

Kollektoren in solarthermischen Systemen

U. Frei

SPF Solartechnik Prüfung Forschung

Ingenieurschule Rapperswil ITR

8640 Rapperswil

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Flachkollektoren
3. Röhrenkollektoren
4. Kollektor Leistungs- und Qualitätsprüfung
5. Auswahl von geeigneten Kollektoren
6. Schlussfolgerungen

1. Einleitung

Die heute hauptsächlich eingesetzten Kollektoren lassen sich in Flach- und Vakuumröhrenkollektoren unterteilen. Daneben existieren Sonderbauformen, die Merkmale von beiden Bauarten aufweisen (z. B. teilvakuierte Flachkollektoren). Kollektoren mit Luft als Wärmeträger sowie Absorbermatten für die Schwimmbadwasser-Erwärmung werden nicht diskutiert.

Flach- und Röhrenkollektoren werden für die Brauchwassererwärmung und die Raumheizungsunterstützung seit 20 Jahren eingesetzt. Die leider teilweise ungenügenden Produkte der Pionierzeit wurden durch verbesserte, qualitativ und leistungsmässig mehrheitlich akzeptable Produkte abgelöst. Der europäische Markt weist zur Zeit ein jährliches Volumen von insgesamt ca. 0,5 Millionen Quadratmetern auf und wächst trotz nach wie vor wirtschaftlich ungünstiger Randbedingungen weiter an.

Dies ist auch der Grund, dass weiterhin eine Zunahme von Herstellern zu verzeichnen ist. Neben den seit mehreren Jahren erfolgreichen, kleineren spezialisierten Sonnenenergiefirmen kommen wieder vermehrt grössere Hersteller mit neuen Produkten auf den Markt. Interessanterweise sind es teilweise dieselben Firmen, die bereits in den Jahren 1970 bis 1980 Kollektoren produziert haben. Damit ungenügende Produkte, wie sie damals angeboten wurden, den zur Zeit guten Ruf der Solartechnik nicht schädigen, werden Qualitäts- und Leistungsprüfungen durch spezialisierte Institute durchgeführt.

Neben der Kolleorteknik ist auch die Systemtechnik in den letzten 10 Jahren nicht stehengeblieben! Von der Klein- bis zur Grossanlage ist gerade zum jetzigen Zeitpunkt eine innovative Phase zu verzeichnen, beispielsweise:

- preiswerte "Solarkits" mit neuartigen Betriebsstrategien wie z.B. "Low-Flow"
- heizungsunterstützende Anlagen mit geschichteten Speichern
- Brauchwassererwärmung im Mehrfamilienhaus mit Legionellenschaltung
- Nahwärmeversorgungssysteme mit Saisonspeicher

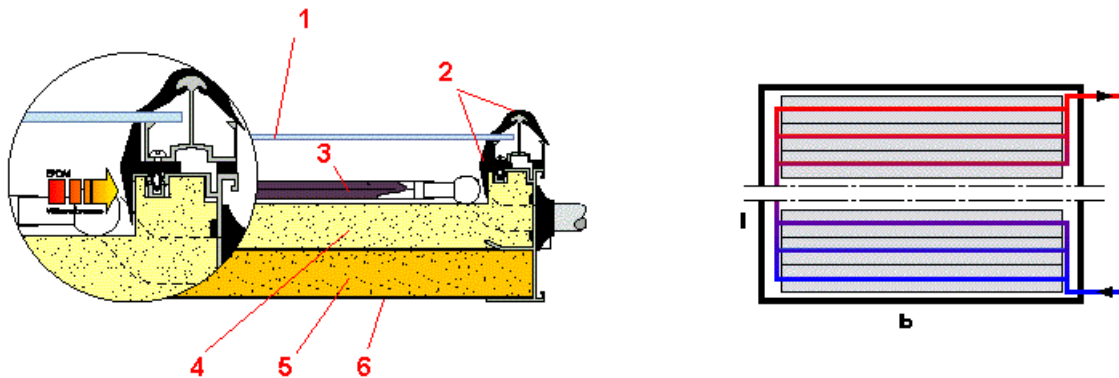
Der Kollektor muss immer als Teil eines Systems gesehen werden. Selbst ein leistungsfähiger Kollektor ist nicht in der Lage, in einem schlechten System einen hohen Ertrag zu erzielen. Grundsätzliche Voraussetzung für eine gute Anlage ist die realistische Bestimmung des tatsächlichen Wärmebedarfs. Natürlich ist eine sorgfältige, fachgerechte Planung und Ausführung ebenfalls notwendig. Der Wahl des Kollektors kommt immer besondere Bedeutung zu. Neben den technischen Aspekten wie Leistungsfähigkeit, Qualität, Bauform usw. sind optische bzw. architektonische Aspekte zunehmend wichtig. Die Zeit der dilettantischen Aufbauten mit zusätzlichen Gerüsten ist vorbei. Bauherren verlangen zurecht ansprechende Lösungen ohne grosse Kompromisse bezüglich der Technik. Damit ist der Architekt oder Planer gefordert! Neue Planungshilfsmittel müssen diesen veränderten Randbedingungen Rechnung tragen. Der unter Kapitel 5 vorgestellte, elektronische LTS-Katalog (Leistungsfähigkeit thermischer Sonnenkollektoren) kommt den veränderten Zielsetzungen weitestgehend entgegen. Die optische Vorstellung jedes Produkts ist neben Integrationsmöglichkeiten und vieler technischer Daten wichtiger Teil der Software.

2. Flachkollektoren

Oberflächlich betrachtet hat sich der Aufbau von Flachkollektoren in den letzten 20 Jahren kaum verändert. Die grundlegenden Komponenten, wie transparente Abdeckung, Absorber mit Beschichtung, Rahmen und Wärmedämmung, sind nach wie vor in jedem thermischen Flachkollektor enthalten. Bei näherer Betrachtungsweise stellt man allerdings fest, dass die Kollektoren bis heute wesentlich verbessert wurden. Alle eingesetzten Komponenten, die nachfolgend diskutiert werden, sind hinsichtlich Leistungsfähigkeit und insbesondere der Lebensdauer kaum mehr vergleichbar mit den Produkten aus der Anfangszeit. Neben den konventionellen, belüfteten Flachkollektoren werden auch Produkte mit Edelgasfüllung oder mit unterschiedlich evakuierten Gehäusen angeboten.

Die Modulgrößen variieren von minimal 1.5 m^2 bis zu 8 m^2 . Die Tendenz geht mehr und mehr zu grösseren Modulen. Die Vorteile liegen in den reduzierten Verbindungsstellen und den reduzierten Wärmeverlusten durch kleinere Randanteile.

Natürlich müssen für grössere Module entsprechend stabilere bzw. angepasste Rahmen eingesetzt werden. Neben den Modulkollektoren werden immer häufiger Dacheinbaukollektoren eingesetzt. Das Erscheinungsbild der Anlage kann dadurch in vielen Fällen verbessert werden. Einzelne Hersteller verwenden Zubehörteile für die Dachintegration von Modulkollektoren. Die folgenden Querschnitte geben einen Einblick über die Vielfalt an Lösungsmöglichkeiten von Flachkollektoren:

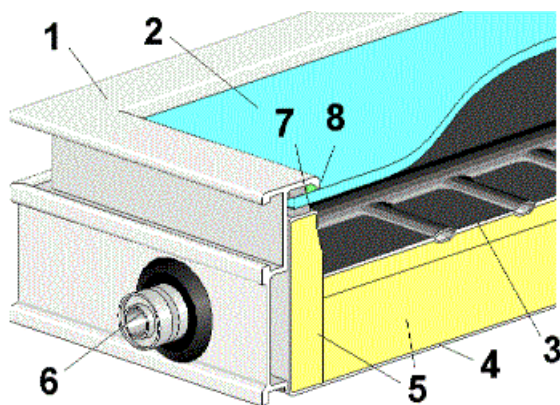


1. Glasabdeckung, strukturiert, eisenfrei, gehärtet
2. Glashalteprofil, Aluminiumrahmen
3. Fahnen-Absorber, selektiv beschichtet
4. Mineralwolle
5. Polyurethanschaum mit Aluminium-Kaschierung auf beiden Seiten
6. Rückwand

Merkmale:

Modulkollektor in Grossbauweise. Ein Modul hat bis zu 8 m^2 Fläche. Die Verglasung erfolgt erst am Ende der Montage. Dadurch sind die Kollektoren im Verhältnis zu ihrer Grösse leicht und gut installierbar.

Abb. 1: Grossmodul-Flachkollektor, links: Schnitt, rechts Absorbermasse: $l = 1.48 \text{ m}$, $b = 3.83 \text{ m}$, (Wagner, LTS-Nr. 236)



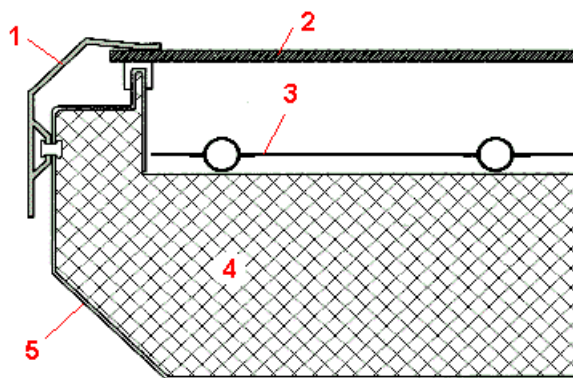
- 1. Aluminiumrahmen
- 3. Aluminium-Rollbondabsorber, solar selektiv beschichtet
- 5. Wärmedämmung
- 7. Glasauflage

- 2. Glasabdeckung, eisenfrei, gehärtet
- 4. Aluwanne, in den Ecken geschweisst
- 6. Anschluss für flexible Verbindung
- 8. Silikonfuge

Merkmale:

Modernes, aufwendiges Konzept, die Verbindungstechnik mittels Edelstahlfallenbälgen hat sich seit mehr als 10 Jahren bewährt. Rollbondabsorber sind preiswert, deren solarselektive Beschichtung ist dagegen vergleichsweise teuer.

Abb. 2: Modulflachkollektor (Lenz-Multisol, LTS-Nr. 61)



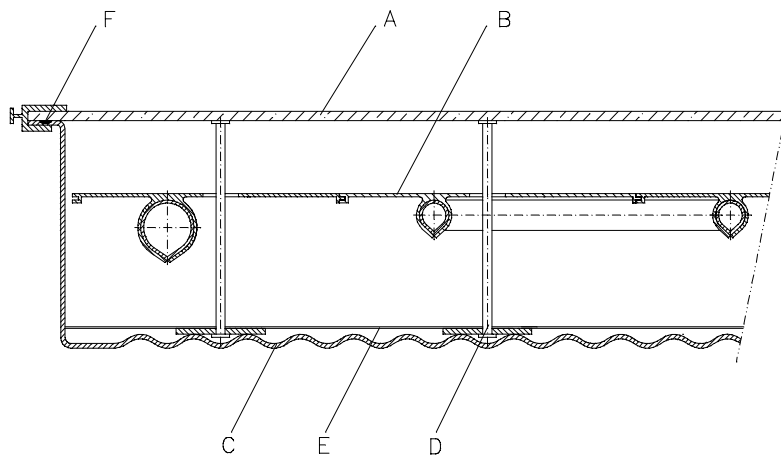
- 1. Edelstahl-Rahmen
- 3. Fahnen-Absorber, selektiv beschichtet
- 5. Aluwanne in den Ecken geschweisst

- 2. Glasabdeckung, strukturiert, eisenfrei, gehärtet
- 4. Wärmedämmung

Merkmale:

Modernes, sehr einfaches Konzept.

Abb. 3: Modulflachkollektor (Fyrosol, LTS-Nr. 139)

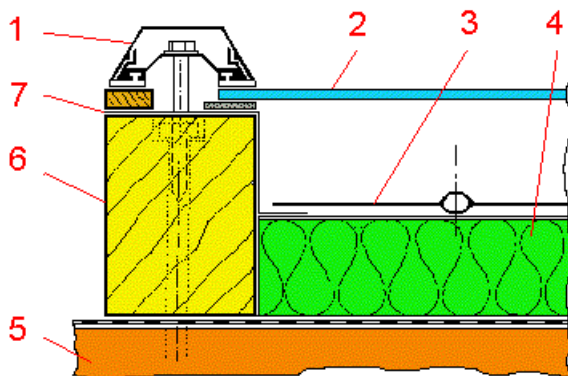


- | | |
|---|--|
| A. Glasabdeckung, strukturiert, eisenfrei, gehärtet | B. Fahnen-Absorber, selektiv beschichtet |
| C. Aluminiumrahmen | D. Stützen |
| E. Aluminiumfolie | F. Dichtung |

Merkmale:

Modulkollektor mit Teilvakuum. Der Kollektor wird erst nach der Installation mittels zusätzlicher Leitung vom Kollektor in den Installationsraum teilvakuiert (Druck im Kollektor je nach Pumpe 10 bis 0.1 mbar). Der Kollektor muß in regelmässigen Abständen nachevakuiert werden. Dasselbe Modul wird als Dachaufbau und als dachintegrierter Kollektor eingesetzt.

Abb. 4: Teilvakuiertes-Flachkollektor (Thermosolar, LTS-Nr. 75)



- | | |
|--|-----------------|
| 1. Abdeckprofil, Alu | 2. Abdeckung |
| 3. Absorber, solarselectiv beschichtet | 4. Wärmedämmung |
| 5. Unterdach | 6. Rahmen |
| 7. Alublech | |

Merkmale:

Dacheinbau-Kollektor, der erst auf der Baustelle zusammengesetzt wird. Das heisst, Rahmen, Absorber, Glas, Isolation etc. werden lose auf die Baustelle geliefert. Die Installation erfolgt direkt auf die Dachlatung. Der Kollektor ersetzt damit die Dachhaut (Ziegel).

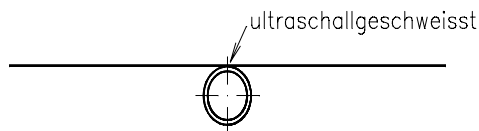
Abb. 5: Einbaufachkollektor (Vitruv, LTS-Nr.65)

2.1 Absorber

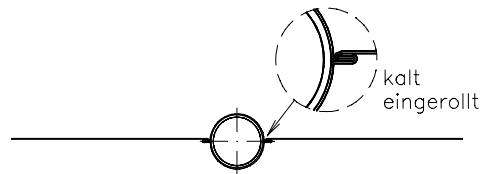
Der Absorber mit seiner Beschichtung bildet das "Herzstück" jedes Kollektors! Die Leistungsfähigkeit hängt entscheidend von den optischen Eigenschaften der Beschichtung, sowie der Geometrie und der Materialwahl des Absorbers ab.

Die Absorberbauformen sind sehr unterschiedlich. Die wesentlichen Typen sind in den nachfolgenden Abbildungen enthalten:

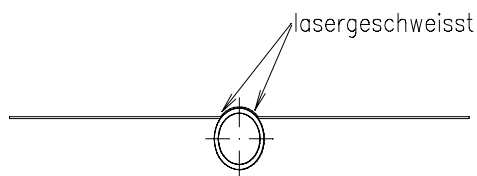
A:



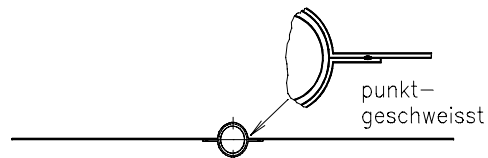
B:



C:



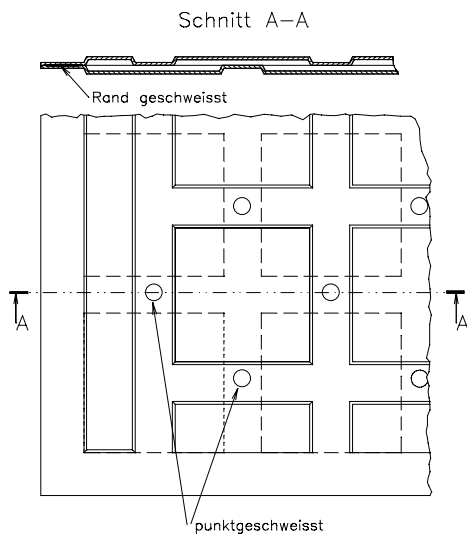
D:



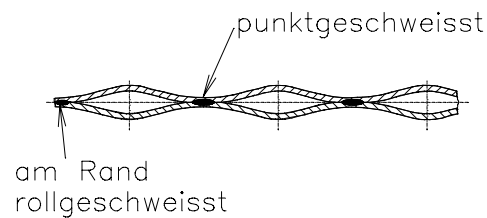
- A: Fahnen-Absorber aus Kupfer, Rohr mit Blech mittels Ultraschallschweissung verbunden (Hochfrequenz- bzw. Plasmaschweissen ebenfalls möglich)
- B: Fahnen Absorber aus Kupfer, Rohr mit Blech umhüllt
- C: Fahnen Absorber aus Kupfer, Rohr mit Blech lasergeschweisst
- D: Fahnen Absorber aus Kupfer, Rohr mit Blech umhüllt und punktgeschweisst

Abb. 6: Diverse Fahnen-Absorber

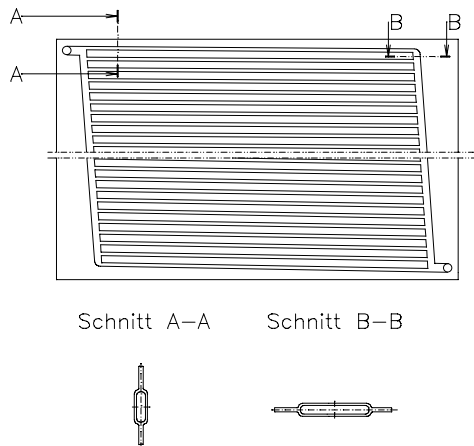
E:



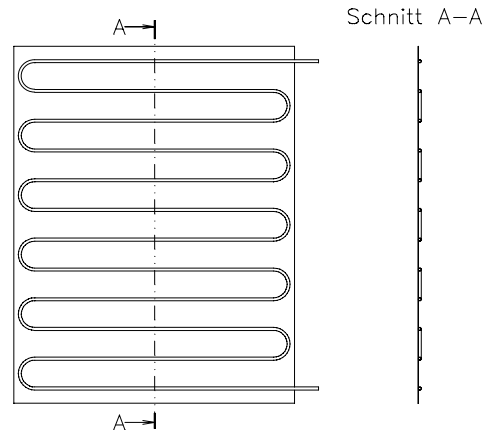
F:



G:



H:



- E: Vollflächig durchströmter Edelstahl-Absorber (Energie Solaire)
 F: Vollflächig durchströmter Stahl-Absorber (z. B. Solahart)
 G: Rollbondabsorber aus Aluminium (z. B. VDM-Evidal)
 H: Plattenabsorber aus Kupfer mit aufgelöteten Rohren (z. B. Solar-Graubünden)

Abb. 7: Diverse Plattenabsorber

Die Vorteile der Fahnenabsorber sind die grosse Flexibilität bezüglich der Grösse des gesamten Absorbers und der Art der Durchströmung (Serie- bzw. Parallelschaltung der Fahnen).

Die vollflächig durchströmten Absorber können zu sehr effizienten Kollektoren führen.

Die Leistungsfähigkeit des Absorbers wird mit dem Kollektorwirkungsgradfaktor F' beschrieben. Einen wesentlichen Einfluss auf diesen Faktor haben:

- Absorberbauart bzw. Absorbergeometrie (Material, Materialstärken)
- Wärmeübergang Fluid / flüssigkeitsführender Teil des Absorbers
- Wärmeverlustfaktor des Kollektors (Emissionsgrad der Absorberbeschichtung, konvektive Verluste, Wärmeleitung Wärmedämmung Rückseite und Rahmen)

Neben einem hohen Kollektorwirkungsgradfaktor ist die homogene Durchströmung des gesamten Absorbers im Kollektor eine wichtige Voraussetzung für einen hohen Wirkungsgrad. Dabei spielt die Gesamtdurchflussmenge durch den Kollektor eine wichtige Rolle. Beispielsweise sind in einem Fahnen-Absorber mit Sammelrohren die Rohrdurchmesser und damit die Druckverlustverhältnisse von Bedeutung. Für niedrige Durchflussraten (Lowflow, Microflow) eignet sich diese Bauart überhaupt nicht. Der Wirkungsgrad von Kollektoren mit vollflächig durchströmten Absorbern ist, falls sie von unten nach oben durchströmt werden, weniger abhängig von der Durchflussrate.

2.2 Absorberbeschichtung

Die Absorberbeschichtung hat die Aufgabe, die auf den Absorber auftreffende Sonnenstrahlung zu einem möglichst grossen Teil zu absorbieren und damit in Wärme umzuwandeln. Dies gilt unabhängig von der Anwendung des Kollektors! Im "thermischen" Bereich des Spektrums, d. h. im Infraroten, gilt es nun möglichst wenig Energie wieder abzustrahlen. Absorberbeschichtungen mit hohem Absorptionsgrad α , im Wellenlängenbereich der eingestrahnten Solarstrahlung (0,3 - 2,5 μm) und gleichzeitig tiefem Emissionsgrad ϵ , im Wellenlängenbereich 2,5 - 50 μm , werden als selektive Schichten bezeichnet.

In modernen Flachkollektoren kommen fast immer selektive Absorberbeschichtungen zum Einsatz. Die folgenden Schicht-Typen stehen dabei im Vordergrund:

- Schwarz-Chrom
- Nickelpigmentiertes Aluminiumoxyd
- "Sputterschichten"

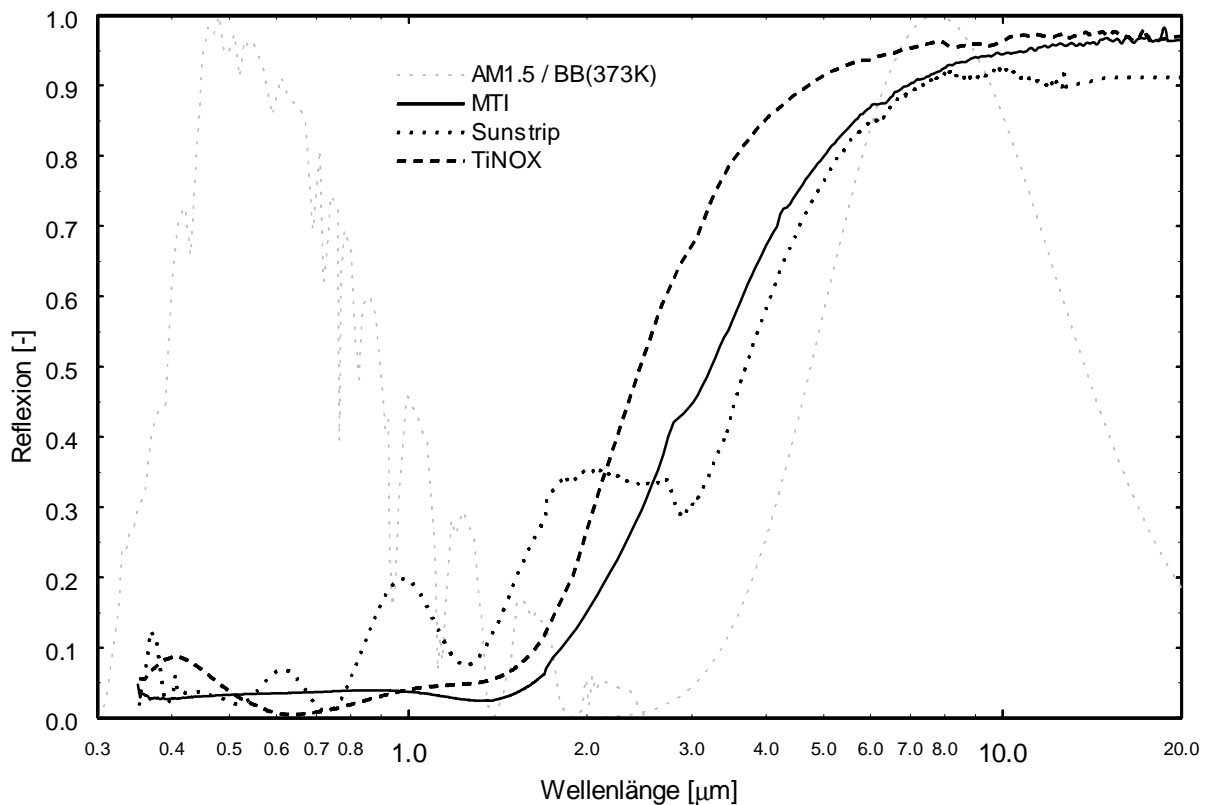


Abb. 8: Optische Eigenschaften von Absorberbeschichtungen

Schwarz-Chrom wird üblicherweise mit einer Nickel-Zwischenschicht auf Kupfer mittels Galvanotechnik aufgebracht. Dieser Schichttyp und Schichtaufbau hat sich bewährt und ist innerhalb der Lebensdauer eines Kollektors keiner signifikanten Degradation unterworfen. Dasselbe gilt für Schwarz-Chrom Schichten, die direkt auf Edelstahl aufgebracht werden^{/3/}.

Schwarz-Chrom Schichten auf Aluminium weisen mehrere Zwischenschichten auf und sind dementsprechend schwieriger und aufwendiger in der Produktion.

Nickelpigmentiertes Aluminiumoxyd kann ausschliesslich in Verbindung mit Aluminium hergestellt werden. Es handelt sich dabei um ein spezielles "Eloxal"-Verfahren. Laboruntersuchungen und Messresultate aus der Praxis haben gezeigt, dass dieser Schichttyp empfindlich ist, gegenüber hohen Feuchten im Kollektor^{/3/}. Dieser Schichttyp darf nur in Kollektoren eingesetzt werden, die über eine optimierte Ventilationsrate und ein absolut regendichtes Gehäuse verfügen.

"Sputterschichten" sind in den letzten Jahren als Beispiele erfolgreichen Technologietransfers von der Forschung in die Praxis entstanden. Neben anderen Herstellungsverfahren stehen gesputterte "Cermets" im Vordergrund. Die Beschichtungstechnik ist vergleichbar mit der Herstellung von niedrigemittierenden Oberflächen von Architekturgläsern. Die Vorteile dieser Herstellungsmethode sind:

- Bessere Reproduzierbarkeit und damit bessere Qualitätskonstanz als bei galvanischen Beschichtungen
- Keine kritischen Abfälle
- Deutlich niedrigere Energieaufwendungen für die Produktion

2.3 Transparente Abdeckungsmaterialien

Die transparente Abdeckung hat sowohl die Aufgabe, die Solarstrahlung in den Kollektor einwirken zu lassen, als auch den Wärmeverlust des Kollektors zu reduzieren. Die im Bereich der Wärmestrahlung nicht transparente Abdeckung führt zum "Treibhauseffekt" im Kollektor und schützt gleichzeitig den Absorber vor Wärmeverlusten durch Windeinwirkung.

Für die Abdeckung der Kollektoren werden häufig Gläser und Kunststoffe eingesetzt. Der Vorteil der Gläser liegt in der bewährten Langzeitstabilität in Bezug auf die optischen und mechanischen Eigenschaften. Daneben werden Kunststoffe teilweise mit Erfolg eingesetzt; allerdings sollten klare Garantiebestimmungen für den Fall von frühzeitigen Schäden vorhanden sein. Der Vorteil von Kunststoffen ist ihr geringeres Gewicht, das zu insgesamt besser handhabbaren Kollektoren führt. Zudem lassen sich z. B. gewellte Kunststoffabdeckungen bei dachintegrierten Kollektoren gut mit anderen Dach-Abdeckungsmaterialien kombinieren. Neben den optischen Eigenschaften sollten bei Kunststoffen immer auch die mechanischen Eigenschaften geprüft werden. Von Bedeutung ist dabei allenfalls die Hagelschlagfestigkeit und die Schneelast. In schneereichen Gebieten ist ein minimaler Anstellwinkel von 30° empfehlenswert. Bei dieser Neigung rutscht Schnee normalerweise ab, falls keinerlei Bauteile am Kollektor oder Dach dies behindern.

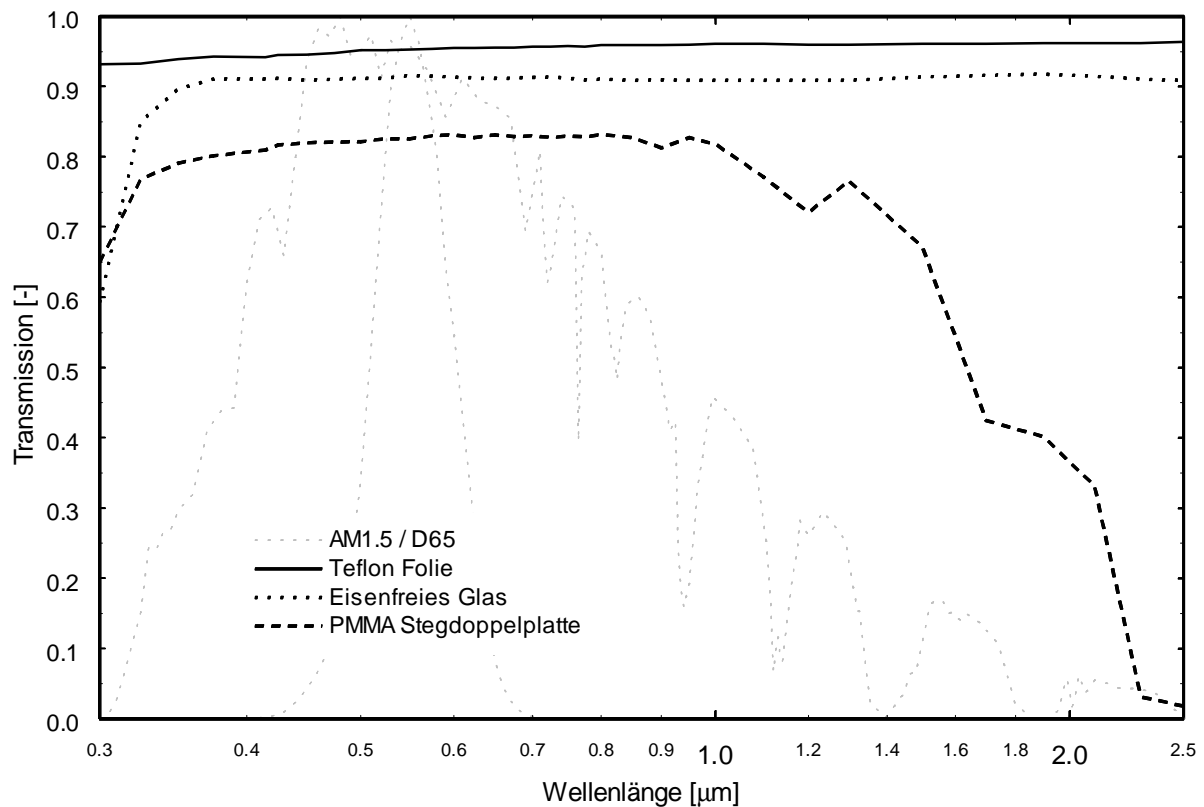


Abb. 9: Spektrale Transmission von eisenfreiem Glas (4 mm), Teflon-Folie (100 μm) und einer Stegdoppelplatte aus Polymethyl-Methacrylat (PMMA) (16 mm)

Abdeckung	Dicke mm	Gewicht pro m ²	sol. Transmission	Beständigkeit
Normalglas gehärtet	4	10	0,84	+
Eisenfreies Glas gehärtet	4	10	0,91	+
Eisenfreies Glas, strukturiert, gehärtet	4	10	0,91	+
FEP (Teflon)	0,05	0,12	0,96	+
PVF (Tedlar)	0,1	0,14	0,90	oo
ETFE (Hostafon)	0,125	0,219	0,94	o
PC	4	4,9	0,80	o
PMMA	4	4,8	0,84	o
PMMA, Stegdoppelplatte	16	5,0	0,77	o
PMMA, Stegdreifachplatte	16	5,6	0,72	o

Alterungsbeständigkeit:

Ergebnisse aus einem Langzeittest in Rapperswil und Davos während der letzten 10 Jahre (Publikation in Vorbereitung), Beurteilung der Abnahme des Transmissionsgrades innerhalb der ersten 5 Betriebsjahre ohne Berücksichtigung von Verschmutzungseffekten:

- + geringe Abnahme des sol. Transmissionsgrades: $\Delta\tau \leq 0,02$
- o Abnahme des sol. Transmissionsgrades: $0,02 < \Delta\tau \leq \text{###} 0,05$
- oo Abnahme des sol. Transmissionsgrades: $\Delta\tau \text{###} > 0,05$

Tab. 1: Gebräuchliche Abdeckungsmaterialien für Flachkollektoren

2.4 Kollektorgehäuse

Das Kollektorgehäuse hat mehrere Aufgaben:

- Halterung der Elemente wie Abdeckung, Absorber und Wärmedämmung
- Thermische Verluste des gesamten Moduls so gering wie möglich halten (durch Minimierung von Wärmebrücken)
- Befestigungsmöglichkeiten für die einfache Montage

2.4.1 Rahmen bzw. Wannen

Es kommen verschiedene Materialien zum Einsatz: Aluminium, Edelstahl, verzinkter Stahl, Kunststoffe und Holz.

Je nach verwendetem Material fällt die Konzeption des Rahmens sehr unterschiedlich aus.

Das Aluminium-Strangpressprofil ist leicht und ermöglicht die grösstmögliche Flexibilität bezüglich der Modulabmessungen. Im weiteren können auch komplizierte Formen, z. B. für die einfache Befestigung des Kollektors, in das Profil integriert werden. Die Werkzeugkosten sind relativ gering.

Die Aluminium-Tiefziehwanne hat den Vorteil, dass sie keine zusätzliche Rückwand benötigt. Der Nachteil liegt in den hohen Werkzeugkosten und der mangelnden Flexibilität der Modulgrösse. Die Tiefziehwanne lohnt sich hauptsächlich bei grösserer industrieller Fertigung.

Rahmen und Wannen aus verzinktem Stahl oder Edelstahl führen zu schweren Gehäusen und damit zu schweren Kollektoren. Die Herstellung erfolgt üblicherweise nicht im Tiefziehverfahren sondern mittels konventioneller Blechbearbeitungsmaschinen.

Holz als Rahmenmaterial hat sich in vielen Kollektoren bewährt. Voraussetzung ist die Wahl einer geeigneten Qualität. Der Vorteil von Holz liegt in der Toleranz gegenüber Feuchte im Kollektor. Das Holz übernimmt die Funktion eines Kondensators, d.h. bei hoher Feuchte im Kollektor wird Wasser aufgenommen und bei geringer Feuchte wieder abgegeben.

In jedem Gehäuse, unabhängig von der Bauweise muss die Entlüftung des Kollektors integriert sein. (Ausnahme Vakuum-Kollektoren oder Kollektoren mit Edelgasfüllung). Dimensionierung, Platzierung und Anordnung der Lüftungsöffnungen hängen von der Konstruktion des Kollektors ab.

2.4.2 Wärmedämmung

Stein- und Glaswolle werden häufig als einziges Isolationsmaterial eingesetzt. Vor dem Einsatz eines Mineralwoll-Produkts muß immer die Ausgasungsfestigkeit geprüft werden. Kondensierte Ausgasungsprodukte aus dem Bindematerial der Mineralwolle kann, wenn nicht anderweitig verhindert, zu Niederschlägen an der transparenten Abdeckung führen. Häufig werden als Absorberauflage aluminiumkaschierte Mineralwollisolationen eingesetzt. Diese Kaschierung hat üblicherweise nur den Vorteil, Ausgasungsprodukte zurückzuhalten. Da der Absorber auf der Isolation aufliegt, sind keine Isolationstechnischen Vorteile zu erwarten.

Polyurethan- oder Polystyrolschaum muß immer mittels einer zusätzlichen Wärmedämmung vor zu hohen Temperaturen geschützt werden. Der Vorteil der Schäume (natürlich immer FCKW-frei), liegt im geringen Gewicht und der tiefen Wärmeleitfähigkeit. Zusätzlich kann im Verbund mit dem Kollektorgehäuse die Stabilität erhöht werden.

2.4.3 Dichtungsmaterialien

Es werden verschiedenste Dichtungsmaterialien für unterschiedliche Zwecke eingesetzt:

- Dichtung der transparenten Abdeckung
- Dichtung der wärmeträgerführenden Anschlüsse (Ein- und Austritt)
- Dichtung der Rahmenprofile in den Ecken
- Dichtung der Rückwand
- usw.

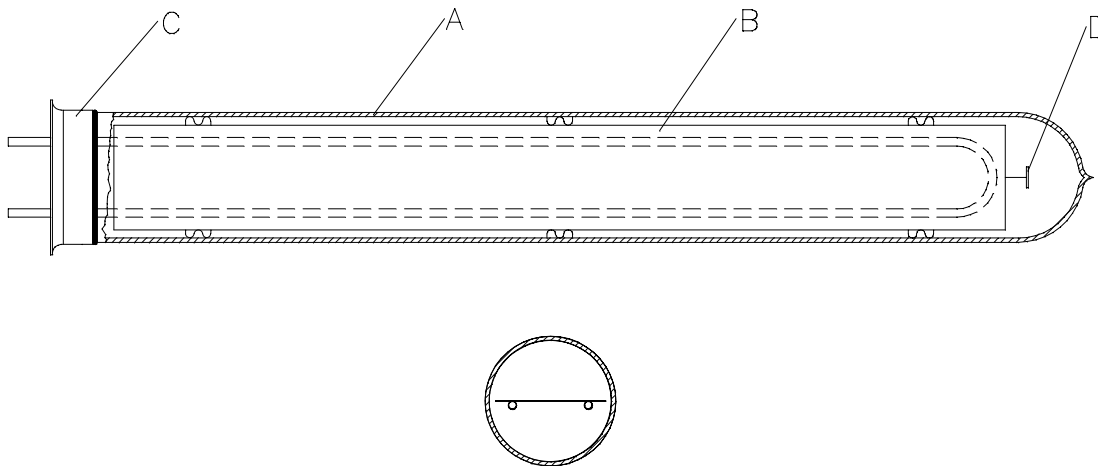
Die Dichtigkeit des gesamten Kollektors ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine lange Lebensdauer. Alternde oder mangelhafte Dichtungsmaterialien sowie ungenügende konstruktive Lösungen sind Hauptursachen für Schäden an Kollektoren.

Es werden die folgenden Dichtungsmaterialien eingesetzt:

Dichtungsmaterial	Bezeichnung-Kurzform	Max. Einsatztemperatur / °C	UV-Beständigkeit
Ethylen-Propylen-Terpolymer-Kautschuk	EPDM	-40 - 140°C (150 °C für per-oxydische Vernetzung)	Ja
Silikon-Kautschuk	MVQ	-60 - 200 °C	Ja
Fluor-Kautschuk (Viton####)	FPM	-20 - 200 °C	Ja
Chloropren-Kautschuk (Neoprene####)	CR	-30 - 100 °C	Ja
Nitril-Kautschuk	NBR	-20 - 80 °C	Nein

Tab. 2: Eine Auswahl häufig eingesetzter Dichtungsmaterialien in Flachkollektoren
(Die angegebenen technischen Daten sind Richtwerte und können je nach Produkt abweichen)

3. Röhrenkollektoren



- | | |
|-----------------------------------|--------------------|
| A: Glasrohr (Borosilikat) | D: Getter |
| B: Absorber, selektiv beschichtet | E: Evakuierstutzen |
| C: Metall-Abschlusskappe | |

Abb. 10: Vakuum-Röhrenkollektor

Diese Bauart thermischer Kollektoren zeichnet sich durch eine Reihe von technischen Eigenheiten aus:

- Ein Kollektor besteht immer aus einer Gruppe von Röhren.
- Das Vakuum in den Röhren reduziert die Wärmeverluste durch Unterdrückung der Konvektion und der Wärmeleitung im Gas.
- Jede einzelne Röhre ist evakuiert.
- Das Glas ist immer in der Form einer Röhre, um den Belastungen durch das Vakuum standzuhalten.
- Zumindest am einen Ende der Röhre ist ein Sammelkasten für die Integration der Anschlussleitungen.

Die Röhrenkollektoren können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Direktdurchströmte Röhrenkollektoren.
- Heat-Pipe Röhrenkollektoren.

Bei den "direktdurchströmten" Röhrenkollektoren fließt der Wärmeträger durch den Absorber in der evakuierten Röhre. Im Gegensatz dazu wird beim "Heat-Pipe" Röhrenkollektor die Wärme mittels eines thermodynamischen Kreislaufs aus der Röhre gefördert, bevor sie vom Wärmeträger übernommen wird. Bei Erwärmung des Absorbers wird das Arbeitsmedium (Wasser, Alkohol etc.) verdampft, steigt bis zum Kondensator ausserhalb der Vakuumröhre und fließt nach Übergabe der Wärme durch Kondensation wieder in den Kollektor zurück. Damit dieser "Heat-Pipe" Prozess funktioniert, muß die Längsachse des Kollektors eine Neigung von mindestens 20° aufweisen. Dagegen ist die Lage des direktdurchströmten Kollektors frei wählbar.

Der Vorteil des Heat-Pipe Kollektors liegt in der Begrenzung der maximalen Stillstandstemperatur im Primärkreis der Solaranlage. Je nach Arbeitsmedium und Druck ist bei einer bestimmten Temperatur der gesamte Inhalt des Absorbers verdampft und befindet sich im Kondensator. Typischerweise liegt diese Temperatur bei ca. 130-150 °C. Damit besteht keine Degradationsgefahr für die üblicherweise eingesetzten glykolbasierenden Wärmeträgerflüssigkeiten (max. Einsatztemperatur für Ethylen- und Propylenglykol < 170 °C). Direktdurchströmte Röhrenkollektoren können wesentlich höhere Temperaturen erreichen, nämlich bis zu 300 °C (ohne zusätzliche Reflektoren). Deshalb müssen beim Einsatz von dieser Kollektorbauart zusätzliche Sicherheiten gegen zu hohe Temperaturen vorgesehen werden.

Bei Anwendungen in der Haustechnik liegt die Begrenzung der maximalen Kollektortemperatur sinnvollerweise bei ca. 100 °C. Ein Hersteller von Röhrenkollektoren hat deshalb den Einsatz von Memory-Metallen vorgeschlagen. Falls die Temperatur in der Heat-Pipe eine bestimmte Höhe übersteigt, wird der interne Heat-Pipe-Kreislauf durch eine Art Ventil mit Memory-Metall-Antrieb unterbrochen^[4].

3.1 Absorberbeschichtung

Die optischen Eigenschaften und insbesondere der Emissionsgrad ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines evakuierten Röhrenkollektors. Die thermischen Verluste dieses Kollektortyps werden dominiert von der Infrarotabstrahlung der Absorberbeschichtung. Die gängigen galvanisch aufgetragenen, selektiven Absorberbeschichtungen sind an der Grenze ihrer Einsetzbarkeit. In Frage kommt ohnehin nur Schwarzchrom, da nickelpigmentiertes Aluminiumoxyd einen zu hohen Emissionsgrad aufweist ($\epsilon_{373K} < 0.10$). Schwarzchrom-Beschichtungen sind üblicherweise mit einer Nickel-Zwischenschicht ausgestattet und erreichen damit einen minimalen Emissionsgrad von 8 Prozent). Zur Reduzierung des Emissionsgrades wird deshalb von einzelnen Herstellern auf die Nickel-Zwischenschicht verzichtet. Damit lassen sich Emissionsgrade von bis zu 5 % erreichen. Leider wird dabei die Lebensdauer der Beschichtung negativ beeinflusst und ist je nach Anwendung nicht mehr akzeptabel.

Modernere Beschichtungsmethoden, wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, ermöglichen die Herstellung von Absorberbeschichtungen mit wesentlich tieferen Emissionsgraden ($\epsilon_{373K} < 0.04$).

2.2.3 Glasrohre

Gute optische Eigenschaften und mechanische Stabilität ist Voraussetzung für die Herstellung eines evakuierten Röhrenkollektors. Es lassen sich zwei verschiedene Lösungsmöglichkeiten unterscheiden.

- Der Durchmesser des Glasrohrs ist ca. 100 mm oder grösser:

Zum Einsatz kommt lediglich Borosilikatglas. Es weist eine sehr hohe mechanische und thermische Stabilität auf. Hagelschlag, Temperaturschocks oder ähnliche Belastungen überstehen Röhrenkollektoren aus diesem Material üblicherweise schadlos. Die optischen Eigenschaften sind vergleichbar mit eisenfreien Gläsern. Der Nachteil liegt im relativ hohen Preis.

- Der Durchmesser des Glasrohrs ist ca. 30 bis max. 50 mm:

Bei diesen Durchmessern wird konventionelles eisenfreies Glas zu Röhren verarbeitet. Die mechanische Stabilität der nicht gehärteten Röhren ist bescheiden. In Gebieten mit Hagelschlag ist auf den Einsatz dieser Röhren zu verzichten. Der Vorteil liegt im vergleichsweise tiefen Preis.

4. Kollektorprüfung

4.1 Leistungsprüfung

Die genaue Kenntnis der Leistungsfähigkeit von thermischen Sonnenkollektoren bildet die Voraussetzung für die Wahl des geeigneten Kollektors. Im Besonderen muß die angewendete Testmethode so praxisnah wie möglich sein, d. h. die Resultate müssen den Wirkungsgrad im **gesamten** Arbeitsbereich des Testkollektors aufzeigen. Die Norm ISO 9806-1 sowie der europäische Normentwurf prEN 12975-2 erfüllen diese Anforderung.

Mit den Ergebnissen können zum Beispiel zusätzlich die Bruttowärmeerträge mit Hilfe validierter Modelle berechnet werden ^{77/}. Der Bruttowärmeertrag ist der Ertrag für eine bestimmte, konstante Kollektormitteltemperatur und für eine bestimmte Zeitdauer (Monat, Jahr) an den Kollektorstützen. Natürlich sind die geometrischen Bedingungen (Anstellwinkel, Orientierung) und der Standort des Kollektors notwendige Eingabeparameter. Von diesem Ertrag müssen für eine grobe Abschätzung eines möglichen Anlageertrags folgende Verluste abgezogen werden:

- Leitungsverluste
- Wärmeverluste im Speicher
- Überproduktion falls die Wärme nicht verwendet wird
- Verluste durch die nicht ideale Regulierung
- etc.

Für eine bessere Abschätzung des Anlageertrags stehen diverse Simulationsprogramme zur Verfügung wie z. B. Polysun 2.0 ^{78/}.

Prinzip der Prüfung

Die Kollektoren werden im Freien unter natürlicher Sonneneinstrahlung geprüft. Die Bestimmung des Wirkungsgrades erfolgt über den gesamten Einsatzbereich des Kollektors. Die Messungen werden nur bei schönem Wetter, d. h. bei hoher Einstrahlung ($> 800 \text{ W/m}^2$) und konstanten Einstrahlungsverhältnissen durchgeführt. Die Kollektormitteltemperatur wird dann entsprechend den Kollektoreigenschaften über den gesamten Arbeitsbereich variiert.

Neben der Bestimmung des Wirkungsgrades unter senkrechter Einstrahlung in die Kollektorebene, sollte zusätzlich der Winkelfaktor für beide Hauptachsen des Kollektors bestimmt werden.

Um die Messzeiten zu reduzieren kann eine ein oder zweiachsige Nachführung verwendet werden, dies garantiert vergleichbare Bedingungen für alle getesteten Kollektoren bei kurzen Meßzeiten. Bei guten Wetterbedingungen sind die Messungen nach drei Tagen abgeschlossen. Trotz der bestmöglichen Ausnutzung des Wetters, kann im Winterhalbjahr, bei entsprechend schlechten Wetterbedingungen, eine Prüfung bis zu einem Monat dauern. Darin liegt der Nachteil einer Messung im Freien im Vergleich zu einer Messung im Labor mittels Sonnensimulator.

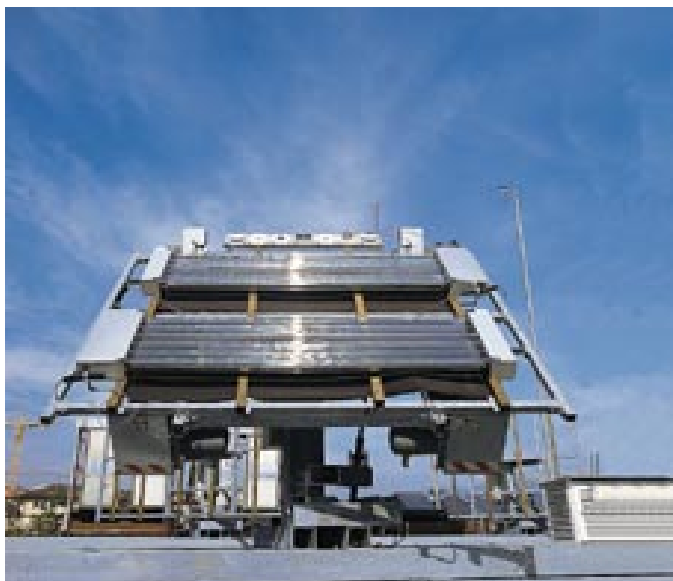


Abb. 11: Prüfeinrichtungen an der SPF-ITR

Bezugsfläche

Für den Vergleich der Leistungsfähigkeit thermischer Kollektoren ist die Bezugsfläche von grosser Bedeutung. Ein Vergleich ist nur dann aussagekräftig, wenn Gleiches mit Gleichem verglichen wird. Zur Auswahl stehen 3 verschiedene Flächen:

- Absorberfläche
- Aperturfläche
- Bruttofläche

Alle 3 Flächen haben ihre Vor- und Nachteile. Sind die Flächen bekannt, kann natürlich jederzeit der Wirkungsgrad von einer Bezugsfläche auf eine andere umgerechnet werden.

Bestimmung der Wirkungsgradfunktion

Die thermische Leistung eines Flach- oder Röhrenkollektors unter quasistationären Bedingungen kann wie folgt beschrieben werden:

$$\eta = F'(\alpha\tau)_e - a_1 \frac{T_m - T_a}{G_K} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G_K}$$

mit $\eta_0 = F'(\alpha\tau)_e$ und $x = \frac{T_m - T_a}{G_K}$ (x: reduzierte Temperaturdifferenz)

$$\eta = \eta_0 - a_1 x - a_2 G_K x^2$$

Nomenklatur:

F'	[-]	Kollektorwirkungsgradfaktor: An einer beliebigen Position des Absorbers ist F' das Verhältnis des momentan nutzbaren Energiegewinnes zu dem nutzbaren Energiegewinn, der auftreten würde, wenn die Absorberplattentemperatur identisch der lokalen Fluidtemperatur wäre.
G _K	[W/m ²]	Globale Bestrahlungsstärke in die Kollektorebene
T _a	[K]	Umgebungstemperatur
T _m	[K]	Mittlere Kollektortemperatur $T_m = (T_i + T_o) / 2$
T _i	[K]	Kollektor Eintrittstemperatur
T _o	[K]	Kollektor Austrittstemperatur
($\tau\alpha$) _e	[-]	Effektives Absorption-Transmissionsprodukt
α	[-]	Absorptionskoeffizient
τ	[-]	Transmissionskoeffizient
η	[-]	Kollektorwirkungsgrad
η_0	[-]	Optischer Wirkungsgrad, Kollektorkennwert
a ₁	[W/m ² K]	Kollektorkennwert
a ₂	[W/m ² K ²]	Kollektorkennwert

Beschreibung der Test-Kollektoren

Die Angaben sollen den Testkollektor möglichst umfassend beschreiben. Ein Interessent, sei es der Ingenieur oder der Bauherr, kann sich auf Grund dieser Angaben ein Bild über Konzeption des Kollektors und eingesetzte Materialien machen. Weiter garantieren diese Angaben, dass ein Prototypkollektor nicht als Serienmodell ausgegeben wird. Grosser Wert wird auf die detaillierte Beschreibung der Modifikationen zum Serienkollektor gelegt.

Publikation von Resultaten

Die verschiedenen Testinstitute verfolgen sehr unterschiedliche Ziele bezüglich der weiteren Verwendung bzw. Publikation der Daten. In den meisten Instituten werden die Ergebnisse lediglich dem Auftraggeber, der für die Messungen bezahlt, ausgehändigt. Dem Interessenten, seien es Planer oder Bauherren, stehen diese Daten daher nicht zur Verfügung. Im Gegensatz dazu sind die Messresultate der SPF, in zwei modernen Medien publiziert:

CDROM SPF-Info 1998: Auf der jährlich neu erscheinenden CDROM werden die aktuellen Resultate der SPF publiziert. Unabhängig vom Betriebssystem (DOS, Mac Intosh, Unix) können neben anderen Informationen auch die Prüfberichte aller an der SPF geprüften Kollektoren betrachtet und ausgedruckt werden. Zusätzlich steht den Benutzern von PC's mit "Windows 95" ein universelles Hilfsmittel zur effizienten Auswahl von thermischen Kollektoren zur Verfügung (siehe Kapitel 5).

Internet: Unter der Internet-Adresse "http:\\www.solarenergy.ch", sind neben vielen weiteren Informationen zur thermischen Solartechnik (Aktivitäten SPF, Forschung in der Schweiz, Markt), sämtliche aktuellen Messresultate von thermischen Kollektoren spätestens 2 Wochen nach Abschluss der Messungen abrufbar.

4.2 Qualitätsprüfung

Ziel und Zweck

Neben der Leistungsfähigkeit eines thermischen Kollektors ist dessen Qualität der wichtigste Parameter für die Kaufentscheidung. Im weiteren werden, in der jetzigen Wachstumsphase des thermischen Kollektormarktes, vermehrt ungenügende Produkte angeboten. Händler ohne fundiertes Fachwissen versuchen mit billigen Importprodukten am derzeitigen Aufschwung teilzuhaben.

Mit der vorgeschlagenen Qualitätsprüfung soll in erster Linie das Vertrauen in die Produkte gesteigert und das Risiko für den investitionswilligen Bauherrn auf ein Minimum reduziert werden.

Testverfahren, Geltungsbereich und Anwendung

Die Qualitätsprüfung wird anhand der Norm ISO 9806-2 bzw. dem europäische Normentwurf prEN 12975-2 durchgeführt.

Die Norm beinhaltet die detaillierte Beschreibung verschiedener Testprozeduren. Diese Prozeduren sollen das Verhalten des Kollektors gegenüber allen möglichen Belastungen aufzeigen. Die Norm ist anwendbar an allen üblichen Kollektorbauarten wie Flach- oder Röhrenkollektoren^{/11/}.

Die Dauer der Prüfung ist abhängig von den Wetterbedingungen und dürfte zwischen mindestens 1 Monat und maximal ca. 3 Monaten liegen.

Für die Prüfung werden 3 Kollektoren benötigt.

Das Testverfahren besteht aus einer Anzahl von Einzelprüfungen:

- Druckbeständigkeitstest des Absorbers
- Beständigkeitstest gegenüber hohen Temperaturen
- Stagnationstest
- Externer thermischer Schocktest
- Interner thermischer Schocktest
- Test der Regendichtigkeit
- Frostsicherheit
- Druckbeständigkeitstest des Absorbers (Wiederholung von Sequenz A)
- Schlussinspektion

Beispiel 1: kombinierte Anlage zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung in Feldkirch

Gesucht: Ein Kollektor für die Fassadenintegration mit Einschränkungen bezüglich Dimension. Die Fassadenfläche die zur Verfügung steht ist in der Höhe auf 2.2 m beschränkt, die maximale Breite des Kollektorfelds ist auf 15 m beschränkt. Der Warmwasserbedarf von 15 kWh bei 50°C muss in den Sommermonaten möglichst vollumfänglich gedeckt werden können. Der Kollektor darf pro Quadratmeter Bruttofläche nicht mehr als 4000 S kosten.

Vorgehen: Folgende Bedingungen müssen durch den Kollektor bzw. das Kollektorfeld erfüllt werden:

1. max. Preis 4000 S
2. max. Höhe (Bruttomass) 2.2 m
3. Montage als Fassadenelement (Einbau)
4. Bruttowärmeertrag des Kollektorfelds in den Monaten Juni bis September > 585 kWh (Abschätzung 30 Tage * 15 kWh/Tag * 1.3 (30% Zuschlag für Verluste))

Die Bedingungen 1-3 können mit der Funktion "suchen" des Katalogs berücksichtigt werden. Die Bedingung 4 kann mittels Bruttowärmeertragsberechnung (im Katalog enthalten) geklärt werden.

Lösung: Der Katalog gibt uns die Wahl zwischen 4 Kollektorprodukten, nämlich die LTS-Nr. 151, 161, 171, 195. Diese Produkte würden die Bedingungen 1 bis 3 (unter Vorgehen) erfüllen. Nun entscheidet die Leistungsfähigkeit und allenfalls weitere technische (Integration in der Fassade) oder ästhetische Aspekte welcher Kollektor tatsächlich gewählt wird. Die Leistungsfähigkeit kann mittels des Bruttowärmeertrags vereinfacht dargestellt werden. Abbildung 12 zeigt den Jahresverlauf des monatlichen Bruttowärmeertrags bei 50°C. Entgegen der vergleichsweise kleinen Abweichungen in den Kennlinien zeigen die Bruttowärmeerträge enorme Differenzen. Der leistungsfähigste Kollektor der Gruppe, LTS-Nr. 195, würde eine Fläche von ca. 30 Quadratmetern für eine weitestgehende Deckung des Energiebedarfs in den Sommermonaten benötigen. Die anderen Kandidaten mit den LTS-Nr. 151, 161 und 171 würden dagegen rund die doppelte Fläche benötigen! Da die Kollektoren in etwa gleich teuer sind (ca. 4000 öS) käme auch die Anlage mit dem leistungsfähigsten Kollektor deutlich billiger zu stehen. Zusätzlich ist lediglich für den leistungsfähigsten Kollektor genügend Platz in der Fassade.

Eine Nachsimulation mit dem detaillierten Simulationsprogramm Polysun 2.0^{8/} hat die Resultate in ihrer Größenordnung bestätigt.

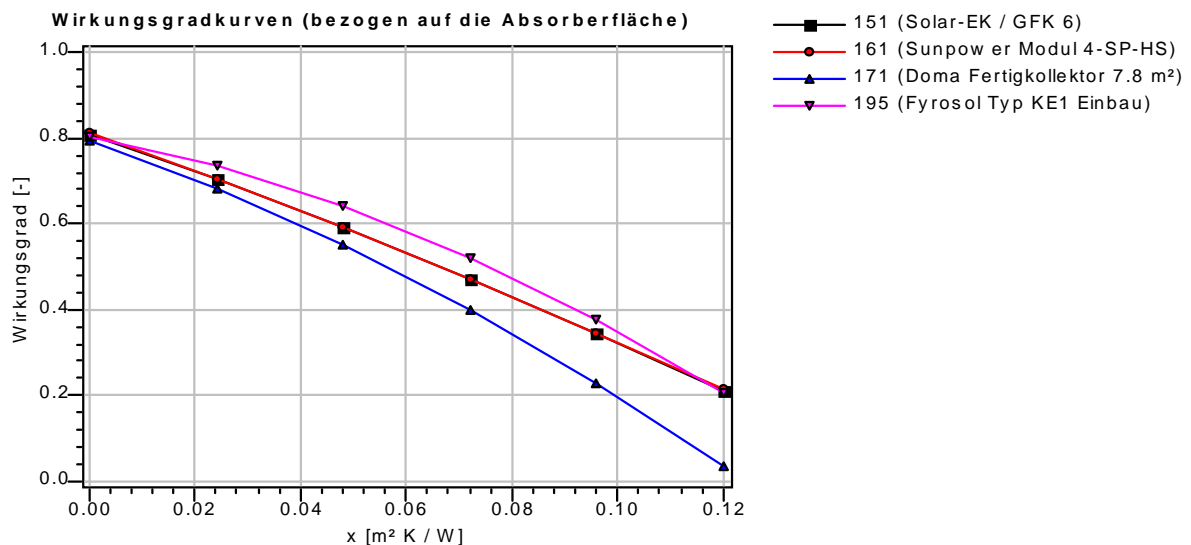


Abb. 12 Wirkungsgradkennlinien von 4 Kollektoren, LTS-Nr. 151 und 161 sind deckungsgleich

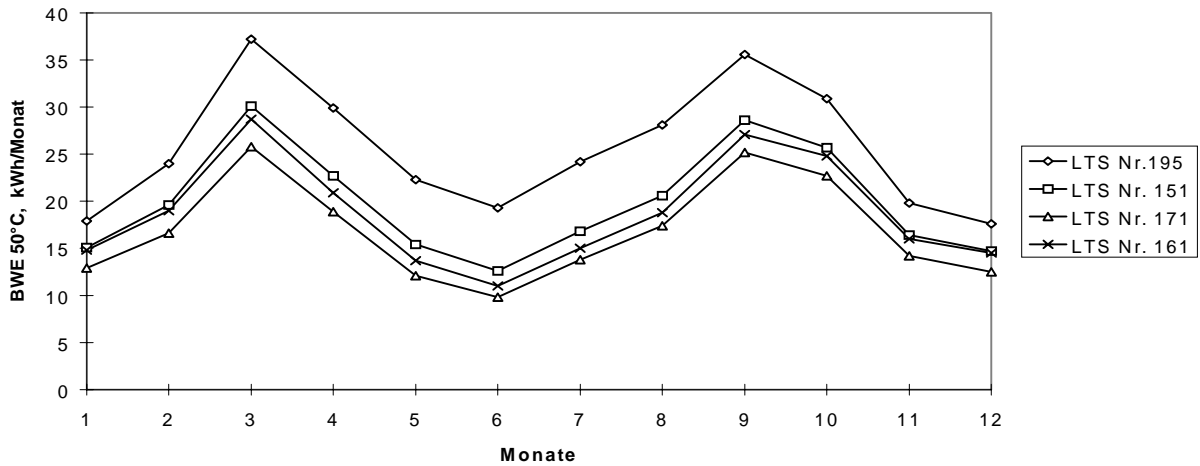


Abb. 12: Monatswerte des Bruttowärmeertrags im Jahresverlauf für einen Neigungswinkel von 90° (Fassade), südorientiert, Standort Feldkirch Oesterreich

Beispiel 2: Anlage für den Sommerbetrieb in einem Campingplatz

Gesucht: Kollektoren für die Duschwassererwärmung eines Campingplatzes in Feldkirch. Der Campingplatz ist vom 1. Mai bis 1. Oktober geöffnet. Messungen des bisherigen Energiebedarfs für die Wassererwärmung haben einen täglichen Wärmebedarf von 135 kwh ergeben (WW-Temperatur 40°C). Die Kollektoraufstellung erfolgt im Gelände. Der Platz ist nicht beschränkt. Die Kosten sollen so tief wie möglich gehalten werden.

Vorgehen: Die Anforderungen an den Kollektor sind gering d.h. eine Vielzahl von Kollektoren könnte eingesetzt werden. Die Einschränkung für die Wahl geeigneter Produkte ist einerseits die Installationsart "Aufstellung im Gelände mit Ständer" und andererseits das Preis-Leistungsverhältnis. Der max. Preis pro Quadratmeter Kollektorfläche wurde auf 3000 öS gesetzt.

Lösung: Es stehen 6 Kollektorprodukte zur Auswahl. Die LTS-Nr. 34 ist ein nicht abgedeckter solarselektiv beschichteter Edelstahlabsorber. Sein Vorteil liegt im hohen Wirkungsgrad im Betriebsbereich $x < 0.02$. Die optischen Wirkungsgrade der anderen Kandidaten liegt innerhalb von ca. 4%. Die Auslegung erfolgt auf den Monat mit dem höchsten Bruttowärmeertrag. Die Deckung durch Sonnenenergie soll im Juli in etwa erreicht werden, wenn möglich ohne Überschüsse. Die notwendige Kollektorfläche kann abgeschätzt werden, indem der Monatsbedarf durch den Monats-Bruttowärmeertrag (für die gewünschte Temperatur von 40°C) dividiert wird (Monatsbedarf : Tagesbedarf plus 20% für Systemverluste multipliziert mit der Anzahl Tage für den Monat Juli). Die daraus einfach berechenbaren Kosten für das Kollektorfeld (siehe Abb. 15) sind üblicherweise 30 bis 50% der gesamten Systemkosten.

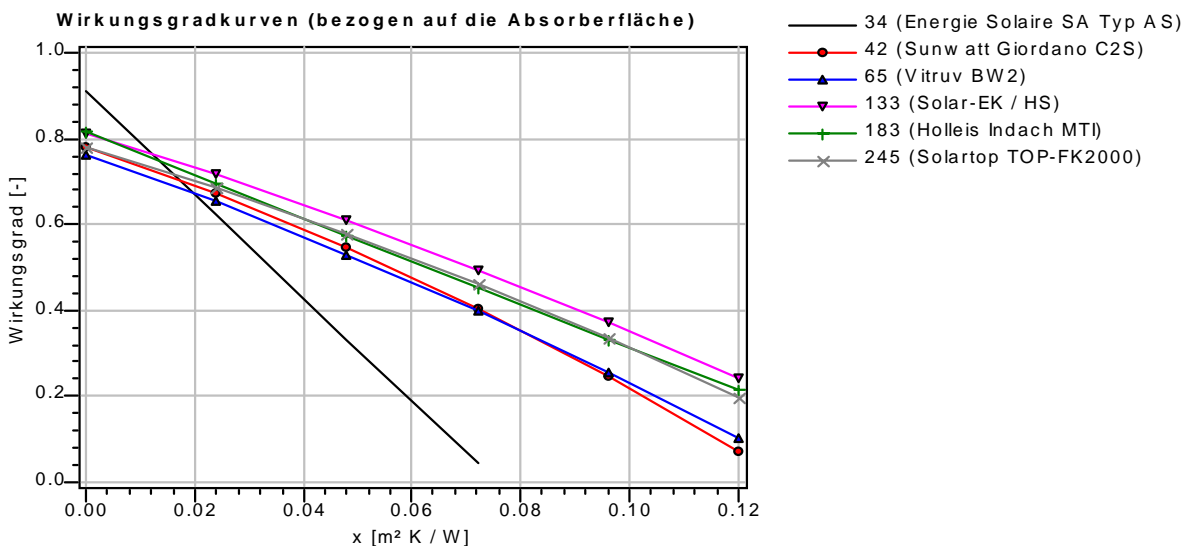


Abb. 13: Wirkungsgradkennlinien verschiedener Kollektorkandidaten für die Wassererwärmung

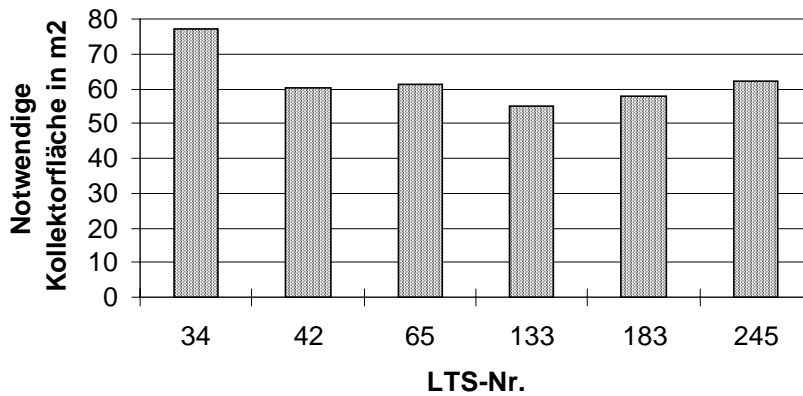


Abb. 14: Kollektorfeldgrösse von 6 Kandidaten

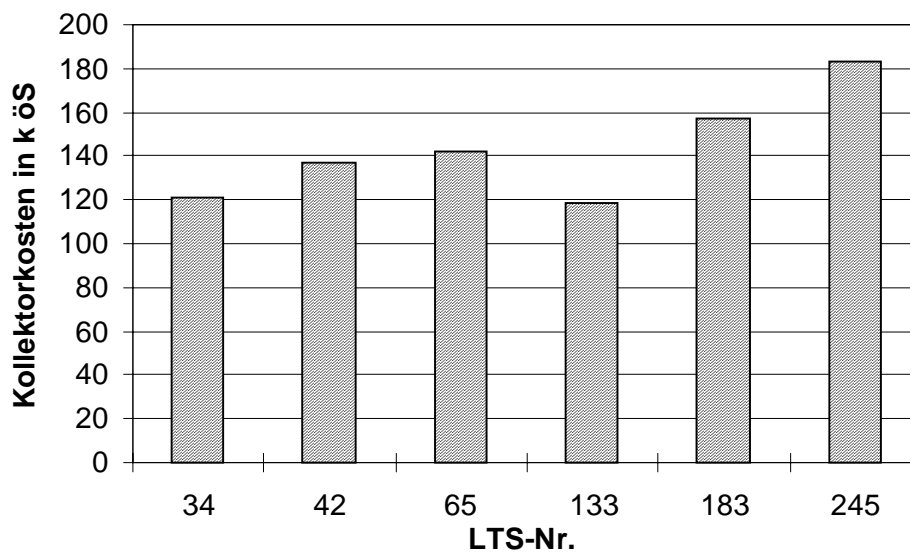


Abb. 15: Kollektorfeldkosten von 6 Kandidaten

Beispiel 3: Flaschenreinigung in einer Kellerei

Gesucht: Kollektoren für die Prozesswärmegewinnung. Die Anlage wird für die Dampferzeugung bei 120°C eingesetzt. Im September soll die Anlage den täglichen Wärmebedarf von 300 kWh möglichst decken. Die Fabrik hat ein Flachdach. Die Kollektoren dürfen aus optischen Gründen nicht aufgeständert werden. Die Fläche des Daches beträgt 400 m² (20 * 20 m). Die Kosten für die produzierte Kilowattstunde sollen so tief wie möglich sein.

Vorgehen: Für die Anwendung bei diesen hohen Temperaturen sind nur Vakuumröhrenkollektoren einsetzbar. Da eine Aufständigung nicht möglich ist, können nur direktdurchströmte Röhrenkollektoren eingesetzt werden. Die Auswahlkriterien sind demnach:

1. Vakuum-Röhrenkollektor mit Direktdurchströmung
2. Ertrag im Monat September

Die notwendige Fläche und die Kosten für das Kollektorfeld wird die Wahl eines geeigneten Produkts bestimmen.

Lösung: Es stehen 5 Vakuumröhrenkollektoren mit Direktdurchströmung zur Auswahl. Deren Anstellwinkel lässt sich, für jede Röhre einzeln, der Nutzung entsprechend wählen. Für die geforderte Deckung im September ist ein Anstellwinkel von 30° geeignet. Die Kennlinien (siehe Abbildung 16) liegen in einem engen Bereich. Zudem liegt der Betriebspunkt bei 120°C bereits unter einer Einstrahlung von ca. 850 W/m² jenseits von $x = 0.12 \text{ m}^2\text{K/W}$ und ist somit in der Abbildung 16 nicht mehr ersichtlich. Wesentlich aussagekräftiger als die Wirkungsgradkennlinie oder die Kennwerte ist der Bruttowärmertrag. Dieser ist in der Abbildung 17 für den Monat September mit Standort Feldkirch und einer mittleren Kollektortemperatur von 120°C abgebildet. Die Differenz vom Kollektor Nr. 181 zum leistungsfähigsten Kollektor Nr. 115 beträgt rund 35%. Unter Berücksichtigung der Kollektorkosten, der notwendigen Kollektorfläche (Zugabe zum Bruttowärmeertrag für Leitungs- und Speicherverluste 30%) verändert sich die Situation erneut. Die Kollektoren Nr. 41 und 250 liefern die preiswerteste Energie unter den berücksichtigten Randbedingungen.

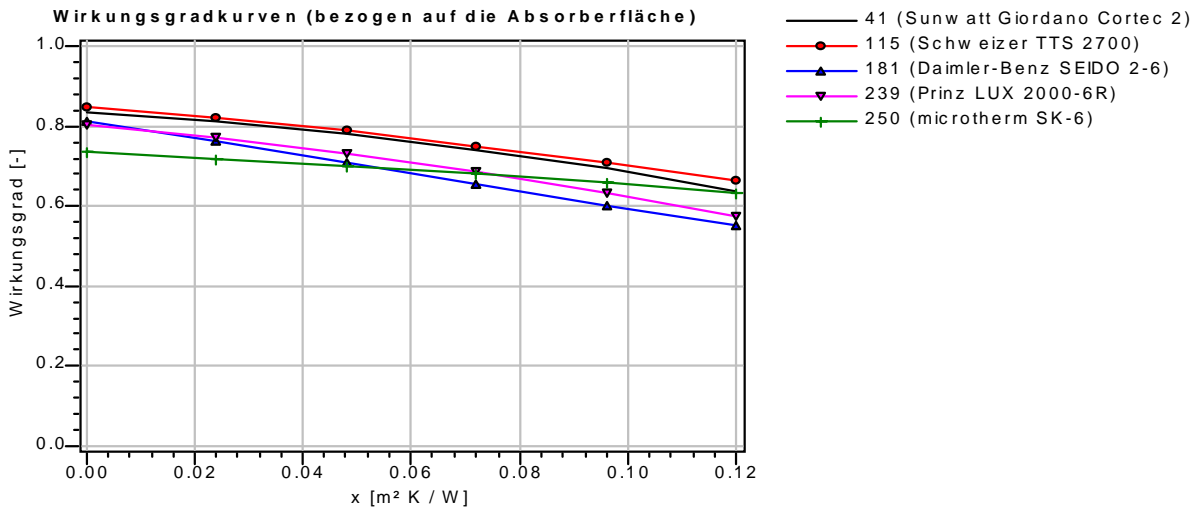


Abb. 16: Wirkungsgradkennlinien von direktdurchströmten Vakuumkollektoren

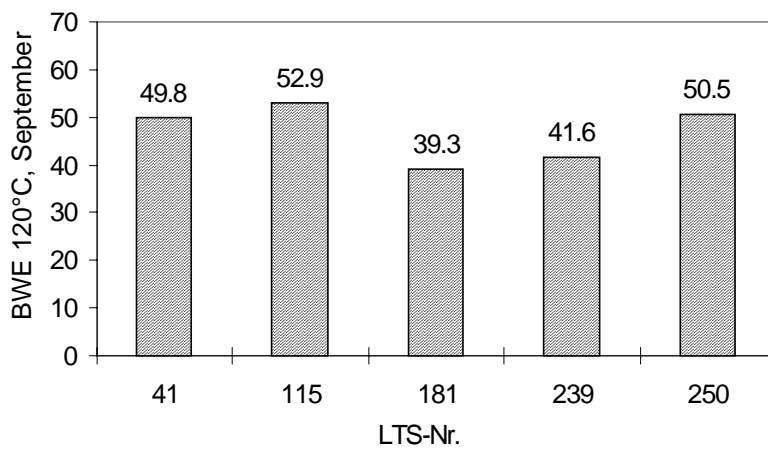


Abb. 17: Bruttowärmeertrag in kWh für Feldkirch, mit einem Neigungswinkel von 30°, südorientiert

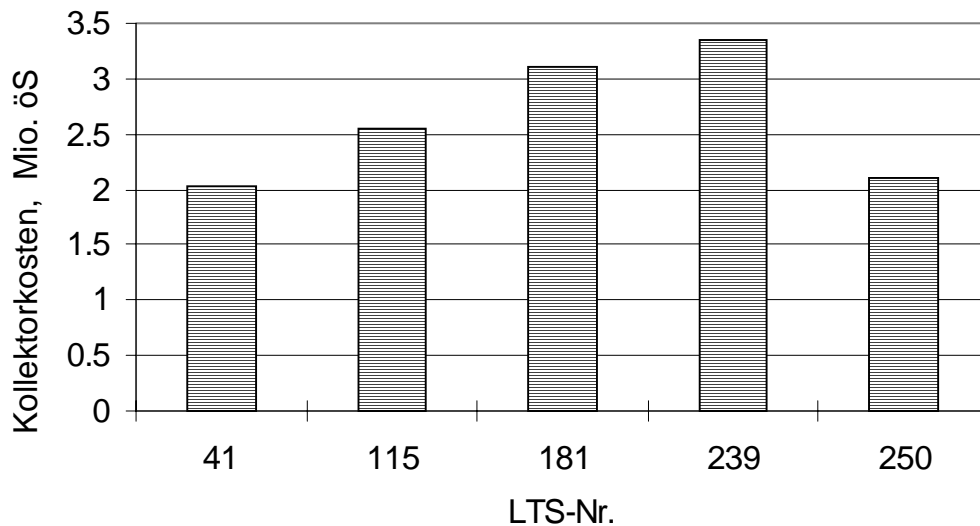


Abb. 18 Kollektorkosten für die notwendige Feldgröße für die Deckung des Wärmebedarfs

6. Schlussfolgerungen

Die Auswahl an thermischen Kollektoren für die Wassererwärmung und die Heizungsunterstützung ist enorm. Selbst für Fachleute wird es immer schwieriger den oder die geeigneten Kollektoren zu identifizieren. Zudem steigen die Anforderungen an den Planer und Architekten hinsichtlich der optisch ansprechenden Integration zunehmend an. Daneben muss die Technik und insbesondere die Leistungsfähigkeit, die Qualität und nicht zuletzt der Preis stimmen.

Mittels des vorgestellten LTS-Katalogs haben Fachleute und interessierte Anwender erstmals die Möglichkeit speitativ Kollektoren zu evaluieren oder sich einen Ueberblick über den Markt zu verschaffen. Die meisten heute am Markt erhältlichen Produkte sind neutral dargestellt und vergleichbar gemessen. Die im Katalog integrierte Berechnung des Bruttowärmeertrags ermöglicht den exakten **Vergleich** der Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung des Horizonteinflusses. Die umfangreichen Wetterdaten enthalten neben Standorten in der Schweiz auch eine Auswahl von Standorten in Oesterreich und Deutschland sowie weiteren europäischen Ländern.

Neben den technischen Daten soll der Katalog vermehrt auch helfen die visuell unterschiedliche Erscheinung von Kollektorprodukten aufzuzeigen. Die Hersteller wurden aufgerufen, Fotos von realisierten Anlagen zur Verfügung zu stellen. Leider war es teilweise sehr schwierig, brauchbares Bildmaterial zu bekommen. Da der Katalog im Jahresrhythmus neu aufgelegt wird, erhoffen wir eine entscheidende Steigerung der Bildqualität bis zur Ausgabe 1999. Das gleiche gilt teilweise für einzelne technische Daten.

Der Katalog kann und soll herkömmliche Simulationsprogramme nicht ersetzen. Geht es darum den Anlagenenertrag abzuschätzen, ist ein Simulationsprogramm wie z.B. Polysun notwendig. Die vereinfachte Methode mittels der Bruttowärmeerträge (siehe Beispiele) ist bezüglich des Anlagenenertrags mit einer Unsicherheit von ca. $\pm 20\%$ behaftet.

Literatur

- /1/ T. Jakob, U. Müller, *Messeinrichtung zur Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors*, Diplomarbeit Ing. Schule ITR, 1992
- /2/ J. Duffie, W.A. Beckmann, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York, 1980
- /3/ Bo Carlsson, U. Frei, M. Köhl, K. Möller, *Accelerated Life testing of Solar Energy Materials, Case study of some selective solar absorber coatings*, International Energy Agency Task X "Solar Heating and Cooling Programme", Draft, Nov. 1993
- /4/ Produktinformation, Thermomax Ltd., Bangor, Irland
- /5/ Produktinformation, Microtherm Energietechnik GmbH, Hamburg, Deutschland
- /6/ Vienna Agreement, ISO/TC 180 N91/N92
- /7/ R. Frey, U. Frei, *Die Validierung des Bruttowärmeertragsmodells "BWE 91"*, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1993
- /8/ *Simulationsprogramme für thermische Sonnenenergienutzung Polysun*, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1994
- /9/ U. Frei, T. Häuselmann, F. Flückiger, R. Frey, *Methode zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit thermischer Sonnenkollektoren*, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1992
- /10/ *Leistungsdaten thermischer Sonnenkollektoren*, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1994 (zu beziehen bei Infoenergie, CH-5200 Brugg, Telephon: + (0) 56 41 60 80)
- /11/ U. Frei, A. Mayr, *Qualitätsprüfung thermischer Kollektoren*, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle SPF-ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1993
- /12/ CD-Rom SPF-Info 1998, SPF Solartechnik Prüfung Forschung, Ing. Schule ITR, Bundesamt für Energiewirtschaft BEW, 1998