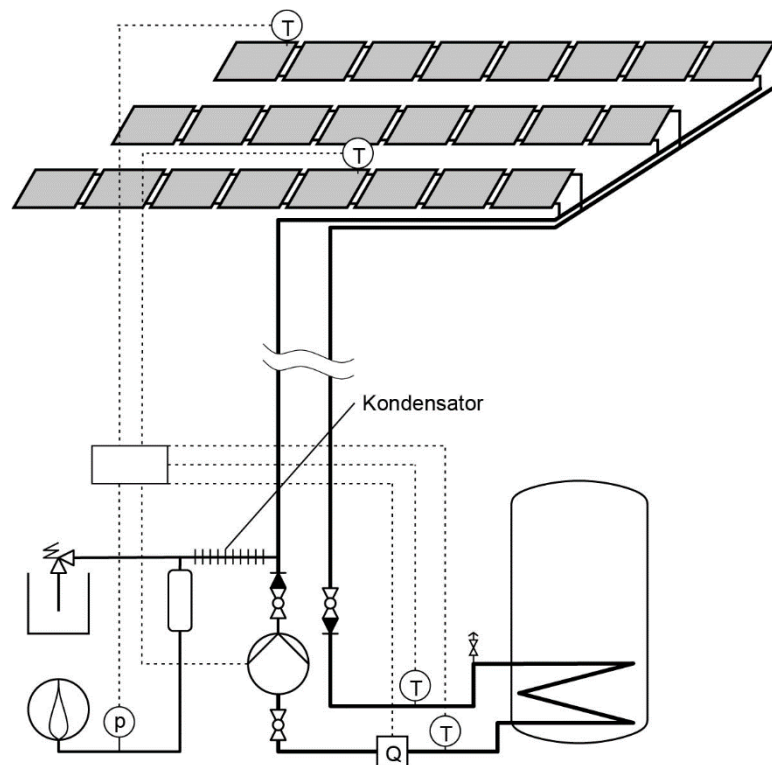


# HYDRA – Thermohydraulische Dimensionierungssoftware für druckbefüllte Solaranlagen und Drainback Solaranlagen

## Bedienungsanleitung mit Beispielen



Ralph Eismann, Andreas Genkinger

Muttenz, 18.11.2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1	VORWORT ZUR ZWEITEN AUFLAGE .....	4
1.2	ZIELE DER THERMOHYDRAULISCHEN DIMENSIONIERUNG .....	5
1.3	PLANUNGSABLAUF UND PLANUNGSSOFTWARE .....	6
1.4	HINWEISE ZUR NUTZUNG DER ANLEITUNG .....	7
1.5	ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR HYDRA .....	7
1.5.1	<i>Anlagendimensionierung</i> .....	7
1.5.2	<i>Überprüfung der Betriebssicherheit</i> .....	8
1.5.3	<i>Analyse von Betriebsstörungen</i> .....	8
1.5.4	<i>Entwicklung von Kollektoren und Anlagensortimenten</i> .....	8
1.6	ÜBERBLICK ÜBER DEN LEISTUNGSUMFANG .....	8
1.6.1	<i>Randbedingungen und Betriebszustände</i> .....	8
1.6.2	<i>Modellierung von Kollektorfeldern</i> .....	9
1.6.3	<i>Modellierung des Kreislaufs</i> .....	9
1.6.4	<i>Druckverlust und Strömungsverteilung</i> .....	9
1.6.5	<i>Leistung und Temperaturverteilung und Fließgeschwindigkeiten</i> .....	10
1.6.6	<i>Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten</i> .....	10
1.7	HAFTUNGSAUSSCHLUSS .....	10
<b>2</b>	<b>BEDIENUNGSANLEITUNG.....</b>	<b>11</b>
2.1	EINSTELLUNGEN IN EXCEL .....	11
2.2	ARBEITSBLÄTTER UND FARBCODES .....	12
2.3	MODELLIEREN DER SOLARANLAGE .....	13
2.4	RANDBEDINGUNGEN FÜR ANLAGENBETRIEB UND RECHNUNG .....	14
2.4.1	<i>Standardeinstellungen für Betriebsbedingungen und Rechnung</i> .....	14
2.4.2	<i>Speichern mit und ohne Programmcode</i> .....	15
2.5	KOLLEKTORFELDER .....	16
2.5.1	<i>Definition von Kollektorreihe und Strang</i> .....	16
2.5.2	<i>Konfigurationen der Verrohrung</i> .....	16
2.5.3	<i>Freiheitsgrade bei der Verschaltung</i> .....	17
2.5.4	<i>Möglichkeiten der Modellierung</i> .....	18
2.5.5	<i>Integrierte und externe Verteil- und Sammelleitungen</i> .....	19
2.5.6	<i>C- und Z-Konfiguration bei komplexen Kollektorfeldern</i> .....	20
2.6	SOLARKREIS UND DRUCKHALTUNG .....	21
2.6.1	<i>Verbindungsleitungen, Armaturen, Wärmeübertrager und Pumpe</i> .....	21
2.6.2	<i>Anlagenhöhe und Druckhaltung</i> .....	23
2.7	MODELLE .....	23
2.7.1	<i>Kollektoren</i> .....	23
2.7.2	<i>Rohrleitungen</i> .....	27
2.7.3	<i>Armaturengruppen</i> .....	29
2.7.4	<i>Wärmeübertrager und Durchflussmesser</i> .....	30
2.7.5	<i>Pumpen</i> .....	30
<b>3</b>	<b>DIMENSIONIERUNG VON DRUCKBEFÜLLTEN SOLARANLAGEN.....</b>	<b>31</b>
3.1	GRUNDSÄTZE .....	31
3.2	HINWEISE ZUM VORGEHEN.....	31
3.2.1	<i>Hohe Globalstrahlung und hohe Umgebungstemperatur</i> .....	31
3.2.2	<i>Normalbetrieb und Standardberechnungen</i> .....	31
3.2.3	<i>Betrieb bei tiefen Temperaturen</i> .....	32
3.2.4	<i>Rücklauftemperatur, Stoffdaten und Durchfluss</i> .....	32

3.3	SOLARANLAGE MIT 138 M <sup>2</sup> FLACHKOLLEKTOREN .....	32
3.3.1	<i>Eckdaten der baulichen Abklärung und der energetischen Dimensionierung</i> .....	32
3.3.2	<i>Modellieren der Anlage</i> .....	33
3.3.3	<i>Volumenstrom-, Temperatur- und Druckverteilung</i> .....	38
3.4	VARIANTE REIHENANSCHLUSS UND FELDVERROHRUNG IN Z-KONFIGURATION .....	40
3.4.1	<i>Volumenstrom-, Temperatur- und Druckverteilung</i> .....	41
3.5	VERGLEICHENDE BEURTEILUNG DER C-C UND Z-Z KONFIGURATION.....	43
3.6	KOLLEKTORFELD MIT 276 M <sup>2</sup> FLACHKOLLEKTOREN UND SYMMETRISCHER ANBINDUNG .....	44
3.7	GROSSKOLLEKTOR MIT 5 MÄANDERABSORBERN UND INTEGRIERTEN SAMMELLEITUNGEN .....	45
3.8	GROSSKOLLEKTOR MIT HARFENABSORBER .....	51
<b>4</b>	<b>DIMENSIONIERUNG VON DRAINBACK-ANLAGEN MIT DRUCKLOSEM SPEICHER .....</b>	<b>55</b>
4.1	DIMENSIONIERUNG MIT HYDRA .....	56
4.1.1	<i>Minimaler Volumenstrom für sichere Entlüftung</i> .....	56
4.1.2	<i>Erforderlicher Öffnungsdruck des Überströmventils und erforderlicher Pumpendruck</i> .....	57
4.1.3	<i>Betriebspunkt bei Maximal- und Minimaldrehzahl</i> .....	59
4.1.4	<i>Strömungs- Temperatur- und Druckverteilung</i> .....	60
4.1.5	<i>Nachweis der Stagnationssicherheit</i> .....	62
<b>5</b>	<b>DANK .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>65</b>

## Zusammenfassung

Die vorliegende Anleitung beschreibt die Software HYDRA, mit der grosse solarthermische Anlagen dimensioniert werden können. HYDRA wurde in Visual Basic for Applications (VBA) unter EXCEL programmiert und läuft auf Rechnern unter Windows und macOS.

Es können druckbefüllte Solaranlagen mit einigen tausend Quadratmetern Kollektorfläche modelliert werden. Für die Modellierung stehen umfangreiche Kataloge für Kollektoren, Pumpen, Armaturengruppen und Rohrleitungen zur Verfügung. Diese Kataloge können beliebig erweitert werden. Die stationäre Simulation unter vorgebbaren Randbedingungen liefert die thermische Leistung, die Druckverluste sowie die Strömungs-, Temperatur- und Druckverteilung im Kollektorfeld.

Die neueste Version HYDRA-2511\_de.xlsb ermöglicht die Dimensionierung von Drainback Systemen mit drucklosem Speicher. Der Mindestvolumenstrom und der erforderliche Pumpendruck für sichere Entlüftung des Kollektorfeldes können berechnet werden. Ausserdem kann der Gegendruck des Überströmventils bestimmt werden. Dieses sorgt dafür, dass der Betriebsdruck am Hochpunkt um einen festlegbaren Betrag über dem Atmosphärendruck liegt. Schliesslich kann mittels Simulationsrechnung geprüft werden, ob das Dissipationsvermögen des Kreislaufes ausreicht, um den bei Stagnation entstehenden Dampf vollständig zu kondensieren.

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation für eine neue Version der Anleitung

Hauptmotivation für eine zweite Auflage der Anleitung war der Abschluss des Projektes SimplyDrain2 (Philippen, Eismann et al. 2025), in dessen Rahmen HYDRA für die Planung von Drainback-Anlagen mit atmosphärischem Speicher erweitert wurde. Im Weiteren wurden die ActiveX-Schaltflächen durch einfache Command-Buttons ersetzt, um die Ausführbarkeit auf Macintosh-Rechnern zu erleichtern und weil Microsoft ActiveX Elemente standardmässig sperrt. Die Stoffdatentabellen wurden aktualisiert. Neu wird auch die hydraulische Pumpleistung berechnet. Die Rohrrauigkeit kann als globaler Parameter vorgegeben werden. Für den Nachweis der Entlüftbarkeit wird die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit an den kritischen Orten des Kreislaufs berechnet. Es können eine oder mehrere seriell geschaltete, drehzahlgeregelte Pumpen definiert werden. Der Rohrkatalog wurde erweitert und um Kunststoffrohre ergänzt. Alle Beispiele wurden neu gerechnet.

Vollständig neu sind die Berechnungsmöglichkeiten, die zur Dimensionierung von Drainback-Systemen mit atmosphärischem Speicher benötigt werden. Diese umfassen die Berechnung des minimal erforderlichen Volumenstroms, der die sichere Entlüftung des Kollektorfeldes bei der Befüllung gewährleistet, die Berechnung des erforderlichen Druckabfalles, der durch das Überströmventil erzeugt werden muss, sowie die Simulation der Dampfausbreitung bei Stagnation. Die neueste Version von HYDRA und die zugehörige Anleitung kann unter [Solar Thermal Pipe Network Analysis download | SourceForge.net](#) heruntergeladen werden.

## 1.2 Ziele der thermohydraulischen Dimensionierung

Thermische Solaranlagen müssen nicht nur energieeffizient sein, sondern auch kostenoptimal und betriebssicher. Es genügt daher nicht, eine Solaranlage energetisch zu dimensionieren. Investitions- und Betriebskosten werden massgeblich durch die Rohrführung, die Dimensionen von Rohren, Armaturen und Pumpe bestimmt. Voraussetzung für die Betriebssicherheit ist die korrekt dimensionierte Druckhaltung und der Nachweis der Stagnationssicherheit. Diese Aufgaben sind Bestandteil der Anlagenplanung und dürfen nicht dem ausführenden Betrieb überlassen werden – es sei denn, dieser macht die Planung selbst und kann die entsprechenden Honorare beanspruchen.

Bei der hydraulischen Dimensionierung von Rohrnetzen werden primär Strömungsvorgänge erfasst. Sobald Temperaturen eine massgebende Rolle spielen oder Strömungen von Gemischen aus Flüssigkeit und Gas bzw. Dampf auftreten, beispielsweise bei der Stagnation und Entlüftung, muss man neben der Hydraulik auch die Thermodynamik berücksichtigen. Die hydraulischen und thermodynamischen Vorgänge sind durch die Erhaltungsgleichungen der Masse, des Impulses und der Energie gekoppelt. Man spricht daher von «thermohydraulischer Dimensionierung».

Für die effiziente Bewältigung dieser Aufgaben wurden die beiden Programme HYDRA und THD entwickelt. Das Programm HYDRA wurde durch den Erstautor seit 2004 entwickelt und laufend erweitert. Es kann bei der Entwicklung von Kollektoren und Anlagensystemen eingesetzt werden und eignet sich für die Planung von grossen Solaranlagen mit über tausend Quadratmetern Kollektorfläche. Das Programm THD (**T**hermo**H**ydraulische **D**imensionierung) wurde zur Dimensionierung von Anlagen für Kleinanlagen entwickelt. Die Entwicklung von THD wurde durch das Bundesamt für Energie gefördert (Eismann, Föllner et al. 2017). Es eignet sich in erster Linie zur Dimensionierung von kleineren Anlagen bis rund 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, bietet aber gegenüber HYDRA einige Zusatzfunktionen, die für die Inbetriebnahme, die Wartung und die Betriebssicherheit wichtig sind. Tabelle 1 zeigt die Einsatzgebiete der beiden Programme. Die vorliegende Anleitung beschränkt sich auf den Einsatz von HYDRA in der Anlagenplanung.

Tabelle 1 Funktionen von HYDRA und THD

Funktion	HYDRA	THD
Rohrnetz- und Pumpendimensionierung	✓	✓
Strömungs- und Temperaturverteilung in Kollektorfeldern	✓	
Dimensionierung von Expansionsgefäßen	-	✓
Nachweis der Dampfreichweite bei Stagnation von druckbefüllten Anlagen	-	✓
Nachweis der Dampfausbreitung bei Stagnation von Drainback-Anlagen	✓	-
Nachweis der Entlüftbarkeit	✓	✓
Druckhaltung bei Drainback-Anlagen mit atmosphärischem Speicher	✓	-

### 1.3 Planungsablauf und Planungssoftware

Vor der Planung einer Solaranlage müssen das Energiekonzept festgelegt und die baulichen Gegebenheiten sorgfältig geklärt werden. Die eigentliche Planung umfasst im Wesentlichen drei Schritte. Diese umfassen die energetische und die thermohydraulische Dimensionierung.

#### **Energetische Dimensionierung:**

1. Festlegen des Kollektortyps, der Anzahl Kollektoren, des Speichers und des Wärmeübertragers.

#### **Thermohydraulische Dimensionierung:**

2. Bestimmen der kostenoptimalen Anordnung von Kollektoren und der Rohrführung im Kollektorfeld. Dimensionierung aller Rohre des Kreislaufes, der Armaturen und der Pumpe.
3. Dimensionierung der Druckhaltung, Nachweis der Stagnationssicherheit, Nachweis der Entlüftbarkeit.

Für den ersten Planungsschritt, die energetische Dimensionierung, stehen komfortable und leistungsfähige Simulationsprogramme zur Verfügung, beispielsweise Polysun (Vela Solaris AG) oder T\*Sol (Valentin Software GmbH) oder der Solarrechner, der als kostenfreie Webapplikation zur Verfügung steht. Auf der Grundlage der energetischen Dimensionierung erfolgt die thermohydraulische Dimensionierung.

Planungsschritt 2 kann mit HYDRA vollständig und effizient bewältigt werden. Für den Planungsschritt 3 wurde das Programm THD entwickelt, das in dieser Anleitung nicht behandelt wird. Die theoretischen Grundlagen beider Programme sind in Eismann (2017) ausführlich hergeleitet. Die Rohrreibungszahlen für gerade Rohre werden nach Zanke (1996), jene für Rohrwendel nach Eismann und Adams (2018) berechnet. Für die Beurteilung einer Dimensionierung ist es hilfreich zu wissen, ob die Strömung in den Absorberrohren eher laminar oder turbulent ist. Dies wird anhand der Wahrscheinlichkeit für turbulente Strömung entschieden. Bei einer Reynoldszahl unter 2560 ist die Wahrscheinlichkeit für turbulente Strömung kleiner als 25 %, und die Strömung

wird als laminar bezeichnet. Bei einer Reynoldszahl über 3190 ist die Wahrscheinlichkeit für turbulente Strömung grösser als 75 %, und die Strömung wird als turbulent bezeichnet.

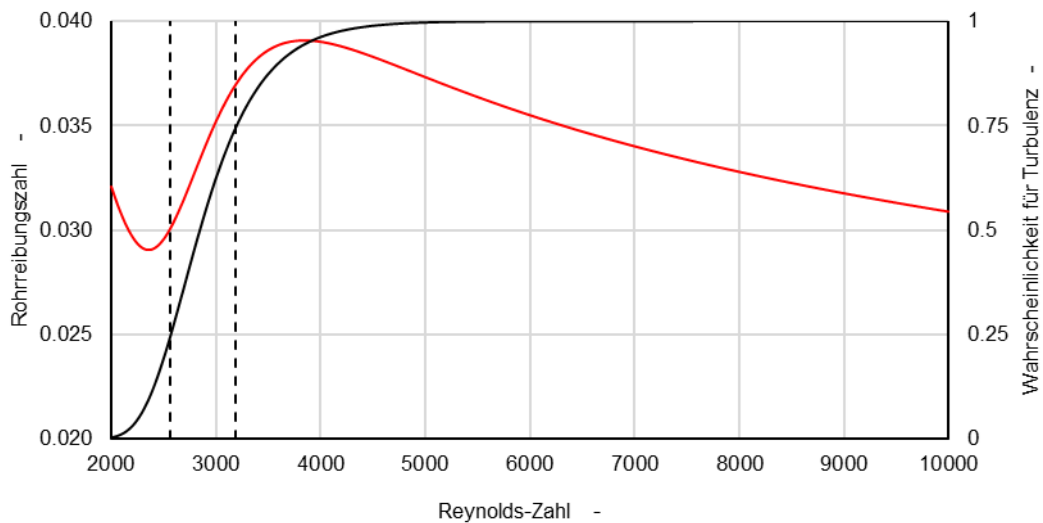


Abbildung 1 Rohrreibungszahl (rot) und Wahrscheinlichkeit für turbulente Strömung (schwarz).

## 1.4 Hinweise zur Nutzung der Anleitung

Wer HYDRA zum ersten Mal nutzt, erhält in den Abschnitten 1.4 bis 1.6 einen Einblick über die Anwendungsmöglichkeiten und den Leistungsumfang. Die eigentliche Bedienungsanleitung in Kapitel 2 beginnt auf Seite 11.

HYDRA besteht aus mehreren Arbeitsblättern, von denen im Tagesgeschäft aber nur wenige benutzt werden, beispielsweise das Tabellenblatt «Anlagendaten», das Tabellenblatt «Fliegeschw» und die Diagramme für die Strömungs- und Temperaturverteilung im Betrieb. Bei Drainback-Systemen werden ausserdem die Tabellenblätter «Drainback», «Leistungsverluste» und «Stagnation» genutzt.

Im Abschnitt 3 ab Seite 31 werden die Möglichkeiten der Modellierung anhand von Beispielen erläutert.

## 1.5 Anwendungsmöglichkeiten für HYDRA

### 1.5.1 Anlagendimensionierung

Die wichtigste Anwendung von HYDRA ist die thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen. Es können Kollektorfelder mit folgenden Kollektortypen dimensioniert werden:

- Flachkollektoren mit und ohne Abdeckung sowie photovoltaisch-thermische Kollektoren («PVT-Kollektoren»)
- Vakuumröhrenkollektoren, direkt durchströmt
- Vakuumröhrenkollektoren, Heatpipe
- Grosskollektoren, die mehrere Teilabsorber beinhalten

Zu einer gegebenen Feldanordnung kann die kostengünstigste Verrohrungsvariante mit den zugehörigen Leitungsdimensionen und der dazu passenden Umwälzpumpe gefunden werden. Für

die Kollektoren, Pumpen, Armaturengruppen und Wärmeträgermedien stehen Komponentenkataloge zur Verfügung, die durch die Nutzerin oder den Nutzer beliebig erweitert werden können.

Die Berechnung der Druckverluste und der Strömungsverteilung basieren auf gut abgesicherten Modellen. Es ist daher in den meisten Fällen möglich, auf Strangreguliertventile zu verzichten und den hydraulischen Abgleich allein durch die geeignete Wahl der Leitungsdimensionen zu erreichen. Dies spart Kosten und reduziert die Möglichkeiten von Fehlern infolge Ventildefekt oder Fehleinstellung.

### **1.5.2 Überprüfung der Betriebssicherheit**

Die Rechnung bei verschiedenen extremalen Randbedingungen ermöglicht es, ungünstige Betriebszustände zu erkennen und zu vermeiden. Beispielsweise zu hohe Fließgeschwindigkeiten. Anhand der Austrittstemperaturen der Kollektoren und der Sammelleitungen kann der geeignete Ort für den Temperaturfühler gefunden werden, bei dem die Temperatur am wenigsten von der Vorlauftemperatur abweicht. Dies ermöglicht die zuverlässige Regelung und vermeidet Reklamationen von Kunden, denen eine zu grosse Differenz zwischen Kollektor- und Vorlauftemperatur auffällt.

### **1.5.3 Analyse von Betriebsstörungen**

Der erwartete Durchfluss einer bestehenden Anlage kann mit wenig Aufwand nachgerechnet werden. Dies ist sehr wertvoll bei der Analyse von Betriebsstörungen. Liegt der gemessene Gesamtdurchfluss deutlich unter dem berechneten Wert, so muss ein Fehler bei der Ausführung (z.B. zu geringe Querschnitte bei Rohren und Armaturen) oder eine Betriebsstörung (z.B. Luft im System) vermutet werden.

Häufig will man auch prüfen, ob eine Anlage die erwartete Leistung bringt. Dazu vergleicht man die momentane Leistung (z.B. Anzeige des Wärmezählers) mit dem Wert, der mit HYDRA bei der momentanen Bestrahlungsstärke berechnet wird. Die Bestrahlungsstärke kann beispielsweise mit einem mobilen Pyranometer gemessen werden.

### **1.5.4 Entwicklung von Kollektoren und Anlagensortimenten**

Durch die Anwendung von HYDRA, in Kombination mit thermodynamischen Simulationsprogrammen, kann bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung geprüft werden, welche Konzepte für Kollektoren und Anlagensysteme das Lastenheft erfüllen. Dieses Vorgehen ist sehr zeitsparend sowie wesentlich zielgenauer und kostengünstiger als der Weg über die experimentelle Untersuchung von Prototypen. Schliesslich können mit HYDRA effizient «Gesamtpakete» konfiguriert und dimensioniert werden.

## **1.6 Überblick über den Leistungsumfang**

### **1.6.1 Randbedingungen und Betriebszustände**

- HYDRA rechnet mit konstanten Randbedingungen, die durch die Benutzerin bzw. den Benutzer vorgegeben werden können. Dies sind die Bestrahlungsstärke, die Umgebungstemperatur und die Eintrittstemperatur in das Kollektorfeld.

- Als Wärmeträgermedium können handelsübliche Wasser-Glykol Gemische sowie Wasser ausgewählt werden. Die Stoffdaten sind im Programm hinterlegt und können beliebig erweitert werden.
- Es werden stationäre Betriebszustände berechnet. Diese sind gekennzeichnet durch einen konstanten Durchfluss, konstante thermische Leistung und konstante Austrittstemperaturen.
- Der Durchfluss kann auf zwei Arten festgelegt werden:
  - 1) Durch Eingabe eines spezifischen Durchflusses. In diesem Fall ist der Druckverlust das primäre Resultat der Rechnung. Die Anlagenkennlinie wird als Diagramm dargestellt, mit dem entsprechenden Druckverlust im Betriebspunkt.
  - 2) Durch die Wahl einer Umwälzpumpe. Der resultierende Durchfluss ist das primäre Resultat der Rechnung. Die Anlagenkennlinie und die Pumpenkennlinie werden als Diagramm dargestellt, mit dem Betriebspunkt im Schnittpunkt der beiden Kurven. Anhand des Diagramms lässt sich entscheiden, ob die Pumpe passend gewählt wurde.

### **1.6.2 Modellierung von Kollektorfeldern**

- Es können maximal zwei gleichartige oder unterschiedliche Kollektorfelder modelliert werden.
- Die Kollektorfelder können parallel oder in Serie geschaltet sein.
- Jedes Kollektorfeld kann aus beliebig vielen Kollektorreihen bestehen, bei denen einzelne Kollektoren durch Verteil- und Sammelleitungen parallel geschaltet sind.
- Kollektorreihen können auch aus einer Parallelschaltung von mehreren Strängen bestehen, die ihrerseits durch seriell geschalteten Kollektoren bzw. Absorber gebildet sind.

Grosskollektoren mit komplexer Hydraulik können näherungsweise durch vereinfachte Hydraulik abgebildet werden. Dies ermöglicht die Modellierung von Kollektorfeldern in der Grössenordnung von 100'000 m<sup>2</sup> Fläche.

### **1.6.3 Modellierung des Kreislaufs**

- Für den Kreislauf können Verbindungsleitungen, Armaturengruppe, Durchflussmesser, Glattrohr- oder Plattenübertrager sowie Umwälzpumpe spezifiziert werden.

### **1.6.4 Druckverlust und Strömungsverteilung**

- Der Gesamtdruckverlust und der Druckverlust der wichtigsten Einzelkomponenten werden als Zahlenwerte dargestellt. Dadurch kann ein „Flaschenhals“ leicht identifiziert werden.
- Der luftgefüllte Bereich eines direkt durchströmten Drain-Back Gefässes erzeugt einen hydrostatischen Gegendruck, der näherungsweise proportional zur Höhe der fehlenden Wassersäule ist. Dadurch kann der Durchfluss im Betrieb einer Drain-Back Anlagen berechnet werden. Hingegen lässt sich die bremsende Wirkung einer Luftbeladung in Rohrleitungen auf diese Weise nicht abschätzen, weil der Druckverlust einer Zweiphasenströmung wesentlich von deren Strömungsform abhängt und meist um ein Vielfaches höher ist als eine reine Flüssigkeitsströmung.
- Der Volumenstrom und der Druckverlust der beiden Kollektorfelder werden als Zahlenwerte ausgegeben.

- Die Volumenstromverteilungen durch die einzelnen Kollektoren innerhalb der Kollektorfelder werden als Balkendiagramme dargestellt. Anhand der Farbdarstellung lässt sich ablesen, ob die Strömung in den Absorberrohren laminar (blau) oder turbulent (rot) ist.

Der Gesamtvolumenstrom und der Druckverlust der Anlage sowie die hydraulische Pumpleistung werden als Zahlenwerte ausgegeben.

### **1.6.5 Leistung und Temperaturverteilung und Fließgeschwindigkeiten**

- Die thermische Leistung und die Austrittstemperatur des Kollektorfeldes werden als Zahlenwerte ausgegeben. Die Austrittstemperaturen der Kollektoren werden auch grafisch als Balkendiagramme dargestellt.
- Auch die Mischtemperaturen in den Sammelleitungen werden als Balkendiagramme dargestellt.
- Indem als Globalstrahlung null eingesetzt wird, kann zu einer gegebenen Vorlauftemperatur die Rückkühlleistung des Kollektorfeldes als Funktion der Aussentemperatur abgeschätzt werden. Hierzu wird das empirische Kollektormodell nach der Prüfnorm (DIN 2017) verwendet.

### **1.6.6 Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten**

- Für einen vorgebbaren Druck am Referenzpunkt der Druckhaltung wird die Druckverteilung über die Verteil- und Sammelleitungen aller Kollektoren berechnet und in Balkendiagrammen dargestellt. Dabei wird berücksichtigt, ob das Ausdehnungsgefäßes auf der Saug- oder Druckseite der Pumpe angeschlossen ist.
- Für alle Komponenten des Kreislaufes und die wichtigsten Bereiche der Kollektorfelder werden die Fließgeschwindigkeiten als Tabellenwerte ausgegeben.

## **1.7 Haftungsausschluss**

HYDRA wird als Open Source unter der MIT-Lizenz zur Verfügung gestellt. Es gilt der im Programmcode und in der Lizenzdatei enthaltene Haftungsausschluss. Die im Programm hinterlegten Parameter für Kollektoren, Pumpen, Armaturengruppen, Rohre und Stoffdaten sind ohne Gewähr. Weder der Autor noch die FHNW sind haftbar für Problem- und Schadenfälle an Solaranlagen, die mit Hilfe von HYDRA dimensioniert wurden.


## 2 Bedienungsanleitung

Die folgende Bedienungsanleitung führt die Anwenderin und den Anwender Schritt für Schritt durch das Programm, von der Eingabe der Anlagedaten bis zur Ausgabe der Resultate. Zuerst wird ein Überblick über die Arbeitsblätter gegeben. Anschliessend wird ausführlich dargestellt, welche Daten für die Modellierung der Solaranlage erforderlich sind und welche Daten in Modellkatalogen hinterlegt werden können.

Die jeweils neueste Version von HYDRA kann unter <https://sourceforge.net/projects/solar-pipe-network-analysis/> heruntergeladen werden. Der Dateiname lautet «HYDRA-JJMM.xlsm», wobei JJMM für die Programmversion, also das Erstellungsdatum (Jahr JJ, Monat MM) steht. Der Dateiname «HYDRA-1811.xlsm» beispielsweise steht für die Programmversion vom November 2018.

### 2.1 Einstellungen in EXCEL

Nachfolgend sind wichtige Punkte aufgelistet, die bei der Anwendung berücksichtigt werden müssen:

1. Im Menüband von Excel muss «Entwicklertools» verfügbar sein. Durch Rechtsklick auf den Befehlsbereich im Menüband erscheint das Kontextmenu. In diesem wählt man «Menüband anpassen». Nun kann beim Eintrag «Entwicklertools» das Häkchen gesetzt werden.
2. Beim Öffnen des Programms HYDRA muss die Option Makros aktivieren gewählt werden. Der «Entwurfsmodus» (Das Symbol  mit Dreieck und Lineal im Befehlsbereich «Entwicklertools») muss deaktiviert sein, sonst können beispielsweise die Schaltflächen verschoben werden und das Programm führt keine Berechnungen aus.
3. Der Programmcode und gewisse Arbeitsblätter sind geschützt. Sollen Änderungen vorgenommen werden, muss der Schutz durch Eingabe des Codes «321» aufgehoben werden. Bei Änderungen an der Blattstruktur ist Vorsicht geboten: Beim Lesen von Tabellenwerten in die Variablen des VBA-Codes werden Zellbezüge verwendet und keine Namen. Bei der Änderung der Struktur kann die Integrität von HYDRA auf zwei Arten gesichert werden:
  - Ersetzen der Zellbezüge durch Namen. Zuweisen der Werte im VBA-Code über das Range-Objekt: Range("Name") = Variable.
  - Anpassen der Zellbezüge im VBA-Code.
4. In der neuen Version HYDRA\_2511 tritt das Problem der veränderlichen Schriftgrössen in den Schaltflächen nicht mehr auf, weil die ursprünglichen ActiveX Schaltflächen durch die einfacheren Command-Buttons ersetzt wurden. Falls mit älteren Versionen gearbeitet wird, lässt sich die korrekte Schriftgrösse folgendermassen wiederherstellen: 1) Blattschutz durch Eingabe des Codes «321» aufheben. 2) In den Entwicklertools den Entwurfsmodus einschalten. 3) Nach Rechtsklick auf die Schaltfläche «Code anzeigen» wählen. Dadurch wird der Programmeditor geöffnet. Im linken unteren Bereich des Monitors erscheint ein Feld gemäss Abbildung 1. 4) AutoSize auf «False» und dann wieder auf «True» ändern.
5. Für die Kommunikation der Resultate kann über die Schaltfläche «Datei erzeugen» eine Excel Datei ohne Funktionalität/Programmcode (\*.xlsx) generiert werden.
6. Tabellenblätter und Diagramme dürfen weder gelöscht noch umbenannt werden, da das Programm auf diese Bezug nimmt.

## 2.2 Arbeitsblätter und Farbcodes

HYDRA beinhaltet zahlreiche Arbeitsblätter mit Tabellen und Diagrammen. Für den täglichen Gebrauch sind nur wenige Arbeitsblätter nach Tabelle 2 von Bedeutung. Die restlichen Arbeitsblätter umfassen Modellbibliotheken für Kreislaufkomponenten sowie Tabellen mit Rechenwerten.

Tabelle 2 Arbeitsblätter und ihre Funktionen

<i>Arbeitsblatt</i>	<i>Funktion</i>
Standardeinstellungen	Eingabe der Randbedingungen für standardisierte Rechnungen
Anlagendaten	Eingabe der Anlagendaten und Ausgabe der wichtigsten Resultate
Feld 1, Feld 2	Darstellung der Strömungsverteilung in den Kollektorfeldern 1 und 2
T <sub>aus</sub> 1, T <sub>aus</sub> 2	Darstellung der Austrittstemperaturen der Kollektoren in den Kollektorfeldern 1 und 2
T <sub>SL</sub> 1, T <sub>SL</sub> 2	Darstellung der Temperaturen in den Sammelleitungen der Kollektorfelder 1 und 2
Fliessgeschw	Ausgabe der Fliessgeschwindigkeiten an den verschiedenen Stellen des Kreislaufs. Ausgabe der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit in dem vertikal nach unten führenden Rohr in der Steigzone.
Serienrechnung	Berechnen einer Tabelle von Druckverlusten bei unterschiedlichen Volumenströmen, z.B. für Datenblätter

Farben der Labels für Tabellenblätter und Zellen erleichtern die Übersicht und die Lesbarkeit. Die Funktion jedes Blattes ist durch Farben nach Tabelle 3 gekennzeichnet.

Tabelle 3 Farbcode für Arbeitsblätter

<i>Farbcode</i>	<i>Funktion der Arbeitsblätter</i>
	Eingabe von Daten und Ausgabe von Rechenwerten
	Grafische und tabellarische Darstellung von Resultaten
	Standardeinstellungen
	Modellparameter für Kollektoren, Pumpen, Armaturen, Rohre etc.
	Datenbasis für Diagramme. Weitere Hilfstabellen.

In den Tabellenblättern sind Zellen verschiedener Bereiche durch Farben nach Tabelle 4 gekennzeichnet. Daten werden in weisse und weiss schraffierte Zellen eingegeben. Solange ein Tabellenblatt geschützt ist, sind die anderen Zellbereiche, die nicht verändert werden dürfen, gesperrt.

Tabelle 4 Farbcode für Zellen

Farbcode	Funktion der Zellen
	Eingabe durch den Nutzer
	Eingabe durch den Nutzer oder Rechenwert
	Rechenwerte (Ausgabe)
	Bezeichnung der Eingabedaten und Rechenwerte
	Bezeichnung der Randbedingungen

## 2.3 Modellieren der Solaranlage

In der Tabelle «Anlagendaten» nach Abbildung 2 werden alle Eingaben gemacht, die zur Beschreibung der Anlagenhydraulik notwendig sind.

HYDRA 2511		nw		Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik		Berechnen	Standard-Einstellungen	Datei erzeugen	© Ralph Eismann						
Objektbezeichnung: Beispiel 6 x 10		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände			Stoffdaten bei Rücklauftemperatur						
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene		W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	60	Thermische Leistung	kW	83	Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1008			
Umgebungstemperatur		°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	138	homog. Durchström.	kW	83	Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	1.66			
Rücklauftemperatur		°C	60	Vorlauftemperatur	°C	77	Inhomog. Volumenstrom	%	5	Rauigkeit Oberflächen	mm	0.001			
Wärmeträgermedium		Typ/Konz.	Tyfocon LS 45%	Vol. Feld inkl. Verrohrung	l	192	Einfluss auf Leistung	%	-0.09	Diagramme formatieren	ja/nein	ja			
Spezifischer Durchfluss		l/hm <sup>2</sup>	32.7	Vol. Feldverrohrung	l	36	Max. Fließgeschw.	m/s	1.1	Serierechnung	ja/nein	nein			
Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kollektorreihe: Anz. Paralle. Stränge		-	10	10	10	10	10	10	10						
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang		-	1	1	1	1	1	1	1						
Kollektortyp		-	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H						
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf		m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5						
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke		mm	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1						
Anzahl Winkel im Vorlauf		-	3	3	3	3	3	3	3						
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration		-	C	C	C	C	C	C	C						
Feldleitung: Reihenabstand		m	0	4	4	4	4	4	4						
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke		mm	42 x 1.5	42 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	28 x 1.5	28 x 1.5	28 x 1.5						
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration		-	C	Δp Kollektorfeld 1	kPa	36.7	V Koll.feld 1	l/h	4513						
Kollektorfeld 2		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kollektorreihe: Anz. Paralle. Stränge		-													
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang		-													
Kollektortyp		-													
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf		m													
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke		mm													
Anzahl Winkel im Vorlauf		-													
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration		-													
Feldleitung: Reihenabstand		m													
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke		mm													
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration		-													
Schaltung parallel / seriell		Typ	T	unberück Δp Kollektorfeld	kPa	36.7	V Koll.feld	l/h	4513	Δp inkl. Feldanschluss	kPa	43.2			
Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpe		Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte													
Feldanschluss: Länge Vorlauf (=Rücklauf)		m	3.0	Δp Feldanschluss	kPa	6.5	Anlagen- und Pumpenkennlinie					Anlagenhöhe und Betriebsdruck			
Rohrdimension		mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	4						Höhe der Sammelleit. m 10			
Steigzone: Länge Vorlauf (=Rücklauf)		m	10.0	Δp Steigzone	kPa	6.8	Höhe der Verteilleit. m 9.2					Höhe des MAG m 0			
Rohrdimension		mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	0	Betriebsüberdruck MAG bar ü 1.5					Anschluss MAG bar ü Saugseite 0			
Technikraum: Länge Vorlauf (=Rücklauf)		m	4	Δp Kellerverrohr.	kPa	7.1	Statischer Druck Feld bar ü 0.5					Betriebsdruck Feld bar ü 0.7			
Rohrdimension		mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	4	Reynoldszahlen Kollektorfeld 1					Absorberrohr 1. Koll. - 3541			
Armaturengruppe: Typ oder Rohrdimension		Typ	DN40	Δp Armaturengruppe	kPa	4.8	Sammelleit. glatt 1. Koll. - 15550					Randbedingungen für die Berechnung			
Durchflussmesser: Druckverlust bei einem Volumenstrom		kPa	0	Δp Durchflussmesser	kPa	0.0	Ergänz. Tichelmannleitg. Reihe ja					Krümmung Wellrohre - 0.01			
Glattrohrübertrager: Fläche		m <sup>2</sup>	20.0	Δp Glattrohrübertrager	kPa	10.0	Berücksichtigt, Querschnittsänd. ja					Berücksichtigt, Reihensammelleitg. ja			
Rohrdimension		"	1"	Δp Glattrohrübertrager	l	110	Berücksichtigt, Feldanschlussleitung ja					Berücksichtigt, der T-Verbindungen Wagner			
Anz. Parallele Röhre		-	4	Wendeldurchmesser	m	0.8	1199					V Kreislauf l/s 1.25			
Plattenübertrager: Druckverlust bei einem Volumenstrom		kPa	0	Δp Plattenübertrager	kPa	0.0									
Luftsäule bzw. Druckhochhaltung		l/h	7300	Druckverlustkoeffizient	-	26.6									
Pumpe / Drehzahlstufe		Typ	Biral ModuA 40-8 RED	%	100%	0.0									
Anz. Pumpen seriell/parallel		-	1	Δp total	kPa	71.9	Anlagenvol. Exkl. MAG l 378								
Mittlerer Druckverlust pro Längeneinheit		Pa/m	Hydr. Pumpleistung	W	90.1	Längenbez. Druckverlust Pa/m 1199									

Abbildung 2 Tabellenblatt Anlagendaten.

Daten werden in die Zellen der weissen bzw. nicht gefärbten Bereiche eingegeben. Bei den meisten Zellen ist selbsterklärend, was eingegeben werden muss. Oft wird via Dropdown Menü eine Reihe von Eingabewerte angeboten (z.B. Rohrdimensionen), aus der man auswählen kann. Wo möglich, wurde die Eingabe unsinniger Werte durch Bereichsgrenzen verhindert. Rote Dreiecke markieren Zellen, bei denen Hilfetexte als Kommentar hinterlegt sind. Nachfolgend werden die einzelnen Bereiche im Detail besprochen.

## 2.4 Randbedingungen für Anlagenbetrieb und Rechnung

Abbildung 3 zeigt den Ausschnitt des Tabellenblattes «Anlagendaten», in welchem die Randbedingungen für den Anlagenbetrieb und das Wärmeträgermedium spezifiziert werden. Der Text, der als «Objektbezeichnung» eingegeben wird, erscheint in allen Arbeitsblättern, in denen Resultate dargestellt werden.

Falls in der Zelle E48 anstelle eines Pumpentyps «vorgegebener Durchfluss» gewählt wird, kann der spezifische Durchfluss vorgegeben werden. Andernfalls wird der berechnete spezifische Durchfluss dargestellt.

Nach ausgeführter Berechnung erscheinen die Kenndaten des Kollektorfeldes und die zum Betriebspunkt gehörende Vorlauftemperatur.

HYDRA 2511		n w		Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik	
Objektbezeichnung: Beispiel 6 x 10					
Betriebsbedingungen			Kenndaten des Kollektorfeldes		
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	60
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	138
Rücklauftemperatur	°C	60	Vorlauftemperatur	°C	77
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfoacor LS 45%	Vol. Feld inkl. Verrohrung	l	192
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	32.7	Vol. Feldverrohrung	l	36

Abbildung 3 Objektbezeichnung und Betriebsbedingungen und Kenndaten des Kollektors.

Abbildung 4 zeigt den Ausschnitt des Tabellenblattes «Anlagendaten», in welchem die Randbedingungen für die Rechnung definiert werden. Im Normalfall werden alle Beiträge zum Druckverlust berücksichtigt. Spezialfälle, bei denen man einzelne Beiträge nicht berücksichtigt, werden weiter unten diskutiert.

Ergänz. Tichelmannleitg. Reihe	ja
Krümmung Wellrohre	0.01
Berücksichtig. Querschnittsänd.	ja
Berücksichtig. Reihensammelleitg.	ja
Berücksichtig. Feldanschlussleitung	ja
Berücksichtig. der T-Verbindungen	Wagner

Abbildung 4 Randbedingungen für die Rechnung

Auch die Druckverluste in den T-Verbindungen werden berücksichtigt. Hierfür stehen verschiedene Modelle zur Auswahl. Das Modell nach VDI (2013) gilt für T-Verbindungen, bei denen alle Anschlüsse denselben Druckverlust haben. Das Modell nach Wagner (2001) berücksichtigt den Einfluss unterschiedlicher Durchmesser sowie den Einfluss gerundeter Kanten.

### 2.4.1 Standardeinstellungen für Betriebsbedingungen und Rechnung

Es kann sinnvoll sein, dass sich Anwenderinnen und Anwender innerhalb einer Firma darüber einigen, für welche Randbedingungen Standardberechnungen gemacht werden sollen, beispielsweise zur Erzeugung von Tabellen für Planungsunterlagen. Diese Randbedingungen können im Tabellenblatt «Standardeinstellungen» nach Abbildung 5 festgelegt werden.

Im oberen Bereich des Arbeitsblatts «Anlagendaten» sind drei Schaltflächen zum Ausführen von Funktionen angeordnet. Durch Anklicken der Schaltfläche **Standard-Einstellungen** werden die Eingabefelder neben den hellgrün hinterlegten Bereichen mit diesen Randbedingungen überschrieben.

StandardEinstellungen		
Globalstrahlung in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	0
Umgebungstemperatur	°C	40
Rücklaufttemperatur	°C	40
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocor LS 45%
Höhe der Luftsäule im Betrieb/Reserve	m	0
Anz. Pumpen seriell/parallel	-	1
Ergänz. Tichelmannleitg. Reihe	ja / nein	ja
Krümmung Wellrohre		0.01
Berücksichtig. Querschnittsänd.	ja / nein	ja
Berücksichtig. Reihensammelleitg.	ja / nein	ja
Berücksichtig. Feldanschlussleitg.	ja / nein	ja
Berücksichtig. der T-Verbindungen	ja / nein	Wagner

Abbildung 5 StandardEinstellungen

Die Rechnung wird durch Betätigen der Schaltfläche **Berechnen** ausgeführt. Die Resultate müssen kritisch geprüft werden:

- Entspricht der spezifische Durchfluss der angestrebten Betriebsweise (Low-Flow, High-Flow)?
- Gibt es Kollektoren, bei denen die Austrittstemperatur sehr stark vom Mittelwert abweicht? Dies kann durch Ändern der Dimensionen von Rohrleitungen oder durch Anpassen der Feldaufteilung korrigiert werden.
- Falls Fließgeschwindigkeiten wesentlich grösser als 1 m/s sind, muss die Dimension der entsprechenden Rohrabschnitte vergrößert werden.
- Ein hoher Druckverlust eines Rohrabschnittes oder einer Armatur deutet auf einen Flaschenhals hin. Meist ist dann auch die Fließgeschwindigkeit zu hoch. Vergrößern der Dimension schafft Abhilfe.
- Im Kreislauf ausserhalb der Kollektoren sollten Fließgeschwindigkeiten von mindestens 0.5 m/s angestrebt werden. Bei deutlich tieferen Fließgeschwindigkeiten ist keine Entlüftung durch Strömungskräfte möglich.
- Pumpe passend wählen, nicht überdimensionieren.

#### 2.4.2 Speichern mit und ohne Programmcode

Es ist sinnvoll, die berechneten Daten zu einem Objekt zu speichern, beispielsweise zur Dokumentation einer Anlage oder um die Daten zur Ausführung an den Kunden zu schicken. Durch Klicken auf die Schaltfläche **Datei erzeugen** wählt das Programm die Blätter mit den Anlagendaten und Diagrammen aus und erzeugt eine neue Arbeitsmappe mit der Objektbezeichnung als Dateinamen. Die neue Datei enthält keinen Programmcode. Man erkennt dies daran, dass die drei Schaltflächen nicht vorhanden sind.

Es ist nicht möglich, Anlagendaten aus bestehenden Objekten einzulesen. Um eine Planung nachvollziehen zu können, legt man am besten einen objektspezifischen Ordner und speichert HYDRA inklusive Rechencode mit der Objektbezeichnung als Dateinamen dort ab.

## 2.5 Kollektorfelder

Bestehen Kollektorfelder aus vielen Kollektoren, stellt sich im Allgemeinen die Frage nach der technisch- und kostenmässig günstigsten Verrohrung. In den folgenden Abschnitten werden die Begriffe «Kollektorreihe» und «Strang» definiert. Ausserdem werden die Bezeichnungen C- und Z-Konfiguration am Beispiel von Kollektorreihen erläutert. Schliesslich werden die Möglichkeiten bei der Modellierung komplexer Kollektorfelder dargestellt.

### 2.5.1 Definition von Kollektorreihe und Strang

Nach Abbildung 6 sind mehrere Kollektoren in einer **Kollektorreihe** angeordnet und über integrierte Verteil- und Sammelleitungen parallelgeschaltet.

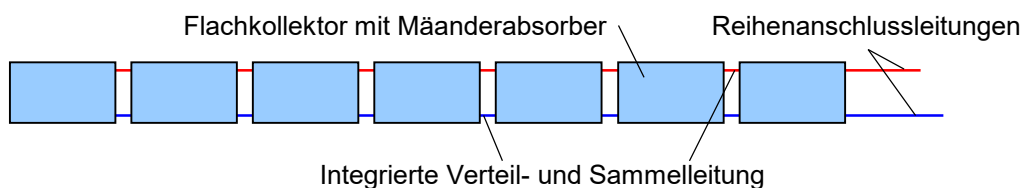


Abbildung 6 Kollektorreihe bestehend aus Flachkollektoren mit integrierten Sammelleitungen.

Bei gewissen Kollektortypen können mehrere Kollektoren in Serie geschaltet werden. Diese bilden gemäss Abbildung 7 einen **Strang**. Mehrere Stränge können über Verteil- und Sammelleitungen parallelgeschaltet werden.

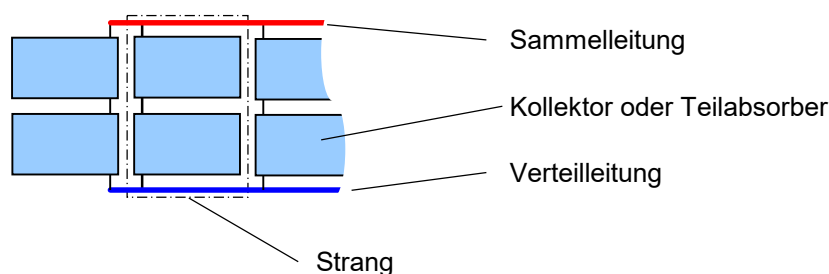


Abbildung 7 Kollektorreihe, bestehend aus mehreren parallel geschalteten Strängen.

In einigen Fällen verzichtet man auf eine Abstufung der Leitungsquerschnitte und rechnet mit den Verteil- und Sammelleitungen, die dem Absorbermodell zugeordnet sind. Es ist aber auch möglich, Verteil- und Sammelleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern zu modellieren.

### 2.5.2 Konfigurationen der Verrohrung

Abbildung 8 zeigt die beiden Alternativen der Verrohrung am Beispiel einer Kollektorreihe. Beim einseitigen Anschluss gleicht der Strömungspfad dem Buchstaben «C». Man spricht daher von C-Konfiguration. Tichelmann (1911) hat für schwerkraftgetriebene Heizungsnetze eine Verschaltungsart vorgeschlagen, bei der alle Strömungspfade dieselbe Länge haben. Man nennt diese Verschaltungsart daher Tichelmannschaltung. Ausserhalb der deutschsprachigen Literatur spricht man jedoch meist von der Z-Konfiguration, weil die Strömungspfade dem Buchstaben «Z» gleichen.

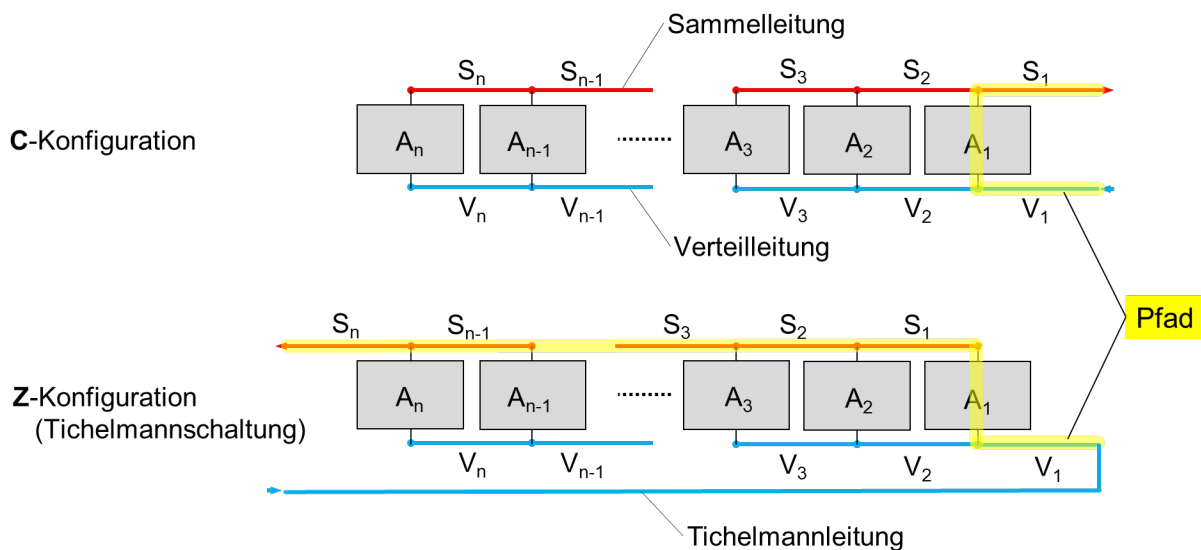


Abbildung 8 Anschlussmöglichkeiten von Kollektorreihen mit parallel geschalteten Kollektoren.

### 2.5.3 Freiheitsgrade bei der Verschaltung

Nicht durchströmte «tote» Sammelleitungen können nicht gespült und somit nicht entlüftet werden. Daher müssen nicht durchströmte Leitungen vermieden werden. Bei modernen Flachkollektoren mit integrierten Sammelleitungen sind die Verteil- und Sammelleitungen mit dem Absorber wärmeleitend verbunden, beispielsweise durch Laser- oder Ultraschallschweißen. Nicht durchströmte Leitungen würden nur über benachbarte Absorberrohre und Wärmeverluste gekühlt. Dampfbildung und partielle Stagnation können die Folge sein. Der entstehende Dampf kann aus dem stagnierenden Bereich in durchströmte Bereiche geraten und dort schlagartig kondensieren. Die dabei entstehenden Druckstöße können Leckagen verursachen und Kompensatoren zum Bersten bringen. verursachen kann. Auch aus diesen Gründen müssen nicht durchströmte Leitungen vermieden werden. Ob eine Kollektorreihen in der C- oder Z-Konfiguration angeschlossen werden muss, ist daher nach Abbildung 9 davon abhängig, auf welcher Seite das Absorberrohr mit der Verteil- bzw. Sammelleitung verbunden ist.

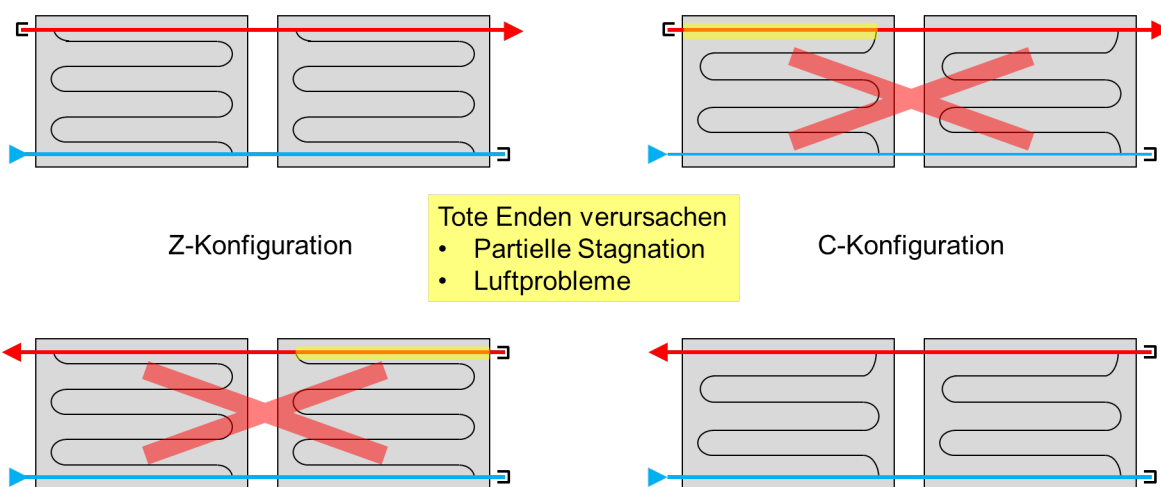


Abbildung 9 Die Verschaltungsart ist durch die kollektorinterne Hydraulik festgelegt.

Daher ist die Verschaltungsart durch das Kollektorfabrikat festgelegt. Ansonsten ist man in der Wahl der Rohrführung frei. Anhand der folgenden Beispiele werden die Möglichkeiten der Modellierung diskutiert. Um den Aufwand bei der Eingabe minimal zu halten, müssen nicht alle Details spezifiziert werden. Das Programm ergänzt die fehlenden Informationen nach festen Regeln. Diese Regeln werden fallweise besprochen.

## 2.5.4 Möglichkeiten der Modellierung

Ein Kollektorfeld in HYDRA kann aus zwei Teilfeldern bestehen. Abbildung 10 zeigt den entsprechenden Ausschnitt im Arbeitsblatt «Anlagendaten». Die erforderlichen Eingaben werden der Reihe nach besprochen.

Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-		10	10	10	10	10	10				
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-		1	1	1	1	1	1				
Kollektortyp	-		FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H				
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5				
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1	22 x 1				
Anzahl Winkel im Vorlauf	-		3	3	3	3	3	3				
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration			C	C	C	C	C	C				
Feldleitung: Reihenabstand	m		0	4	4	4	4	4				
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		42 x 1.5	42 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	28 x 1.5	28 x 1.5				
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration			C Δp Kollektorfeld 1				kPa	36.7	√ Koll.feld 1	l/h	4513	
Kollektorfeld 2		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-											
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-											
Kollektortyp	-											
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m											
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm											
Anzahl Winkel im Vorlauf	-											
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration												
Feldleitung: Reihenabstand	m											
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm											
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration			C Δp Kollektorfeld 2				kPa		√ Koll.feld 2	l/h		
Schaltung parallel / seriell	Typ		T unberück Δp Kollektorfeld				kPa	36.7	√ Kollektorfeld	l/h	4513	
Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpe			Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte					kPa	Anlagen- und Pumpenkennlinie			

Abbildung 10 Spezifikation von Kollektorfeldern inklusive Feldverrohrung.

**Kollektorreihe:** In der ersten Zeile wird eingegeben, wie viele parallel geschaltete Kollektoren bzw. Stränge eine Kollektorreihe enthält. In der zweiten Zeile wird die Anzahl seriell geschalteter Kollektoren pro Strang definiert. Schliesslich wird auch der Kollektortyp spezifiziert. Im Beispiel nach Abbildung 10 besteht Das Kollektorfeld aus sechs Kollektorreihen mit je 10 parallel geschalteten Flachkollektoren des Typs «FK Mäander H». Der Kollektortyp kann aus dem Menu gewählt werden, das beim Anklicken der Zelle erscheint. Die hydraulischen und thermischen Eigenschaften des gewählten Kollektortyps sind im Tabellenblatt «Absorbermodelle» spezifiziert. Dieses wird in Abschnitt 2.7.1 besprochen.

**Reihenanschlussleitung:** Eine Kollektorreihe wird über Reihenanschlussleitungen mit dem Kreislauf verbunden. Nur die vorlaufseitige Reihenanschlussleitung muss definiert werden. Im Beispiel nach Abbildung 10 ist der vorlaufseitige Austritt der Kollektorreihe über eine 1.5 m lange Reihenanschlussleitung der Dimension 22x1 mit der Feldleitung verbunden. In der darunterliegenden Zelle wurde spezifiziert, dass der vorlaufseitige Reihenanschluss drei scharfkantige 90° Winkel hat.

Alle Kollektorreihen sind in der C-Konfiguration, d.h. einseitig angeschlossen. In diesem Fall übernimmt HYDRA jeweils die Länge, Dimension und Anzahl Winkel der vorlaufseitigen Reihenanschlussleitung für die rücklaufseitige Reihenanschlussleitung. HYDRA prüft nicht, welche der beiden Anschlussarten zulässig ist. Sowohl bei der C- als auch bei der Z- Konfiguration wird angenommen, dass alle Verteil und Sammelleitungen durchströmt sind und keine toten Enden auftreten.

**Feldleitung:** Mehrere Kollektorreihen sind über Feldleitungen parallelgeschaltet. Im Beispiel nach Abbildung 10 beträgt der Reihenabstand 4 m. In den meisten Fällen entspricht der Reihenabstand der Länge eines Rohrabschnittes. Auch hier muss nur die vorlaufseitige Feldleitung definiert werden. Für jeden Rohrabschnitt kann die Dimension individuell festgelegt werden. Druckverlust von Winkeln und Bogen kann durch entsprechende Verlängerung des Rohres näherungsweise berücksichtigt werden.

Wird das Kollektorfeld in Z-Konfiguration angeschlossen, so addiert Hydra zum ersten Segment der rücklaufseitigen Feldleitung eine Leitung mit der gleichen Dimension und deren Länge der Summe der Reihenabstände entspricht.

**Zwei Teilfelder:** Werden zwei Kollektorfelder modelliert, so können diese parallel oder in Serie geschaltet werden.

- Bei der Parallelschaltung können die Druckverluste im T-Stück berücksichtigt werden.
- Bei der Serienschaltung wird zuerst das Kollektorfeld 1, danach das Kollektorfeld 2 durchströmt.

Die Möglichkeit, zwei Teilfelder parallel zu schalten, ist für die Abbildung von Grosskollektoren mit komplexer Hydraulik durch ein vereinfachtes Modell sehr hilfreich. Im Kollektorfeld 1 wird beispielsweise der Grosskollektor detailliert abgebildet. Im Kollektorfeld 2 wird das vereinfachte Modell abgebildet. Dessen Dimensionen werden so lange angepasst, bis die Abweichung der Volumenströme in beiden Kollektorfeldern hinreichend klein ist. Damit die Druckverluste der beiden Teilfelder voneinander unabhängig sind, dürfen bei dieser Anwendung die Druckverluste im T-Stück nicht berücksichtigt werden. Ein Beispiel wird im Abschnitt 3.7 gegeben.

## 2.5.5 Integrierte und externe Verteil- und Sammelleitungen

Anordnungen von Flachkollektoren mit integrierten Sammelleitungen, die in mehreren Reihen angeordnet sind, kommen sehr häufig vor. Ein Beispiel ist in Abbildung 11 gezeigt. Die Kollektoren sind identisch, besitzen also dieselben Verteil- und Sammelleitungen.

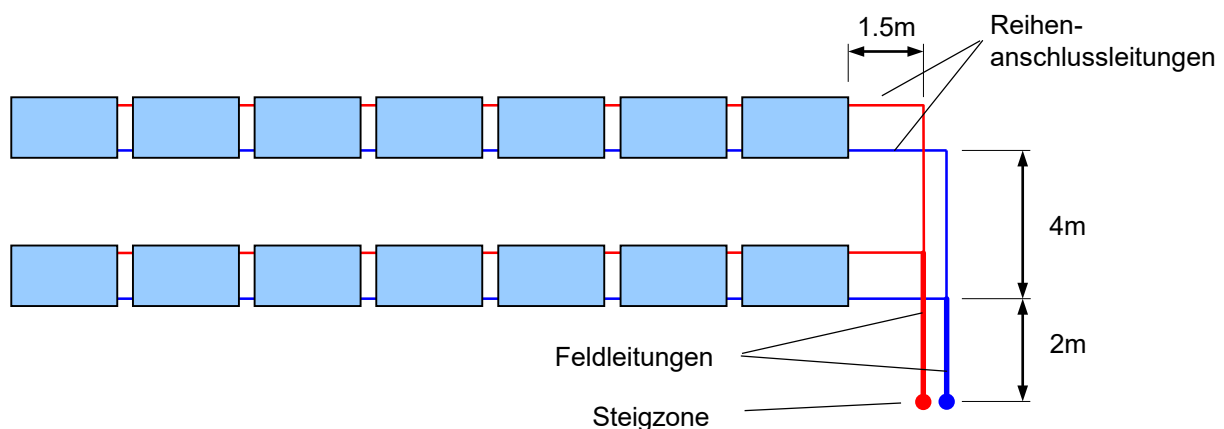


Abbildung 11 Zweireihiges Kollektorfeld mit integrierten Sammelleitungen.

Bei Grosskollektoren, bei denen ein Strang aus mehreren Absorbern besteht, können die Verteil- und Sammelleitungen ebenfalls innerhalb des Kollektorgehäuses angeordnet sein.

Besteht ein Strang hingegen aus mehreren Kollektoren, so müssen die Verteil- und Sammelleitungen ausserhalb des Kollektorgehäuses angeordnet sein. Diese müssen nicht identisch sein, sondern können unterschiedliche Durchmesser haben.

### 2.5.6 C- und Z-Konfiguration bei komplexen Kollektorfeldern

Meist wird für alle Kollektorreihen die C- oder die Z-Konfiguration gewählt. Es gibt aber Situationen, in denen eine Kombination der beiden Konfigurationen sinnvoll ist. Ausserdem gibt es für eine bestimmte Konfiguration meist mehrere Varianten für die Rohrführung der Feldleitungen. Damit der Aufwand bei der Modellierung klein bleibt, wurde auf die Abbildung dieser Variantenvielfalt verzichtet. HYDRA trifft anhand der Eingaben die Wahl der Rohrführung nach festen Kriterien. Diese werden nachfolgend anhand mehrreihiger Kollektorfelder erläutert. Nach Abbildung 12 sind alle Kollektorreihen eines Feldes in C-Konfiguration angeschlossen.

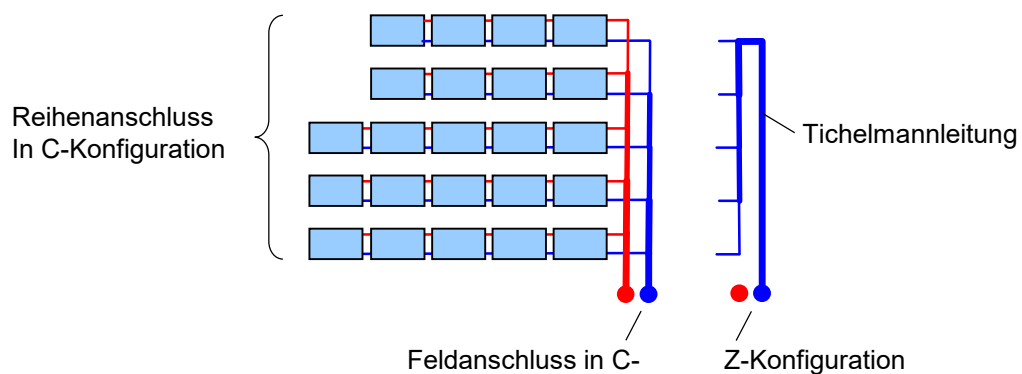


Abbildung 12 Mehrreihiges Kollektorfeld. Reihenanschluss in C-Konfiguration.

Das Kollektorfeld kann in der C- oder Z-Konfiguration angeschlossen werden. Nur die vorlaufseitige Feldleitung muss spezifiziert werden. In der rücklaufseitigen Feldleitung wird mit denselben Rohrlängen und Dimensionen gerechnet. Bei der Z-Konfiguration werden die Segmente der rücklaufseitigen Feldleitung in der umgekehrten Reihenfolge gerechnet. Entsprechend definiert HYDRA den kalten Rücklauf als Tichelmannleitung. Die Länge der Tichelmannleitung ist gleich der Summe aller Reihenabstände.

Nach Abbildung 13 sind alle Reihen des Kollektorfeldes in der Z-Konfiguration angeschlossen.

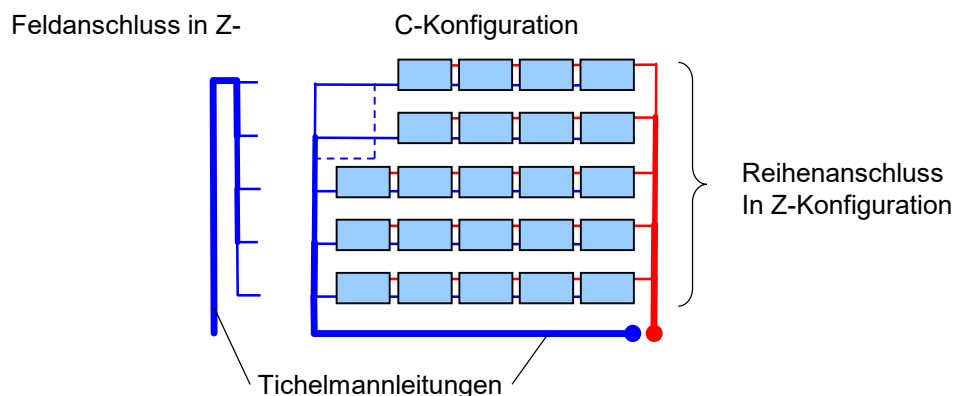


Abbildung 13 Mehrreihiges Kollektorfeld. Reihenanschluss in Z-Konfiguration, Feldanschluss in C- oder Z-Konfiguration.

Um die Wärmeverluste klein zu halten, wird die vorlaufseitige Feldleitung auf derjenigen Seite des Kollektorfeldes geführt, wo die Gesamtlänge der Rohre kürzer ist. Die rücklaufseitige Feldleitung wird auf der anderen Seite des Kollektorfeldes geführt. Die Tichelmannleitung hat die Länge der längsten Kollektorreihe. Sie wird automatisch zur rücklaufseitigen Feldleitung hinzugerechnet.

Auch hier kann das Kollektorfeld in der C- oder Z-Konfiguration angeschlossen werden. Bei der Z-Konfiguration wird die Rücklaufleitung um die Summe der Reihenabstände verlängert, und die Reihen werden in der umgekehrten Reihenfolge angeschlossen.

Wenn die Feldleitung entlang des Feldes verlaufen soll (gestrichelte Linie) kann die grössere Rohrlänge durch einen entsprechenden Reihenabstand berücksichtigt werden. Andernfalls muss bei den beiden kürzeren Feldern eine längere Reihenanschlussleitung gewählt werden.

Nach Abbildung 14 sind zwei Kollektorreihen in der C-Konfiguration und eine Kollektorreihe in der Z-Konfiguration angeschlossen. Bei der Kollektorreihe, die in Z-Konfiguration angeschlossen ist, wird die rücklaufseitige Reihenanschlussleitung automatisch um die Länge der Kollektorreihe verlängert. Das Feld ist in C-Konfiguration angeschlossen. Es könnte aber auch in Z-Konfiguration angeschlossen sein, analog zur entsprechenden Variante in Abbildung 13.

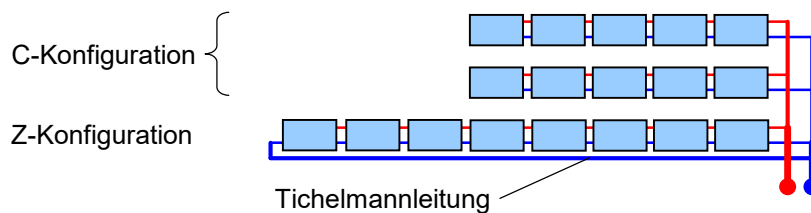


Abbildung 14 Reihenanschluss in C- und Z-Konfiguration kombiniert.

## 2.6 Solarkreis und Druckhaltung

### 2.6.1 Verbindungsleitungen, Armaturen, Wärmeübertrager und Pumpe

Die Verbindungsleitungen zwischen Kollektorfeld und Wärmeübertrager, die Armaturen, der Wärmeübertrager und die Pumpe werden auf dem Arbeitsblatt «Anlagendaten» im Bereich nach Abbildung 15 definiert. Ebenfalls dargestellt ist die Pumpen- und Anlagenkennlinie, mit dem Betriebspunkt der Anlage im Schnittpunkt der beiden Kennlinien.

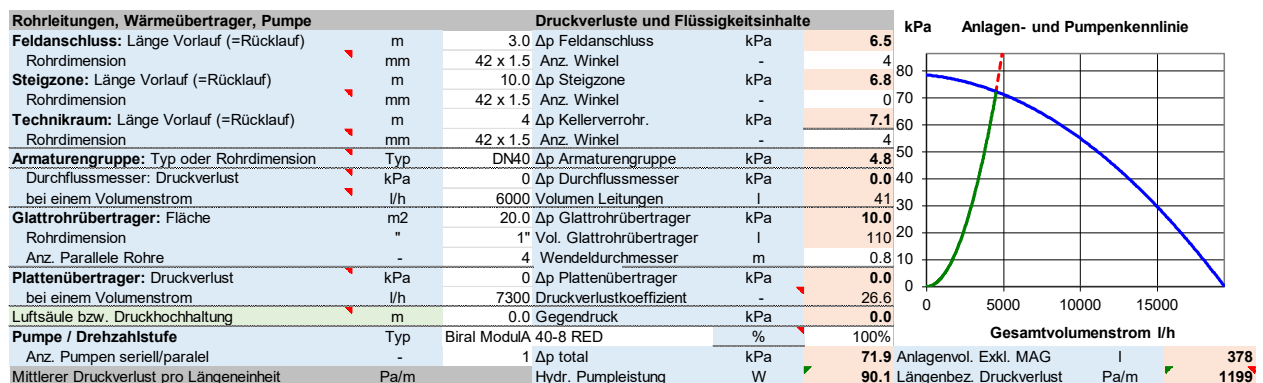


Abbildung 15 Spezifikation von Verbindungsleitungen, Armaturen, Wärmeübertrager und Pumpe.

**Feldanschluss, Steigzone, Technikraum:** Als Verbindungsleitungen zwischen Kollektorfeld und Speicher können drei unterschiedliche Leitungsabschnitte definiert werden. Diese sind mit «Feldanschluss», «Steigzone» und «Technikraum» benannt. Alle Leitungen sind durch ihren Querschnitt, ihre Länge und die Anzahl der 90° Winkel charakterisiert. Höhendifferenzen werden nicht berücksichtigt.

Bei den Leitungslängen dieser drei Abschnitte muss nur die Länge der Vorlaufleitung angegeben werden. Die Rücklaufleitung wird als gleich lang angenommen.

Wird ein Leitungsabschnitt nicht benötigt, muss seine Länge null gesetzt werden. Der Leitungsquerschnitt soll gleich dem vorangegangenen oder anschliessenden Rohrelement gesetzt werden, damit der Druckverlust infolge Querschnittänderung korrekt berechnet wird.

Die verfügbaren Rohrdimensionen sind im Menu der Zellen hinterlegt. Es können Glattrohre oder Welschläuche gewählt werden. Das Programm liest den Innendurchmesser aus dem Katalog im Tabellenblatt «Rohre». Die Katalog kann beliebig angepasst und erweitert werden. In der aktuellen Version enthält der Katalog folgende Elemente:

- Stahlrohre sind durch die Dimension «Aussendurchmesser x Wanddicke» in Millimetern charakterisiert, beispielsweise 42 x 1.5. Dieser Teil des Katalogs enthält metrische Rohre mit ab der Dimension 8 x 1 bis zur Dimension 64 x 2 sowie zöllige Rohre ab der Dimension 76.1 x 2.9 bis zur Dimension 610 x 10.
- Welschläuche sind durch die Nennweite in Millimetern charakterisiert, beispielsweise W 50. Der Katalog enthält Welschläuche des Typs RS531/430 (Witzenmann 2014) ab der Dimension DN 12 bis zur Dimension ND 200.
- Kunststoff-Verbundrohre sind durch den Buchstaben P und den Innendurchmesser in Millimetern gekennzeichnet, beispielsweise P 40. Der Katalog enthält Kunststoff-Verbundrohre ab 16 mm bis 63 mm Innendurchmesser.

**Armaturengruppen:** Diese sind im Dropdown Menu der Zelle hinterlegt. Armaturengruppen beinhalten Absperrarmaturen, Rückschlagventile und weitere Elemente, jedoch keine Pumpen.

**Glattrohr-Wärmeübertragern:** Für die Rohre sind standardmässig zöllige Siederohre hinterlegt. Es muss nur die Fläche, die Anzahl paralleler Rohrwendel und der mittlere Wendeldurchmesser eingegeben werden. Die Rohrlängen werden aus der Fläche und dem Aussendurchmesser berechnet. Dieser ist für die entsprechende Nennweite im Rohrkatalog hinterlegt. Ist kein Glattrohr-Wärmeübertrager vorhanden, so muss als Fläche null eingesetzt werden.

**Durchflussmesser und Plattenübertrager:** Hier muss der Druckverlust beim entsprechenden Volumenstrom angegeben werden. Dieses Wertepaar kann aus Datenblättern entnommen werden. Das Programm berechnet den Druckverlust bei anderen Volumenströmen. Falls kein Plattenübertrager eingesetzt wird, muss der Druckverlust null gesetzt werden. Dasselbe gilt für den Durchflussmesser.

**Pumpen:** Via Dropdown Menü in der entsprechenden Zelle steht eine Auswahl verschiedener Pumpenmodelle zur Verfügung. Es können bis zu drei Pumpen in Serie geschaltet werden. Falls keine passende Pumpe hinterlegt ist, soll der Druckverlust bei vorgegebenem Durchfluss berechnet werden. Anschliessend wird eine geeignete Pumpe aus dem Katalog des Herstellers gesucht. Diese kann dann durch drei Punkte auf der Maximalkennlinie modelliert und im Pumpenkatalog eingetragen werden.

**Luftsäule** bzw. **Druckhochhaltung**: Der luftgefüllte Bereich eines direkt durchströmten Drain-Back Gefässes erzeugt einen hydrostatischen Gegendruck, der proportional zur vertikalen Ausdehnung dieser «Luftsäule» ist. Dieser Gegendruck kann durch die Höhe der Luftsäule in der Zelle C47 definiert werden. Hingegen lässt sich die bremsende Wirkung einer Luftbeladung in Rohrleitungen auf diese Weise nicht abschätzen, weil der Druckverlust einer Zweiphasenströmung ausserdem von der Strömungsform abhängt und meist um ein Vielfaches grösser ist.

Bei Drainback-Anlagen, bei denen der Speicher offen zur Atmosphäre ist und dadurch entsprechend leicht gebaut werden kann, muss der erforderliche Überdruck am Hochpunkt durch ein Überströmventil in der Vorlaufleitung erzeugt werden. Der entsprechende Druckabfall wird ebenfalls in der Zelle C47 definiert, als Höhe der entsprechenden Flüssigkeitssäule. Wie diese zu bestimmen ist, wird im Abschnitt 2.6.2 besprochen.

## 2.6.2 Anlagenhöhe und Druckhaltung

Abbildung 16 zeigt einen weiteren Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten». Hier können die Höhen der Sammelleitung, der Verteilleitung und des Membranausdehnungsgefässes (MAG) bezüglich Boden des Technikraumes definiert werden. Ausserdem kann gewählt werden, ob der Referenzpunkt der Druckhaltung auf der Saugseite oder Druckseite der Pumpe ist. Bei druckbefüllten Anlagen muss der Referenzpunkt auf der Druckseite sein, damit die Pumpe bei Stagnation nicht von heissem Kondensat oder Dampf durchströmt wird. Bei Drainback-Anlagen ist der Referenzpunkt hingegen auf der Saugseite. Es wird angenommen, dass sich der Referenzpunkt auf der Höhe des Membranausdehnungsgefässes bzw. des Drainback-Gefässes befindet. Für den Referenzpunkt muss der erforderliche Betriebsdruck eingegeben werden. Dieser muss so hoch sein, dass der Druck am Hochpunkt sowohl im Stillstand als auch im Betrieb stets über dem Atmosphärendruck liegt. Diese Rechnung dient nur der Orientierung und hat auf die übrigen Resultate keinen Einfluss.

Anlagenhöhe und Druckhaltung		
Höhe der Sammelleit.	m	10
Höhe der Verteilleit.	m	9.2
Höhe des MAG	m	0
Überdruck Referenzpunkt	bar <sub>ü</sub>	1.9
Referenzpkt. Druckhaltg.	-	Druckseite
Ruhedruck Hochpunkt	bar <sub>ü</sub>	0.9
Betriebsdruck Hochpunkt	bar <sub>ü</sub>	0.4

Abbildung 16 Anlagenhöhe und Druckhaltung.

Diese Einstellungen werden im Zusammenhang mit dem Beispiel im Abschnitt 3.3 diskutiert.

## 2.7 Modelle

Für Kollektoren, Rohrleitungen, Pumpen und Armaturengruppen sind Komponentenkataloge vorhanden. Diese können durch Anwenderinnen und Anwender beliebig erweitert werden.

### 2.7.1 Kollektoren

Kollektoren werden im Tabellenblatt «Absorbermodelle» durch die Kollektorfläche, die Leistungskennzahlen des empirischen Kollektormodelles sowie folgende Grössen charakterisiert:

- Kollektorfläche (Brutto-, Apertur- oder Absorberfläche, passend zu den Leistungsparametern)
- Innendurchmesser und Länge eines Absorberrohre.
- Anzahl parallel geschalteter Absorberrohre.
- Innendurchmesser und Länge der Verteil- und Sammelleitungen.
- Länge und Durchmesser des Metallbalgs für den Kollektorverbinder.
- Absorbervolumen
- Leistungsdaten

Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt aus dem Kollektorkatalog. Die erforderlichen Einträge werden anhand der aufgelisteten Beispiele besprochen. Der Kollektortyp in der linken Spalte erscheint in den Auswahlmenüs der Zeilen 12 und 23 im Arbeitsblatt «Anlagendaten». Die ersten beiden Einträge «FK Mäander H» und «FK Mäander V» beschreiben Flachkollektoren mit **Mäanderabsorber** und integrierten Verteil- und Sammelleitungen. «H» und «V» bezeichnen horizontale bzw. vertikale Orientierung des Kollektors. Beim horizontal orientierten Kollektor ist die Verteil- bzw. Sammelleitung 2 m lang, beim vertikal orientierten hingegen nur 1.2 m. Die Druckverluste in den Rohrbogen werden nicht berechnet. Um deren Druckverluste näherungsweise zu berücksichtigen, muss mit einem entsprechend längeren Absorberrohr gerechnet werden. Diese äquivalente Rohrlänge wird am besten anhand des Vergleiches mit Messdaten bestimmt, weil diese den Einfluss der Abweichungen vom Kreisquerschnitt im Bereich des Bogens enthalten. Falls keine Messdaten vorhanden sind, kann der Druckverlust mit Hilfe von empirischen Korrelationen abgeschätzt werden, beispielsweise aus Idelchik (2007), (VDI 2013) oder Eismann und Adams (2018).

Kollektortyp	Aperturfläche m <sup>2</sup>	Absorber			Anz. Parallele Absorberrohre	Verteil- und Sammelleitungen			Kollektorverbinder		Wirkungsgradparameter			
		Absorberrohrlänge äquivalent m	hydr. Durchmesser Absorberrohr m	hydr. Durchmesser Absorberanschluss m		Länge m	hydr. Durchmesser m	Typ Verzweigung	Länge Balg / Wellrohr m	hydr. Durchmesser Balg / Wellrohr m	Absorbervolumen l	eta0 -	a1 W/m <sup>2</sup> K	a2 W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
FK Mäander H	2.3	18	0.007	0.007	1	2	0.016	scharfkantig	0.05	0.016	1.8	0.800	3.6	0.01
FK Mäander V	2.3	18	0.007	0.007	1	1.2	0.016	scharfkantig	0.05	0.016	1.6	0.800	3.6	0.01
FK Harfe	2.3	5	0.007	0.016	5	1.2	0.016	scharfkantig	0	0.016	1.4	0.800	3.6	0.01
FK unverglast	2.3	21	0.007	0.007	1	2	0.016	scharfkantig	0	0.016	1.8	0.950	28	0.01
Teilkollektor	2.47	22	0.007	0.007	1	1.2	0.026	scharfkantig	0.04	0.026	4.0	0.800	3.6	0.01
Grosskollektor	12.35	22	0.007	0.007	5	2.4	0.026	scharfkantig	0.06	0.026	11.4	0.800	3.6	0.01
VKR direkt	1.2	10	0.007	0.007	1	0.6	0.016	scharfkantig	0.02	0.016	0.9	0.650	0.8	0.01
VKR heat pipe	1.2	0.6	0.013	0.013	1	0	0.016		0.02	0.02	0.6	0.650	0.8	0.01

Abbildung 17 Modellparameter für Kollektoren.

Als Kollektorverbinder werden häufig Metallbälge eingesetzt. Diese sind durch ihren hydraulischen Durchmesser und ihre Länge definiert. Bei einigen Bauarten ist der Strömungsquerschnitt im Anschlussstücke des Kollektorverbinders kleiner als im Metallbalg. Dies verursacht einen zusätzlichen Druckverlust. Dieser kann im Modell durch eine entsprechende Verlängerung des Metallbalgs berücksichtigt werden. Das Absorbervolumen wird nicht aus den Dimensionen der Absorber- und Sammelleitungen berechnet, weil teilweise erforderlich ist, deren Länge so anzupassen, dass berechnete und gemessene Druckverluste übereinstimmen. Das Absorbervolumen muss daher explizit eingegeben werden.

Der dritte Eintrag in Abbildung 17 beschreibt einen **Harfenabsorber**, der hydraulisch aus zwei Abschnitten besteht. Jeder Abschnitt besteht aus jeweils 5 Absorberrohren, die über Sammelleitungen parallel geschaltet sind. Zwei spiegelbildlich angeordnete Abschnitte sind in Serie geschaltet. Abbildung 18 zeigt das zugehörige Schema.

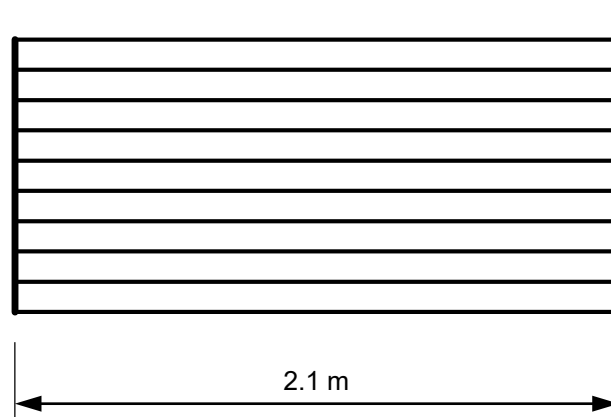


Abbildung 18 Harfenabsorber

Die Gesamte Länge des Strömungspfad entlang der Absorberrohre beträgt  $2 \times 2.1 = 4.2$  m. Der Druckverlust von Verzweigungen und Richtungsänderungen wird nicht vollständig abgebildet. Den fehlenden Beitrag kann man näherungsweise berücksichtigen, indem man die Absorberrohre im Modell entsprechend verlängert. Die Länge der Absorberrohre ist dann in Bezug auf den Druckverlust gleichwertig wie beim realen Kollektor. Falls Messresultate verfügbar sind, kann man die gleichwertige Länge durch Vergleichsrechnungen unter Prüfbedingungen bestimmen. In diesem Beispiel wurde die gleichwertige Länge mit 5 m angenommen. Diese Länge ist im Absorbermodell eingetragen. In ähnlicher Weise können auch **Grosskollektoren** modelliert werden, die aus mehreren parallel geschalteten Absorberelementen bestehen.

Abbildung 19 zeigt einen **direkt durchströmten Vakuum-Röhrenkollektor**, der aus vier Röhren besteht. Die Absorberrohre haben einen Innendurchmesser von 7 mm. Die Verteil- und Sammelleitungen haben einen Innendurchmesser von 16 mm.

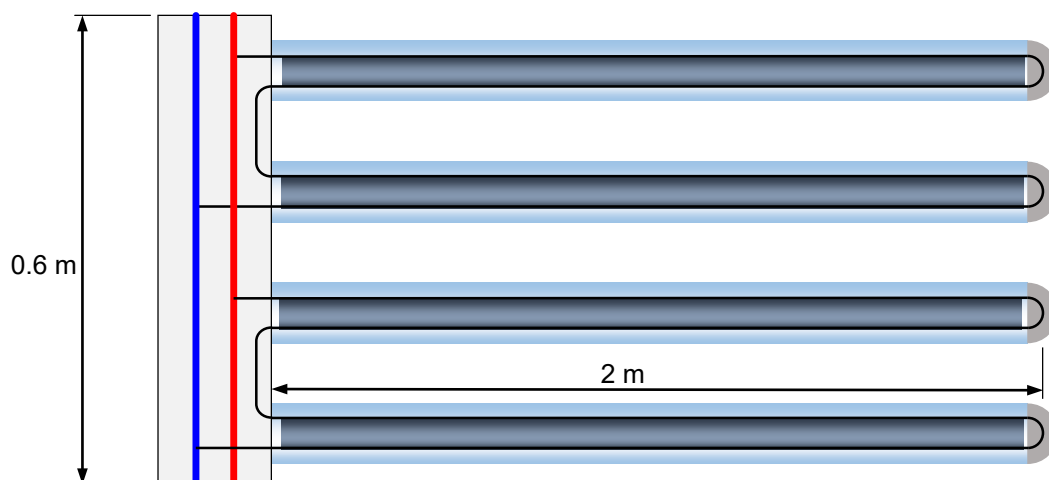


Abbildung 19 Direkt durchströmter Vakuum-Röhrenkollektor.

Je zwei Absorber sind in Serie geschaltet. Ihre Absorberrohre haben eine Gesamtlänge von 8.5 m. Die äquivalente Länge des Absorberrohres ist mit 10 m etwas grösser. Dadurch können die Druckverluste in den Rohrbogen berücksichtigt werden. In der Praxis würde man Vergleichsrechnungen machen und die Länge so lange anpassen, bis der berechnete Druckverlust mit dem Messwert übereinstimmt. Der Kollektor ist im Kollektormodell nach Abbildung 17 unter der Bezeichnung «VKR direkt» modelliert.

Abbildung 20 zeigt einen **Heat-Pipe Vakuüm-Röhrenkollektor**. Die Kondensatoren der Heat-Pipes haben die Form eines Zylinders und sind quer zur Strömungsrichtung in der Sammelleitung angeordnet. Die Sammelleitung hat einen Innendurchmesser von 25 mm. Bei nasser Anbindung liegen die Kondensatoren quer zur Strömungsrichtung in der Sammelleitung. Bei Kollektoren mit trockener Anbindung sitzen die Kondensatoren meist in zylindrischen oder konischen Hülsen, die quer zur Strömungsrichtung im Sammelrohr liegen und mit diesem durch Schweissen oder Hartlöten verbunden sind. An diesen Orten ist der Querschnitt stark reduziert. Daher ist der Druckverlust wesentlich höher als der eines Rohres mit 25 mm. In diesem Beispiel wurde angenommen, dass es genügt, den Innendurchmesser von 25 mm auf 16 mm zu reduzieren. In der Praxis wird man auch hier Vergleichsrechnungen machen und die Rohrdimensionen anpassen, bis die berechneten und gemessenen Druckverluste hinreichend gut übereinstimmen.

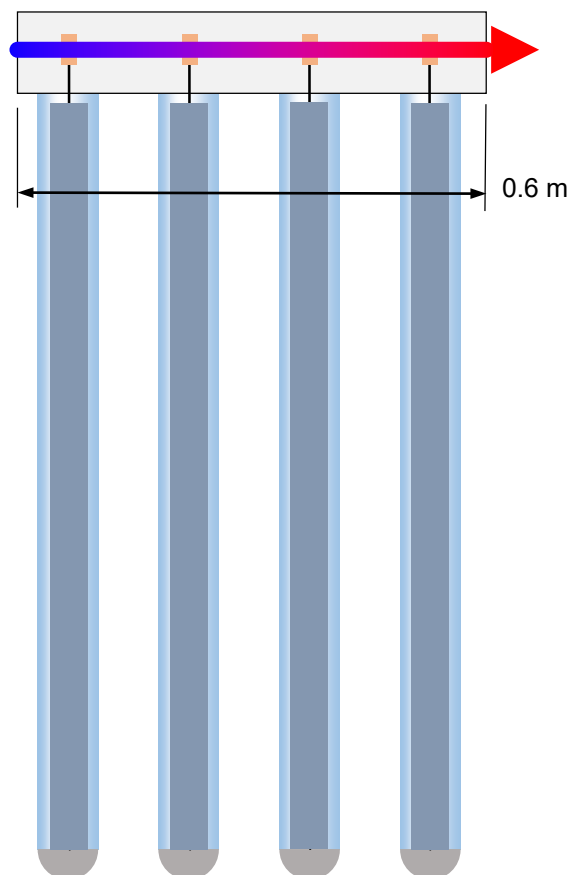


Abbildung 20 Heat-Pipe Vakuüm-Röhrenkollektor.

Es gibt auch Heat-Pipes mit trockener Anbindung, bei denen die Sammelleitung aus zwei Rohren besteht. Diese sind im Bereich der Kondensatoren so verformt, dass sie sich an die Kondensatoren anschmiegen. Bei diesen Kollektoren ist es günstiger, die Sammelleitung mit der tatsächlichen Länge und dem Innendurchmesser des Anschlusses zu modellieren. Der zusätzliche Druckverlust in den deformierten Bereichen wird durch mehrere Absorberrohre berücksichtigt, deren Innendurchmesser der Spaltweite entspricht. Die Anzahl Absorberrohre soll etwa dem Strömungsquerschnitt der Spalte entsprechen. Die Länge der Absorberrohre muss durch Vergleichsrechnungen ermittelt werden.

## 2.7.2 Rohrleitungen

Im Tabellenblatt «Rohre» sind die Dimensionen von Glattrohren, Wellschläuchen und kombinierten Rohren hinterlegt. Diese stehen als Dropdown Menu in den entsprechenden Zellen des Arbeitsblattes «Anlagendaten» zur Verfügung. Die Rohrrauigkeit wird als globaler Parameter im Arbeitsblatt «Anlagendaten» definiert. Dieser gilt für alle geraden Rohre und Rohrwendel gleichermassen. In der Tabelle 5 sind alle Rohrtypen gelistet, die im Rohrkatalog hinterlegt sind. Die Auswahl der Rohrtypen ist wie folgt eingeschränkt:

Bei den Rohrleitungen des Kreislaufes, d.h. ausserhalb des Kollektorfeldes, können nur gerade Rohre mit metrischen und zölligen Dimensionen sowie Wellschläuche gewählt werden. Die Rohrdimensionen sind als Aussendurchmesser bzw. Nennweiten ohne Einheiten angegeben.

- Der Anschluss an eine Kollektorreihe besteht oft aus einem Stück Wellschlauch für den Anschluss an den Kollektor und einem daran anschliessenden Glattrohr als Verbindung zur Feldleitung. Im Dropdown Menu sind die entsprechenden Rohrkombinationen mit «A» gekennzeichnet. Die Länge des Wellschlauches ist im Rohrkatalog definiert. Die Länge des anschliessenden geraden Rohres wird bei der Definition des Reihenanschlusses festgelegt.
- Es gibt Kollektorsysteme, bei denen mehrere in einer Reihe angeordnete Kollektoren oder Stränge über Verteil- und Sammelleitungen ausserhalb des Kollektors parallelgeschaltet werden. Diese können im Querschnitt abgestuft sein und ebenfalls aus einer Kombination eines geraden Rohrstücks mit einem Metallbalg bzw. Wellschlauch mit vordefinierter Länge bestehen. Diese Rohrkombinationen sind mit \* gekennzeichnet.
- Bei den Verbindungsleitungen des Feldanschlusses, der Steigzone und des Technikraumes können nur gerade Rohre mit metrischen und zölligen Dimensionen sowie Wellschläuche gewählt werden.

Bei den mit «A» gekennzeichneten Rohrkombinationen ist die Länge des Wellschlauches im Rohrkatalog definiert. Die Länge des Glattrohres kann frei gewählt werden.

Bei externen Sammelleitungen sind die Rohrlängen durch das Rastermass der Kollektoren gegeben. Tabelle 5 und Abbildung 21 zeigen Beispiele für kombinierte Rohrtypen.

Tabelle 5 Rohrtypen

Rohrtyp	Beispiel	Beschreibung
Gerades Rohr, metrisch	22 x 1	Aussendurchmesser x Wanddicke in mm
Rohr, zöllig	1 1/2"	Nennweite in Zoll
Wellschlauch	W 32	Nennweite in mm
Reihenanschluss	A22-DN20_0.4	0.4 m Wellschlauch DN20 als Kollektoranschluss. Daran anschliessend ein metrisches Rohr mit 22 mm Aussendurchmesser
Externe Sammelleitung	*A 22-DN20-18	Gerades Rohr mit 22 mm Aussendurchmesser, gefolgt von einem Wellschlauch DN20, der in ein gerades Rohr mit 18 mm Aussendurchmesser mündet.

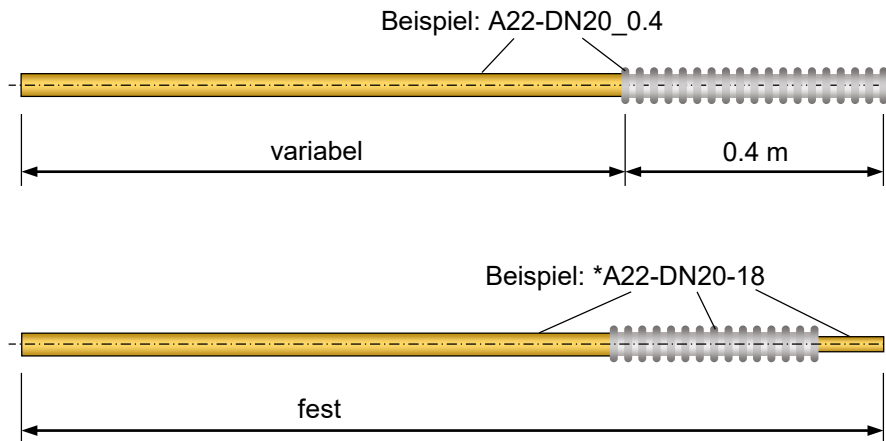


Abbildung 21 Beispiele für kombinierte Rohrleitungen.

### 2.7.3 Armaturengruppen

Armaturengruppen nach Abbildung 22 bestehen aus Absperrarmaturen, Rückschlagventilen und beliebig vielen weiteren Elementen. Die Pumpe wird separat berücksichtigt.

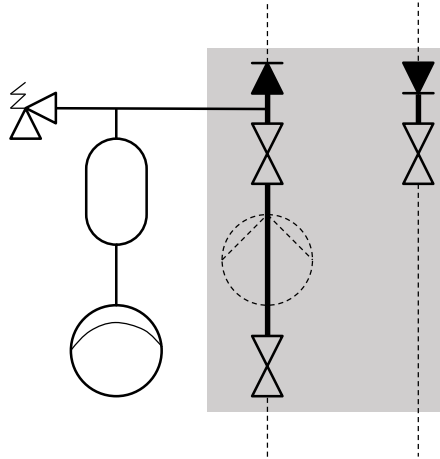


Abbildung 22 Armaturengruppe, grau hinterlegter Bereich, ohne Pumpe.

Tabelle 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog «Armaturengruppen». Die Absperrarmaturen können entweder durch kv-Werte spezifiziert werden oder durch den Druckverlust  $dp_1$  beim entsprechenden Volumenstrom  $vs_1$ .

Tabelle 6 Komponenten und Modellparameter einer Armaturengruppe mit der Nennweite DN 20.

Dimension	Typ	$dp_0$ Pa	$dp_1$ Pa	$vs_1$ l/h	kv l/h	Quelle
DN20	Rückschlagventil	2100	7000	3000		Valstop
	Kugelhahn				18500	Giacomini R250D
	Kugelhahn				18500	Giacomini R250D
	Kugelhahn				18500	Giacomini R250D
	Rückschlagventil	2100	7000	3000		Valstop

Bei Rückschlagventilen wird der Öffnungsdruck berücksichtigt, der bei geringen Durchflüssen vom quadratischen Widerstandsgesetz abweicht. Ein Beispiel ist in Abbildung 23 gezeigt.

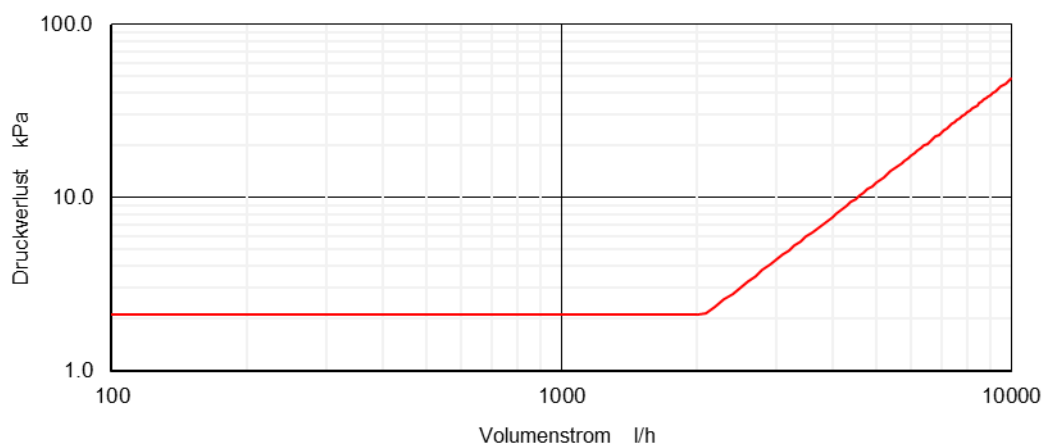


Abbildung 23 Druckverlust eines federbelasteten Rückschlagventils.

## 2.7.4 Wärmeübertrager und Durchflussmesser

**Glattrohr-Wärmeübertrager** werden definiert durch die Übertragerfläche, die Nennweite des Glattrohres und den mittleren Wendeldurchmesser. Die erforderliche Rohrlänge wird automatisch berechnet. Glattrohrwärmeübertrager mit grosser Übertragerfläche können in mehrere parallel geschaltete Rohrwendel unterteilt werden. Der Druckverlust wird nach Eismann und Adams (2018) berechnet.

**Plattenwärmeübertrager** werden durch Angabe des Druckverlustes beim entsprechenden Volumenstrom charakterisiert. Diese Angaben müssen den Datenblättern der Hersteller entnommen werden.

**Durchflussmesser** werden, gleich wie Plattenwärmeübertrager, durch Angabe des Druckverlustes beim entsprechenden Volumenstrom charakterisiert. Durchflussmesser können auch als Teil von Armaturengruppen definiert werden.

## 2.7.5 Pumpen

Tabelle 7 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog «Pumpenmodelle». Dieser enthält die Bezeichnungen der Pumpentypen sowie drei Punkte auf der Maximalkennlinie. Aus diesen Daten werden die Koeffizienten für ein Polynom zweiten Grades berechnet. Die Drehzahl kann im Tabellenblatt «Anlagendaten» als Prozentwert zwischen 10% und 100% eingegeben werden.

Tabelle 7 Ausschnitt aus dem Pumpenkatalog.

Pumpentypen vorgegebener Durchfluss	p0 mWs	vs1 l/h	p1 mWs	vs2 l/h	p2 mWs
Biral Redline AX 13	6.2	2000	3	3800	0
Biral Redline A 13	6.2	1000	6.1	3800	0
Biral Redline A 15	8.3	5000	4.6	10000	0.3
Biral Redline A 16	11	3000	9.8	10000	2.5
Biral Modula 32-6 RED	6	3000	5.35	6000	3.5
Biral Modula 32-8 RED	8.1	3000	7.3	6000	4.8
Biral Modula 32-10 RED	10	3000	9.15	6000	6.3
Biral Modula 40-6 RED	6.1	8000	4.6	14000	1.5

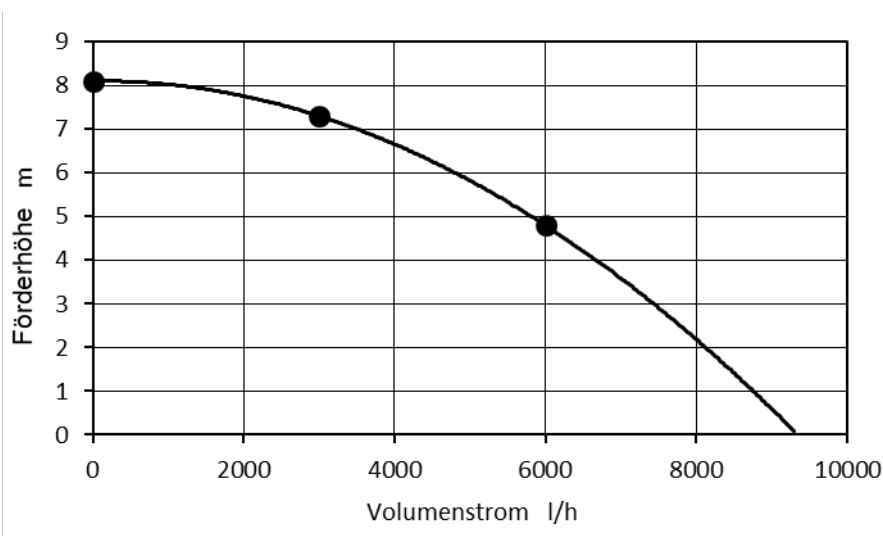


Abbildung 24 Beispiel für eine Pumpenkennlinie.

Es ist möglich, Serienschaltungen von bis zu drei gleichartigen Pumpen zu modellieren.

## **3 Dimensionierung von druckbefüllten Solaranlagen**

### **3.1 Grundsätze**

Bei der Gestaltung und Dimensionierung des Rohrnetzes sollen folgende Grundsätze beachtet werden:

- Hydraulischer Abgleich durch Wahl geeigneter Rohrquerschnitte.
- Überdimensionierung von Rohren vermeiden.
- Bei der Pumpe keine Reserven vorsehen. Lieber Anzahl Winkel grosszügig wählen und Rohrlängen mit Zuschlag gegenüber den Plänen bemessen.
- Die Rohrführung soll so einfach wie möglich sein. Überkreuzungen möglichst vermeiden.
- C- oder Z- Konfiguration für den Reihenanschluss ist durch das Kollektorsystem vorgegeben.
- Meist ist die C-Konfiguration für den Feldanschluss ausreichend.

### **3.2 Hinweise zum Vorgehen**

Die energetische Dimensionierung liefert Typ und Anzahl der Kollektoren sowie die Dimensionen des Wärmeübertragers. Aus der Jahressimulation können ausserdem die extremalen Betriebszustände gewonnen werden, beispielsweise die maximale Rücklauftemperatur, die als Randbedingung in HYDRA eingegeben werden kann. Rohrquerschnitte und Pumpe müssen so dimensioniert werden, dass der Durchfluss und die Temperaturen innerhalb des zulässigen Bereiches liegen. Es ist sinnvoll, die Rechnung unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu rechnen:

#### **3.2.1 Hohe Globalstrahlung und hohe Umgebungstemperatur**

Durch Eingabe einer hohen Bestrahlungsstärke bei gleichzeitig hoher Umgebungstemperatur kann die maximale Bruttoleistung des Kollektorfeldes ermittelt werden. Mit diesen Daten kann der Wärmeübertrager ausgelegt werden.

Wird die Rechnung auch noch bei der maximal zulässigen Rücklauftemperatur durchgeführt, wird die höchste zu erwartende Austrittstemperatur berechnet. Ein Blick in das Diagramm «T\_ aus» zeigt, ob und an welchen Stellen mit Entgasung und Dampfbildung gerechnet werden muss. Auf der Grundlage dieser Resultate lässt sich entscheiden, ob der Durchfluss oder der erforderliche Betriebsdruck erhöht werden soll, oder ob die zulässige Rücklauftemperatur gesenkt werden muss.

#### **3.2.2 Normalbetrieb und Standardberechnungen**

Der Normalbetrieb soll bei einer hohen Einstrahlung gerechnet werden, beispielsweise 1000 W/m<sup>2</sup>. Auf der Grundlage der berechneten Leistung und der Temperaturspreizung kann ein geeigneten Wärmeübertrager ausgelegt werden.

Für das Erstellen von Datenblättern kann es sinnvoll sein, die Bestrahlungsstärke null zu setzen und die Umgebungstemperatur gleich der Rücklauftemperatur zu wählen, beispielsweise bei 50°C. Die Rechnung erfolgt dann isotherm.

### 3.2.3 Betrieb bei tiefen Temperaturen

Für die Abschätzung der Rückkühlleistung muss die Bestrahlungsstärke null gesetzt werden.

Für die Auslegung der Pumpe kann auch die Rechnung bei tiefen Temperaturen sinnvoll sein, wo die Viskosität des Wärmeträgers höher ist.

### 3.2.4 Rücklaufemperatur, Stoffdaten und Durchfluss

Die **Rücklaufemperatur** muss entsprechend des Anlagentyps gewählt werden, beispielsweise 20 bis 50 °C bei Vorwärmanlagen und 40 bis 80°C bei Anlagen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung.

Das **Wärmeträgermedium**, das eingesetzt werden soll, muss auch für die Rechnung vorgegeben werden. Die Stoffdaten (Dichte, Viskosität, spezifische Wärmekapazität) von Wärmeträgermedien verschiedener Hersteller sind im Tabellenblatt «Stoffdaten» hinterlegt.

Der **spezifische Durchfluss** muss zur Betriebsweise der Anlage passen. Low-flow Anlagen sollen mit beispielsweise 10-20 l/hm<sup>2</sup> betrieben werden. Bei High-Flow Anlagen sind 30-50 l/hm<sup>2</sup> sinnvoll. Bei der Eingabe hat man zwei Möglichkeiten:

- Wird in der Zeile 48 des Arbeitsblattes «Anlagendaten» für «Pumpe/Drehzahlstufe» eine Pumpe aus dem Katalog gewählt, so stellt sich der Durchfluss entsprechend Anlagenhydraulik ein.
- Wird in der Zeile 48 für Pumpe/Drehzahlstufe anstelle einer Pumpe «Vorgegebener Durchfluss» gewählt, so kann in Zeile 8 der gewünschte Durchfluss vorgegeben werden.

## 3.3 Solaranlage mit 138 m<sup>2</sup> Flachkollektoren

### 3.3.1 Eckdaten der baulichen Abklärung und der energetischen Dimensionierung

Aus der vorangegangenen baulichen Abklärung und der energetischen Dimensionierung seien folgende Eckdaten bekannt, die als Input für die thermohydraulische Dimensionierung benötigt werden:

Das Kollektorfeld soll aus 60 Flachkollektoren des Typs «FK Mäander H» bestehen. Diese sollen auf dem Flachdach eines Gebäudes nach in sechs Reihen zu je 10 Kollektoren angeordnet werden (vgl. Abbildung 25). Der Reihenabstand beträgt 4 m. Die vorlaufseitige Reihenanschlussleitung zwischen Kollektoraustritt und Feld

Die Vor- und Rücklaufleitungen zwischen dem oberen Ende der Steigzone und dem Feldanschluss beim ersten Kollektor sind rund 3 m lang und enthalten je vier Rohrbogen.

Die Vor- und Rücklaufleitungen in der Steigzone sind je 10 m lang und können mit geraden Rohren und ohne Winkel ausgeführt werden. Die Rohrlängen der Vor- und Rücklaufleitungen im Technikraum betragen je vier Meter und beinhalten je vier Rohrbogen.

Zur Wärmeabgabe an den Speicher dient ein Glattrohr-Wärmeübertrager. Dieser hat eine Übertragerfläche von 20 m<sup>2</sup> und besteht aus vier parallel geschalteten, einzölligen Rohrwendeln mit einem mittleren Wendeldurchmesser von 1 m.

Der Auslegungsfall sei durch folgende Betriebsbedingungen charakterisiert: Als Wärmeträger soll das Wasser-Glykol Gemisch Tyfocor LS mit einem Glykolanteil von 45 % eingesetzt werden. Der

maximale spezifische Durchfluss soll rund 30 l/hm<sup>2</sup> betragen, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup>, einer Rücklauf­temperatur von 60 °C und einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

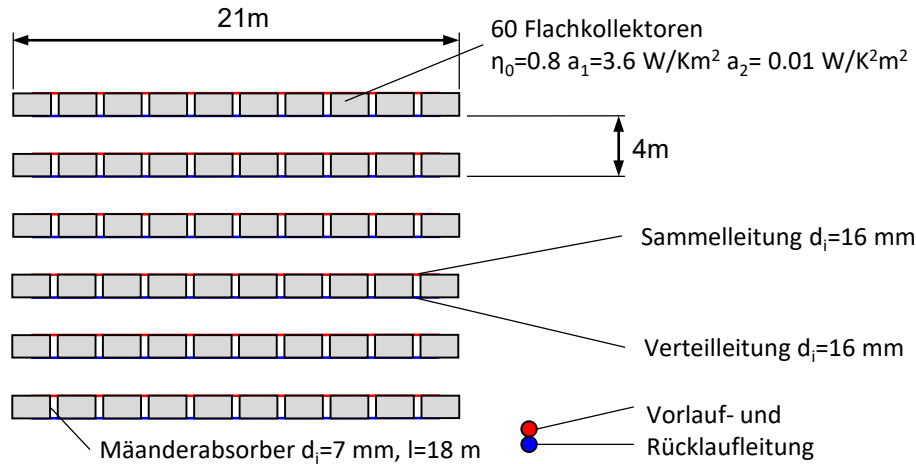


Abbildung 25 Sechsstufiges Kollektorfeld mit je 10 Flachkollektoren pro Reihe.

Folgende Aufgaben sind zu lösen:

- Es soll diejenige Feldverrohrung gefunden werden, die bezüglich Wirtschaftlichkeit und Leistung ein Optimum darstellt.
- Der Querschnitt der Vorlaufleitung soll so dimensioniert sein, dass im Betrieb beim Nennvolumenstrom die Bedingung der Selbstentlüftung erfüllt ist.
- Eine geeignete Pumpe soll aus Herstellerkatalogen gefunden und modelliert werden.
- Der optimale Ort des Kollektorfühlers soll identifiziert werden.
- Es soll der Druck am Referenzpunkt bestimmt werden, bei dem der Betriebsdruck am Hochpunkt 0.5 bar über dem Atmosphärendruck liegt.

### 3.3.2 Modellieren der Anlage

Als erstes wird der Kollektor im Tabellenblatt «Absorbermodelle» modelliert. Folgende Angaben seien dem Datenblatt entnommen oder durch den Hersteller mitgeteilt worden:

Die Kollektoren haben integrierte Verteil- und Sammelleitungen mit einem Innendurchmesser von 16 mm. Das Absorberrohr hat einen Innendurchmesser von 7 mm und eine äquivalente Länge von 18 m. Als Kollektorverbinder dienen Metallbalgkompensatoren mit 16 mm Nennweite und 50 mm Länge. Der Konversionsfaktor betrage  $\eta_0 = 0.8$ , und die Wärmeverlustkoeffizienten seien  $a_1 = 3.6 \text{ W/Km}^2$  und  $a_2 = 0.01 \text{ W/K}^2\text{m}^2$ . Der Absorberinhalt betrage 1.8 Liter. Das entsprechende Modell ist im Tabellenblatt «Absorbermodelle» eingetragen, wie in Tabelle 8 dargestellt ist.

Tabelle 8 Modellparameter für den Kollektor «FK Mäander H» im Tabellenblatt «Absorbermodelle».

Kollektortyp	Kollektorfläche	Absorberrohrlänge äquivalent	hydr. Durchmesser Absorberrohr	hydr. Durchmesser Absorberanschluss	Anz. Parallele Absorberrohre	Länge	hydr. Durchmesser	Typ Verzweigung	Länge Balg / Wellrohr	hydr. Durchmesser Balg / Wellrohr	Absorber­volumen nach Datenblatt	eta0	a1	a2
	m <sup>2</sup>	m	m	m		m	m		m	m		-	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
FK Mäander H	2.3	18	0.007	0.007	1	2	0.016	scharfkantig	0.05	0.016	1.8	0.800	3.6	0.01

Der Hersteller bietet ausserdem Komponenten für den Reihenanschluss an. Diese bestehen aus einem 0.4 m langen Well Schlauch und können durch gerade Rohre mit 22 mm Aussendurchmesser bis zur Feldleitung verlängert werden. Tabelle 9 zeigt, wie diese Komponente im Tabellenblatt «Rohre» unter dem Namen A22-DN20\_0.4 modelliert wird.

Tabelle 9 Komponenten für den Reihenanschluss im Tabellenblatt «Rohre».

Rohre	Rohrdimension mm	Kollektorseite		Reihen- /Feldanschluss		D aussen mm	D-hydr. Well. mm	L. Well. m	Anwendung
		D-hydr. mm	Länge glatt m	D-hydr. mm					
Kombinierte Rohre	A12-DN16_0.8	10		10			16	0.8	Reihenanschluss
	A18-DN16_0.4	15		16			16	0.4	Reihenanschluss
	A18-DN16_1.5	15		16			16	1.5	Reihenanschluss
	A18-DN20_1.5	15		20			20	1.5	Reihenanschluss
	<b>A22-DN20_0.4</b>	20		20			20	0.4	Reihenanschluss

Die Betriebsbedingungen und die Daten für das Kollektorfeld werden in das Tabellenblatt «Anlagendaten» gemäss Abbildung 26 eingetragen.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände				
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	60	Thermische Leistung	kW	82.4		
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	138	" homog. Durchström.	kW	82.5		
Rücklaufstemperatur	°C	60	Vorlaufstemperatur	°C	79	Inhomog. Volumenstrom	%	11		
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocor LS 45% Vol. Feld inkl. Verrohrung			l	194	Einfluss auf Leistung	%	-0.11	
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	30.0	Vol. Feldverrohrung	l	38	Max. Fließgeschw.	m/s	1.0		
<b>Kollektorfeld 1</b>	Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	10	10	10	10	10	10			
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1			
Kollektortyp	-	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H			
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	A22-DN20_0.4	A22-DN20_0.4	A22-DN20_0.4	A22-DN20_0.4	A22-DN20_0.4	A22-DN20_0.4			
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	3	3	3	3	3	3			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	C	C	C	C	C			
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0	4	4	4	4	4			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	54 x 2	42 x 1.5	42 x 1.5	35 x 1.5	28 x 1.5	22 x 1			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C Δp Kollektorfeld 1				kPa	30.4	√ Koll.feld 1	l/h	4140

Abbildung 26 Definition der Betriebsbedingungen und des Kollektorfeldes.

Für die Rohrführung hat man grundsätzlich die vier Möglichkeiten der Z-Z, Z-C, C-Z und der C-C Konfiguration. Es soll jedoch immer zuerst die Verrohrungsart mit dem geringsten Aufwand an Material und Investitionskosten gewählt werden. Entsprechend werden nach Abbildung 27 sowohl die einzelnen Reihen als auch das Feld in C-Konfiguration angeschlossen.

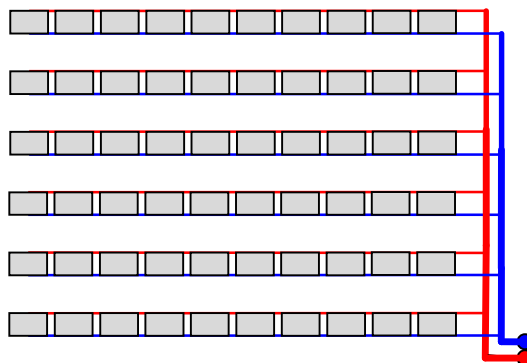


Abbildung 27 Sechsstufiges Kollektorfeld in C-C-Konfiguration.

Die Rohrdimensionen werden so gewählt, dass die Fließgeschwindigkeiten zwischen 0.4 und 1 m/s liegen. Nach Betätigen der Schaltfläche «Berechnen» wird im Tabellenblatt «Fließgeschw» geprüft, ob die Fließgeschwindigkeiten im gewünschten Bereich liegen. Nach einigen Iterationen

findet man die geeignete Abstufung der Rohrdimensionen von 54x2 beim Feldanschluss (Reihe 1) bis zu 22x1 bei der Feldleitung zur Reihe 6. Die Strömungsverteilung ist nie homogen. Die Inhomogenität ist als relative mittlere Abweichung des flächenspezifischen Durchflusses definiert und wird wie folgt berechnet:

$$\langle \Delta \dot{V} \rangle = \frac{1}{n} \frac{\sum (\dot{V}_{spec} - \langle \dot{V}_{spec} \rangle)}{\langle \dot{V}_{spec} \rangle}$$

Unter den vorgegebenen Betriebsbedingungen und den gewählten Rohrdimensionen beträgt die relative mittlere Abweichung des flächenspezifischen Durchflusses 11 %. Die thermische Leistung des Kollektorfeldes wird unter der Annahme berechnet, dass die Leistungsparameter gemäss Datenblatt konstant sind. Unter diesen Voraussetzungen resultiert eine thermische Leistung von 82.4 kW. Zum Vergleich wird die thermische Leistung bei homogener Durchströmung zu 82.5 kW berechnet. Die Leistungseinbusse durch die Inhomogenität der Durchströmung ist nur 0.11 % und damit vernachlässigbar. Dieses Resultat zeigt, dass die Tichelmannschaltung, wonach sowohl die Kollektorreihen als auch das Kollektorfeld in Z-Konfiguration angeschlossen werden, in diesem Fall nicht erforderlich ist.

Anschliessend wird der Kreislauf im Tabellenblatt «Anlagendaten» gemäss Abbildung 28 modelliert. Sinnvollerweise wählt man für die drei Leitungsabschnitte des Feldanschlusses, der Steigzone und des Technikraumes dieselben Rohrdimensionen wie bei der Feldleitung, d.h. 54x2. Entsprechend wird eine Armaturengruppe mit der Dimension DN 50 gewählt.



Abbildung 28 Modellierung des Kreislaufes.

Der Durchflussmesser muss passend für die Rohrdimension und den Durchfluss von 4140 l/h gewählt werden. Ausserdem muss sichergestellt sein, dass das Messteil für Glykol geeignet bzw. kalibrierbar ist. Beispielsweise findet man im Online-Katalog der Belimo AG (BELIMO 2025) die Baureihe nach Abbildung 29.

Typ	DN	G [°]	qp [m³/h]	qs [m³/h]	qi [m³/h]	Kvs theor. [m³/h]	Δp [kPa]
22PE-1UC	15	3/4	1.5	3	0.015	3.9	15
22PE-1UD	20	1	2.5	5	0.025	7.2	12
22PE-1UE	25	1 1/4	3.5	7	0.035	13.2	7
22PE-1UF	32	1 1/2	6	12	0.06	16.0	14
22PE-1UG	40	2	10	20	0.1	23.6	18
22PE-1UH	50	2 1/2	15	30	0.15	32.0	22

qp: Nenndurchfluss  
 qs: Höchstdurchfluss  
 qi: Kleinster Durchfluss  
 Kvs theor.: theoretischer Kvs-Wert für Druckabfallberechnung  
 Δp: Druckabfall bei Nenndurchfluss qp



Abbildung 29 Durchflussmesser (Quelle: Belimo AG)

Aus dieser Baureihe wählt man den Typ 22PE-1UH mit der Nennweite DN 50, der einen Messbereich von 0.15 bis 15 m³/h hat. Zur Modellierung des Druckverlustes trägt man den Druckverlust von 22 kPa beim Nenndurchfluss von 15'000 l/h ein. Nach betätigen der Schaltfläche «Berechnen» erscheinen die Druckverluste der Rohrabschnitte und Kreislaufkomponenten. Der Gesamtdurchfluss von 4.14 m³/h und der Gesamtdruckverlust von 51.2 kPa werden später benötigt, um eine geeignete Pumpe auszuwählen.

Abbildung 30 zeigt einen Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Fließgeschw». Hier kann kontrolliert werden, ob die Fließgeschwindigkeiten im gewünschten Rahmen liegen. Ausserdem kann festgestellt werden, dass die Fließgeschwindigkeit in der Vorlaufleitung die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit um 49 % übersteigt. Es kann also damit gerechnet werden, dass der Kreislauf im Betrieb entlüftet werden kann.

Kollektorfeld 1:		Reihen Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Absorberrohr maximal	m/s		0.66	0.64	0.63	0.62	0.59	0.57	
Absorberrohr minimal	m/s		0.49	0.47	0.46	0.44	0.41	0.39	
Sammelleitung maximal	m/s		1.04	1.01	0.99	0.96	0.92	0.87	
Sammelleitung minimal	m/s		0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	
Reihenanschlussleitung	m/s		0.66	0.64	0.63	0.61	0.58	0.55	
Feldanschlussleitung Glattrrohr	m/s		0.59	0.80	0.63	0.69	0.73	0.56	
Feldanschlussleitung Wellrohr	m/s		0.59	0.80	0.63	0.69	0.73	0.56	
Kollektorfeld 2:		Reihen Nr.							
Absorberrohr maximal	m/s								
Absorberrohr minimal	m/s								
Sammelleitung maximal	m/s								
Sammelleitung minimal	m/s								
Reihenanschlussleitung	m/s								
Feldanschlussleitung Glattrrohr	m/s								
Feldanschlussleitung Wellrohr	m/s								
Rohrleitungen, Wärmetauscher, Pumpe			Selbstentlüftungsgeschwindigkeit						
Feldanschluss	m/s		0.59	m/s					%
Steigzone	m/s		0.59	0.39		Fließgeschw./Selbstentlüftungsgeschw =			149%
Technikraum	m/s		0.59						

Abbildung 30 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Fließgeschw».

Anschliessend werden im Tabellenblatt «Anlagendaten» anstelle «vorgegebener Durchfluss» Pumpen ausgewählt und durch «Berechnen» geprüft, ob diese geeignet sind. Falls der Pumpenkatalog keine geeignete Pumpe enthält, kann diese anhand des bei 30 l/hm² berechneten Betriebspunktes aus dem Pumpenkatalog von Herstellern gefunden und modelliert werden. Für dieses Beispiel wurde die Pumpe des Typs ModulA 50-6 270 RED der Biral AG gewählt. Abbildung 31 zeigt das Kennfeld der Pumpe, deren Maximalkennlinie im interessierenden Bereich durch ein Polynom zweiten Grades approximiert wurde.

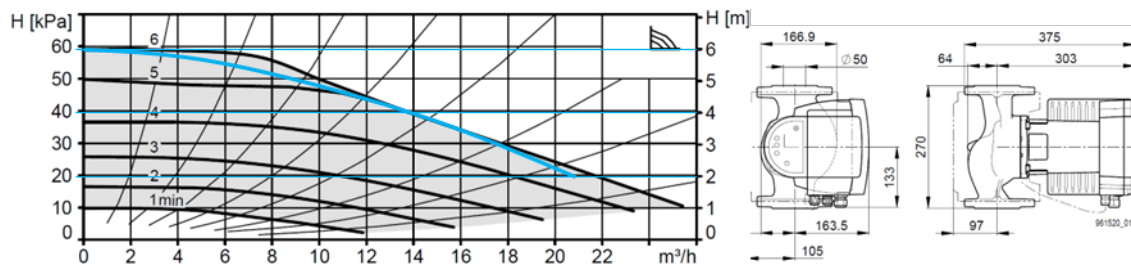


Abbildung 31 Pumpe ModulA 50-6 270 RED (Quelle: Biral AG)

Die Pumpenbezeichnung und die Stützstellen des Polynoms werden in den Pumpenkatalog nach Tabelle 10 eingetragen.

Tabelle 10 Eintrag der Parameter im Tabellenblatt «Pumpenmodelle»

Pumpentypen		$p_0$	$Vs_1$	$p_1$	$Vs_2$	$p_2$
vorgegebener Durchfluss		mWs	l/h	mWs	l/h	mWs
Biral ModulA 50-6 RED		6	14000	4	20800	2

Nun kann das Pumpenmodell im Arbeitsblatt «Anlagendaten» ausgewählt werden. Nach Betätigen der Schaltfläche «Berechnen» erscheinen nun nebst den numerischen Resultaten auch die Pumpenkennlinie, die sich mit der Anlagenkennlinie im Betriebspunkt schneidet.

Schaltung parallel / seriell	Typ	T unberück	$\Delta p$ Kollektorfeld	kPa	33.0 V	Kollektorfeld	l/h	4311
<b>Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpe</b>								
<b>Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte</b>								
Feldanschluss: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	3.0	$\Delta p$ Feldanschluss	kPa	2.1	kPa Anlagen- und Pumpenkennlinie		
Rohrdimension	mm	54 x 2	Anz. Winkel	-	4	60		
Steigzone: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	10.0	$\Delta p$ Steigzone	kPa	1.9	50		
Rohrdimension	mm	54 x 2	Anz. Winkel	-	0	40		
Technikraum: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	4	$\Delta p$ Kellerverrohr.	kPa	2.3	30		
Rohrdimension	mm	54 x 2	Anz. Winkel	-	4	20		
Armaturengruppe: Typ oder Rohrdimension	Typ	DN50	$\Delta p$ Armaturengruppe	kPa	4.4	10		
Durchflussmesser: Druckverlust	kPa	22	$\Delta p$ Durchflussmesser	kPa	1.8	0		
bei einem Volumenstrom	l/h	15000	Volumen Leitungen	l	67	0		
Glattrohrübertrager: Fläche	m <sup>2</sup>	20.0	$\Delta p$ Glattrohrübertrager	kPa	9.7	0		
Rohrdimension	"	1"	Vol. Glattrohrübertrager	l	110	0		
Anz. Parallele Rohre	-	4	Wendeldurchmesser	m	1	0		
Plattenübertrager: Druckverlust	kPa	0	$\Delta p$ Plattenübertrager	kPa	0.0	0		
bei einem Volumenstrom	l/h	7300	Druckverlustkoeffizient	-	85.1	0		
Luftsäule bzw. Druckhochhaltung	m	0.0	Gegendruck	kPa	0.0	0		
Pumpe / Drehzahlstufe	Typ	Biral ModulA 50-6 RED		%	100%	0		
Anz. Pumpen seriell/parallel	-	1	$\Delta p$ total	kPa	55.3	Anlagenvol. Exkl. MAG	l	322
Mittlerer Druckverlust pro Längeneinheit	Pa/m	Hydr. Pumpleistung	W	66.2	Längenbez. Druckverlust	Pa/m	368	

Abbildung 32 Resultate mit Anlagen- und Pumpenkennlinie.

Der ebenfalls im Tabellenblatt «Anlagendaten» angezeigte spezifische Durchfluss übersteigt mit 31.2 l/hm<sup>2</sup> den spezifizierten Maximalwert von 30 l/hm<sup>2</sup> nur geringfügig. Die Pumpe ist folglich korrekt dimensioniert. Wichtige Resultate für den Vergleich mit weiter unten dargestellten Varianten sind

- Gesamtdurchfluss 4311 Liter pro Stunde
- Anlagenvolumen 322 Liter.

Es können auch die Druckverhältnisse im Kreislauf berechnet werden. Tabelle 11 zeigt einen Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten», in dem die erforderlichen Angaben gemacht werden können.

Tabelle 11 Angaben zur Anlagenhöhe und Druckhaltung.

Anlagenhöhe und Druckhaltung		
Höhe der Sammelleit.	m	10
Höhe der Verteilleit.	m	9.2
Höhe des MAG	m	0.2
Überdruck Referenzpunkt	bar	1.85
Referenzpt. Druckhaltung	-	Druckseite
Überdruck Hochpt. Ruhe	bar	0.88
Überdruck Hochpt. Betr.	bar	0.50

Die Höhe der Sammelleitungen über dem Boden des Technikraumes ist 10 m. Der Boden des Ausdehnungsgefäßes befindet sich 0.2 m über dem Boden des Technikraumes. Es wird angenommen, dass der Referenzpunkt auf derselben Höhe liegt. Der Referenzpunkt muss aus Gründen der Stagnationssicherheit auf der Druckseite der Pumpe liegen. Daher ist der Betriebsdruck am Hochpunkt gegenüber dem Ruhedruck um die Druckverluste der Rücklaufleitung und des Kollektorfeldes reduziert. Der Betriebsüberdruck am Hochpunkt soll beispielsweise 0.5 bar betragen. Nach einigen Versuchsrechnungen findet man den erforderlichen Überdruck am Referenzpunkt. Diese Rechnung muss ergänzt werden durch eine saubere, vollständig dokumentierte Dimensionierung des Ausdehnungsgefäßes, inklusive Sicherheitsventil und Genauigkeitsklasse des Manometers.

### 3.3.3 Volumenstrom-, Temperatur- und Druckverteilung

Abbildung 33 zeigt die Volumenstromverteilung über alle 60 Kollektoren. Erwartungsgemäss ist der Volumenstrom im ersten Kollektor der ersten Reihe am höchsten. In den Absorberrohren der ersten Kollektoren der Reihen 1 bis 3 ist die Strömung turbulent (rote Balken). In den vom Reihenanschluss weiter entfernten Kollektoren der Reihen 3 bis 6 ist die Strömung laminar (blaue Balken). Der Bereich dazwischen liegt im Übergangsbereich (gelbe Balken).

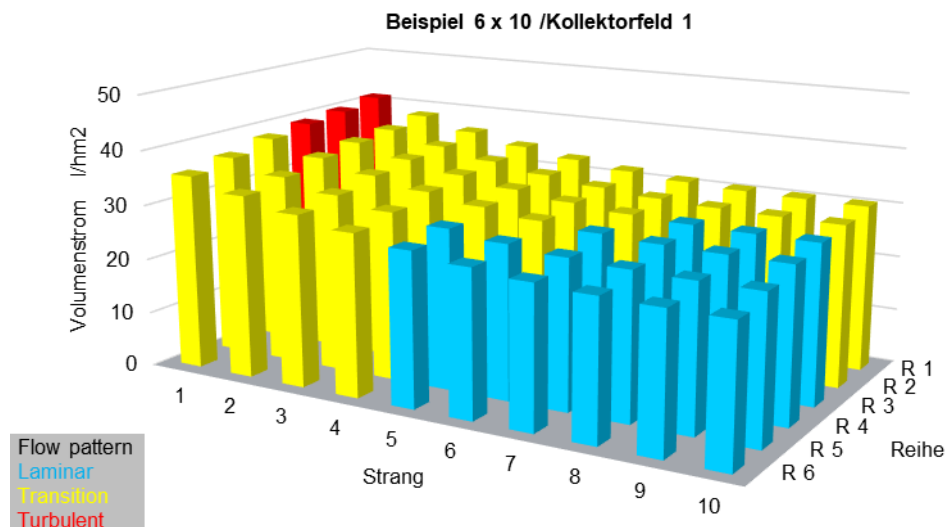


Abbildung 33 Volumenstromverteilung und Art der Strömung.

Abbildung 34 zeigt die Temperaturverteilung am Austritt der Absorberrohre. Die Reihenfolge der Reihen ist gegenüber der Abbildung 33 vertauscht, damit sich die Balken nicht verdecken.

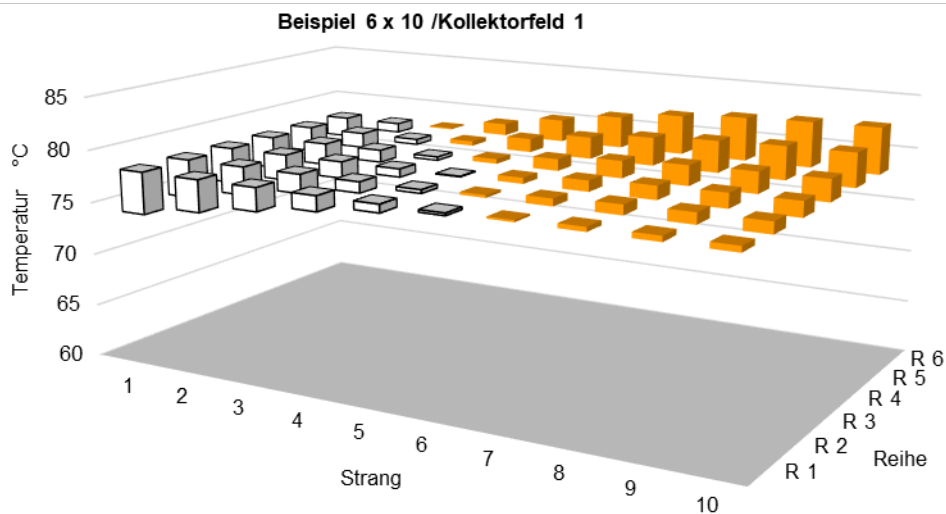


Abbildung 34 Austrittstemperatur der Absorberrohre.

Anhand dieser Darstellung kann man jene Kollektoren identifizieren, bei denen die Austrittstemperatur etwa der Vorlauftemperatur entspricht. Die Kollektoren 6 und 7 sind für die Fühlerplatzierung optimal. Ein Fühler im Kollektor 1 würde eine Temperatur messen, die um rund 4 K tiefer ist als die Vorlauftemperatur. Das kann Betreiber verunsichern und Reklamationen zur Folge haben. Es wird ausserdem empfohlen, auch den zehnten Kollektor in der sechsten Reihe mit einem Fühler auszurüsten. Dort würde sich am ehesten ein schlecht durchströmter Bereich oder partielle Stagnation manifestieren. Dies lässt sich leicht anhand einer zu grossen Temperaturdifferenz der beiden Kollektorfühler feststellen.

Bei gewissen Fabrikaten kann der Kollektorfühler beim vorlaufseitigen Reihenanschluss in der Sammelleitung platziert werden. In der Abbildung 35 sind die Mischtemperaturen in den Sammelleitungen dargestellt. Demnach wäre die Sammelleitung des ersten Kollektors der vierten Reihe der optimale Ort für den Kollektorfühler. Auch hier ist es sinnvoll, die Sammelleitung des zehnten Kollektors der sechsten Reihe mit einem Temperaturfühler auszurüsten.

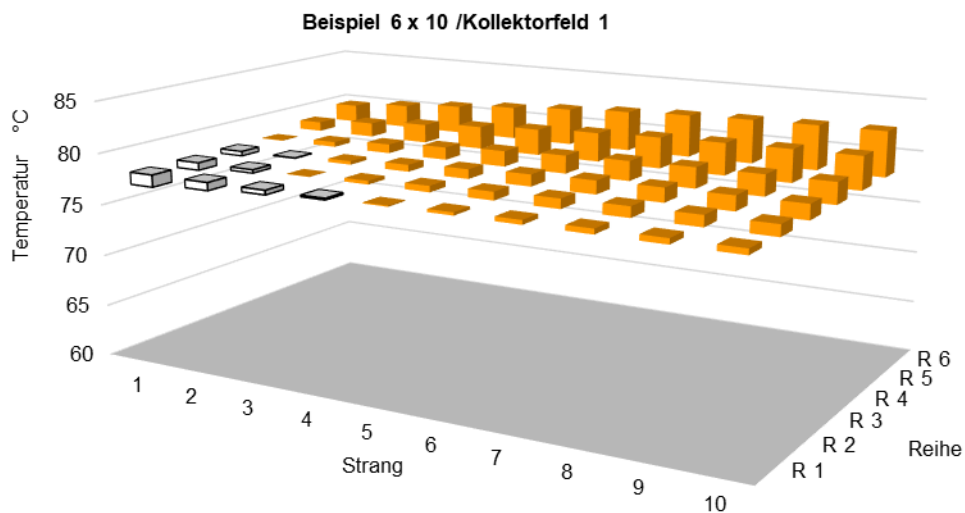


Abbildung 35 Mischtemperaturen in den Sammelleitungen.

Abbildung 36 zeigt die Druckverteilung in den Verteil- und Sammelleitungen des Kollektorfeldes.

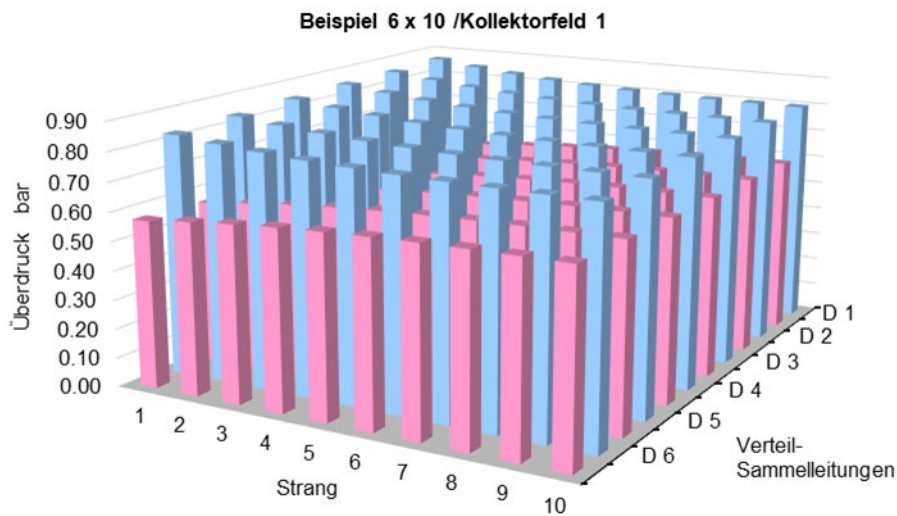


Abbildung 36 Druckverteilung in den Verteilungen (D) und Sammelleitungen.

Die grösste Druckdifferenz tritt über dem Absorber des ersten Kollektors der ersten Reihe auf. Dort ist der Druck am Eintritt in die Verteilung am höchsten und am Austritt der Sammelleitung (rosa Balken, verdeckt) mit 0.5 bar am tiefsten (vgl. Tabelle 11).

### 3.4 Variante Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration

Nach Abbildung 37 sind sowohl die Kollektorreihen als auch das Kollektorfeld in Z-Konfiguration angeschlossen. 60 Flachkollektoren in 6 Reihen mit einem Reihenabstand von 4 m angeordnet. Dieses soll mit der Vor- und Rücklaufleitung unten rechts im Bild verbunden werden.

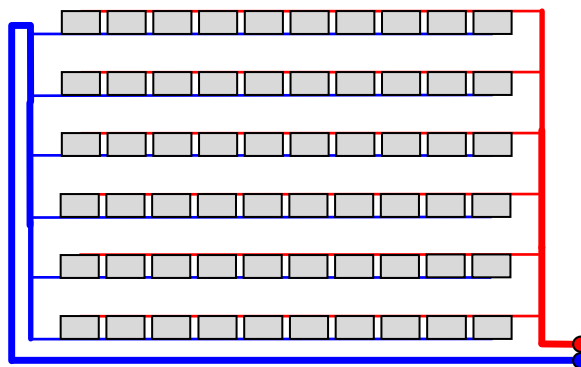


Abbildung 37 Kollektorfeld mit Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

Nach Abbildung 38 muss nur die Konfiguration für Reihen und Feld von C auf Z geändert werden. Das Programm verbindet die rücklaufseitige Feldleitung in umgekehrter Reihenfolge mit den rücklaufseitigen Reihenanschlussleitungen und verlängert den ersten Abschnitt der Feldleitung um die Leitungslänge der Tichelmannleitung.

Kollektorfeld 1	Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	10	10	10	10	10	10			
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1			
Kollektortyp	-	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H			
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4			
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	3	3	3	3	3	3			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z			
Feldleitung: Reihenabstand	m	0	4	4	4	4	4			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	54 x 2	42 x 1,5	42 x 1,5	35 x 1,5	28 x 1,5	22 x 1			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Δp Kollektorfeld 1		kPa	31,7	√ Koll.feld 1		l/h	4000

Abbildung 38 Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

Die Tichelmannleitung erzeugt nebst Wärmeverlusten auch Druckverlust. Im Vergleich zur Variante mit Reihenanschluss und Feldverrohrung in C-Konfiguration

- Sinkt der spezifische Durchfluss von 31.2 l/hm<sup>2</sup> auf 29 l/hm<sup>2</sup>
- Sinkt der Gesamtdurchfluss von 4311 auf 4000 Liter pro Stunde
- Steigt das Anlagenvolumen von 322 auf 408 Liter.

### 3.4.1 Volumenstrom-, Temperatur- und Druckverteilung

Beim Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration sind alle Strömungspfade zwischen Ein- und Austritt des Kollektorfeldes gleich lang. Trotzdem ist die Volumenstromverteilung nicht völlig homogen, wie in Abbildung 39 zu sehen ist. Die Volumenströme über die Kollektoren bzw. Stränge zeigen die Verteilung, die für identische Verteil- und Sammelleitungen typisch ist. Diese ist nicht vollkommen symmetrisch, weil sich die Rohrreibungszahlen in den Verteil- und Sammelleitungen aufgrund der Temperaturdifferenz unterscheiden. Dank der abgestuften Feldleitungen ist der Volumenstrom praktisch gleichmässig auf die Kollektorreihen verteilt. Die Inhomogenität der Durchströmung beträgt nur noch 5%. Die Leistungsminderung im Vergleich zu homogener Durchströmung ist mit – 0.02% praktisch null.

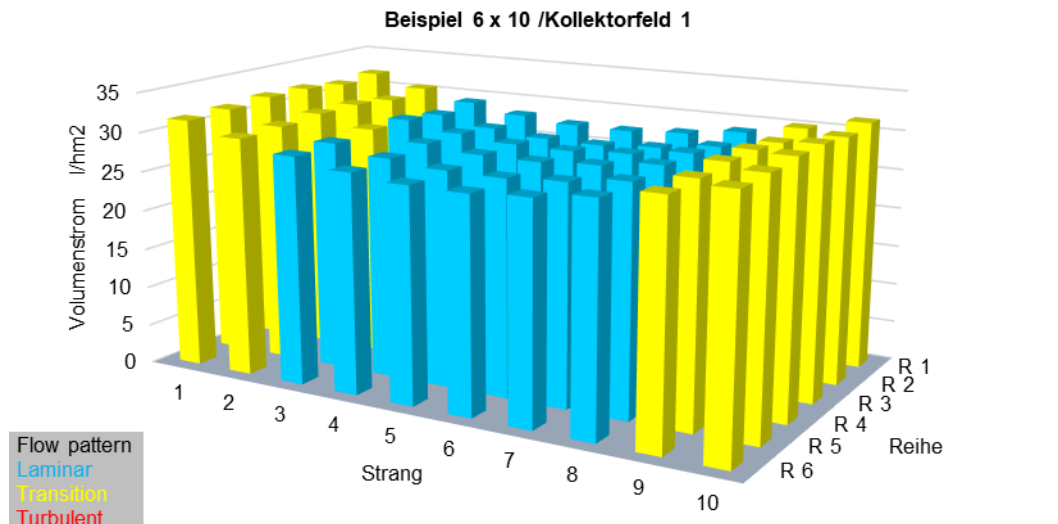


Abbildung 39 Volumenstromverteilung bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

Abbildung 40 zeigt die entsprechenden Temperaturen am Austritt der Absorberrohre bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration. Hier ist der dritte Kollektor der ersten Reihe optimal für die Platzierung des Kollektorfühlers.

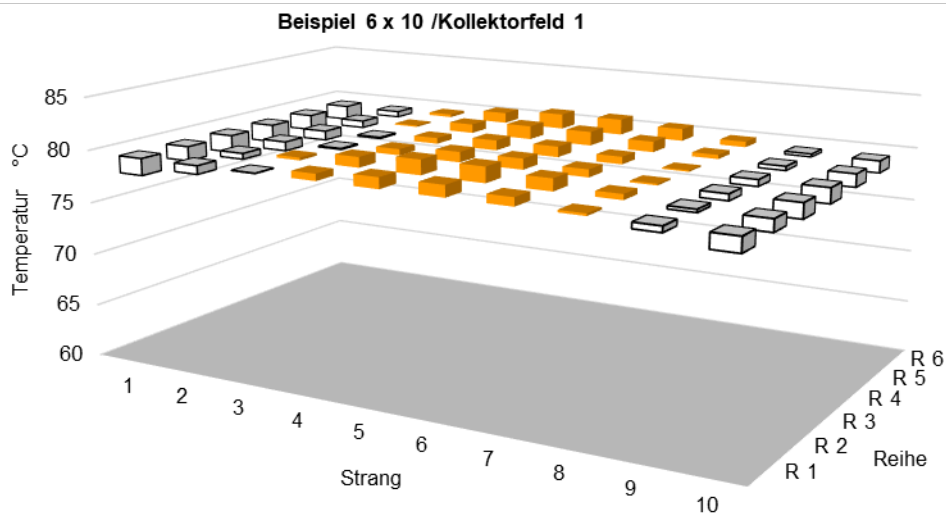


Abbildung 40 Temperaturen am Austritt der Absorberrohre bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

Abbildung 41 zeigt die Temperaturen am Austritt der Sammelleitungen. Aufgrund der gewählten Abstufung der Leitungsdimensionen entsprechen die Austrittstemperaturen der Kollektorreihen (Strang 1) praktisch dem Mittelwert, sodass der Kollektorfühler in irgendeinem der vorlaufseitigen Sammelleitungen installiert werden kann. In diesem Fall würde man den ersten Kollektor der ersten Reihe wählen, weil dieser der Steigzone am nächsten liegt.

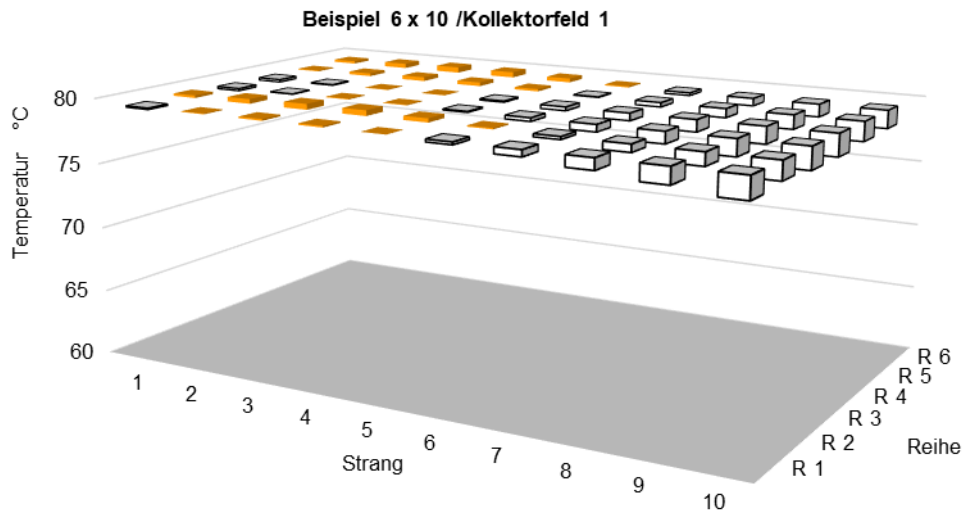


Abbildung 41 Temperaturen am Austritt der Sammelleitungen bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

Abbildung 42 zeigt die Druckverteilung über den Verteilleitungen (blau) und Sammelleitungen (rosa) bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

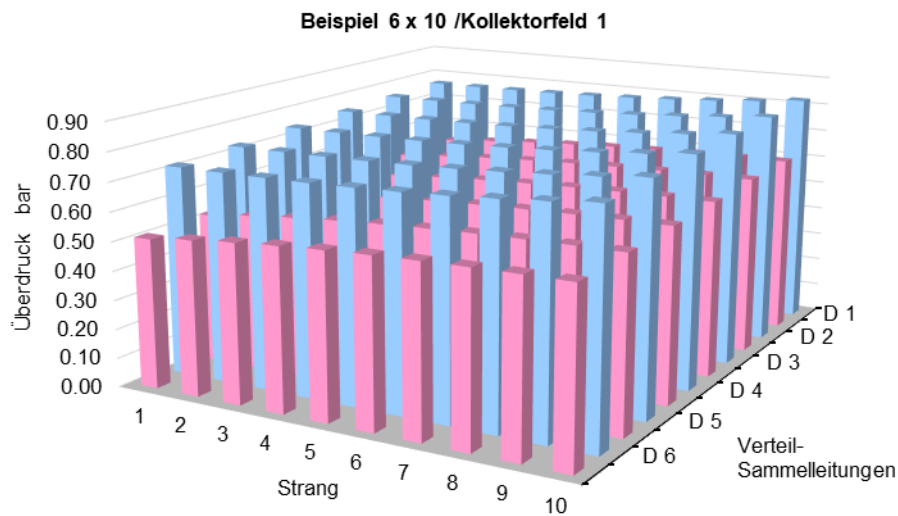
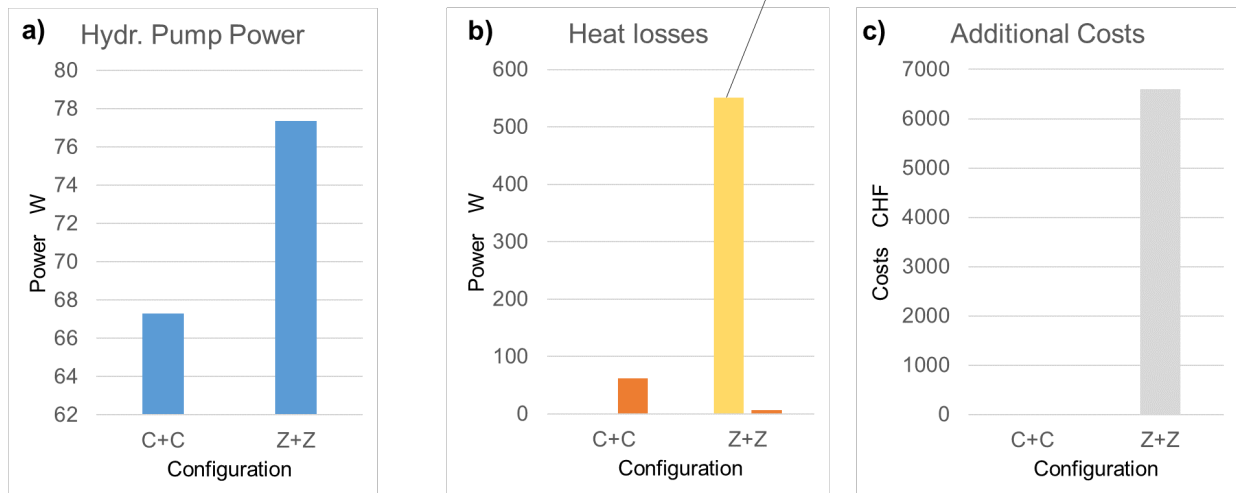


Abbildung 42 Druckverteilung über den Verteilungen (blau) und Sammelleitungen (rosa) bei Reihenanschluss und Feldverrohrung in Z-Konfiguration.

### 3.5 Vergleichende Beurteilung der C-C und Z-Z Konfiguration

Interessant ist der Vergleich der scheinbar optimalen Z-Z Konfiguration mit der wesentlich einfacheren C-C Konfiguration nach Abbildung 43. In beiden Fällen wurde mit demselben Durchfluss von  $30 \text{ l/hm}^2$  gerechnet. Bei der Z-Z Konfiguration ist die hydraulische Pumpenleistung um rund 10 W höher als bei der C-C Konfiguration, weil zusätzlich die Rohrreibung in der 40 m langen Tichelmannleitung überwunden werden muss. Andererseits ist die Leistungseinbusse des Kollektorfeldes bei der C-C Konfiguration rund 60 W höher als bei der Z-Z Konfiguration. Wenn man aber die Wärmeverluste der Tichelmannleitung berücksichtigt, sind die Wärmeverluste bei der Z-Z Konfiguration rund 500 W höher! Ausserdem kostet die fertig installierte und wetterfest gedämmte Tichelmannleitung mehr als 6000 CHF.

Wärmeverlust von 40 m Rohr bei 55 °C mit  
50 mm Insulation ( $\lambda=0.04$  W/Km and  $\alpha=10$  W/Km<sup>2</sup>)



Quelle: D. Ehrbar, Solarline AG, Zurich

Abbildung 43 Vergleich der hydraulischen Pumpleistung, der Wärmeverluste und der Kosten von C-C und Z-Z Konfiguration.

Aus diesem Vergleich können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die C-C Konfiguration ist wesentlich kostengünstiger als die Z-Z Konfiguration.
- Die C-C Konfiguration erfordert kleinere Pumpenleistung als die Z-Z Konfiguration.
- Die C-C Konfiguration liefert in der Regel einen höheren Ertrag als die Z-Z Konfiguration.

Es gibt aber Gründe, wo die Z-Z Konfiguration vorteilhaft ist:

- Sehr grosse Kollektorfelder mit stark unterschiedlichen Kollektorreihen.
- Grosse Kollektorfelder mit unverglasten Kollektoren, bei denen sich die ungleiche Durchströmung stärker auf den Wirkungsgrad auswirkt.
- Betrieb bei hohen Temperaturen, die nur wenig unter der Siedetemperatur liegen. In diesem Fall muss dafür gesorgt werden, dass sich die Austrittstemperaturen der einzelnen Kollektoren nur wenig unterscheiden.

Welche der beiden Konfigurationen vorteilhaft ist, muss stets im Einzelfall geprüft werden.

### 3.6 Kollektorfeld mit 276 m<sup>2</sup> Flachkollektoren und symmetrischer Anbindung

Es kann günstig sein, ein Kollektorfeld zu halbieren und über dieselben Feldleitungen anzuschliessen. Im Beispiel nach Abbildung 44 besitzt das Kollektorfeld zwei identische Teilfelder, deren Kollektorreihen in C-Konfiguration an die ebenfalls in C-Konfiguration ausgeführten Feldleitungen angeschlossen sind.

Bei sehr vielen Reihen kann es erforderlich sein, die Feldverrohrung in Z-Konfiguration auszuführen, wie rechts in der Abbildung gezeigt ist.

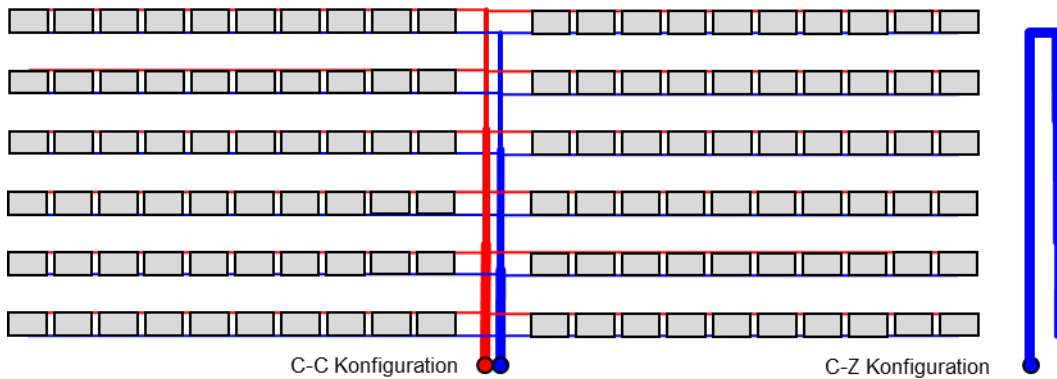


Abbildung 44 Symmetrisches Kollektorfeld mit mittigem Anschluss.

In der Praxis wird man die Reihenanschlussleitungen nicht über Kreuzfittings, sondern über versetzt angeordnete T-Verbindungen anschliessen. Dies kann in HYDRA so modelliert werden, dass der Reihenabstand zwischen den spiegelbildlich angeordneten Reihen etwa gleich dem minimalen Abstand zweier T-Stücke gewählt wird.

Abbildung 45 zeigt ein Beispiel für ein Kollektorfeld mit 2 x 6 Reihen und mittigem Anschluss in C-Konfiguration. Die Dimensionen der Feldverrohrung wurden an die zu erwartenden Volumenströme angepasst.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände				Stoffdaten bei Rücklaufemperatur					
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	120	Thermische Leistung	kW	164.5	Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1008				
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	276	homog. Durchström.	kW	164.6	Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	1.66				
Rücklaufemperatur	°C	60	Vorlaufemperatur	°C	79	Inhomog. Volumenstrom	%	11	Rauigkeit Oberflächen	mm	0.002				
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tylocor LS 45%	Vol. mit Feldverrohrung	l	0	Einfluss auf Leistung	%	-0.10	Diagramme formatieren	ja/nein	ja				
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	30.0	Vol. Feldverrohrung	l	0	Max. Fließgeschw.	m/s	1.1	Serierechnung	ja/nein	nein				
Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kollektortyp	-	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H	FK Mäander H
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4	A22-DN20_0,4
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Feldleitung: Reihenabstand	m	0	0,2	3,8	0,2	3,8	0,2	3,8	0,2	3,8	0,2	3,8	0,2	3,8	0,2
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	76.1 x 2,9	76.1 x 2,9	64 x 2	64 x 2	64 x 2	64 x 2	64 x 2	54 x 2	54 x 2	42 x 1,5	42 x 1,5	28 x 1,5	28 x 1,5	28 x 1,5
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	Δp Kollektorfeld 1	kPa	26.2	∇ Koll.feld 1	l/h	8001							

Abbildung 45 Modellierung eines Kollektorfeldes mit 2 x 6 Reihen und mittigem Anschluss in C-Konfiguration.

### 3.7 Grosskollektor mit 5 Mäanderabsorbern und integrierten Sammelleitungen

Grosskollektoren, wie sie in Fernwärmeanlagen eingesetzt werden, besitzen Absorber, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt sind. HYDRA bietet die Möglichkeit, die komplexe Verschaltung innerhalb des Kollektorgehäuses durch ein einfacheres Modell abzubilden. Dieses einfachere Modell wird dann verwendet, um grosse Kollektorfelder zu modellieren.

In der Abbildung 46 ist der Absorber eines Grosskollektors mit insgesamt 12 m<sup>2</sup> Absorberfläche schematisch dargestellt. Er besteht aus 5 identischen Mäanderabsorbern. Jedes Absorberrohr hat eine Länge von 20 m und einen Innendurchmesser von 7 mm. Die Verteilleitung und die Sammelleitung haben einen Innendurchmesser von 33 mm und eine Gesamtlänge von 5.5 m. Die Absorberrohre sind jeweils einseitig mit den Verteil- und Sammelleitungen verbunden. Der erste Absorber auf der linken Seite ist gespiegelt. Dadurch kann eine Kollektorreihe in C- und Z-Konfiguration angeschlossen werden. Als Kollektorverbinder kommen Metallbälle mit 33 mm Innendurchmesser und einer Länge von 100 mm zum Einsatz. Die Leistungskenndaten seinen durch  $\eta_0 = 0.8$ ,  $a_1 = 3.5 \text{ W/Km}^2$  und  $a_2 = 0.01 \text{ W/K}^2\text{m}^2$  gegeben.

Es ist sehr wertvoll, bereits in einem frühen Stadium der Produktentwicklung die hydraulischen Eigenschaften zu kennen, lange bevor ein Prototyp für Messungen zur Verfügung steht.

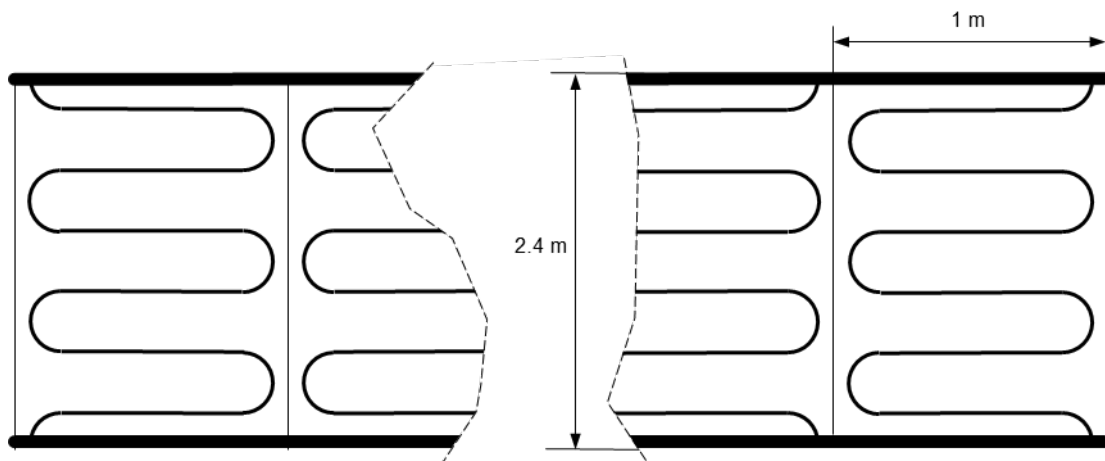


Abbildung 46 Schematische Darstellung des Absorbers eines Grosskollektors, bestehend aus 5 Mäanderabsorbern.

HYDRA bietet die Möglichkeit, solche Grosskollektoren als Kollektor mit vereinfachter Hydraulik zu modellieren. Dazu geht man wie folgt vor:

1. Zunächst modelliert man den **Teilkollektor** mit  $2.4 \text{ m}^2$  Absorberfläche sowie Verteil- und Sammelleitung von  $1.1 \text{ m}$  Länge. Für den Teilkollektor wird ein Metallbalgkompensator mit  $20 \text{ mm}$  Länge modelliert. Man weiss aus Erfahrung, dass die äquivalente Länge eines Mäanderrohres etwa  $10\%$  grösser ist als die effektive Länge. Daher wählt man eine Länge von  $22 \text{ m}$ . Ausserdem modelliert man den **Grosskollektor**, bestehend aus 5 parallelen Absorberrohren und einer Sammelleitung mit einer Länge von  $5.5 \text{ m}$ .
2. Anschliessend werden zwei Kollektorfelder mit diesen Kollektoren modelliert. Das Kollektorfeld 1 besteht aus einer Kollektorreihe mit 30 Teilkollektoren, die in C-Konfiguration angeschlossen sind. Das Kollektorfeld 2 besteht aus 6 Grosskollektoren. Die beiden Teilfelder werden parallelgeschaltet, wobei der Druckverlust der T-Verzweigung nicht berücksichtigt wird.
3. Das Modell soll für Z-Konfiguration und einen spezifischen Durchfluss von  $15 \text{ l/hm}^2$  optimiert werden, bei einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ W/m}^2$ , einer Rücklauftemperatur von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Umgebungstemperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nachdem man die gewünschten Randbedingungen eingestellt hat, führt man eine Rechnung durch. Der Volumenstrom im Teilfeld 1 wird grösser sein als im Teilfeld 2, weil im Teilfeld 1 der Gesamtmassenstrom nur durch je  $1 \text{ m}$  Verteil- und Sammelleitung strömt. Im Teilfeld 2 durchströmt der Gesamtmassenstrom eines Grosskollektors die gesamte Länge von  $5 \text{ m}$ .
4. Nun passt man den Durchmesser der Sammelleitung des Grosskollektors so lange an, bis beide Volumenströme gleich sind. In diesem Beispiel stimmen die Volumenströme bei einer äquivalenten Länge von  $4.4 \text{ m}$  überein.
5. Falls später gemessene Druckverluste verfügbar sind, kann die Länge des Absorberrohres optimiert werden. Es genügt dann, im Teilfeld 1 einen einzigen Grosskollektor zu modellieren. Die Randbedingungen werden entsprechend der Prüfbedingungen eingestellt. Danach wird die Rechnung durchgeführt und der berechnete mit dem gemessenen Druckverlust verglichen. Die Länge des Absorberrohres wird so lange angepasst, bis beide Werte hinreichend gut übereinstimmen.



Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände		Stoffdaten bei Rücklauftemperatur				Leitungslängen Feldverrohrung								
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	0 Anz. Koll. total				280	Thermische Leistung	2,4 Dichte				1008 RL Reihe max. Feld 1								
Umgebungstemperatur	°C	60 Kollektorfäche total				3360	* homog. Durchström.	2,4 Viskosität				1,66 RL Reihe max. Feld 2								
Rücklauftemperatur	°C	60 Vorlauftemperatur				60	Inhomog. Volumenstrom	17 Rauigkeit Oberflächen				0,002 Rücklauf Feld 1								
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	15,0 Vol. Feldverrohrung				3	Einfluss auf Leistung	-0,33 Diagramme formatieren				ja Rücklauf Feld 2								
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	15,0 Vol. Feldverrohrung				5	Max. Fließgeschw.	1,0 Serienerrechnung				nein								
Kollektorfeld 1	Reihe Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kollektortyp	-	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M
Reihenschlussleitung: Länge Vorlauf	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Feldleitung: Reiterabstand	m	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z, 2p Kollektorfeld 1	kPa	32,9 V Koll.feld 1				l/h	50400											

Abbildung 48 Kollektorfeld mit 280 Grosskollektoren. Resultate bei isothermer Durchströmung.

Unter diesen Bedingungen resultiert ein Druckverlust des Kollektorfeldes von 32.9 kPa. Abbildung 49 Symmetrische Strömungsverteilung bei nicht abgestuften Feldleitungen, vernachlässigten Druckverlusten in den T-Verbindungen und isothermem Betrieb. Abbildung 49 zeigt die typische Strömungsverteilung bei Z-Z Konfiguration und nicht abgestuften Rohrleitungen. Weil die Druckverluste in den T-Verbindungen nicht berücksichtigt wurden und keine Variationen der Stoffdaten auftreten, ist die Strömungsverteilung symmetrisch.

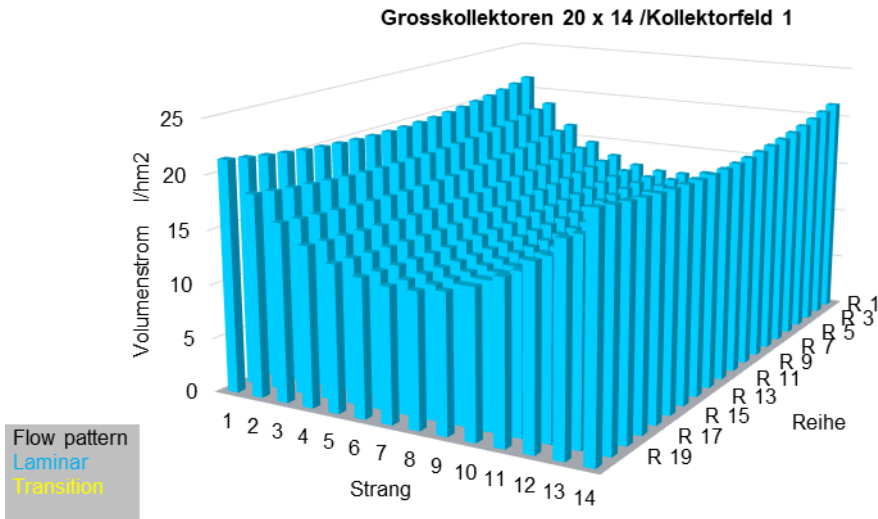


Abbildung 49 Symmetrische Strömungsverteilung bei nicht abgestuften Feldleitungen, vernachlässigten Druckverlusten in den T-Verbindungen und isothermem Betrieb.

In nächsten Schritt wird mit den einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup> und einer Umgebungstemperatur von 20 °C. gerechnet. Abbildung 50 zeigt die Resultate für das Kollektorfeld. Die thermische Leistung ist 1874.8 kW. Die Vorlauftemperatur ist 95 °C. Aufgrund der höheren Temperatur ist die Viskosität geringer. Daher ist der Druckverlust gegenüber der isothermen Rechnung mit 30.0 kPa rund 10 % kleiner.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände		Stoffdaten bei Rücklauftemperatur				Leitungslängen Feldverrohrung								
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1000 Anz. Koll. total				280	Thermische Leistung	1874,8 Dichte				1008 RL Reihe max. Feld 1								
Umgebungstemperatur	°C	20 Kollektorfäche total				3360	* homog. Durchström.	1882,8 Viskosität				1,66 RL Reihe max. Feld 2								
Rücklauftemperatur	°C	60 Vorlauftemperatur				95	Inhomog. Volumenstrom	17 Rauigkeit Oberflächen				0,002 Rücklauf Feld 1								
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	15,0 Vol. Feldverrohrung				3	Einfluss auf Leistung	-0,43 Diagramme formatieren				ja Rücklauf Feld 2								
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	15,0 Vol. Feldverrohrung				5	Max. Fließgeschw.	1,0 Serienerrechnung				nein								
Kollektorfeld 1	Reihe Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kollektortyp	-	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M
Reihenschlussleitung: Länge Vorlauf	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5	35 x 1,5
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Feldleitung: Reiterabstand	m	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4	139,7 x 4
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z, 2p Kollektorfeld 1	kPa	30,0 V Koll.feld 1				l/h	50400											

Abbildung 50 Kollektorfeld mit 280 Grosskollektoren. Resultate bei Betriebsbedingungen.

Weil die Temperaturverteilung nicht isotherm ist, ist auch die Strömungsverteilung nicht mehr vollkommen symmetrisch. Die Abweichungen können aber nur anhand der Zahlenwerte im Tabellenblatt «vs 1» gemäss Abbildung 51 festgestellt werden, nicht aber in einer Darstellung analog zur Abbildung 49.

R 1	21.1	18.5	16.3	14.7	13.5	12.8	12.4	12.5	13.0	13.9	15.3	17.2	19.5	22.4
R 2	20.8	18.2	16.1	14.5	13.4	12.6	12.2	12.3	12.9	13.8	15.1	16.9	19.3	22.1
R 3	20.5	18.0	15.9	14.3	13.2	12.5	12.1	12.2	12.7	13.6	14.9	16.7	19.0	21.8
R 4	20.2	17.7	15.7	14.2	13.1	12.3	12.0	12.1	12.6	13.5	14.8	16.5	18.8	21.5
R 5	20.0	17.6	15.6	14.1	13.0	12.2	11.9	12.0	12.5	13.4	14.6	16.4	18.6	21.3
R 6	19.8	17.4	15.4	13.9	12.9	12.1	11.8	11.9	12.4	13.3	14.5	16.2	18.4	21.1
R 7	19.7	17.3	15.3	13.9	12.8	12.1	11.7	11.8	12.3	13.2	14.4	16.1	18.3	20.9
R 8	19.5	17.2	15.2	13.8	12.7	12.0	11.7	11.8	12.2	13.1	14.4	16.0	18.2	20.8
R 9	19.5	17.1	15.2	13.7	12.7	12.0	11.6	11.7	12.2	13.1	14.3	16.0	18.1	20.7
R 10	19.4	17.1	15.1	13.7	12.6	11.9	11.6	11.7	12.2	13.1	14.3	15.9	18.1	20.7
R 11	19.4	17.1	15.1	13.7	12.6	11.9	11.6	11.7	12.2	13.0	14.3	15.9	18.0	20.7
R 12	19.4	17.1	15.2	13.7	12.7	11.9	11.6	11.7	12.2	13.1	14.3	15.9	18.1	20.7
R 13	19.5	17.1	15.2	13.7	12.7	12.0	11.7	11.7	12.2	13.1	14.3	16.0	18.1	20.8
R 14	19.6	17.2	15.3	13.8	12.7	12.0	11.7	11.8	12.3	13.1	14.4	16.0	18.2	20.9
R 15	19.7	17.3	15.4	13.9	12.8	12.1	11.8	11.8	12.3	13.2	14.4	16.1	18.3	21.0
R 16	19.9	17.4	15.5	14.0	12.9	12.2	11.8	11.9	12.4	13.3	14.5	16.3	18.5	21.2
R 17	20.1	17.6	15.6	14.1	13.0	12.3	11.9	12.0	12.5	13.4	14.7	16.4	18.6	21.3
R 18	20.3	17.8	15.8	14.2	13.1	12.4	12.0	12.1	12.6	13.5	14.8	16.6	18.8	21.6
R 19	20.6	18.0	15.9	14.4	13.2	12.5	12.1	12.2	12.7	13.6	15.0	16.7	19.1	21.8
R 20	20.9	18.3	16.1	14.5	13.4	12.6	12.3	12.4	12.9	13.8	15.1	17.0	19.3	22.1
Strang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Abbildung 51 Zahlenwerte der Strömungsverteilung in l/hm<sup>2</sup>.

Im nächsten Schritt werden die Druckverluste der T-Stücke berücksichtigt. Nach Abbildung 52 ist der Druckverlust mit 31.3 kPa um rund 5 % höher als ohne Berücksichtigung der der T-Stücke. Die Inhomogenität der Durchströmung beträgt 17%. Die dadurch bedingte Leistungsminderung ist mit -0.43 % vernachlässigbar.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände				Stoffdaten bei Rücklauf Temperatur				Leitungslängen Feldverrohrung						
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000 Anz. Koll. total	-	280 Thermische Leistung	kW	1874.7 Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1008 RL Reihe max. Feld 1	m	0.00										
Umgebungstemperatur	°C	20 Kollektorfäche total	m <sup>2</sup>	3360 * homog. Durchström.	kW	1862.8 Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	1.66 RL Reihe max. Feld 2	m	0										
Rücklauf Temperatur	°C	60 Vorlauf Temperatur	°C	95 Inhomog. Volumenstrom	%	17 Raugigkeit Oberflächen	mm	0.002 Rücklauf Feld 1	m	158										
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tykor LS 45% Vol. mit Feldverrohrung	l	3 Einfluss auf Leistung	%	-0.43 Diagramme formatieren	ja/nein	ja Rücklauf Feld 2	m	0										
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	15.0 Vol. Feldverrohrung	l	5 Max. Fließgeschw.	m/s	1.7 Serienerrechnung	ja/nein	nein												
<b>Kollektorfeld 1</b>	<b>Reihe Nr.</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Kollektoreber. Anz. Parall. Stränge	-	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kollektortyp	-	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M	Gross M
Reihenanschlusssystem: Länge Vorlauf	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Röhrendimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Feldleitung: Reihenabstand	m	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Röhrendimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4	139.7 x 4
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
		Z-Öp Kollektorfeld 1				31.5 V Koll.feld 1				50400										
		kPa				l/h														

Abbildung 52 Kollektorfeld mit 280 Grosskollektoren. Resultate bei Betriebsbedingungen, mit Berücksichtigung der T-Stücke.

Abbildung 53 zeigt die entsprechende Strömungsverteilung. Hier ist die Abweichung von der symmetrischen Durchströmung einigermaßen gut zu erkennen.

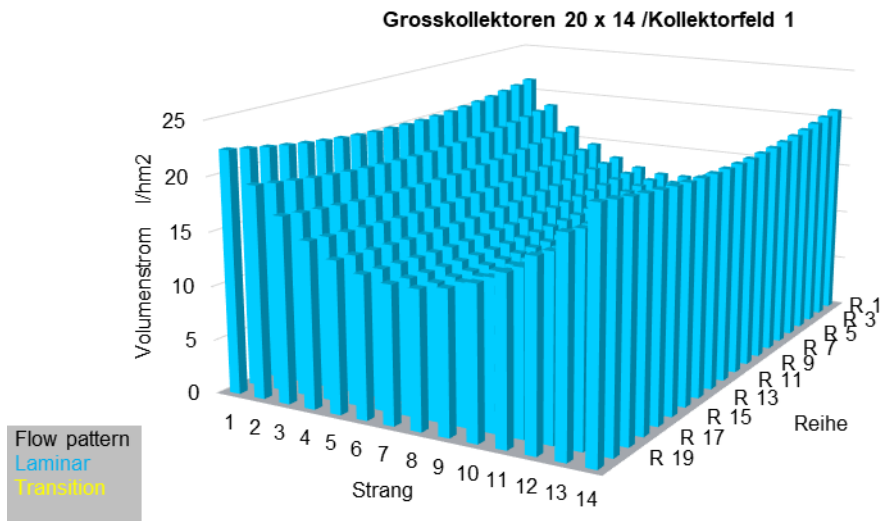


Abbildung 53 Strömungsverteilung bei nicht abgestuften Feldleitungen, bei Betriebsbedingungen, mit Berücksichtigung der T-Verbindungen.

Hingegen kann die Abweichung von der symmetrischen Strömungsverteilung anhand der mittleren Austrittstemperaturen der Absorberrohre sichtbar gemacht werden, wie in Abbildung 54 gezeigt.

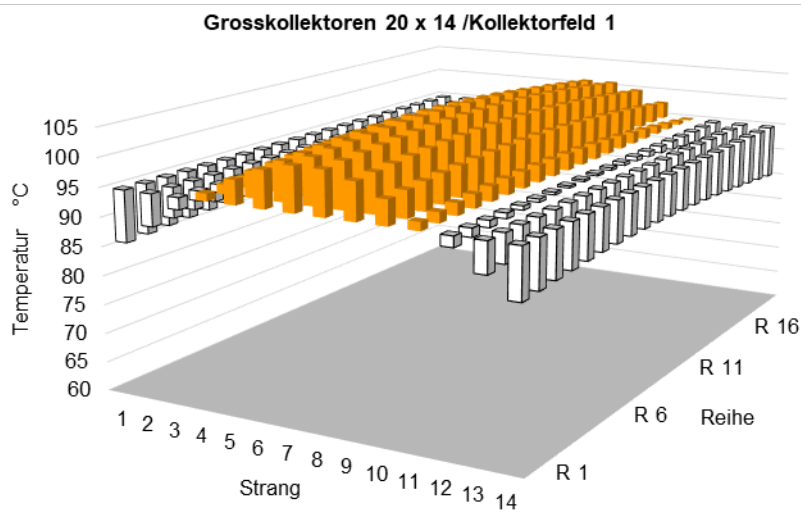


Abbildung 54 Austrittstemperaturen der Absorberrohre, gemittelt über jeweils ein Kollektormodul.

Noch besser sieht man die Inhomogenität anhand der Mischtemperaturen der Sammelleitungen in der Abbildung 55.

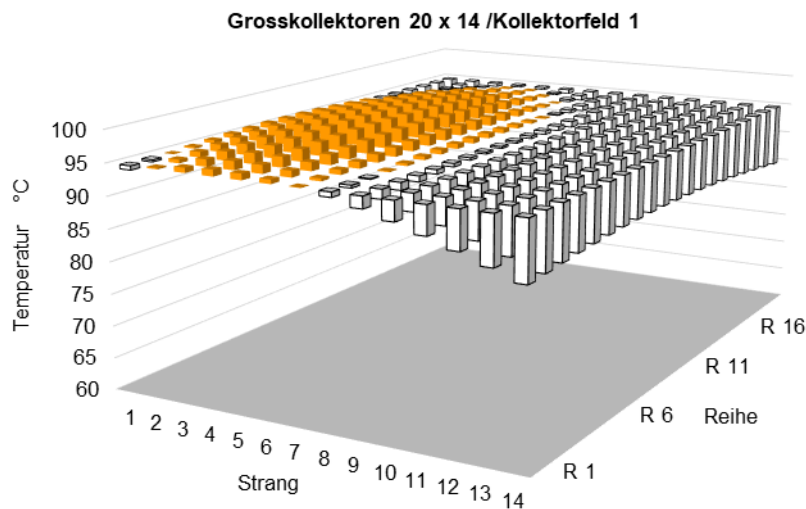


Abbildung 55 Mischtemperaturen der Sammelleitungen.

### 3.8 Grosskollektor mit Harfenabsorber

Abbildung 56 zeigt den Harfenabsorber eines Grosskollektors. 24 Absorberrohre mit einem Innendurchmesser von 7 mm sind über Verteil- und Sammelleitungen mit 33 mm Innendurchmesser parallelgeschaltet. Der Achsabstand der Absorberrohre beträgt 100 mm. Die Absorberrohre haben eine Länge von 5 m. Mehrere Kollektoren können über gebogene Welschläuche mit 40 mm Innendurchmesser parallel geschaltet werden. Die Welschlauchbogen werden an den oberen Enden der Verteil- und Sammelleitungen angeschlossen. Die Absorber werden folglich in C-Konfiguration durchströmt. Aus Herstellerangaben und/oder Modellrechnungen sei bekannt, dass der Druckverlust eines Welschlauchbogens dem Druckverlust eines Welschlauches von 0.8 m Länge entspricht.

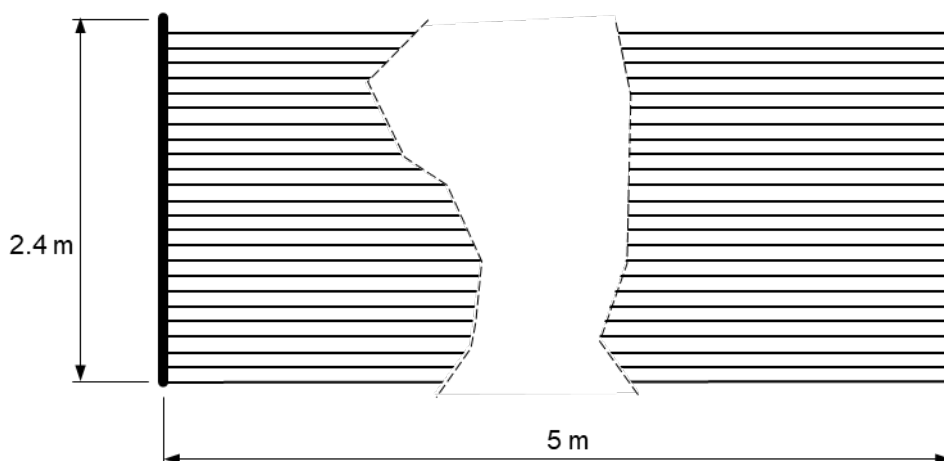


Abbildung 56 Grosskollektor mit Harfenabsorber.

Falls keine Messdaten für den Druckverlust vorhanden sind, kann ein realistisches Modell durch Vergleichsrechnungen entwickelt werden.

1. Zunächst modelliert man einen Absorberstreifen als den **Teilkollektor** «Teil H», mit 0.5 m<sup>2</sup> Absorberfläche sowie Verteil- und Sammelleitung von 0.1 m Länge. Ausserdem modelliert man den **Grosskollektor** «Gross H», bestehend aus 24 parallelen Absorberrohren und einer Sammelleitung mit einer Länge von 2.4 m.
2. Anschliessend werden zwei Kollektorfelder mit diesen Kollektoren modelliert. Das Kollektorfeld 1 besteht aus einer Kollektorreihe mit 24 Teilkollektoren «Teil H», die in C-Konfiguration angeschlossen sind. Das Kollektorfeld 2 besteht aus einem Grosskollektor «Gross H». Die beiden Teilfelder werden parallelgeschaltet, wobei der Druckverlust der T-Verzweigung nicht berücksichtigt wird.
3. Das Modell soll für einen spezifischen Durchfluss von 20 l/hm<sup>2</sup> bei einer Serienschaltung von 10 Kollektoren optimiert werden, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup>, einer Rücklauftemperatur von 60 °C und einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Nachdem man die gewünschten Randbedingungen eingestellt hat, führt man eine Rechnung durch. Der Volumenstrom im Teilfeld 1 wird grösser sein als im Teilfeld 2, weil im Teilfeld 1 der Gesamtmassenstrom nur durch je 0.1 m Verteil- und Sammelleitung strömt. Im Teilfeld 2 durchströmt der Gesamtmassenstrom eines Grosskollektors die gesamte Länge von 2.4 m.
4. Nun passt man den Durchmesser der Sammelleitung des Grosskollektors so lange an, bis beide Volumenströme gleich sind. In diesem Beispiel stimmen die Volumenströme bei einer äquivalenten Länge von 1.05 m überein.
5. Anschliessend wird das Absorbermodell «Gross H» um den Kollektoranschluss ergänzt (gerades Stück Wellenschlauch, äquivalent zum Wellenschlauchbogen) und als «Gross H+A» abgebildet.
6. Falls später gemessene Druckverluste verfügbar sind, kann die Länge des Absorberrohres optimiert werden. Es genügt dann, im Teilfeld 1 einen einzigen Grosskollektor zu modellieren. Die Randbedingungen werden entsprechend der Prüfbedingungen eingestellt. Danach wird die Rechnung durchgeführt und der berechnete mit dem gemessenen Druckverlust verglichen. Die Länge des Absorberrohres wird so lange angepasst, bis beide Werte hinreichend gut übereinstimmen.

Tabelle 13 zeigt einen Ausschnitt des Tabellenblattes «Absorbermodelle» mit den Modellen «Gross H» und «Teil H». Die Modelle beschränken sich auf den Absorber allein, ohne Wellenschlauchbogen.

Tabelle 13 Modellparameter für Grosskollektor mit Harfenabsorber.

Kollektortypen		Absorber				Verteil- und Sammelleitungen			Kollektorverbinder		Wirkungsgradparameter			
Kollektortyp	Kollektorfläche	Absorberrohrlänge äquivalent	hydr. Durchmesser Absorberrohr	hydr. Durchmesser Absorberanschluss	Anz. Parallele Absorberrohre	Länge	hydr. Durchmesser	Typ Verzweigung	Länge Balg / Wellrohr	hydr. Durchmesser Balg / Wellrohr	Absorbervolumen nach Datenblatt	eta0	a1	a2
	m <sup>2</sup>		m	m		m	m		m	m		-	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
Teil H	0.5	5	0.007	0.007	1	0.1	0.033	scharfkantig	0	0.033	0.5	0.800	3.6	0.01
Gross H	12	5	0.007	0.007	24	1.05	0.033	scharfkantig	0	0.033	12.0	0.800	3.6	0.01
Gross H+A	12	5	0.007	0.007	24	1.05	0.033	scharfkantig	0.8	0.04	12.0	0.800	3.6	0.01

Mit den Modellen «Teil H» und «Gross H» werden im Tabellenblatt «Anlagendaten» zwei Kollektorfelder gemäss Abbildung 57 modelliert. Der spezifische Durchfluss muss 200 l/hm<sup>2</sup> betragen, damit sich bei 10 seriell geschalteten Kollektoren unter denselben Bedingungen ein spezifischer Durchfluss von 20 l/hm<sup>2</sup> ergibt.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände					
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	25	Thermische Leistung	kW	15.2			
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	24	" homog. Durchström.	kW	15.2			
Rücklauftemperatur	°C	60	Vorlauftemperatur	°C	63	Inhomog. Volumenstrom	%	1			
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocon LS 45%	Vol. mit Feldverrohrung	l	0	Einfluss auf Leistung	%	0.00			
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	200.0	Vol. Feldverrohrung	l	0	Max. Fließgeschw.	m/s	0.8			
<b>Kollektorfeld 1</b>	Reihe Nr.		2	3	4	5	6	7	8	9	
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	24									
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1									
Kollektortyp	-	Teil H									
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5									
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C									
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	Δp Kollektorfeld 1	kPa	9.2	∇ Koll.feld 1	l/h	2400			
<b>Kollektorfeld 2</b>	Reihe Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	1									
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1									
Kollektortyp	-	Gross H									
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5									
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C									
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	Δp Kollektorfeld 2	kPa	9.2	∇ Koll.feld 2	l/h	2400			
<b>Schaltung</b> parallel / seriell	Typ	T unberückt	Δp Kollektorfeld	kPa	9.2	∇ Kollektorfeld	l/h	4800			

Abbildung 57 Äquivalente Modellierung von Kollektorfeldern mit Teilkollektoren und Grosskollektoren.

Mit dem Modell «Gross H+A» kann beispielsweise ein Kollektorfeld nach Abbildung 58 modelliert werden. Dieses besteht aus 10 Reihen. Jede Reihe besteht aus einem einzigen Strang mit 10 in Serie geschalteten Kollektoren des Typs «Gross H+A». Das Kollektorfeld ist in C-Konfiguration angeschlossen. Die Querschnitte der Feldleitungen wurden so gewählt, dass die Fließgeschwindigkeit zwischen 0.5 und 1 m/s liegt. Die Kollektorfläche beträgt 1200 m<sup>2</sup>. Bei einem spezifischen Durchfluss von 20 l/hm<sup>2</sup> entsteht ein Druckverlust von 80.2 kPa.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände				Stoffdaten	
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	100	Thermische Leistung	kW	694.3	Dichte	694.3	
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	1200	" homog. Durchström.	kW	694.3	Viskosität	2	
Rücklauftemperatur	°C	60	Vorlauftemperatur	°C	87	Inhomog. Volumenstrom	%	0.00	Rauigkeit Ob	0.9	
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocon LS 45%	Vol. mit Feldverrohrung	l	1	Einfluss auf Leistung	%	0.00	Diagramme f		
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	20.0	Vol. Feldverrohrung	l	0	Max. Fließgeschw.	m/s	0.9	Serierechnung		
<b>Kollektorfeld 1</b>	Reihe Nr.		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Kollektortyp	-	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A	Gross H+A
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5	35 x 1.5
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	114.3 x 3.6	114.3 x 3.6	114.3 x 3.6	88.9 x 2	88.9 x 2	76.1 x 2.9	76.1 x 2.9	64 x 2	54 x 2	35 x 1.5
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	Δp Kollektorfeld 1	kPa	80.2	∇ Koll.feld 1	l/h	24000			

Abbildung 58 Kollektorfeld mit 10 Reihen und je 10 in Serie geschalteten Kollektoren des Typs «Gross H+A».

Abbildung 59 zeigt die Strömungsverteilung über die 10 Reihen. Diese ist aufgrund des grossen Druckverlustes der einzelnen Stränge praktisch homogen.

### Grosskollektoren 10 x 10 /Kollektorfeld 1

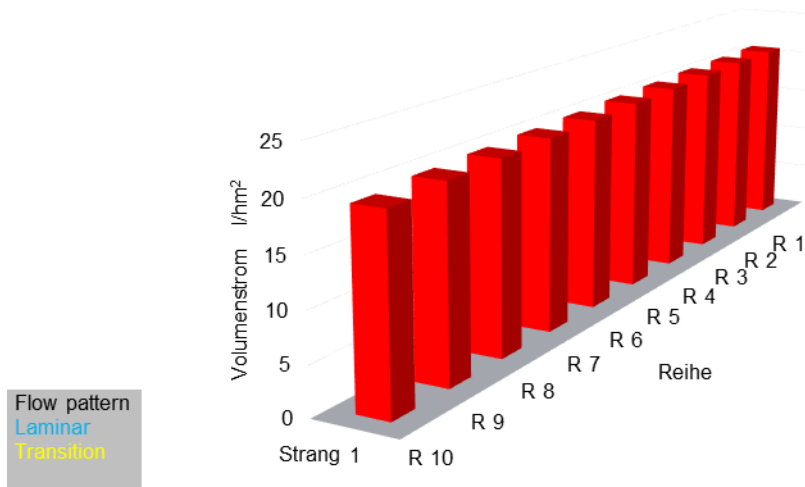


Abbildung 59 Strömungsverteilung über die 10 Reihen.

## 4 Dimensionierung von Drainback-Anlagen mit drucklosem Speicher

Im Rahmen des Forschungsprojektes SimplyDrain2 (Philippen, Eismann et al. 2025) wurde ein Drainback-Anlagenkonzept mit drucklosem Speicher entwickelt, das den Einsatz von Kunststoffleitungen im Solarkreis erlaubt. Um Anlagen dieses Typs dimensionieren zu können, wurde HYDRA im Rahmen dieses Projektes entsprechend erweitert. In den folgenden Abschnitten wird das Vorgehen bei der Dimensionierung anhand eines Beispiels demonstriert. Wo möglich, werden Abbildungen und Textabschnitte aus dem Schlussbericht verwendet. Abbildung 60 zeigt das Schema des Fallbeispiels. Das Kollektorfeld besteht aus 36 Flachkollektoren des Typs Cobra-4° der Firma SOLTOP Energie AG. Je 12 Kollektoren sind in drei Reihen angeordnet und über integrierte Sammelleitungen parallel geschaltet. Die Anlage wird mit Wasser betrieben. Frostsicherheit wird dadurch erreicht, dass sowohl die Reihen als auch die Feldleitungen mit einem Grad Neigung verlegt sind. Aus demselben Grund besitzen auch die Mäanderrohre der Absorber ein Gefälle. Für die Details der zugrundeliegenden Modelle sei auf den Schlussbericht verwiesen.

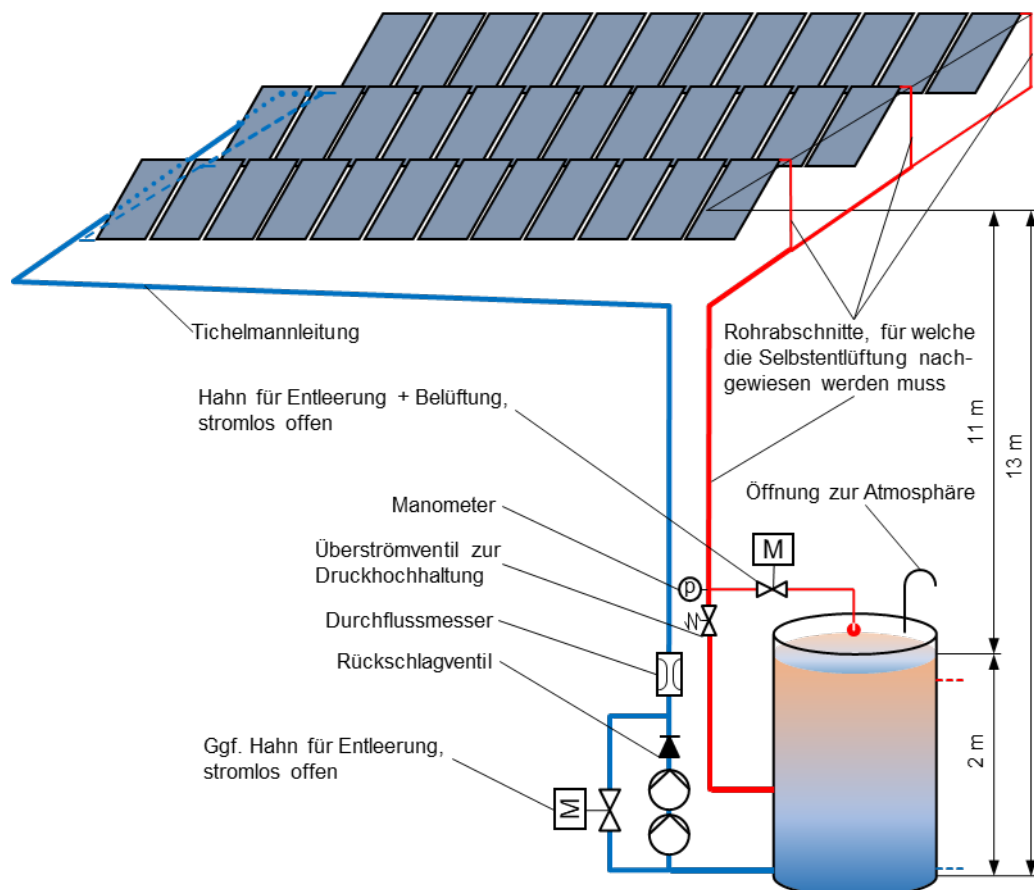


Abbildung 60 Drainback-Anlage mit drucklosem Speicher (Philippen, Eismann et al. 2025).

Der drucklose Speicher dient gleichzeitig als Drainback-Gefäß und besitzt eine Öffnung zur Atmosphäre. Der Druckabfall eines Überströmventils sorgt dafür, dass der Druck am Hochpunkt im Betrieb über dem Atmosphärendruck liegt.

Für die Dimensionierung dieser Anlage müssen folgende Aufgaben nacheinander gelöst werden:

- Bestimmen des minimalen Volumenstroms für sichere Entlüftung
- Bestimmen der Rohrquerschnitte des Solarkreises inklusive Feldverrohrung
- Bestimmen der erforderlichen Druckdifferenz des Überströmventils
- Festlegen des Pumpentyps und ggf. Anzahl seriell geschalteter Pumpen und Nachweis des gewünschten Durchflusses
- Nachweis der Stagnationssicherheit

## 4.1 Dimensionierung mit HYDRA

### 4.1.1 Minimaler Volumenstrom für sichere Entlüftung

Bei der Befüllung des Solarkreises nach Pumpenstart muss sichergestellt sein, dass die Bedingung zur Selbstentlüftung in allen Rohrabschnitten erfüllt ist. Es genügt, diesen Nachweis für nach unten führende Rohre zu erbringen. Hierfür dient das Tabellenblatt «Drainback» nach Abbildung 61. Nach der Eingabe der Temperatur werden die Stoffdaten und die mit diesen gebildete Morton-Zahl berechnet. Durch die Wahl einer eher tiefen Temperatur von 20 °C liegt man auf der sicheren Seite. Die Angabe des Kollektortyps dient nur der Dokumentation. Die Kollektorfläche von 2.435 m<sup>2</sup> wird manuell eingetragen. Nachdem die Anzahl Kollektoren pro Reihe und die Anzahl gleichartiger Reihen eingegeben wurden erscheinen die zugehörigen Kollektorflächen. Anschliessend wird die Dimension der Reihenanschlussleitung gewählt, im Beispiel 22 x 1 mm. Diese verläuft bei Kollektorfeldern auf Flachdächern meist vertikal nach unten, bei Kollektorfeldern auf Schrägdächern hingegen entlang der Dachneigung. Für diese Situationen wird die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit berechnet, ab der Luftansammlungen durch Strömungskräfte abtransportiert werden. Schliesslich wird der erforderliche, flächenspezifische Volumenstrom berechnet.

Vorbereitende Rechnungen zur Dimensionierung von Drainback-Anlagen			
Minimal erforderlicher Volumenstrom zur Entlüftung der Reihenanschlussleitung			
Temperatur	°C	20	
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	998	
Viskosität	m <sup>2</sup> /s	1.04E-06	
Oberflächenspannung	N/m <sup>2</sup>	0.072	
Morton-Zahl	-	3.05E-11	
Kollektortyp	-	Cobra 4°	
Kollektorfläche	m <sup>2</sup>	2.435	
Anzahl Reihen pro Kollektor	-	12	
Anzahl gleichartige Reihen	-	3	
Kollektorfläche pro Reihe	m <sup>2</sup>	29.22	
Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	87.66	
Dimension der Reihenanschlussleitung	Name	22 x 1	
Innendurchmesser	mm	20	
Rohrquerschnitt	m <sup>2</sup>	3.14E-04	
Neigungswinkel	Grad	90	45
Sicherheit für Selbstentlüftung	m/s	0.1	
Selbstentlüftungsgeschwindigkeit	m/s	0.34	0.47
Erforderlicher Volumenstrom pro Reihe	l/s	0.11	0.15
Erforderlicher Gesamtvolumenstrom	l/s	0.32	0.44
Erforderlicher Gesamtvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h	1.15	1.59
Erforderlicher Gesamtmassenstrom	kg/s	0.32	0.44
Erforderlicher flächenspezifischer Volumenstrom	l/hm <sup>2</sup>	13.1	18.1

Abbildung 61 Tabellenblatt «Drainback» zur Bestimmung des erforderlichen Volumenstroms.

In diesem Beispiel ist der spezifische Durchfluss von 13.1 l/hm<sup>2</sup> massgebend. Dieser Wert wird als vorgegebener Durchfluss im Tabellenblatt «Anlagendaten» eingetragen, zusammen mit den Betriebsbedingungen bei der Befüllung. Anschliessend wird das Kollektorfeld modelliert (Abbildung 62).

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes					
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	0	Anz. Koll. total	-		36	
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>		88	
Rücklaufstemperatur	°C	20	Vorlaufstemperatur	°C		20	
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Wasser	Vol. mit Feldverrohrung	l		0	
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	13.1	Vol. Feldverrohrung	l		0	
Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5
<b>Kollektorreihe:</b> Anz. Parall. Stränge	-	12	12	12			
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1			
Kollektortyp	-	Cobra 4°	Cobra 4°	Cobra 4°			
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	1.5	1.5	1.5			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	22 x 1	22 x 1	22 x 1			
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	3	3	3			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z			
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0	5	5			
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	42 x 1.5	35 x 1.5	28 x 1.5			
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z					
<b>Z Δp Kollektorfeld 1</b>						kPa	<b>4.0</b>

Abbildung 62 Tabellenblatt «Anlagendaten»: Kollektorfeld und Betriebsbedingungen beim Befüllen.

Für den Kreislauf wurden nach Abbildung 63 Kunststoffleitungen der Nennweite 40 mm gewählt. Die Durchmesser wurden so bestimmt, dass die Fliessgeschwindigkeiten über der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit und unter 1 m/s liegen. Ausführen der Berechnung liefert die Druckverluste der einzelnen Abschnitte.

Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpe		Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte			
<b>Feldanschluss:</b> Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	3.0	Δp Feldanschluss	kPa	<b>0.4</b>
Rohrdimension	mm	P 40	Anz. Winkel	-	4
<b>Steigzone:</b> Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	11.0	Δp Steigzone	kPa	<b>0.8</b>
Rohrdimension	mm	P 40	Anz. Winkel	-	4
<b>Technikraum:</b> Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	2	Δp Kellerverrohr.	kPa	<b>0.4</b>
Rohrdimension	mm	P 40	Anz. Winkel	-	4
<b>Armaturengruppe:</b> Typ oder Rohrdimension	Typ	DBS DN40	Δp Armaturengruppe	kPa	<b>2.1</b>

Abbildung 63 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten»: Kreislauf ohne Pumpe.

#### 4.1.2 Erforderlicher Öffnungsdruck des Überströmventils und erforderlicher Pumpendruck

Bei der Befüllung sind die Druckverluste der Rücklaufleitungen und des Kollektorfeldes massgebend. Diese werden automatisch in die entsprechenden Bereiche des Tabellenblattes «Drain-back» eingetragen. Bei der Berechnung des Öffnungsdruckes ist entweder der Überdruck gegenüber dem Atmosphärendruck oder der Dampfdruck massgebend. Der Dampfdruck wird anhand der maximalen Austrittstemperatur der Kollektoren berechnet. Der Atmosphärendruck wird als Funktion der Anlagenhöhe über Meer berechnet. Ausserdem müssen noch der Sicherheitszuschlag für den Überdruck und die Höhendifferenz zwischen dem Wasserspiegel im Speicher und dem Hochpunkt eingetragen werden.

Die Rechnung liefert den erforderlichen Öffnungsdruck des Überströmventils von 128 kPa. Dieser Wert muss manuell als Höhe der entsprechenden Wassersäule von 13 m in das Tabellenblatt «Anlagendaten» eingetragen werden.

Erforderlicher Öffnungsdruck des Überströmventils						
Maximale Austrittstemperatur der Kollektoren	°C	95	$p_v$	kPa		83
Anlagenhöhe über Meer	m	430	$p_{Atm}$	kPa		96
Höhendifferenz Wasserniveau im Speicher - Hochpunkt	m	11				
Sicherheitszuschlag für den Überdruck am Hochpunkt	kPa	20				
Erforderlicher Öffnungsdruck des Überströmventils	kPa	<b>128</b>				
Entspricht einer Wassersäule von	m	13.0				
Erforderlicher Pumpendruck bei der Befüllung (Erf. Flächenspezifischer Volumenstrom in "Anlagendaten" vorgegeben)						
Druckverlust der Vorlaufleitung (mit Hydra berechnet)	kPa	2.9				
Druckverlust des Kollektorfeldes (mit Hydra berechnet)	kPa	4.0				
Gesamter Strömungsdruckverlust beim Befüllen	kPa	6.9				
Erforderlicher Pumpendruck	kPa	<b>242</b>				

Abbildung 64 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Drainback»: erforderlicher Öffnungsdruck des Überströmventils und erforderlicher Pumpendruck.

Ausserdem wird der erforderlichen Pumpendruck 242 kPa beim Minimaldurchfluss 1148 l/h bei der Befüllung berechnet. Dieser Betriebspunkt kann beispielsweise durch Serienschaltung zweier Pumpen des Typs Biral Modula 25-12 RED erreicht werden, deren Kennfeld in Abbildung 65 dargestellt ist. Ebenfalls dargestellt ist die Approximation der Maximal Kennlinie durch ein Polynom zweiten Grades (grün).

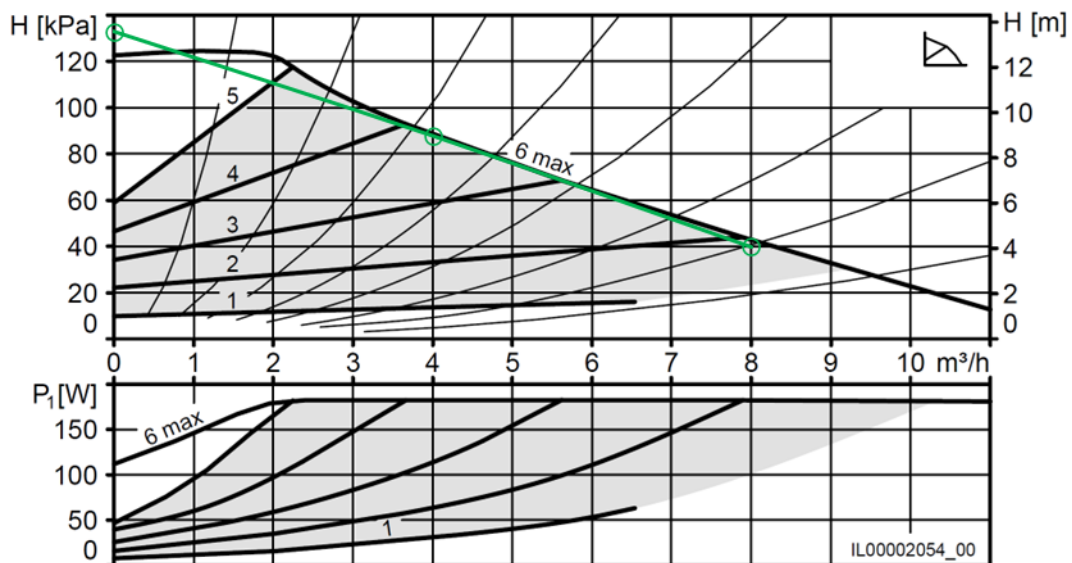


Abbildung 65 Kennfeld der Pumpe Modula 25-12 RED (Quelle: Biral AG)

Diese Pumpe wird im Tabellenblatt «Pumpenmodelle» gemäss Tabelle 14 modelliert. Danach steht sie für die Anlagenmodellierung zur Verfügung.

Tabelle 14 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Pumpenmodelle».

vorgegebener Durchfluss	$p_{0\_min}$ mWs	$p_0$ mWs	$vs_1$ l/h	$p_1$ mWs	$vs_2$ l/h	$p_2$ mWs
Biral PrimAX 25-4 RED		4.8	1200	2.8	2400	1
Biral PrimAX 25-6 RED		7	1000	4.9	3000	1.5
Biral Modula 25-12 RED		13.79	4000	8.99	8000	4.09
Biral Modula 32-6 RED		6	3000	5.35	6000	3.5

### 4.1.3 Betriebspunkt bei Maximal- und Minimaldrehzahl

Zwei in Serie geschaltete Pumpen werden im Tabellenblatt Anlagendaten gemäss ausgewählt, mit einem Drehzahlparameter von 100 %. Die Rechnung liefert einen Gesamtdurchfluss von 4075 l/h bei einem Druckverluste des Feldes von 32.8 kPa. Die Vorlauftemperatur beträgt 72 °C, die thermische Leistung 56 kW.

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände				
Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	W/m <sup>2</sup>	1'000	Anz. Koll. total	-	36	Thermische Leistung	kW	56.0		
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m <sup>2</sup>	88	" homog. Durchström.	kW	56.0		
Rücklauftemperatur	°C	60	Vorlauftemperatur	°C	72	Inhomog. Volumenstrom	%	5		
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Wasser	Vol. mit Feldverrohrung	l	0	Einfluss auf Leistung	%	-0.01		
Spezifischer Durchfluss	l/hm <sup>2</sup>	46.5	Vol. Feldverrohrung	l	0	Max. Fließgeschw.	m/s	1.2		
<b>Kollektorfeld 1</b>	Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Kollektorreihe:</b> Anz. Parall. Stränge	-	12	12	12						
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	1	1	1						
Kollektortyp	-	Cobra 4"	Cobra 4"	Cobra 4"						
<b>Reihenanschlussleitung:</b> Länge Vorlauf	m	1.5	1.5	1.5						
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	22 x 1	22 x 1	22 x 1						
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	3	3	3						
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Z	Z						
<b>Feldleitung:</b> Reihenabstand	m	0	5	5						
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	42 x 1.5	35 x 1.5	28 x 1.5						
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	Z	Δp Kollektorfeld 1	kPa	32.8	∇ Koll.feld 1	l/h	4075		

Abbildung 66 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten»: Betriebspunkt des Kollektorfeldes bei Maximaldrehzahl.

Abbildung 67 zeigt die Anlagen- und Pumpenkennlinie, die sich im Betriebspunkt schneiden, sowie die Druckverluste in den einzelnen Rohrabschnitten. Der Gegendruck des Überströmventils ist geringfügig tiefer, weil der Schweredruck bei 60 °C und nicht bei 20 °C berechnet wurde.

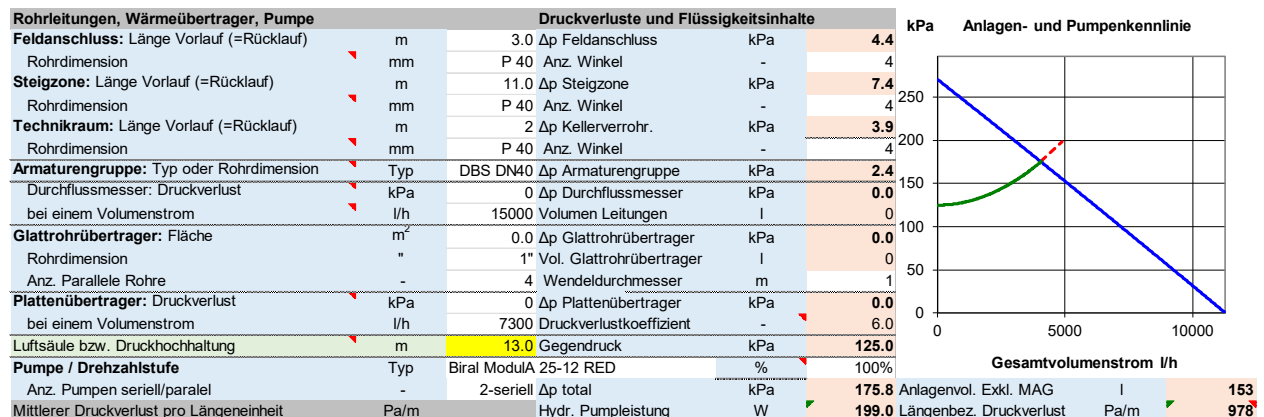


Abbildung 67 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten»: Betriebspunkt des

Abbildung 68 zeigt einen weiteren Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten». Die Höhe des Membranausdehnungsgefäßes (MAG) muss bei Drainback-Anlagen als Referenzhöhe des Wasserspiegels im Drainback-Gefäß interpretiert werden. Die Höhendifferenz zwischen Wasserspiegel und dem Hochpunkt der Sammelleitung in der ersten Kollektorreihe ist 11 m, wie im Fallbeispiel definiert. Der Betriebsüberdruck ist null, weil über dem Wasserspiegel Atmosphärendruck herrscht. Könnte das Wasser weder abfließen noch verdampfen, so würde sich nach dem Ausschalten der Pumpe ein Druck von -1.06 bar einstellen. Der Druck am Hochpunkt ist nicht 20 kPa bzw. 0.2 bar, wie gefordert, sondern um den Druckabfall in den vorlaufseitigen Rohrleitungen von 0.15 bar höher. Aufgerundet erhält man einen Wert von 0.35 bar.

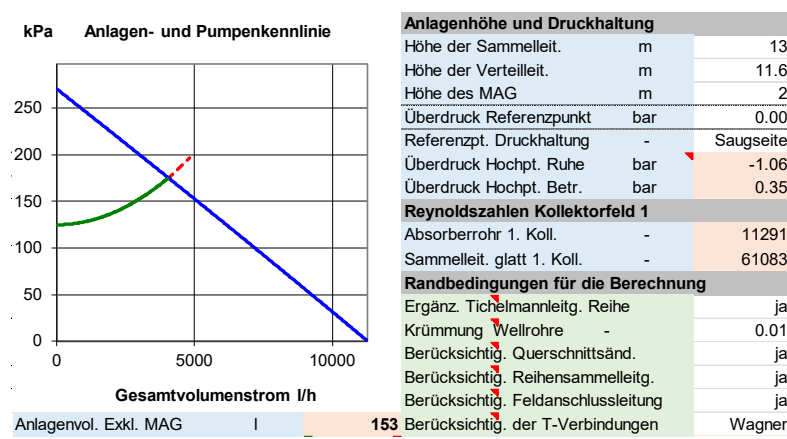


Abbildung 68 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt «Anlagendaten» in HYDRA: Anlagenhöhe und Betriebsdruck.

### 4.1.4 Strömungs- Temperatur- und Druckverteilung

Abbildung 69 zeigt die Strömungsverteilung im Kollektorfeld. Die Strömung in den Absorberrohren ist turbulent, weil Wasser eine viel kleinere Viskosität als Wasser-Glykol Gemische.

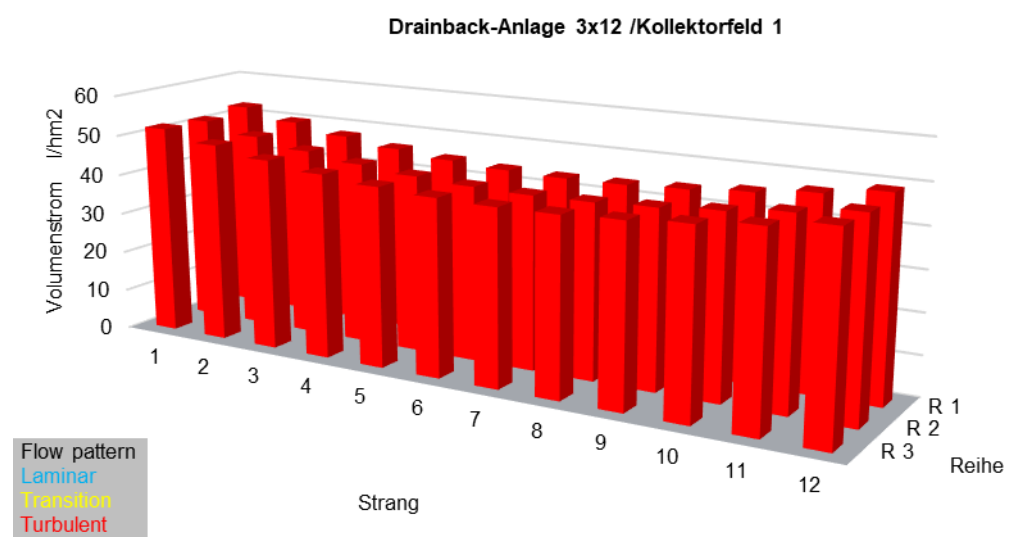


Abbildung 69 Strömungsverteilung im Kollektorfeld.

Abbildung 70 zeigt die Austrittstemperatur der Sammelleitungen.

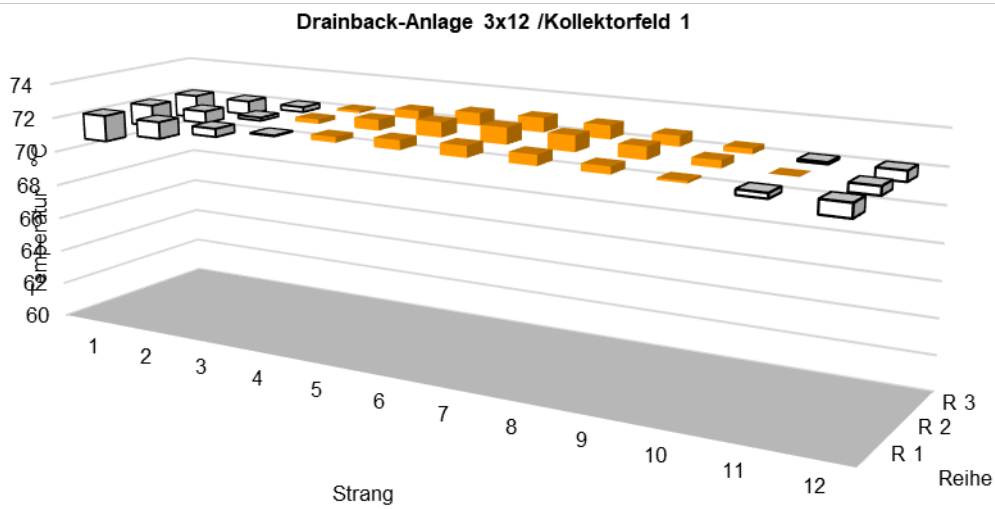


Abbildung 70 Austrittstemperaturen der Absorber.

In der Abbildung 71 sind die Mischtemperaturen der Sammelleitungen dargestellt.

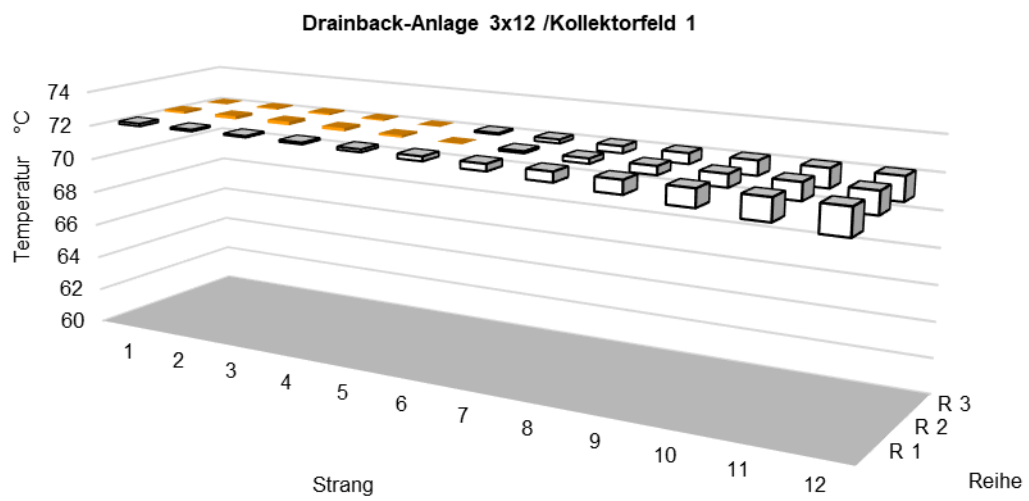


Abbildung 71 Mischtemperaturen der Sammelleitungen.

Abbildung 72 zeigt die Druckverteilung in den Verteil- und Sammelleitungen im Betrieb.

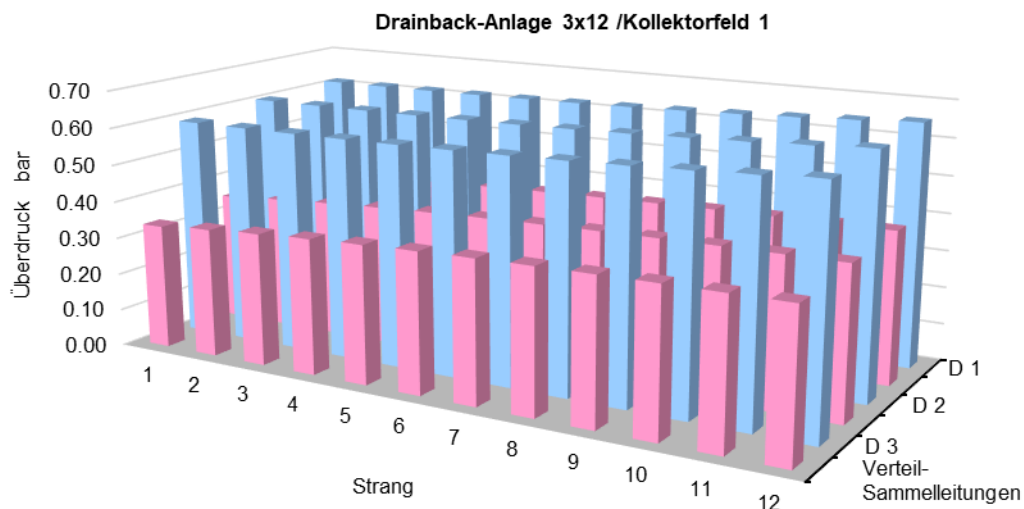


Abbildung 72 Druckverteilung im Kollektorfeld.

#### 4.1.5 Nachweis der Stagnationssicherheit

Stagnationssicherheit muss nicht nur bei druckbefüllten Anlagen nachgewiesen werden, sondern auch bei Drainback-Anlagen. Aus zwei Gründen produzieren auch Kollektoren von Drainback-Anlagen Dampf: Erstens sind die Innenflächen (Größenordnung 1 m<sup>2</sup> pro Absorber) nach der Entleerung benetzt. Zweitens dauert die Entleerung viel länger als das Aufheizen auf Siedetemperatur. Die Absorber enthalten daher eine Restmenge Wasser, die verdampft und im Leitungssystem des Kreislaufes vollständig kondensieren muss. Bei geschlossenen Drainback-Anlagen ist das Volumen der Gasphase durch das Volumen des Kreislaufes und des Flüssigkeit gegeben. Daher steigen Druck und Sättigungstemperatur bei der Verdampfung entsprechend an und nehmen durch Kondensation des Dampfes an den Rohrwänden wieder ab. Bei Drainback-Anlagen mit drucklosem Speicher geschieht die Verdampfung praktisch bei Atmosphärendruck. Das Dampfvolumen ist nur durch die Restmenge Wasser bestimmt, das durch Verdampfen aus den Absorbern in die Rohrleitungen strömt. Dieser Dampf muss vollständig innerhalb des Kreislaufes kondensieren und darf nicht über die Belüftungsöffnung des Speichers entweichen. Ein Teil der Kondensationsenthalpie, die bei der Kondensation frei wird, heizt die Rohrwände von ihrer Anfangstemperatur auf die Sättigungstemperatur auf. Der Rest muss durch Wärmeverluste an die Umgebung abgeführt werden. Ob der modellierte Kreislauf dazu in der Lage ist, muss durch Simulation nachgewiesen werden.

Dazu werden im Tabellenblatt «Leitungsverluste» nach Abbildung 73 alle Rohrleitungen zusammenfassend modelliert<sup>1</sup>. Um den Aufwand bei der Dateneingabe zu minimieren, werden die Feldleitungen nicht abgestuft modelliert, sondern mit der grössten Rohrdimension am Anschluss. Dafür werden die Wärmebrücken und die zusätzliche Masse der Fittings nicht berücksichtigt. Bei

<sup>1</sup> Mit entsprechendem Programmieraufwand könnten die erforderlichen Daten aus der Definition des Kollektorfeldes automatisch generiert werden.

der Rohrlänge muss die Summe der Vor- und Rücklaufleitungen eingegeben werden. Die Reihenanschlussleitungen sind  $2 \times 3 \times 1.5 = 9$  m lang. Die Länge der Feldleitungen ist gleich der zweifachen Länge der Reihenabstände  $2 \times 2 \times 5 = 20$  m, plus die Länge der Tichelmannleitung von 24.2 m. Es wird angenommen, dass nur die vorlaufseitigen Rohre im Technikraum mit einer Länge von 2 m zur Kondensation des Dampfes beitragen.

Die Rohre werden durch Länge, Innen- und Aussendurchmesser sowie Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand charakterisiert. Die Rohrinsulation besteht im Beispiel aus 10 mm Armaflex mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0.042 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Der zylindrische Speicher besteht aus 1.5 mm Edelstahl mit einem Durchmesser von 1.4 m. Das Volumen des Gasraumes beträgt  $0.08 \text{ m}^3$ . Die mittlere Anfangstemperatur der Rohrleitungen beträgt  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Umgebungstemperatur beträgt  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Auf die Modellierung eines Kühlers wurde verzichtet.

Die grau hinterlegten Zellen enthalten Standard- bzw. Erfahrungswerte, die selten angepasst werden müssen.

Wärmekapazität und Verlustleistung der Rohre																											
Kollektorfeld 1	L	d <sub>i</sub>	d <sub>w</sub>	A	V	rho	c	lambda <sub>w</sub>	m	C	T <sub>in</sub>	Q <sub>C</sub>	S <sub>isol</sub>	d <sub>isol</sub>	lambda <sub>isol</sub>	alpha <sub>s</sub>	T <sub>sat</sub>	T <sub>a</sub>	U	Q <sub>U</sub>							
	m	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	J/kgK	W/Km	kg	J/K	°C	J	m	m	W/Km	W/Km <sup>2</sup>	°C	°C	W/K	W							
Reihenanschlussleitungen	9	0.02	0.022	6.60E-05	1.19E-03	7800	500	20	9.3	4631	80	92624	0.010	0.042	0.042	26	100	30	3.3	228							
Feldleitungen	44.2	0.04	0.044	2.64E-04	2.33E-02	7800	500	20	182.0	90977	80	1819547	0.010	0.064	0.042	26	100	30	27.3	1910							
Feldanschlussleitung	6	0.04	0.044	2.64E-04	3.17E-03	7800	500	20	24.7	12350	80	246997	0.010	0.064	0.042	26	100	30	3.7	259							
Steigzone	22	0.04	0.046	4.05E-04	1.78E-02	1100	2500	0.4	19.6	49036	80	980713	0.010	0.066	0.042	26	100	30	13.6	952							
Technikraum	2	0.04	0.046	4.05E-04	1.62E-03	1100	2500	0.4	1.8	4458	80	89156	0.010	0.066	0.042	26	100	30	1.2	87							
Kühler	0	0.04	0.044	2.64E-04	0.00E+00	7800	500	20	0.0	0	30	0	0.000	0.044	0.042	100	100	30	0.0	0							
Total Kreislauf	4.71E-02																										
Drainback-Volumen	A	d	h	s	V						m	C	T <sub>in</sub>	Q <sub>C</sub>	S <sub>isol</sub>	lambda <sub>isol</sub>	alpha <sub>s</sub>	T <sub>sat</sub>	T <sub>a</sub>	U	Q <sub>U</sub>						
	m <sup>2</sup>	m	m	m	m <sup>3</sup>						kg	J/K	°C	J	m	W/Km	W/Km <sup>2</sup>	°C	°C	W/K	W						
Wand	1.77	1.4	0.052	0.002	0.08	7800	500						55.2	27579	80	551587	0.1	0.04	8	100	30	0.71	50				
wirksame Wasserschicht	1.77					0.006	0.010607	971.8	4200						10.31	43295	80	865896									
						Volumen										C											
						m <sup>3</sup>										Q <sub>C</sub>											
						0.127134										J/K											
																J											
Total																232326						4646520					
																					W						
																					3486						

Abbildung 73 Tabellenblatt «Leitungsverluste»: Wärmekapazität und Wärmeverluste der Rohre.

Anschliessend wechselt man auf das Tabellenblatt «Stagnation» nach Abbildung 74. Durch Wahl der Datenbasis «Modell» wird die Dampfleistung zu Beginn und die Verdampfungszeit nach einem Modell berechnet, dessen Parameter für den Kollektortyp Cobra 4° gelten. Für andere Typen müssen die Parameter experimentell bestimmt werden. Das Modell berechnet die Dampfleistung für den Fall, dass das Kollektorfeld aus einer Anzahl identischer Reihen besteht. Durch Betätigen der Schaltfläche «Dampfausbreitung» wird der zeitliche Verlauf des Stagnationsvorganges berechnet.

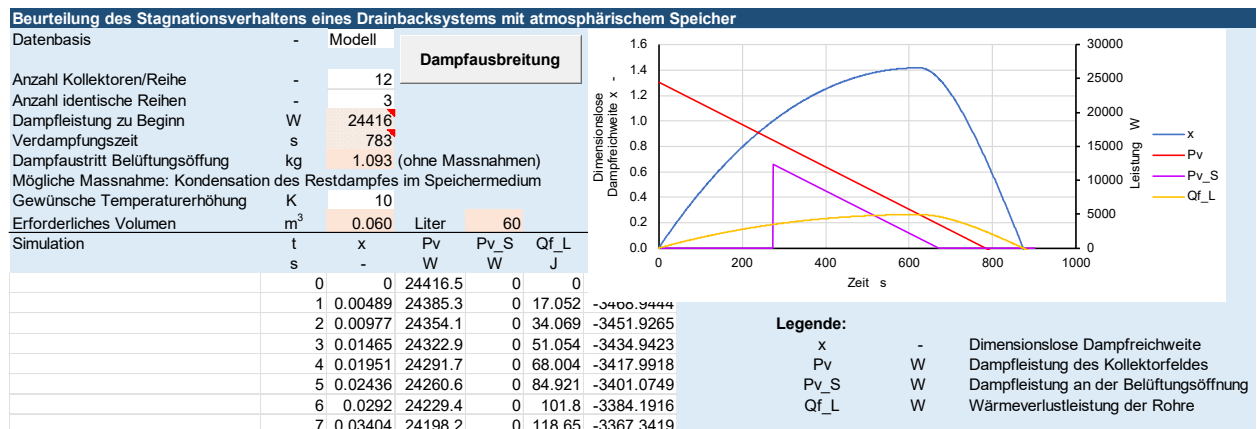


Abbildung 74 Tabellenblatt «Stagnation»: Dampfleistung und dimensionslose Dampfreichweite.

Das Diagramm in der Abbildung 74 zeigt den Verlauf der Dampfleistung des Kollektorfeldes  $P_v$  (rot) und den Verlauf der Leitungsverluste  $Q_{f,L}$  (orange), die dimensionslose Dampfreichweite  $x$  (blau) und die Dampfleistung  $P_{v,S}$  (magenta) an der Belüftungsöffnung des Speichers. Bei einer dimensionslosen Dampfreichweite von  $x = 1$  sind alle Rohrleitungen und der Gasraum des Speichers vollständig mit Dampf gefüllt. Sobald die dimensionslose Dampfreichweite den Wert  $x = 1$  überschreitet, tritt Dampf aus der Belüftungsöffnung des Speichers. Beim Schnittpunkt der Dampfleistung mit den Wärmeverlusten ist das Maximum der dimensionslosen Dampfreichweite  $x = 1.41$  erreicht. Ab diesem Zeitpunkt überwiegen die Wärmeverluste, und die dimensionslose Dampfreichweite nimmt wieder ab.

Aus dem Verlauf der Dampfleistung  $P_{v,S}$  wird die entsprechende Menge Wasser berechnet, die durch den Austritt des Dampfes verloren gehen würde. Im Beispiel wären dies 1.09 kg Wasser. Der Wasserverlust kann verhindert werden, indem der Dampf im Speichermedium kondensiert wird, das sich dabei entsprechend erwärmt. Die Erwärmung kann durch eine gewünschte Temperaturerhöhung vorgegeben werden. HYDRA berechnet das erforderliche Volumen des Speicherbereiches. Im Beispiel wurde eine Erwärmung um 10 K vorgegeben, was in einem Volumen von 60 Litern resultiert. Abbildung 75 zeigt, wie dies erreicht werden kann.

Gemäss Abbildung 74 ist nach knapp 4 Minuten ab Pumpenstopp mit Dampfaustritt zu rechnen. Es scheint daher zweckmässig, nach 2 Minuten ab Pumpenstopp das Drain-Ventil  $V_d$  zu schliessen und das Ventil  $V_c$  zum Kondensator zu öffnen. Der Kondensator besteht aus einer Rohrwendel mit offenem Ende. Die Wendel hat ein monotonen Gefälle. Dadurch kann der eintretende Dampf das Wasser nach unten verdrängen, ohne dass Kondensationsdruckstösse entstehen. Zur Dimensionierung des Kondensators stellt der VDI-Wärmeatlas (VDI 2013) geeignete Korrelationen zur Verfügung.

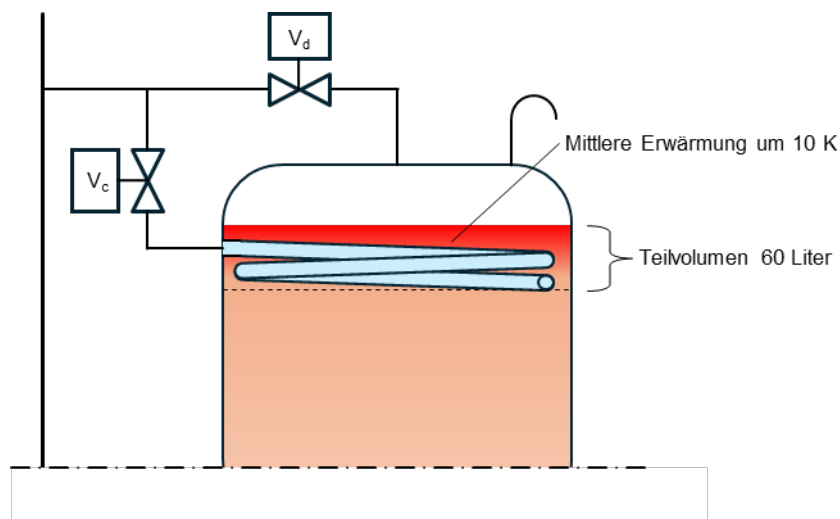


Abbildung 75 Kondensator im Speicher.

## 5 Dank

Die erste Version dieser 2019 publizierten Anleitung entstand im Rahmen des Forschungsprogramms des «Swiss Competence Center of Energy Research, Future Energy Efficient Buildings and Districts» SCCER FEEB&D, mit teilweiser Finanzierung durch Innosuisse. Die Autoren danken Dr. Wieland Hintz von EnergieSchweiz für sein Interesse und die Subventionierung dieser Arbeit, sowie dem Fachverband Swissolar für die Übersetzungen der Anleitung auf Französisch und der Benutzeroberflächen auf Französisch und Italienisch.

Die neue Version dieser Anleitung wurde in eigener Initiative und ohne finanzielle Förderung erarbeitet.

## 6 Literatur

BELIMO, Thermischer Energiezähler - Technisches Datenblatt. Belimo AG, Zugriff 04-11-2025, 2025, von [https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/de-ch/belimo\\_22PE-1U..\\_datasheet\\_de-ch.pdf](https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/de-ch/belimo_22PE-1U.._datasheet_de-ch.pdf).

DIN EN ISO 9806 (2017) Solarenergie - Thermische Solarkollektoren - Prüfverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin

Eismann, R. (2017). Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen : Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung. Springer Vieweg, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07125-7>

Eismann, R. und R. Adams (2018). An Explicit and Continuous Friction Factor Correlation for Helical Tubes with Arbitrary Roughness. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT) **11**: 1-7. <http://dx.doi.org/10.5098/hmt.11.4>

Eismann, R., F. Föllerrund A. Witzig (2017). Programm THD: Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE, Bern.

Idelchik, I. E. (2007). Handbook of hydraulic resistance. Begell House, inc., New York.

Philippen, D., R. Eismann und A. Genkinger (2025). SimplyDrain2 - Einfachste Solarwärmeanlagen mit Drainback-Prinzip als Ergänzung für Warmwassererzeuger in Mehrfamilienhäusern. Bundesamt für Energie BFE, Bern

Tichelmann, A. (1911). Die Bewertung der in Wasserheizungssystemen tätigen Kräfte. Gesundheits-Ingenieur, Zeitschrift fuer die gesamte Staedtehygiene(34): 417-427.

VDI (2013). VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3>

Wagner, W. (2001). Strömung und Druckverlust. Vogel Buchverlag, Würzburg.

Witzenmann (2014). Handbuch der Metallschläuche. Pforzheim, Witzenmann GmbH.

Zanke, U. (1996). Zum Übergang hydraulisch glatt: hydraulisch rauh. Wasser und Boden **48**(10): 32-36.