

Entscheidungskriterium für Luftkollektoren zur BAFA-Förderung

Dipl.-Ing. (FH) Christian Welz, Dipl.-Ing. (FH) Korbinian Kramer,
Dr.-Ing. Michael Hermann, Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
E-Mail: christian.welz@ise.fraunhofer.de
Telefon: +49 (761) 4588 5869, Fax: +49 (761) 4588 9950

1. Einleitung

Luftkollektoren nehmen einen relativ kleinen Anteil von 0,7 % am Solarkollektormarkt ein (Mauthner und Weiss 2013, S. 5). Ursachen sind u. a. der gegenüber Flüssigkeitskollektoren niedrigere Wärmeübergangskoeffizient Absorber-Luft und die geringere Wärmekapazität der Luft und die daraus resultierenden Einsatznachteile. Des Weiteren fehlte bislang eine Prüfnorm und folglich die Basisinformation für ein Entscheidungskriterium für die Investoren und die staatliche Förderung, ähnlich wie es für Flüssigkeitskollektoren vorhanden ist.

Mit steigender Nachfrage nach einfacher, robuster und zuverlässiger solarthermischer Technik werden vermehrt Solarluftanlagen angeboten. Derzeit können Luftkollektoren jedoch nur auf Basis einer Ausnahmeregelung in die Liste förderfähiger Kollektoren im Marktanzreizprogramm (MAP) aufgenommen werden (Kramer 2012). U. a. um den Weg zur Förderung zu ebnen, wurde am Fraunhofer ISE das BMU-geförderte Projekt Luko-E (Förderkennzeichen: 0325959A) durchgeführt (Stryi-Hipp, Thoma et al. 2014). Als Ergebnis wurde die überarbeitete Norm DIN EN ISO 9806:2014-03 auf Luftkollektoren erweitert und deren Veröffentlichung für März 2014 angekündigt (Kramer, Thoma et al. 2014). DIN EN ISO 9806 entspricht inhaltlich in vollem Umfang der englischsprachigen bereits veröffentlichten Version ISO 9806 (Norm ISO 9806:2013(E)) und ist damit der globale Prüfstandard. Ein mathematisches Modell für abgedeckte Luftkollektoren wurde unter Berücksichtigung des Massenstromeinflusses auf den thermischen Wirkungsgrad und der druckabhängigen Leckage bereits entwickelt (Welz, Knecht et al. 2013). Das bewährte TRNSYS-Type 832 für Wasserkollektoren wurde um das Modell abgedeckter Luftkollektoren erweitert.

In diesem Beitrag wird der nächste notwendige Schritt, die Bestimmung eines Förderkriteriums für Luftkollektoranlagen auf Basis von Systemsimulationen, vorgestellt. Als weitere Möglichkeit wird auf die Komponentensimulation mittels ScenoCalc

eingegangen. Abschließend werden Empfehlungen zur Wahl des Förderkriteriums gegeben.

2. Systemmodelle

Im Programm TRNSYS wurde ein Luftkollektor-Systemmodell (Simulationsdeck) aufgebaut, in welchem alle Komponenten (solarer Luftkreis, Regelung, Wärmerückgewinnung, Nachheizung, Speicher, Gebäude, Radiatoren, Trinkwasserzapfprofil, Klimadaten, ...) in separaten Modulen abgebildet sind. Die Module werden über deren Ein- und Ausgänge (Massenströme, Temperaturen, Luftfeuchten) außerhalb von TRNSYS in einer Excel-Datei verknüpft. Die Verknüpfungen können mit Bedingungen versehen werden, um komplexere Regelungen zu realisieren. Die Art der Verknüpfung der Module erlaubt die relativ schnelle Abbildung komplexer Systeme. Darüber hinaus wird in der Excel-Datei eine übersichtliche Auswahl an Parametern der Komponenten vorgegeben.

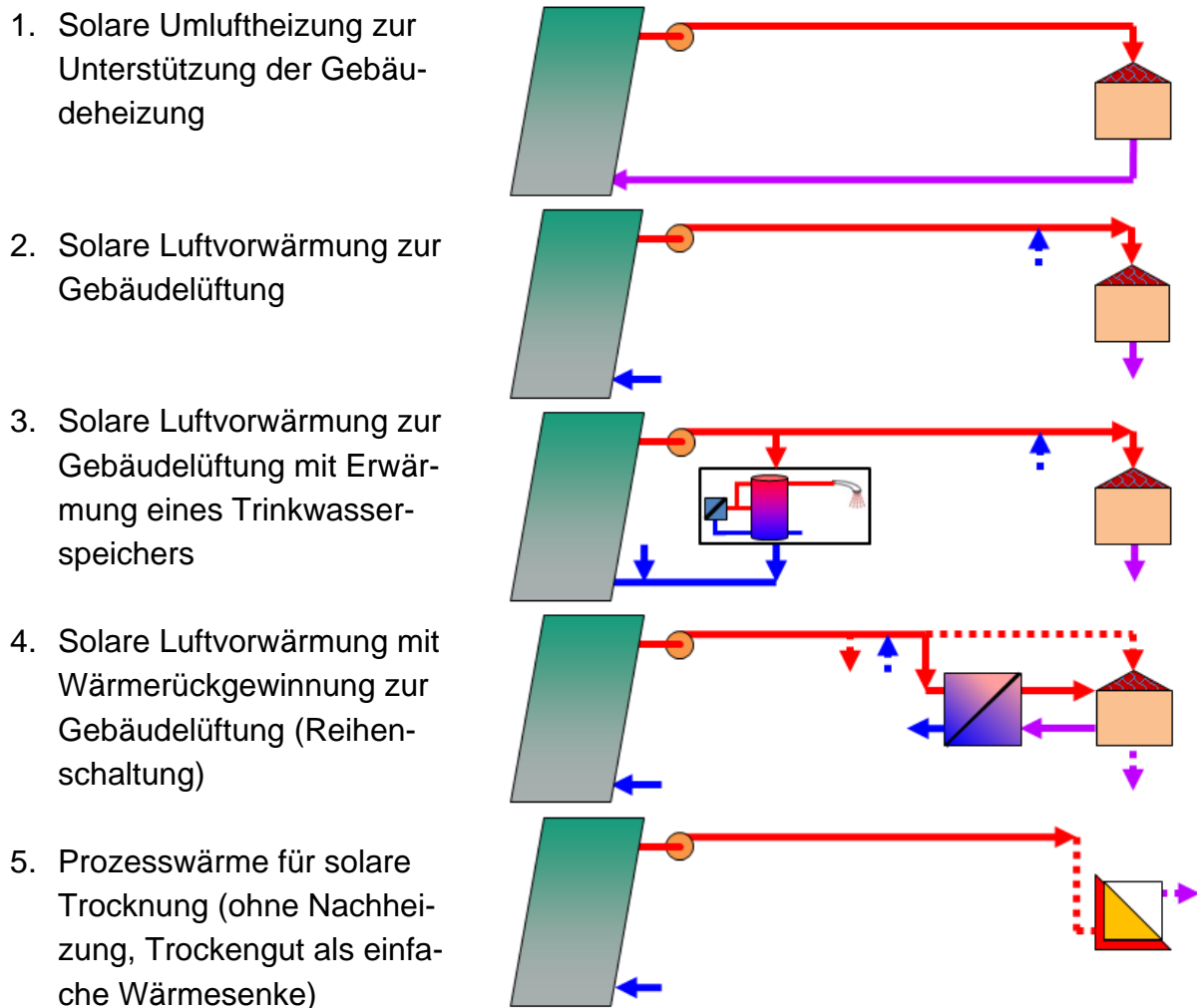


Abbildung 1: In TRNSYS modellierte Luftkollektoranwendungen (in System 5 repräsentiert das Symbol rechts einen Verbraucher zur Trocknung z. B. von Holz hackschnitzeln)

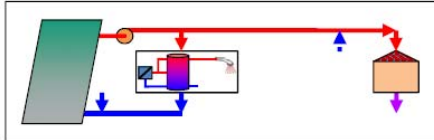
Systembeschreibung

System

Bezeichnung

Solare Lüftungsvorwärmung mit Trinkwassererwärmung

Aufbau



Komponenten

Kollektorfeld

Anstellwinkel (Horizontal: 0°)	45 °
Azimut (Süd: 0°; Ost: -90°)	0 °
Durchströmungsrichtung Kollektor	Waagrecht

Kanäle

Innendurchmesser	0.16 m
Länge	
Lüftungsvorwärmung	8.5 m
Umluftheizung	- m
Wassererwärmung	11 m
90°-Bögen (Anzahl)	5 [-]
Dämmstärke	
Im Freien	0.05 m
Im Gebäude (Lüftungsvorwärmung, Luftheizung)	0.02 m
Im Gebäude (Wassererwärmung)	0.05 m

Ventilator

Position	Saugend
Art	Radial
Antrieb	EC-Motor
Volumenstrombereich	310-730 m³/h
Druckverlustbereich	0-500 Pa
Leistungsaufnahme	10-83 W

Wärmerückgewinnung

Wirkungsgrad	- -
Verschaltung zum Luftkollektorfeld	-

Luft-Wasser-Wärmeübertrager

Übertragungsleistung	3.6 kW
Druckverlust Luft	30-35 Pa
bei Luftvolumenstrom	350-380 m³/h
bei Wasservolumenstrom	200-300 l/h

Trinkwasserspeicher

Volumen, gesamt	322 l
Volumen, Bereitschaftsteil	132 l
Dämmstärke	0.1 m

Konventionelle Heizung

Wirkungsgrad Brenner	0.85 -
----------------------	--------

Verbraucher

Gebäude

Solltemperatur	20 °C
Maximaltemperatur	24 °C
Wohnfläche	140 m²
Luftvolumen	334 m³
Fensterfläche (Süd/West/Ost/Nord)	12/4/4/3 m²
Spezifischer Wärmebedarf	100 kWh/(m²a)
UA-Wert	146 W/K
Kapazität	38 kWh/K

Luftwechsel

Infiltration	
Luftwechselrate	0.5 1/h
Kapazitätsrate	55 W/K
Mechanische Lüftung	
Luftwechselrate	1.0 1/h
Kapazitätsrate	111 W/K
Profil Montag-Freitag	6-8, 14-21 Uhr
Profil Samstag-Sonntag	7-22 Uhr

Warmwasserbedarf

Zapftemperatur	50 °C
Durchschnittliche Zapfrate	175 l/d

Randbedingungen

Klima

Standort	Würzburg (D)
Quelle	Meteonorm 6.1.0.22
Datenbasis Temperatur	1996-2005
Datenbasis Strahlung	1981-2000

Primärenergiefaktoren

Heizöl	1.1 -
Elektroenergie	3.0 -

Energiekosten

Heizöl	0.11 €/kWh
Elektroenergie	0.25 €/kWh

Optimierung

Optimierungsparameter

Aperturfläche Kollektorfeld	
Volumenstrom Kollektorfeld	

Optimierungsziele

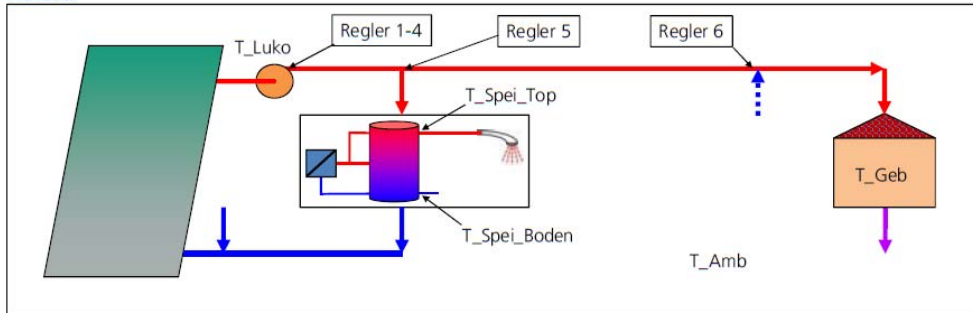
- Solarer Deckungsgrad (Vorrang) f_{save} 18.00 %
(Bezug auf Referenzsystem mit Raumheizung+Warmwasser)
- Maximale Nettoprimärenergieeinsparung
(Differenz aus Heizprimärenergieeinsparung und Hilfsprimärenergieaufwand)

Abbildung 2: Datenblatt der Systemkonfiguration zur Simulation mit einem getesteten Luftkollektor (Systembeispiel: Lüftungsunterstützung mit Trinkwassererwärmung)

Systemregelung

Bezeichnung
Solare Lüftungsunterstützung und Trinkwassererwärmung

Aufbau



Regler 1
Ventilator des Luftkollektorfeldes
Nebenregelung Lüftung

Lüftungsbedarfsprofil $mp_LP > 0$	Hysterese $T_Luko - T_Amb > 6 / 4 \text{ K}$	Übertemperaturschutz $T_Geb < T_Geb_max$	Signal(T_Amb)
1	1	1	1
			sonst 0

Regler 2
Ventilator des Luftkollektorfeldes
Nebenregelung Heizung

Lüftungsbedarfsprofil $mp_LP > 0$	Hysterese $T_Luko - T_Geb > 6 / 4 \text{ K}$	Übertemperaturschutz $T_Geb < T_Geb_max$	Signal(T_Geb)
0	1	1	1
			sonst 0

Regler 3
Ventilator des Luftkollektorfeldes
Nebenregelung Trinkwasser

Heizperiode	Heizbedarf $T_Geb > T_Geb_max$	Hysterese $T_Luko - T_Spei_Boden > 10 / 6 \text{ K}$	Übertemperaturschutz $T_Spei_Top < T_Spei_max$	Signal(T_Spei_Boden)
0	0	1	1	1
0	1	1	1	1
1	0	1	1	1
				sonst 0

Regler 3
Ventilator des Luftkollektorfeldes
Endregelung

Signal(T_Amb)	Signal(T_Geb)	Signal(T_Spei_Boden)	Heizperiode	Ventilator Luftkollektorfeld
1	0	0	1	1
0	1	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
				sonst 0

Regler 5
Verzweigung Lüftungsunterstützung
oder Trinkwassererwärmung

Heizperiode	Heizbedarf $T_Geb < T_Geb_max$	Zur Lüftungsunterstützung	Zur Trinkwassererwärmung
1	1	1	0
		sonst 0	sonst 1

Regler 4
Aufstocken des
Lüftungsmassenstroms

Lüftungsbedarfsprofil $mp_LP > 0$	$mp \Rightarrow mp_LP$	mp	T
1	0	mp_LP	T_mix
		sonst m	sonst T

Legende

- mp_LP Massenstrom des vorgegebenen Lüftungsprofils
- T_Geb_max Obere Gebäudetemperaturgrenze für Regelungszwecke
- T_Spei_max Obere Speichertemperaturgrenze für Regelungszwecke
- mp Massenstrom an einer betrachteten Stelle
- T Lufttemperatur an einer betrachteten Stelle
- T_mix Mischtemperatur $(m/mp_LP)T + (mp_LP - m)/mp_LP T_Amb$

Abbildung 3: Datenblatt der Systemregelung zur Simulation mit einem getesteten Luftkollektor (Systembeispiel: Lüftungsunterstützung mit Trinkwassererwärmung)

Zur Berechnung von Jahresenergieerträgen wurden fünf typische Solarluftsysteme modelliert, die in Abbildung 1 schematisch dargestellt sind. Für jedes System wurde ein Datenblatt mit den relevanten Informationen der Systemkonfiguration erstellt (siehe Beispiel in Abbildung 2). Wichtig ist darüber hinaus die Regelstrategie, die in einem weiteren Datenblatt beschrieben ist (siehe Beispiel in Abbildung 3).

Im Deck ist ein Gebäude mit 140 m² Wohnfläche und 100 kWh/m²a Jahresheizwärmebedarf in Würzburg hinterlegt, der sich auf 77,5 kWh/m²a reduziert, wenn die Wärmerückgewinnung aktiviert wird. Der Innenraum ist mit einem Luftknoten abgebildet. Eine kontinuierliche Infiltrationsrate und ein Profil zur Lüftungsrate werden vorgegeben.

Das Heizsystem enthält einen Wasserspeicher, welcher wahlweise als Trinkwasser- oder Kombispeicher verwendet wird, die Nachheizung enthält darüber hinaus einen Pufferspeicher mit 150 l Volumen, die konventionelle Gebäudeheizung erfolgt über Radiatoren. Der Warmwasserbedarf ist mit durchschnittlich 175 l/d bei 50 °C stochastisch verteilt. Es kann zwischen den Klimadaten von Würzburg, Athen, Davos und Stockholm umgeschaltet werden. Die Klimadaten sind mit dem Jahresertragsprogramm ScenoCalc abgeglichen.

Abbildung 4 zeigt das Modul des Luftkreises. Es enthält den auf abgedeckte Luftkollektoren erweiterten Type 832 eines flüssigkeitsdurchströmten Kollektorfelds. Der Luft/Wasser-Wärmeübertrager zur Speichererwärmung ist mit dem physikalischen Modell in Type 52b berücksichtigt. Im Luftkreis werden die Druckverluste von Kollektorfeld, Luftkanälen und Luft-Wasser-Wärmeübertrager temperaturabhängig berechnet. Das Kennlinienfeld eines Ventilators ist zur volumenstrom- und druckverlustabhängigen Berechnung der elektrischen Hilfsleistung mit einer Fläche zweiter Ordnung abgebildet.

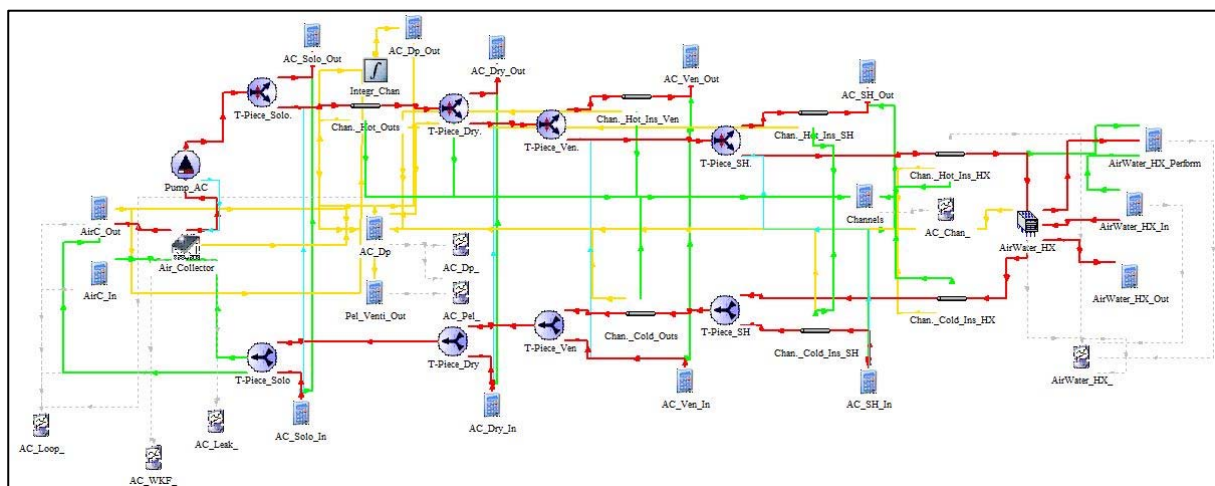


Abbildung 4: Modul des Luftkreises in TRNSYS mit Luftkollektor, Ventilator, Kanälen und Luft/Wasser-Wärmeübertrager zur thermischen Simulation und Druckverlustsimulation (rote Verbindungen führen Luftmassenströme)

3. Faire Randbedingungen

Fläche des Luftkollektorfeldes

Ein praxisnaher Vergleich von Solarkollektoren erfordert die Betrachtung des Kollektors in einem Solarsystem und den Vergleich resultierender Jahresenergieerträge. Dabei muss der Solarsystemvergleich für denselben solaren Deckungsgrad erfolgen, da dieser den spezifischen Energieertrag eines Kollektors massiv beeinflusst. Ein bestimmter solarer Deckungsgrad lässt sich durch die Anpassung der Kollektorfläche erreichen. Dies geschieht in Analogie zur Simulation für flüssigkeitsführende Kollektoren für den BAFA-Nachweis.

Zum standardisierten Vergleich von Luftkollektoren in verschiedenen Anwendungen wird der solare Deckungsgrad für jede Systemvariante vorgegeben. Für die Gebäudeanwendungen ist der solare Deckungsgrad f_{save} über das Verhältnis der durch Solarunterstützung realisierten Energieeinsparung gegenüber dem nicht solar unterstützten Referenzsystem zum Jahresheizenergiebedarf des nicht solar unterstützten Referenzsystems mit Gleichung (1) definiert. Für den Nenner wird das System ohne solare Unterstützung als Referenz simuliert. Bei allen Gebäudeanwendungen ergibt sich der Jahresheizenergiebedarf als Summe der Bedarfe für Heizung und Warmwasser.

$$f_{save} = \frac{Q_{\text{Heizung}}^{\text{Referenzsystem}} - Q_{\text{Nachheizung}}^{\text{Solarsystem}}}{Q_{\text{Heizung}}^{\text{Referenzsystem}}} \quad (1)$$

Die Ermittlung der vorzugebenden solaren Deckungsgrade erfolgt über eine ökonomische Optimierung auf der Grundlage von Simulationen des zu betrachtenden Systems bei Variation der Luftkollektorfeldfläche. Aus den simulierten Energieeinsparungen wird berechnet, bis zu welcher solaren Deckung eine Vergrößerung der Feldfläche ökonomisch ist. Berücksichtigt werden dabei

- die Preise und eine jährliche Preissteigerung für konventionellen Brennstoff (Heizöl) und Strom (für Ventilator),
- Zinsen auf eingesparte Energiekosten,
- ein Preis pro Kollektorfläche abzüglich einer einmaligen Förderung,
- entgangene Zinsen auf die Kollektorfeldinvestition, sowie
- eine Amortisationsdauer.

Erste Simulationsergebnisse mit den ermittelten solaren Deckungsgraden ergaben, dass die Randbedingungen der Systeme weiterer Anpassung bedürfen, um eine praxisnahe Abbildung von Luftkollektorsystemen zu erreichen (siehe Kapitel 4).

Länge einer Luftkollektorreihe und Volumenstrom

Bei Luftkollektoren variieren die in der Praxis angewendeten individuellen Volumenstrombereiche und Reihenlängen der verschiedenen Konstruktionen teilweise deutlich. Daher können der Volumenstrom und die Reihenlänge bei der Simulation

nicht fest als standardisierte Randbedingungen vorgegeben werden. Um faire Randbedingungen für den Vergleich von Luftkollektoren zu gewährleisten, ist die Anpassung des Volumenstroms an den massenstromabhängigen thermischen Wirkungsgrad und den druckverlustabhängigen Hilfsenergiebedarf notwendig. Gleichzeitig ist die Anpassung der Reihlänge an den druckverlustabhängigen Hilfsenergiebedarf erforderlich. Ziel der Optimierung ist dabei ein hoher thermischer Wirkungsgrad bei noch niedrigem Hilfsenergiebedarf. Die Optimierung erfolgt über die Maximierung der Differenz der eingesparten Heizprimärenergie und der aufgewendeten Primärhilfsenergie.

Optimierung von Feldfläche, Reihlänge und Volumenstrom

Zur automatischen Optimierung der Feldfläche, der Reihlänge und des Volumenstroms wurde das Optimierungsprogramm GenOpt mit TRNSYS gekoppelt. Jedoch konnte die Optimierung nicht mit ausreichender Genauigkeit in angemessener Zeit umgesetzt werden, u. a. aufgrund der Unstetigkeit der Systemmodelle und gleichzeitiger Korrelation der Parameter. Weitere Untersuchungen der Zielfunktionen und gegebenenfalls ein anderer Optimierungsalgorithmus wären notwendig, um die automatische Optimierung nutzen zu können.

Stattdessen wird nun die Optimierung von Feldfläche und Volumenstrom manuell durchgeführt. Zur Vereinfachung der Methodik entfällt dabei die Optimierung der Reihlänge. Für die relativ kleinen Luftkollektorfelder für Einfamilienhäuser wird festgelegt, dass sie aus einer Reihe bestehen. Für die großen Feldflächen des Prozesswärmesystems zur solaren Trocknung ist die Optimierung der Reihlänge unerlässlich, so dass die Optimierung für dieses System zurückgestellt wurde.

Zur manuellen Optimierung wurde ein iterierendes Verfahren entwickelt, bei dem die Kollektorfeldfläche und der Volumenstrom je vier- bzw. dreimal mit je zwei bzw. drei Simulationen optimiert werden, so dass letztlich beide Parameter gleichzeitig bezüglich ihrer Zielfunktionen optimiert sind. Dabei sind für die sich ergebende Anzahl Luftkollektoren auch nicht ganzzahlige Ergebnisse zulässig.

4. Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse werden in einem Datenblatt zusammengefasst. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für ein Solarluftsystem zur Lüftungsvorwärmung mit Trinkwasserspeichererwärmung dargestellt. Auf dem Datenblatt befinden sich links die gemessenen Luftkollektor-Modellparameter und rechts die entsprechenden Simulationsergebnisse. Als Simulationsergebnisse werden Energieerträge bzw. -einsparungen je Quadratmeter Kollektorfläche mit end- und primärenergetischem Bezug aufgeführt. Des Weiteren werden der Hilfsenergiebedarf und die Leckage gelistet.

Test- und Simulationsergebnisse

Luftkollektor

Hersteller	Beispielhersteller & Co.
Bezeichnung	Muster-Luko
Aufbau	
Abdeckung	ja
Selektive Beschichtung	nein

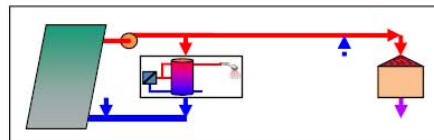
Messergebnisse

Abmessungen			
Aperturfläche		2,000	m ²
Bruttofläche		2,100	m ²
Bruttolänge		2,100	m
Bruttbreite		1,000	m
Bruttohöhe		0,150	m
Thermische Parameter			
Konversionsfaktor	η_0	0,777	-
Linearer			
Wärmeverlustkoeffizient	$a_{1,max}$	8,88	W/(m ² K)
Quadratischer			
Wärmeverlustkoeffizient	$a_{2,max}$	0,0222	W/(m ² K ²)
Massenstromabhängiger			
Wärmeverlustkoeffizient	a_3	0,0111	h/kg
Effektive Wärmekapazität	C_{eff}	11000	J/(m ² K)
Optische Parameter			
Winkelkorrekturfaktor Direktstrahlung (50°)			
Längs (Strömungsrichtung)		0,888	-
Quer		0,888	-
Winkelkorrekturfaktor Diffusstr.			
		0,777	
Hydraulische Parameter			
Druckverlust			
Linearer Koeffizient	h_1	4,44E-03	Pa/(kg/h)
Quadratischer Koeffizient	h_2	4,44E-05	Pa/(kg/h) ²
Überdruckleckage			
Linearer Koeffizient	$d_{1,e}$	8,88E-02	(kg/h)/Pa
Quadratischer Koeffizient	$d_{2,e}$	-2,22E-04	(kg/h)/Pa ²
Unterdruckleckage			
Linearer Koeffizient	$d_{1,j}$	8,88E-02	(kg/h)/Pa
Quadratischer Koeffizient	$d_{2,j}$	2,22E-04	(kg/h)/Pa ²

System

Bezeichnung
Solare Lüftungsvorwärmung mit Trinkwassererwärmung

Aufbau



Vorgabe

Solare Deckung	...	%
Anzahl Reihen	1	-
Simulationsdauer	1	a

Simulationsergebnisse

Luftkollektorfeld		
Solarertrag Feld je Aperturfläche	...	kWh/(m ² a)
Aperturfläche Feld	...	m ²
Anzahl Kollektoren	...	-
Volumenstrom Feldaustritt	...	m ³ /h
Druckverlust Feld	...	Pa
Druckverlust je Kollektor	...	Pa
Leckagemassenstrom auswärts	...	kg/h
Leckageenergieverluste auswärts	...	kWh
Leckagemassenstrom einwärts	...	kg/h
Leckageenergieverluste einwärts	...	kWh
Endenergie		
Einsp. Heizen. je Aperturfläche	...	kWh/(m ² a)
Einsparung Heizenergie	...	kWh/a
Aufwand Ventilator	...	kWh/a
CO ₂ -Einsparung (Heizöl)	...	kg/a
Jahresarbeitszahl	...	-
Primärenergie		
Nettoeinsparung je Aperturfläche	...	kWh/(m ² a)
Nettoeinsparung	...	kWh/a
Einsparung Heizenergie (Heizöl)	...	kWh/a
Aufwand Ventilator	...	kWh/a
Jahresarbeitszahl	...	-
Kosten		
Einsparung (Heizöl)	...	€/a
Aufwand (Ventilatorstrom)	...	€/a
Energiekosteneffizienz	...	-

Abbildung 5: Datenblatt der Testergebnisse eines Luftkollektors und der Simulationsergebnisse des getesteten Luftkollektors im Referenzsystem (Systembeispiel: Lüftungsunterstützung mit Trinkwassererwärmung)

Für die im Rahmen von Luko-E vermessenen Kollektoren wurden erste Simulationen mit den verschiedenen Systemkonfigurationen durchgeführt und die Jahresenergieerträge mit den Luftkollektorherstellern diskutiert. Dabei zeigte sich, dass die simulierten Netto-Primärenergieeinsparungen geringer waren, als die Hersteller gemäß ihrer Praxiserfahrungen erwarten. Als Grund wurden folgende ungünstig gewählte Randbedingungen für die Simulation identifiziert:

- Die Südfensterfläche des simulierten Gebäudes ist relativ groß, was zu relativ hohen passiven Solargewinnen führt, die in Konkurrenz zu den direkt genutzten solaren Erträgen der Solarluftanlage stehen. Luftkollektoranlagen sind vor allem vorteilhaft bei Gebäuden mit einem höheren Heizwärmebedarf und ohne große Südfenster beziehungsweise mit starker Verschattung der Fenster.
- Die Fläche des Luftkollektorfeldes und damit der solare Deckungsgrad sind in Realität meist kleiner als in der Simulation angesetzt.
- Häufig wird eine weitere bislang nicht als Modell abgebildete Systemvariante – solare Umluftheizung mit Lüftungsvorwärmung (mit und ohne Trinkwasser-Speichererwärmung) – realisiert, welche so geregelt wird, dass der solar zu erwärmende Luftstrom für beide Betriebsarten optimal gemischt werden kann.

Daraus folgt, dass die Definition von Standardsystemen und ihren Randbedingungen, aus welchen Förderkriterien abgeleitet werden, vor der endgültigen Festlegung nochmals intensiv mit der Branche auf Praxistauglichkeit hin diskutiert werden müssen. Mit der beschriebenen Methodik und dem TRNSYS-Simulationsdeck steht der Luftkollektorbranche aber erstmals ein fundiertes Verfahren zur Verfügung, das an konkrete Anwendungen angepasst und damit zum Vergleich und zur Optimierung von Luftkollektoren und deren Systemen sowie zum Vergleich von Flüssigkeitskollektorsystemen eingesetzt werden kann.

Trotz der noch an die Praxis anzupassenden Randbedingungen konnten aus den ersten Simulationsergebnissen schon grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden, welche mit den Industriepartnern diskutiert wurden. Der zu optimierende Volumenstrom ergibt sich nicht nur aus den Eigenschaften des Luftkollektors, sondern wird auch stark vom übrigen System beeinflusst, wie dessen Strömungswiderstand, thermische und exergetische Verluste sowie Regelungseinstellungen. Die thermischen Verluste durch Leckage eines weniger dichten Luftkollektors erreichten je nach System Werte von Null bis zu höheren einstelligen Prozentbeträgen. Dementsprechend wiesen die dichteren Luftkollektoren deutlich geringere thermische Verluste durch Leckage auf.

5. ScenoCalc

Für künftige Überarbeitungen der MAP-Richtlinie wird erwartet, dass das Verfahren zum Nachweis eines Mindestertrags von $525 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ für flüssigkeitsführende Kollektoren durch ein europaweit einheitliches Verfahren zur Ertragsberechnung ersetzt wird. So wird in manchen Ländern Europas die Förderung mittlerweile auf

einen jährlichen Kollektorertrag CAO (Collector Annual Output) am Kollektorausstritt bei 100 % Nutzungsgrad bezogen, welcher sich aus der Komponentensimulation eines Kollektors über ein Jahr mit dem Excel-basierten Programm ScenoCalc (Solar Collector Energy Output Calculator) ergibt. Seit dem 1. Januar 2013 ist diese Berechnung für jeden Solar Keymark zertifizierten Kollektor verpflichtend anzugeben (CEN Certification und Solar Keymark Network 2013). Falls der bisherige Ertragsnachweis für flüssigkeitsführende Kollektoren in Deutschland durch ScenoCalc ersetzt wird, sind dort künftig auch die Luftkollektoren zu integrieren.

Zu diesem Zweck wurden in dem vorgestellten Simulationsdeck die Klimadaten von Würzburg, Athen, Davos und Stockholm mit ScenoCalc abgeglichen. Damit kann das Deck die Umsetzung der Simulation realistischer Jahreserträge von Luftkollektoren in ScenoCalc unterstützen. Dies betrifft beispielsweise die Ermittlung des in der Simulation zu verwendenden Massenstroms für einen effizienten Betrieb und die Berücksichtigung der Leckage.

6. Empfehlungen zum Förderkriterium

Im Rahmen des MAPs wird die Installation von solarthermischen Anlagen mit flüssigkeitsgeführten Kollektoren mit Zuschüssen je Quadratmeter Kollektorfläche gefördert. Zur Gewährleistung einer Mindestqualität bei den geförderten Anlagen wird das Solar Keymark-Zertifikat abgefragt. Um eine Mindesteffizienz zu sichern, müssen die Kollektoren ihre Effizienz durch den Simulationsnachweis eines Mindestertrags von 525 kWh/m²a bei 40 % solarer Deckung der Trinkwassererwärmung am Standort Würzburg nachweisen. Der Mindestertrag ergibt sich dabei am Austritt des Kollektorfeldes, jedoch wird dieser für das Erreichen der vorgegebenen solaren Deckung noch um die thermischen Verluste von Rohren und Speicher reduziert. Dies kann leicht zu einer Fehlinterpretation und in Folge zu einer Überbewertung des Trinkwassersystems führen. Der Mindestertrag in einer Trinkwarmwasseranlage wird aufgrund historischer Änderungen derzeit auch zur Förderung von Kombianlagen herangezogen. Dies sind Gründe für derzeit laufende Diskussionen zur Überarbeitung des Förderkriteriums für Flüssigkeitskollektoren, welche auch bei der Wahl des Förderkriteriums von Luftkollektoren berücksichtigt werden sollten.

Da Luftkollektoren in dem Referenzsystem zur solaren Trinkwassererwärmung nicht sinnvoll eingesetzt werden können, ist der Nachweis des Mindestertrags entsprechend oben genannter Bedingungen für Luftkollektoren nicht möglich. Zudem konnten Luftkollektoren bis zur Normänderung im Jahr 2014 kein Solar Keymark-Zertifikat erhalten. Daher wurden Solarluftsysteme im MAP dann gefördert, wenn ein Prüfinstitut den Luftkollektoren eine den wasserführenden Kollektoren vergleichbare Mindestleistung in ihrem Anwendungsgebiet bescheinigt hatte.

Das Ziel der Solarförderung ist nach Präambel des MAP der Umwelt- und Klimaschutz, sprich der Ersatz von fossilen durch erneuerbare Energien (Bundesministerium für Umwelt 2012). Eine Förderung ist demnach nur dann gerechtfertigt, wenn Anreize für Investitionen in Anlagen zur Nutzung erneuerbarer

Energien stimuliert werden, welche ohne Förderung nicht stattgefunden hätten. Als zu überwindende Investitionshindernisse kommen in Betracht, dass die Nutzung der erneuerbaren Energien teurer als die Nutzung fossiler Energien ist, oder dass die Technologien nicht ausreichend bekannt sind.

Die gerechteste Art der Förderung wäre es, dem Solaranlagenbetreiber für jede tatsächlich erzeugte und genutzte solare Kilowattstunde (und damit jede vermiedene fossile Kilowattstunde) eine Vergütung zu bezahlen, welche der Differenz zum fossilen Wärmepreis nahekommt. Da der Mess- und Abrechnungsaufwand hierfür jedoch noch zu hoch ist, kommt dies für kleine und mittlere Anlagen derzeit nicht in Frage. Allerdings könnte stattdessen die Förderung proportional zum prognostizierten Anlagenertrag ausbezahlt werden. Da die Umsetzung dieser Möglichkeit aber erst seit wenigen Jahren verfolgt wird, wurde die Förderung bisher weiterhin proportional zur Kollektorfläche gewährt.

Dies zeigt, dass der aktuelle Mindestertragsnachweis nur ein Ersatzkriterium darstellt, welches eine gewisse Berechtigung hat, allerdings auch Nachteile im Sinne einer Fehlsteuerung aufweist. Dies muss bei der Weiterentwicklung des Kriteriums und bei einer Ausweitung auf Luftkollektoren berücksichtigt werden. Aufgrund der Arbeiten in Luko-E lassen sich folgende generellen Empfehlungen zu einem Förderkriterium für Luftkollektoren ableiten:

- **Kollektortypisches Referenzsystem:** Der Ertragsnachweis sollte für ein Referenzsystem erbracht werden, welches für den Kollektortyp typisch ist (kein Trinkwassersystem für Luftkollektoren, da diese für Luftheizsysteme konzipiert sind).
- **Ertragssimulation mit modelliertem System:** Ein dem heutigen Stand für flüssigkeitsführende Kollektoren entsprechender Nachweis könnte durch Ertragssimulation in einem Standardsystem mit der in Luko-E entwickelten Methode erbracht werden. Es sind jedoch noch weitere Arbeiten erforderlich, um hierfür realistische Randbedingungen zu definieren.
- **Verschiedene Systemkonfigurationen:** Da sich Luftkollektoren in ihrer Bauweise wesentlich stärker in Bezug auf die Anwendung unterscheiden, ist zu prüfen, ob für die Ertragssimulation verschiedene Systemkonfigurationen für unterschiedliche Luftkollektoren definiert werden müssen.
- **Primärenergetischer Nettoertrag des Systems:** Es sollte geprüft werden, ob statt des Kollektormindestertrags der Ertrag des Solarluftsystems oder die resultierende Heizenergieeinsparung (möglichst unter Berücksichtigung des primärenergetischen Hilfsenergiebedarfs) als Förderkriterium genutzt werden kann. Da durch Luftkollektoren erwärmte Luft bevorzugt ohne Speicherung direkt genutzt wird, und da durch flüssigkeitsführende Kollektoren erwärmtes Wasser i. d. R. wärmeverlustbehaftet zwischengespeichert wird, würde sich bei Verwendung des Ertrags jeweils am Kollektorfeldaustritt ein unfairer Vergleich beider Kollektorvarianten ergeben – vorteilhaft für flüssigkeitsführende Kollektoren. Der Systemertrag und auch die resultierende Heizenergieeinsparung haben hingegen eine hohe praktische Aussagekraft. Die Berücksichtigung des primärenergetischen

Hilfsenergiebedarfs verfolgt einen ökologischen Ansatz. Die Verwendung von Endenergien ist weder ein ökologischer noch ein ökonomischer Ansatz.

- **Förderhöhe gemäß Nettoertrag:** Es sollte in Betracht gezogen werden, die Förderhöhe am Förderkriterium auszurichten, um bessere Kollektoren attraktiver zu machen.
- **Oder Kollektormindestenertrag mittels ScenoCalc:** Solange der Kollektormindestenertrag als Förderkriterium genutzt wird, ist zu prüfen, inwieweit das Excel-basierte Programm ScenoCalc als einfaches und europaweit einheitliches Simulationstool genutzt und auf Luftkollektoren angepasst werden kann. Beispielsweise muss der in der Simulation zu verwendende Massenstrom für einen effizienten Betrieb ermittelt werden, bspw. nach der Methode zur analytischen Ermittlung des Massenstroms maximaler Primärenergieeinsparung MMP entsprechend (Welz, Maurer et al. 2014). Zudem ist die Leckage in ScenoCalc derzeit nicht berücksichtigt.

7. Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Ermittlung eines Entscheidungskriteriums zur staatlichen Förderung von Luftkollektorsystemen entwickelt. Hierzu wurden fünf Luftkollektoranwendungen in einem TRNSYS-Deck modelliert, welche auf Systemdatenblättern übersichtlich erläutert sind. Die Methode gewährleistet die faire Bewertung von Luftkollektoren durch die jeweilige Optimierung der Kollektorfeldfläche, des Volumenstroms und der Reihenlänge.

Für die Darstellung der Test- und Simulationsergebnisse wurde ein Datenblatt entworfen. Erste Simulationsergebnisse zeigten, dass die Randbedingungen weiterer Anpassung an den realen Einsatz von Luftkollektorsystemen bedürfen. Allerdings konnten grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden, wie die Relevanz der Leckage und der nicht nur vom Luftkollektor, sondern auch vom Gesamtsystem stark beeinflusste zu optimierende Volumenstrom.

Neben der oben genannten Ermittlungsmethode über Systemsimulationen wurde als weitere Möglichkeit auf die Verwendung des Excel-basierten Programms ScenoCalc zur Simulation der Kollektoren als Komponente eingegangen. Zur Wahl des Entscheidungskriteriums zur staatlichen Förderung von Luftkollektorsystemen wurden Empfehlungen gegeben.

8. Danksagung

Das Projekt Luko-E (Förderkennzeichen: 0325959A) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung.

9. Literatur

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit** (2012). Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. B. d. Justiz. Bonn, Bundesanzeiger
- CEN Certification und Solar Keymark Network** (2013). Specific CEN Keymark Scheme Rules for Solar Thermal Products. Solar Keymark – Specific Scheme Rules 27
- Kramer, K.** (2012). "Interaction of regulation and innovation: Solar air heating collectors." *Energy Procedia* **30**(0): 1311-1321.
- Kramer, K., C. Thoma, et al.** (2014). Testing solar air-heating collectors. SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, September 23-25. Freiburg, Germany
- Mauthner, F. und W. Weiss** (2013). Solar heat worldwide - Markets and contribution to the energy supply 2011. IEA Solar Heating & Cooling Programme. Gleisdorf, Austria, AEE - Institute for Sustainable Technologies
- Norm ISO 9806:2013(E)** Solar energy — solar thermal collectors — test methods, edition 2013-11
- Stryi-Hipp, G., Thoma, et al.** (2014). Abschlussbericht zum Projekt »Luko-E Grundlagen zur Luftkollektorentwicklung«, Freiburg
- Welz, C., C. Maurer, et al.** (2014). Mass flow, pressure drop, and leakage dependent modeling and characterization of solar air collectors. SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, September 23-25. Freiburg, Germany
- Welz, C., M. Knecht, et al.** (2013). Thermohydraulische Simulation von Luftkollektorsystemen und Systembezogene Bewertung von Luftkollektoren. 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April, Bad Staffelstein, Germany