
Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen

Ralph Eismann

Thermohydraulische Dimensionierung von Solaranlagen

Theorie und Praxis der kostenoptimierenden
Anlagenplanung

Ralph Eismann
Institut für Energietechnik
ETH Zürich
Zürich, Schweiz

ISBN 978-3-658-07124-0 ISBN 978-3-658-07125-7 (ebook)
DOI 10.1007/978-3-658-07125-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

In den vielen Jahren Berufstätigkeit auf dem Gebiet der Solarthermie habe ich Kollektor- und Anlagensysteme entwickelt, Solaranlagen geplant, gebaut und in Betrieb genommen.

Dabei ist mir immer wieder aufgefallen, dass wir einerseits umfassende Theorien und solides Handlungswissen zur Thermodynamik von Solaranlagen besitzen, andererseits unsere Methoden zur anlagentechnischen Dimensionierung vergleichsweise primitiv sind. Die dadurch bedingte Planungsunsicherheit führte in der Vergangenheit zu Betriebsstörungen und kostspieligen Schadenfällen, verursacht durch Stagnation oder Strömungsblockaden durch Luft im Kreislauf. Als Ursache konnte häufig erst im Nachhinein eine Fehldimensionierung vermutet werden. Auch war es bisher nicht möglich, das hydraulische Netz einer Solaranlage kostenoptimal zu planen und dieses Optimum rechnerisch nachzuweisen. Dies sind nach meiner Überzeugung die Hauptursachen dafür, dass es bisher nicht gelungen ist, die Anlagenkosten signifikant zu senken. Es besteht folglich ein beträchtliches Potenzial zur Kostensenkung, sowohl bei den Anlagen selbst als auch bei der Planung. Ich habe mich daher nach neun Jahren Tätigkeit als Entwicklungsleiter im Bereich Sonnenenergiesysteme der Ernst Schweizer AG entschlossen, an die ETH Zürich zu wechseln. Dort habe ich im Rahmen einer Dissertation Grundlagen für eine verbesserte Planungssicherheit erarbeitet.

Teile dieser Dissertation sowie die Resultate des daran anschließenden Nachfolgeprojektes bilden die Grundlage des vorliegenden Buches. Dieses behandelt die Rohrnetzberechnung, die Dimensionierung von Ausdehnungsgefäßen sowie die Nachweise der Entlüftbarkeit und der Stagnationssicherheit in einer Form, die für numerische Rechnungen geeignet ist. Bei der Herleitung der entsprechenden Modelle habe ich berücksichtigt, dass die zugrundeliegenden Erhaltungsgleichungen gekoppelt sind. Die Teilaufgaben der Dimensionierung werden daher nicht, wie bisher üblich, getrennt betrachtet, sondern mit den Methoden der Thermohydraulik gelöst, welche die Thermodynamik und der Fluidmechanik vereint und außerdem die Beschreibung von Zweiphasen-Strömungsphänomene ermöglicht. Die Theorie der Thermohydraulik hat ihren Ursprung in der Nukleartechnik. Die Störfallsicherheit von Kernkraftwerken wird heute mit Hilfe fortschrittlicher thermohydraulischer Simulationsprogramme nachgewiesen. Diese beruhen ihrerseits auf zahlreichen, sowohl theoretisch als auch experimentell gut abgesicherten Modellen. Auf den ersten Blick mag es erstaunen, dass diese Theorie mit Erfolg auch in der Solarthermie angewendet werden kann. In der Tat treten in Kernkraftwerken und in Solaranlagen qualitativ dieselben Strömungsphänomene auf, die daher auch mit denselben Methoden behandelt werden können.

Um eine Solaranlage planen und ausführen zu können, sind thermohydraulische Werkzeuge allein nicht ausreichend. Es ist ein ebenso profundes Fachwissen und Können im Bereich des Hochbaus, der Installationstechnik und der Werkstoffkunde erforderlich. Ich habe mich daher bemüht, die theoretischen Werkzeuge stets im Kontext der Anwendung darzustellen und dabei die praktischen Fragestellungen zur Integration von Solaranlagen in Gebäuden nicht zu vernachlässigen.

Das Buch richtet sich an ein breites Publikum aus Wissenschaft und Praxis. Es soll insbesondere Personen, die sich mit der Planung von Solaranlagen und der Entwicklung von Sonnenkollektoren und sonstigen Anlagenkomponenten befassen, als Nachschlagewerk dienen. Die Kapitel zur Entlüftung und Stagnation geben einen praxisnahen und damit leicht verständlichen

Einstieg in die Theorie der Zweiphasenströmung. Damit kann das Buch auch in anderen Fachgebieten des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik wertvoll sein. Die Modelle und Berechnungsverfahren, insbesondere zur Rohrnetzrechnung, Entlüftung und Druckhaltung, können ohne weiteres auch in anderen Gebieten der Anlagen- und Gebäudetechnik eingesetzt werden.

Das Stagnationsverhalten einer Solaranlage wird maßgeblich durch die Eigenschaften des Kollektorfeldes bestimmt. Ich habe mich vorerst auf Kollektortypen beschränkt, bei denen ein mäanderförmiger Absorber von unten nach oben durchströmt. Damit sind sowohl Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern als auch horizontal liegende, seriell geschaltete Vakuum-Röhrenkollektoren berücksichtigt. Es ist vorgesehen, weitere hydraulische Konfigurationen abzubilden.

Es ist geplant, die in diesem Buch dargestellten Modelle in Form eines Rechenprogrammes zu veröffentlichen. Es war mir daher ein großes Anliegen, die Methoden der thermohydraulischen Modellierung nachvollziehbar herzuleiten und anhand praktischer Beispiele ausführlich zu begründen. Mit diesem Buch hoffe ich, das Vertrauen in die Solarthermie zu fördern und einen Beitrag zu ihrer Wirtschaftlichkeit zu leisten.

Dank

Ich danke dem Bundesamt für Energie BFE für die Förderung dieses Projekts. Ebenfalls danke ich der Fachgruppe Solarwärme des SWISSOLAR sowie weiteren Personen aus Industrie, Gewerbe und Forschung, die mich als Mitgliedern meiner Begleitgruppe unterstützt haben:

Andreas Eckmanns	Bundesamt für Energie BFE
Jean-Christophe Hadorn	Bundesamt für Energie BFE
Christoph Bartholdi	eontec GmbH
Dr. Andreas Bohren	Hochschule Rapperswil, Institut für Solartechnik SPF
Stefan Braendle	Amstein+Walthert AG
Pascal Cretton	Sebasol Vaud
Leo Engeler	Salerno Engeler GmbH
Richard Güttinger	Solarline Güttinger AG
Herbert Hobi	Hobi + Partner GmbH
Josef Jenni	Jenni Energietechnik AG
Heinrich Kriesi	Walter Meier AG
Urs Lippuner	Alco Haustechnik AG
Jürg Marti	Marti Energietechnik
José Martin	SWISSOLAR
Dr. Stephan A. Mathez	Solar Campus GmbH
Prof. Matthias Rommel	Hochschule Rapperswil, Institut für Solartechnik SPF
Dr. Karin Rühling	TU Dresden, Institut für Energietechnik

Bruno Schläpfer	Ernst Schweizer AG
Christian Thesing	IMI Hydronic Engineering AG
Christian Voellmin	Sopra Solarpraxis AG
Björn Zittra	Hoval AG / GebäudeKlima Schweiz

Ihre Beiträge in den Begleitgruppensitzungen, ihr Feedback zum Manuskript sowie die Resultate aus Interviews sind an vielen Stellen eingeflossen. Ebenfalls danke ich der Ernst Schweizer AG für die Erlaubnis, Datenmaterial aus der Analyse von Betriebsstörungen in Kundenanlagen zu verwenden. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Horst-Michael Prasser. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, thermohydraulische Theorien und Rechenmethoden aus der Nukleartechnik für die Solarthermie verfügbar zu machen. Ich danke auch meinen Studenten, die ihre Bachelor- und Masterarbeiten im Rahmen meiner Projekte durchführten. Herrn Dr. Fröhlich vom Springer-Verlag danke ich für das Lektorat. Schließlich danke ich auch meiner Partnerin Dr. Patricia Fry für das kritische Gegenlesen, ihr Interesse und ihre Unterstützung.

Zürich, November 2016

Ralph Eismann

Geleitwort

Mit dem von Bundesrat und Parlament im Jahr 2011 gefällten Grundsatzentscheid für einen schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie sowie weiteren tiefgreifenden Veränderungen im internationalen Energieumfeld wird ein Umbau des Schweizer Energiesystems notwendig. Hierfür hat der Bundesrat die Energiestrategie 2050 erarbeitet. Er will die vorhandenen Energieeffizienzpotenziale konsequent erschließen und die Potenziale der Wasserkraft und der neuen erneuerbaren Energien (Sonne, Wind, Geothermie, Biomasse) ausschöpfen. Den Ausbau der erneuerbaren Energien hat das Parlament bereits mit einer Anfang 2014 in Kraft getretenen Änderung des Energiegesetzes verstärkt. Ebenfalls bereits in Kraft ist der Aktionsplan „Koordinierte Energieforschung Schweiz“.

Im Rahmen dieses Aktionsplanes fördert das Bundesamt für Energie BFE Forschungsprojekte in verschiedenen Gebieten der erneuerbaren Energien. Solarthermie soll in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Wärmeversorgung liefern. Sie bildet daher einen der Forschungsschwerpunkte des BFEs. Die Projektförderung beschränkt sich nicht allein auf die Entwicklung neuer Technologien und die Erforschung ihrer thermodynamischen Eigenschaften. Ebenso wichtig ist die Erarbeitung von Planungsgrundlagen, mit deren Hilfe diese Technologien kosteneffizient am Markt umgesetzt werden können.

Ralph Eismann hat mit dem vorliegenden Buch ein Grundlagenwerk geschaffen, das die Methoden der thermodynamischen Dimensionierung um die dazu komplementären, thermohydraulischen Modelle und Berechnungsmethoden ergänzt. Diese ermöglichen nicht nur die Dimensionierung des Rohrnetzes und des Expansionsgefäßes, sondern auch die rechnerischen Nachweise der Entlüftbarkeit und der Stagnationssicherheit. Damit sind die Voraussetzungen für eine umfassende und effiziente Anlagenplanung gegeben.

Ich hoffe, dass dieses Buch in der Praxis breite Anwendung findet. Ebenfalls ist es wünschenswert, dass dessen Inhalte auch in der Lehre sowie in der beruflichen Weiterbildung von Planerinnen und Planern vermittelt werden.

Die Anwendung der im Buch beschriebenen Methoden sollen zur Kostenreduktion und gleichzeitig zur Maximierung von Betriebssicherheit und Lebensdauer von Solaranlagen führen. Dadurch werden nicht nur die Marktchancen der Solarthermie erhöht, sondern auch das Vertrauen der Kunden, Installateure und Planenden in diese Technologie verstärkt. In diesem Sinne liefert das vorliegende Buch einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiestrategie 2050.

Bundesamt für Energie BFE

Andreas Eckmanns

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	XV
1 Energetische Kenndaten und bauliche Integration	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Energetische Kenndaten	1
1.2.1 Leistungskennndaten von Kollektoren	3
1.3 Bauliche Integration	4
1.3.1 Kollektorfeld	4
1.3.2 Verbindungsleitungen zwischen Kollektorfeld und Speicher	14
1.4 Mess- und Regelgrößen	26
1.4.1 Temperaturen	26
1.4.2 Durchfluss	28
1.4.3 Druck	29
1.5 Literatur	30
2 Dimensionierung des Rohrnetzes	31
2.1 Einleitung	31
2.2 Eindimensionale Beschreibung stationärer Rohrströmungen	31
2.2.1 Stromfadentheorie	31
2.3 Modellierung von Druckverlusten	36
2.3.1 Reibungsdruckverlust in Rohren	36
2.3.2 Lokale Druckverluste	45
2.4 Druckverlust und Strömungsverteilung in Kollektorfeldern	54
2.4.1 Aufbau von Absorbern	54
2.4.2 Schaltungsvarianten	58
2.4.3 Strömungsverteilung und Druckverlust	61
2.4.4 Druckverlust aus Messdaten	70
2.4.5 Einfluss der Verschaltung auf Durchfluss, Temperaturen und Leistung	76
2.5 Modellierung von Kreiselpumpen	81
2.5.1 Pumpenkennlinie	81
2.5.2 Erforderlicher Zulaufdruck zur Vermeidung von Kavitation	83
2.6 Druckverlauf im Kollektorkreis	87
2.7 Literatur	93
3 Druckhaltung und Sicherheit	97
3.1 Einleitung	97
3.2 Aufgaben, Aufbau und Funktionsweise der Druckhaltung	97
3.2.1 Aufgaben der Druckhaltung	97
3.2.2 Arten der Druckhaltung	98
3.3 Sicherheit	103
3.3.1 Sicherheitsventile	104
3.3.2 Druckmessung	104
3.4 Einbindung der Druckhaltung in den Kreislauf	110
3.4.1 Anschluss des Ausdehnungsgefäßes an den Kreislauf	111

3.4.2	Referenzpunkt bezüglich Rückschlagventil und Pumpe	112
3.4.3	Anordnung und Dimensionierung des Sicherheitsventils.....	116
3.5	Systemwahl und Vorgehen bei der Dimensionierung.....	117
3.5.1	Anlagendaten für die Dimensionierung.....	117
3.5.2	Vorgehen bei der Dimensionierung.....	118
3.6	Dimensionierung von Membran-Druckausdehnungsgefäßen	119
3.6.1	Grundlagen	119
3.6.2	Dimensionierung nach VDI 4708	123
3.6.3	Dimensionierung mit Berücksichtigung der Unsicherheiten	129
3.7	Wartung von Membranausdehnungsgefäßen	144
3.7.1	Direkte Prüfung.....	144
3.7.2	Indirekte Prüfung durch Überströmversuch.....	145
3.8	Literatur.....	149
4	Entlüftung und Entgasung	151
4.1	Einleitung.....	151
4.1.1	Notwendigkeit für die Entfernung von Gasen	151
4.1.2	Ursache von freien Gasen.....	152
4.1.3	Solaranlagen im Vergleich zu anderen Rohrnetzen.....	153
4.2	Entlüftungsventile und Luftabscheider	154
4.2.1	Manuell betätigte Entlüftungsventile an Hochpunkten	154
4.2.2	Luftabscheider mit automatischem Entlüftungsventil	156
4.3	Selbstentlüftung von Rohren	157
4.3.1	Kräfte an Lufttaschen und Luftblasen.....	157
4.3.2	Stand der Technik.....	158
4.3.3	Neue Experimente mit Glattrohren und Ringwellschläuchen	160
4.3.4	Füllen des Kreislaufes	168
4.4	Entgasung.....	176
4.4.1	Entgasung durch Sprührohr-Vakuumentgasung.....	177
4.4.2	Solarthermische Entgasung	178
4.4.3	Gaslösung in Mehrkomponentengemischen.....	179
4.5	Literatur.....	186
5	Stagnation.....	189
5.1	Einleitung.....	189
5.1.1	Ursachen und Bedeutung der Stagnation.....	189
5.1.2	Aufgaben beim Nachweis der Stagnationssicherheit	192
5.2	Praktische Regeln für ein günstiges Stagnationsverhalten	192
5.2.1	Entleerbarkeit und Leerdruckbarkeit des Kollektorfeldes	192
5.2.2	Maßnahmen zur Begrenzung der Dampfreichweite	197
5.2.3	Ablauf, Phänomene und Kenngrößen der Stagnation	198
5.2.4	Phasen der Stagnation	198
5.3	Die Methode der thermohydraulischen Simulation.....	204
5.3.1	Charakterisierung von Zweiphasenströmungen.....	204
5.3.2	Darstellung durch eindimensionale Erhaltungsgleichungen	208
5.3.3	Simulation des Stagnationsverhaltens mit TRACE	211
5.3.4	Erkenntnisse aus der Simulation mit TRACE.....	220

5.4	Analytische Beschreibung der Stagnation.....	223
5.4.1	Drift Flux Modelle für den Gasvolumenanteil	223
5.4.2	Das Kriterium der Gegenstrombegrenzung.....	226
5.4.3	Dampfleistung von Kollektoren	232
5.4.4	Restmenge Flüssigkeit in einem Mäanderabsorber	237
5.4.5	Zeitspanne für die Aufheiz- und Verdrängungsphase	241
5.4.6	Modellierung der Rohrleitungen	243
5.4.7	Modellierung von Rippenrohrkühlern	246
5.4.8	Dampfreichweite und Dampfvolumen	247
5.4.9	Simulation des Stagnationsverhaltens mit dem analytischen Modell.....	254
5.5	Literatur.....	259
6	Anhang.....	261
6.1	Das Reynoldssche Transporttheorem	261
6.1.1	Erhaltung der Masse.....	261
6.1.2	Erhaltung des Impulses.....	262
6.1.3	Anwendung des Reynoldsschen Transporttheorems in Integralform	264
6.2	Stoffdaten	267
6.2.1	Dichte.....	268
6.2.2	Kinematische Viskosität.....	269
6.2.3	Spezifische Wärme	270
6.2.4	Spezifische Enthalpie und Verdampfungsenthalpie	271
6.2.5	Dampfdruck	272
6.2.6	Oberflächenspannung	273
6.3	Literatur.....	275
6.4	Symbolverzeichnis.....	276
6.5	Sachverzeichnis	282

Zusammenfassung

Thermohydraulik – Schlüssel zur Kostensenkung

Die Thermische Solarenergie bietet effiziente Lösungen für zahlreiche wärmetechnische Anwendungen. Diese reichen von der Warmwasserbereitung und Gebäudeheizung über die Prozesswärmeerzeugung bis hin zur Einbindung in Fernwärmesysteme. Besonders attraktiv sind die mit Wärmepumpen kombinierten Systeme, beispielsweise zur Regeneration von Erdsonden und Eisspeichern. Hierzu können auch unverglaste Kollektoren sowie Photovoltaisch-Thermische Kollektoren eingesetzt werden.

Trotz ihres Potenzials hat die Attraktivität der Solarthermie in den letzten Jahren abgenommen. Die Ursachen sind vielschichtig. Obwohl Anlagenkomponenten sehr weitgehend optimiert und Fertigungsprozesse rationalisiert wurden, ist es bisher nicht gelungen, die Anlagenkosten in ähnlichen Größenordnungen zu senken, wie bei der Photovoltaik.

Im Vergleich zur Solarthermie ist die Photovoltaik in weit höherem Maß standardisiert. Die Schnittstelle zwischen dem Generatorfeld und dem Verbraucher mit seiner scheinbar unbegrenzten Kapazität und den standardisierten Spannungen des 50-Hz-Netzes ist durch die Wechselrichter wohldefiniert. Bei der Planung einer thermischen Solaranlage stellt sich hingegen immer auch die Aufgabe der Einbindung in ein konkretes wärmetechnisches System. Dieses ist, im Unterschied zum Stromnetz, durch eine begrenzte Kapazität und durch variable Temperaturniveaus gekennzeichnet. Unterschiedliche Anforderungen und wechselnde Randbedingungen auf der Verbraucherseite sind Gründe für die Variantenvielfalt der Systemtechnik, was die Planung zu einer anspruchsvollen Ingenieursaufgabe macht.

In der heutigen Praxis spielen persönliche Erfahrung und lokal geprägte Stile der Systemtechnik eine große Rolle. Systemanbieter profilieren sich gegenüber ihren Mitbewerbern durch bewährte und häufig sichtbar differenzierte Produkte und Systemlösungen. Die dadurch bedingte Variantenvielfalt systemtechnischer Lösungen ist sehr hoch. Für die energetische Dimensionierung stehen leistungsfähige und bedienerfreundliche Simulationsprogramme zur Verfügung, die diese Variantenvielfalt problemlos abbilden können. Im Gegensatz dazu fehlen die entsprechenden Werkzeuge zur hydraulischen Dimensionierung weitgehend. Einzelaufgaben der Planung, insbesondere die Dimensionierung des Rohrnetzes und des Ausdehnungsgefäßes, werden unabhängig voneinander gelöst. Die Stagnationssicherheit und die Entlüftbarkeit werden nicht nachgewiesen. Checklisten als formale Elemente der Qualitätssicherung kommen erst bei der Inbetriebnahme zum Einsatz. Die dadurch bedingte Planungsunsicherheit hat mehrere Auswirkungen. Einerseits ist es praktisch nicht möglich, das Kostenoptimum für eine Anlage zu finden und rechnerisch zu belegen. Andererseits besteht die Gefahr der Fehldimensionierung, die zu Betriebsstörungen und kostspieligen Schadenfällen führen kann. Unvollständige Spezifikationen müssen durch die Erfahrung und Kreativität des Installateurs wettgemacht werden, wodurch sich Konflikte bei der Gewährleistung ergeben können. Schließlich kann das Vertrauen in die an sich bestechende Technologie geschädigt werden. Es darf nicht erstaunen, dass Bauherrschaften, Planungsfirmen und Installateure jene Technologien bevorzugen, die mit weniger Unsicherheiten und geringeren Risiken behaftet sind.

Damit die Solarthermie ihr Potenzial im Zuge der Energiewende entfalten kann, müssen daher nicht nur die Kosten gesenkt, sondern auch das Vertrauen der Kunden, Planer und Installateure gewonnen werden. Ein Schlüssel zur Erreichung dieser Ziele liegt in der umfassenden und effizienten thermohydraulischen Planung. Was diese Planung auszeichnet, wird im folgenden Absatz erläutert.

Jeder Planungsschritt, beispielsweise die Rohrnetzdimensionierung und der Nachweis der Dampfreichweite bei Stagnation, erfordert Rechenoperationen. Daher müssen alle Anlagenkomponenten und die in diesen Komponenten ablaufenden physikalischen Prozesse durch Modelle abgebildet werden. Die Erhaltungsgleichungen der Masse, der Energie, und des Impulses bilden die theoretische Grundlage dieser Modelle. Die Gleichungen zur Beschreibung dieser Modelle sind gekoppelt, weil dieselben Zustandsgrößen, beispielsweise die Drücke und die Temperaturen, in mehreren Gleichungen gleichzeitig auftreten. Aus diesem Grund sind auch die einzelnen Dimensionierungsaufgaben voneinander abhängig, wie in [Abbildung 1](#) schematisch dargestellt ist. Indem diese Kopplung berücksichtigt wird, lassen sich die thermodynamischen und hydraulischen Einzelphänomene formal zueinander in Beziehung setzen. Man spricht daher von thermohydraulischer Dimensionierung. Dieses Buch legt den Schwerpunkt auf die Herleitung der Modelle. Es ist geplant, ein entsprechendes Rechenprogramm für den praktischen Einsatz zu veröffentlichen.

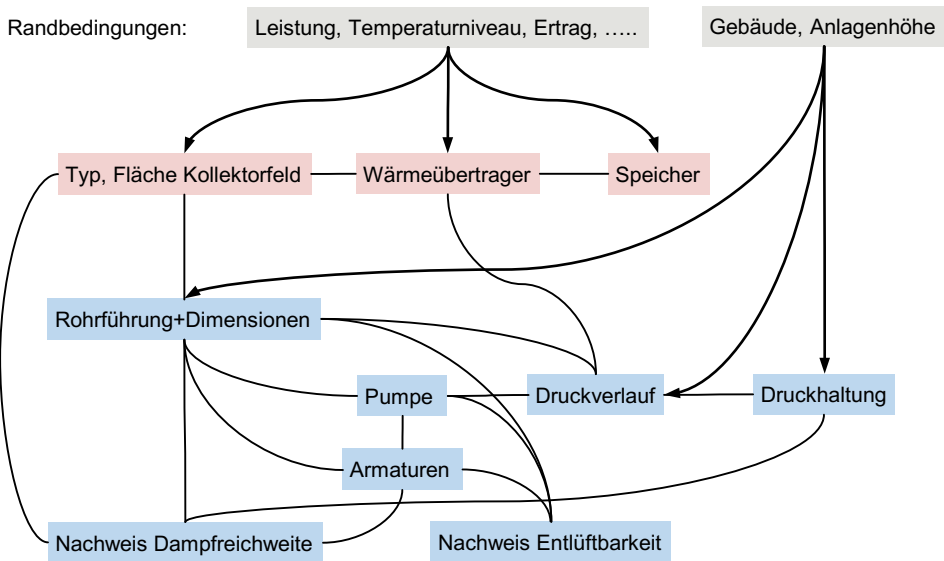


Abbildung 1 Wirkungszusammenhänge bei der Planung von Solaranlagen. Wechselseitige Abhängigkeiten sind ohne Pfeile dargestellt.

Die Vorteile des thermohydraulischen Ansatzes sind vielfältig. Einerseits können die Anlagenkosten durch zielgenaue Dimensionierung minimiert werden. Andererseits lassen sich Betriebsstörungen, die zum Beispiel aufgrund ungenügender Entlüftung oder zu großer Dampfreichweite auftreten können, durch entsprechende Nachweise vermeiden. Weil die Planungsschritte objektiv nachvollziehbar sind, können die Verantwortlichkeiten in der Planung und Ausführung klar geregelt werden. Dies ist wichtig für die Gewährleistung sowie für Wartungs- und

Reparaturarbeiten. Außerdem wird durch die formalisierte Vorgehensweise auch der Planungsprozess effizient und damit kostengünstig. Verschiedene Varianten können rasch durchgerechnet und kostenmäßig verglichen werden.

Inhalt des Buches

Die Kapitel des Handbuches folgen dem Ablauf des Planungsprozesses, der im Kapitel 1 auf Seite 2 grafisch dargestellt ist.

Im ersten Kapitel werden die Möglichkeiten und Randbedingungen der baulichen Integration von Kollektorfeldern behandelt. Es wird gezeigt, in welchen Fällen bei dachintegrierten Kollektorfeldern eine Dampfsperre erforderlich ist und dass die Umgebungsfeuchte auch bei frei aufgeständerten Flachkollektoren beachtet werden muss. Bewährte Rohrleitungssysteme und die Möglichkeiten zur Kompensation von Wärmedehnungen werden im Detail besprochen. Für die Dachintegration und für die Flachdachmontage von Kollektorfeldern werden Checklisten angeboten. Diese bieten Unterstützung beim Abklären der baulichen Randbedingungen. Einsatzmöglichkeiten für Temperatur-, Durchfluss- und Drucksensoren werden diskutiert. Es wird darauf hingewiesen, dass große Solaranlagen mit mehr als einem Kollektorfühler ausgerüstet sein sollen, damit Durchströmungsprobleme und partielle Stagnation erkannt werden können.

Das zweite Kapitel behandelt die Rohrnetzrechnung und Pumpendimensionierung. Basierend auf der Stromfadentheorie wird die Bernoulligleichung mit Druckverlustterm hergeleitet. Druckverlustkorrelationen für die Rohrreibung sowie für die lokalen Druckverluste bei Querschnittänderungen, Richtungsänderungen und Verzweigungen werden dargestellt. Eine neue Korrelation zur Berechnung der Rohrreibungszahl in Rohrwendeln mit beliebiger Rauigkeit wird hergeleitet. Die Korrelationen der Rohrreibungszahlen sind als stetige Funktionen der Reynoldszahl formuliert und decken den Bereich von laminarer bis turbulenter Strömung ab. Damit erfüllen sie die Grundvoraussetzung dafür, dass numerische Rechenverfahren konvergieren. Das bekannte Verfahren nach Cross zur Berechnung der Strömungsverteilung und des Druckverlustes in verzweigten Rohrnetzen wird ausführlich hergeleitet und anhand eines Beispiels demonstriert. Anschließend wird ein neues Verfahren hergeleitet, das wesentlich rascher konvergiert. Schließlich wird eine neue Korrelation hergeleitet, mit welcher der Druckverlust verzweigter Kollektorfelder näherungsweise, dafür direkt und ohne Iteration, berechnet werden kann. Die Korrelation beinhaltet einen Messwert des Druckverlustes und den zugehörigen Volumenstrom aus der Kollektorprüfung als Parameter. Der Vorteil dieser Korrelation besteht darin, dass die Geometrie des Absorbers, die weder durch die Hersteller noch in den Prüfberichten offengelegt wird, nicht bekannt sein muss. Abschließend wird das Vorgehen zur Berechnung des Druckverlaufes im Kreislauf hergeleitet und anhand eines Beispiels erläutert. Die Kenntnis des Druckverlaufes ist sowohl für den Nachweis der Kavitations-sicherheit als auch für die Dimensionierung der Druckhaltung erforderlich.

Im dritten Kapitel werden die Aufgaben der Druckhaltung sowie deren Ausführungsformen und Dimensionierung besprochen. Das etablierte Verfahren nach VDI 4708 zur Dimensionierung von Membran-Druckausdehnungsgefäßen wird dargestellt und anhand eines Beispiels veranschaulicht. Dieses berücksichtigt die Abhängigkeit des Systemdruckes vom Ausdehnungsvolumen bzw. von der Temperatur des Kreislaufes. Anschließend wird ein neues Verfahren hergeleitet, das zusätzlich den Einfluss der Gefäßtemperatur sowie die Unsicherheiten bei der

Einstellung des Vordrucks und beim Ablesen des Systemdrucks berücksichtigt. Dadurch gewinnt man die notwendige Sicherheit in der Planung und bei der Ausführung. Das Resultat einer Dimensionierung wird dem Installateur in Form von anlagenspezifischen Diagrammen zur Verfügung gestellt. Diese dienen sowohl zur sicheren Inbetriebnahme als auch zur Kontrolle des Füllzustandes einer Anlage in einem beliebigen Betriebszustand. Das Manometer ist ein wichtiges Instrument bei der Befüllung und für die Überwachung des Betriebs. Wählt man ein Manometer mit einer höheren Genauigkeitsklasse, als in der Heizungstechnik üblich ist, so wird nach dem neuen Berechnungsverfahren häufig ein kleineres Ausdehnungsgefäß dimensioniert, was insgesamt zu tieferen Anlagenkosten führt.

Das vierte Kapitel behandelt die Entlüftung und Entgasung von Kreisläufen. Die die Entlüftung durch Strömungskräfte, die sogenannte Selbstentlüftung, wird vertieft behandelt. Eine auf Versuchen mit Wasser und Wasser-Glykol-Gemisch beruhende Korrelation für die Selbstentlüftung von Glattrohren wird dargestellt und exemplarisch für verschiedene Nennweiten und unterschiedliche Temperaturen ausgewertet. Befüllstrategien für kleine und große Anlagen sowie die entsprechenden Füllrichtungen werden ausführlich diskutiert. Abschließend wird ein neues Verfahren zur Prüfung des Füllzustandes von Anlagen dargestellt. Im Unterschied zur etablierten Methode nach VDI 4708 muss das Ausdehnungsgefäß nicht entleert werden. Die Anwendung des neuen Verfahrens ist zeitsparend und in jedem beliebigen Betriebszustand möglich.

Im fünften Kapitel wird das Phänomen der Stagnation zunächst in seinem geschichtlichen Kontext beleuchtet. Die verfügbare Literatur wird ausführlich diskutiert. Anschließend wird Stagnation als komplexes Zweiphasen-Strömungsphänomen interpretiert und mit den Methoden der Thermohydraulik behandelt. Basierend auf der Modellierung und Simulation mit TRACE, einem der fortschrittlichsten thermohydraulischen Rechenprogramme, wird ein vereinfachtes, analytisches Modell hergeleitet. Dieses Modell wurde durch Simulationen mit TRACE validiert. Im gegenwärtigen Stand können Kollektortypen simuliert werden, bei denen ein mäanderförmiger Absorber von unten nach oben durchströmt wird. Damit sind sowohl Flachkollektoren mit Mäanderabsorbern als auch horizontal liegende, seriell geschaltete Vakuum-Röhrenkollektoren berücksichtigt. Es ist vorgesehen, weitere hydraulische Konfigurationen abzubilden. Außerdem ist geplant, die Modelle experimentell zu validieren.

Das sechste Kapitel beleuchtet das Reynoldssche Transporttheorem, das im fünften Kapitel zur Herleitung der Erhaltungsgleichungen benutzt wurde. Es wird gezeigt, dass sich die Eulergleichung mit Hilfe dieses Theorems anschaulich herleiten lässt, dass es sich aber auch auf andere Strömungsprobleme anwenden lässt, wo die Stromfadentheorie nicht anwendbar ist. Schließlich werden die benötigten Stoffdaten zusammengestellt. Im Unterschied zu anderen Fachbüchern werden diese jedoch nicht als Zahlenwerte in Tabellenform präsentiert, sondern als Gleichungen. Diese können unmittelbar in Rechenprogrammen verwendet werden.