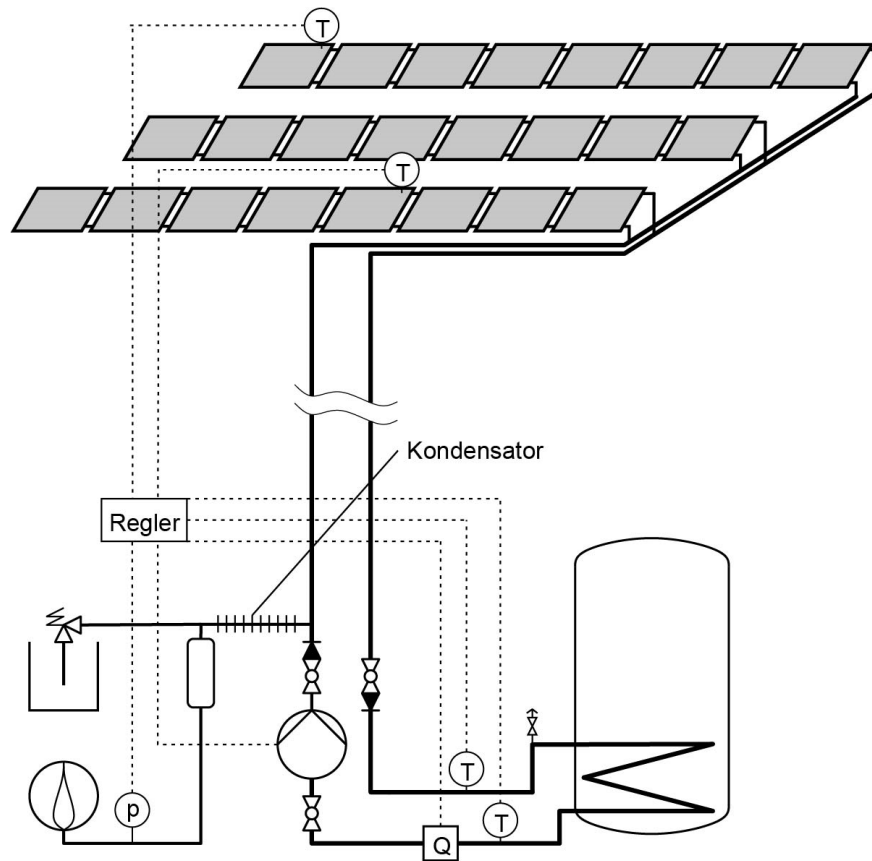


HYDRA – Rohrnetzdimensionierung für Solaranlagen Bedienungsanleitung mit Beispielen



Ralph Eismann, Andreas Genkinger

Muttenz, 30.11.2018

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
1.1	ZIELE DER THERMOHYDRAULISCHEN DIMENSIONIERUNG.....	4
1.2	PLANUNGSABLAUF UND PLANUNGSSOFTWARE.....	4
1.3	HINWEISE ZUR NUTZUNG DER ANLEITUNG	5
1.4	ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR HYDRA	5
1.4.1	<i>Anlagendimensionierung</i>	5
1.4.2	<i>Überprüfung der Betriebssicherheit</i>	6
1.4.3	<i>Analyse von Betriebsstörungen</i>	6
1.4.4	<i>Entwicklung von Kollektoren und Anlagensortimenten</i>	6
1.5	ÜBERBLICK ÜBER DEN LEISTUNGSUMFANG	6
1.5.1	<i>Randbedingungen und Betriebszustände</i>	6
1.5.2	<i>Modellierung von Kollektorfeldern</i>	7
1.5.3	<i>Modellierung des Kreislaufs</i>	7
1.5.4	<i>Druckverlust und Strömungsverteilung</i>	7
1.5.5	<i>Leistung und Temperaturverteilung und Fließgeschwindigkeiten</i>	7
1.5.6	<i>Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten</i>	8
1.6	HAFTUNGSAUSSCHLUSS	8
2	BEDIENUNGSANLEITUNG.....	9
2.1	EINSTELLUNGEN IN EXCEL	9
2.2	ARBEITSBLÄTTER UND FARBCODES	10
2.3	MODELLIEREN DER SOLARANLAGE.....	11
2.4	RANDBEDINGUNGEN FÜR ANLAGENBETRIEB UND RECHNUNG.....	12
2.5	KOLLEKTORFELDER.....	13
2.5.1	<i>Definition von Kollektorreihe und Strang</i>	14
2.5.2	<i>Konfigurationen der Verrohrung</i>	14
2.5.3	<i>Freiheitsgrade bei der Verschaltung</i>	15
2.5.4	<i>Möglichkeiten der Modellierung</i>	16
2.5.5	<i>Integrierte und externe Verteil- und Sammelleitungen</i>	17
2.5.6	<i>C- und Z-Konfiguration bei komplexen Kollektorfeldern</i>	17
2.6	VERBINDUNGSLEITUNGEN, ARMATUREN, WÄRMEÜBERTRAGER UND PUMPE.....	19
2.7	MODELLE	20
2.7.1	<i>Kollektoren</i>	20
2.7.2	<i>Rohrleitungen</i>	23
2.7.3	<i>Armaturengruppen</i>	25
2.7.4	<i>Wärmeübertrager und Durchflussmesser</i>	26
2.7.5	<i>Pumpen</i>	26
3	BEISPIELE ZUR DIMENSIONIERUNG VON SOLARANLAGEN.....	27
3.1	GRUNDSÄTZE	27
3.2	HINWEISE ZUM VORGEHEN	27
3.2.1	<i>Hohe Globalstrahlung und hohe Umgebungstemperatur</i>	27
3.2.2	<i>Normalbetrieb und Standardberechnungen</i>	27
3.2.3	<i>Betrieb bei tiefen Temperaturen</i>	27
3.2.4	<i>Rücklauftemperatur, Stoffdaten und Durchfluss</i>	28
3.3	BEISPIEL: SOLARANLAGE MIT FLACHKOLLEKTOREN	28
3.3.1	<i>Mehrreihiges Kollektorfeld in Z-Z Konfiguration</i>	29
3.3.2	<i>Mehrreihiges Kollektorfeld in C-C Konfiguration</i>	30
3.3.3	<i>Beispiel: Kollektorfeld mit symmetrischer Anbindung</i>	34
3.3.4	<i>Beispiel: Kollektorreihe mit abgestuften Verteil- und Sammelleitungen</i>	34

3.3.5	<i>Beispiel: Grosskollektor mit 5 Teilabsorbieren und integrierten Sammelleitungen</i>	<i>35</i>
4	DANK	37
5	LITERATUR	37

1 Einleitung

1.1 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 selber 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. Man spricht daher besser von «thermohydraulischer Dimensionierung».

Für die effiziente Bewältigung dieser Aufgaben wurden die beiden Programme HYDRA und THD entwickelt. Das Programm HYDRA wurde durch den Autor 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 et al. 2017). Es eignet sich in erster Linie zur Dimensionierung von kleineren Anlagen bis rund 100 m² 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		✓
Nachweis der Entlüftbarkeit		✓

1.2 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). 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.

1.3 Hinweise zur Nutzung der Anleitung

Wer HYDRA zum ersten Mal nutzt, erhält in den Abschnitten 1.3 bis 1.5 einen Einblick über die Anwendungsmöglichkeiten und den Leistungsumfang. Die eigentliche Bedienungsanleitung in Kapitel 2 beginnt auf Seite 9.

HYDRA besteht aus mehreren Arbeitsblättern, von denen im Tagesgeschäft aber nur wenige benutzt werden.

Im Abschnitt 3 ab Seite 27 werden die Möglichkeiten der Modellierung anhand von Beispielen erläutert.

1.4 Anwendungsmöglichkeiten für HYDRA

1.4.1 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, direktdurchströmt
- Vakuumröhrenkollektoren, heat-pipe
- 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 Strangregulierventile zu verzichten und

den hydraulischen Abgleich allein durch die geeignete Wahl der Leitungsdimensionen zu erreichen.

1.4.2 Überprüfung der Betriebssicherheit

Die Rechnung bei verschiedenen extremalen Randbedingungen ermöglicht es, ungünstige Betriebszustände zu erkennen und zu vermeiden. Beispielsweise zu hohe Fließgeschwindigkeiten und zu hohe Austrittstemperaturen.

1.4.3 Analyse von Betriebsstörungen

Der erwartete Durchfluss einer bestehenden Anlage kann mit wenig Aufwand nachgerechnet werden. Dies ist nach der Erfahrung des Autors 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.

1.4.4 Entwicklung von Kollektoren und Anlagensortimenten

Durch die Anwendung von HYDRA, in Kombination mit thermodynamischen Simulationsprogrammen wie Polysun oder T*Sol, 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.

1.5 Überblick über den Leistungsumfang

1.5.1 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 folglich konstante Austrittstemperaturen.
- Die Randbedingung für den 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.

1.5.2 Modellierung von Kollektorfeldern

- Es können maximal zwei hydraulisch unterschiedliche Kollektorfelder modelliert werden. Diese können aus einer unterschiedlichen Anzahl Kollektoren bestehen.
- Die Kollektorfelder können parallel oder in Serie geschaltet sein.

1.5.3 Modellierung des Kreislaufs

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

1.5.4 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 proportional zur vertikalen Ausdehnung dieses Bereiches 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 angegeben.
- 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.

1.5.5 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.

1.5.6 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.

1.6 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 Kollektoren, Pumpen, Armaturengruppen sind als Beispiele zu verstehen. 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 leitet 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. Häufig arbeitet man im Büro mit einem grossen Bildschirm und unterwegs mit dem Laptop. Es kann dann vorkommen, dass sich beim Betätigen der Schaltflächen die Schriftgrösse ändert. Dies lässt sich vermeiden, wenn man vor dem Wechsel die Programme schliesst und sich abmeldet. Passiert es trotzdem, kann man die korrekte Schriftgrösse folgendermassen wiederherstellen: 1) Blattschutz 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.

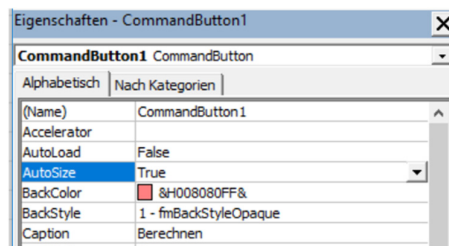


Abbildung 1 Eigenschaften von Schaltflächen

4. Der Programmcode und gewisse Arbeitsblätter sind geschützt. Sollen Änderungen vorgenommen werden, muss der Schutz durch Eingabe des Codes «321» aufgehoben werden.
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 2-1 von Bedeutung. Die restlichen Arbeitsblätter umfassen Modellbibliotheken für Kreislaufkomponenten sowie Tabellen mit Rechenwerten.

Tabelle 2-1 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 _{aus} 1, T _{aus} 2	Darstellung der Austrittstemperaturen der Kollektoren in den Kollektorfeldern 1 und 2
T _{SL} 1, T _{SL} 2	Darstellung der Temperaturen in den Sammelleitungen der Kollektorfelder 1 und 2
Fliessgeschw	Ausgabe der Fliessgeschwindigkeiten an den verschiedenen Stellen des Kreislaufs
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 2-2 gekennzeichnet.

Tabelle 2-2 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 2-3 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.

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

2.3 Modellieren der Solaranlage

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

HYDRA 1812

Anlagendaten

Berechnen

Standard
Einstellung

Datei
erzeugen

n w

Fachhochsch
Hochschule

Objektbezeichnung: Beispiel 1

Betriebsbedingungen		Kenndaten des Kollektorfeldes				Betriebszustände			Stoffdaten bei Rücklauftemperatur					
Globalstrahlung in der Kollektorebene	W/m ²	900	Anz. Koll. total	-	60	Thermische Leistung	kW	75	Dichte	kg/m ³	1012			
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m ²	138	" homog. Durchström.	kW	75	Viskosität	mm ² /s	1.71			
Rücklauftemperatur	°C	55	Vorlauftemperatur	°C	72	Inhomog. Volumenstrom	%	4	Rauigkeit Oberflächen	mm	0.0015			
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfoacor LS 45° Vol. Feld inkl. Verrohrung				192	Einfuss auf Leistung	%	-0.13	Diagramme formatieren	ja/nein	ja		
Spezifischer Durchfluss	l/hm ²	31	Vol. Feldverrohrung	l	36	Max. Fließgeschw.	m/s	1.1	Serienerchnung	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							
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 einseitig / fischelmann	(e,t)	e	e	e	e	e	e							
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 einseitig / fischelmann	(e,t)	e	Druckverlust Koll.feld 1		kPa	34.3	Volumenstr. Koll.feld 1	l/h	4250					
Kollektorfeld 2	Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-													
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-													
Kollektortyp	-													
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m													
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm													
Anzahl Winkel im Vorlauf	-													
Anschluss einseitig / fischelmann	(e,t)													
Feldleitung: Reihenabstand	m													
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm													
Anschluss einseitig / fischelmann	(e,t)		Druckverlust Koll.feld 2		kPa		Volumenstr. Koll.feld 2	l/h	4250	Druckv. inkl. Feldanschluss	kPa	41.2		
Schaltung parallel / seriell	Typ	T unberück Druckv. Feld												
Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte	kPa	34.3												
Anlagen- und Pumpenkennlinie	kPa	Anlagen- und Pumpenkennlinie												
Anlagenhöhe und Betriebsdruck	m	Anlagenhöhe und Betriebsdruck												
Feldanschluss: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	10.0	Druckv. Feldanschluss	kPa	6.9	Höhe der Sammelleit.	m	8						
Rohrdimension	mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	2	Höhe der Verteilleit.	m	8						
Steigzone: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	5.0	Druckv. Steigzone	kPa	3.8	Höhe des MAG	m	1						
Rohrdimension	mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	2	Betriebsüberdruck MAG	bar _ü	1.6						
Kellerverrohrung: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	5	Druckv. Kellerverrohr.	kPa	4.5	Anschluss MAG	-	Druckseite						
Rohrdimension	mm	42 x 1.5	Anz. Winkel	-	4	Statischer Druck Feld	bar _ü	0.9						
Armaturengruppe: Typ oder Rohrdimension	Typ	1 1/2"	Druckv. Pumpengruppe	kPa	2.5	Betriebsdruck Feld	bar _ü	0.5						
Volumenzähler: Druckverlust	kPa	0	Druckv. Volumenzähler	kPa	0.0	Reynoldszahlen Kollektorfeld 1								
bei einem Volumenstrom	l/h	6000	Volumen Leitungen	l	48	Absorberrohr 1. Koll.	-	3243						
Glattrohrtaucher: Fläche	m ²	0.0	Druckv. Glattrohrtaucher.	kPa	0.0	Sammelleit. glatt 1. Koll.	-	13613						
Rohrdimension	"	1"	Vol. Glattrohrtaucher	l	0	Randbedingungen für die Berechnung								
Anz. Parallele Rohre	-	1	Wendeldurchmesser	m	0.8	Ergänz. Tichelmannleitg. Reihe	ja							
Plattentaucher: Druckverlust	kPa	11	Druckv. Plattentaucher	kPa	3.7	Krümmung Weiröhre	-	0.01						
bei einem Volumenstrom	l/h	7300				Berücksichtig. Querschnittsänd.	ja							
Höhe der Luftsäule im Betrieb/Reserve	m	0.0	Gegendruck Luftsäule	kPa	0.0	Berücksichtig. Reihensammelleit.	ja							
Pumpe / Drehzahlstufe	Typ	Biral Modula 40-6 RED				Berücksichtig. Feldanschlussleitung	ja							
Anz. Pumpen seriell/parallel	-	1	Druckverlust total	kPa	55.7	Anlagenvol. Exkl. MAG	l	276						
			Hydr. Pumpleistung	W	65.8	Berücksichtig. der T-Verbindungen	Wagner							

Abbildung 2 Tabellenblatt Anlagendaten

Die gelben Bereiche bezeichnen Daten, welche die Anlage charakterisieren. Die grünen Bereiche beschreiben die Randbedingungen, unter denen die Berechnung durchgeführt wird. Die hellblauen Bereiche bezeichnen Resultate, die in den hellroten Zellen als Rechenwerte dargestellt werden.

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 verunmöglicht. 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 keine Pumpe gewählt wird, kann der spezifische Durchfluss vorgegeben werden («vorgegebener Durchfluss» im Dropdown). Andernfalls wird der berechnete spezifische Durchfluss dargestellt.

HYDRA 1812		Anlagendaten			
Objektbezeichnung: Beispiel 1					
Betriebsbedingungen			Kenndaten des Kollektorfeldes		
Globalstrahlung in der Kollektorebene	W/m2	900	Anz. Koll. total	-	60
Umgebungstemperatur	°C	20	Kollektorfläche total	m2	138
Rücklauftemperatur	°C	55	Vorlauftemperatur	°C	72
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocor LS 45° Vol. Feld inkl. Verrohrung		l	192
Spezifischer Durchfluss	l/hm2	31	Vol. Feldverrohrung	l	36

Abbildung 3 Objektbezeichnung und Betriebsbedingungen

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.

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 entsprechenden Eingabefelder mit diesen Randbedingungen überschrieben.

Globalstrahlung in der Kollektorebene	W/m ²	0
Umgebungstemperatur	°C	40
Rücklauf­temperatur	°C	40
Wärmeträgermedium	Typ/Konz	Tyfocor L 50%
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. Feldanschlussleitung	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 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 recht hoch. Vergrößern der Dimension schafft Abhilfe.
- Im Kreislauf ausserhalb der Kollektoren sollten Fließgeschwindigkeiten von rund 0.5 m/s angestrebt werden. Bei deutlich tieferen Fließgeschwindigkeiten ist keine Entlüftung durch Spülen möglich.
- Pumpe passend wählen, nicht überdimensionieren.

Es ist sinnvoll, die berechneten Daten zu einem Objekt als Datei zu archivieren oder 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, die dann unter dem gewünschten Namen im gewünschten Verzeichnis gespeichert werden kann. Die neue Datei enthält keinen Programmcode. Man erkennt sie daran, dass die drei Schaltflächen nicht vorhanden sind.

Falls HYDRA inklusive Rechencode gespeichert werden soll, legt man am besten einen objekt-spezifischen Ordner und speichert HYDRA mit unverändertem Namen 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 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 Verteil- und Sammelleitungen parallelgeschaltet.

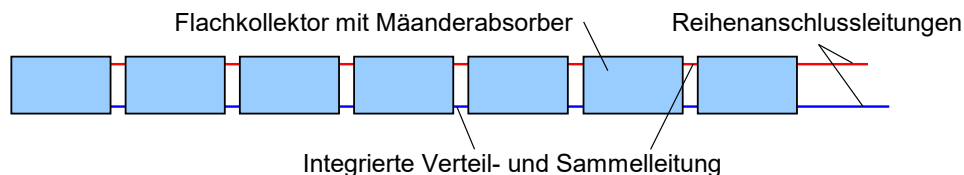


Abbildung 6 Kollektorreihe bestehend aus Flachkollektoren mit integrierten Sammelleitungen

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.

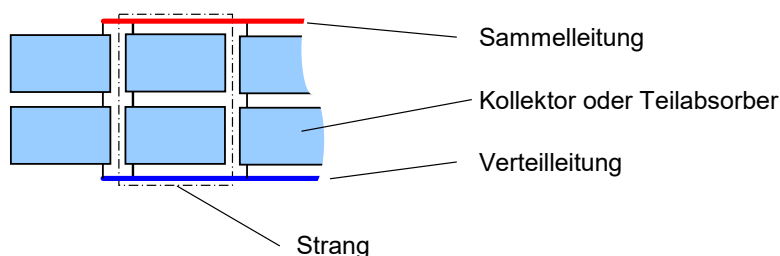


Abbildung 7 Kollektorreihe, bestehend aus mehreren parallel geschalteten Strängen

In einigen Fällen verzichtet man auf eine Abstufung der Leitungsquerschnitte und rechnet mit den Verteil- und Sammelleitungen, die dem Absorbermodell zugeordnet sind. Im Abschnitt 3.3.4 wird gezeigt, wie Verteil- und Sammelleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern modelliert werden können.

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 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.

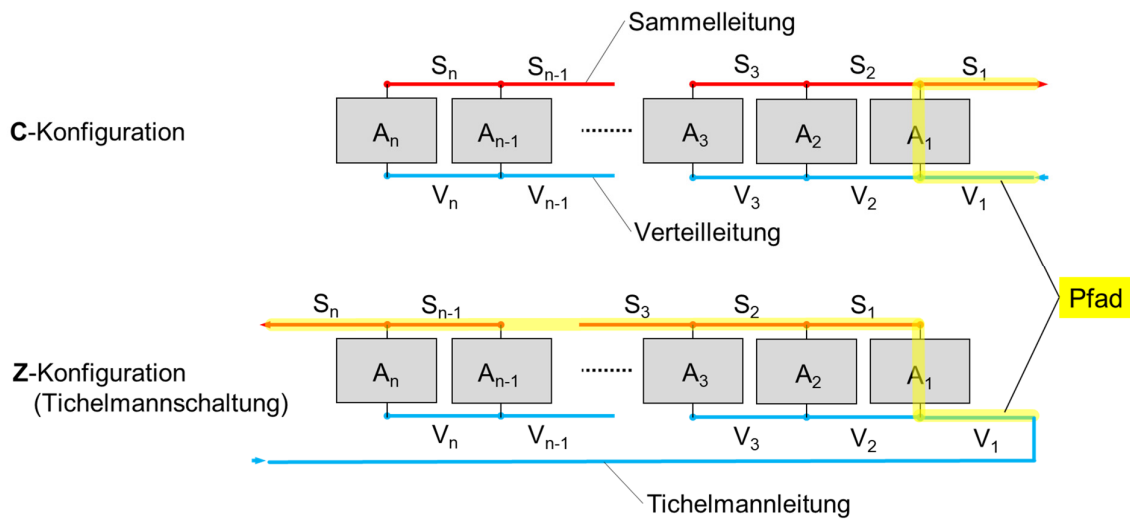


Abbildung 8 Anschlussmöglichkeiten von Kollektorreihen mit parallel geschalteten Kollektoren

2.5.3 Freiheitsgrade bei der Verschaltung

Nicht durchströmte «tote» Sammelleitungen können nicht gespült und somit nicht hinreichend entlüftet werden. Daher sollte man nicht durchströmte Leitungen möglichst vermeiden. Dies ist für die Entlüftung wichtig. Nicht durchströmte Leitungen werden aber auch nur schlecht gekühlt und können partielle Stagnation verursachen. Bei modernen Flachkollektoren mit integrierten Sammelleitungen ist dies besonders wichtig, weil die Verteil- und Sammelleitungen mit dem Absorber verbunden sind, beispielsweise durch Laser- oder Ultraschallschweißen. Ob eine Kollektorreihen in der C- oder Z-Konfiguration angeschlossen werden muss, ist daher nach Abbildung 9 bereits durch das Kollektorfabrikat festgelegt.

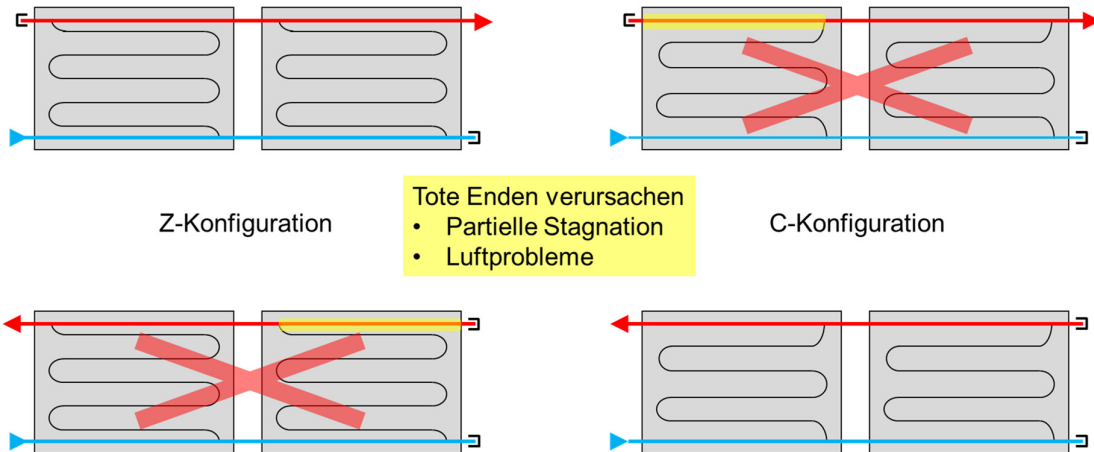


Abbildung 9 Die Verschaltungsart ist durch die kollektorinterne Hydraulik festgelegt.

Ansonsten ist man in der Wahl der Rohrführung frei. Anhand der folgenden Beispiele werden die Möglichkeiten der Modellierung diskutiert. Ausserdem werden die Regeln dargestellt, nach denen das Programm arbeitet.

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	32.7	V Koll.feld 1		l/h	4158
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		V Koll.feld 2		l/h	
Schaltung parallel / seriell	Typ		T unberück Δp Kollektorfeld			kPa	32.7	V Kollektorfeld		l/h	4158

Abbildung 10 Kollektorfelder

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 in der Regel 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. Diese weist drei scharfkantige 90° Winkel auf (Zeile «Anzahl Winkel im Vorlauf»).

Alle Kollektorreihen sind in der C-Konfiguration, d.h. einseitig angeschlossen. HYDRA übernimmt die Länge und Dimension der vorlaufseitigen Reihenanschlussleitung für den rücklaufseitigen Reihenanschluss. HYDRA prüft nicht, welche der beiden Anschlussarten zulässig ist. Sowohl bei C- als auch bei Z- Konfiguration werden die Verteil und Sammelleitungen aller Kollektoren berücksichtigt.

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. Für jeden Rohrabschnitt kann die Dimension individu-

ell festgelegt werden. Druckverlust von Winkeln und Bogen kann durch entsprechende Verlängerung des Rohres näherungsweise berücksichtigt werden. Auch hier muss nur die vorlaufseitige Feldleitung definiert werden. Hydra rechnet mit einer identischen rücklaufseitigen Feldleitung. Auch das Kollektorfeld kann in der C- oder Z- Konfiguration angeschlossen werden.

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. Beim Vergleich zweier Konfigurationen, dargestellt durch die Kollektorfelder 1 und 2, soll das T-Stück nicht berücksichtigt werden. Dadurch sind die Druckverluste der Teilfelder voneinander unabhängig.

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.

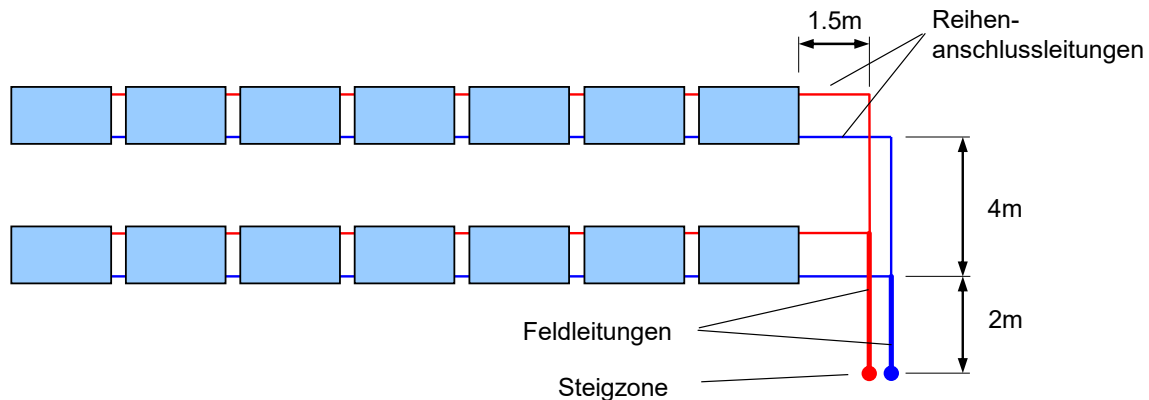


Abbildung 11 Zweireihiges Kollektorfeld mit integrierten Sammelleitungen.

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 Sammelleitungen ausserhalb des Kollektorgehäuses angeordnet sein.

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.

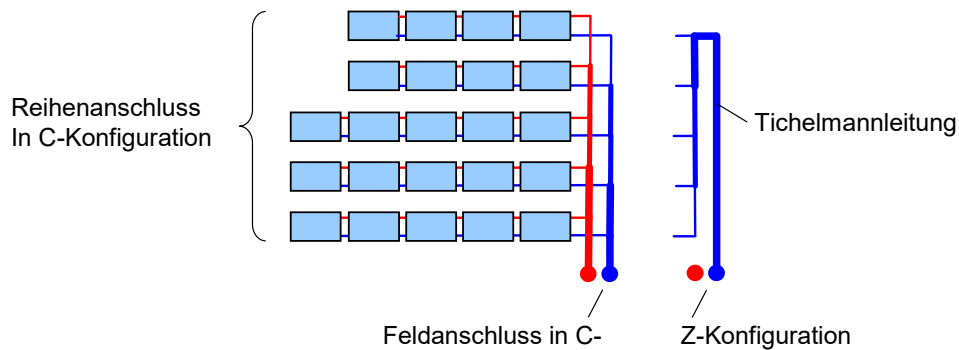


Abbildung 12 Mehrreihiges Kollektorfeld. Reihenanschluss in C-Konfiguration

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. Hydra definiert den kalten Rücklauf als Tichelmannleitung. Die Länge der Tichelmannleitung ist gleich der Summe aller Reihenabstände.

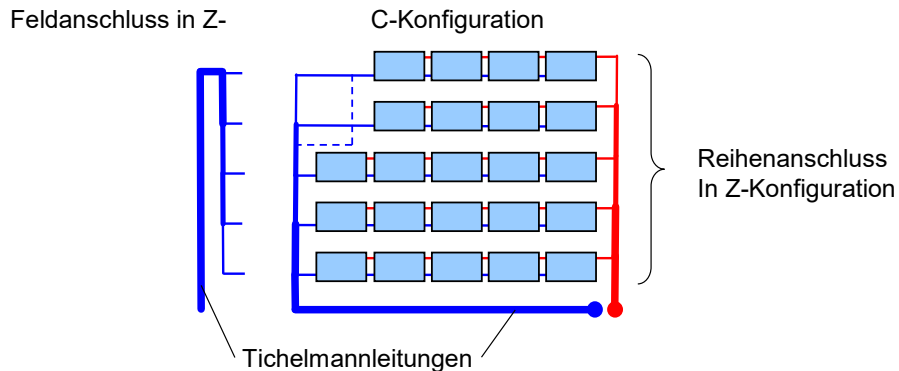


Abbildung 13 Mehrreihiges Kollektorfeld. Reihenanschluss in Z-Konfiguration

Nach Abbildung 13 sind alle Kollektorreihen eines Feldes in der Z-Konfiguration angeschlossen. Die vorlaufseitige Feldleitung wird 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 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.

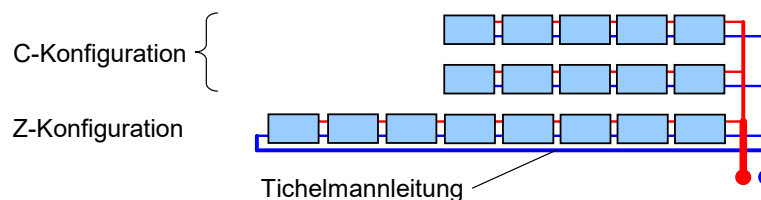


Abbildung 14 Reihenanschluss in C- und Z-Konfiguration kombiniert.

2.6 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.

Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpe		Druckverluste und Flüssigkeitsinhalte		kPa		Anlagen- und Pumpenkennlinie	
Feldanschluss: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	10.0 Δp Feldanschluss	kPa	6.9			
Rohrdimension	mm	42 x 1.5 Anz. Winkel	-	2			
Steigzone: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	5.0 Δp Steigzone	kPa	3.8			
Rohrdimension	mm	42 x 1.5 Anz. Winkel	-	2			
Technikraum: Länge Vorlauf (=Rücklauf)	m	5 Δp Kellererrohr.	kPa	4.5			
Rohrdimension	mm	42 x 1.5 Anz. Winkel	-	4			
Armaturengruppe: Typ oder Rohrdimension	Typ	1 1/2" Δp Pumpengruppe	kPa	2.5			
Volumenzähler: Druckverlust	kPa	0 Δp Volumenzähler	kPa	0.0			
bei einem Volumenstrom	l/h	6000 Volumen Leitungen	l	48			
Glattrohrübertrager: Fläche	m ²	0.0 Δp Glattrohrübertrager	kPa	0.0			
Rohrdimension	"	1" Vol. Glattrohrübertrager	l	0			
Anz. Parallele Rohre	-	1 Wendeldurchmesser	m	0.8			
Plattenübertrager: Druckverlust	kPa	11 Δp Plattenübertrager	kPa	3.7			
bei einem Volumenstrom	l/h	7300					
Höhe einer Luftsäule im Betrieb	m	0.0 Gegendruck Luftsäule	kPa	0.0			
Pumpe / Drehzahlstufe	Typ	Biral ModulA 40-6 RED					
Anz. Pumpen seriell/parallel	-	1 Δp total	kPa	55.7	Anlagenvol. Exkl. MAG	l	276
		Hydr. Pumpleistung	W	65.8			

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

Hinweis: Nach Änderungen an den Eingaben muss zuerst wieder die Berechnung durch Betätigen der entsprechenden Schaltfläche ausgeführt werden um die Darstellung zu aktualisieren.

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 90° Richtungsänderungen charakterisiert. Höhendifferenzen werden nicht berücksichtigt.

Die verfügbaren Rohrdimensionen sind im Menu der Zellen hinterlegt. Es können Glattrohre oder Wellschläuche gewählt werden. Glattrohre sind durch die Dimension «Aussendurchmesser x Wanddicke» in Millimetern charakterisiert, beispielsweise 42 x 1.5. Bei Wellschläuche durch die Nennweite in Millimetern, beispielsweise «DN50».

Bei den Leitungslängen 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.

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.

Luftsäule: Der luftgefüllte Bereich eines direkt durchströmten Drain-Back Gefässes erzeugt einen hydrostatischen Gegendruck, der proportional zur vertikalen Ausdehnung dieser «Luftsäule» ist. Dadurch kann der entsprechende Druckverlust 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 ausserdem von der Strömungsform abhängt und meist um ein Vielfaches grösser ist.

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:

- Aperturfläche
- Innendurchmesser und Länge eines Absorberrohre.
- Anzahl parallel geschalteter Absorberrohre.
- Innendurchmesser und Länge der Verteil und Sammelleitungen.
- Länge und Durchmesser des Metallbalgs für den Kollektorverbinder.
- Absorberinhalt
- Leistungskenndaten

Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt aus dem Kollektorkatalog. Nur die geometrischen Grössen sind dargestellt. 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.

Kollektortypen		Absorber				Verteil- und Sammelleitungen			Kollektorverbinder			Wirkungsgradparameter			
Kollektortyp	Aperturfläche	Absorberrohrlänge äquivalent	hydr. Durchmesser Absorberrohr	hydr. Durchmesser Absorberanschluss	Anz. Parallele Absorberrohre	Länge	hydr. Durchmesser	Typ Verzweigung	Länge Balg / Wellrohr	hydr. Durchmesser Balg / Wellrohr	Absorbervolumen	eta0	a1	a2	
	m ²	m	m	m		m	m		m	m	l	-	W/m ² K	W/m ² K	
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 16 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 kann.

Der dritte Eintrag in Abbildung 16 beschreibt einen **Harfenabsorber**, bei dem jeweils 5 Absorberrohre parallel durchströmt werden. Abbildung 17 zeigt das zugehörige Schema.

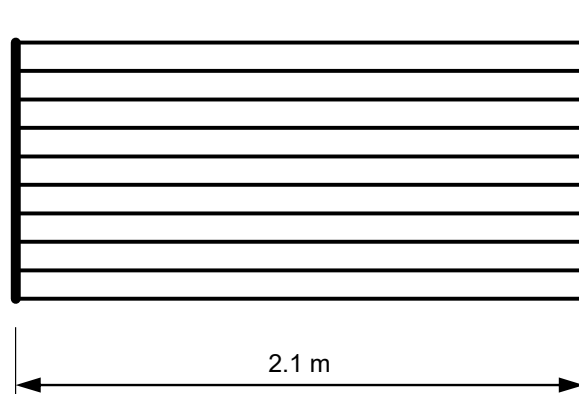


Abbildung 17 Harfenabsorber

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.

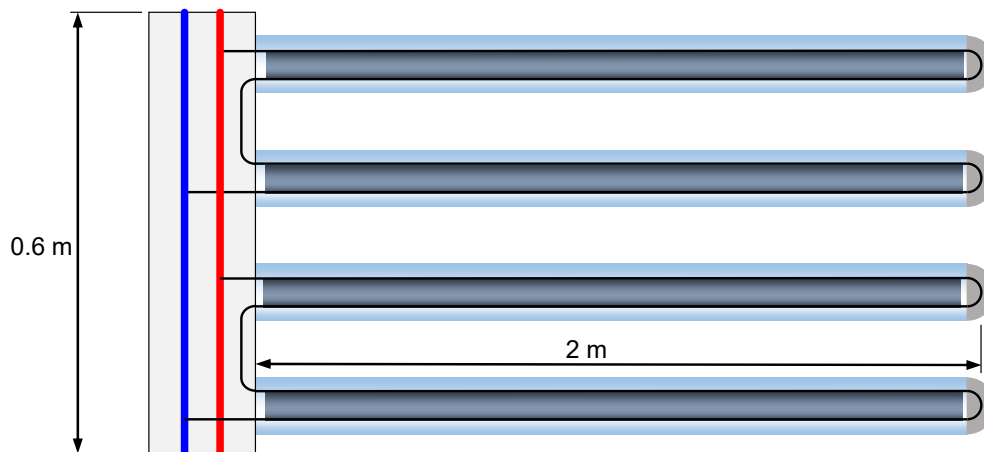


Abbildung 18 Direkt durchströmter Vakuum-Röhrenkollektor.

Abbildung 18 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.

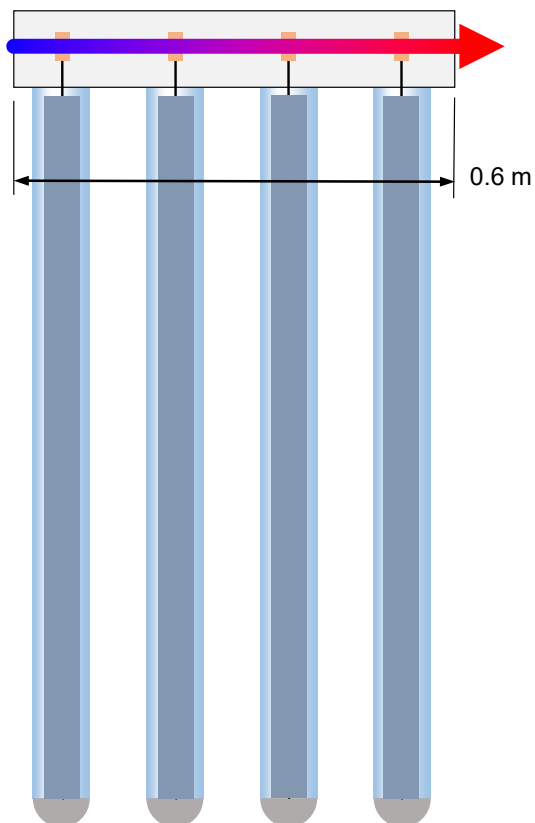


Abbildung 19 Heat-Pipe Vakuum-Röhrenkollektor.

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 äquivalente Länge so lange anpassen bis der berechnete Druckverlust mit dem Messwert übereinstimmt. Der Kollektor ist im Kollektormodell nach Abbildung 16 unter der Bezeichnung «VKR direkt» modelliert.

Abbildung 19 zeigt einen **Heat-Pipe Vakuum-Röhrenkollektor**. Die Kondensatoren der Heat-Pipes haben die Form eines Zylinders und sind quer zur Strömungsrichtung in der Sammelleitung angeordnet. Weil die Heat-Pipes vom kühlenden Fluid benetzt sind, spricht man von «nasser Anbindung». Die Sammelleitung hat einen Innendurchmesser von 25 mm. Am Ort der Kondensatoren 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.

Es gibt auch Heat-Pipes mit trockener Anbindung. Bei diesen besteht die Sammelleitung häufig aus zwei Rohren. 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. Der Durchmesser des Absorberrohres soll gleich der Spaltweite sein. Es werden so viele Absorberrohre modelliert, bis etwa der Strömungsquerschnitt des Spaltes erreicht ist. 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 Glattrohre gleichermaßen. In der Tabelle 4 sind alle Rohrtypen gelistet, die im Rohrkatalog hinterlegt sind. Die Auswahl der Rohrtypen in den Menus ist wie folgt eingeschränkt:

Bei den Rohrleitungen des Kreislaufes, d.h. ausserhalb des Kollektorfeldes, können nur metrische und zöllige Glattrohre sowie Wellschläuche gewählt werden. Die Rohrdimensionen sind als Aussendurchmesser bzw. Nennweiten ohne Einheiten angegeben.

- Der Anschluss an eine Kollektorreihe besteht oft aus einem Stück Well Schlauch 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.
- Es gibt Kollektorsysteme, bei denen Kollektorreihen über Verteil- und Sammelleitungen ausserhalb des Kollektors parallelgeschaltet werden. Diese können im Querschnitt abgestuft sein und ebenfalls aus einer Kombination von Glattrohr und Metallbalg bzw. Well Schlauch bestehen. Diese Rohrkombinationen sind mit * gekennzeichnet.
- Bei den Verbindungsleitungen können nur metrischen und zöllige Glattrohre sowie Wellschläuche gewählt werden.

Bei den mit «A» gekennzeichneten Rohrkombinationen ist die Länge des Welschlauches im Rohrkatalog definiert. Die Länge des Glattrohres kann frei gewählt werden.
 Bei externen Sammelleitungen sind die Rohrlängen durch das Rastermass der Kollektoren gegeben. Tabelle 4 und Abbildung 20 zeigen Beispiele für kombinierte Rohrtypen.

Tabelle 4 Rohrtypen

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

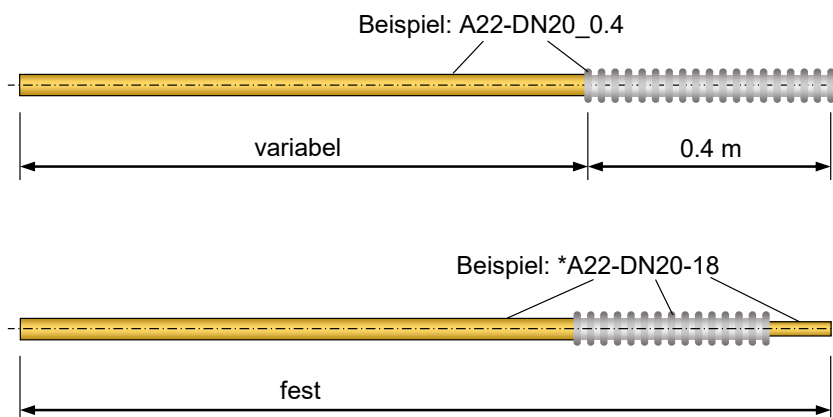


Abbildung 20 Beispiele für kombinierte Rohrleitungen

2.7.3 Armaturengruppen

Armaturengruppen nach Abbildung 21 bestehen aus Absperrarmaturen, Rückschlagventilen und beliebig vielen weiteren Elementen. Die Pumpe wird separat berücksichtigt.

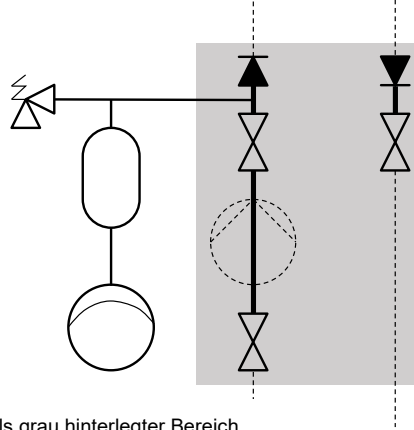


Abbildung 21 Armaturengruppe als grau hinterlegter Bereich.

Abbildung 22 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog «Armaturengruppen». Die Absperrarmaturen können entweder durch kv-Werte spezifiziert werden, oder durch den Druckverlust dp1 beim entsprechenden Volumenstrom vs1.

Dimension	Typ	dp0 Pa	dp1 Pa	vs1 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

Abbildung 22 Modellparameter für Armaturengruppen

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

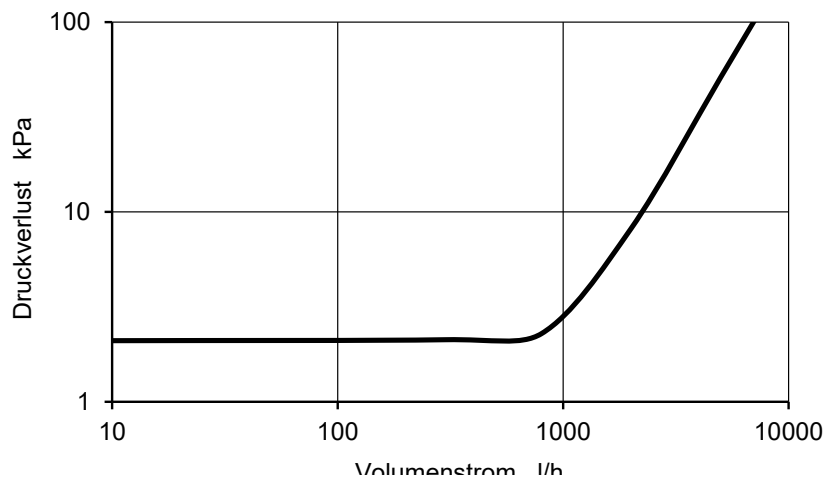


Abbildung 23 Druckverlust eines Rückschlagventiles

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.

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

Der Katalog «Pumpenmodelle» enthält die Bezeichnungen der Pumpentypen sowie drei Punkte der Pumpenkennlinie. Aus diesen Daten wird die Kennlinie nach Abbildung 25 als Polynom zweiten Grades berechnet. Ein Ausschnitt aus dem Pumpenkatalog ist in Abbildung 24 gezeigt. Für jede Drehzahlstufe muss eine eigene Kennlinie definiert werden. Sinnvoll ist beispielsweise die Definition der Maximal- und Minimalkennlinie.

Pumpentypen	p0	vs1	p1	vs2	p2
vorgegebener Durchfluss	mWs	l/h	mWs	l/h	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 Bezeichnung der Pumpentypen und Parameter der Pumpenkennlinie

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

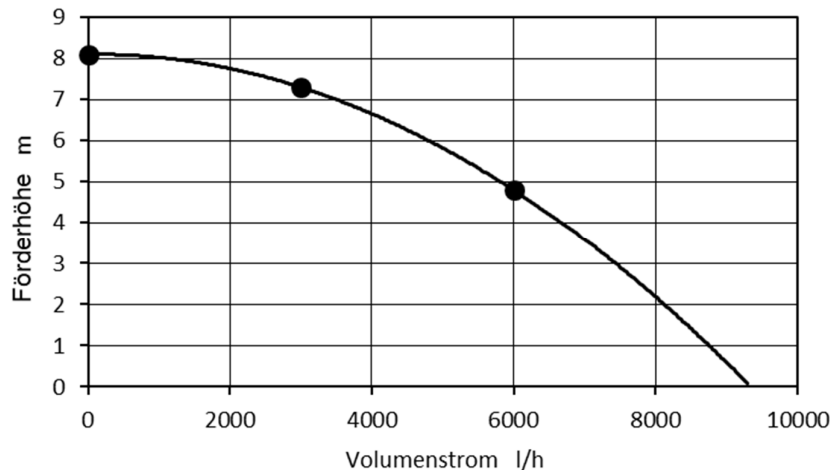


Abbildung 25 Beispiel für eine Pumpenkennlinie.

3 Beispiele zur Dimensionierung von 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 Simulation können ausserdem die extremalen Betriebszustände gewonnen werden. 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/m². Auf der Grundlage der berechneten Leistung und 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, wo die Viskosität des Wärmeträgers höher ist, sinnvoll sein.

3.2.4 Rücklauftemperatur, Stoffdaten und Durchfluss

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

Die Stoffdaten von **Wärmeträgermedien** verschiedener Hersteller können in abgestuften Konzentrationen gewählt werden. Die Stoffdaten sind im gleichnamigen Tabellenblatt hinterlegt.

Der **spezifische Durchfluss** muss zur Betriebsweise der Anlage passen. Low-flow Anlagen sollen mit beispielsweise 10-20 l/hm² betrieben werden. Bei High-Flow Anlagen sind 30-50 l/hm² 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 Beispiel: Solaranlage mit Flachkollektoren

In den folgenden Beispielen wird eine Solaranlage diskutiert, die ein Kollektorfeld mit 60 Flachkollektoren und integrierten Verteil- und Sammelleitungen besitzt. Der Kreislauf besteht im Wesentlichen aus Glattrohren der Dimension 42 x 1.5, einem Plattenübertrager und einer Pumpe. Die Modellparameter sind in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26 Modellparameter des Kreislaufs

Abbildung 27 zeigt die Randbedingungen, unter denen die Rechnung durchgeführt wird. Die Rechenwerte und die Kennlinien in Abbildung 26 und der spezifische Durchfluss in Abbildung 27 gehören zum Kollektorfeld nach Abschnitt 3.3.1.

Betriebsbedingungen	
Globalstrahlung in der Kollektorebene	W/m ² 900
Umgebungstemperatur	°C 20
Rücklauftemperatur	°C 55
Wärmeträgermedium	Typ/Konz Tyfocor LS 45 ^o
Spezifischer Durchfluss	l/hm ² 28

Abbildung 27 Randbedingungen

3.3.1 Mehrreihiges Kollektorfeld in Z-Z Konfiguration

Nach Abbildung 28 sind 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.

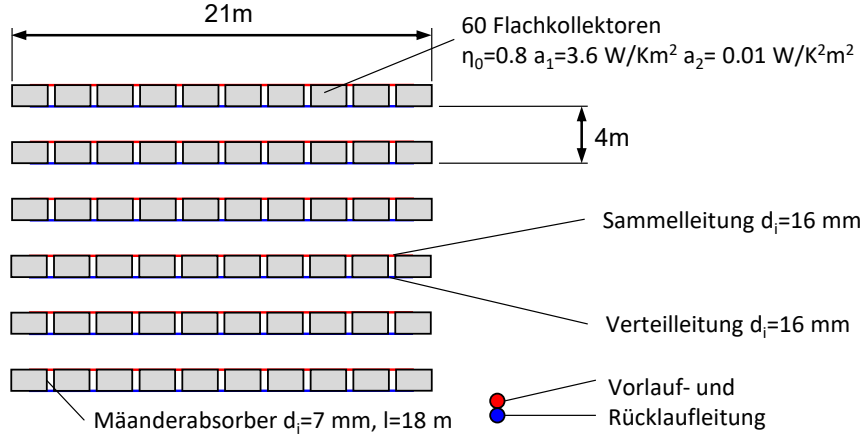


Abbildung 28 Mehrreihiges Kollektorfeld mit Flachkollektoren und integrierten Sammelleitungen.

Für die Rohrführung hat man grundsätzlich die vier Möglichkeiten der Z-Z, Z-C, C-Z und der C-C Konfiguration. Die aufwändigste Variante der Rohrführung ist die Z-Z Konfiguration, wie in Abbildung 29 gezeigt. Sowohl die Reihen als auch das Kollektorfeld sind in der Z-Konfiguration angeschlossen.

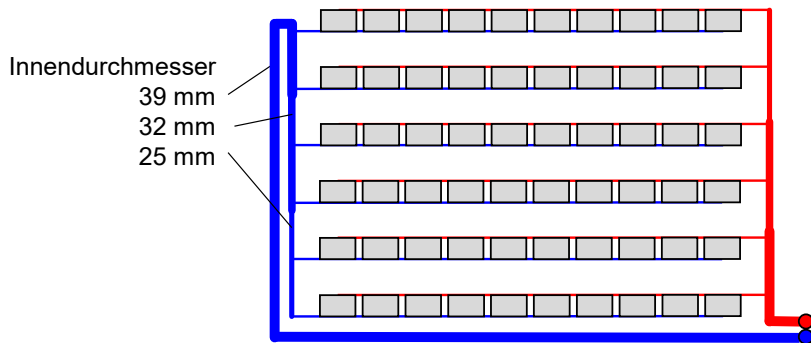


Abbildung 29 Kollektorfeld in Z-Z Konfiguration.

Abbildung 30 zeigt die entsprechenden Modellparameter im Arbeitsblatt «Anlagendaten».

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	-	Z	Z	Z	Z	Z	Z			
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	-	Z Δp Kollektorfeld 1				kPa	34.4	√ Koll.feld 1	l/h	3891

Abbildung 30 Modellierung des Kollektorfeldes in Z-Z Konfiguration

Durch betätigen der Schaltfläche Berechnen werden der Durchfluss, die Druckverluste sowie die Durchfluss-, Temperatur- und Druckverteilung berechnet. Abbildung 31 zeigt die Strömungsverteilung im Kollektorfeld. Bei der Z-Z Konfiguration sind alle Strömungspfade zwischen Ein- und

Austritt gleich lang. Daher ist die in Abbildung 31 gezeigte Strömungsverteilung nahezu symmetrisch.

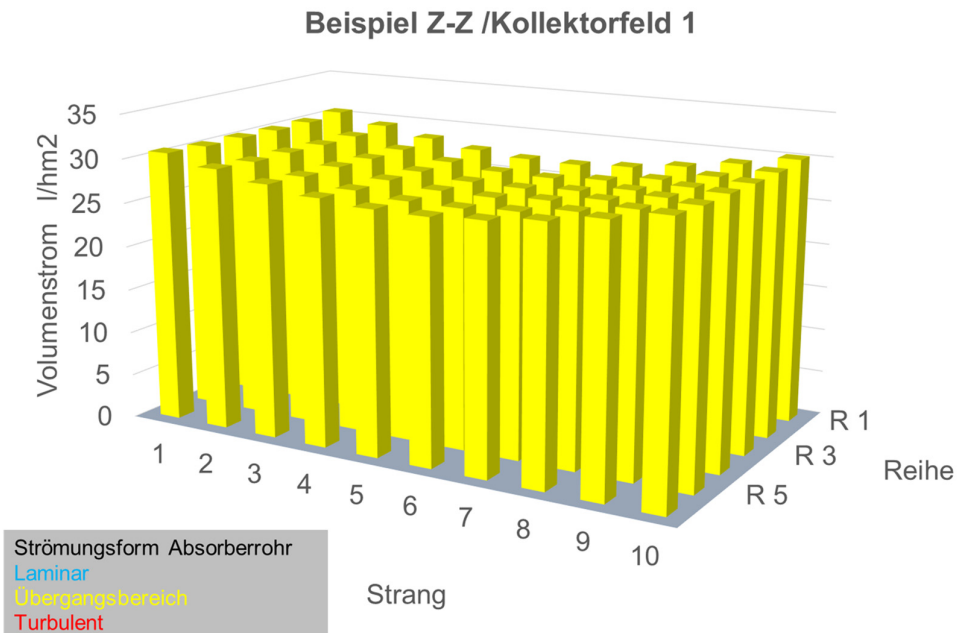


Abbildung 31 Strömungsverteilung bei Z-Z Konfiguration.

3.3.2 Mehrreihiges Kollektorfeld in C-C Konfiguration

Indem man im Arbeitsblatt «Anlagendaten» nach Abbildung 30 die Anschlussart «Z» für die Reihen und das Feld durch «C» ersetzt, erhält man dasselbe Kollektorfeld in der C-C Konfiguration nach Abbildung 32.

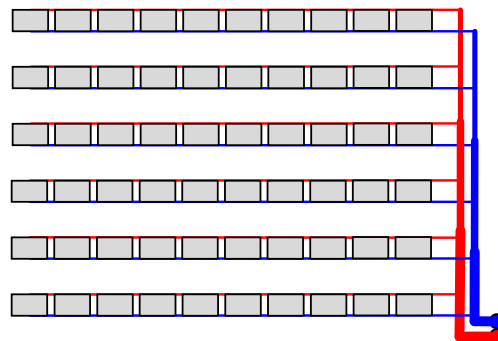


Abbildung 32 Kollektorfeld in C-C Konfiguration

Diese Konfiguration wird nachfolgend im Detail diskutiert und mit den Eigenschaften der Z-Z Konfiguration verglichen. Die Strömungsverteilung ist nach Abbildung 33 nicht mehr symmetrisch. In den ersten Kollektoren der ersten beiden Reihen ist die Strömung im Absorberrohr turbulent, in den letzten vier Kollektoren der Reihen 5 und 6 hingegen laminar.

Beispiel C-C /Kollektorfeld 1

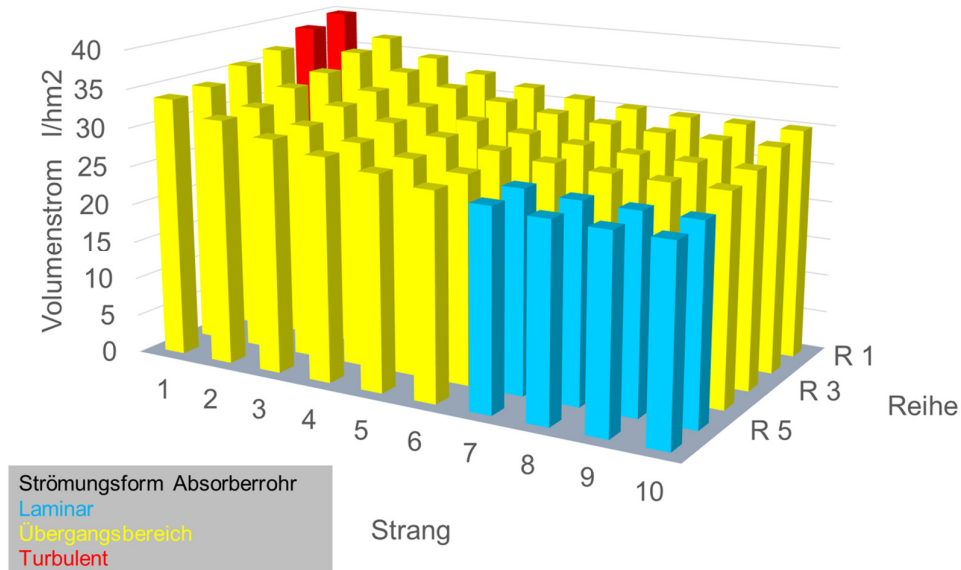


Abbildung 33 Strömungsverteilung bei C-C Konfiguration.

Abbildung 34 zeigt die Temperaturverteilung am Austritt der Absorberrohre. Die Reihenfolge der Reihen ist vertauscht, damit sich die Balken nicht verdecken. Anhand dieser Darstellung kann man jene Kollektoren identifizieren, bei denen die Austrittstemperatur etwa der Vorlauftemperatur entspricht.

Beispiel C-C /Kollektorfeld 1

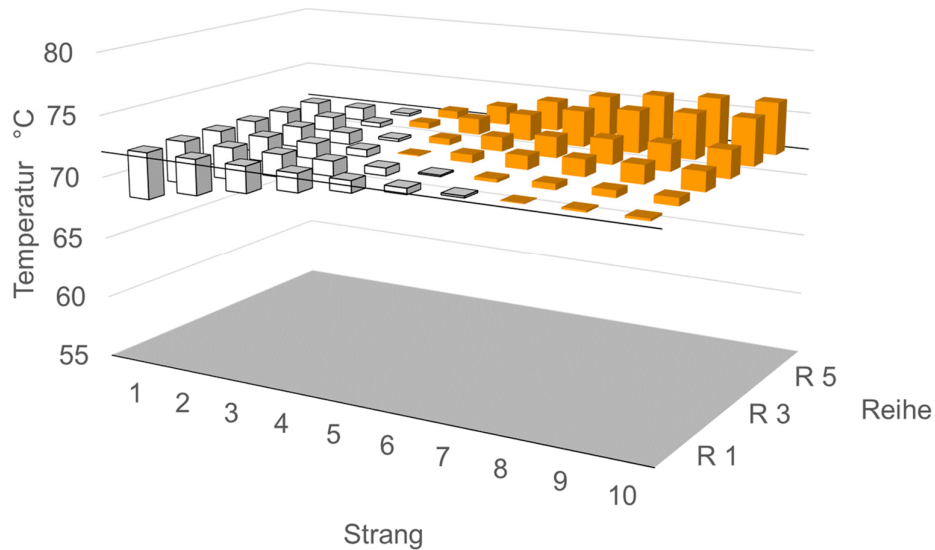


Abbildung 34 Austrittstemperaturen der Absorberrohre bei C-C Konfiguration.

Abbildung 35 stellt die Mischtemperatur in den Sammelleitungen dar. Die Austrittstemperaturen der dritten und vierten Reihe weichen nur wenig von der Vorlauftemperatur ab. Die Sammelleitung dieser Kollektoren würde sich daher als Fühlerposition anbieten.

Beispiel C-C /Kollektorfeld 1

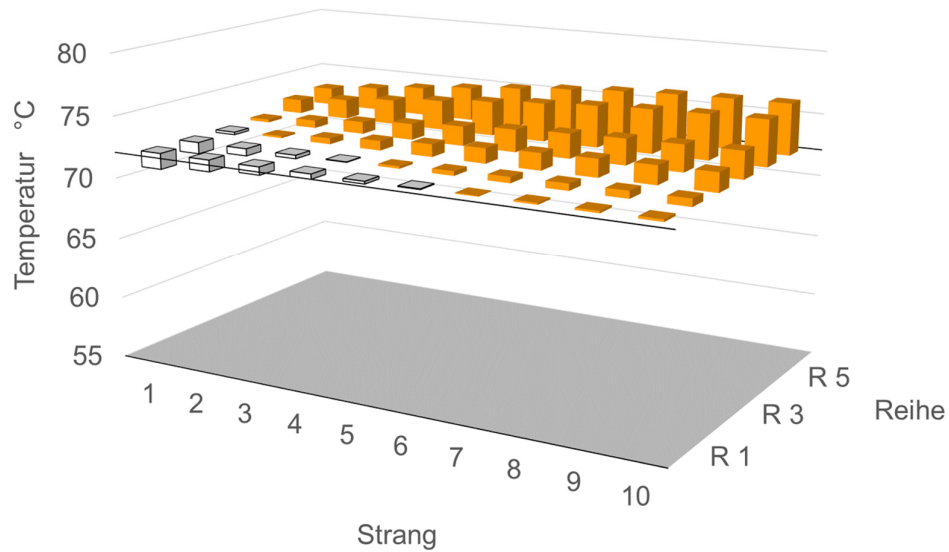


Abbildung 35 Mischtemperatur in den Sammelleitungen bei C-C Konfiguration

Schliesslich ist in der Abbildung 36 die Druckverteilung dargestellt. Die Druckdifferenzen zwischen den Verteil- und Sammelleitungen entsprechen den Druckverlusten in den Absorberrohren.

Beispiel C-C /Kollektorfeld 1

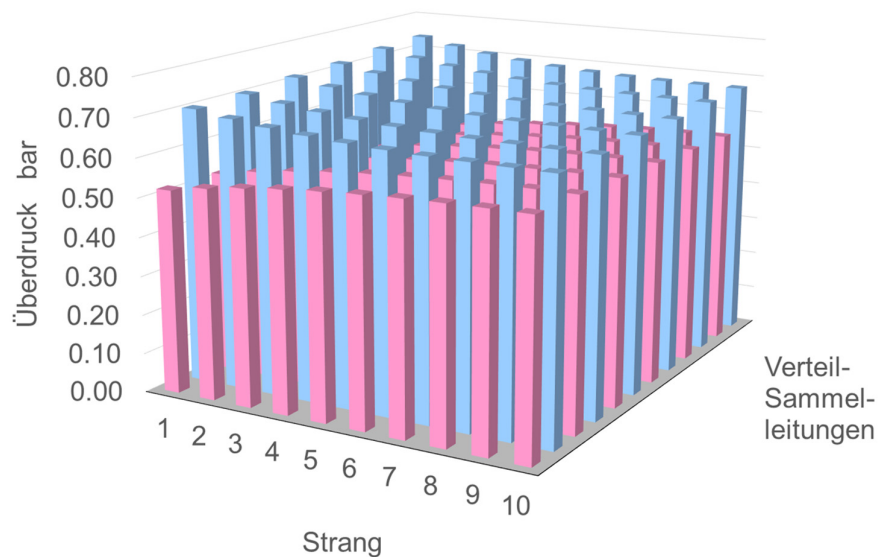
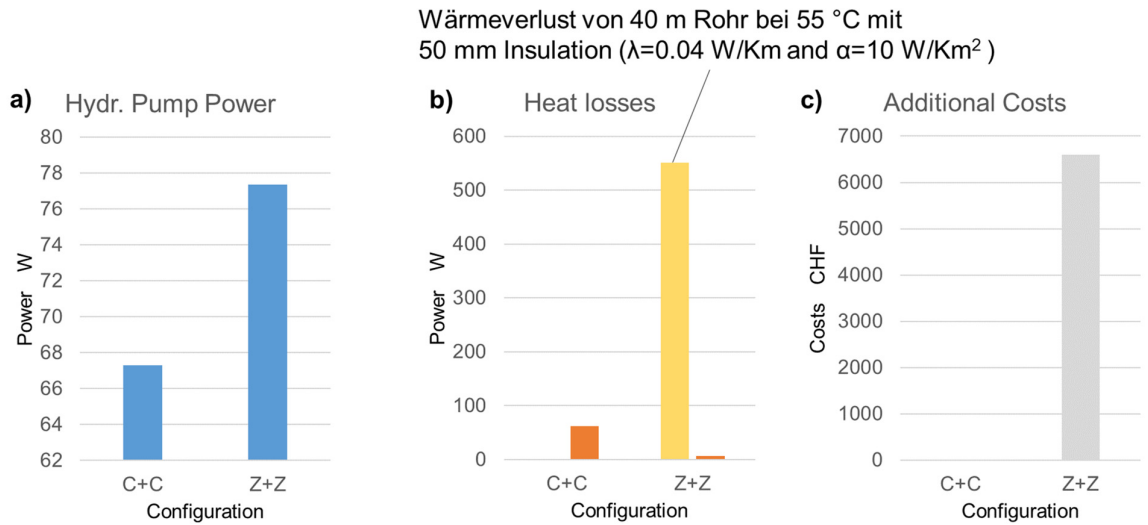


Abbildung 36 Druckverteilung in den Verteil- und Sammelleitungen bei C-C Konfiguration.

Interessant ist der Vergleich der scheinbar optimalen Z-Z Konfiguration mit der wesentlich einfacheren C-C Konfiguration nach Abbildung 41 a), b) und c). In beiden Fällen wurde mit demselben Durchfluss von 30 l/hm² gerechnet.



Quelle: D. Ehrbar, Solarline AG, Zurich

Abbildung 37 Vergleich zwischen Z-Z und C-C Konfiguration

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 sind die Wärmeverluste des Kollektorfeldes bei C-C Konfiguration rund 60 W höher als bei C-C Konfiguration. Wenn man aber die Wärmeverluste der Tichelmannleitung berücksichtigt, sind die Wärmeverluste bei der Z-Z Konfiguration rund 500 W höher!

Die fertig installierte und wetterfest gedämmte Tichelmannleitung kostet mehr als 6000 CHF. 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.

3.3.3 Beispiel: Kollektorfeld mit symmetrischer Anbindung

Es kann günstig sein, ein Kollektorfeld zu halbieren und über dieselben Feldleitungen anzuschließen. Ein Beispiel ist in Abbildung 38 gezeigt.

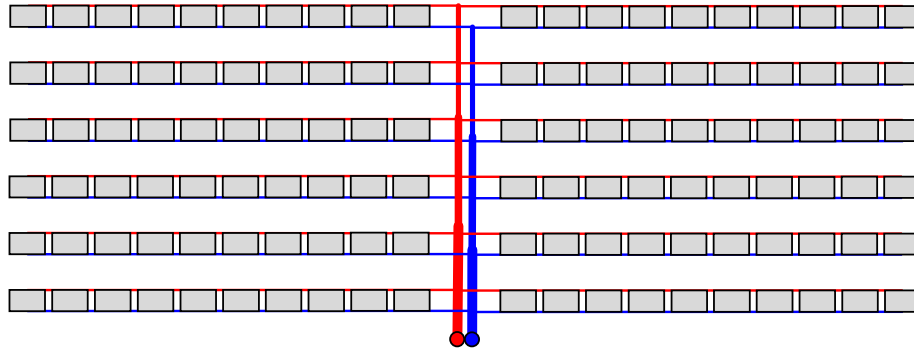


Abbildung 38 Kollektorfeld mit mittigem Anschluss.

Der mittige Abstand wird dadurch realisiert, dass der Reihenabstand zwischen den benachbarten Reihen etwa gleich dem minimalen Abstand zweier T-Stücke gewählt wird. Dies ist in Abbildung 39 gezeigt, wobei nur die Reihen 1 bis 9 dargestellt sind.

Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-		10	10	10	10	10	10	10	10	10
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-		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
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m		1,5	1,5	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	22 x 1	22 x 1
Anzahl Winkel im Vorlauf	-		3	3	3	3	3	3	3	3	3
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration			C	C	C	C	C	C	C	C	C
Feldleitung: Reihenabstand	m		0,2	3,8	0,2	3,8	3,8	0,2	3,8	0,2	3,8
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke			54 x 2	54 x 2	54 x 2	54 x 2	42 x 1,5	42 x 1,5	42 x 1,5	42 x 1,5	35 x 1,5
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration			Z Δp Kollektorfeld 1			kPa		30,2		√ Koll.feld 1	
										l/h	
										6955	

Abbildung 39 Modellbereich für ein Kollektorfeld mit mittigem Anschluss.

3.3.4 Beispiel: Kollektorreihe mit abgestuften Verteil- und Sammelleitungen

Abbildung 40 zeigt ein Kollektorfeld, bestehend aus vier Strängen mit je 2 seriell geschalteten Kollektoren, die über abgestufte Verteil- und Sammelleitungen parallel geschaltet sind. Bei Kollektoren, bei denen die Verrohrung ausserhalb des Kollektorgehäuses liegt, ist dies grundsätzlich möglich.

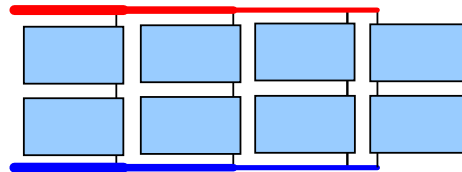


Abbildung 40 Kollektorreihe mit vier Strängen

Die Spezifikation des Kollektorfeldes ist in Abbildung 41 dargestellt. Die Feldleitungen übernehmen die Rolle der Verteil- und Sammelleitungen. Für Mäanderabsorbern werden im Kollektormodell die Länge der Sammelleitung mit 0m Länge und dem Durchmesser des Absorberrohres spezifiziert.

Bei der Berechnung werden die Einträge für die Reihenanschlussleitung gelöscht, da diese nicht benötigt werden. Ausserdem werden in der Zeile Reihenabstand die Gesamtlänge der externen Sammelleitungen angegeben.

Spezifischer Durchfluss	l/hm ²	15 Vol. Feldverrohrung				l	0
Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-	1	1	1	1		
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-	2	2	2	2		
Kollektortyp	-	FK extern H	FK extern H	FK extern H	FK extern H		
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m	0	0	0	0		
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm						
Anzahl Winkel im Vorlauf	-	0	0	0	0		
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C	C	C	C		
Feldleitung: Reihenabstand	m	2.15	2.15	2.15	0.25		
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm	*22-DN25-22	*22-DN20-18	*18-DN16-12	*12-12		
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-	C Δp Kollektorfeld 1				kPa	27.9

Abbildung 41 Spezifikation einer Kollektorreihe mit externen Verteil- und Sammelleitungen

3.3.5 Beispiel: Grosskollektor mit 5 Teilabsorbern und integrierten Sammelleitungen

Grosskollektoren, wie sie in Fernwärmanlagen eingesetzt werden, besitzen Absorber, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt sind. HYDRA bietet die Möglichkeit, die recht komplexe Verschaltung innerhalb des Kollektorgehäuses durch ein einfacheres Modell abzubilden. Dieses einfachere Modell wird dann verwendet, um grosse Kollektorfelder zu modellieren. In der Abbildung 42 ist der Absorber eines Grosskollektors dargestellt. Er besteht aus 5 identischen Mäanderabsorbern. Jedes Absorberrohr hat eine effektive Länge von 20 m und einen Innendurchmesser von 7 mm. Die Verteilleitung und die Sammelleitung haben einen Innendurchmesser von 26 mm und eine Gesamtlänge von 5 m. Die Distanz zwischen den Anschlüssen der Absorberrohre beträgt 1 m. Als Kollektorverbinder kommen Metallbälle mit 26 mm Innendurchmesser und einer Länge von 100 mm zum Einsatz.

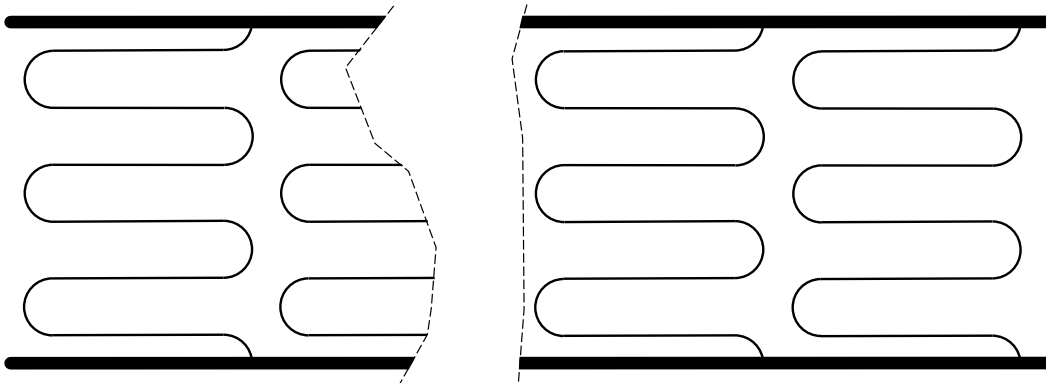


Abbildung 42 Grosskollektor, bestehend aus 5 Mäanderabsorbern

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

1. Zunächst modelliert man den **Teilkollektor** inklusive Verteil- und Sammelleitung von 1 m Länge. Man weiss aus Erfahrung, dass die äquivalente Länge eines Mäanderabsorbers etwa 10% grösser ist als die effektive Länge. Daher wählt man 22 m. Für den Teilkollektor wird ein Metallbalgkompensator mit 20 mm Länge modelliert. Ausserdem modelliert man den **Grosskollektor**, bestehend aus 5 parallelen Absorberrohren mit je 22 m Länge und einer Sammelleitung mit einer Länge von 5 m.

2. Anschliessend werden zwei Kollektorfelder mit diesen Kollektoren modelliert. Das Kollektorfeld 1 besteht aus 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 einen spezifischen Durchfluss von 30 l/hm² optimiert werden. 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 m Verteil- und Sammelleitung strömt. Im Teilfeld 2 durchströmt der Gesamtmassenstrom die gesamte Länge von 5 m.
4. Nun passt man den Durchmesser der Sammelleitung des Grosskollektors so lange an, bis beide Volumenströme gleich sind.

Abbildung 16 zeigt die Modellparameter im Tabellenblatt «Kollektormodelle». Der Volumenstrom in beiden Kollektorfeldern ist gleich, wenn man im Modell für den Grosskollektor einen äquivalenten Innendurchmesser von 27.4 mm einsetzt. Abbildung 43 zeigt den Modellbereich im Arbeitsblatt «Anlagendaten» mit den berechneten Werten für Druckverlust und Durchfluss.

Kollektorfeld 1		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-		30									
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-		1									
Kollektortyp	-		Teilkollektor									
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m		0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		28 x 1.5									
Anzahl Winkel im Vorlauf	-		0									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-		C									
Feldleitung: Reihenabstand	m		0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		28 x 1.5									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-		C									
			C Δp Kollektorfeld 1				kPa	33.9	V Koll.feld 1		l/h	2250
Kollektorfeld 2		Reihe Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kollektorreihe: Anz. Parall. Stränge	-		6									
Anzahl serielle Kollektoren pro Strang	-		1									
Kollektortyp	-		Grosskollektor									
Reihenanschlussleitung: Länge Vorlauf	m		0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		28 x 1.5									
Anzahl Winkel im Vorlauf	-		0									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-		C									
Feldleitung: Reihenabstand	m		0									
Rohrdimension: Durchmesser x Wanddicke	mm		28 x 1.5									
Anschluss in C- oder Z-Konfiguration	-		C									
			C Δp Kollektorfeld 2				kPa	33.9	V Koll.feld 2		l/h	2250
Schaltung parallel / seriell	Typ	T	unberück Δp Kollektorfeld				kPa	33.9	V Kollektorfeld		l/h	4500

Abbildung 43 Äquivalente Teilkollektorfelder mit Teilkollektoren und Grosskollektoren.

5. Falls gemessene Druckverluste verfügbar sind, kann die Länge des Absorberrohres optimiert werden. Es genügt dann, als 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.

Das Resultat ist geringfügig abhängig von der Dimension der Reihenanschlussleitung, weil die Querschnittänderung beim Übergang auf die Verteil- und Sammelleitung des Kollektors ein Stossverlust entsteht. Dieser Stossverlust ist bei Teilkollektoren anders als bei Grosskollektoren, weil die Durchmesser der Verteil- und Sammelleitungen unterschiedlich sind.

4 Dank

Diese 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.

5 Literatur

DIN, 2017, DIN EN ISO 9806: "Solarenergie - Thermische Solarkollektoren - Prüfverfahren," Beuth Verlag GmbH, Berlin

Eismann, R., 2017, "Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen : Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung", Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-07124-0. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07125-7>

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

VDI, 2013, "VDI-Wärmeatlas", 11. Aufl, Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3>

Wagner, W., 2001, "Strömung und Druckverlust", Kamprath-Reihe, 5. Aufl, Vogel Buchverlag, Würzburg. ISBN: 3802317203.