

# THD - Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen

Ralph Eismann<sup>1</sup>, Fiona Föllner<sup>2</sup>, Andreas Witzig<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Labor für Kernenergiesysteme, Schweiz

<sup>2</sup> Vela Solaris AG (Polysun), Winterthur, Schweiz

<sup>3</sup> Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Institute of Computational Physics ICP, Winterthur, Schweiz

## Zusammenfassung

Durch konsequenten Einsatz einer korrekten, thermohydraulischen Dimensionierung können die Anlagenkosten minimiert sowie Betriebsstörungen und deren Fehlerkosten vermieden werden. Damit werden nicht nur die Voraussetzungen für die Wettbewerbsfähigkeit der Solarthermie und die Langlebigkeit der Anlagen erfüllt, sondern auch das Vertrauen der Planer, Installateure, Bauherrschaften und Investoren in diese Technologie gestärkt.

Anhand eines Anwendungsbeispiels wird eine transparente Planungsmethodik demonstriert, welche die thermodynamische Planung mit der thermohydraulischen Planung des Solarkreises verknüpft. Das Programm THD zur thermohydraulischen Dimensionierung [1] basiert auf den Methoden, die in einem neu erschienenen Fachbuch [2] beschrieben sind. Gegenüber dem in [3] dargestellten Stand der Entwicklung führt das Programm folgende Dimensionierungsaufgaben weitgehend automatisiert aus:

- Rohrnetz- und Pumpendimensionierung
- Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes
- Rechnerischer Nachweis der Entlüftbarkeit
- Rechnerischer Nachweis der Dampfreichweite.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde außerdem eine Schnittstelle entwickelt, über welche Daten aus Polysun importiert werden können. Die Schnittstelle bietet folgende Vorteile bei der Anwendung des thermohydraulischen Dimensionierungsprogrammes:

- Umfangreiche Kataloge von Polysun stehen jederzeit zur Verfügung. Die Anlagendaten aus der thermodynamischen Simulation können importiert werden.

- Die Eckwerte der energetischen Planung (spezifischer Durchfluss, Bestrahlungsstärke, Maximal- und Minimaltemperaturen etc.) werden als Randbedingungen für die thermohydraulische Dimensionierung importiert.
- Der Aufwand und die Fehlermöglichkeit durch Mehrfacheingaben werden vermieden.

Als Resultat der neuen Planungsmethodik werden folgende Ziele zur Kostensenkung, Betriebssicherheit und Effizienzsteigerung erreicht:

- Die Ausführungsplanung ist für den Planer/Installateur wesentlich erleichtert. Der Planungsaufwand wird mindestens halbiert.
- Durch zielgenaue Planung werden die materiellen Kosten der Anlage minimiert.
- Gleichzeitig werden Fehlerkosten (Stagnation, Durchströmungsprobleme, Fehldimensionierung von Kreislaufkomponenten) vermieden.
- Schließlich wird durch diese Planungsmethodik eine neue Grundlage geschaffen für die entsprechende Ergänzung von Richtlinien und Normen.

Zielgruppen sind Anlagenplaner, Installateure, Entwickler von Kollektoren und anderen Anlagenkomponenten. Das Programm THD kann außerdem in der Handwerker-Ausbildung und in der Lehre an Fachhochschulen und Universitäten eingesetzt werden. Der Funktionsumfang von THD wird im nachfolgenden Auszug aus dem Schlussberichtes [1] dargestellt.

## 1. Planung mit Polysun und Datenexport

Die Planung einer Solaranlage beginnt mit der Entwicklung eines Energiekonzeptes, der Abklärung der baulichen Gegebenheiten und der energetischen Dimensionierung.

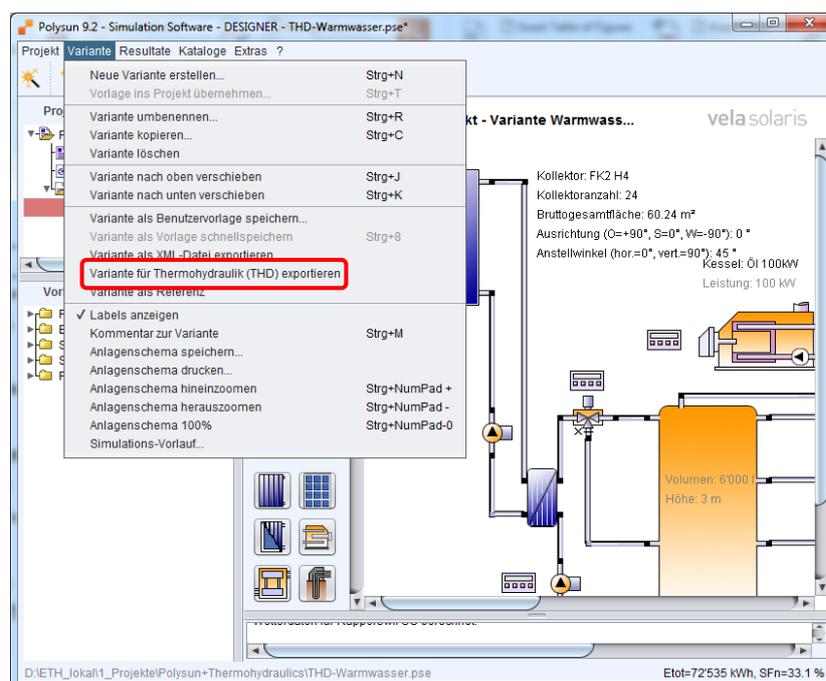


Abbildung 1-1 Polysun Menu für den Datenexport.

Die neueste Version von Polysun bietet nach Abbildung 1-1 die Möglichkeit, sämtliche Anlagendaten sowie die für die thermohydraulische Dimensionierung benötigten Eckdaten aus dem Datensatz der Simulation als XML-Datei zu exportieren.

## 2. Thermohydraulische Planung mit THD

Das Vorgehen bei der thermohydraulischen Planung wird anhand des Beispiels nach Abbildung 1-2 dargestellt. Die Anlage besteht aus 24 Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern und integrierten Sammelleitungen sowie einem Speicher mit 4000 l Inhalt. In der Variante 1 erfolgt die Beladung des Speichers über einen externen Plattenwärmetauscher im Low-Flow Betrieb. Die Variante 2 sowie der Einfluss unterschiedlicher Rohrformate auf das Stagnationsverhalten sind im Schlussbericht ausführlich dargestellt.

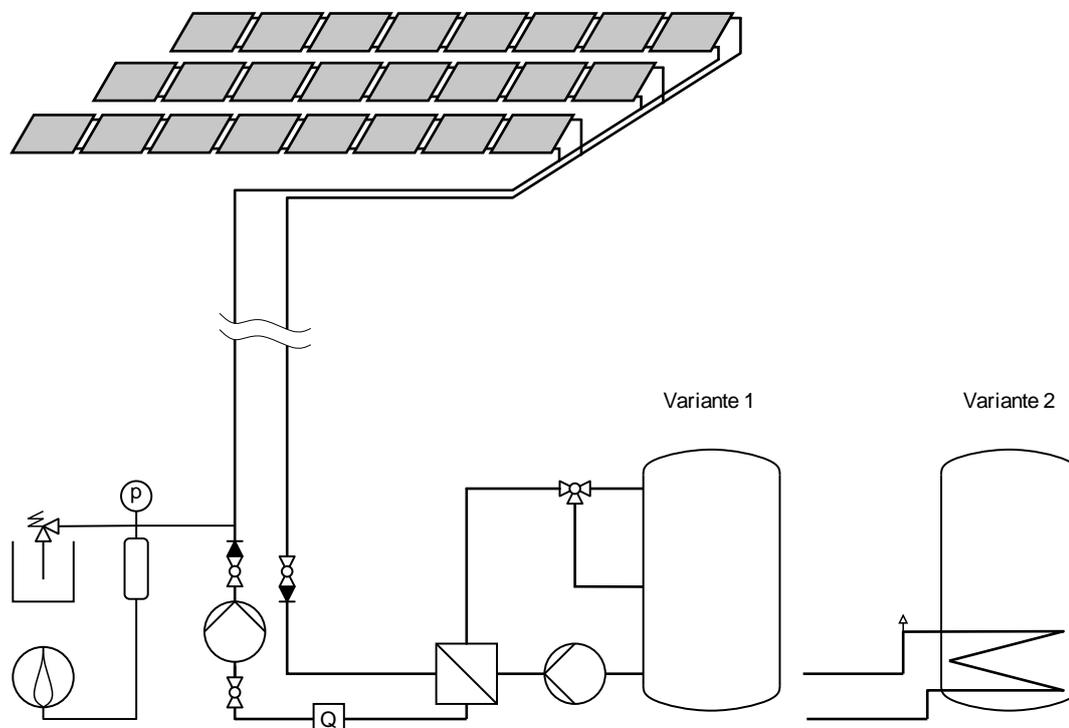


Abbildung 2-1 Solaranlage, Variante 1 low-flow, Variante 2 high-flow.

Für die thermohydraulische Planung stellt THD vier Tabellenblätter zur Verfügung. Diese werden in der Reihenfolge besprochen, in der sie bei der Dimensionierung abgearbeitet werden.

### 2.1. Spezifikation des Kollektorfeldes

Abbildung 2-2 zeigt die Eingabemaske des Tabellenblattes *Kollektorfeld + Betriebsweise*. Weiße Felder dienen zur Dateneingabe durch den Nutzer. Orange hinterlegte Zellen sind Rechenwerte. Graue Zellen stellen Werte dar, die aus Polysun importiert werden können. Die in Klammern gesetzten Zahlen stellen den Bezug zum Text her und sind in



Abweichungen gegenüber der in Polysun definierten Anzahl kommen. Solange das Kollektorfeld mit derselben Anzahl Reihen ausgeführt wird, ist die Auswirkung auf den Volumenstrom vernachlässigbar. Der Vorteil für den Anwender ist, dass auch große Kollektorfelder durch sehr wenige Angaben spezifiziert werden können.

## 2.2. Dimensionierung des Kreislaufs

Die in Polysun gemachten Eingaben werden über die neu geschaffene Exportfunktion in eine XML-Datei geschrieben, von THD gelesen und in der korrekten Reihenfolge in das Tabellenblatt *Kreislauf* eingetragen. Anschließend werden die Eingaben gemäß Abbildung 2-3 in Übereinstimmung mit dem Gebäudeplan vervollständigt.

Version: 27.02.2017							Kreislauf	Kreislauf+MAG			
Kreislaufelemente	Rohrdim.	Länge m	Wendel- Durchm. m	Parallele Rohre	Anzahl Winkel	Höhen- diff. m	Dicke Isolation mm	Fläche m <sup>2</sup>	Druck bar <sub>0</sub>	spezif. Durchfluss l/hm <sup>2</sup>	Aussen = a Polysun l/hm <sup>2</sup>
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											Trigress RB17 DN 25
14 Rückschlagventil											Trigress 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											GWFF MTW 25-3.5
20 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	1			2	0	25				
21 Kugelhahn											Trigress RB17 DN 25
22 Pumpe											Biral Redline A12
23 Kugelhahn											Trigress RB17 DN 25
24 Rückschlagventil											Trigress DN 25
25 Rohr C-Stahl Optipress	28x1.5	2			1	2	25				

Abbildung 2-3 Vollständige Spezifikation des Solarkreislaufs.

THD prüft während der Eingabe, ob der Kreislauf geschlossen ist und die Summe aller Höhendifferenzen (a) null ergibt. Sehr wichtig ist die Höhenangabe des Referenzpunktes bezüglich Anschlussnippel des Ausdehnungsgefäßes (b). Der Grund wird im Kapitel Stagnation erläutert. Bei der Pumpenwahl kann bei (c) ein Regelparameter zwischen null und eins definiert werden. Falls man aus dem Menu zur Pumpenwahl *Vorgegebener Durchfluss* wählt, wird der aus Polysun übertragene oder manuell eingegebene Wert (d) übernommen.

In THD sind alle Komponenten 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. Die Dateneingabe ist vollständig ereignisgesteuert. Dies bedeutet, dass sich Zellenformate sowie Inhalte von Kontextmenüs in Abhängigkeit der Eingabe ändern. Mit diesen Angaben ist der Kreislauf vollständig bestimmt.

## Rohr- und Pumpendimensionierung

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 die erforderlichen Druckrandbedingungen festgelegt bzw. geprüft. Abbildung 2-4 zeigt den Druckverlauf im Ruhezustand und im Betrieb. Ebenfalls dargestellt sind die Druckverläufe des Kollektorfeldes und der Pumpe. Dieses Diagramm dient gleichzeitig zur Orientierung für das folgende Diagramm zur Fließ- und Selbstentlüftungsgeschwindigkeit.

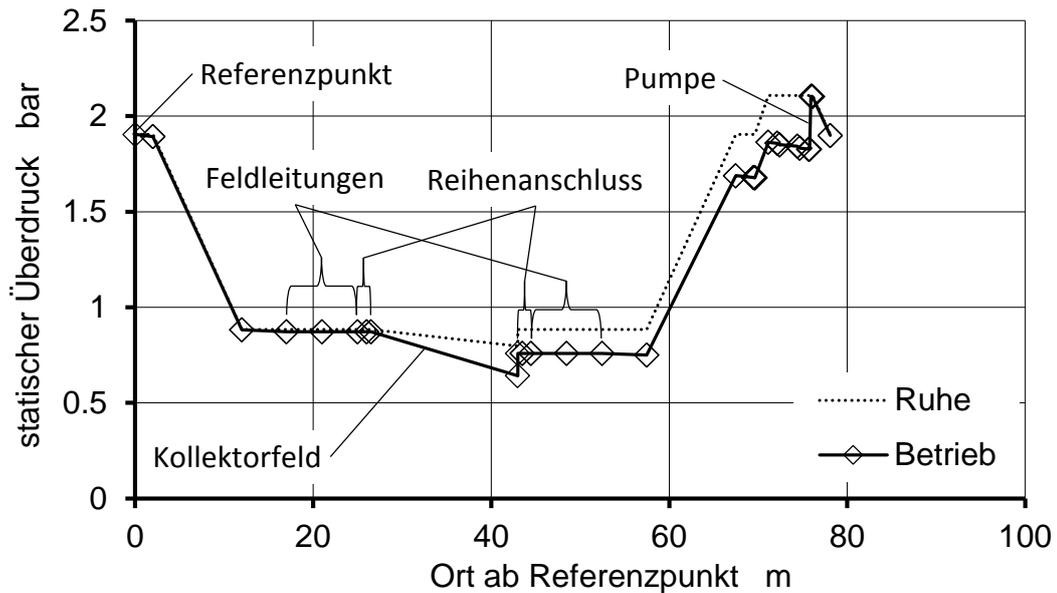


Abbildung 2-5 Druckverlauf im Ruhezustand und im Betrieb.

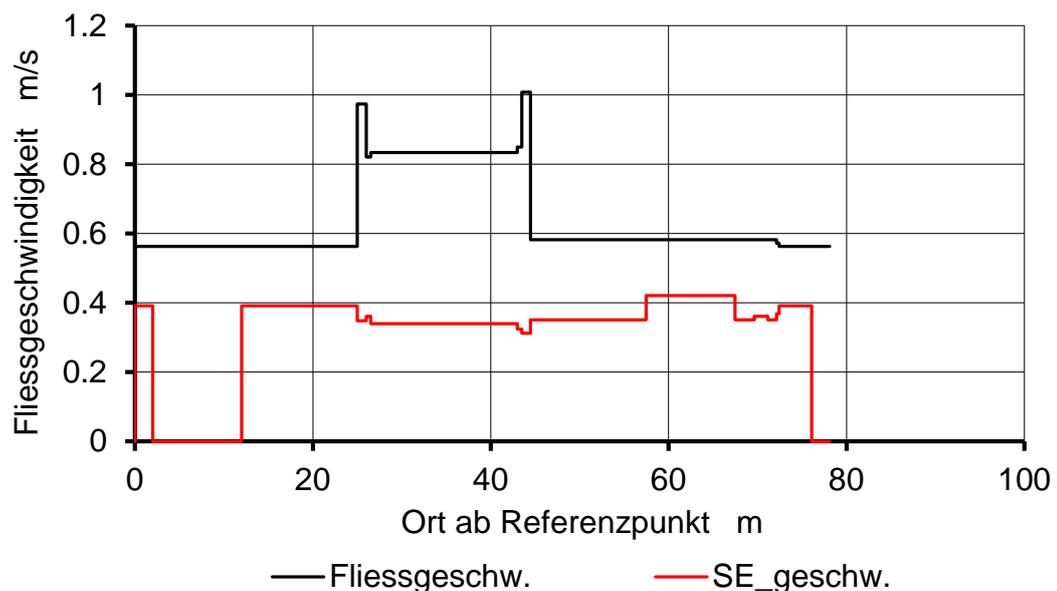


Abbildung 2-4 Fließ- und Selbstentlüftungsgeschwindigkeit.

## Nachweis der Entlüftbarkeit

Die Abbildung 2-5 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 sind 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.

## Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes

Die Dimensionierung des Membran-Druckausdehnungsgefäßes erfolgt nach einer neuen Methode, die auf der Arbeit [4] beruht und in [2] ausführlich beschrieben ist. Im Tabellenblatt nach Abbildung 2-6 muss lediglich spezifiziert werden, ob ein Membran-Druckausdehnungsgefäß (MAG) oder eine Kompressordruckhaltung vorgesehen ist. Alle weiteren Größen, beispielsweise die Anlagenhöhe und das Anlagenvolumen, berechnet das Programm aus den bereits eingegebenen Daten. Das bei Stagnation entstehende Dampfvolumen ist jedoch unbekannt und kann erst beim Nachweis der Dampfreichweite berechnet werden. Für die erste Iteration trifft das Programm die Annahme, dass das Dampfvolumen das 1.5-fache der Summe aller Kollektorinhalte ist.

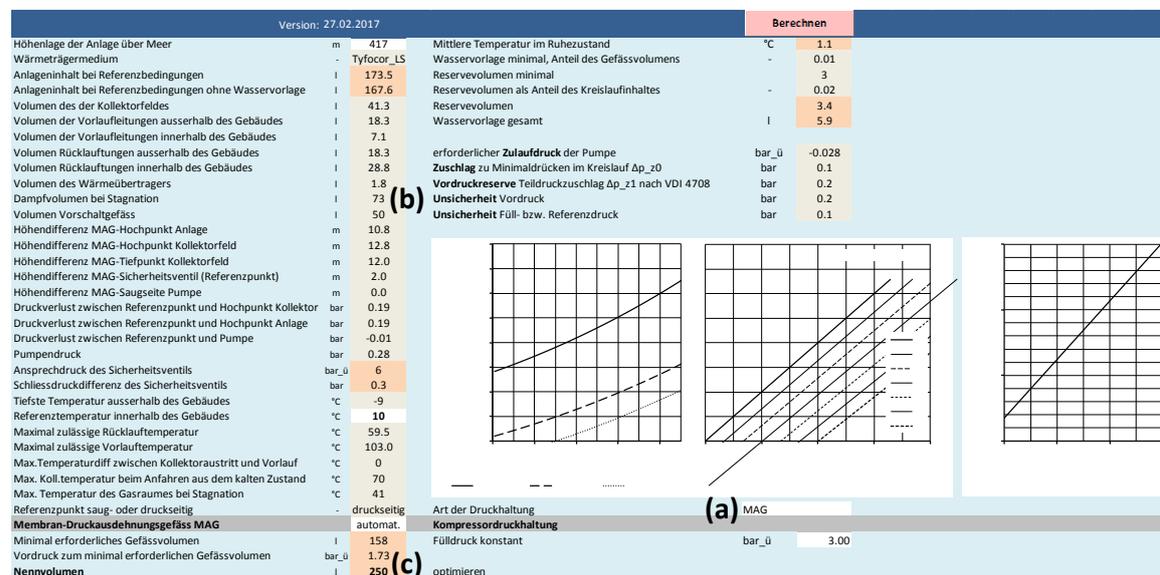


Abbildung 2-6 Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes.

Das Resultat der Dimensionierung wird in anlagenspezifischen Diagrammen dargestellt. Diese erlauben es dem Installateur, den Vordruck und den Systemdruck in Abhängigkeit der Gefäßtemperatur und der mittleren Kreislauftemperatur einzustellen.

### 2.3. 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.

Abbildung 2-7 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.

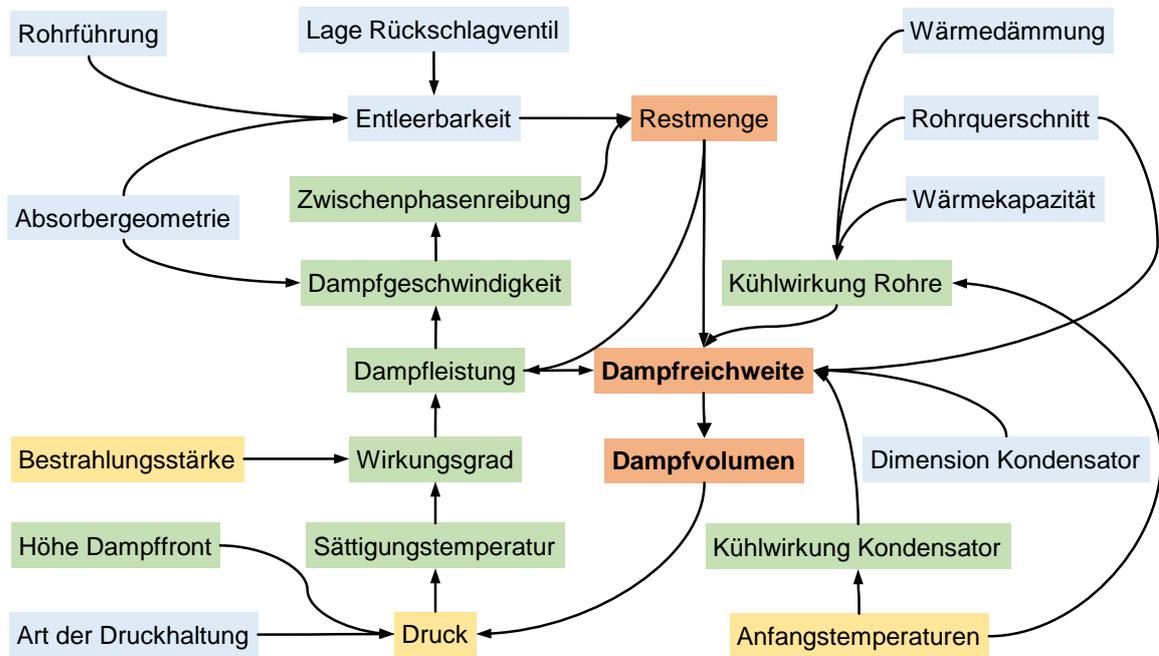


Abbildung 2-7 Einflüsse der Anlagendaten (blau), der Anfangs- und Randbedingungen (gelb) auf die Dampfreichweite und das Dampfvolumen.

Abbildung 2-8 zeigt das Tabellenblatt *Stagnation*, in das die erforderlichen Eingaben gemacht werden können. Oben rechts sind die Druckhaltung und ihr Anschluss an den Referenzpunkt des Kreislaufs schematisch dargestellt. 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 weit 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 durch die Eingabe des Rohrfabrikats, der Rohrdimension und der Rohrlänge definiert. Die Kühlrippen des Kondensators dienen zur Verbesserung des Wärmeübergangs an die Umgebung. Die Berechnung erfolgt nach [5]. Der Kondensator reicht allein nicht aus. In der Regel ist zusätzlich ein Vorschaltgefäß erforderlich, welches das MAG vor dem heißen Kondensat schützt. Das Vorschaltgefäß (c) wird durch die Angabe des Nennvolumens und des Innendurchmessers modelliert. Für die thermische Trägheit werden die spezifische Wärme von Stahl und eine Wanddicke des Zylinders von 3 mm angenommen. Böden werden vernachlässigt.

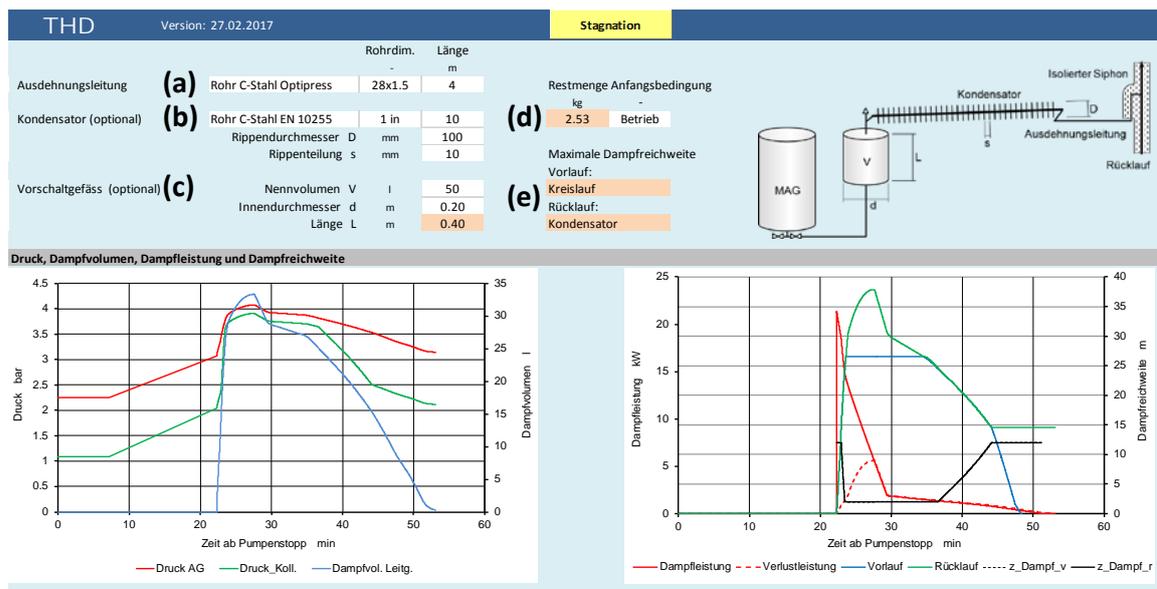


Abbildung 2-8 Tabellenblatt Stagnation: Eingabe und Simulationsergebnisse.

Durch Betätigen der Schaltfläche Stagnation werden die im gestrichelten Rahmen dargestellten Rechenschritte nach Abbildung 2-9 automatisch ausgeführt. Bei der Simulation des Stagnationsverlaufes wird das Dampfvolumen berechnet und als neue Randbedingung zur Dimensionierung des MAG vorgegeben. In der Regel reichen zwei Iterationen zur Bestimmung des erforderlichen Gefäßvolumens.

Nach Abbildung 2-3 (b) liegt der Referenzpunkt 2 m oberhalb des Wärmetauschers, sodass dieser vom Dampf nicht erreicht wird, solange dieser auf den Kondensator beschränkt bleibt. Falls die Pumpe, der Durchflussmesser, der Wärmeübertrager oder das MAG vom Dampf erreicht werden, würde die Rechnung abgebrochen und eine entsprechende Warnmeldung ausgegeben.

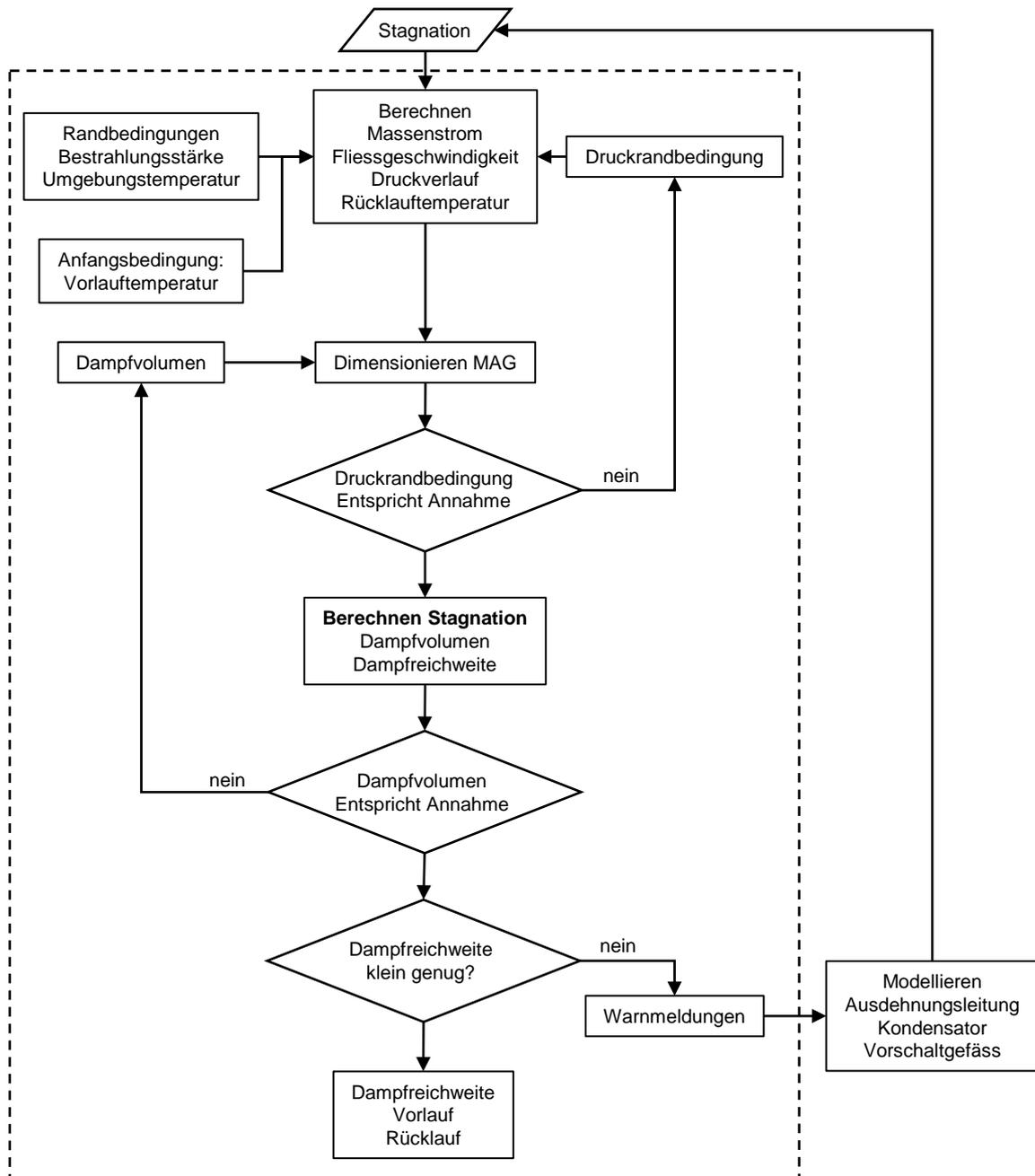


Abbildung 2-9 Programmablauf beim Nachweis der Dampfreichweite.

Der Benutzer muss dann die erforderlichen Maßnahmen treffen:

- Referenzpunkt weiter oben anordnen oder den Eintritt in den Wärmeübertrager tiefer legen.
- 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 mit größeren Dimensionen wählen.

Nach der Simulation erhält man in Abbildung 2-8 die Zeitentwicklung der Drücke und des Dampf volumens (linkes Diagramm) sowie die der Dampfleistung, der Verlustleistung und der Dampfreichweiten (rechtes Diagramm). Der Ort der maximalen Dampfreichweite (e) wird für die Vorlauf- und Rücklaufleitung ausgegeben.

### **3. Diskussion und Ausblick**

#### **3.1. Diskussion**

Die Solarthermiebranche steht gegenwärtig unter einem hohen Leistungs- und Kostendruck. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde mit THD ein fortschrittliches Werkzeug für die thermohydraulische Anlagenplanung geschaffen.

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.
- 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. Damit steht allen Anbietern von Simulationsprogrammen offen, eine entsprechende Schnittstelle zu entwickeln.

#### **3.2. Ausblick und Validierungsbedarf**

Mit THD können alle gängigen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren modelliert werden. Die Stagnationsmodelle sind gegenwärtig auf folgende Kollektortypen beschränkt:

- Flachkollektoren mit Mäanderabsorber, ohne Verteil- und Sammelleitung.
- Flachkollektoren mit Mäanderabsorber mit beheizter Verteil- und Sammelleitung.
- Direktdurchströmte, seriell geschaltete Vakuumröhrenkollektoren.

Die Ergänzung um weitere Kollektortypen ist geplant.

Die zur Beschreibung des Stagnationsverhaltens verwendeten Modelle der 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 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.

In einem gegenwärtig laufenden Projekt werden die bei Stagnation ablaufenden Prozesse durch umfangreiche Simulationen mit Hilfe des thermohydraulischen Rechenprogramms TRACE untersucht. Mit gewissen Einschränkungen ist es möglich, die in THD verwendeten Modelle anhand dieser Simulationen zu validieren [6]. Sowohl aus praktischer als auch wissenschaftlicher Sicht ist es jedoch notwendig, gezielte Validierungsexperimente durchzuführen.

### 3.3. Dank

Die Autoren danken dem Schweizerischen Bundesamt für Energie, insbesondere den Herren Andreas Eckmanns und Jean-Christophe Hadorn, für die Förderung und Begleitung dieses Projektes.

## 4. Referenzen

1. Eismann, R. und A. Witzig, 2017: Programm THD - Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen, Schlussbericht,ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern, <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38131>
2. Eismann, R., 2017: *Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen : Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung*. Wiesbaden: Springer Vieweg. XVIII, 287 Seiten,
3. Eismann, R. 2016: *Neue Methode zur thermohydraulischen Dimensionierung von Solaranlagen. 26. Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein: Ostbayerisches Technologie Transfer Institut OTTI.
4. Eismann, R., K. Rühling, und C. Thesing, 2017: *Dimensioning of membrane expansion vessels for solar thermal circuits*. Solar Energy (in publication).
5. VDI, 2013: *VDI-Wärmeatlas*. 11. ed, ed. V.-G.V.u.C. Verein Deutscher Ingenieure. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag,
6. Eismann, R., 2014: *Thermohydraulik von Solaranlagen, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Institut für Energietechnik*