

# Einführung eines 2-Knotenmodells zur besseren Beschreibung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren

S. Fischer, H. Müller-Steinhagen

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685-3231, Fax: 0711 / 685-3503

E-mail: [fischer@itw.uni-stuttgart.de](mailto:fischer@itw.uni-stuttgart.de)

Internet: <http://www.itw.uni-stuttgart.de>

## 1. Einleitung

Alle heute verwendeten nationalen und internationalen Normen benutzen ein sogenanntes 1-Knotenmodell zur Beschreibung der thermischen Leistungsfähigkeit von Sonnenkollektoren. Hierbei werden alle thermischen Massen des Kollektors und die Wärmeübergangsmechanismen zwischen den einzelnen Massen in einer flächenbezogenen effektiven Wärmekapazität  $c_{\text{eff}}$  zusammengefasst. Bezugstemperatur ist dabei die mittlere Fluidtemperatur.

Diese Vereinfachung kann bei Kollektoren, die im Betrieb einen hohen Temperaturunterschied zwischen Absorber und Wärmeträgerfluid aufweisen, zu einer Fehlinterpretation der effektiven Wärmekapazität führen.

Das im Folgenden vorgestellte 2-Knoten-Modell berücksichtigt die Temperaturdifferenz zwischen Absorber- und Fluidtemperatur durch zwei Kapazitäten  $c_{\text{abs}}$  und  $c_{\text{fl}}$ , sowie einem Wärmeübertragungsvermögen ( $kA$ ) zwischen den beiden Kapazitäten.

## 2. Kollektormodelle

### 2.1 Ein-Knoten-Modell

Das bisher in nationalen und internationalen Normen, z. B. EN 12975 /1/ und ISO 9806 /2/ etablierte Kollektormodell ist ein 1-Knoten-Modell (siehe Abbildung 1).

In diesem Fall sind alle Wärmekapazitäten der Kollektorkomponenten in einer gemeinsamen Kapazität  $c_{\text{eff}}$  zusammengefasst, die sich auf die Fluidtemperatur bezieht. Das 1-Knoten-Modell wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

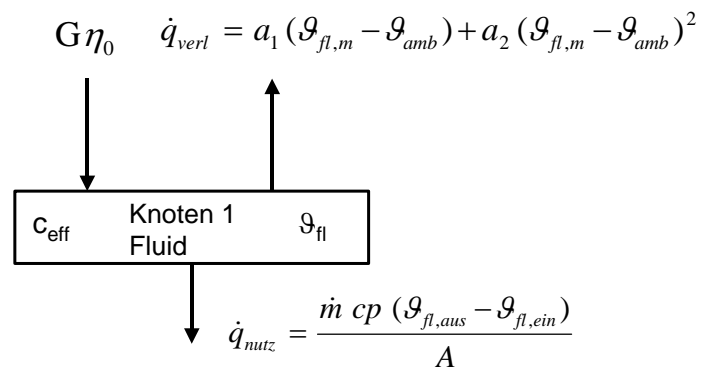


Abbildung 1: 1-Knoten-Modell

$$c_{\text{eff}} \frac{d\vartheta_{\text{fl},m}}{dt} = G\eta_0 - a_1(\vartheta_{\text{fl},m} - \vartheta_{\text{amb}}) - a_2(\vartheta_{\text{fl},m} - \vartheta_{\text{amb}})^2 - \frac{\dot{m}c_p(\vartheta_{\text{fl},\text{aus}} - \vartheta_{\text{fl},\text{ein}})}{A} \quad (1)$$

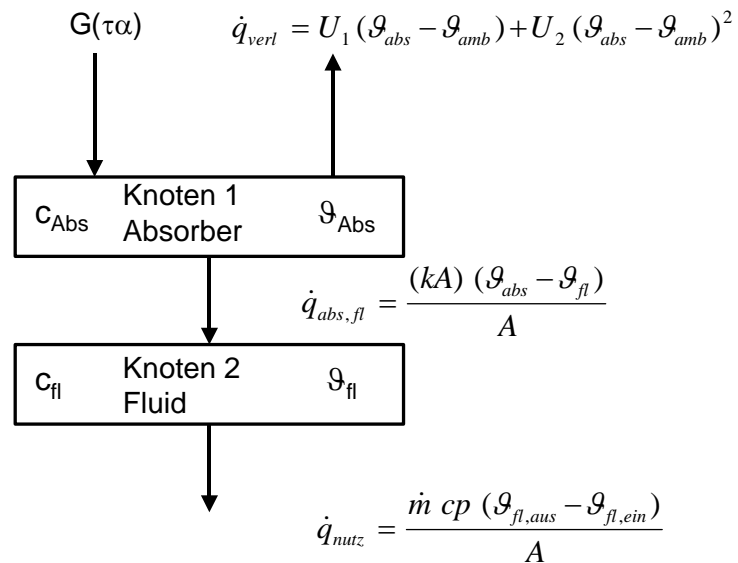
Die Reduzierung der internen Wärmeübergangsmechanismen auf einen Kapazitätsknoten erlaubt bei Kollektoren mit geringer Temperaturdifferenz zwischen Absorber- und Fluidtemperatur, wie sie bei Flachkollektoren vorherrscht, eine gute Abbildung der thermischen Leistungsfähigkeit. Auch stimmen bei diesen Kollektoren die unter dynamischen Bedingungen bestimmten effektiven Wärmekapazitäten gut mit den berechneten überein.

Bei größeren Temperaturdifferenzen zwischen Absorber- und Fluidtemperatur führt die messtechnische Bestimmung der effektiven Wärmekapazität zu Werten, die die Summe der Kapazitäten der einzelnen Kollektorbauteile um ein Vielfaches übersteigen können. Als Beispiel eines derartigen Kollektors ist u.a. der sogenannte „Sydney-Kollektor“ nach dem Thermoskannen-Prinzip zu nennen. Hier können im Betrieb Temperaturdifferenzen zwischen Absorber (beschichtetes Glasrohr) und Fluid von 30 K und mehr auftreten. Um diese Tatsache zu berücksichtigen und die im Kollektor vorherrschenden Wärmeübergangsmechanismen besser abzubilden zu können, wurde ein 2-Knoten Modell eingeführt und für die Auswertung von Kollektor-testdaten herangezogen.

## 2.2 Zwei-Knoten-Modell

Das 2-Knoten-Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Hier wird die Wärmekapazität des Kollektors unterteilt in die Wärmekapazität des Absorbers  $c_{\text{abs}}$  und des Fluids  $c_{\text{fl}}$ . Der

Absorberknoten wird in Abhängigkeit vom entsprechenden Wert des Transmissions-Absorptions-Produkts ( $\tau\alpha$ ) durch die einfallende Solarstrahlung  $G$  erwärmt. Die Wärmeverluste des Absorbers  $\dot{q}_{verl}$  beziehen sich auf die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung.



Der Wärmeübergang vom Absorber  $\dot{q}_{abs,fl}$  zum Fluid wird

Abbildung 1: 1-Knoten-Modell

durch das Wärmeübertragungsvermögen ( $kA$ ) und die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Fluid bestimmt.

Das 2-Knoten-Modell wird durch die beiden gekoppelten Differentialgleichungen (2) und (3) beschrieben.

$$c_{fl} \frac{d\theta_{fl,m}}{dt} = (kA)(\theta_{abs} - \theta_{fl,m}) - \frac{\dot{m} c_p (\theta_{fl,out} - \theta_{fl,in})}{A} \quad (2)$$

$$(kA)(\theta_{abs} - \theta_{fl,m}) = G(\tau\alpha) - U_1(\theta_{abs} - \theta_{amb}) - U_2(\theta_{abs} - \theta_{amb})^2 - c_{abs} \frac{d\theta_{abs}}{dt} \quad (3)$$

Für die folgenden Untersuchungen wurde dieses 2-Knoten-Modell in den TRNSYS Type 132 implementiert.

### 3. Anwendung des 2-Knoten-Modells bei der Kollektorprüfung

Das vorgestellte 2-Knoten-Modell wurde exemplarisch bei der Auswertung der Messungen an einem „Sydney-Kollektors“ parallel zum genormten 1-Knoten-Modell angewandt. Der untersuchte Kollektor besitzt eine Aperturfläche  $A$  von  $1.33 \text{ m}^2$  und ist mit 16 Vakuumröhren ausgestattet. In Tabelle 1 sind die bei Verwendung des 1-Knoten-Modells ermittelten Kollektorparameter zusammengefasst.

$\eta_0$ [-]	IAMdfu[-]	$a_1$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$a_2$ [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	$c_{eff}$ [J/(m <sup>2</sup> K)]
0.651	1.19	1.361	0.0096	44030

Tabelle 1: Kollektorkennwerte bei Verwendung des 1-Knoten-Modells

Berechnet man nach den Vorgaben der EN 12975 /1/ die effektive Wärmekapazität des Kollektors ergibt sich diese zu knapp 22000 J/(m<sup>2</sup>K). Vergleicht man diesen Wert mit dem messtechnisch bestimmten Wert der effektiven Kapazität aus Tabelle 1, so unterscheiden sich beide Kapazitäten um den Faktor 2. Verantwortlich für diese Diskrepanz ist die deutliche Temperaturerhöhung des Absorbers gegenüber der Fluidtemperatur im Betrieb und die fehlende Modellierung des Wärmeübergangs zwischen Absorber und Fluid beim 1-Knoten-Modell.

Zum Vergleich wurden die selben Messdaten mit Hilfe des 2-Knoten-Modells ausgewertet. Die entsprechenden Kennwerte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Kennwertbestimmung die beiden Kapazitäten  $c_{abs}$  und  $c_{fl}$  als Konstanten vorgegeben wurden. Die Kapazität des Absorbers wurde hierbei aus den Materialwerten der Glasabsorber zuzüglich der Aluminiumleitbleche berechnet, die Fluidkapazität aus dem Fluidinhalt und der Masse der durchströmten Kupferrohre.

$(\tau\alpha)$ [-]	IAMdfu [-]	$U_1$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$U_2$ [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	$C_{abs}$ [J/(m <sup>2</sup> K)]	$C_{fl}$ [J/(m <sup>2</sup> K)]	(kA) [W/K]
0.673	1.18	1.337	0.0101	10465	9515	99.0

Tabelle 2: Kollektorkennwerte bei Verwendung des 2-Knoten-Modells

Mit Hilfe des Verfahrens nach Rockendorf /3/ lassen sich aus den Kennwerten des 2-Knoten-Modells die Kollektorkennwerte des 1-Knoten-Modells und der Kollektorstufigen Wirkungsgradfaktor  $F'$  abschätzen. Tabelle 3 zeigt die nach /3/ ermittelten Werte.

$\eta_0$ [-]	$a_1$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$a_2$ [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	$F'$ [-]
0.661	1.314	0.0097	0.982

Tabelle 3: Abschätzung der Kollektorkennwerte des 1-Knoten-Modells aus den Kennwerten des 2-Knoten-Modells

#### 4. Anwendung des 2-Knoten-Modells bei der Simulation

Bislang wird nicht nur bei der Leistungsprüfung sondern auch bei der Simulation von Sonnenkollektoren das 1-Knoten-Modell verwendet. Eine Vergleichsgröße bei der Bewertung von Sonnenkollektoren ist der jährliche flächenbezogene Kollektorertrag, der durch eine Simulation des jeweiligen Kollektors bzw. seiner Kennwerte in

Kombination mit einer Referenzanlage ermittelt wird. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für die Simulation der Referenzanlage unter Verwendung der beiden Modelle gegenübergestellt.

Modell	1-Knoten	2-Knoten
Kollektorertrag $Q_{col}$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	600	595

Tabelle 3: Vergleich Kollektorertrag in der Referenzanlage

Die Abweichung beim Kollektorertrag liegt unter 1%. Entgegen der anfänglichen Vermutung lässt sich für den hier untersuchten Kollektor das thermische Verhalten dieses Kollektors trotz der scheinbar falschen effektiven Wärmekapazität mit dem 1-Knoten-Modell ausreichend genau beschreiben.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Ein 2-Knoten-Modell wurde für die Auswertung von Kollektortestdaten und zur Simulation von Sonnenkollektoren eingeführt. Vorteile des 2-Knoten-Modells gegenüber dem 1-Knoten-Modell sind die genauere Abbildung der physikalischen Vorgänge und die Möglichkeit den Kollektorstufenwirkungsgradfaktor  $F'$  abschätzen zu können. Weiterhin weichen die in Verbindung mit dem 2-Knoten-Modell ermittelten Wärmekapazitäten deutlich weniger von den theoretisch rechnerisch ermittelten Werten ab.

Unter Verwendung der in der EN 12975 vorgegebenen Prüfbedingungen führt die Auswertung der Messdaten jedoch zu teilweise unrealistischen Werten des Transmissions-Absorptions-Produkts ( $\tau\alpha$ ) und des Wärmeübertragungsvermögens ( $kA$ ). Dies konnte durch die Vorgabe von rechnerisch ermittelten Wärmekapazitäten für den Absorber und das Fluid umgangen werden. Durch die Erweiterung der Prüfbedingungen, z.B. durch die Variation des Volumenstroms oder durch die Aufnahme von Wärmeverlustmessungen ohne Bestrahlung in die Prüfung, sollte jedoch die Ermittlung von physikalisch nachvollziehbaren Kennwerten möglich sein.

## 6. Nomenklatur

$a_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Wärmedurchgangskoeffizient (1 Knoten-Modell)
$a_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient (1 Knoten-Modell)
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Aperturfläche
$c_p$	[J/(kgK)]	Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
$c_{abs}$	[J/(m <sup>2</sup> K)]	Wärmekapazität des Absorbers
$c_{eff}$	[J/(m <sup>2</sup> K)]	Effektive Wärmekapazität des Kollektors (1-Knoten-Modell)
$c_{fl}$	[J/(m <sup>2</sup> K)]	Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
$F'$	[-]	Kollektorwirkungsgradfaktor
$G$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hemisphärische Bestrahlungsstärke
$IAM_{dfu}$	[-]	Einfallswinkelkorrekturfaktor der diffusen Bestrahlungsstärke
$\dot{m}$	[kg/s]	Massendurchfluss des Wärmeträgerfluids
$\dot{q}_{abs,fl}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestrom vom Absorber zum Wärmeträgerfluid
$\dot{q}_{verl}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmeverluste des Absorbers
$Q_{col}$	[kWh/a]	Jährlicher Kollektorsertrag
$(kA)$	[W/K]	Wärmeübertragungsvermögen zwischen Absorber und Wärmeträgerfluid
$U_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	Wärmeverlustkoeffizient (2 Knoten-Modell)
$U_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	Temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient (2 Knoten-Modell)
$\eta_0$	[-]	Konversionsfaktor
$\vartheta_{abs}$	[°C]	Absorbentemperatur
$\vartheta_{amb}$	[°C]	Umgebungstemperatur
$\vartheta_{fl,in}$	[°C]	Eintrittstemperatur Wärmeträgerfluid
$\vartheta_{fl,m}$	[°C]	Mittlere Temperatur des Wärmeträgerfluids
$\vartheta_{fl,out}$	[°C]	Austrittstemperatur Wärmeträgerfluid
$(\tau\alpha)$	[-]	Transmissions-Absorptions-Produkt

## 7. Referenzen

- (1) DIN EN 12975-2, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren – Teil 2: Prüfverfahren, Juni 2001
- (2) ISO 9806-1:1994 Test methods for solar collectors – Part 1: Thermal Performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop, 1994
- (3) Rockendorf G., Schreitmüller K.R., Wetzels W., Thermal collector test methods – a comparison of the heat loss measurement and a measurement under radiation, Proceedings ISES Solar World Congress, Budapest, 1993

Die diesem Bericht zugrunde liegende Untersuchungen wurden mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Rahmen des Projekts „EuroSol“ gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.