

Schlussbericht, 28. Mai 2017

# Bericht «Stagnation sicher beherrschen»



**energie schweiz**

Unser Engagement: unsere Zukunft.

**Autoren**

Ralph Eismann, ETH Zürich

Bruno Schläpfer, Ernst Schweizer AG, Metallbau

Andreas Haller, Ernst Schweizer AG, Metallbau

Andreas Bohren, SPF, Hochschule Rapperswil

Daniel Ehrbar, Solarline-Güttinger AG

Jürg Marti, Marti Energietechnik

José Martin, Swissolar

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.  
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

**Adresse**

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern  
Infoline 0848 444 444. [www.energieschweiz.ch/beratung](http://www.energieschweiz.ch/beratung)  
[energieschweiz@bfe.admin.ch](mailto:energieschweiz@bfe.admin.ch), [www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1	Ursachen der Stagnation .....	5
1.2	Stagnation ist ein zulässiger Zustand .....	5
<b>2</b>	<b>Was ist Stagnation?</b> .....	<b>6</b>
2.1	Ablauf der Stagnation.....	6
2.2	Was kann passieren, wenn man Stagnation nicht beherrscht?.....	7
2.3	Stand der Forschung.....	8
2.4	Wie kann man Anlagen stagnationssicher dimensionieren? .....	8
<b>3</b>	<b>Partielle Stagnation – ein gefährlicher Zustand</b> .....	<b>9</b>
3.1	Ursachen von partieller Stagnation .....	9
3.2	Mögliche Schäden durch partielle Stagnation .....	9
<b>4</b>	<b>Regeln für ein günstiges Stagnationsverhalten</b> .....	<b>10</b>
4.1	Eigenschaften von Kollektoren und Kollektorfeldern .....	10
4.1.1	Entleerbarkeit von Kollektorfeldern .....	10
4.2	Leitungsführung im Kollektorfeld.....	11
4.2.1	Dachintegrierte Kollektorfelder.....	11
4.2.2	Frei aufgeständerte Kollektorfelder .....	13
4.2.3	Optimaler Querschnitt von Siphons .....	16
4.2.4	Luftabscheider im Dampfbereich .....	16
4.3	Rohrführung und Armaturen im Technikraum.....	17
4.3.1	Dampfausbreitung bis in den Technikraum möglich.....	18
4.3.2	Dampf dringt nie bis zum Technikraum vor .....	19
4.3.3	Anordnung des Rückschlagventils.....	19
4.3.4	Anordnung des Sicherheitsventils.....	19
4.4	Hinweise zur Dimensionierung .....	20
4.4.1	Anlagendimensionierung.....	20
4.4.2	Membran-Druckausdehnungsgefäß .....	20
4.4.3	Kompressordruckhaltung .....	21

4.4.4	Kondensator .....	22
4.4.5	Vorschaltgefäss .....	22
4.5	Geeignetes Wärmeträgerfluid .....	23
<b>5</b>	<b>Partielle Stagnation vermeiden .....</b>	<b>24</b>
5.1	Mehrere Kollektorföhler in grossen Kollektorfeldern .....	24
5.2	Warum braucht es einen Drucksensor? .....	25
<b>6</b>	<b>Auswertung von TRACE-Simulationen .....</b>	<b>26</b>
6.1	Verbindung von Kollektorreihe zur Feldleitung .....	26
6.2	Neigung von Kollektorreihen .....	27
6.3	Kollektorreihen auf unterschiedlichen Ebenen .....	28
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>31</b>

# 1 Einleitung

Eine Solaranlage muss so gebaut sein, dass Stagnation nicht zu Schäden führen kann. Ziel dieser Arbeit ist, die wichtigen Regeln für die Planung und Ausführung darzustellen. Ausserdem werden Hinweise für die Dimensionierung gegeben. Diese Arbeit gilt für druckbefüllte Anlagen, die mit Wasser-Glykol-Gemisch betrieben werden. Folgende Fragen werden beantwortet:

- Was muss beim Anschluss von dachintegrierten Kollektorfeldern beachtet werden?
- Dürfen Kollektorreihen auf unterschiedlichen Ebenen angeordnet sein?
- Dürfen Kollektorreihen ein Gefälle haben?
- Wie müssen Kollektoren an die Feldverrohrung angeschlossen werden?
- Was kann man tun, um die Dampfreichweite zu begrenzen?
- Welche Unterschiede müssen bei der Dimensionierung von Membran-Druckausdehnungsgefässen (MAG) und Kompressor-Druckhaltungen beachtet werden?

Nicht alle Fragen können auf der Basis der bestehenden Literatur beantwortet werden. Fehlende Erkenntnisse werden durch Modellierung und Simulation gewonnen. Dazu wird das thermohydraulische Rechenprogramm TRACE verwendet. Wichtige Punkte sind, wie die folgenden, als Merksätze in Kasten dargestellt.

- Kollektoren müssen nach Montageanleitung angeordnet und montiert werden.
- Der Einsatz von Kollektoren ausserhalb der Spezifikation ist nicht zulässig.
- Eine korrekt geplante und gut gebaute Solaranlage übersteht Stagnation ohne Schäden.

Wasser-Glykol-Gemisch wird im Text abkürzend mit Flüssigkeit bezeichnet. Wichtige Begriffe sind fett gedruckt.

## 1.1 Ursachen der Stagnation

Stagnation kann viele Ursachen haben. Die wichtigsten sind nachfolgend aufgelistet:

1. Sobald die maximal zulässige Speicher- oder Kollektortemperatur erreicht ist, schaltet der Regler die Solarkreispumpe aus.
2. Stromausfall.
3. Der Regler ist defekt und kann die Solarkreispumpe nicht einschalten.
4. Die Pumpe ist defekt.
5. Strömungsblockade durch grosse Luftmengen im Kreislauf

## 1.2 Stagnation ist ein zulässiger Zustand

Die erste Ursache kann man „im Prinzip“ verhindern. Die entsprechenden Massnahmen lassen sich mit Hilfe von Simulationsprogrammen wie Polysun dimensionieren:

- Am kostengünstigsten ist es, wenn man das das Kollektorfeld nicht überdimensioniert. Die Solarwärme wird sofort genutzt oder in einem genügend grossen Speicher gelagert.

- Man kann den Speicher nachts über die Kollektoren so weit abkühlen, dass am darauffolgenden Tag genügend Speicherkapazität zur Verfügung steht.
- Sobald der Speicher geladen ist, wird die Kollektorleistung einem weiteren Verbraucher mit sehr grosser Kapazität zugeführt (Schwimmbad), oder durch einen Kühler an die Umgebung abgeben.

Die Ursachen 2 bis 5 können durch technische Massnahmen nicht verhindert werden. Eine Solaranlage muss daher immer so geplant und ausgeführt werden, dass sie Stagnation schadlos übersteht. Diese Eigenschaft einer Solaranlage nennt man **Eigensicherheit**, weil sie ohne aktive Massnahmen sicher vor Schäden ist.

## 2 Was ist Stagnation?

### 2.1 Ablauf der Stagnation

Wenn bei hoher Bestrahlungsstärke die Solarkreispumpe steht, können die Kollektoren keine Nutzwärme liefern. Dieser Zustand heisst **Stagnation**. Nachfolgend ist der Ablauf der Stagnation beschrieben. Ausserdem werden die Begriffe definiert, die man zur Beschreibung der Stagnation braucht. Diese Begriffe sind fett gedruckt.

Die Temperatur eines Absorbers steigt so lange an, bis sein Wärmeverlust gleich gross ist wie die absorbierte Strahlungsleistung. Mit modernen selektiv beschichteten Absorberschichten werden sehr hohe Temperaturen erreicht. Flachkollektoren mit einfacher Abdeckung erreichen eine **Stagnationstemperatur** von rund 200 °C, Vakuum-Röhrenkollektoren (VKR) je nach Bauart bis weit über 300 °C.

Die Flüssigkeit beginnt jedoch bereits bei 120-140 °C zu siedeln. Durch den entstehenden Dampf werden die Absorber zum grossen Teil entleert. Dies geschieht durch Verdrängen und durch die Reibung zwischen der Flüssigkeit und dem Dampfstrom. Die **Entleerbarkeit** ist eine wichtige Eigenschaft von Kollektorfeldern. Je besser die Entleerbarkeit ist, desto weniger Flüssigkeit bleibt als **Restmenge** in den Absorbern zurück. Die Restmenge wird in Kilogramm oder Litern angegeben. Mit dem Anwachsen des Dampfolumens wird ein entsprechendes Flüssigkeitsvolumen aus den Rohrleitungen in das Ausdehnungsgefäss verdrängt.

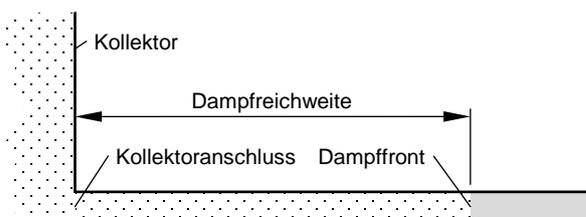


Abbildung 2-1 Dampfreichweite und Dampffront.

Die Restmenge verdampft im Lauf der Stagnation. Diesen Zustand eines Kollektorfeldes nennt man **Leersieden**. Der Dampf breitet sich in die Rohrleitungen aus. Dort kondensiert der Dampf und heizt

dabei die Rohrwand auf. Man stellt sich nach Abbildung 2-1 vor, dass der Dampf den gesamten Rohrquerschnitt beansprucht. Der Übergang zwischen Dampf und Flüssigkeit wird als **Dampffront** bezeichnet.

Die Rohrlänge zwischen Kollektoranschluss und Dampffront heisst **Dampfreichweite**. Die maximalen Dampfreichweiten in der Vor- und Rücklaufleitung hängen von der Rohrführung ab. Sie können daher unterschiedlich sein. Die maximale Dampfreichweite ist erreicht, wenn in den Kollektoren gleich viel Flüssigkeit verdampft wie in den Rohren kondensiert. In diesem Zeitpunkt ist auch das **Dampfvolumen** maximal. Danach nehmen die Dampfreichweiten und das Dampfvolumen wieder ab.

- Je besser die Entleerbarkeit, desto kleiner ist die Restmenge.
- Je kleiner die Restmenge, desto weniger Dampf produziert der Kollektor.
- Je weniger Dampf das Kollektorfeld verlässt, desto kleiner sind die Dampfreichweite und das Dampfvolumen.

## 2.2 Was kann passieren, wenn man Stagnation nicht beherrscht?

**Zu grosse Dampfreichweite:** Viele Schäden entstehen dadurch, dass der Dampf zu weit in den Kreislauf vordringt und Komponenten erreicht, die durch die hohen Temperaturen zerstört werden. Besonders gefährdet sind folgende Komponenten:

- Membran des Ausdehnungsgefässes
- Pumpe
- Plattenwärmetauscher. (Thermische Spannungen können Risse hervorrufen)
- Durchflussmesser
- Armaturen
- Wärmedämmung

**Druckstösse:** Strömt Dampf in den Wärmetauscher, so kondensiert er dort sehr rasch. Durch den entstehenden Unterdruck werden benachbarte Flüssigkeitsvolumen gegeneinander beschleunigt. Beim Zusammenprall dieser Flüssigkeitsvolumen können heftige Druckstösse mit weit über 10 bar entstehen. Diese können Manometer und Durchflussmesser beschädigen, den Spalttopf der Pumpe deformieren und Undichtigkeiten verursachen. Das Sicherheitsventil kann diese Druckstösse nicht begrenzen. Dazu ist es viel zu träge. Wenn der Dampf von unten in ein Flüssigkeitsvolumen strömt, die mit kühler Flüssigkeit gefüllt ist, kondensiert der Dampf dort ebenfalls sehr rasch. Auch hier können Druckstösse auftreten.

**Sieden auf der Sekundärseite:** Der Wärmeübergang bei Kondensation ist sehr hoch. Falls der Druck auf der Sekundärseite des Wärmetauschers kleiner als 5 bar ist, kann die Flüssigkeit siedend. Kreislaufkomponenten auf der Sekundärseite können beschädigt werden.

**Frostschutzmittel zerstört:** Frostschutzmittel, die nicht für Solaranlagen geeignet sind, können durch hohe Temperaturen zerstört werden. Herkömmliche Wasser-Propylenglykol Gemische für die Kältetechnik sind nicht für Dauertemperaturen über 150 °C geeignet. Bei der Verdampfung bilden sich feste Ablagerungen, die nicht löslich sind und Absorberrohre verstopfen können. Weil dabei

auch der Korrosionsinhibitor zerstört wird, sinkt der pH-Wert des Wasser-Glykol Gemisches. Dadurch kann Korrosion an Rohrleitungen und Komponenten auftreten. Die Korrosionsprodukte bilden häufig einen Schlamm, der den Durchfluss behindern oder blockieren kann.

## 2.3 Stand der Forschung

Zum Stagnationsverhalten von Solaranlagen wurden viele Untersuchungen durchgeführt. Im Folgenden werden einige Quellen besprochen, die praktische Bedeutung haben. Fünf davon sind im Internet frei verfügbar. Die Hyperlinks sind im Literaturverzeichnis angegeben. In den Jahren 2000 bis 2003 wurden durch Hausner et al. (2003) unterschiedlich verschaltete Kollektorfelder experimentell untersucht, bestehend aus Kollektoren mit Mäander- und Harfenabsorbern. Es wurden auch Möglichkeiten untersucht, wie die Ausbreitung des Dampfes begrenzt werden kann. Rommel et al. (2007) haben ein neues Verfahren entwickelt, mit dem das Dampfvolument gemessen werden kann. Scheuren (2008) hat dieses Verfahren verwendet, um grössere Felder mit Flachkollektoren sowie direkt durchströmten Vakuumröhrenkollektoren zu untersuchen. Auf der Grundlage seiner Messdaten hat er eine Berechnungsformel hergeleitet, mit der man das Dampfvolument abschätzen kann. Eismann (2014) hat die theoretische Grundlage zur dynamischen Simulation des Stagnationsverhaltens geschaffen. Diese bildet zusammen mit den Modellen für die Dimensionierung des Rohrnetzes und der Druckhaltung (Eismann 2017) eine neue Basis für die kostenmässig und betriebstechnisch optimale Dimensionierung von Solaranlagen. Frank et al. (2015) geben eine ausführliche Übersicht über Möglichkeiten, wie Stagnation beherrscht werden kann.

## 2.4 Wie kann man Anlagen stagnationssicher dimensionieren?

Die Dampfreichweite und das Dampfvolument sind die beiden zentralen Grössen, die man bei der Dimensionierung kennen muss. Stagnation ist jedoch ein Vorgang, der von sehr vielen Faktoren beeinflusst wird. Beispielsweise wird die Dampfreichweite umso grösser,

- Je grösser die Restmenge ist, die verdampfen kann.
- je kleiner die Querschnitte der Vor- und Rücklaufleitungen sind,
- je dünner die Rohrwand ist,
- je besser die Wärmedämmung der Rohre ist
- und je kleiner der Systemdruck ist.

Es ist daher nicht möglich, einfache Formeln oder Diagramme anzugeben, mit denen die Dampfreichweite und das Dampfvolument abgeschätzt werden können. Man muss Stagnation genauso simulieren, wie es bei der energetischen Dimensionierung seit Jahrzehnten üblich ist. Zu diesem Zweck wurde das Simulationsprogramm THD entwickelt (Eismann et al. 2017). Mehr Informationen zu THD und zur Dimensionierung im Allgemeinen sind im Abschnitt 0 zu finden.

Die Simulationsrechnung allein bietet aber keine Gewähr für Stagnationssicherheit! Nur wenn gewisse Regeln bei der Gestaltung der Anlage befolgt werden, liefert die Rechnung realistische Ergebnisse. Diese Regeln werden im Kapitel 4 besprochen.

## 3 Partielle Stagnation – ein gefährlicher Zustand

Bei partieller Stagnation befindet sich nur ein Teil des Kollektorfeldes in Stagnation. Der andere Teil ist in Betrieb und wird bei laufender Solarkreispumpe durchströmt. Partielle Stagnation ist daher etwas völlig anderes als Stagnation. Partielle Stagnation ist ein sehr gefährlicher Zustand, bei dem heftige Druckstösse auftreten können. Durch die im Kapitel 0 dargestellten Gegenmassnahmen kann partielle Stagnation verhindert werden.

### 3.1 Ursachen von partieller Stagnation

Falls in einem grossen, weitverzweigten Kollektorfeld Luft vorhanden ist, wird die Durchströmung der betroffenen Kollektoren behindert. Je kleiner der Durchfluss ist, desto höher ist die Austrittstemperatur. Sobald die Siedetemperatur erreicht ist, entsteht im Absorber Dampf. Der Dampf kann den Durchfluss so stark behindern, dass der Kollektor praktisch keine Energie mehr liefert. Der betroffene Kollektor ist dann im Zustand der Stagnation. Mögliche Ursachen sind:

1. Ungenügende Entlüftung.
2. Druckabfall durch Leck. Falls am Hochpunkt nach dem Abkühlen der Anlage Unterdruck herrscht, kann Luft in den Kreislauf eindringen.
3. Fehlerhafte Dimensionierung oder Inbetriebnahme des Ausdehnungsgefässes.
4. Die Membran des Ausdehnungsgefässes ist beschädigt. Dadurch gelangt Luft aus dem Gasraum in den Kreislauf.

Auch bei perfekter Entlüftung sind verzweigte Kollektorfelder nie völlig gleichmässig durchströmt. Unter folgenden Bedingungen kann den Siedezustand erreicht werden:

5. Druckabfall durch Leck. Entsprechend sinkt auch die Siedetemperatur.
6. Der Kollektorfühler ist falsch positioniert und misst eine zu tiefe Temperatur.
7. Schlecht geplante Feldhydraulik führt zu einer stark ungleichmässigen Durchströmung.

### 3.2 Mögliche Schäden durch partielle Stagnation

Auf die Dampfblasen in den Rohren wirken Druck- und Strömungskräfte. Bei einer partiellen Stagnation ist die Gefahr gross, dass Dampfblasen aus dem stagnierenden Bereich in den durchströmten Bereich des Kollektorfeldes verschoben werden. Dort kommen die Dampfblasen mit kühleren Rohrwänden und Flüssigkeit in Berührung und kondensieren schlagartig. Beim Verschwinden einer Dampfblase schlagen die zuvor getrennten Flüssigkeitsvolumen aufeinander. Dabei können Durchstösse mit weit über 10 bar auftreten. Diese verursachen heftige Bewegungen der Rohrleitungen. Als Folge können vielfältige Schäden entstehen:

1. Ausknicken und Bersten der Metallbälge von Kollektorverbindern.
2. Beschädigte Rohrdurchführung am Kollektoranschluss.
3. Deformation der Rohrbefestigungen.
4. Undichte Rohrverbindungen.
5. Reißen der Schweissnaht an den Anschlussnippeln von Wellschläuchen.

## 4 Regeln für ein günstiges Stagnationsverhalten

### 4.1 Eigenschaften von Kollektoren und Kollektorfeldern

Der entstehende Dampf verdrängt einen Teil der Flüssigkeit aus den Kollektoren. Nach der Verdrängungsphase bleibt eine Restmenge Flüssigkeit in den Kollektoren zurück. Je kleiner diese Restmenge ist, desto kleiner ist die Dampfreichweite. Man muss bereits in der Planung dafür sorgen, dass diese Restmenge möglichst klein ist. Die Restmenge ist abhängig von der Entleerbarkeit des Kollektorfeldes. Diese ist abhängig von der hydraulischen Verschaltung des Kollektorfeldes.

#### 4.1.1 Entleerbarkeit von Kollektorfeldern

Kollektorfelder mit Mäanderabsorbern nach Abbildung 4-1 a), die von unten nach oben durchströmt werden, sind gut entleerbar. Dasselbe gilt für Kollektorfelder mit Harfenabsorbern nach Abbildung 4-1 b), die von unten nach oben durchströmt werden. Weil sich der Dampf am Hochpunkt des Kollektors sammelt, hat ein anwachsendes Dampfvolument denselben Effekt wie Luft, die beim oberen Kollektoranschluss eintritt.

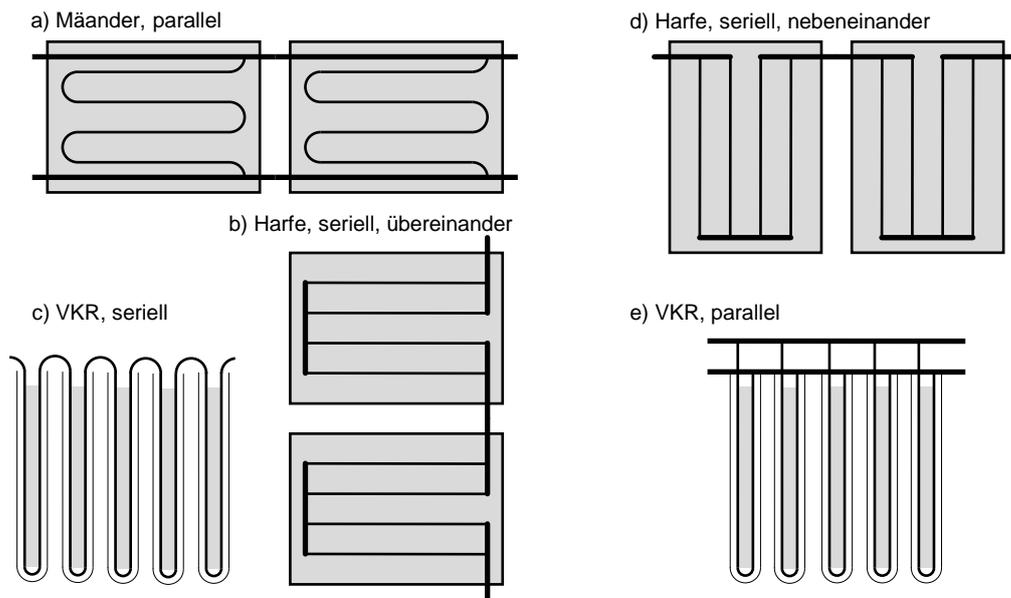


Abbildung 4-1 Kollektoren mit unterschiedlicher Entleerbarkeit.

Obwohl bei seriell verschalteten, direkt durchströmten Vakuumschlangensammlern nach Abbildung 4-1 c) beide Kollektoranschlüsse oben liegen, können sie durch den entstehenden Dampf recht gut entleert werden. Man kann sich leicht vorstellen, wie der entstehende Dampf die Flüssigkeit in den dünnen Absorberrohren vor sich herschiebt. Je kleiner der Innendurchmesser der Absorberrohre, desto besser ist die Entleerbarkeit.

Kollektorfelder mit seriell geschalteten Harfenabsorbern nach Abbildung 4-1 d) sind weniger gut entleerbar, weil sich der Dampfstrom auf mehrere Absorberrohre aufteilt. Die Dampfgeschwindigkeit ist dadurch kleiner und die Flüssigkeit kann eher gegen den Dampfstrom nach unten fließen und als Restmenge im Kollektor bleiben. Bei mehreren in Serie geschalteten Kollektoren nimmt die Dampfgeschwindigkeit gegen die Enden der Kollektorreihe zu. Entsprechend nimmt auch die

Reibung zwischen dem Dampfstrom und der Flüssigkeit zu. Mit zunehmender Reibung wird mehr Flüssigkeit aus dem Kollektor befördert. Die Entleerbarkeit hängt daher nicht nur von der Hydraulik eines einzelnen Kollektors ab, sondern auch von der Anzahl seriell geschalteter Kollektoren.

Parallel geschaltete, direkt durchströmte Vakuum-Röhrenkollektoren nach Abbildung 4-1 sind grundsätzlich sehr schlecht entleerbar, besonders bei geneigter Anordnung. Die Entleerbarkeit ist am besten, wenn die Röhren horizontal liegen. Im Vergleich zu Mäanderabsorbern muss man auch bei horizontaler Anordnung mit grösseren Restmengen rechnen, weil die Dampfgeschwindigkeiten in den einzelnen Absorberrohren kleiner sind.

Die Restmenge hängt aber nicht nur davon ab, ob das Kollektorfeld entleerbar ist. Die Innenflächen des Absorbers sind nach dem Entleeren benetzt. Ausserdem kann in horizontalen Abschnitten der Absorberrohre Flüssigkeit zurückbleiben. Daher ist die Restmenge bei Mäanderabsorbern mit beispielsweise 11 mm Innendurchmesser grösser als bei 7 mm Innendurchmesser.

Massgebend für das Stagnationsverhalten ist die Restmenge. Die Restmenge ist klein, wenn

- Der Kollektor gut entleerbar ist und
- der Absorber eine kleine Innenfläche hat.

Bei schlecht entleerbarem Kollektorfeld und Stagnationstemperaturen über 200 °C muss man dafür sorgen, dass Stagnationsereignisse möglichst nicht vorkommen, beispielsweise durch

- Kühler im Bypass zur Vorlaufleitung,
- zusätzliche Wärmesenke auf der Sekundärseite, (z.B. Schwimmbadheizung) oder
- Rückkühlen über Nacht.

## 4.2 Leitungsführung im Kollektorfeld

Die Feldverrohrung hat einen grossen Einfluss auf die Entleerbarkeit! Bei korrekter Leitungsführung ist die Restmenge praktisch nur von der Entleerbarkeit der Kollektoren abhängig. Ungünstige Leitungsführung kann bewirken, dass das Kollektorfeld schlecht entleerbar ist. Dadurch ist die Restmenge grösser. Dies führt wiederum zu grösseren Dampfreichweiten und Dampfvolumen.

### 4.2.1 Dachintegrierte Kollektorfelder

Bei bestehenden Gebäuden sind die Möglichkeiten für die Anordnung von Kollektorfeld und Steigzone stark eingeschränkt. Dies macht es schwierig, die Rohre so zu verlegen, dass das Kollektorfeld durch den Dampf entleert werden kann. Ausserdem ist der Platz zwischen Dachhaut und Unterdach meist sehr beschränkt. Man muss häufig kleinere Rohrquerschnitte als üblich wählen. Die Fliessgeschwindigkeit darf jedoch den zulässigen Wert nicht überschreiten. Dieser ist abhängig vom Rohrtyp und vom Rohrwerkstoff nach Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1 Rohrtypen und zulässige Fliessgeschwindigkeiten.

Rohrtyp und Werkstoff	m/s	Bemerkungen
Stahl- und Edelstahlrohre	1.5	Höhere Fliessgeschwindigkeiten führen zu störenden Geräuschen.
Rohre aus Kupfer	1	Höhere Fliessgeschwindigkeiten führen zu Erosionskorrosion.
Wellschläuche	1	Höhere Fliessgeschwindigkeiten führen zu Schwingungen und Ermüdungsbrüchen.

Bei der Planung müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Glattrohre lassen sich sehr platzsparend verlegen. Wellschläuche haben bei gleicher Fließgeschwindigkeit einen deutlich grösseren Gesamtdurchmesser.
- Die wasserdichte Durchführung durch das Unterdach kann keine Lasten aufnehmen und keine Bewegungen ausgleichen. Daher muss die Durchführung als Fixpunkt ausgebildet sein. Dasselbe gilt für die Kollektoranschlüsse.
- Das Rohr darf zwischen diesen Fixpunkten nicht in gerader Linie verlegt werden. Die Wärmedehnungen der Leitungen werden am besten durch Dehnungsschenkel kompensiert.

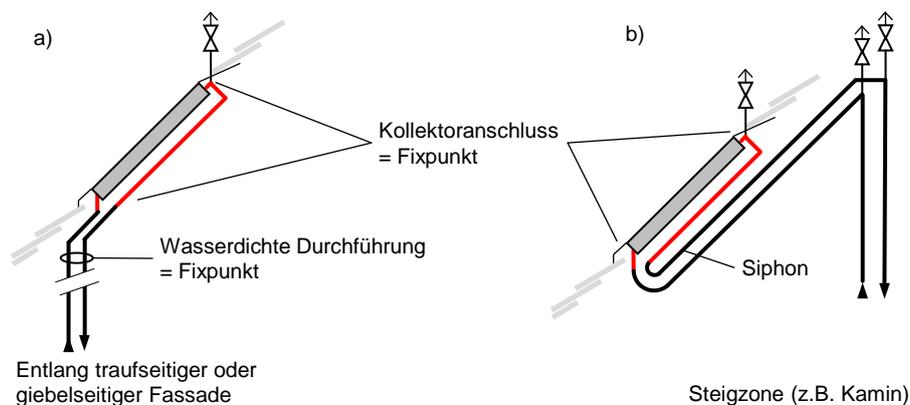


Abbildung 4-2 Rohrführung bei dachintegrierten Kollektorfeldern.

Im Beispiel a) nach Abbildung 4-2 sind die Kollektoranschlüsse direkt nach unten geführt. Damit ist die Entleerbarkeit gewährleistet. Rot eingezeichnet sind die Bereiche der Leitungen, die gegen Ende des Stagnationsprozesses noch mit Dampf gefüllt sind. Die Restmenge Flüssigkeit ist allein durch die Eigenschaften des Kollektorfeldes bestimmt.

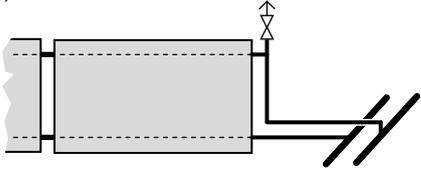
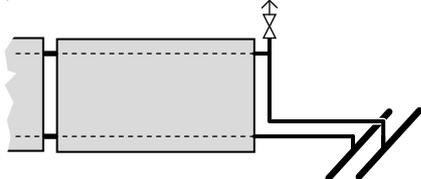
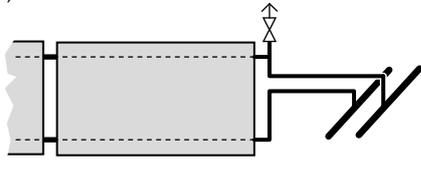
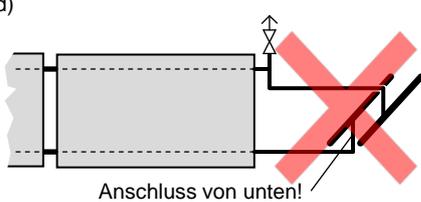
Im Beispiel nach Abbildung 4-2 b) befindet sich der Hochpunkt der Steigleitungen oberhalb des Kollektorfeldes. Wären die Leitung vom oberen Kollektoranschluss direkt nach oben geführt, so würde bei Stagnation laufend Flüssigkeit in den dampfgefüllten Kollektor nachströmen. Dies führt zu einer stark vergrößerten Dampfreichweite und im ungünstigen Fall zu Druckstößen. Damit der Dampf das Kollektorfeld entleeren kann, muss die Leitung vom oberen Kollektoranschluss zuerst nach unten geführt werden, bis auf die Höhe des unteren Kollektoranschlusses. Dies wird nach Abbildung 4-2 b) durch einen Siphon erreicht. Der Leitungsquerschnitt des Siphons muss möglichst klein sein. Hinweise zur Dimensionierung werden im Kapitel 4.2.3 gegeben. Auch hier ist die Restmenge Flüssigkeit, die den Kollektor nur als Dampf verlassen kann, praktisch allein durch die Eigenschaften des Kollektorfeldes bestimmt.

Die Leitung vom oberen Kollektoranschluss muss auf möglichst kurzem Weg auf das Niveau des unteren Kollektoranschlusses geführt werden.

## 4.2.2 Frei aufgeständerte Kollektorfelder

Bei frei aufgeständerten Kollektorfeldern hat man viele Möglichkeiten, Kollektoren anzuordnen und zu verschalten. In diesem Abschnitt wird dargestellt, welche Möglichkeiten geeignet sind, und welche man vermeiden muss.

Tabelle 4-2 Anschluss von Kollektorreihen

Anordnung	Eigenschaften
a) 	<b>Feldleitung auf der Höhe des unteren Kollektoranschlusses:</b> Die Kollektorreihe ist entleerbar. Dampfvolumen und Dampfreichweite sind nur von der Kollektorreihe abhängig. Die Höhe der rücklaufseitigen Feldleitung ist durch die Höhe des unteren Kollektoranschlusses definiert.
b) 	<b>Feldleitung unterhalb des unteren Kollektoranschlusses:</b> Die Kollektorreihe ist entleerbar. Dampfvolumen und Dampfreichweite sind nur von der Kollektorreihe abhängig. Der Abstand zwischen Kollektor und Untergrund muss grösser sein als bei der Variante a).
c) 	<b>Reihenanschluss siphoniert:</b> Kollektorreihe ist entleerbar, wenn die aufsteigende Reihenanschlussleitung so klein ist, dass die Fließgeschwindigkeit im Betrieb mindestens 1 m/s beträgt. Dampfvolumen und Dampfreichweite sind praktisch nur von der Kollektorreihe abhängig. Mehr Spielraum bei der Anordnung der Feldleitungen.
d)  Anschluss von unten!	<b>Reihenanschluss nicht siphoniert:</b> Die Kollektorreihe ist schlecht entleerbar. Die Restmenge ist grösser als bei den Varianten a) - c). Daher sind auch Dampfvolumen und Dampfreichweite grösser. Es können Druckstösse auftreten, die aber meist ungefährlich sind.

Die Verbindungsleitung zwischen der Feldleitung und dem Kollektoranschluss muss so verlaufen, dass keine Flüssigkeit aus der Feldleitung in den dampfgefüllten Kollektor fließen kann.

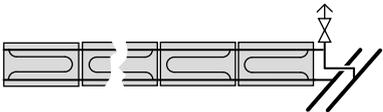
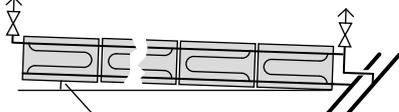
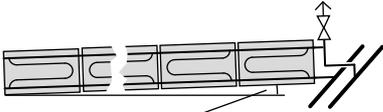
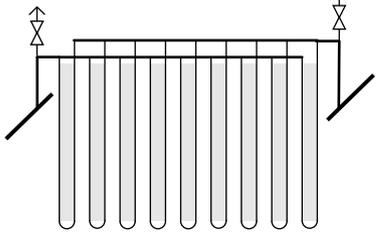
#### 4.2.2.1 Einseitiger Anschluss oder Anschluss nach Tichelmann?

Man muss dafür sorgen, dass **keine toten Leitungen** vorkommen: Alle Verteil- und Sammelleitungen müssen durchströmt sein. Das ist besonders wichtig bei modernen Flachkollektoren, bei denen die Verteil- und Sammelleitungen mit dem Absorberblech verbunden sind. Die Anschlussart ist durch das Kollektorfabrikat vorgegeben und in der Montageanleitung beschrieben. **Montageanleitungen sind verbindlich!** Direkt durchströmte Vakuum-Röhrenkollektoren werden in der Regel nach Tichelmann angeschlossen.

#### 4.2.2.2 Steigung und Gefälle von Kollektorreihen

Tabelle 4-3 zeigt, wie gross die Abweichung von der horizontalen Ausrichtung von Kollektorreihen sein darf und wo die Entlüftungsventile angeordnet sein müssen.

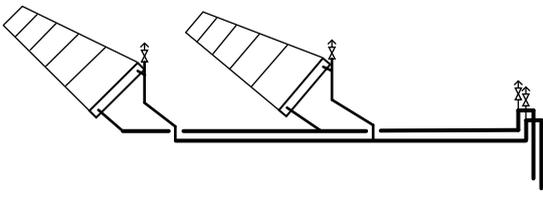
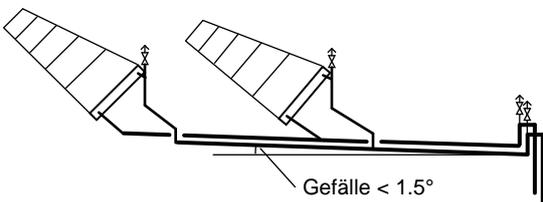
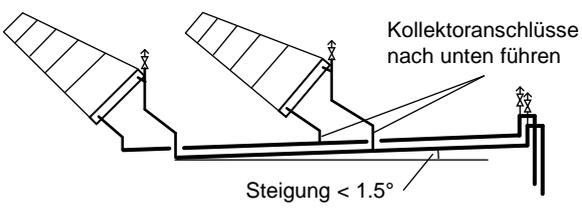
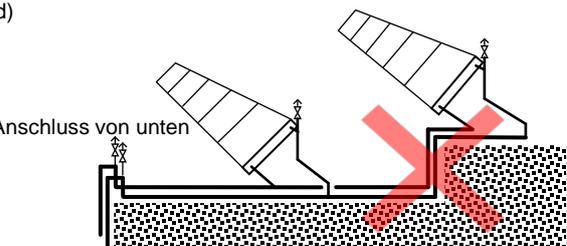
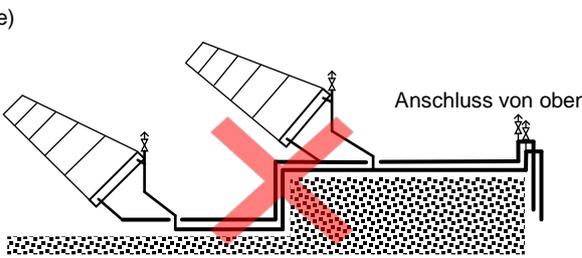
Tabelle 4-3 Neigung von Kollektorreihen.

<p>a)</p> 	<p><b>Horizontale Ausrichtung:</b> Ansprechendes Gesamtbild, weil die Kanten der Kollektorreihen mit den Gebäudekanten fluchten. Für ein günstiges Stagnationsverhalten darf die Lage von Kollektorreihen nicht mehr als <math>\pm 1.5^\circ</math> von der Horizontalen abweichen. Dies entspricht dem Gefälle von Flachdächern.</p>
<p>b)</p>  <p>Gefälle <math>&lt; 1.5^\circ</math></p>	<p><b>Gefälle in Richtung Reihenanschluss:</b> Besonders gute Entleerbarkeit wird erreicht, wenn eine <b>einseitig</b> angeschlossene Kollektorreihe <math>1.5^\circ</math> Gefälle in Richtung der Kollektoranschlüsse hat. Man muss dann ein Entlüftungsventil am gegenüberliegenden Ende der Kollektorreihe vorsehen.</p>
<p>c)</p>  <p>Steigung <math>&lt; 1.5^\circ</math></p>	<p><b>Steigung in Richtung Reihenanschluss:</b> Durch eine Steigung von bis zu <math>1.5^\circ</math> wird die Leerdrückbarkeit nur geringfügig verschlechtert. Eine Steigung von mehr als <math>1.5^\circ</math> ist nicht zulässig. Die Entleerbarkeit würde deutlich schlechter. Ausserdem können Druckstöße auftreten, wenn Flüssigkeit in die dampfgefüllten Kollektoren fliesst.</p>
<p>d)</p> 	<p><b>Parallel geschaltete Vakuumröhrenkollektoren:</b> Direkt durchströmte, parallel geschaltete Vakuum-Röhrenkollektoren müssen möglichst horizontal ausgerichtet sein. Bereits kleine Abweichungen führen zu einer Verschlechterung der Entleerbarkeit. Die Vorlauf- und Rücklaufseite muss separat entlüftet werden können.</p>

### 4.2.2.3 Mehrreihige Kollektorfelder

Tabelle 4-4 zeigt geeignete und ungünstige Anordnungen von Kollektorreihen und Feldleitungen.

Tabelle 4-4 Neigung und Rohrführung der Feldleitung.

<p>a)</p> 	<p><b>Feldleitungen horizontal:</b> Die Kollektorreihen eines Feldes sollen möglichst in einer horizontalen Ebene angeordnet sein. Die Entleerbarkeit der Kollektorreihen ist unabhängig von der Feldleitung, wenn diese horizontal verläuft.</p>
<p>b)</p> 	<p><b>Gefälle in Richtung Steigzone:</b> Ein Gefälle der Feldleitungen in Richtung Steigzone von bis zu 1.5 Grad ist zulässig. Auch hier ist die Entleerbarkeit der Kollektorreihen unabhängig von der Feldleitung.</p>
<p>c)</p> 	<p><b>Steigung in Richtung Steigzone:</b> Bis zu 1.5° Steigung der Feldleitungen in Richtung Steigzone von ist zulässig. Damit die Entleerbarkeit nicht beeinflusst wird, müssen die Kollektoranschlüsse von oben in die Feldleitung geführt werden, wie bei den Varianten b) und c) in Tabelle 4-2.</p>
<p>d)</p> 	<p><b>Unterschiedliche Ebenen, Anschluss von unten:</b> Obwohl die Kollektorreihen entleerbar sind, kann diese Anordnung zu deutlich grösseren Dampf- volumen und Dampfreichweiten führen.</p>
<p>e)</p> 	<p><b>Unterschiedliche Ebenen, Anschluss von oben:</b> Das Kollektorfeld ist nicht entleerbar. Im Vergleich zu den Varianten a) bis c) können Dampf- volumen und Dampfreichweite doppelt so gross sein. Es muss mit Druckstössen gerechnet werden, die zu Schäden führen können.</p>

### 4.2.3 Optimaler Querschnitt von Siphons

Mit einem Siphon kann erreicht werden, dass die Entleerbarkeit eines Kollektorfeldes von der Feldverrohrung unabhängig ist. Dies ist an Beispielen in der Abbildung 4-2 b) und bei Variante c) in der Tabelle 4-3 gezeigt.

Der Dampf wird sich meist über den Siphon hinaus ausbreiten. In den aufsteigenden Leitungen strömt der Dampf gegen herabfließende Flüssigkeit nach oben und kondensiert im Kontakt mit der etwas kühleren Rohrwand und der Flüssigkeit. Dabei treten Druckstöße auf. Wenn man eine einfache Regel beachtet, sind diese Druckstöße viel kleiner als 1 bar und damit unbedenklich:

Der Leitungsquerschnitt eines Siphons soll so bemessen sein, dass die Fließgeschwindigkeit im Betrieb mindestens 1 m/s beträgt.

Dasselbe gilt für Rohre, mit denen die Feldleitungen über einen Hochpunkt an die Steigleitungen angeschlossen werden. Dies ist in allen Varianten der Tabelle 4-4 dargestellt. Für einen spezifischen Durchfluss von 30 l/hm<sup>2</sup> sind die entsprechenden Nennweiten in Abbildung 4-3 dargestellt. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt 1.7 m/s. Dies ist bei kurzen Rohren aus Stahl oder Edelstahl vertretbar. Wellschläuche neigen zu Schwingungen und sind daher nicht geeignet.

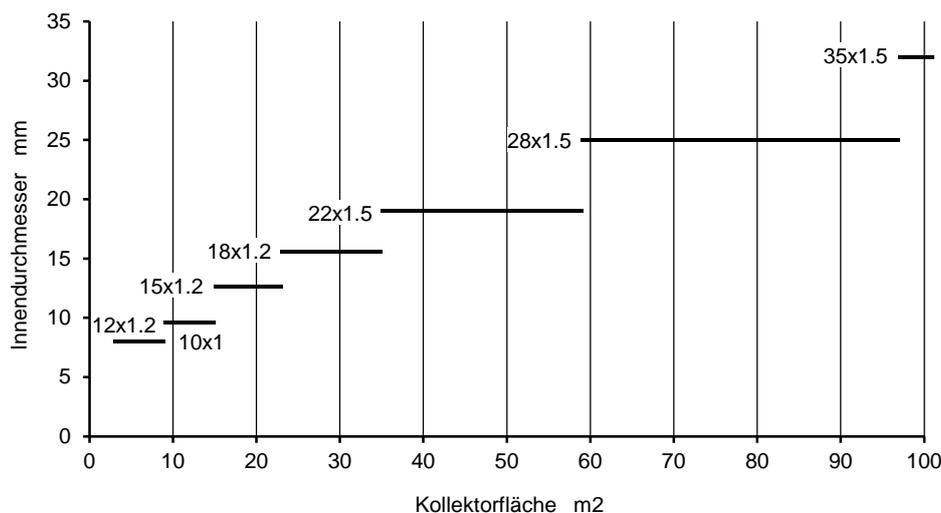


Abbildung 4-3 Rohrdimension des Siphons als Funktion der Kollektorfläche, für einen spezifischen Durchfluss von 30 l/hm<sup>2</sup>.

### 4.2.4 Luftabscheider im Dampfbereich

Bei automatischen Luftabscheidern wird das Entlüftungsventil durch das Gewicht einer Boje betätigt, die auf dem Flüssigkeitsspiegel im Luftabscheider schwimmt. Normale Luftabscheider aus der Heizungstechnik können nicht zwischen Luft und Dampf unterscheiden. Im Stagnationsfall würden diese Dampf ablassen und somit Flüssigkeitsverlust verursachen. Es gelten folgende Regeln:

- Luftabscheider müssen durch einen Absperrhahn vom Kreislauf getrennt werden oder automatisch schliessen, bevor die Temperatur 100 °C erreicht.
- Luftabscheider, Hähne und Ventile müssen für Dampf bis 180 °C geeignet sein.
- Im Freien angeordnete Luftabscheider müssen witterungsbeständig sein.

Abbildung 4-4 a) zeigt die schematische Darstellung eines automatisch schliessenden Luftabscheiders. Bevor die Temperatur die Siedetemperatur erreicht, wird die Boje in der oberen Position festgehalten und das Entlüftungsventil bleibt geschlossen. Nach Abbildung 4-4 b) besteht der Luftabscheider aus einem Separator, in dem die Luftblasen aufsteigen können, und einem automatischen Entlüftungsventil. Zwischen diesen Elementen ist ein handbetätigter Absperrhahn angeordnet. Dieser muss nach dem Entlüften der Anlage von Hand geschlossen werden. Abbildung 4-4 c) stellt die klassische Anordnung eines Entlüftungsventils am Hochpunkt dar. Entlüftung ist nur bei ruhender Anlage möglich. Die Anordnung nach Abbildung 4-4 d) ist verboten, weil bei Stagnation Dampf entweichen würde.

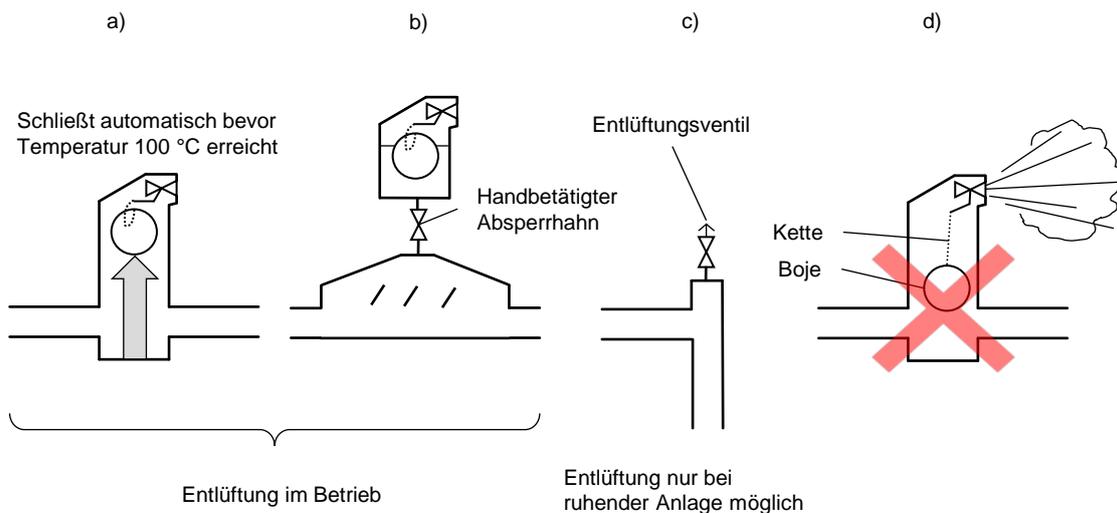


Abbildung 4-4 Entlüftungsmöglichkeiten im Dampfbereich.

### 4.3 Rohrführung und Armaturen im Technikraum

Der Dampf kann Temperaturen von über 150 °C haben. Die Kreislaufkomponenten nach Tabelle 4-5 müssen daher zuverlässig vor Dampf und heissem Kondensat geschützt werden.

Tabelle 4-5 Kreislaufkomponenten ausserhalb des Dampfbereiches.

Komponente	Zulässige Temperatur	Bemerkungen
	°C	
Pumpe	110	
Durchflussmesser	90..130	Je nach Fabrikat
Drucksensor	90..110	
Rohrfedermanometer	60..150	Datenblatt beachten
Ausdehnungsgefäss	50	Gefährdetes Bauteil ist die Membran



### 4.3.2 Dampf dringt nie bis zum Technikraum vor

In der Heizungstechnik wird das Ausdehnungsgefäß üblicherweise auf der Saugseite der Pumpe an den Kreislauf angeschlossen. Nach VDI 4708 (2012) wird diese Art der Einbindung **Saugdruckhaltung** genannt. Diese ist bei Solaranlagen nach Abbildung 4-6 nur dann zulässig, wenn weder Dampf noch heisses Kondensat die Pumpe erreichen kann.

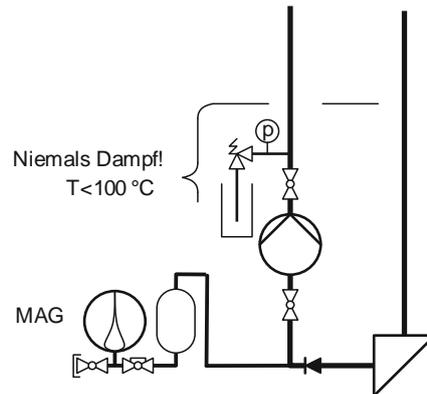


Abbildung 4-6 Saugseitiger Anschluss des MAG. Standard bei Heizungsanlagen. Nur zulässig, wenn weder Dampf noch heisses Kondensat die Pumpe erreichen kann.

### 4.3.3 Anordnung des Rückschlagventils

Wichtig ist, dass der Dampf die Kollektoren über die Vorlaufleitung **und** die Rücklaufleitung entleeren kann. Daher muss das Rückschlagventil in Strömungsrichtung **vor** dem Anschluss der Ausdehnungsleitung sitzen. Dies ist in den Abbildungen 4-5 und 4-6 dargestellt.

### 4.3.4 Anordnung des Sicherheitsventils

Die Verbindungsleitung zwischen Kollektorfeld und Sicherheitsventil darf nicht absperrrbar sein. Falls das Sicherheitsventil gemäss Abbildung 4-5 direkt mit der Rücklaufleitung verbunden ist, muss am Austritt ein metallisches Rohr angeschlossen sein, das in einen Behälter führt. Der Behälter muss für Glykol und Temperaturen von 150 °C geeignet sein. Wenn man das Sicherheitsventil zwischen Ausdehnungsgefäß und Vorschaltgefäß anordnet, kann anstelle des Rohres ein Kunststoffschlauch eingesetzt werden, der in einen kostengünstigen Kunststoffbehälter führt.

- Rückschlagventile müssen so angeordnet sein, dass der Dampf die Flüssigkeit gleichzeitig über den Vorlauf **und** den Rücklauf leerdrücken kann.
- Das Kollektorfeld darf gegenüber dem Sicherheitsventil nicht absperrrbar sein.

## 4.4 Hinweise zur Dimensionierung

### 4.4.1 Anlagendimensionierung

Zur hydraulischen Dimensionierung grosser Solaranlagen wurde das Programm THD entwickelt (Eismann et al. 2017). THD führt die folgenden Dimensionierungsaufgaben automatisch aus:

- Rohrnetz- und Pumpendimensionierung
- Dimensionierung des Ausdehnungsgefässes
- Nachweis der Entlüftbarkeit
- Dampfvolumen und Dampfreichweite bei Stagnation

Dies ist die weitaus effizienteste und sicherste Dimensionierungsmethode, weil sie die gegenseitige Abhängigkeit der Dimensionierungsaufgaben berücksichtigt. Über eine Schnittstelle können Anlagendaten und Simulationsergebnisse aus Polysun importiert werden. Falls THD oder ein gleichwertiges Programm nicht verfügbar ist, soll man sich an folgende Regeln halten:

- Mehrreihige Kollektorfelder sollen nach Tichelmann angeschlossen werden.
- Die Querschnitte der Vor- und Rücklaufleitung sind so wählen, dass die Fließgeschwindigkeit zwischen 0.5 und 1 m/s liegt.
- Für das Dampfvolumen soll das doppelte Kollektolvolumen geschätzt werden. Genauere Voraussagen sind mit der Methode nach Scheuren (2008, Kap. 7.4) möglich. Diese lässt sich leicht in Excel programmieren.

Wenn die Dimensionierung auf Schätzungen beruht, kann das Potenzial für Kostenoptimierung nicht voll ausgeschöpft werden. Ausserdem können Fehldimensionierungen nicht ausgeschlossen werden. Diese können Betriebsstörungen kostspielige Schadenfälle zur Folge haben.

### 4.4.2 Membran-Druckausdehnungsgefäss

Das Membran-Druckausdehnungsgefäss (MAG) muss in der Ausführungsplanung rechnerisch dimensioniert werden. Eine grobe Abschätzung ist aus Gründen der Betriebssicherheit nicht zulässig. Folgende Resultate der Dimensionierung gehören zur Dokumentation der Anlage:

- Gefässvolumen
- Vordruck als Funktion der Gefässstemperatur
- Systemdruck als Funktion der mittleren Kreislaufstemperatur

Für die Dimensionierung verwendet man die Methode nach VDI 4908 (2012) oder die neue Methode nach Eismann (2017), die in THD integriert ist. Diese Methode berücksichtigt zusätzlich die Unsicherheiten der Druckmessung und den Einfluss der Gefässstemperatur. Ausserdem werden der Vordruck und der Systemdruck in einfach lesbaren, anlagenspezifischen Diagrammen als Funktion der Kreislauf- und Gefässstemperatur dargestellt.

Im DGS-Ordner (DGS 2012) ist ein vereinfachtes Verfahren beschrieben, das auf der VDI 4708 (2012) basiert. Es sollte nur für Abschätzungen verwendet werden, weil der Einfluss der Kreislaufstemperatur auf den Systemdruck nicht berücksichtigt ist.

Es ist wichtig, dass die Dimensionierung auf der sicheren Seite liegt. Das Gefässvolumen soll daher grosszügig bemessen werden. Die Grösse des Vordrucks wird nicht auf der Baustelle, sondern bei

der Anlagenplanung berechnet. Nach VDI 4708 ist der Vordruck als Überdruck über dem Atmosphärendruck definiert. Der Vordruck setzt sich zusammen aus dem statischen Druck der Flüssigkeit  $p_{st}$  über dem MAG, dem Dampfüberdruck  $p_D$  und dem Pumpendruck  $\Delta p_P$ . Hinzu kommt noch ein Zuschlag  $\Delta p_{z1}$  von mindestens 0.2 bar, der den Gasdruckverlust berücksichtigt. Für Saugdruckhaltung gilt,

$$p_0 \geq p_{st} + p_D + \Delta p_{z1} \quad (1.1)$$

Bei druckseitigem Anschluss (Nachdruckhaltung) muss man noch den Pumpendruck addieren,

$$p_0 \geq p_{st} + p_D + \Delta p_P + \Delta p_{z1} \quad (1.2)$$

- Das Volumen des MAG, der Vordruck und der Systemdruck müssen bereits in der Ausführungsplanung festgelegt werden, nicht erst auf der Baustelle.
- Unterschiede zwischen druckseitigem Anschluss (Standard) und saugseitigem Anschluss beachten.
- Ein grosszügig gewähltes Gefässvolumen erhöht die Betriebssicherheit.

#### 4.4.3 Kompressordruckhaltung

Wenn der Platz im Technikraum für ein MAG nicht ausreicht, setzt man gerne eine Kompressordruckhaltung ein. Für das gleiche Ausdehnungsvolumen benötigt diese ein viel kleineres Gefässvolumen. Bei der Dimensionierung einer Solaranlage müssen die Unterschiede zwischen MAG und Kompressordruckhaltung beachtet werden:

Bei einem MAG wird das Gas im Gasraum komprimiert. Daher steigt der Druck mit zunehmendem Dampfvolument an. Entsprechend steigt auch die Siedetemperatur in den Kollektoren an. Dadurch sinkt der Wirkungsgrad. Die Restmenge in den Kollektoren verdampft weniger schnell. Die Dampfleistung der stagnierenden Kollektoren wird entsprechend schwächer.

Bei einer Kompressordruckhaltung steigt der Druck bei Stagnation nicht an. Daher steigt auch die Siedetemperatur in den Kollektoren bei Stagnation nicht an. Der Wirkungsgrad sinkt nicht. Falls derselbe Anfangsdruck wie beim MAG gewählt wird, verdampft die Restmenge in den Kollektoren in kürzerer Zeit. Die Dampfleistung der stagnierenden Kollektoren ist in dieser Zeit entsprechend höher. Bei gleichem Anfangsdruck ist die Dampfreichweite bei einer Kompressordruckhaltung viel grösser als bei einer Druckhaltung mit MAG.

Damit die Dampfreichweite bei MAG und Kompressordruckhaltung etwa gleich gross ist, muss bei der Kompressordruckhaltung ein um 2 bar höherer Druck eingestellt werden. Die Bemessungsregeln für Heizungsanlagen gelten nicht!

Bei einer Kompressordruckhaltung muss der Druck 2 bar höher sein als der minimale Anfangsdruck einer Druckhaltung mit MAG. Geringere Drücke führen zu grösseren Dampfreichweiten als bei einer Druckhaltung mit MAG.

#### 4.4.4 Kondensator

Es genügt meistens, die Dampfreichweite durch ein entsprechend gross dimensioniertes Vorschaltgefäss zu begrenzen. Für grosse Leistungen sind Kondensatoren erforderlich. Sehr gut geeignet sind Rippenrohr-Heizkörper aus Stahl, die beispielsweise durch die Coolson AG <http://www.coolson.ch/> angeboten werden. Die in den Datenblättern angegebenen Leistungen sind auf die Anwendung als Heizkörper bezogen. Für den Einsatz als Kondensator verwendet man besser die Berechnungsformeln im VDI Wärmeatlas (2013, F2, S.760).

Abbildung 4-7 zeigt die Anordnung eines Kondensators in der Ausdehnungsleitung. Dieser soll horizontal oder leicht in Richtung MAG geneigt sein. Ein Kondensator allein reicht nicht aus. Das Ausdehnungsgefäss muss vor dem heissen Kondensat geschützt werden. Dazu dient das Vorschaltgefäss.

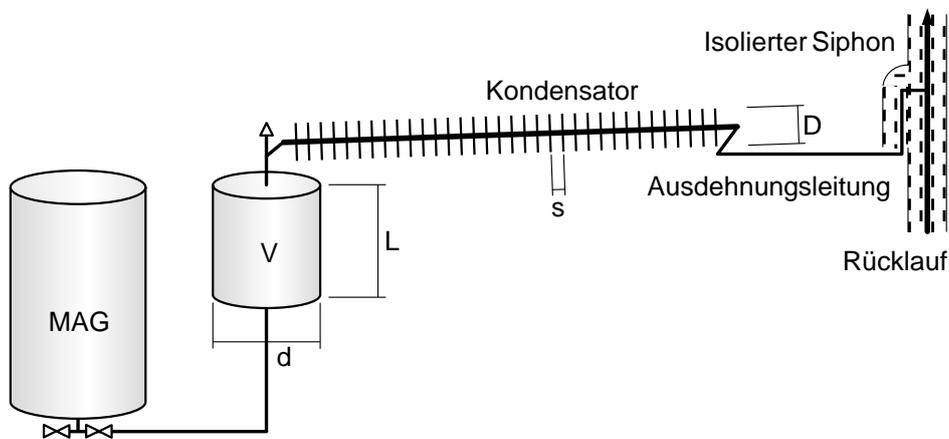


Abbildung 4-7 Anordnung des Kondensators und des Vorschaltgefässes in der Ausdehnungsleitung (Eismann et al. 2017)

#### 4.4.5 Vorschaltgefäss

Das Vorschaltgefäss (VSG) dient dazu, den heissen Kreislaufinhalt vom MAG fernzuhalten. Aus folgendem Grund darf die mittlere Temperatur im MAG 50 °C nicht überschreiten:

Die Membran eines MAG ist nicht vollkommen diffusionsdicht. Im Lauf der Zeit wird Gas durch die Membran in den Kreislauf diffundieren. Die Diffusion steigt mit zunehmender Temperatur stark an. Man muss also dafür sorgen, dass die Membran im MAG möglichst kühl bleibt. Für den Einsatz in Solaranlagen gelten folgende Regeln:

- Falls das Vorschaltgefäss nicht rechnerisch dimensioniert werden kann (THD oder gleichwertiges Programm) soll das Volumen dem Volumen der Kollektoren entsprechen.
- Der Anschluss an den Kreislauf muss oben sein. Der Anschluss zum Ausdehnungsgefäss muss unten sein.

In den Datenblättern der Ausdehnungsgefässe sind viel höhere Werte für die zulässige Temperatur der Membran angegeben. Dies gilt aber nur für die Beständigkeit des Membranwerkstoffes und sagt nichts über den Diffusionswiderstand aus.

## 4.5 Geeignetes Wärmeträgerfluid

Wasser-Propylenglykol Gemische für Solaranlagen sind, je nach Fabrikat, für Dauertemperaturen von 170-180 °C geeignet, kurzzeitig sogar bis 230 °C. Der Korrosionsinhibitor ist flüssig, sodass sich beim Verdampfen keine Rückstände bilden. Bei Temperaturen über 200 °C werden auch diese Gemische langsam zersetzt und in teerartige Substanzen umgewandelt. Für Dauertemperaturen über 200 °C werden höher siedende Glykole angeboten.

Die Datenblätter können von den Internetseiten der Hersteller heruntergeladen werden. In diesen Datenblättern ist auch angegeben, für welche Rohrwerkstoffe der Korrosionsinhibitor geeignet ist und welche Dichtungswerkstoffe gegen die Flüssigkeit beständig sind.

- Nur Wasser-Glykol Gemische verwenden, die für Solaranlagen zugelassen sind.
- Einsatztemperaturen nach Datenblatt beachten.

## 5 Partielle Stagnation vermeiden

Partielle Stagnation tritt **nicht** auf, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

1. Der Druck an den Hochpunkten und im Kollektorfeld ist ausreichend hoch.
2. Der Kreislauf ist hinreichend entlüftet und, falls erforderlich, entgast.
3. Alle Kollektoren des Kollektorfeldes sind ausreichend durchströmt.

Diese drei Punkte lassen sich messtechnisch überwachen. Die erforderlichen Sensoren sind in der Abbildung 5-1 dargestellt.

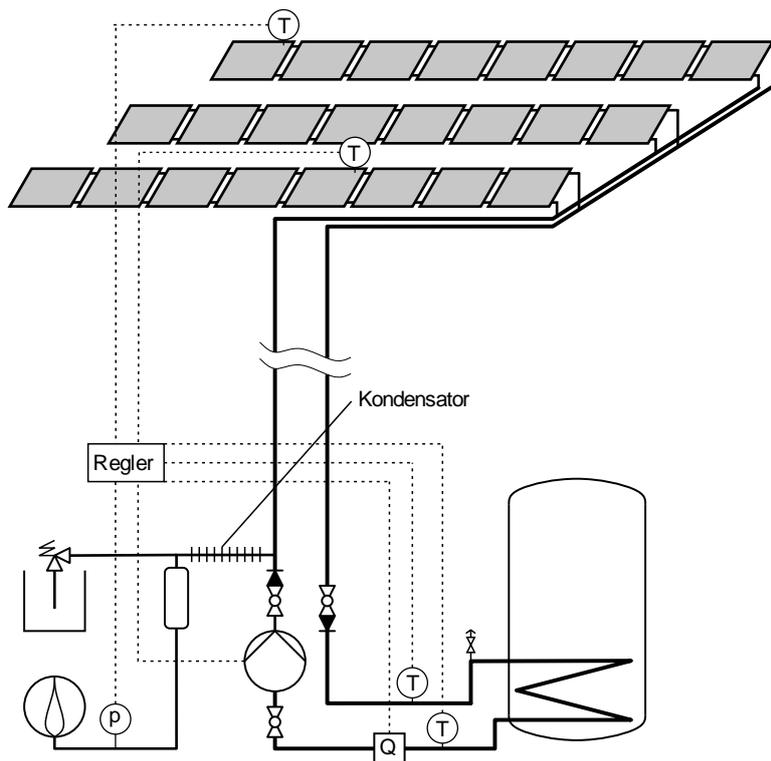


Abbildung 5-1 Sensoren für den sicheren und energetisch effizienten Betrieb.

### 5.1 Mehrere Kollektorfühler in grossen Kollektorfeldern

Grosse, weitverzweigte Kollektorfelder sind nie völlig homogen durchströmt. Der Kollektor unmittelbar am Feldanschluss ist am besten durchströmt und hat daher die tiefste Austrittstemperatur. Der am weitesten vom Feldanschluss entfernte Kollektor wird am schlechtesten durchströmt. Er wird daher am wenigsten gut gekühlt und hat entsprechend die höchste Austrittstemperatur. Partielle Stagnation beginnt daher am ehesten in diesem Kollektor. Grosse Kollektorfelder müssen daher mit mindestens zwei Temperaturfühlern ausgerüstet sein. Der eine Fühler liefert das Einschaltkriterium für den Solarregler. Der zweite Fühler soll in dem Kollektor mit dem geringsten Durchfluss angeordnet sein. Der Beginn der partiellen Stagnation kann anhand der Temperatursignale festgestellt werden: 1) Die Temperaturdifferenz der beiden Fühler nimmt rasch zu. 2) Der Temperaturfühler im Kollektor mit dem geringsten Durchfluss erreicht oder übersteigt die

Siedetemperatur. Damit festgestellt werden kann, ob die Temperatur der Siedetemperatur entspricht, muss der zugehörige Druck bekannt sein.

- Damit partielle Stagnation festgestellt werden kann, muss der Regler mindestens zwei Kollektortemperaturen messen und vergleichen.
- Sobald partielle Stagnation auftritt, muss die Solarkreispumpe ausgeschaltet werden.

## 5.2 Warum braucht es einen Drucksensor?

Der korrekt eingestellte Druck ist die wichtigste Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb. Aus diesem Grund soll, mindestens bei grossen Anlagen, der Druck durch einen Sensor gemessen und durch den Regler aufgezeichnet werden. Folgende Fehler und Betriebsstörungen können anhand des Druckverlaufes frühzeitig erkannt werden, bevor Schäden auftreten:

- Flüssigkeitsverlust durch ein kleines Leck.
- Flüssigkeitsverlust durch grosses Leck infolge Rohrbruch, beispielsweise infolge Frostschaden oder Druckstoss.
- Flüssigkeitsverlust durch Ansprechen des Sicherheitsventils.
- Zu klein dimensioniertes oder falsch eingestelltes Ausdehnungsgefäss.

Der Drucksensor muss langzeitstabil sein. Sensoren mit Keramikmembran sind gut geeignet. Der Sensor soll an einem möglichst kühlen Ort angeordnet werden, beispielsweise zwischen dem Vorschaltgefäss und dem Ausdehnungsgefäss.

- Durch Aufzeichnen des Drucks und Fernüberwachung können Betriebsstörungen erkannt werden, bevor Schadenfälle eintreten.
- Nur wenn der Druck laufend aufgezeichnet wird, kann man die Ursache für Schadenfälle mit Sicherheit ermitteln.
- Nur wenn man die Ursache genau kennt, kann man die richtigen Massnahmen treffen.

## 6 Auswertung von TRACE-Simulationen

Die Einflüsse von Rohrführung und Neigung von Kollektorreihen auf das Stagnationsverhalten wurden durch Simulationsrechnungen untersucht. Dazu wurde das thermohydraulische Rechenprogramm TRACE eingesetzt, das zur Störfallanalyse von Kernkraftwerken entwickelt wurde. TRACE eignet sich hervorragend zur Simulation der Strömung von Flüssigkeit und Dampf in einer stagnierenden Solaranlage. Es wurden Solaranlagen mit Kollektorfeldern nach Tabelle 6-1 untersucht. Das Kollektorfeld besteht aus Flachkollektoren vom Typ FK2 H4 (Ernst Schweizer AG, Metallbau)

Tabelle 6-1 Mit TRACE untersuchte Situationen

Situation	Kollektorfeld
Kollektorfeld in einer Ebene, horizontal	2 Reihen mit 7 Kollektoren, 4m Reihenabstand
Kollektorfeld in Richtung Reihenanschluss fallend	
Kollektorfeld in Richtung Reihenanschluss steigend	
Kollektorfeld in einer Ebene, horizontal	4 Reihen mit 7 Kollektoren, 14m Reihenabstand
Kollektorfeld auf 4 Ebenen, Anschluss unten	
Kollektorfeld auf 4 Ebenen, Anschluss oben	

Die Feldleitungen sind über einen Hochpunkt mit den Steigleitungen verbunden. Der Hochpunkt liegt 1 m über der Feldleitung. Die vor- und rücklaufseitigen Steigleitungen führen 10 m nach unten in den Technikraum.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate zu erzielen, wurden alle Anlagen mit Kompressordruckhaltung modelliert. Der Druck im Kollektorfeld nimmt praktisch nur dadurch zu, dass der Flüssigkeitsspiegel in den Steigleitungen sinkt.

### 6.1 Verbindung von Kollektorreihe zur Feldleitung

Abbildung 6-1 zeigt die in das Ausdehnungsgefäß verdrängte Flüssigkeit für zwei unterschiedliche Rohrführungen der Reihenanschlussleitungen. Die Varianten a) und c) sind praktisch gleichwertig.

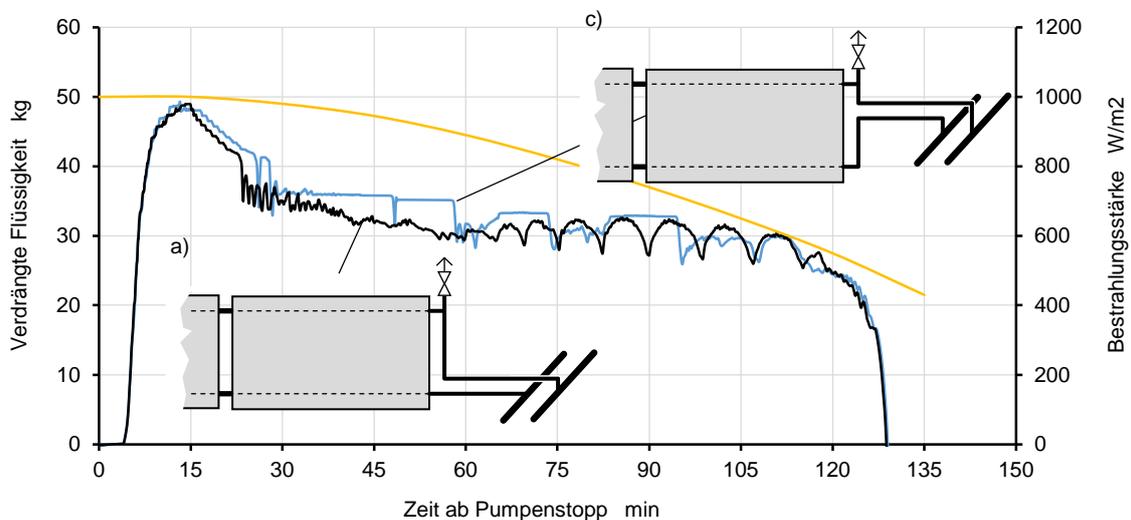


Abbildung 6-1 Einfluss der Leitungsführung zwischen Kollektoranschluss und Feldleitung.

## 6.2 Neigung von Kollektorreihen

Abbildung 6-2 zeigt die in das Ausdehnungsgefäß verdrängte Flüssigkeit für unterschiedliche Neigungen der Kollektorreihe. Gefälle der Kollektorreihe von  $-1.5^\circ$  in Richtung Kollektoranschluss ist vorteilhaft. Bei Dampfbildung kann die Flüssigkeit aus den Sammelleitungen in die Feldleitungen fließen. Eine Steigung von  $+1.5^\circ$  ist nur unwesentlich schlechter als die horizontale Anordnung. Eine Steigung von über  $5^\circ$  ist ungünstig und darf nicht realisiert werden.

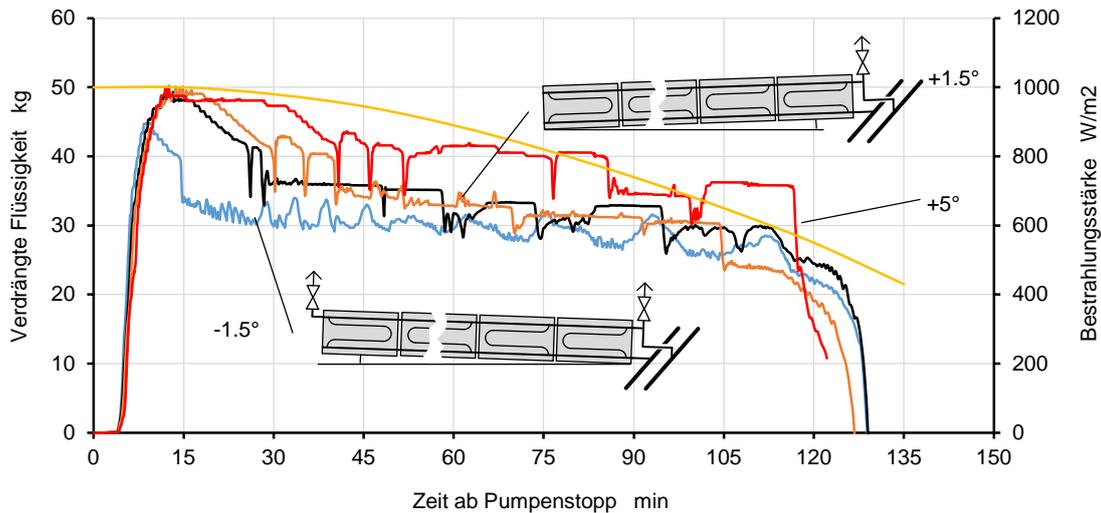


Abbildung 6-2 Einfluss der Reihenneigung auf die durch den Dampf verdrängte Flüssigkeitsmenge.

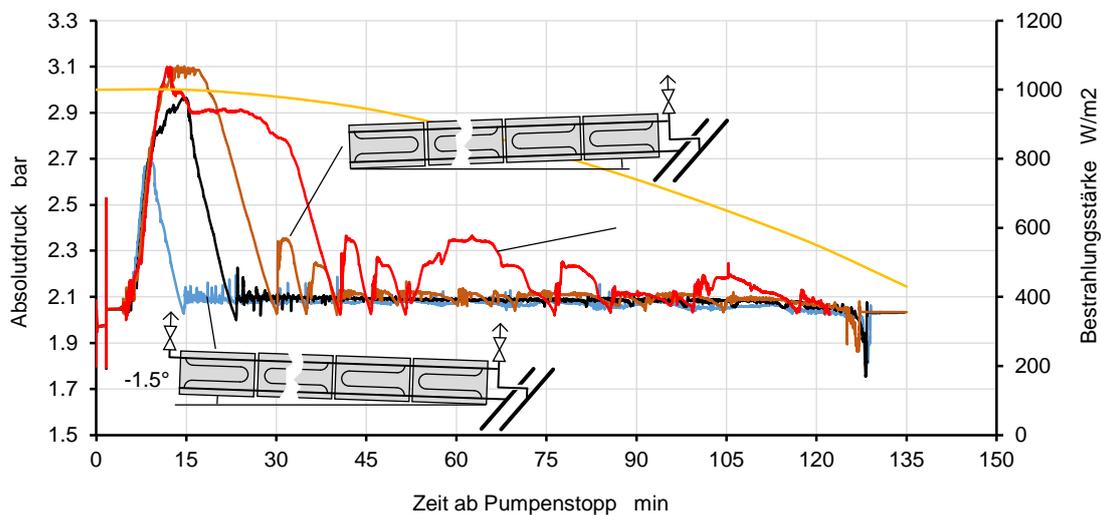


Abbildung 6-3 Druckverlauf bei unterschiedlicher Reihenneigung.

Abbildung 6-3 zeigt den Verlauf der Drücke bei unterschiedlichen Neigungen der Kollektorreihe. Ein Druckanstieg über 2.1 bar zeigt an, dass sich der Dampf in die vertikalen Steigleitungen ausbreitet. Wie zu erwarten, weist die Variante mit  $1.5^\circ$  Gefälle den geringsten Druckanstieg auf. Bei einer Steigung von  $+1.5^\circ$  treten Oszillationen auf, die aber rasch abklingen. Bei einer Steigung von  $5^\circ$  sind die Oszillationen wesentlich stärker. Damit verbunden sind entsprechende Bewegungen des

Kreislaufinhaltes. Diese führen dazu, dass weite Bereiche des Kreislaufs auf hohe Temperaturen aufgeheizt werden, was unerwünscht ist.

### 6.3 Kollektorreihen auf unterschiedlichen Ebenen

Ein Kollektorfeld, bestehend aus vier Reihen mit je 7 Flachkollektoren, wurde in drei unterschiedlichen Anordnungen untersucht. In der Standardanordnung verlaufen die Feldleitungen horizontal und die Kollektoren befinden sich in derselben horizontalen Ebene. In zwei weiteren Varianten sind die Kollektorreihen auf vier unterschiedlichen Höhen angeordnet, mit jeweils 1 m Höhendifferenz, analog zu den Varianten d) und e) in der Tabelle 4-4.

Die Länge der Feldleitungen zwischen den Reihen beträgt je 14 m. In der einen Variante befindet sich der Anschluss entsprechend Tabelle 4-4 d) unten. Das Kollektorfeld ist somit entleerbar. In der anderen Variante befindet sich der Anschluss entsprechend Tabelle 4-4 e) oben. Das Kollektorfeld ist nicht entleerbar.

Abbildung 6-4 zeigt die Masse der verdrängten Flüssigkeit als Funktion der Zeit. Bei der Standardanordnung steigt der Wert kurzzeitig auf 100 kg an und fällt anschliessend auf rund 65 kg ab. Bei der nicht entleerbaren Variante sind die verdrängte Masse und damit das Dampfvolumen rund doppelt so gross! Dieses Resultat würde man qualitativ auch ohne Simulation erwarten. Überraschend ist aber, dass die verdrängte Masse bei der entleerbaren Variante nur geringfügig kleiner ist.

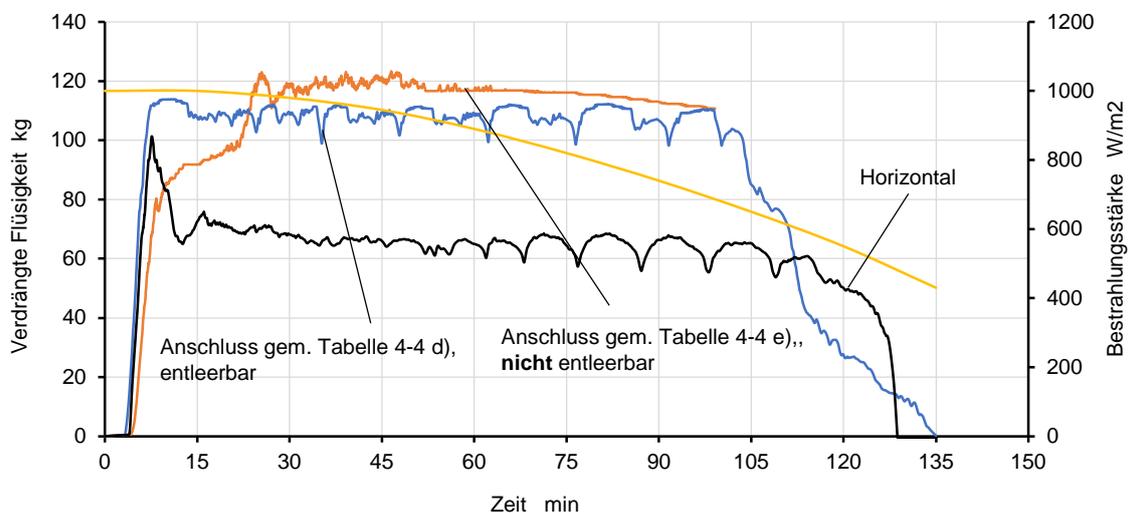


Abbildung 6-4 Durch den Dampf verdrängte Flüssigkeitsmenge bei Kollektorreihen auf unterschiedlicher Höhe.

Abbildung 6-5 zeigt den Druckverlauf als Funktion der Zeit. Im Vergleich zur Standardanordnung zeigt die treppenartige, entleerbare Variante periodische Druckschwankungen. Diese sind auf den Eintritt von Flüssigkeit in den überhitzten Absorber zurückzuführen. In der nicht entleerbaren Variante dringt der Dampf bis 10 m tief in den Technikraum vor. Daher ist der Druck rund 1 bar höher.

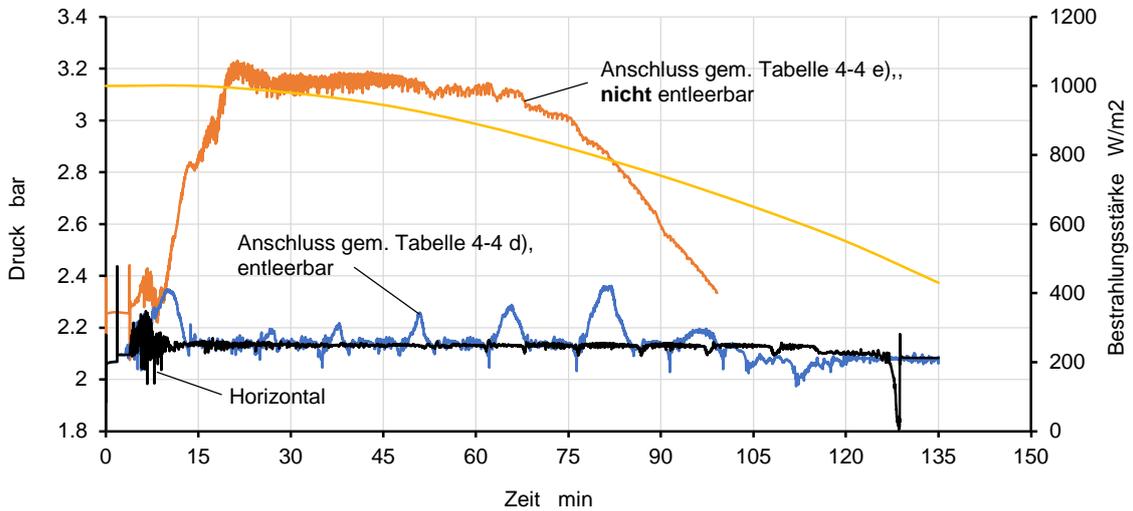


Abbildung 6-5 Druckverlauf bei Kollektorreihen auf unterschiedlicher Höhe.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Stagnation ist grundsätzlich beherrschbar, wenn Regeln für die hydraulische Verschaltung von Kollektorfeldern und für die Anordnung von Kreislaufkomponenten im Technikraum beachtet werden. Diese Regeln wurden auf der Grundlage von Erfahrung, aus der Literatur und aus den Resultaten von thermohydraulischen Simulationsrechnungen abgeleitet. Die Anwendung dieser Regeln erhöht die Planungssicherheit und minimiert das Risiko von Betriebsstörungen und Schadenfällen durch Stagnation.

Es wurde gezeigt, dass man das Stagnationsverhalten nur bei der Anordnung von Kollektorreihen in einer horizontalen Ebene intuitiv richtig abschätzen kann. Bei der Anordnung auf unterschiedlichen Ebenen können Voraussagen völlig falsch sein.

Die hydraulische Dimensionierung von Solaranlagen nach Erfahrungswerten und Faustformeln ist problematisch. Vollständige Planungssicherheit bei gleichzeitiger Kostenoptimierung erreicht man nur durch Simulation, wie es bei der energetischen Dimensionierung üblich ist.

Die im Bericht dargestellten Regeln können direkt auf folgende Kollektortypen angewendet werden:

1. Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern und externen Sammelleitungen.
2. Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern und integrierten, mit dem Absorber verbundenen Sammelleitungen.
3. Direkt durchströmte Vakuumröhrenkollektoren mit U-förmigem Absorberrohr in horizontaler Anordnung.

Für diese Kollektortypen existieren praxistaugliche Modelle für die Simulation. Es ist geplant, die Regeln für folgende, ebenfalls weit verbreitete Typen zu erweitern:

4. Flachkollektoren mit Harfenabsorber, horizontalen Absorberrohren und oberliegenden Anschlüssen für die Serienschaltung in horizontalen Reihen.
5. Flachkollektoren mit Harfenabsorber, deren Absorberrohre in Neigungsrichtung verlaufen, mit oberliegende Anschlüsse für die Serienschaltung in horizontalen Reihen.
6. Heat-Pipe Vakuumröhrenkollektoren mit trockener und nasser Anbindung.

Es ist ausserdem geplant, sowohl die bestehenden als auch die neuen Modelle zu validieren. Dazu soll wiederum das thermohydraulische Rechenprogramm TRACE eingesetzt werden, sowie gezielte Versuche an geeigneten Solaranlagen.

## 8 Literatur

- DGS (2012) Leitfaden Solarthermische Anlagen. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Landesverband Berlin Brandenburg e.V., Berlin,
- Eismann R. (2014) Thermohydraulik von Solaranlagen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, doi: 10.3929/ethz-a-010138185, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:8539/eth-8539-02.pdf>
- Eismann R. (2017) Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen : Theorie und Praxis der kostenoptimierenden Anlagenplanung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 978-3-658-07124-0,
- Eismann R., Föller F., Witzig A. (2017) Programm THD: Thermohydraulisches Dimensionierungsprogramm für Solaranlagen,ETH Zürich, Institut für Energietechnik, Labor für Kernenergiesysteme, Bundensamt für Energie BFE, Bern SI/501387-01, <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=38131>
- Frank E., Mauthner F., Fischer S. (2015) Overheating prevention and stagnation handling in solar process heat applications IEA SHC Task 49: Solar Process Heat for Production and Advanced Applications, Technical Report A.1.2, [http://task49.iea-shc.org/Data/Sites/7/frank\\_iea\\_shc\\_task49\\_overheatingstagnationreport\\_approved\\_v-2-3.pdf](http://task49.iea-shc.org/Data/Sites/7/frank_iea_shc_task49_overheatingstagnationreport_approved_v-2-3.pdf)
- Hausner R., Fink C., Wagner W., Riva R., Hillerns F. (2003) Entwicklung von thermischen Solarsystemen mit unproblematischem Stagnationsverhalten Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie, Wien <http://www.aee-intec.at/Uploads/dateien4.pdf>
- Rommel M., Siems T., Schüle K., Mehnert S., Thoma C. (2007) Schlussbericht zum Teilprojekt: Entwicklung von Techniken zur Beherrschung des Stillstandsbetriebes,Fraunhofer Gesellschaft für solare Energiesysteme ISE, Freiburg
- Scheuren J. (2008) Untersuchungen zum Stagnationsverhalten solarthermischer Kollektorfelder. Dissertation, Kassel University Press, doi: <http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-430-1>
- VDI (2012) VDI 4708: Druckhaltung, Entlüftung, Entgasung, Blatt 1. Beuth Verlag, Berlin
- VDI (2013) VDI-Wärmeatlas. 11. Aufl. Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, doi:10.1007/978-3-642-19981-3