Ausdehnungsgefäß verdrängt. In den Absorbern bleibt eine Restmenge Flüssigkeit zurück. Diese Restmenge verdampft und breitet sich als Dampf in die Rohrleitungen aus. Die maximale Dampfreichweite ist erreicht, wenn in den Kollektoren gleich viel Flüssigkeit verdampft wie in den Rohren kondensiert. Danach nimmt die Dampfreichweite wieder ab. Der Ablauf der Stagnation wurde in zahlreichen experimentellen Arbeiten untersucht, beispielsweise in [6], [7], [8] und [9]. Empirische Korrelationen zur Berechnung dieser Größen wurden von Hausner, Fink, Wagner, Riva und Hillerns [10] sowie Scheuren [11] entwickelt.

Das in THD verwendete Modell beruht auf der Theorie der Zweiphasenströmungen. In dieser Arbeit wird das Modell nur qualitativ beschrieben. Ausführliche Darstellungen finden sich in [12] und [4]. Abbildung 3-18 zeigt die vielfältigen Abhängigkeiten, die bei der Simulation des Stagnationsverlaufes berücksichtigt werden müssen. Die für das Stagnationsverhalten maßgebenden physikalischen Eigenschaften der Anlage sind blau dargestellt. Das Stagnationsverhalten wird also nicht allein durch



die Kollektoren bestimmt, sondern auch durch die Rohrleitungen. Großen Einfluss haben auch die gelb dargestellten Anfangs- und Randbedingungen der Temperaturen, des Drucks und der Bestrahlungsstärke.

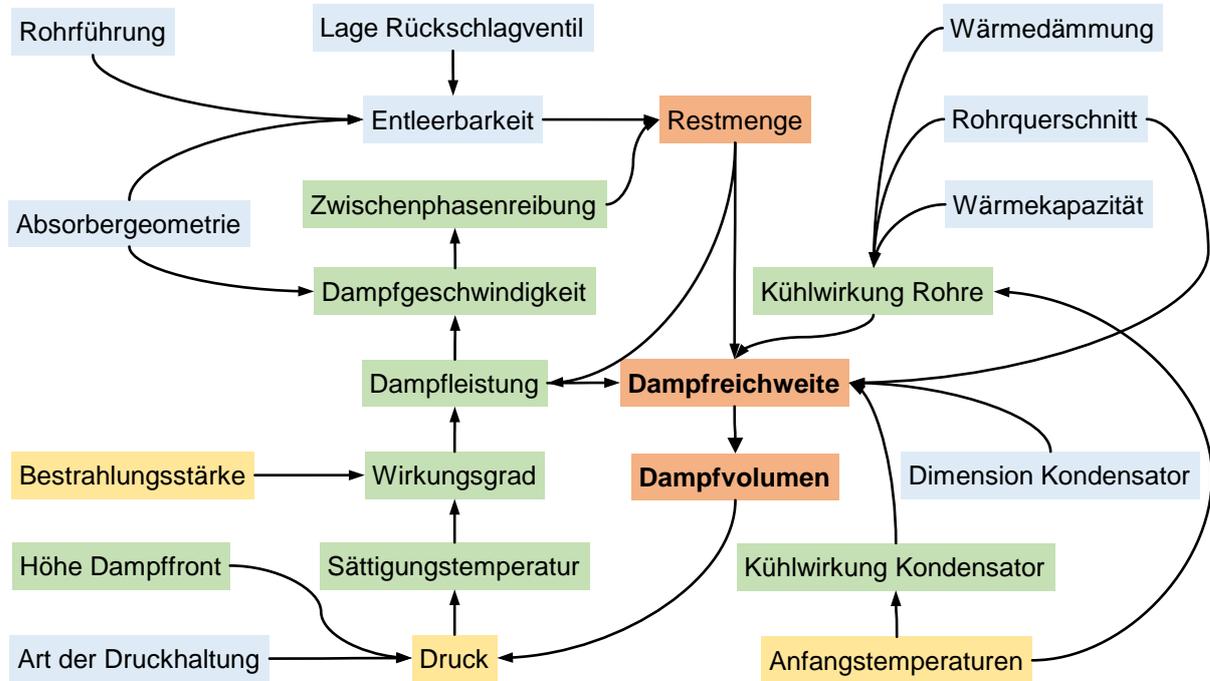


Abbildung 3-18 Einflüsse der Anlagendaten (blau), der Anfangs- und Randbedingungen (gelb) auf die Dampfreichweite und das Dampfvolumen.

Die Restmenge Flüssigkeit, die das Kollektorfeld nur in Form von Dampf verlassen kann, ist die zentrale Größe, die man zur Beschreibung des Stagnationsverlaufes kennen muss.

Der Verlauf der Dampfleistung und die Ausbreitung des Dampfes werden durch entsprechende Differentialgleichungen beschrieben, deren analytische Lösungen in THD implementiert sind. Durch die Vermeidung numerischer Lösungen werden kurze Rechenzeiten erreicht und Konvergenzprobleme vermieden.

In einem ersten Schritt wird die Restmenge Flüssigkeit bestimmt, die das Kollektorfeld nur in Form von Dampf verlassen kann. Bei entleerbaren Kollektorfeldern ist diese im Wesentlichen vom Durchmesser des Absorberrohres und von der Dampfgeschwindigkeit abhängig. Anschließend wird der Verlauf der Dampfleistung und der Ort der Dampffront in den Anschlussrohren als Funktion der Zeit berechnet.

3.4.2 Modellierung

Die wichtigsten Zustandsgrößen für die Dimensionierung sind die Dampfreichweite und das Dampfvolumen. Darüber hinaus muss auch noch die Maximaltemperatur im Ausdehnungsgefäß ermittelt werden, weil diese den Anlagendruck entscheidend mitbestimmt. Abbildung 3-19 zeigt das Tabellenblatt in THD, in das die erforderlichen Eingaben gemacht werden können. Oben rechts sind die Druckhaltung und ihr Anschluss an den Referenzpunkt des Kreislaufs schematisch dargestellt.

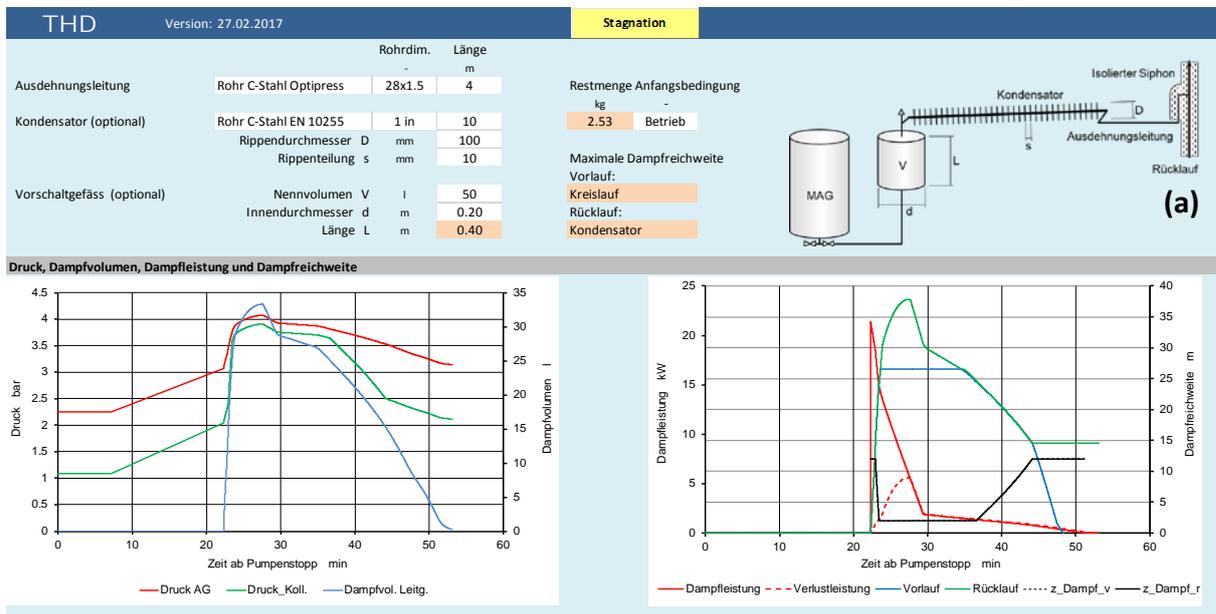


Abbildung 3-19 Tabellenblatt Stagnation

Der Anschluss der Ausdehnungsleitung muss immer siphoniert sein, damit Wärmeverluste vermieden werden und das MAG vor hohen Temperaturen im Betrieb geschützt ist. Im günstigsten Fall reicht eine einfache, nicht isolierte Ausdehnungsleitung für den Anschluss an das MAG. In dem hier betrachteten Beispiel wird sich der Dampf jedoch bis in die Ausdehnungsleitung ausbreiten. Die Dampfreichweite muss daher durch Zusatzmaßnahmen begrenzt werden. Zu diesem Zweck kann ein Kondensator in Form eines Rippenrohrkühlers und ein Vorschaltgefäß modelliert werden. Die Ausdehnungsleitung (a) und das Rohr (b) des Kondensators werden nach Abbildung 3-20 durch die Eingabe des Rohrfabrikats, der Rohrdimension und der Rohrlänge definiert. Die Kühlrippen des Kondensators dienen zur Verbesserung des äußeren Wärmeübergangs. Die Wärmeleitfähigkeit der üblichen Rohrleitungswerkstoffe ist so hoch, dass die Temperaturen des Rohres und der Kühlrippen gleich gesetzt werden können. Es genügt dann, die Kühlrippen allein durch ihren Außendurchmesser und die Rippenteilung zu definieren. Die Berechnung erfolgt nach [13]. Der Kondensator reicht allein nicht aus. In der Regel ist zusätzlich ein Vorschaltgefäß erforderlich, welches das MAG vor dem heißen Kondensat schützt. Das Vorschaltgefäß wird durch die Angabe des Nennvolumens und des Innendurchmessers modelliert. Die thermische Trägheit wird durch die Annahme einer Gefäßwand aus 3 mm unlegiertem Stahl modelliert.

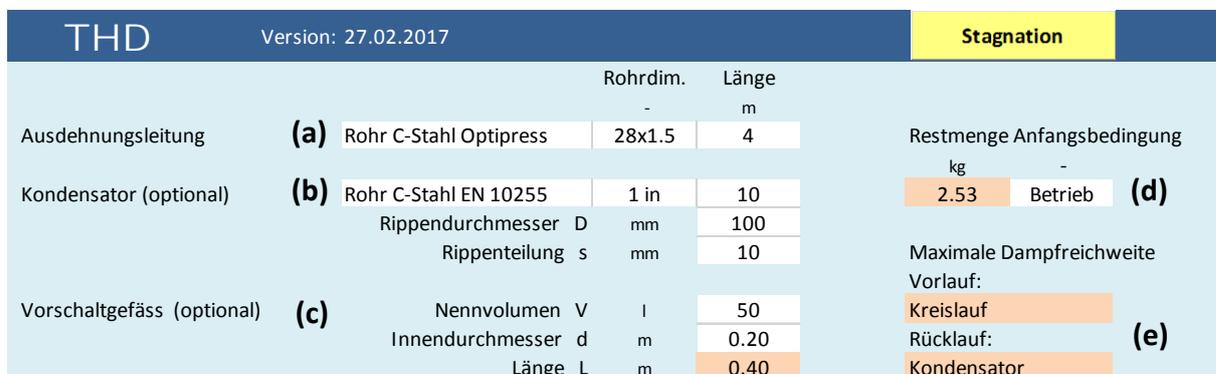


Abbildung 3-20 Definition von Massnahmen zur Begrenzung der Dampfreichweite

Durch Betätigen der Schaltfläche Stagnation werden die im gestrichelten Rahmen dargestellten Rechenschritte nach Abbildung 3-21 automatisch ausgeführt. Bei der Simulation des Stagnationsverlaufes wird das Dampfvolmen berechnet und als neue Randbedingung zur



Dimensionierung des MAG vorgegeben. In der Regel reichen zwei Iterationen zur Bestimmung des erforderlichen Gefäßvolumens aus.

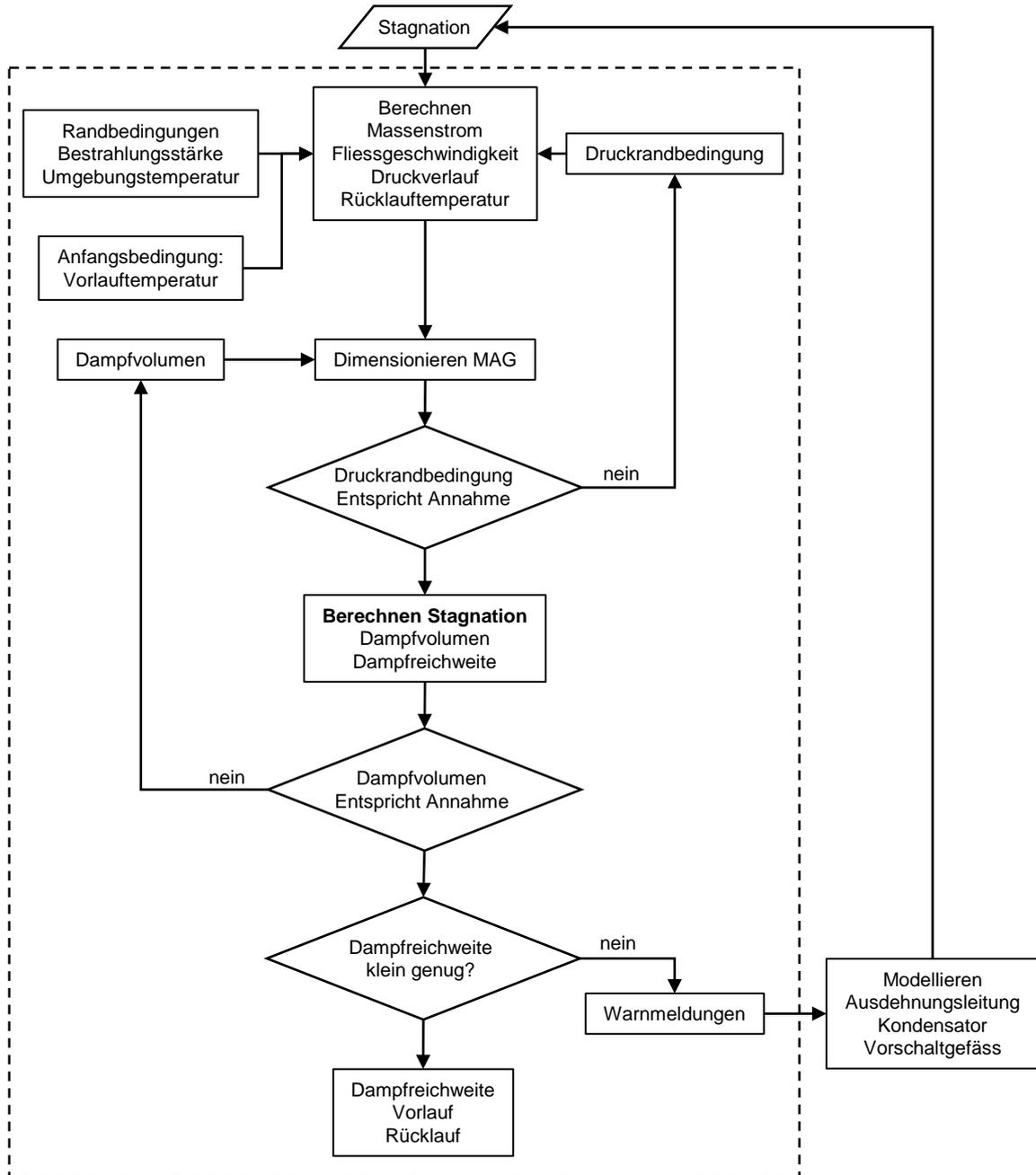


Abbildung 3-21 Programmablauf beim Nachweis der Dampfreichweite

Das Programm prüft, ob die Pumpe, der Durchflussmesser, der Wärmeübertrager oder das MAG vom Dampf erreicht werden. Ist dies der Fall, so wird die Rechnung abgebrochen und eine entsprechende Warnmeldung ausgegeben. Der Benutzer muss dann die erforderlichen Maßnahmen treffen:

- Kontrollieren: Der Referenzpunkt muss mindestens 0.5m über dem Eintritt in den Wärmeübertrager liegen.



- Falls eine Saugdruckhaltung gewählt wurde: Reihenfolge von Armaturen und Pumpe so ändern, dass der Referenzpunkt auf der Druckseite der Pumpe liegt (Nachdruckhaltung).
- Kondensator und Vorschaltgefäß dimensionieren.

Nach Abbildung 3-9 liegt der Referenzpunkt 2 m oberhalb des Wärmetauschers, sodass dieser vom Dampf nicht erreicht werden kann. Nach der Simulation erhält man das Resultat (e) nach Abbildung 3-20: Die maximale Dampfreichweite im Vorlauf ist auf die Vorlaufleitung beschränkt. Im Rücklauf hingegen dringt der Dampf hingegen über den Referenzpunkt hinaus bis in den Kondensator vor. Die Abbildung 3-21 zeigt den Verlauf der Dampfreichweite und der Dampfleistung. Sobald der Dampf in den Kondensator eintritt, steigt die Verlustleistung stark an.

Das Modell für die Dampfleistung basiert auf der Annahme, dass die Dampfleistung proportional zur aktuellen Restmenge ist. In diesem Beispiel ändert sich der Druck im Kollektor während der Phase des Leersiedens nur wenig. Entsprechend gering sind die Auswirkungen auf die Siedetemperatur und damit den Wirkungsgrad, mit dem das Kollektorfeld die Bestrahlungsstärke in Dampfleistung umsetzt. Aus diesen Gründen sind die Verläufe der Dampfleistung praktisch linear. Zu Beginn des Leersiedens trägt die gesamte Fläche des Kollektorfeldes zur Dampfleistung bei. Diese beträgt in vorliegenden Beispiel im Maximum etwa 21 kW. Im weiteren Verlauf der Dampfleistung sind zwei Bereiche zu erkennen. Der steile Abfall im ersten Bereich kommt daher, dass die Absorberrohre, die mit rund 80 % des Absorberbleches verbunden sind, rasch austrocknen und danach keinen Beitrag zur Dampfleistung mehr leisten. Die Verteil- und Sammelleitungen beinhalten wesentlich mehr Flüssigkeit als die Absorberrohre, sind jedoch mit nur 20 % des Absorberbleches verbunden. Ihr Beitrag zur Dampfleistung ist daher geringer und von längerer Dauer. Dieses Beispiel zeigt, dass man den Einfluss der Verteil- und Sammelleitungen nicht vernachlässigen darf.

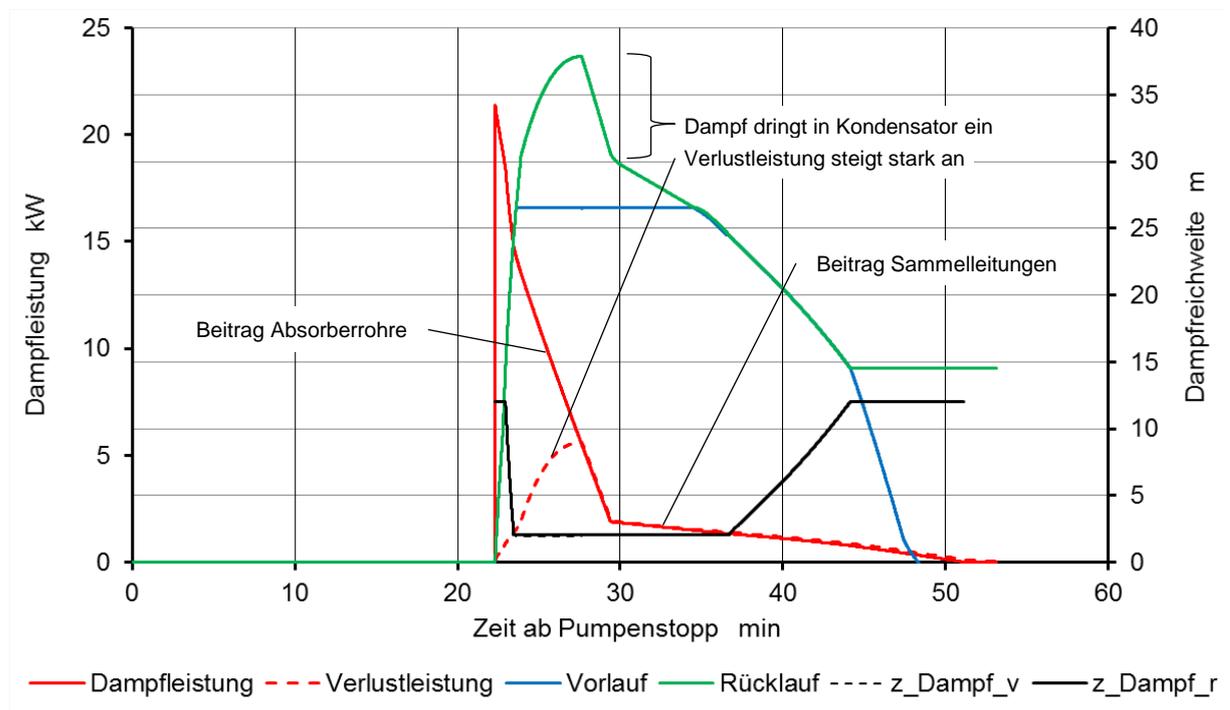


Abbildung 3-22 Verlauf der Dampfleistung und der Dampfreichweite

In der Abbildung 3-23 sind die Druckverläufe und das Dampfvolmen in den Rohrleitungen außerhalb der Kollektoren dargestellt. Die Druckdifferenz zwischen MAG und Kollektorfeld nimmt ab, weil sich der Dampf nach unten ausbreitet und daher der Schweredruck über dem MAG kleiner wird. Das Dampfvolmen in den Rohrleitungen erreicht einen Maximalwert von knapp 34 l. Bei gleicher



Verlustleistung wäre das Dampfvolumen in einem Vorschaltgefäß viel grösser als in einem Kondensator. Dieses zusätzliche Dampfvolumen müsste durch ein entsprechend groß dimensioniertes MAG kompensiert werden. Es ist daher günstiger, die Dampfreichweite durch einen Kondensator zu begrenzen, als durch das Vorschaltgefäß.

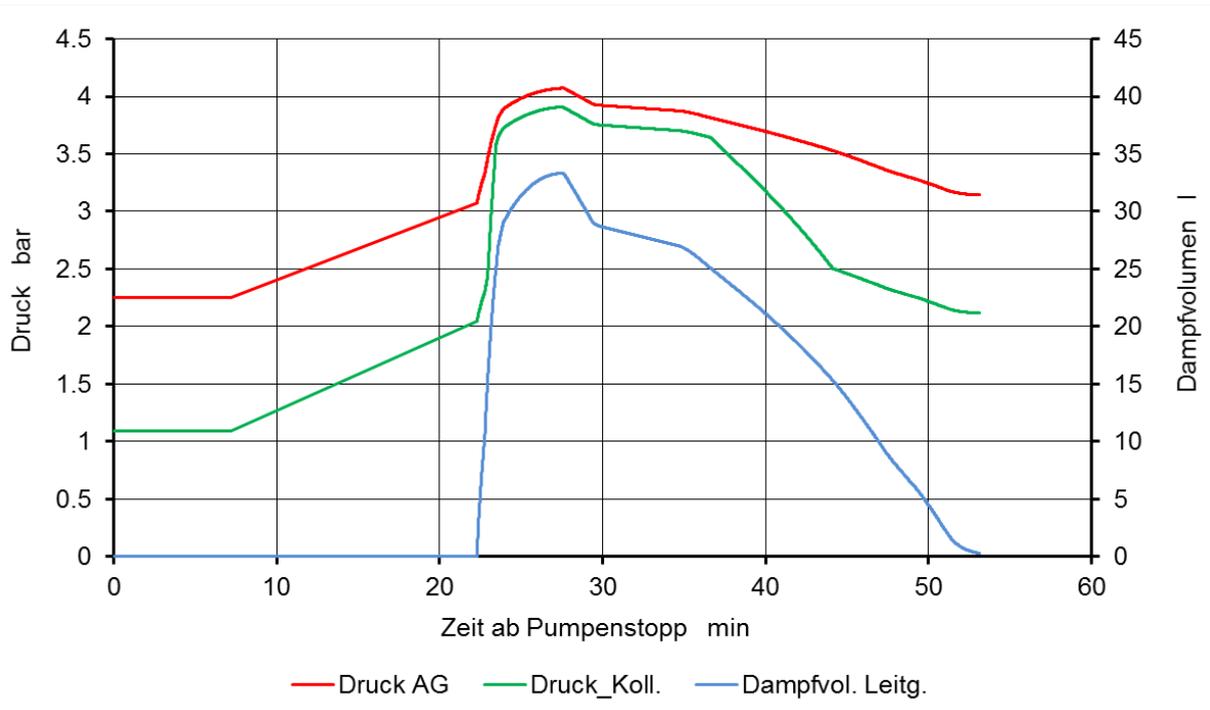


Abbildung 3-23 Verlauf der Drücke und des Dampfvolumens in den Rohrleitungen

3.5 Anlagenvariante für high-flow Betrieb

Die Berechnung folgender Variante soll zeigen, dass die Resultate einer Dimensionierung selbst dann nicht auf Anlagenvarianten übertragen lassen, wenn der Kollektortyp und die Kollektorfläche identisch sind. Als Regel gilt: Jede Anlagenvariante erfordert ihre eigene Dimensionierung mit den entsprechenden Nachweisen.

3.5.1 Glattrohr-Wärmetauscher und zöllige Rohre für den Kreislauf

Anstelle des Plattenwärmetauschers soll nach Abbildung 3-1 ein Glattrohrwärmetauscher mit einer Fläche von 15.2 m² eingesetzt werden. Dieser hat einen mittleren Wendeldurchmesser von 0.9 m und besteht aus drei parallel durchströmten Stahlrohren mit der Nennweite 1". Die Höhendifferenz zwischen Ein- und Austritt beträgt 1 m. Der vorlaufseitige Anschluss besitzt einen 0.5 m tiefen Siphon. Der Durchfluss soll bei Maximaltemperaturen 35 l/hm² betragen. Der Kreislauf soll aus nahtlosen Stahlrohre mit Schweißverbindung aufgebaut werden.

Abbildung 3-24 zeigt das entsprechend angepasste Tabellenblatt *Kreislauf*. Die metrischen Rohre mit den Abmessungen 28 x 1.5 mm sind durch 5/4 Zoll Rohre ersetzt. Der Siphon ist durch zwei Rohre (b) modelliert. In der Zeile unterhalb ist der Glattrohrwärmeübertrager (a) definiert. Die Übertragerfläche wird automatisch bei der Eingabe berechnet. Anstelle der Pumpe Biral Redline A12 ist eine Biral Redline A14 mit DN32 Nennweite eingesetzt. Diese erzeugt bei einem Regelparameter von 0.9 den gewünschten Durchfluss.



Version: 27.02.2017										Kreislauf		Kreislauf+MAG		
Die Summe aller Höhendifferenzen muss null sein: 0.0										Dicke	spezif.		Aussen = a	
Kreislaufelemente	Rohrdim.	Länge m	Wendel- Durchm. m	Parallele Rohre	Anzahl Winkel	Höhen - diff. m	Isolation mm	Fläche m ²	Druck bar _i	Durchfluss l/hm ²	Polysun l/hm ²			
5 Druckhaltung	Höhe Referenzpunkt bezüglich MAG Anschluss : 2						am Referenzpunkt:	2.06	34	15				
6 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	2			4	0	25							
7 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	10			1	10	25							
8 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	5			0	0	25					a		
9 Kollektorfeld												a		
10 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	5			0	0	25					a		
11 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	10			1	-10	25							
12 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	2			4	0	25							
13 Kugelhahn													Trigriss RB17 DN 32	
14 Rückschlagventil													Trigriss DN 32	
15 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	1.5			2	-1.5	25	(b)						
16 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	1			2	0.5	25							
17 Glattrrohr-Wärmetauscher	1 in	48	0.9	3		-1		15.2						
18 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	2			2	0	25							
19 Durchflussmesser													GWF MTW 32-6	
20 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	1			2	0	25							
21 Kugelhahn													Trigriss RB17 DN 32	
22 Pumpe								0.9					Biral Redline A14-32	
23 Kugelhahn													Trigriss RB17 DN 32	
24 Rückschlagventil													Trigriss DN 32	
25 Rohr C-Stahl EN 10255	1 1/4 in	2			1	2	25							

Abbildung 3-24 Kreislauf für high-flow Betrieb und Glattrrohrwärmeübertrager.

Abbildung 3-25 zeigt den Druckverlauf bei Ruhe und im Betrieb. Der Druckverlust der Feldverrohrung wurde dem Kollektorfeld zugerechnet. Daher ändert sich der Druck entlang der Feldverrohrung nicht.

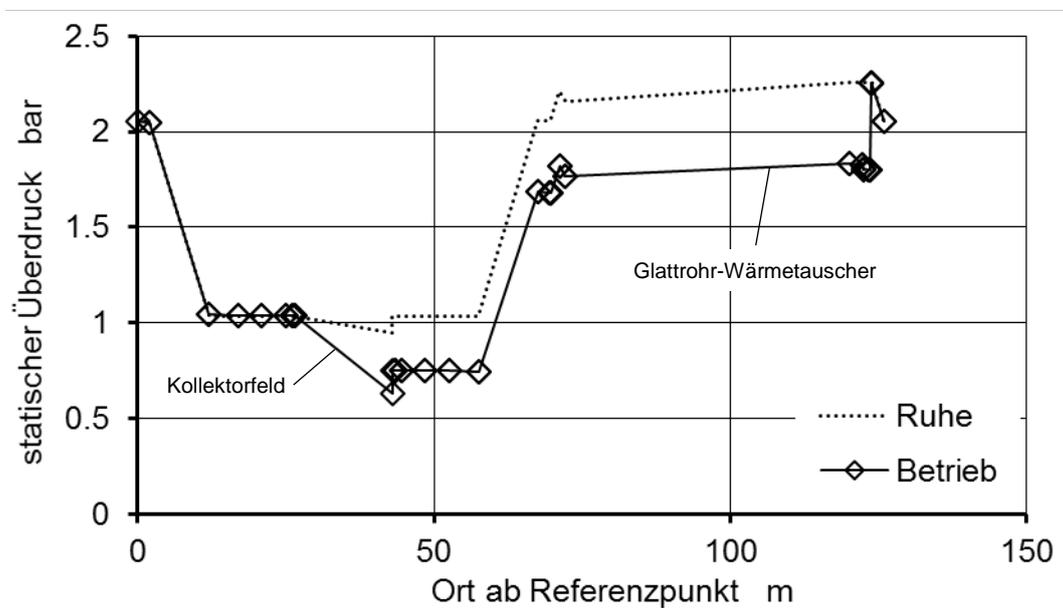


Abbildung 3-25 Druckverlauf bei Ruhe und im high-flow Betrieb.



Für die Dimensionierung des MAG und den Nachweis der Dampfreichweite ist der Betrieb bei Maximaltemperaturen maßgebend. Für die Beurteilung der Entlüftbarkeit muss die Rechnung bei einer tieferen Vorlauftemperatur durchgeführt werden. Ein realistischer Wert ist 50 °C. Nach Abbildung 3-26 wird die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit in der vertikal nach unten führenden Vorlaufleitung nicht erreicht. Im nächsten Optimierungsschritt bei der Dimensionierung würde man für diesen Abschnitt die nächst kleinere Rohrdimension wählen. Auch im Glattrohrwärmetauscher wird die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit nicht erreicht. Hier ist es zweckmäßig, einen Luftabscheider zwischen dem oberen Ende des Siphons und dem vorlaufseitigen Anschluss anzuordnen.

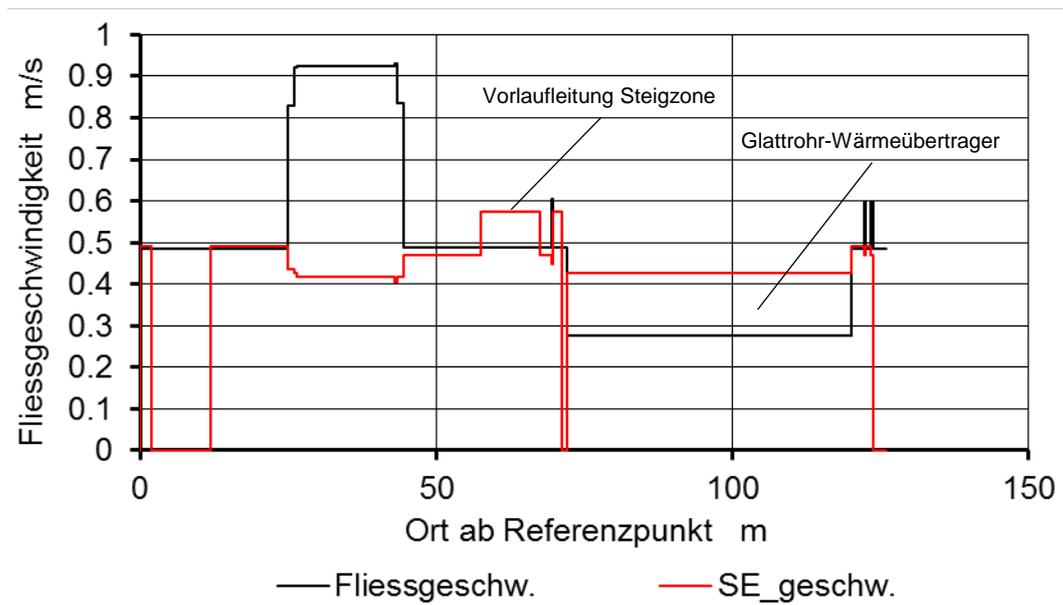


Abbildung 3-26 Fließ- und Selbstentlüftungsgeschwindigkeit im high-flow Betrieb bei 50 °C Vorlauftemperatur.

3.5.2 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes

Anstelle des 250 l MAG bei der low-flow Anlage ist nun ein Gefäß mit einem Nennvolumen von 300 l erforderlich. Dies hat zwei Gründe. Einerseits ist der Fluidinhalt rund 50 % größer als bei der low-flow Konfiguration. Andererseits ist durch die geringere Temperaturspreizung die mittlere Kreislauf-temperatur höher. Beides führt zu einem größeren Ausdehnungsvolumen.

3.5.3 Nachweis der Dampfreichweite

Der Nachweis der Dampfreichweite liefert den Stagnationsverlauf nach Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28. Das maximale Dampfvolmen ist knapp 50 % größer als bei der low-flow Variante. Die kommt daher, dass das Volumen der Leitungen mit dem Quadrat des Durchmessers ansteigt, während der Wärmedurchgangskoeffizient nur linear zunimmt. Sowohl im Verlauf der Dampfreichweite als auch am Höhenverlauf der Dampffront erkennt man, dass der Dampf auf die Vorlauf- und Rücklaufleitung beschränkt bleibt. Die Ausdehnungsleitung bleibt dampffrei. Bei dieser Variante könnte man auf den Kondensator verzichten.

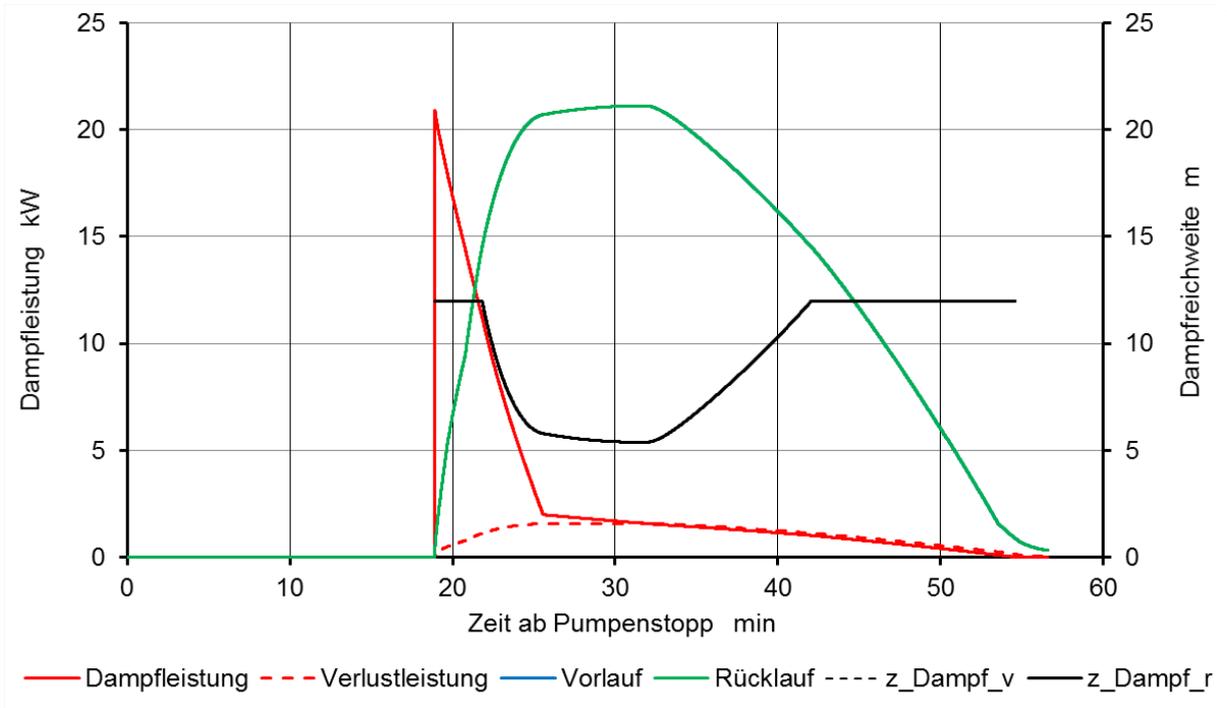


Abbildung 3-27 Dampfleistung und Dampfreichweite bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren.

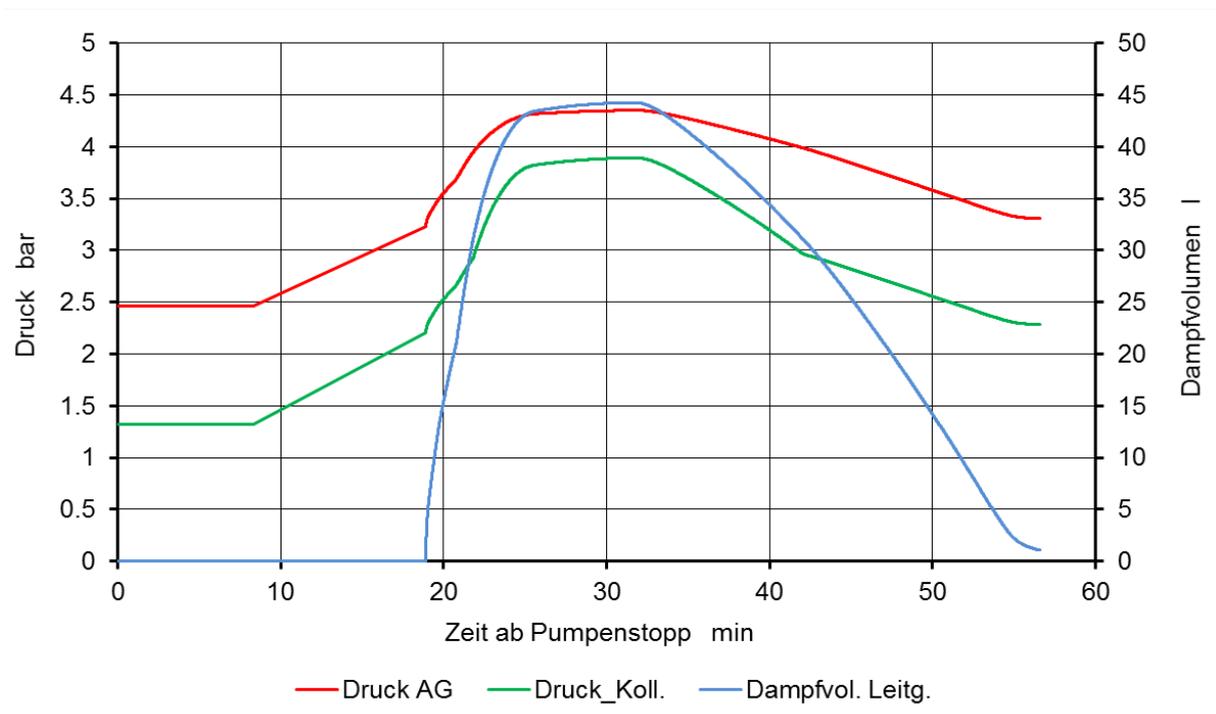


Abbildung 3-28 Drücke und Dampfvolumen bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren.



3.5.4 Einfluss der Wärmekapazität des Rohres auf die Dampfreichweite

Folgendes Beispiel zeigt anschaulich, dass die Dampfreichweite stark abhängig ist von der Wärmekapazität der Rohrwand. Alle 5/4" Stahlrohre wurden durch metrische Edelstahlrohre der Dimension 35x1.5 ersetzt. Das Nennvolumen des MAG von 300 l wurde beibehalten. Die Simulation ergibt einen Stagnationsverlauf nach Abbildung 3-29. Die Dampfreichweite ist rund 13 m höher als bei der Variante mit 5/4" Rohren!

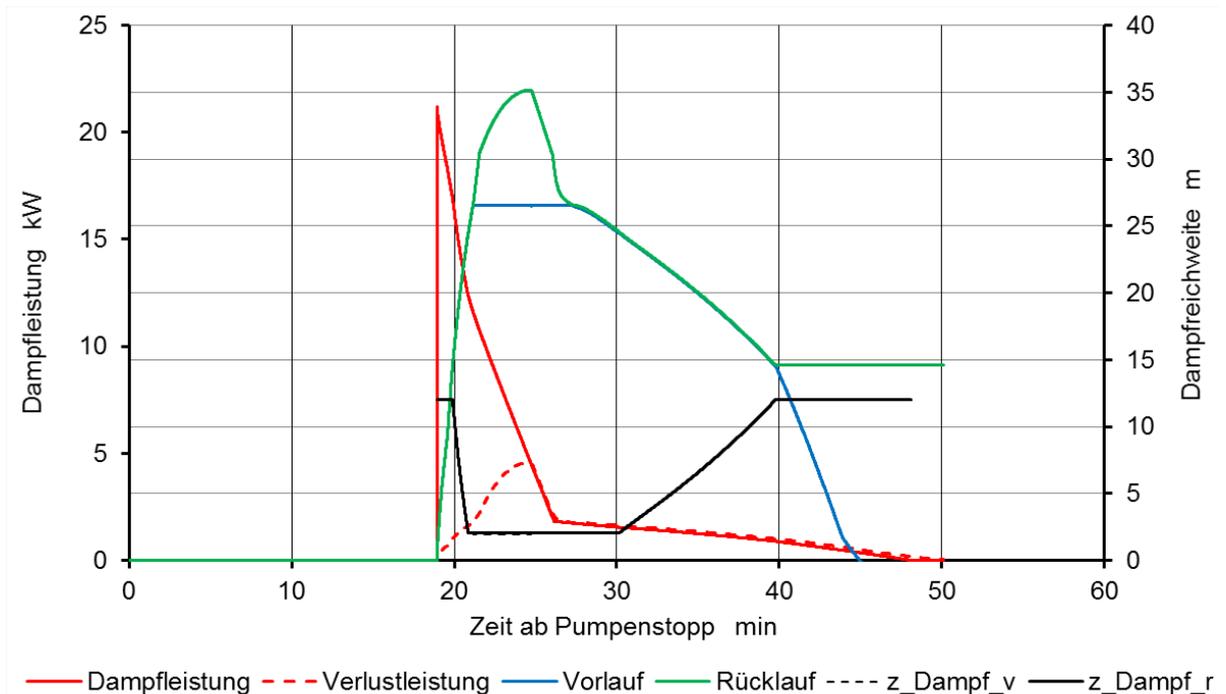


Abbildung 3-29 Dampfleistung und Dampfreichweite bei der high-flow Variante mit 35x1.5 mm Edelstahlrohren.

Das Dampfvolument ist nach Abbildung 3-30 um 6 Liter größer. Die Unterschiede im Stagnationsverhalten sind hauptsächlich durch die unterschiedlichen Wärmekapazitäten erklärbar. Dies lässt sich durch eine einfache Rechnung abschätzen. Die Fläche unter der Kurve der Dampfleistung entspricht der Enthalpie, die in den Rohren durch Kondensation anfällt. Ein Teil dieser Kondensationsenthalpie braucht das Rohr selbst, um von der mittleren Anfangstemperatur von 110 °C auf die mittlere Siedetemperatur von 155 °C zu kommen. Der Rest geht als Verlustwärme an die Umgebung. Die Vergleichsrechnung nach zeigt, dass der Anteil des Wärmeverlusts bei der Variante beim metrischen Edelstahlrohr rund 44% höher ist als beim 5/4" Rohr. Bei gleichen Temperaturdifferenzen muss daher die Fläche zur Wärmeabgabe grösser sein, was durch eine größere Dampfreichweite erreicht wird.

Tabelle 3-1 Abschätzung des Wärmeverlustanteils an der Dissipation der Kondensationsenthalpie beim 5/4" Stahlrohr und beim 35x1.5 mm Edelstahlrohr.

		Stahl 5/4"	Edelstahl 35 x 1.5 mm
Kondensationsenthalpie	kJ	5919	5919
Längenbezogene Wärmekapazität	J/Km	1599	624
Dampfreichweite Vorlauf + Rücklauf	m	44	70
Gespeicherte Enthalpie	kJ	3166	1966
Wärmeverlust / Kondensationsenthalpie	-	0.47	0.67



Man erkennt dies auch daran, dass die Kurven für die Verlustleistung in den Abbildung 3-27 flacher verläuft als in der Abbildung 3-29.

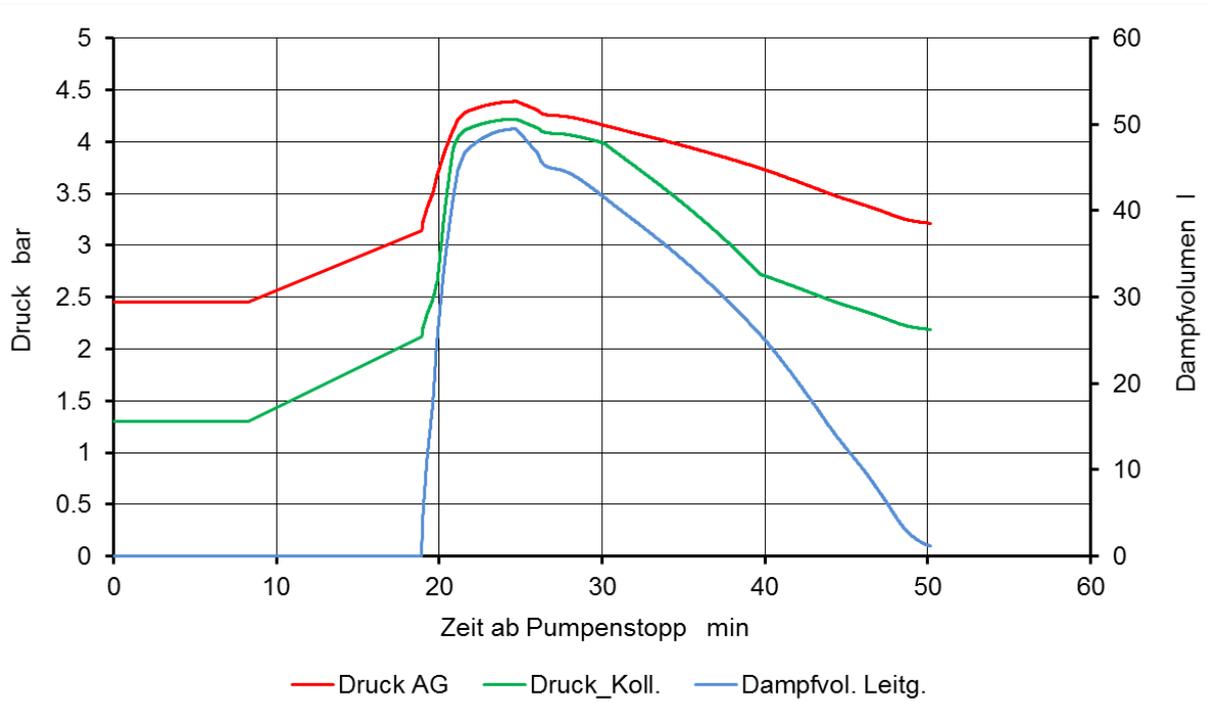


Abbildung 3-30 Drücke und Dampfvolumen bei der high-flow Variante mit 35x1.5 mm Edelstahlrohren.

Die Spezifikation des Rohrfabrikats liegt daher in der Verantwortung des Planers bzw. des planenden Installateurs. Der ausführende Installateur darf das Rohrfabrikat nicht ohne Rücksprache mit dem Planer ändern.

3.5.5 Einfluss der Druckhaltung auf die Dampfreichweite

Die Art Druckhaltung hat ebenfalls einen sehr großen Einfluss auf die Dampfreichweite. Wenn man das 300 l MAG durch eine Kompressordruckhaltung ersetzt, so bleibt der Druck am Referenzpunkt bis auf eine kleine Hysterese konstant. Der Druck im Kollektorfeld steigt nur dadurch an, dass sich der Dampf nach unten ausbreitet und die Höhe der auf dem Referenzpunkt lastenden Flüssigkeitssäule kleiner wird. Legt man die Kompressordruckhaltung so aus wie bei einer Heizungsanlage, erhält man im Vergleich zu einer Druckhaltung mit MAG tiefere Siedetemperaturen und damit höhere Wirkungsgrade und höhere Dampfleistungen des Kollektors. Weil die Differenz zwischen der Siedetemperatur und der Umgebungstemperatur kleiner ist, ist auch die längenbezogene Verlustleistung der Rohre kleiner. Beides führt zu einer größeren Dampfreichweite. Die Abbildung 3-31 und Abbildung 3-32 zeigen die Resultate der entsprechenden Simulationsrechnungen.

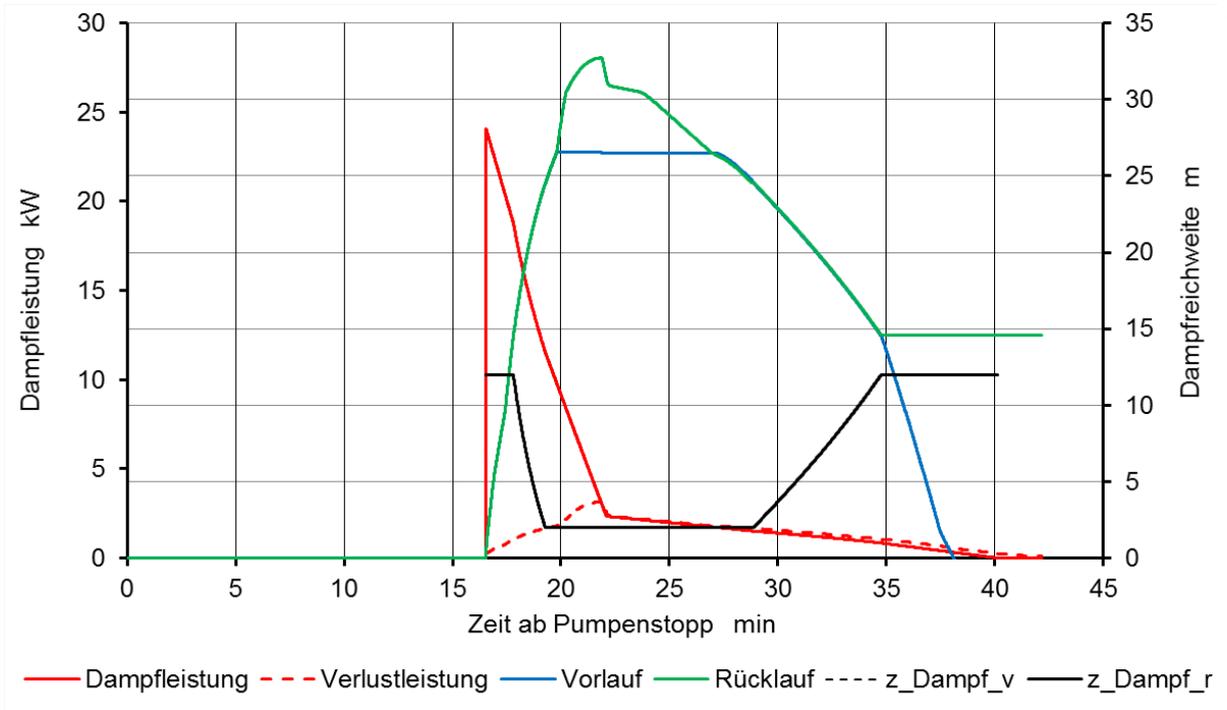


Abbildung 3-31 Dampfleistung und Dampfreichweite bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren und Kompressordruckhaltung mit 2.25 bar Überdruck am Referenzpunkt.

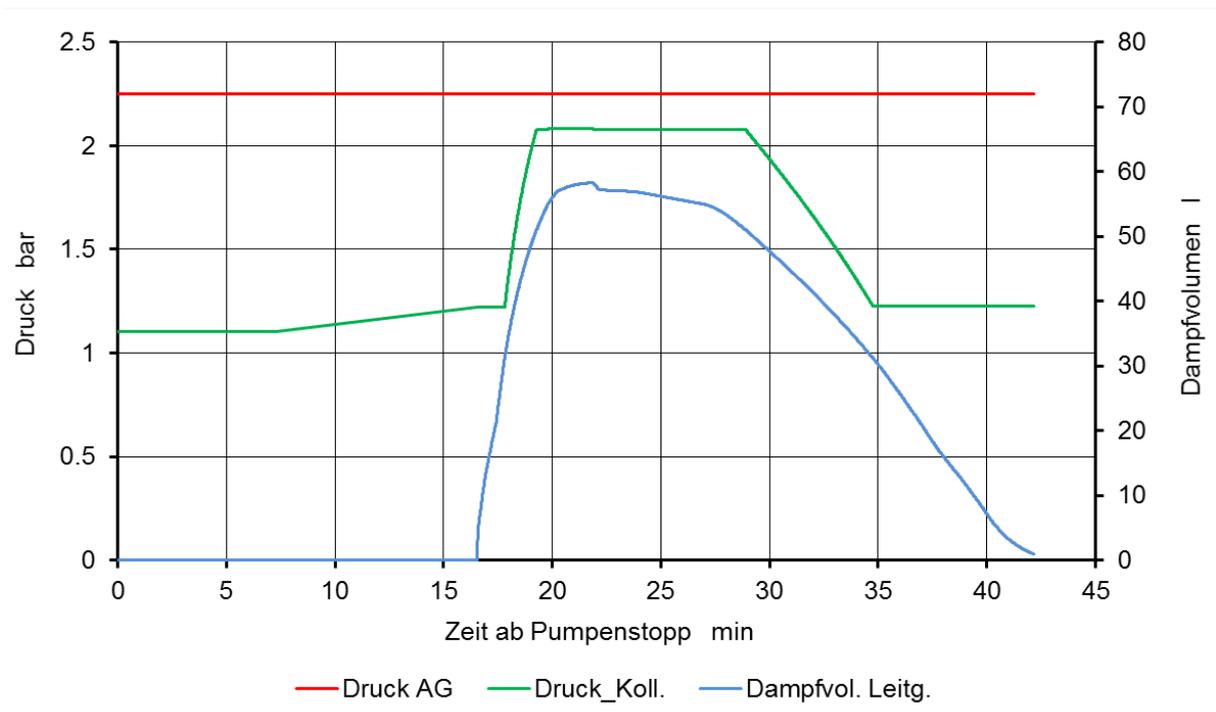


Abbildung 3-32 Drücke und Dampfvolumen bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren und Kompressordruckhaltung mit 2.25 bar Überdruck am Referenzpunkt.



Damit vergleichbar geringe Dampfreichweiten erzielt werden wie bei einer Druckhaltung mit MAG muss die Kompressordruckhaltung einen Druck von einen Überdruck am Referenzpunkt von 4.1 bar erzeugen. In Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34 sind die entsprechenden Resultate dargestellt.

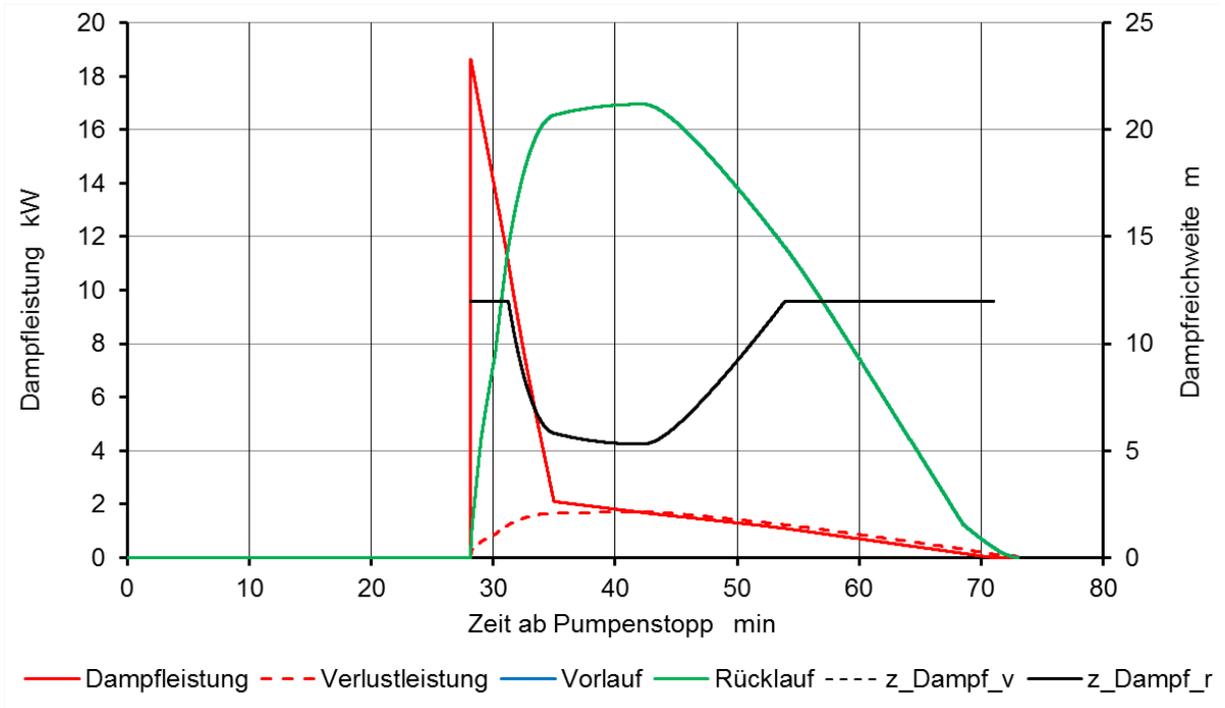


Abbildung 3-34 Dampfleistung und Dampfreichweite bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren und Kompressordruckhaltung mit 4.1 bar Überdruck am Referenzpunkt.

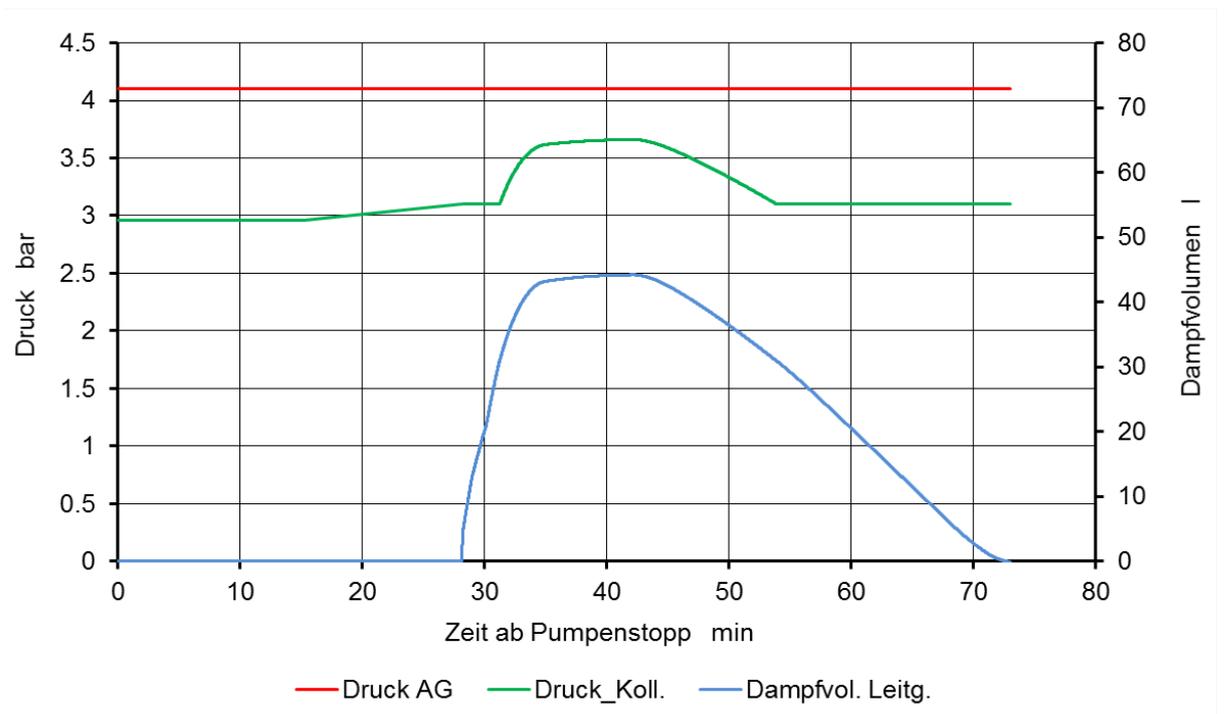


Abbildung 3-33 Drücke und Dampfvolumen bei der high-flow Variante mit 5/4" Rohren und Kompressordruckhaltung mit 4.1 bar Überdruck am Referenzpunkt.



4 Komponentenkataloge

Nachfolgend ist eine Auswahl der Komponentenkataloge dargestellt. Diese können durch den Nutzer beliebig erweitert werden. Datenbereiche, die aus Polysun importiert werden können, sind grau hinterlegt. Die fehlenden Daten müssen von Hand ergänzt werden. Eine entsprechende Ergänzung in zukünftigen Polysun Softwareversionen ist vorgesehen, die Autoren und die Vela Solaris AG sind diesbezüglich in engem Kontakt.

Der Kollektorkatalog nach Tabelle 4-1 enthält neben den Leistungsdaten sämtliche Angaben zur Geometrie von Absorberrohren und Sammelleitungen sowie die Möglichkeiten der Verschaltung. In der Spalte *Typ* ist die Absorberhydraulik codiert. Der erste Buchstabe bezeichnet den Absorbertyp. *M* steht für Mäanderabsorber, *H* für Harfenabsorber. Der zweite Buchstabe bezeichnet die Lage der Absorberrohre. *H* bedeutet horizontale Orientierung, *V* für Orientierung in Neigungsrichtung. Der dritte Buchstabe *H* bedeutet, dass die Verteil- und Sammelleitungen (H=Header) mit dem Absorber wärmeleitend verbunden sind.

Tabelle 4-1 Kollektorkatalog

Kollektormodelle	Inhalt		Absorberrohr				Verteil- und Sammelleitung				Druckverlust gemessen						
	Kollektortyp	A_c	V	Typ	dh	n_par	n_ser	l_aeq.	l_glatt	dh	beheiz	l_well	dh	Δp	Q	Medium	T
Direkteingabe	m ²	l			m	-		m	m	m	-	m	m	mbar	l/h	-	°C
FK1 V2	2.33	2.3	MH	0.011	1	20	24		0.01	nein		0.016		611	373	Wasser	20
FK2 H4	2.33	1.72	MHH	0.007	1	12	21	2	0.0164	ja	0.06	0.016		594	148	Wasser	20
FK2 V4	2.33	1.46	MHH	0.007	1	20	22	1.2	0.0164	ja	0.06	0.016		594	148	Wasser	20
Harfe-V	2	1.2	HV	0.007	5	2	2		0.016	nein				494	360	Wasser	20
Harfe-H	2	1.2	HH	0.007	5	2	2		0.016	nein				494	360	Wasser	20

Leistungsdaten				Stagnation	Geometrie	Abmessungen
eta0	a1	a2	Cp	Tstag	Schalt.Möglichk.	Neig.Rtg.
-	W/m ² K	W/m ² K ²	J/K	°C	-	-
0.802	3.601	0.014	20000	201	seriell_übereinander	2.3
0.814	3.527	0.012	20597	201	parallel_horizontal	1.2
0.814	3.527	0.012	20597	201	parallel_horizontal	2.2
0.8	3.6	0.01	20000	201	seriell_horizontal	2.2
0.8	3.6	0.01	20000	201	seriell_übereinander	1.2

Die Pumpenmodelle nach Tabelle 4-2 enthalten Daten für die Maximalkennlinie und den Druck bei Förderstrom null für die Minimalkennlinie. THD berechnet die effektive Kennlinie zwischen diesen Extramalwerten mit Hilfe dimensionsloser Pumpenkennzahlen und dem vorgegebenen Regelparameter. Außerdem sind die Daten für den minimalen, temperaturabhängigen Zulaufdruck hinterlegt.



Tabelle 4-2 Pumpenmodelle

Pumpenmodelle	DN	l	p_zul	T_zul	V	max. Kennlinie										min.
						p0	Q1	p1	Q2	p2	Q3	p3	Q4	p4	p0	
vorgegebener Durchfluss	mm	m	bar ü	°C	l	kPa	m3/h	kPa	m3/h	kPa	m3/h	kPa	m3/h	kPa	kPa	
Grundfos MAGNA 25-100	25	0.18	10	110	0.2	103	1	106	2	108	4	80	8	40	10	
Grundfos MAGNA 50-100 F	50	0.24	10	110	0.5	103	1	107	2	109	6	59	10	20	10	
Biral Redline A12	25	0.18	10	95	0.2	39	1	31	2	24	3.5	16	5	8	10	
Biral Redline A13	25	0.18	10	95	0.2	52	0.5	52	1	49	3	27	6	9	10	
Biral Redline A14-25	25	0.18	10	95	0.2	60	1	61	2	52	4	34	7	14	10	
Biral Redline A14-32	32	0.18	10	95	0.2	60	1	61	2	52	4	34	7	14	10	
Biral Redline A15-25	25	0.18	10	95	0.2	80	1	80.5	2	73	5	46	8	20	10	
Biral Redline A15-32	32	0.18	10	95	0.2	80	1	80.5	2	73	5	46	8	20	10	

Zulaufdruck bar ü bei Temperaturen						Referenzhöhe	P
T1	p1	T2	p2	T3	p3	m ü M	W
75	0.05	90	0.28	110	1.1	300	180
75	0.15	90	0.45	110	1	300	180
		75	0.1	95	0.55	500	33
		75	0.1	95	0.55	500	50
		75	0.1	95	0.55	500	70
		75	0.1	95	0.55	500	70
		75	0.1	95	0.55	500	107
		75	0.1	95	0.55	500	107

Kugelhähnen nach Tabelle 4-3 sind durch die Durchfluss bei einem bar Druckabfall charakterisiert. Außerdem sind auch die zulässigen Drücke und Temperaturen hinterlegt.

Tabelle 4-3 Kugelhähnen

Kugelhähnen	DN	l	Tzul	p_zul	Δp	Q(Δp)	zeta
	mm	m	°C	bar ü	bar	l/h	-
Trigrass RB17 DN 10	10	0.052	130	18	1	6000	
Trigrass RB17 DN 15	15	0.062	130	12	1	16300	
Trigrass RB17 DN 20	20	0.069	130	12	1	29500	
Trigrass RB17 DN 25	25	0.083	130	12	1	43000	
Trigrass RB17 DN 32	32	0.096	130	10	1	89000	
Trigrass RB17 DN 40	40	0.108	130	10	1	230000	

Die Durchflussmesser in der Tabelle 4-3 können entweder durch den Durchfluss bei einem Druckverlust von 1 bar oder durch einen Druckverlustbeiwert charakterisiert werden. Außerdem sind der erforderliche Minimal- und der zulässige Maximaldurchfluss angegeben.

Tabelle 4-4 Durchflussmesser

Durchflussmesser	DN	l	Tzul	p_zul	Δp	Q(Δp)	zeta	Q_nenn	Q_max	Q_min
	mm	m	°C	bar ü	bar	l/h	-	l/h	l/h	l/h
GWF MTW 15-1.5	15	0.165	130	16	1	3750		1500	3000	30
GWF MTW 20-1.5	20	0.22	130	16	1	5000		1500	3000	30
GWF MTW 20-2.5	20	0.22	130	16	1	5000		2500	5000	50
GWF MTW 25-3.5	25	0.26	130	16	1	9700		3500	7000	70
GWF MTW 25-6	25	0.26	130	16	1	12700		6000	12000	120
GWF MTW 32-6	32	0.26	130	16	1	12700		6000	12000	120



Tabelle 4-4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog der Rückschlagventile. Diese sind durch den Durchfluss bei 1 bar Druckverlust und durch den Öffnungsdruck hinreichend charakterisiert.

Tabelle 4-5 Rückschlagventile

Rückschlagventile	DN	l	Tzul	p_zul	Δp	Q(Δp)	Δp _R
	mm	m	°C	bar_ü	bar	l/h	bar
Trigress DN 10	10	0.047	100	37	1	6000	0.025
Trigress DN 15	15	0.059	100	37	1	16300	0.025
Trigress DN 20	20	0.065	100	37	1	29500	0.025
Trigress DN 25	25	0.075	100	21	1	43000	0.025
Trigress DN 32	32	0.083	100	21	1	89000	0.025
Trigress DN 40	40	0.089	100	14	1	230000	0.025

Der Druckverlust der in Tabelle 4-5 Plattenwärmeübertrager sind durch ein Wertepaar aus Druckverlust und Volumenstrom charakterisiert. Ausserdem sind auch das Volumen und die zulässigen Werte für Temperatur und Druck hinterlegt.

Tabelle 4-6 Plattenwärmeübertrager

Platten-Wärmeübertrager	DN	Länge	Tzul	p_zul	Δp	Q(Δp)	zeta	Vol.
	mm	m	°C	bar_ü	bar	l/h	-	l
WPL 7W1-GG-20	25	0.273	225	27	0.04	800		0.61
WPL 7W1-GG-30	25	0.273	225	27	0.07	1600		1.03
WPL 7W1-GG-50	25	0.273	225	27	0.07	2400		1.53
WPL 7W1-GG-60	25	0.273	225	27	0.1	3600		1.83
WPL 26W-GG-50	50	0.324	225	27	0.05	5000		4.5
WPL 26W-GG-70	50	0.324	225	27	0.06	7300		6.3

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion

Die Solarthermiebranche steht gegenwärtig unter einem hohen Leistungs- und Kostendruck. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden im Rahmen dieses Projektes fortschrittliche Werkzeuge für die Anlagenplanung entwickelt.

Das Programm THD dient zur thermohydraulischen Dimensionierung des Solarkreises, basierend auf der thermodynamischen Planung mit Polysun. Es umfasst die Rohrnetz- und Pumpendimensionierung, die Dimensionierung der Druckhaltung sowie die Nachweise der Entlüftbarkeit und der Dampfreichweite. Außerdem wurde Polysun um eine Schnittstelle erweitert, über welche die Anlagendaten und die Eckwerte der Jahressimulation an THD übertragen werden können. Damit stehen THD die Systemvorlagen und Kataloge aus Polysun zur Verfügung. Durch die Verknüpfung von Polysun und THD ist es möglich, eine Solaranlage nicht nur energetisch optimal zu planen, sondern auch kostenoptimal und betriebssicher.

THD wurde in VBA unter Excel entwickelt. Die tabellarische Dateneingabe wird durch die Exportfunktion in Polysun, durch die in THD integrierte Komponentenkataloge und durch das ereignisgesteuerte Angebot der jeweils passenden Auswahlmenüs sehr stark erleichtert. Dadurch werden Mehrfacheingaben und die Eingabe unpassender Dimensionen vollständig vermieden.



THD führt die Rohrnetz- und Pumpendimensionierung, die Dimensionierung der Druckhaltung sowie die Nachweise der Entlüftbarkeit und der Dampfreichweite in einem iterativen Prozess durch. Dabei werden detaillierte thermohydraulische Modelle verwendet, welche die Eigenschaften einer Solaranlage mit hinreichender Genauigkeit abbilden. Mit der dadurch gewonnenen Planungssicherheit werden folgende Ziele erreicht:

- Solaranlagen lassen sich kostenoptimal dimensionieren. Das Kostenoptimum kann rechnerisch belegt werden. In den gängigen Analysetools (z.B. Polysun) wird die Optimierung nur auf einer energetischen Betrachtung über den Jahresverlauf gemacht, womit beispielsweise die Dimensionierung einer Wärmepumpe oder eines Kessels korrekt beschrieben wird. Die Erweiterung mit THD erlaubt es neu auch, den nicht optimalen Anlagenbetrieb, bedingt durch Über- oder Unterdimensionierung von Rohrleitungen, Armaturen oder der Pumpe, zu vermeiden.
- Durchflussstörungen durch freie Gase lassen sich durch den entsprechenden Nachweis der Selbstentlüftbarkeit vermeiden.
- Mit dem Nachweis der Dampfreichweite können Schadenfälle infolge Stagnation vermieden werden.
- Schließlich wird der Planungsprozess wesentlich erleichtert und beschleunigt.

Die durch Polysun erzeugten XML Dateien sind in Klartext geschrieben und damit direkt lesbar. Die für die thermohydraulische Planung benötigten Daten sind durch sogenannte Tags und Attribute eindeutig gekennzeichnet. Die Schnittstelle zwischen THD und Polysun ist damit offengelegt.

5.2 Validierungsbedarf

Die zur Beschreibung des Stagnationsverhaltens verwendeten Modelle Zweiphasenströmung basieren auf der theoretischen und experimentellen Untersuchungen reiner Gas-Wasser oder Dampf-Wasser Strömungen. Die bei der Stagnation von Solaranlagen auftretende fraktionierte Destillation von Wasser-Glykol Gemisch kann nicht beschrieben werden. Außerdem gelten gerade die wichtigen Korrelationen zur Gegenstrombegrenzung für Leitungsdimensionen und Geometrien, die für die Notkühlung in Kernkraftwerken typisch sind. Im Weiteren gelten die verwendeten Drift-Flux Modelle für den Gasvolumenanteil, mit denen die Restmenge Flüssigkeit in den Absorbern beschrieben wird, nur für stationäre Strömung. Die Verdrängungsphase der Stagnationsvorgang ist jedoch ein ausgeprägt instationärer Prozess.

Es ist daher dringend erforderlich, die verwendeten Modelle durch gezielte Experimente zu validieren. Einzig bei Modellen für Absorber mit Mäanderabsorber ohne Sammelleitungen war bisher eine Validierung möglich [12], allerdings auf einer lückenhaften Datenbasis. Im Rahmen dieses Projekts wurde das Modell für Mäanderabsorber mit beheizten Sammelleitungen erweitert. Dies ist bereits mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die Erweiterung für folgende, ebenfalls wichtige Konfigurationen ist ohne weitergehende theoretische und experimentelle Untersuchungen nicht möglich:

- Geneigt angeordnete, direkt durchströmte, Vakuumröhrenkollektoren.
- Flachkollektoren mit Harfenabsorbern, deren Absorberrohre horizontal verlaufen.
- Flachkollektoren mit Harfenabsorbern, deren Absorberrohre in Neigungsrichtung verlaufen.
- Heat-Pipe Kollektoren.
- Parallele und serielle Schaltungsvarianten der oben genannten Konfigurationen.

Trotz dieser Unsicherheiten gewinnt man durch die Anwendung von THD sehr viel mehr Planungssicherheit als bisher.



5.3 Schlussfolgerungen

Das Planungswerkzeug THD in Kombination mit Polysun setzt neue Maßstäbe bei der Dimensionierung von Solaranlagen. Die Bedienung setzt keine Spezialkenntnisse voraus. THD kann daher von jeder Planerin und jedem Installateur angewendet werden, sofern er oder sie über das nötige Wissen und die Erfahrung im Bereich Solarthermie verfügt.

Durch die Vergleiche einer low-flow und mehrerer high-flow Varianten wurde gezeigt, dass man die Resultate einer Dimensionierung nicht auf Anlagenvarianten mit unterschiedlichen Rohrdimensionen übertragen darf. Aus dieser Erkenntnis lassen sich folgende Regeln ableiten:

- Die Wahl des Rohrfabrikats und der Rohrdimension sind verbindlich.
- Die Art der Druckhaltung und deren Dimensionierung sind verbindlich.
- Jede Änderung erfordert ihre eigene Dimensionierung mit den entsprechenden Nachweisen.

Der ausführende Installateur erhält eine Stückliste aller Kreislaufkomponenten, anlagenspezifische Diagramme zur Inbetriebnahme der Druckhaltung, sowie Angaben zum Einbauort von Luftabscheidern. Auf der Grundlage dieser Informationen kann die Anlage effizient und planungskonform, d.h. fehlerfrei ausgeführt werden.

Die Methode der thermohydraulischen Dimensionierung ermöglicht aber nicht nur die notwendige Kostenoptimierung von Solaranlagen. Indem bestehende Anlagen leicht nachgerechnet werden können, lässt sich diese Methode auch zur Diagnose von Betriebsstörungen einsetzen.



6 Literatur

1. Eismann, R. *Neue Methode zur thermohydraulischen Dimensionierung von Solaranlagen*. 26. *Symposium Thermische Solarenergie*. 2016. Bad Staffelstein: Ostbayerisches Technologie Transfer Institut OTTI.
2. Eismann, R. *Rechenprogramm zur thermohydraulischen Planung von Solaranlagen*. 19. *Status-Seminar, Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt*. 2016. ETH Zürich: Building and Renewable Energies Network of Technology BRENET.
3. Eismann, R., *Thermohydraulische Simulation - Der Schlüssel zur Kostensenkung bei Solaranlagen*, 1. *Internationale Konferenz zur Simulation gebäudetechnischer Energiesysteme2016*, ZHAW: Winterthur.
4. Eismann, R., *Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen, Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung*. 1. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
5. VDI, *VDI 4708: Druckhaltung, Entlüftung, Entgasung, Blatt 1*. VDI Richtlinie 2012, Beuth Verlag: Berlin.
6. Hausner, R. und C. Fink, eds. *Das Verhalten von Solaranlagen im Stagnationsfall*. 11. *Symposium Thermische Solarenergie*. 2001, Ostbayerisches Technologie Transfer Zentrum OTTI: Bad Staffelstein.
7. Lustig, K., *Experimentelle Untersuchungen zum Stillstandsverhalten thermischer Solaranlagen*. Diss. 2002, Univ. Karlsruhe: Karlsruhe.
8. Rommel, M., T. Siems, K. Schüle, S. Mehnert, und R. Becker, *Wieviel Dampf produziert ein Kollektor im Stillstandsfall?*, 15. *Symposium Thermische Solarenergie2005*, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut OTTI: Bad Staffelstein.
9. Rommel, M., T. Siems, K. Schüle, S. Mehnert, und C. Thoma, *Schlussbericht zum Teilprojekt: Entwicklung von Techniken zur Beherrschung des Stillstandsbetriebes, Verbundprojekt: Systemuntersuchungen grosser solarthermischer Kombianlagen2007*, Fraunhofer Gesellschaft für solare Energiesysteme ISE: Freiburg.
10. Hausner, R., C. Fink, W. Wagner, R. Riva, und F. Hillerns, *Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten, Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, I.u.T. Bundesministerium für Verkehr, Editor2003: Wien.
11. Scheuren, J., *Untersuchungen zum Stagnationsverhalten solarthermischer Kollektorfelder*. Dissertation 2008, Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau: Kassel University Press.
12. Eismann, R., *Thermohydraulik von Solaranlagen, Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Energietechnik*. Dissertation 2014, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.
13. VDI, *VDI-Wärmeatlas*. 11. Aufl. 2013, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag.