

Anwendungsspezifische Optimierung von Harfen- und Mäanderabsorbern mit dem Programm «Absorber-Master»

Dr. Stephan von Rotz,

Institut für Solartechnik SPF, Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil

0. Zusammenfassung

Die Optimierung eines Kollektors, insbesondere des Absorbers, ist eine vielschichtige Aufgabe. Eine gut gewählte Absorbergeometrie kann den Wirkungsgrad ohne Zusatzkosten um 5-10 %, eine adäquate Betriebsweise um weitere 2-4 % steigern. Entscheidend für das optimale Absorberdesign ist das Kostengefüge der Absorberherstellung, sowie das spätere Anwendungsgebiet des Kollektors (Fluid, Durchsatz, Temperatur). Unter diesen physikalischen und ökonomischen Randbedingungen sucht Absorber-Master die optimale Lösung. Das Programm liefert das folgende bemerkenswerte Resultat: Bei einer genutzten Einstrahlung von 1000 kWh/m²/a sind Energiekosten (Kollektor- und Betriebskosten, ohne Montage und ohne die übrigen Anlagekomponenten) von *unter 2 Cent/kWh* möglich.

1. Einführung

Der Konversionsfaktor eines thermischen Sonnenkollektors ergibt sich aus dem Transmissionswert des Abdeckglases, dem Absorptionsgrad der Beschichtung und dem Kollektorwirkungsgradfaktor (F').

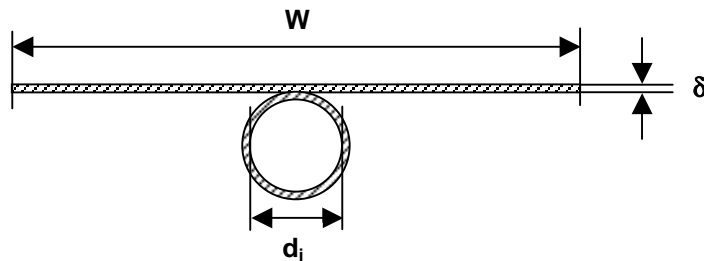


Abb.1: Querschnitt eines Absorberfins. Der Kollektorwirkungsgradfaktor F' ist ein Mass für die Effizienz der Energieübertragung vom Absorberblech auf den Wärmeträger.

Der F' -Wert spielt beim Streben nach effizienteren und kostengünstigeren Kollektoren eine zentrale Rolle. Obschon die theoretischen Grundlagen schon lange bekannt sind¹, bereitet die Optimierung der Leistungsfähigkeit vielen Herstellern Mühe. Ein Grund dafür liegt in der Komplexität des Problems und der oft nur diffusen Vorstellung der einzelnen Einflussfaktoren.

¹ Siehe Duffie und Beckman (1991), bzw. im Original: Whillier (1953, 1977) und Hottel und Whillier (1958).

Das vorliegende Programm «Absorber-Master» löst diese Probleme umfassend. Es stehen 9 verschiedenartige Absorberdesigns zur Auswahl (5 Harfen und 4 Mäander). Die Anordnung von Rohren und Sammelrohren kann automatisch optimiert werden. Bei Harfenabsorbern wird die Durchströmungsverteilung der parallellaufenden Rohre berechnet und die dadurch unterschiedlichen F 's berücksichtigt. Die Rohrdurchmesser, die Blechstärke und die Anzahl paralleler Rohrabschnitte können per Knopfdruck optimiert werden. Die Rohrdurchmesser und die Blechstärke können in diskreten Schritten angegeben werden. Bei der Optimierung wird der gesamte Phasenraum abgescannt, was garantiert, dass immer das globale Optimum gefunden wird.

Die für die Lage des Optimums bestimmenden Betriebsgrößen sind die Anordnung des Kollektorfeldes, der vorgesehene Durchsatz, das zu verwendende Wärmeträgermedium und die (voraussichtliche) durchschnittliche Betriebstemperatur. Diese Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung verdeutlicht, dass es *den* besten Kollektor nicht gibt, dass vielmehr eine Palette von anwendungsspezifischen Kollektoren dem Problem gerecht wird.

Die Material- und Verarbeitungskosten aller Komponenten (Rohre, Turbulatoren, Blech, Lötung/Schweissung, Biegung, Wärmeträger) und die errechneten Betriebskosten (Druckverlust) bestimmen das Preis-Leistungs-Verhältnis. Durch die frei wählbare Gewichtung der Kategorien *Effizienz*, *Ökologie* und *Ökonomie* können die Aspekte Leistung, Material- und Kostenaufwand unterschiedlich stark gewichtet werden. Zudem können bei der Optimierung diverse Randbedingungen festgelegt werden:

Input-Größen (jeweils mit der Angabe von Minimal-, Maximalwert und Abstufung):

- Anzahl parallele Rohre
- Rohr- und Sammelrohr-Innendurchmesser
- Blechstärke

Output-Größen:

- maximaler Druckverlust pro Kollektor
- maximale Wärmekapazität, Masse und Kosten pro m^2
- minimales F'

Schliesslich ist es möglich, die Einstrahlungsbedingungen und den Systemwirkungsgrad anzugeben und daraus die effektiven Energiekosten zu ermitteln. Die Lage des Optimums wird dadurch nicht beeinflusst, wohl aber die Höhe der Energiekosten und die Amortisationsdauer.

2. Der springende Punkt: Umschlag von laminar zu turbulent

Die entscheidende Rolle für den optimalen Betrieb eines Kollektors spielt die Strömungsart des Wärmeträgers. Wie Abb. 2 zeigt, hängt diese unter anderem von der Betriebstemperatur ab. Weitere Größen, die für die Position des Umschlagspunktes bestimmend sind, können aus der Definition der Reynoldszahl abgeleitet werden:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot D}{U \cdot \nu} \quad , \text{ wobei } w = \frac{D}{A} \quad \text{und} \quad d = \frac{4 \cdot A}{U}$$

Dabei ist w die mittlere Fließgeschwindigkeit, A die Querschnittsfläche des Rohres und U dessen Umfang. D ist der Durchsatz und ν die kinematische Viskosität des Wärmeträgers. Der Umschlagspunkt von laminar zu turbulent liegt für ein gerades Rohr bei $Re=2320$. Der Umschlagspunkt hängt somit von folgenden Größen ab:

- Art, Zusammensetzung und Temperatur des Wärmeträgers
- Durchsatz
- Umfang des Rohres (gilt auch für Querschnitte, die nicht rund sind)

Bemerkenswert ist, dass der Umschlagspunkt von der Querschnittsform des Rohres (zumindest in erster Näherung) und von der Rohrrauigkeit *nicht* abhängig ist. Je nach Strömungsart ist die Wärmeübertragung vom Rohr auf den Wärmeträger unterschiedlich. Bei turbulenter Strömung wird das Fluid auch quer zur Fließrichtung (zur Mitte des Rohres hin) rasch bewegt, wohingegen bei laminarer Strömung kein Fluidtransport in dieser Richtung stattfindet. Dies führt zu einer Reduktion des Wärmeübergangs Rohr-Fluid um mehr als 50 %. Insgesamt bewirkt dieser Effekt Effizienzunterschiede von 2-4 %, je nach Absorbertyp. Nach der Wahl des Wärmeträgers und der Abklärung, bei welcher Temperatur der Kollektor vorwiegend betrieben werden soll, kann die benötigte Durchsatzrate bestimmt werden. Bei Harfenabsorbern ist dies in der Regel nur bei kleinen Rohrdurchmessern und Durchsatzraten von deutlich über 50 l/h/m² zu schaffen. Mäanderabsorber haben hier weniger Probleme.

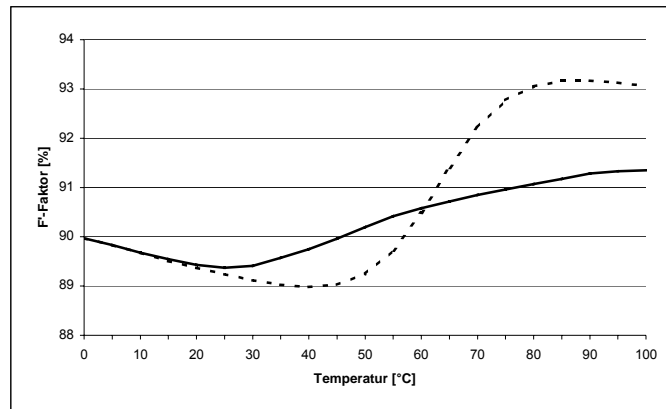


Abb.2: Berechneter F'-Faktor für einen Harfenabsorber mit 12 Parallelen Rohren (6 mm) bei einem Durchsatz mit Wasser von 100 l/h/m² und einer Einstrahlung von 800 W/m². Die punktierte Linie entspricht einer gleichmässigen Durchströmung der Harfe, für die durchgezogene Linie berechnete Absorber Master die Strömungsverteilung der einzelnen Rohre.

Für den Ertrag der gesamten Anlage ist es entscheidend, dass die Strömungsart im Kollektor möglichst oft turbulent ist.

3. Abstand des Mäanderbogens zum Absorberrand

Bei der Optimierung des Abstandes des Mäanderbogens zum Absorberrand muss ein weiteres Phänomen berücksichtigt werden: Die Temperaturschichtung der Luft (des Gases) zwischen Absorber und Abdeckglas. Ziel ist es, eine möglichst stabile Schichtung zu erreichen, denn allfällige Temperatursenken oder -überschüsse führen zu einer verstärkten Zirkulation des Gases. Starke Konvektion führt zu grösseren Energieverlusten und somit zu einem schlechteren Wirkungsgrad des Kollektors.

Um dies zu vermeiden müssen folgende Punkte beachtet werden: Der Abstand zwischen Glas und Absorber sollte in der Grössenordnung von 25 mm liegen¹ und der lokale F' -Faktor am Rand des Absorbers (beim Mäanderbogen) sollte mit dem übrigen F' übereinstimmen. Somit gibt es keine Temperaturänderung zum Absorberrand hin².

Um diesen Abstand zu bestimmen, kann man sich vorerst einen perfekten Fin mit $F'=1$ vorstellen. In diesem Fall muss das Verhältnis von Rohrlänge zu Blechfläche beim Bogen gleich sein wie im übrigen Absorber. Durch diese geometrische Überlegung erhalten wir als gesuchten Abstand a :

$$a = r \cdot (\pi / 2 - 1) \cong 0.5708 \cdot r$$

Wobei r der Radius des Mäanderbogens ist. Für jeden realen Fin ($F' < 1$) ist dieser Wert kleiner. Um den Abstand für reale Fälle zu berechnen, muss die Wärmeleitungsgleichung für einen Kreisbogen gelöst werden. Diese lautet:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{m}{\sqrt{W/2}} \cdot T(x) \cdot x \quad , \text{ wobei} \quad m = \sqrt{\frac{U}{k \cdot \delta}}$$

mit den Randbedingungen

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{und} \quad T|_{x=W/2} = T_b - T_a - S/U$$

Dabei ist W die Breite des Fins, k seine thermische Leitfähigkeit, δ seine Dicke, $T(x)$ die Temperatur an der Stelle x , x der Abstand vom Zentrum des Mäanderbogens, T_b die Temperatur der Kontaktstelle Blech-Rohr, T_a die Temperatur der Umgebung, S die Einstrahlung und U der Wärmeverlustfaktor (a_1 -Wert) des Kollektors. Differenzieren der Lösung $T(x)$ nach x an der Stelle $x=W/2$ ergibt den folgenden F' -Wert:

$$F' = \frac{4}{3 \cdot b} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot J_{-2/3}(b) - 3 \cdot K_{-2/3}(b)}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot J_{1/3}(b) + 3 \cdot K_{1/3}(b)} \quad , \text{ wobei} \quad b = \frac{W \cdot m}{3}$$

² Genau genommen gilt dies nur für senkrechte Einstrahlung. Ansonsten wird wegen Abschattung durch den Kollektorrahmen ein Streifen links oder rechts des Absorbers nicht mehr direkt bestrahlt und unterkühlt. Das Phänomen wird aber erst bei grossen Einfallswinkeln brisant, dort sind aber die Temperaturunterschiede weniger gross.

Dabei sind J und K die Besselfunktionen erster bzw. zweiter Ordnung. Wenn dieses F' über den ganzen Bereich des Mäanderbogens für einen festen Wert von b integriert wird, ergibt sich folgende Abhängigkeit:

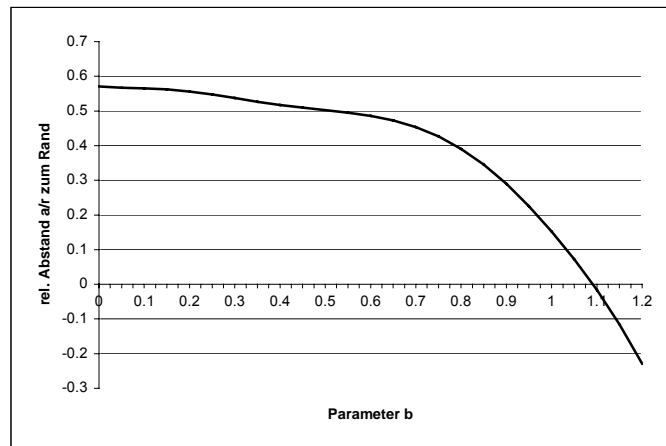


Abb.3: Abstand vom Mäanderbogen zum Absorberrand im Verhältnis zum Radius des Mäanderbogens, in Abhängigkeit des Parameters b .

An der Stelle, an der die Kurve die x-Achse schneidet, d.h. dort, wo der Mäanderbogen bis an den Rand des Absorbers reicht, erhält man $F'=73.1\%$. Unterhalb dieses F' -Wertes lässt sich die oben gestellte Forderung nicht mehr erfüllen.

4. Absorber Master – das Know-How-Paket

Die oben beschriebenen physikalischen Phänomene, sowie die Material-, Herstellungs- und Betriebskosten (Wärmeträger und Pumpenbetrieb) werden vom Programm berechnet und bei der Optimierung berücksichtigt. Absorber Master wählt innerhalb weniger Sekunden aus Hundertausenden von Möglichkeiten das ideale Design. Dank weiterer Angaben wie dem Systemwirkungsgrad, der mittlere Differenz von Kollektor- und Aussentemperatur, der jährlich genutzten Einstrahlung, der Anzahl Betriebsstunden, des Wirkungsgrades und der Energiekosten der Pumpe und des Zinssatzes für die Investition des Kollektors (kundenseitig), kann der Hersteller bereits in der Planungsphase des Absorbers diese ökonomischen Konsequenzen überblicken.

Mit den heutigen Produktionskosten und Absatzvolumina und den aktuellen Material- und Energiekosten, lassen sich Kollektoren designen, die thermische Energie für weniger als 2 Cent/kWh bereitstellen. Die Kosten für das System (Speicher, Pumpe, Leitungen, ...) sowie die Montage sind darin nicht enthalten. Der Vergleich zu klassischen Energieträgern muss angesichts dieser ökonomisch interessanten Perspektiven nicht gescheut werden. (Download der Demoversion: www.solarenergy.ch)