

**Heft 128**

# **Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie**

---

**Blaue TR-Reihe**



---

# Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie

Dr. Martin Zogg

Blaue TR-Reihe

Heft 128

Verlag Technische Rundschau

im Hallwag Verlag, Bern und Stuttgart

---

Wärmewasserspeicher  
mit  
Sonnenenergie

(c) 1977 "Technische Rundschau" Bern  
Gesamtherstellung: Hallwag AG, Bern  
ISBN 3 444 58114 9

---

Als Teil der Natur muss sich auch der Mensch langfristig den Gegebenheiten ihrer Kreisläufe fügen. Von Vorräten kann auf die Dauer niemand leben. Besonders nicht, wenn deren Ende, wie im Falle hochwertiger Energieträger, absehbar geworden ist. Es wäre töricht von den Vorräten zu zehren, wenn regenerierbare Energiequellen zu vergleichbaren Kosten genutzt werden könnten.

Die Sonnenenergie ist eine für menschliche Begriffe nicht versiegende Energieform. Sie lässt sich schon mit einfachen technischen Mitteln direkt nutzen. Auf die Frage, ob dies auch in unseren Breiten wirtschaftlich sei, gehen die Meinungen allerdings weit auseinander. Der Hauptgrund dafür liegt in unzulässig vereinfachten Berechnungsmodellen.

Die Möglichkeiten der Vorausberechnung der Leistungsfähigkeit von Anlagen zur direkten Nutzung der Sonnenenergie wurden bisher bei weitem nicht ausgeschöpft. Das vorhandene Ingenieurwissen genügt durchaus, um mit den von der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt während Jahren gemessenen meteorologischen Werten zu hinreichend genauen Voraussagen über die Nutzung der Sonnenenergie im schweizerischen Mittelland zu gelangen. Voraussetzung dazu ist allerdings die Abkehr von der bisher üblichen Untersuchung einzelner Anlagekomponenten. Deren enge gegenseitige Verknüpfung erfordert die Analyse ganzer Systeme. Dies wird in der vorliegenden Arbeit an der gegenwärtig aussichtsreichsten Möglichkeit der direkten Sonnenenergienutzung, der Warmwasserbereitung, durchgeführt. Mit den von 1964 bis 1972 in Zürich-Kloten stündlich gemessenen direkten und diffusen Strahlungen, Umgebungstemperaturen und Windgeschwindigkeiten (total über 180 000 Daten) wird der Warmwassertemperaturverlauf dreier Varianten einer einfachen Warmwasserbereitungsanlage in Kombination mit acht verschiedenen Flachkollektortypen berechnet. Damit der Rechnungsgang verfolgt und die Ergeb-

nisse beurteilt werden können, sind alle benützten Berechnungsunterlagen zusammengestellt.

Die Untersuchung beantwortet die Frage nach der im schweizerischen Mittelland jährlich zur Warmwasserbereitung nutzbaren Sonnenenergie. Sie zeigt, was mit verschiedenen Massnahmen zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades gewonnen werden kann und unter welchen Bedingungen die Warmwasserbereitung im Sommerhalbjahr ohne Fremdwärme möglich ist.

Weitere Entscheidungsgrundlagen wie die Unabhängigkeit von zu erwartenden Steigerungen der Brennstoffpreise, keine Umweltbelastung, Schonung nicht regenerierbarer Energievorräte, Selbstbaumöglichkeiten usw. unterliegen weitgehend subjektiver Gewichtung. Sie sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung, dürfen aber bei einer Entscheidung für oder gegen die Nutzung der Sonnenenergie nicht ausser acht gelassen werden.

Herrn Dr. P. Valko von der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt sei an dieser Stelle für die Bereitstellung der meteorologischen Daten für Zürich-Kloten und Herrn Dr. P. Kesselring vom Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung für die Uebernahme der bedeutenden Kosten für die numerischen Auswertungen am Rechenzentrum der ETH Zürich herzlich gedankt. Beiden Herren danke ich auch für ihre interessanten Anregungen. Weiter gilt mein bester Dank den Herren H. Bantle von der Meteorologischen Zentralanstalt und A. Markees von der Universität Bern für ihre Hilfe bei der Bewältigung des umfangreichen Datenmaterials. Besonderer Dank gebührt aber auch dem Verlag Technische Rundschau im Hallwag Verlag für die spontane Bereitschaft zur Veröffentlichung dieser Arbeit.

M. Zogg

## Inhaltsverzeichnis

- Zusammenfassung 6
- 1. Einleitung 11
- 2. Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Sonnenenergie 11
- 3. Anlage für die Warmwasserbereitung 15
- 4. Kollektoren für die Warmwasserbereitung 15
- 5. Nutzbare Wärmestromdichte von Flachkollektoren 19
  - 5.1 Daten der Flachkollektoren 19
  - 5.2 Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung 22
  - 5.3 Umrechnung der Strahlungsdaten 23
  - 5.4 Optische Verluste in den Deckscheiben 26
  - 5.5 Wärmeverluste 29
    - 5.5.1 Wärmeverluste auf der Kollektorvorderseite 30
    - 5.5.2 Wärmeverlust auf der Kollektorrückseite 39
  - 5.6 Nutzbare Wärmestromdichte und Wirkungsgrad 41
- 6. Wärmeübertragung vom Kollektor zum Wärmespeicher 47
  - 6.1 Wärmeleitung im Absorberblech 47
  - 6.2 Wärmeübergang in den Rohrleitungen 48
  - 6.3 Wärmeübergang ans Speicherwasser 49
  - 6.4 Bestimmung der Absorbertemperatur aus der Speichertemperatur 50
- 7. Betriebsperioden der Warmwasserbereitungsanlage 53
  - 7.1 Aufheizen des Absorbers ohne Wärmeentnahme 53
  - 7.2 Abkühlung des Speichers ohne Wärmezufuhr 56
  - 7.3 Erwärmung des Speichers 57
- 8. Nutzwärmeberechnung 59
  - 8.1 Erläuterungen zum Programmablaufplan 59
  - 8.2 Daten für die Nutzwärmeberechnung 61
- 9. Ergebnisse für Zürich-Kloten 63
  - 9.1 Auswertung der meteorologischen Daten von 1967 65
  - 9.2 Ergebnisse für die Jahre 1964 bis 1972 77
- 10. Wirtschaftlichkeit der Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie 81

## Zusammenfassung

Die bisherigen, auf grobe Abschätzungen gestützten Prognosen über die aus der Sonnenstrahlung gewinnbare Nutzwärme gehen weit auseinander. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit wird für die Warmwasserbereitung im schweizerischen Mittelland erstmals verlässlicheres Zahlenmaterial für acht verschiedene Typen von Flachkollektoren in Kombination mit drei Anlagenvarianten bereitgestellt.

Für das schweizerische Mittelland stehen mit den durch die Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt in Zürich-Kloten seit Jahren durchgeführten stündlichen Messungen der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung auf eine Horizontalfläche, der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit hervorragende Unterlagen für die Beurteilung von Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Sonnenenergie zur Verfügung. Von diesen Möglichkeiten ist die Warmwasserbereitung dank ihrem übers ganze Jahr verteilten Energiebedarf wirtschaftlich am aussichtsreichsten.

In der vorliegenden Arbeit wird das Datenmaterial der MZA zur Berechnung der mit einer einfachen Wasserbereitungsanlage nutzbaren Sonnenenergie ausgewertet. Dies ist mit bekannten Grundlagen aus der Wärmeübertragung und der Optik mit hinreichender Genauigkeit möglich, erfordert aber den Einsatz eines leistungsfähigen Computers - sind doch pro Jahr umfangreiche Rechnungen mit über 20 000 Messwerten durchzuführen. Die Auswertungen erfolgten an den Rechenzentren der Universität Bern und der ETH Zürich am Beispiel der meteorologischen Daten von Zürich-Kloten. Der ausführlich dargestellte Berechnungsgang ist aber allgemein anwendbar.

Nach einer Uebersicht zu den Möglichkeiten der direkten Nutzung der Sonnenenergie wird eine einfache Anlage zur Warmwasserbereitung vorgestellt (Bild 2). Die dafür in Frage kommenden Kollektoren und einige Massnahmen zur Verbesserung der Wärmeausbeute werden besprochen. Die mit drei Anlagenvarianten (Tabelle 4) während einem Jahr aus der Sonnenstrahlung gewinnbare Wärme wird für acht Beispiele von Flachkollektoren mit gewöhnlichem schwarzem Absorber, einem selektiv beschichteten Absorber, zusätzlich reduzierten Absorptions- und Reflexionsverlusten in den Scheiben und ohne optische Verluste (Tabelle 1) berechnet. Dazu wird zunächst ausführlich gezeigt, wie der mit ortsfesten Flachkollektoren nutzbare Anteil der Sonnenstrahlung aus dem Sonnenstand, der Absorber- und Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Die Ergebnisse der Wirkungsgradberechnung sind in den Bildern 18 bis 21 für das Beispiel ein- und zweifachverglaster Kollektoren mit schwarzen Absorbern aufgezeichnet. Sie lassen die Ueberlegenheit von Kollektoren mit einer Scheibe bei niedrigen Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Umgebung deutlich erkennen.

Die Angaben zur Wärmeübertragung vom Absorber zum Speicher erlauben die Bestimmung der Absorbentemperatur aus der Speichertemperatur (Bild 23). Nach einer Erörterung der rechnerischen Erfassung der unterschiedlichen Betriebsperioden der Warmwasserbereitungsanlage wird der Berechnungsgang für die vollständige Durchrechnung mit den Stundenwerten der diffusen und direkten Strahlung, der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit für ein Jahr gezeigt (Bild 24).

Die Ergebnisse für eine Absorberfläche von  $10 \text{ m}^2$ , eine Wasserzulauftemperatur von  $10 \text{ C}$  und eine Warmwassertemperatur von  $40 \text{ C}$  sind für einen täglichen Warmwasserverbrauch von  $0,2$ ,  $0,4$  und  $0,8 \text{ m}^3$



(Varianten A, B und C: Tabelle 4) und verschiedene Kollektortypen für das Beispiel Zürich-Kloten 1967 in den Bildern 30 bis 35 in Abhängigkeit des Kollektorneigungswinkels dargestellt. Die Bilder 30 und 31 zeigen deutlich, wie stark die Jahresnutzwärme von den Betriebsbedingungen bzw. der Anlagenvariante abhängt. Eine von der Anlage gelöste Untersuchung der Kollektoren ist nur von beschränktem Wert, weil die tägliche Aufheizzeit und der Kollektorwirkungsgrad weitgehend durch die Speichertemperatur bestimmt werden.

Die pro Quadratmeter Absorberfläche gewinnbare Jahresnutzwärme steigt mit zunehmendem Warmwasservolumenstrom infolge der dadurch bedingten tieferen Speichertemperatur stark an. Umgekehrt nimmt dann aber der Zeitanteil, während dem im Sommerhalbjahr das Wasser auf Temperaturen über 40 C erwärmt wird, entsprechend ab: Bilder 32 und 33. Die gegenüber Kollektoren mit einer Scheibe und schwarzer Absorberfläche erreichbaren Verbesserungen der Jahresnutzwärme ist für die Warmwasserbereitung auf 40 C bescheiden. Mit heute realisierbaren kollektorseitigen Massnahmen betragen sie höchstens etwa 10 % (Bild 34). Der Zeitanteil für Warmwassertemperaturen über 40 C lässt sich mit solchen Massnahmen dagegen deutlicher beeinflussen (Bild 35). Bezüglich der Jahresnutzwärme sind Kollektoren mit nur einer Scheibe jenen mit zwei Scheiben fast ebenbürtig. Bei zwei Scheiben erhält man geringfügig höhere Zeitanteile für Warmwassertemperaturen über 40 C im Sommerhalbjahr. Die selektive Beschichtung bringt bei Kollektoren mit einer Scheibe mehr als bei der Verwendung von zwei Abdeckscheiben. Die für die Anwendung interessanten Anlagevarianten A und B liefern bei Kollektorneigungswinkeln von 40 bis 50<sup>0</sup> die höchsten Jahresnutzwärmen. Der Neigungswinkeleinfluss ist allerdings nicht so gross, wie oft angenommen wird.

Kollektoren mit einer Scheibe - allenfalls mit selektiv beschichtetem Absorber - sind demzufolge für die Warmwasserbereitung am zweckmässigsten, falls es nicht gelingt, preisgünstige Scheiben mit sehr geringen optischen Verlusten herzustellen. Deshalb wurden die Nutzwärme, der Zeitanteil für Warmwassertemperaturen über 40 C, die Pumpenergie und die maximale Speichertemperatur bei Verwendung gewöhnlicher Kollektoren mit einer Scheibe und einem Neigungswinkel von 40° auch für die Jahre 1964 bis 1972 berechnet. Dazu wurden für die drei Anlagenvarianten je 184 000 meteorologische Messdaten ausgewertet. Je nach der auf die Absorberfläche bezogenen Warmwasserentnahmemenge werden im Mittel dieser Jahre Jahresnutzwärmen von 0,70 bis  $1,9 \cdot 10^9 \text{ J/m}^2 \text{ a}$  (195 bis 525 kWh/m<sup>2</sup>a) erzielt. Davon entfallen etwa zwei Drittel auf das Sommerhalbjahr. Die Jahreschwankungen liegen innerhalb von -8 % bis +12 %.

Am Beispiel eines Tagesbedarfs von 0,3 m<sup>3</sup> Warmwasser von 40 C (z.B. Einfamilienhaus) wird gezeigt, dass sich pro Quadratmeter Absorberfläche mit einfachen Kollektoren bei der Annahme eines Betriebswirkungsgrades des Kombikessels von 20 % im Sommerhalbjahr und von 80 % im Winterhalbjahr je nach der installierten Absorberfläche (3,75 bis 15 m<sup>2</sup>) im Mittel 60 bis 170 kg/m<sup>2</sup> Heizöl einsparen lassen (Tabelle 6). Die Wirtschaftlichkeitsgrenzen für die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie sind für eine Amortisationszeit von 15 Jahren und einen Kapitalzins von 6,0 % im Bild 40 in Abhängigkeit des Heizölpreises aufgetragen. Der Ölpreis müsste sich gegenüber den heutigen Kleinbezugspreisen von ca. 0,35 Fr/kg (1976) etwa verdoppeln, bis in Kleinserien hergestellte Warmwasserbereitungsanlagen wirtschaftlich wären. Durch eine Grossproduktion standardisierter Anlagekomponenten scheint die Wirtschaftlichkeitsgrenze aber schon heute erreichbar. Die Umweltfreundlichkeit und die Unabhängigkeit von Importen nur begrenzt vorhandener Energieträger dürfen bei der Entscheidung für oder gegen eine Anlage zur Nutzung der Sonnenenergie ebenfalls nicht ausser acht gelassen werden.

Für die Weiterentwicklung von Anlagen zur Warmwasserbereitung ist der Suche nach sehr preisgünstig herzustellenden Anlagenkomponenten mit guter Korrosionsbeständigkeit grösstes Gewicht beizumessen. Daneben sind die Absorbergeometrie und das Speichervolumen unter Einbezug der Gesamtanlage zu optimieren. Auch die Entwicklung billiger selektiver Absorberbeschichtungen und von Scheiben mit geringeren optischen Verlusten ist zur Erzielung höherer Nutzwärmen sinnvoll. Zur Verfeinerung des hier gezeigten Berechnungsweges ist ferner eine bessere Erfassung der Richtungsabhängigkeit der diffusen Sonnenstrahlung anzustreben.

## 1. Einleitung

Die auf den Rand der Erdatmosphäre treffende Sonnenstrahlung weist eine mittlere Gesamtenergiestromdichte von  $1390 \text{ [W/m}^2\text{]} = 4,38 \cdot 10^{10} \text{ [J/m}^2\text{a]}$  auf. Davon werden im Mittel etwa 34 % reflektiert und rund 19 % von der Erdatmosphäre absorbiert. Auf die Erdoberfläche gelangt noch eine mittlere Gesamtenergiestromdichte von  $650 \text{ [W/m}^2\text{]} \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ [J/m}^2\text{a]}$ . Die pro Jahr die Erdoberfläche erreichende Gesamtsonnenstrahlungsenergie beträgt somit ungefähr  $2,6 \cdot 10^{24} \text{ [J/a]}$ . Das sind etwa 2800 mal mehr als der Gesamtweltenergieumsatz im Jahr 1973 [1]. Diese ungeheure Energiemenge bewirkt seit jeher das Wettergeschehen und schenkt uns über die Photosynthese Nahrungsmittel und Brennstoffe. Erste Versuche einer direkten technischen Nutzung der Sonnenenergie gehen auf die zweite Hälfte des letzten Jahrhunderts zurück [2]. In Ländern wie Australien oder Israel hat sich die direkte Nutzung dieser umweltfreundlichen, dezentral anfallenden und für menschliche Begriffe unerschöpfliche Energie längst durchgesetzt. In Mitteleuropa liegt die auf einen Quadratmeter einer Horizontalfläche einfallende Globalstrahlungsenergie relativ tief, nämlich zwischen  $3,15 \cdot 10^9$  und  $4,2 \cdot 10^9 \text{ [J/m}^2\text{a]}$  [3,4]. Der Mittelwert der Messungen der MZA <sup>1)</sup> von 1964 bis 1972 beträgt für Zürich-Kloten  $4,01 \cdot 10^9 \text{ [J/m}^2\text{a]}$ . Erst durch die kräftigen Preisanstiege bei den fossilen Brennstoffen, sowie das Bewusstwerden der leichten Verletzbarkeit der Versorgung und der Endlichkeit der Vorräte an Erdöl begann man sich auch in unseren Breitengraden ernsthaft mit der direkten technischen Nutzung der Sonnenenergie zu befassen. Diese kann durch Umwandlung in Wärme, elektrische oder chemische Energie erfolgen (Bild 1).

## 2. Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Sonnenenergie

Die direkte Umwandlung in chemische Energie durch eine technische Photosynthese scheint vorerst kaum in Frage zu kommen. Der energetische Wirkungsgrad der grünen Pflanzen beträgt nur einige Promille.

1) MZA: Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Zürich

Bei Algen kann er allerdings bis zu 5 % betragen [5]. Der thermodynamische Grenzwert für die photochemische Energieumwandlung liegt bei einem energetischen Wirkungsgrad von 10 bis 15 %, wurde aber bisher von technischen Photosynthesen bei weitem nicht erreicht [6].

Die direkte Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie durch den photoelektrischen Effekt in Solarzellen [7] ist technisch schon seit langem möglich. Standard-Siliziumzellen weisen energetische Wirkungsgrade von 10 bis 12 % auf. In Versuchszellen wurden Werte bis 16 % erreicht. Als theoretischer Grenzwert werden 22 % angegeben. [1,7,8,9,10] Haupthindernis für eine breite Anwendung der Solarzellen ist ihr noch viel zu hoher Preis von gegenwärtig 30 bis 40 [Fr/W]. Man hofft, den Preis durch neue Halbleiterproduktionsverfahren auf 0,6 [Fr/W] senken zu können [11, 12, 13].

Am vielversprechendsten ist die Umwandlung der Sonnenenergie in Wärme. Man muss hier nach der im Absorber erzeugten Temperatur in Nieder- und Hochtemperaturumwandlung unterscheiden. Bei der Hochtemperaturumwandlung strebt man Temperaturen weit über 200 [C] an, um dann über Turbomaschinen Elektrizität zu erzeugen. In New Mexico, USA, wird ein 5-MW-Versuchskraftwerk gebaut. In Mexico ist seit dem Herbst 1975 ein französisches 30 kW-Kraftwerk im Betrieb [1,2,14]. Mit der Hochtemperaturumwandlung kann man aber über thermochemische Prozesse auch synthetische Energieträger wie Wasserstoff erzeugen [15,16,17]. Dies ist eine vielversprechende Möglichkeit zur Nutzung der Sonnenenergie, da Erzeugungs- und Verbrauchsort weit auseinanderliegen können. Die Wasserstoffherzeugung mit Sonnenenergie könnte armen äquatornahen Ländern willkommene Devisen und den Industriestaaten einen hochwertigen, für unsere Begriffe nicht versiegenden Energieträger bringen. Bei uns bestehen für die genannten Anwendungen der Hochtemperaturumwandlung schon infolge zu geringer Sonnenstrahlung und zu grossen witterungsbedingten Schwankungen kaum Realisierungschancen.

Bleibt die Niedrigtemperaturumwandlung mit Absorbertemperaturen unter 100 bis höchstens 200 [C]. Die aus der Sonnenenergie gewonnene Niedertemperaturwärme wird auch bei uns bereits für die Warmwasserbereitung, die Raumheizung und für diverse gewerbliche und industrielle Zwecke [18] verwendet. Die Raumheizung stösst allerdings auf Schwierigkeiten, weil der jahreszeitliche Verlauf des Wärmebedarfs dem jahreszeitlichen An-

gebot an Sonnenenergie widerspricht. Zur Ganzjahresgebäudeheizung mit Sonnenenergie benötigt man ohne Zusatzheizung Wasserspeicher mit einem Volumen, das grössenordnungsmässig demjenigen des Gebäudes entspricht [19]. Eine Reduktion dieses Volumens ist zwar mit Latentenergiespeichern [20,21,22,23] auf etwa 10 % eines entsprechenden Wasserspeichers möglich. Da - wie noch ausführlich gezeigt wird - billige Flachkollektoren nur bei niedrigem Temperaturniveau wirtschaftlich arbeiten, käme bei Vollheizung mit Sonnenenergie praktisch nur eine Fussbodenheizung in Frage [24]. Ein Umbau bestehender Gebäude auf ausschliessliche Sonnenenergieheizung muss somit im vornherein ausgeschlossen werden. Trotz Fortschritten bei der Entwicklung von Latentenergiespeichern wird die Wirtschaftlichkeit der Gebäudeheizung mit Sonnenenergie allgemein negativ beurteilt [24,25,26,27]. Eine Möglichkeit, das Speichervolumen stark zu reduzieren, besteht in der Kombination einer Anlage zur Niedrigtemperaturumwandlung der Sonnenenergie mit einer Wärmepumpe [25,28,29]. Die Wärme kann damit der Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau angeboten werden, als bei Benützung der natürlichen Sonnenenergiespeicher wie Erdreich oder Gewässer. Eine allgemeine Verwendung von Wärmepumpen würde aber nach einem erheblichen weiteren Ausbau der Elektrizitätsversorgung rufen.

Mit Abstand am günstigsten wird die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie beurteilt [25,26,27,30,31]. Zwar beträgt der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung nur etwa 10 bis 20 % desjenigen der Raumheizung. Der schlechte Betriebswirkungsgrad von ölgefeuerten Kesseln bei der Warmwasserbereitung im Sommer von nur 10 bis 20 % ([32], S. 1221) führt trotzdem zu einem hohen Heizölbedarf für die Warmwasserbereitung. Er wird bei einem Einfamilienhaus für die Zeit ausserhalb der Heizperiode auf 500 bis 1000 Liter pro Jahr geschätzt [33]. Hier sind mit der Sonnenenergienutzung schon kurzfristig beträchtliche Einsparungen möglich. Ueber die Grösse dieser Einsparungen sind die Meinungen noch geteilt. Die Angaben liegen zwischen 60 und 150 Liter pro Quadratmeter Kollektorfläche [27,34] und beruhen auf recht groben Abschätzungen. Es ist deshalb sicher angebracht, dieser meistversprechenden Möglichkeit etwas genauer nachzugehen. Dies könnte - wie häufig vorgeschlagen - experimentell erfolgen. Dieser Weg ist kostspielig und zeitraubend. Es kann nicht Aufgabe der Sonnenenergieforschung sein, über Jahre durchgeführte Messungen von Meteorologen oder die Grundlagenforschung zum Wärmetransport zu wiederholen. Es gilt zunächst, das vorhandene Wissen

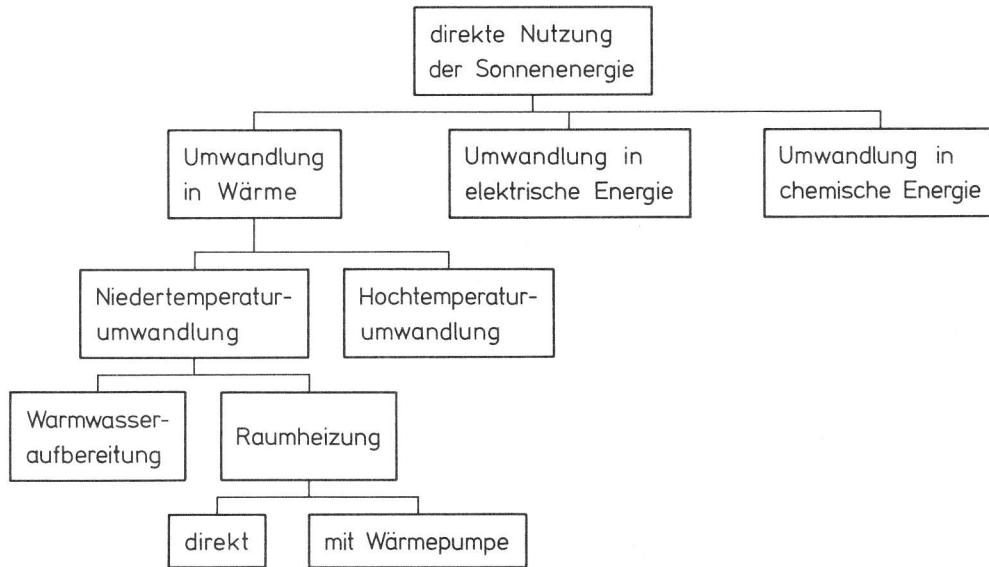


Bild 1: Möglichkeiten zur direkten Nutzung der Sonnenenergie.

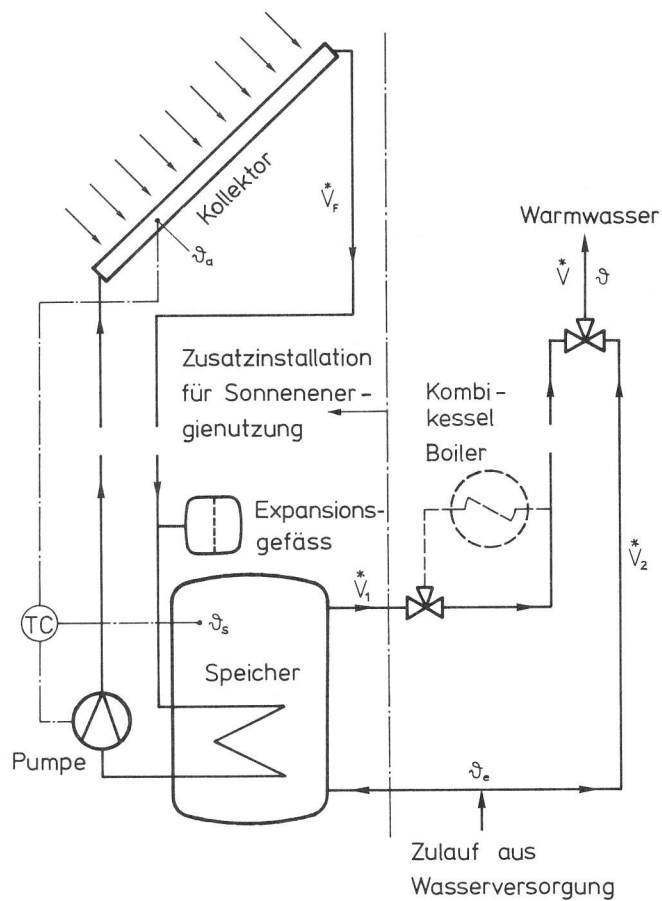


Bild 2: Anlage zur Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie.

auszuschöpfen, und dann die noch offenen Fragen experimentell zu klären. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Möglichkeiten und Grenzen der Vorausberechnung einer Anlage zur Warmwasserbereitung an einigen Beispielen fürs Schweizerische Mittelland aufzuzeigen und bessere Unterlagen zur Klärung der Wirtschaftlichkeitsfrage bereitzustellen.

### 3. Anlage für die Warmwasserbereitung

Zur Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie werden im wesentlichen Kollektoren zur Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärme und ein Wärmespeicher zur Ueberbrückung von Zeiten mit wenig oder keiner nutzbaren Sonnenstrahlung benötigt. Aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität wird Wasser als Speichermedium verwendet. Die Wärme wird aus den Kollektoren mit einem Wärmeübertragungsmittel zum Speicher geführt. Dazu ist eine Umwälzpumpe erforderlich: Bild 2. Diese wird durch den Temperaturregler eingeschaltet, sobald die Absorbtemperatur im Kollektor die Speichertemperatur um einen gewissen Betrag übersteigt. Falls die Speichertemperatur die gewünschte Warmwassertemperatur nicht erreicht, wird das vorgewärmte Wasser im Kombikessel, im elektrischen Boiler oder in einem Durchlauferhitzer weitererwärmt. Falls die Speichertemperatur über die Brauchwassertemperatur steigt, wird im Haushahn kaltes Wasser beigemischt.

Im folgenden wird gezeigt, wie sich die Warmwasserbereitung mit einer solchen Anlage aus der direkten und diffusen Sonnenausstrahlung, der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit berechnen lässt. Dazu muss zunächst der in den Kollektoren in Wärme umsetzbare Strahlungsanteil bestimmt werden. Dann wird der Wärmetransport von den Kollektoren zum Speicher und schliesslich die Speichertemperaturänderung untersucht.

### 4. Kollektoren für die Warmwasserbereitung

Für die Warmwasserbereitung können Flachkollektoren und konzentrierende Kollektoren verwendet werden. Bei den konzentrierenden Kollektoren wird die Sonnenstrahlung mit Spiegeln auf eine relativ kleine Absorberfläche konzentriert. Begnügt man sich mit einer bescheidenen Konzentrierung, wie etwa beim Philips-Kollektor, [24,35] kommt man ohne Nachführ-



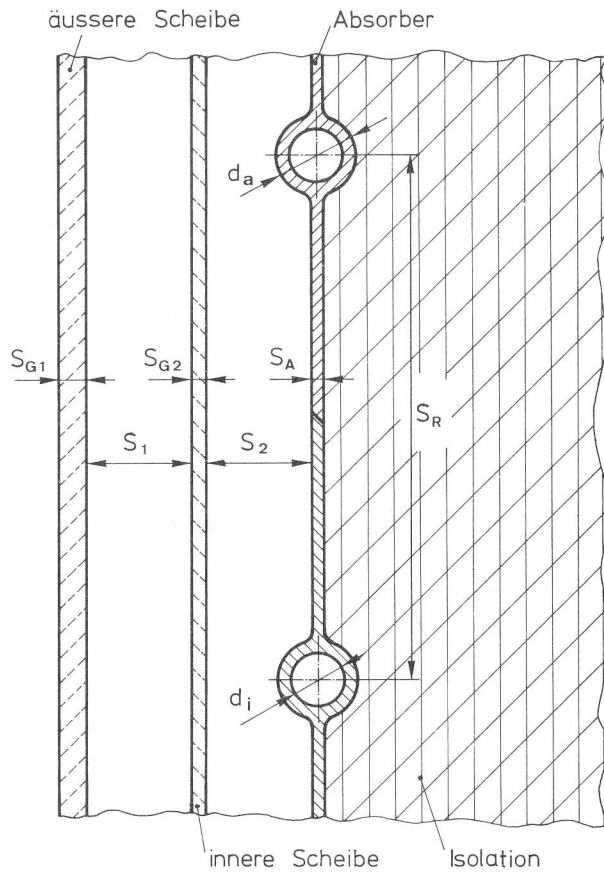


Bild 3: Ausschnitt aus einem Flachkollektor mit zwei Scheiben.

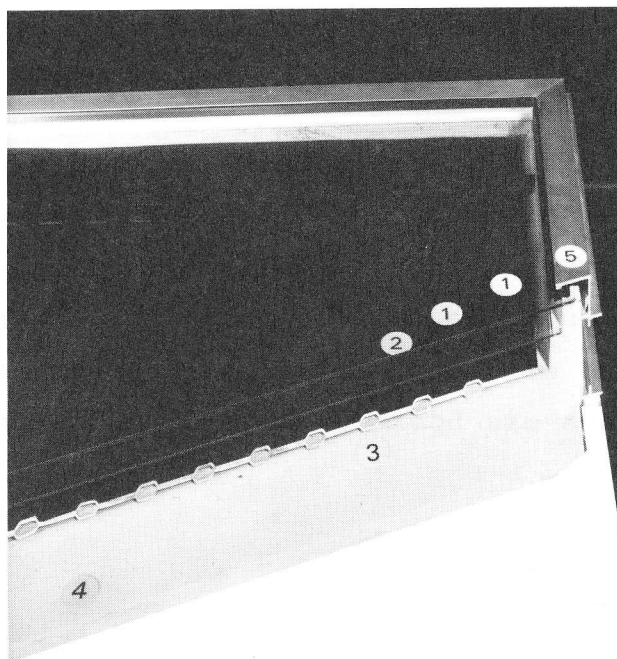


Bild 4: Flachkollektor mit zwei Scheiben (ALUSUISSE).  
 (1) Glas, (2) Schwarze Schicht, (3) Wasserführung  
 (4) Isolation, (5) Rahmen

einrichtungen aus, und es lässt sich noch ein grosser Teil der diffusen Strahlung auffangen. Hochkonzentrierende Kollektoren sind mit Parabolspiegeln ausgerüstet. Bei diesen muss entweder der Spiegel (z.B. Liebig-Kollektor [5], S. 79/106, [36].) oder nach einem neueren Vorschlag der Absorber [37] dem Stand der Sonne nachgeführt werden. Solche Kollektoren können nur noch einen sehr geringen Teil der diffusen Strahlung nutzen. Das heisst, im Schweizerischen Mittelland auf rund 50 % (Tabelle 5) der Globalstrahlung zu verzichten. Da die Absorbtemperatur bei der Warmwasserbereitung 60 [C] nur an wenigen Tagen übersteigt, kommt der Hauptvorteil konzentrierender Kollektoren - der geringere Wärmeverlust - kaum zum Tragen. Der Aufwand ist besonders gegenüber einem einfachverglasten Flachkollektor bedeutend höher. Wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Flachkollektor sind deshalb nicht zu erwarten.

Die folgenden Berechnungen werden darum nur für Flachkollektoren durchgeführt. Ihr Aufbau ist sehr einfach: Bild 3. Als Absorber dient ein Metallblech oder Metallprofil. Zur Wärmeabfuhr werden auf den Blechen oder in den Profilen in regelmässigen Abständen Kanäle für den Durchtritt eines flüssigen Wärmeträgers angebracht. Zur Reduktion der Wärmeverluste wird der Absorber seitlich und hinten isoliert. Auf der Vorderseite sorgen ein oder zwei transparente Scheiben ebenfalls für möglichst geringe Wärmeverluste. Das Ganze wird in Kästen mit 1 bis 4 m<sup>2</sup> Oberfläche zusammengefasst: Bild 4.

Zur Verbesserung der Wärmeausbeute gibt es verschiedene Möglichkeiten, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

- 1) Beschichtung der Absorberoberfläche zur Reduktion der langwelligen Wärmestrahlungsverluste. Eine solche Beschichtung ist nur sinnvoll, wenn sie die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung gegenüber einer geschwärzten Oberfläche nicht oder nur geringfügig schwächt. Solche Beschichtungen werden als selektiv bezeichnet. Die Selektivität beruht auf optischen Interferenzerscheinungen und/oder auf den besonderen Eigenschaften gewisser dünner Halbleiterschichten (z.B. Metalloxide, Metallsulfide), welche für die kurzwellige Sonnenstrahlung ein hohes Absorptionsvermögen aufweisen und für den langwelligen Wärmestrahlungsbereich weitgehend transparent sind. Damit bleiben die niedrigen Emissionswerte des metallischen Grundmaterials für die Wärmestrahlung erhalten. Eine gute Uebersicht zum gegenwärtigen Entwicklungsstand findet man in [37]. Für Flach-

kollektoren zur Niedrigtemperaturumwandlung kommen aus preislichen Gründen nur Beschichtungen in Frage, welche galvanisch oder durch chemische Umwandlung einer Oberflächenschicht erzeugt werden können. Mit einer NiS - ZnS Beschichtung auf nickelplatierten Metallen wurden über den interessierenden Wellenlängenbereich integrale Mittelwerte des Absorptionskoeffizienten  $\epsilon_{aA}$  von 0,94 und des Emissionskoeffizienten  $\epsilon_A$  von 0,06 gemessen. Diese Beschichtung ist aber stark feuchtigkeitsempfindlich. Mit Chromoxid auf nickelplakierten Metallen erreicht man mittlere Absorptionskoeffizienten von 0,9 bis 0,95 bei mittleren Emissionskoeffizienten von 0,11 bis 0,16. Diese ist wesentlich weniger feuchtigkeitsempfindlich als die NiS-ZnS-Beschichtung. Zur Verbilligung der Beschichtung werden auch Farben mit selektiven Eigenschaften vorgeschlagen [2,37]. Um den Einfluss der selektiven Oberfläche auf die Warmwasserbereitung mit Flachkollektoren zu klären, werden im folgenden Rechnungen mit  $\epsilon_{aA} = 0,95$  und  $\epsilon_A = 0,15$  (Kollektortypen 1-2, 1-3, 2-2 und 2-3) und mit dem praktisch nicht erreichbaren Optimum von  $\epsilon_{aA} = 1$  und  $\epsilon_A = 0$  (Kollektortypen 1-4 und 2-4) durchgeführt.

- 2) Beschichtung der Scheibe zur Reduktion der Wärmestrahlungsverluste.  
 Diese Massnahme zeigt, auf die dem Absorber zugekehrte Seite angewandt die gleiche Wirkung wie eine selektive Absorberoberfläche. Bei Kollektoren mit zwei Scheiben wäre eine Beschichtung der vom Absorber abgekehrten Seite der inneren Scheibe allerdings noch wirksamer. Leider führen solche Scheibenbeschichtungen bisher zu einer beträchtlichen Reduktion der Durchlässigkeit der Scheiben für die kurzwellige Sonnenstrahlung [37,38]. Bei der Niedrigtemperaturumwandlung überwiegt der dadurch verursachte Verlust den durch die geringeren Wärmestrahlungsverluste bedingten Gewinn.
- 3) Behandlung der Scheibenoberfläche zur Reduktion der Reflexionsverluste  
 Wie noch gezeigt wird, sind die Verluste durch Reflexion der Sonnenstrahlung an den Scheibenoberflächen bei ortsfesten Flachkollektoren recht hoch. Sie lassen sich durch im Vakuum aufgebraute Schichten stark vermindern, doch sind diese für Flachkollektoren zu teuer [37,38]. Bei Glas ist es mit einer relativ billigen Aetztechnik gelungen, die Reflexionsverluste auf etwa 12,5 % des Werts unbehandelter Gläser herabzusetzen. In den folgenden Rechnungen wird der Einfluss der Reflexionsverminderung auf die Warmwasserbereitung durch

reduzierte Reflexionsverluste (Kollektoren 1-3 und 2-3) und völlig wegfallende Reflexionsverluste (Kollektoren 1-4 und 2-4) untersucht.

- 4) Reduktion der durch freie Konvektion und Wärmeleitung bedingten Wärmeverluste. Dies könnte am wirksamsten durch Evakuieren des Raumes zwischen Absorber und Abdeckung erfolgen. Bei Flachkollektoren könnte dies konstruktiv etwa durch Ausfüllen des Zwischenraums mit evakuierten Glasröhrchen [2,36] verwirklicht werden. Bei den für die Warmwasserbereitung häufigen Absorbtemperaturen sind solche Lösungen allerdings wirtschaftlich kaum vertretbar. Eine weitere Möglichkeit, das Füllen des Zwischenraums mit schlecht wärmeleitenden Gasen hoher kinematischer Viskosität, bringt zwar weniger, wäre aber auch mit wesentlich geringerem Aufwand realisierbar.

## 5. Nutzbare Wärmestromdichte von Flachkollektoren

### 5.1 Daten der Flachkollektoren

Die im folgenden beschriebenen Kollektoren sind als Beispiel möglicher Ausführungen zu verstehen. Es geht in dieser Arbeit darum, die Möglichkeit der Vorausberechnung einer Warmwasserbereitungsanlage an einigen Beispielen aufzuzeigen und eine Standortbestimmung über deren Wirtschaftlichkeit vorzunehmen. Die Optimierung der Anlagenkomponenten muss späteren Arbeiten überlassen werden. Einiges lässt sich gegenüber den hier durchgerechneten Beispielen bestimmt noch herausholen. Die Verbesserungen werden aber einige Prozente nicht übersteigen. In den folgenden Abschnitten wird dies noch näher begründet.

Die Durchrechnung der Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie erfolgte mit acht verschiedenen Kollektortypen. Alle Kollektoren besitzen eine 50 [mm] dicke rückseitige Isolation mit einer als konstant angenommenen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_I = 0,04$  [W/mK]. Diese entspricht etwa der Wärmeleitfähigkeit von Glasfaser- oder Steinwolleisolationen bei 50 [C] ([39], S. 406). Schaumstoffisolationen weisen ähnliche Wärmeleitfähigkeiten auf [40]. Die Isolation wird durch ein 1 [mm] dickes, verzinktes Stahlblech mit einer Wärmeleitfähigkeit von 47 [W/mK] und einem Emissionskoeffizienten von 0,23 [W/mK] ([40], S. 923) abgedeckt.

Kollektor	Scheiben	Absorber						
		$\epsilon_{aA}$ [-]	$\epsilon_A$ [-]					
	$s_{G1}$ [m] $s_{G2}$ [m] $n$ [-] $\alpha_n$ [1/m] $\alpha_{nd}$ [1/m]							
1-1	schwarzer Absorber	0,004	-	1,5	18	22	0,95	0,95
1-2	selektiver Absorber	0,004	-	1,5	18	22	0,95	0,15
1-3	selektiver Absorber und geringe Reflexions- und Absorptionsverluste	0,004	-	1,152	9	11	0,95	0,15
1-4	keine optischen Verluste ideal selektiver Absorber	0,004	-	1,0	0	0	1,0	0
2-1	schwarzer Absorber	0,004	0,002	1,5	18	22	0,95	0,95
2-2	selektiver Absorber	0,004	0,002	1,5	18	22	0,95	0,15
2-3	selektiver Absorber und geringe Reflexions- und Absorptionsverluste	0,004	0,002	1,152	9	11	0,95	0,15
2-4	keine optischen Verluste ideal selektiver Absorber	0,004	0,002	1,0	0	0	1,0	0

Tabelle 1. Daten der untersuchten Flachkollektoren.

Der Absorber besteht aus 13 Aluminiumflossenrohren mit einer Wandstärke  $s_A$  von 1,5 [mm] und einer Länge von 2 [m]: Bild 3. Der Innendurchmesser der parallel geschalteten Rohre  $d_i$  beträgt 8 [mm], der Rohrabstand  $s_R$  77 [mm]. Das Absorbermaterial weist die folgenden mittleren Stoffwerte auf: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_A = 150$  [W/mK], Dichte  $\rho_A = 2700$  [kg/m<sup>3</sup>], spezifische Wärme  $c_{pA} = 892$  [J/kgK] ([42], S. 772). Mit dem Flüssigkeitsverteiler hat der Absorber pro Quadratmeter Absorberfläche eine Masse von 5,3 [kg].

Der mittlere Emissionskoeffizient des Absorbers  $\epsilon_A$  beträgt für die langwellige Wärmestrahlung 0,95 bei den Kollektoren 1-1 und 2-1 (gewöhnlicher schwarzer Absorber), 0,15 bei den Kollektoren 1-2, 1-3, 2-2 und 2-3 (selektive Absorberoberfläche) und 0 bei den Kollektoren 1-4 und 2-4. Bei den Kollektoren mit ideal selektiver Absorberoberfläche (1-4 und 2-4) wurde der mittlere Absorptionskoeffizient für die kurzwellige Sonnenstrahlung  $\epsilon_{aA} = 1$ , in allen anderen Fällen  $\epsilon_{aA} = 0,95$  gesetzt.

Für die beiden Scheiben wurde bei den Kollektoren 1-1, 1-2, 2-1 und 2-2 mit einer Brechzahl  $n$  von 1,5 und einem über den interessierenden Wellenlängenbereich der Sonnenstrahlung gemittelten natürlichen Absorptionskoeffizienten [43]  $\alpha_n$  von 18 [1/m] gerechnet. Zur Berechnung der Absorption der diffusen Strahlung in den Scheiben dieser Kollektoren wurde ein natürlicher Absorptionskoeffizient  $\alpha_{nd}$  von 22 [1/m] angenommen. Diese Stoffwerte wurden für gewöhnliches Fensterglas aus den Angaben in [32], S. 1085 bestimmt. Da neben Glas noch andere transparente Stoffe als Deckscheiben in Frage kommen [1,30] und weil die Scheiben je nach Konstruktion dünner als 4 [mm] aussen und 2 [mm] innen gewählt werden können, wurden auch Kollektorvarianten mit  $n = 1,152$   $\alpha_n = 9$  [1/m] und  $\alpha_{nd} = 11$  [1/m] (Kollektoren 1-3 und 2-3) sowie optisch ideale Kollektoren ohne Reflexions- und Absorptionsverluste in den Scheiben (Kollektoren 1-4 und 2-4) untersucht. Als Emissionskoeffizient für die Wärmestrahlung wurde in allen Fällen der Wert für Glas ([44], S. Ka 3)  $\epsilon_G = 0,876$  eingesetzt. Die Abstände zwischen den Scheiben  $s_1$  und zwischen Absorber und Scheibe  $s_2$  wurden je 15 [mm] gesetzt. Die für die einzelnen Kollektoren unterschiedlichen Daten sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

## 5.2 Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung

Der Anteil der eingestrahlichten Sonnenenergie, welcher mit Flachkollektoren genutzt werden kann, hängt sehr stark vom Winkel  $\varphi$  zwischen der Kollektornormalen  $n$  und der Richtung der Sonnenstrahlung ab (Bild 5). Dieser Winkel wird als Einfallswinkel bezeichnet. Nachstehend wird gezeigt, wie der Einfallswinkel für einen beliebig geneigten, nach Süden orientierten Flachkollektor berechnet werden kann.

Dazu müssen wir zunächst den Sonnenstand (Bild 5: Sonnenazimut  $\alpha^*$  und Sonnenhöhenwinkel  $\varphi$ ) für einen beliebigen Tag  $d$  und eine beliebige Tageszeit  $t$  bestimmen. Als Tageszeit benutzen wir die wahre Sonnenzeit, welche sich im Schweizerischen Mittelland bis zu  $\approx 2350$  [s] von der bürgerlichen Zeit unterscheidet [45]. Der Tageszeitwinkel  $\Theta_d$  wird vom wahren Mittag (12 [h] =  $4,32 \cdot 10^4$  [s] aus gemessen. In einem Tag ändert er sich von  $-\pi$  (=  $-180^\circ$ ) bis  $+\pi$  (=  $+180^\circ$ ). Am wahren Mittag ist er Null:

$$\Theta_d = (t - 4,32 \cdot 10^4) \frac{\pi}{4,32 \cdot 10^4} \quad (1)$$

Darin ist  $t$  die wahre Sonnenzeit in [s] und  $\Theta_d$  der Tageszeitwinkel im Bogenmass. In einem Jahr (=365,25 [d]) bewegt sich die Erde einmal um die Sonne. Geht man etwas vereinfachend von einer konstanten Winkelgeschwindigkeit aus, lässt sich der Jahreszeitwinkel  $\Theta_a$  leicht aus der folgenden Gleichung berechnen:

$$\Theta_a = (d - 80) \frac{2\pi}{365,25} \quad (2)$$

Damit ist  $d$  der Tag ab dem 1. Januar gezählt und  $\Theta_a$  der Jahreszeitwinkel im Bogenmass. Wie man aus der Gl. (2) erkennt, wird der Jahreszeitwinkel für den 80. Tag (21. März) Null. Durch die Neigung der Erdachse gegenüber der Umlaufebene um die Sonne ergibt sich für einen festen Punkt auf dem Aequator eine jahreszeitlich zwischen der maximalen Deklination von  $23,45^\circ = 0,4093$  und ihrem negativen Wert schwankende Deklination  $\delta$ . Sie beträgt im Bogenmass:

$$\delta = 0,4093 \sin \Theta_a \quad (3)$$

Mit der geographischen Breite  $\beta$  (Schweizerisches Mittelland:  $\approx 47^\circ = 0,82$ ) und den aus (1), (2) und (3) bestimmbaren Winkeln liefert die

sphärische Trigonometrie die nachstehende Beziehung für den Sonnenhöhenwinkel  $\psi$  (Bild 5) [45,46]:

$$\sin \psi = \sin \beta \sin \delta + \cos \beta \cos \delta \cos \Theta_d \quad (4)$$

Zur Umgehung von Quadrantenschwierigkeiten schreibt man die in [45] und [46] angegebene Gleichung zur Berechnung des Sonnenazimuts  $\alpha^*$  besser in der folgenden Form [47]:

$$\cos \alpha^* = \frac{\sin \beta \sin \psi - \sin \delta}{\cos \beta \sqrt{1 - \sin^2 \psi}} \quad (5)$$

Nun kann der Einfallswinkel  $\psi$  für einen nach Süden orientierten Flachkollektor, welcher zur Horizontalebene unter dem Kollektor-neigungswinkel  $\gamma$  (Bild 4) geneigt ist, berechnet werden [46,47]:

$$\cos \varphi = \cos (\psi - \gamma) + \cos \psi \cos \gamma (\cos \alpha^* - 1) \quad (6)$$

Das Bild 6 zeigt den aus den Gln. (1) bis (6) berechneten Jahresverlauf des Einfallswinkels für einen um  $50^\circ$  geneigten nach Süden orientierten Kollektor von 0700 bis 1200. Am Nachmittag wiederholen sich die Kurvenverläufe: 1300  $\hat{=}$  1100, 1400  $\hat{=}$  1000, u.s.w.

### 5.3 Umrechnung der Strahlungsdaten

Die den numerischen Rechnungen zugrundeliegenden Sonnenstrahlungsdaten [48] wurden an Horizontalebene gemessen. Sie müssen deshalb auf die geneigte Kollektorebene umgerechnet werden. Die Umrechnung der Energiestromdichte der direkten Sonnenstrahlung (nachstehend als "direkte Sonnenstrahlung" bezeichnet) erfolgt mit dem LAMBERTSchen Gesetz ([49], S. 217/218). Bezeichnet man die durch direkte Strahlung auf eine Horizontalebene einfallende Energiestromdichte als  $\dot{e}_H$  und die auf die geneigte Kollektorfläche gelangende als  $\dot{e}$ , liefert das LAMBERTSche Gesetz:

$$\dot{e} = \dot{e}_H \frac{\cos \varphi}{\sin \psi} \quad (7)$$

Für Wirkungsgradüberlegungen ist auch die auf eine Normalebene zur Sonnenstrahlungsrichtung bezogene Sonnenstrahlung  $\dot{e}_N$  von Interesse.



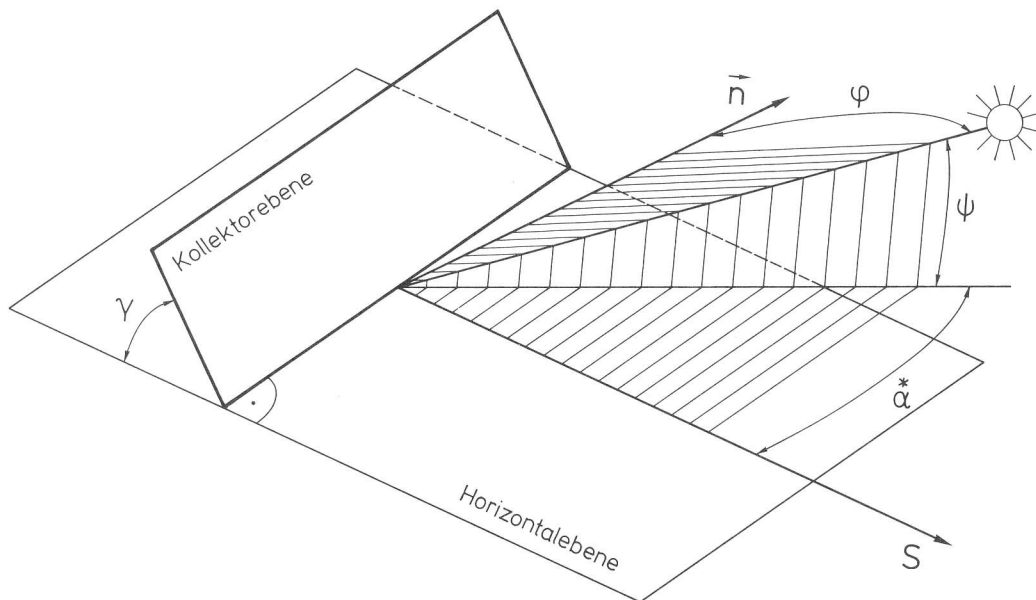


Bild 5: Zur Berechnung des Einfallswinkels.  $\vec{n}$ : Normale auf die Kollektorebene.

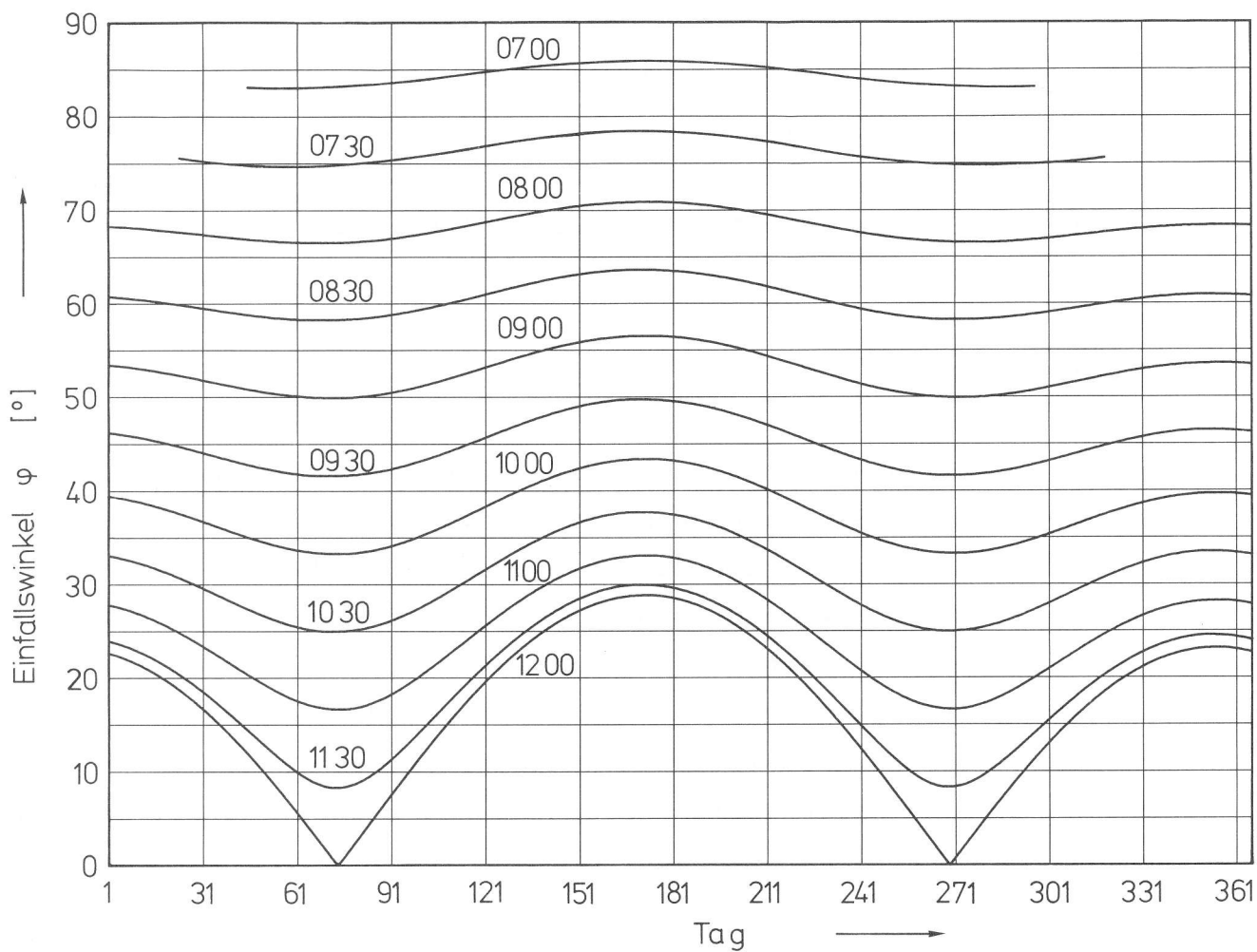


Bild 6: Jahresverlauf des Einfallswinkels für einen nach Süden orientierten Flachkollektor mit einem Neigungswinkel von  $50^\circ$ . Zeitangaben in wahrer Sonnenzeit.

Sie lässt sich ebenfalls mit dem LAMBERTschen Gesetz aus  $\dot{e}_H$  berechnen:

$$\dot{e}_N = \frac{\dot{e}_H}{\sin \psi} \quad (8)$$

Problematischer ist die Umrechnung der Energiestromdichte der diffusen Sonnenstrahlung (im folgenden als "diffuse Strahlung" bezeichnet). Die Winkelabhängigkeit der diffusen Strahlung ist noch weitgehend ungeklärt. Sie wird neben örtlichen Einflussfaktoren wie Gebäudeoberflächen, Wasseroberflächen etc. besonders durch das Verhältnis der diffusen zur gesamten Strahlung bestimmt:

$$\mu = \frac{\dot{e}_{dH}}{(\dot{e}_H + \dot{e}_{dH})} \quad (9)$$

Für die Umrechnung der diffusen Strahlung von der Horizontal- auf die Kollektorebene wird diese in einen winkelunabhängigen und einen nach dem LAMBERTschen Gesetz winkelabhängigen Teil  $(1 - \mu) \dot{e}_{dH}$  aufgeteilt:

$$\dot{e}_d = \mu \left[ \frac{\mu(1 + \cos \gamma)}{2} + (1 - \mu) \right] \dot{e}_{dH} + (1 - \mu) \frac{\cos \varphi}{\sin \psi} \dot{e}_{dH} \quad (10)$$

Der winkelunabhängige Anteil (erster Summand der Gl.(10)) wird mit zunehmendem Neigungswinkel gegenüber dem auf einer Horizontalebene gemessenen Wert abgeschwächt. Dem trägt der Ausdruck in der eckigen Klammer Rechnung. Er wurde aufgrund einiger Messergebnisse an einem nebligen Tag aufgestellt. Dieser Ansatz zur Umrechnung der diffusen Strahlung ist recht grob. Genauere Beziehungen sind erst von laufenden Forschungsarbeiten [63] zu erwarten. Da die Richtungsabhängigkeit der diffusen Strahlung durch örtliche Verhältnisse stark beeinflusst wird, sind einer Verfeinerung des gezeigten Ansatzes allerdings Grenzen gesetzt. Zur Abschätzung des maximalen Fehlers, welcher durch die Gln.(9) und (10) in die numerischen Auswertungen getragen wird, wurden diese für die Anlagevariante B und einem Kollektorneigungswinkel von  $50^\circ$  mit den Grenzwerten  $\mu = 0$  und  $\mu = 1$  durchgeführt. Für  $\mu = 0$  ergaben sich um 3,4% kleinere, für  $\mu = 1$  um 14% grössere Jahresnutzwärmen als mit dem aus der Gl.(9) bestimmten Wert von  $\mu$ . Die Abweichungen der im Sommerhalbjahr gewonnenen Nutzwärmen betragen sogar nur -1% bzw. + 1,5%.

## 5.4 Optische Verluste in den Deckscheiben

Die auf die Kollektoren treffende Strahlung wird durch Reflexion an den Oberflächen der Scheiben und durch Absorption in den Scheiben geschwächt: Bild 7. Wir betrachten zunächst die Schwächung der direkten Sonnenstrahlung. Reflexionsverluste treten an den inneren und äusseren Scheibenoberflächen auf. Der an einer optisch glatten Oberfläche reflektierte Strahlungsanteil lässt sich aus der Brechzahl  $n$  der Scheibe und dem Einfallswinkel  $\varphi$  berechnen ([50], S. 59/61). Die Gleichungen lauten für die äussere Oberfläche:

$$\frac{\dot{e}_{ra}}{\dot{e}} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} + \cos \varphi} \right)^2 + \left( \frac{n^2 \cos \varphi - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}{n^2 \cos \varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \right)^2 \right] \quad (11)$$

und die innere Oberfläche:

$$\frac{\dot{e}_{ri}}{(\dot{e} - \dot{e}_{ra} - \dot{q}_a)} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1} - \cos \varphi_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1} + \cos \varphi_1} \right)^2 + \left( \frac{n^2 \cos \varphi_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1}}{n^2 \cos \varphi_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_1}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Der Winkel  $\varphi_1$  (Bild 6) folgt aus dem Brechungsgesetz von SNELLIUS ([39], S. 202):

$$\sin \varphi_1 = \frac{\sin \varphi}{n} \quad \text{bzw.} \quad \cos \varphi_1 = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}{n} \quad (13) \quad (14)$$

Ein Teil der Sonnenstrahlung wird durch Absorption in der Scheibe in Wärme umgewandelt. Die dadurch in der Scheibe erzeugte Wärmestromdichte  $\dot{q}_a$  kann bei bekanntem spektralem Mittelwert des natürlichen Absorptionskoeffizienten  $\alpha_n$  (Tabelle 1) mit dem Absorptionsweg  $s_{G1} / \cos \varphi_1$  und  $\cos \varphi_1$  aus der Gl. (14) berechnet werden [43]:

$$\dot{q}_a = (\dot{e} - \dot{e}_{ra}) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\alpha_n \cdot s_{G1} \cdot n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}} \right) \right] \quad (15)$$

Die aus der Scheibe 1 tretende Strahlung  $\dot{e}_1$  ist gegenüber der eintretenden  $\dot{e}$  um die Reflexionsverluste an den beiden Scheibenoberflächen und den Absorptionsverlust kleiner:

$$\dot{e}_1 = \dot{e} - \dot{e}_{ra} - \dot{e}_{ri} - \dot{q}_a \quad (16)$$

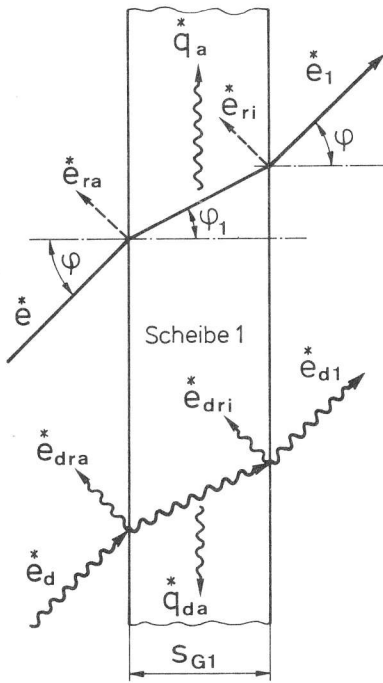


Bild 7: Zur Berechnung der optischen Verluste.

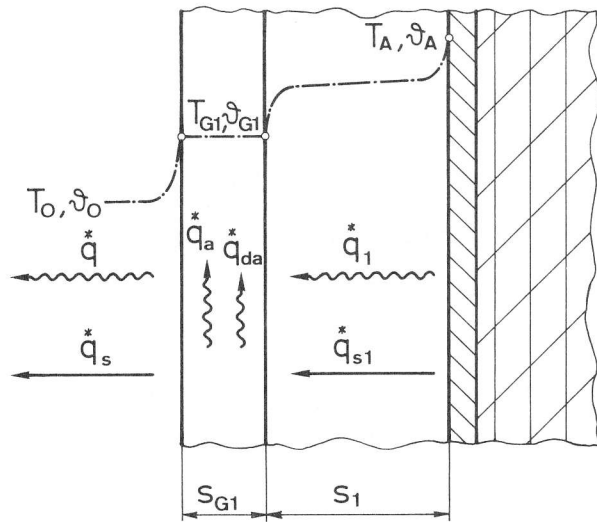


Bild 9: Zur Berechnung der vorderseitigen Wärmeverluste bei einer Scheibe.

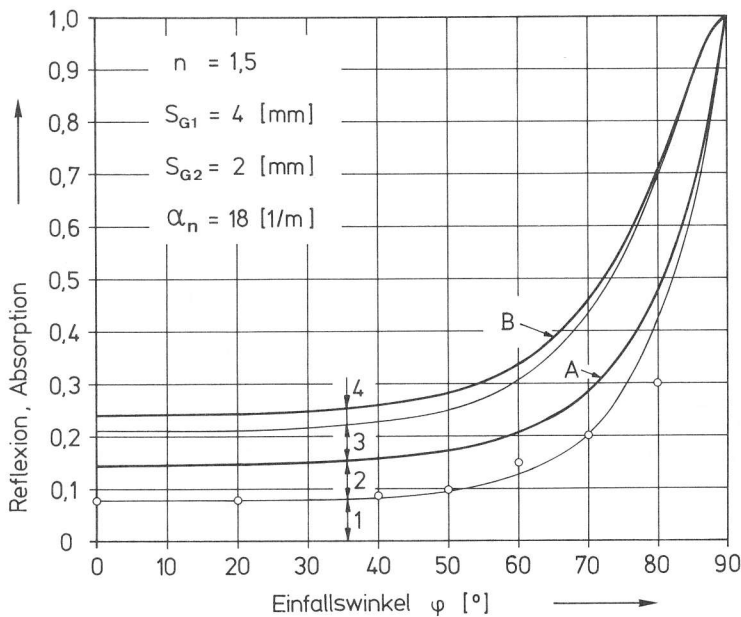


Bild 8: Optische Verluste von Fensterglas in Abhängigkeit des Einfallswinkels. 1: Reflexionsverluste an äusserer Scheibe, 2: Absorptionsverluste an äusserer Scheibe, 3: Reflexionsverluste an innerer Scheibe, 4: Absorptionsverluste an innerer Scheibe. A: optische Verluste der Kollektoren 1-1 und 1-2. B: optische Verluste der Kollektoren 2-1 und 2-2.

Falls eine zweite Scheibe vorhanden ist, erfährt die Sonnenstrahlung nochmals eine entsprechende Schwächung. Sie kann ebenfalls aus den Gln. (11) bis (16) ermittelt werden, wenn für  $\dot{e}$  der für die erste Scheibe aus der Gl. (16) berechnete Wert  $\dot{e}_1$  eingesetzt wird. Im Bild 8 sind die mit den Gln. (11) bis (16) ermittelten Reflexions- und Absorptionsverluste für die direkte Sonnenstrahlung in Abhängigkeit des Einfallswinkels für Fensterglas aufgezeichnet. Die Kurve A gibt die optischen Verluste (Summe der Reflexions- und Absorptionsverluste) einer Scheibe wieder, während die Kurve B die gesamten optischen Verluste von zwei Scheiben zeigt. Die in [32], S. 1085 tabellierten Reflexionsverluste von Fensterglas sind als Punkte im Bild 8 eingezeichnet. Die Übereinstimmung mit den aus den Gln. (11) und (12) berechneten Reflexionsverlusten ist bis zu einem Einfallswinkel von  $\approx 70^\circ$  gut. Der für  $80^\circ$  angegebene Wert liegt 27 % tiefer als der berechnete. Für die späteren Auswertungen ist dies aber bedeutungslos, da Einfallswinkel über  $70^\circ$  nur vor 0800 bzw. nach 1600 (Bild 6) vorkommen. Zu Tageszeiten also, während denen ohnehin keine oder nur sehr geringe Nutzung der Sonnenenergie möglich ist. Die optischen Verluste des winkelunabhängigen Anteils der diffusen Strahlung werden als unabhängig von der räumlichen Intensitätsverteilung angenommen. Für die Reflexionsverluste von Fensterglas gilt nach [32], S.1085:

$$\frac{\dot{e}_{dra} + \dot{e}_{dri}}{\dot{e}_d} = 0,15 \quad (17)$$

Diese Reflexionsverluste entsprechen nach dem Bild 8 den Reflexionsverlusten an direkter Strahlung für einen Einfallswinkel von ungefähr  $65^\circ$ . Bei den Kollektoren 1-3 und 2-3 beträgt die Brechzahl 1,152. Mit  $\alpha_n = 9$  [1/m] und  $s_{G1} = 0,004$  [m] liefern die Gln. (11), (12), (13) und (15) für  $\varphi = 65^\circ$  einen Reflexionsverlust von rund einem Drittel des Werts für  $n = 1,5$  und  $\alpha_n = 18$  [1/m]. Deshalb wird die rechte Seite der Gl. (17) für die Kollektoren 1-3 und 2-3 zu 0,05 angenommen.

Die Absorptionsverluste an diffuser Strahlung lassen sich aus der folgenden Beziehung bestimmen:

$$\dot{q}_{da} = \dot{e}_d [1 - \exp(-\alpha_{nd} s_{G1})] \quad (18)$$

Darin ist  $\alpha_{nd}$  der in der Tabelle 1 aufgeführte spektrale Mittelwert des natürlichen Absorptionskoeffizienten der diffusen Strahlung. Die aus der ersten Scheibe tretende diffuse Strahlung beträgt noch:

$$\dot{e}_{d1} = \dot{e}_d - (\dot{e}_{dra} + \dot{e}_{dri}) - \dot{q}_a \quad (19)$$

Die Ermittlung der durch die zweite Scheibe verursachten optischen Verluste erfolgt analog. Mit den Zahlenwerten aus der Tabelle 1 ergeben die Gln. (17) bis (19) die in der Tabelle 2 aufgeführten optischen Verluste an diffuser Strahlung. Wie aus dem Bild 8 und der Tabelle 2 hervorgeht, sind die optischen Verluste mit gewöhnlichem Fensterglas abgedeckter Kollektoren beträchtlich.

### 5.5 Wärmeverluste

Wärmeverluste treten auf der mit Scheiben abgedeckten Vorderseite und auf der mit einer Isolation versehenen Rückseite des Kollektors auf.

Kollektor	Absorptions- und Reflexionsverluste
1-1, 1-2	23,4%
1-3	9,3%
1-4	0
2-1,2-2	38,2%
2-3	15,8%
2-4	0

Tabelle 2. Optischer Verlust an diffuser Strahlung.

### 5.5.1 Wärmeverluste auf der Kollektorvorderseite

Die Wärmeverluste auf der Kollektorvorderseite setzen sich aus einem Strahlungsverlust und einem Konvektions- und Wärmeleitungsverlust zusammen. Wir beschränken uns zunächst auf den einfacheren Fall mit nur einer Abdeckscheibe. Das Bild 9 zeigt den qualitativen Temperaturverlauf vom Absorber (Index A) zur Umgebung (Index o). Der Temperaturabfall in den Scheiben ist bei der Anwendung zur Warmwasserbereitung gering. Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Berechnungen erreichte er kaum 1,5 % der Temperaturdifferenz  $\vartheta_A - \vartheta_o$  und wird deshalb vernachlässigt.

Die durch freie Konvektion und Wärmeleitung im Spalt zwischen Absorber und Scheibe verursachte Wärmestromdichte  $\dot{q}_1$  kann für  $Gr Pr > 1,5 \cdot 10^5$  aus der Beziehung ([44], S. Fc 2)

$$Nu_1 = c (Gr_1 Pr)^{0,33} Pr^{0,074} \quad (20)$$

berechnet werden. Darin ist c ein vom Kollektorneigungswinkel  $\gamma$  (Bild 4) abhängiger Koeffizient:

$$c \approx 0,0468 + 3,58 \cdot 10^{-4} (90^\circ - \gamma) - 1,21 \cdot 10^{-6} (90^\circ - \gamma)^2 \quad (21)$$

$Gr_1$  die Grashofzahl

$$Gr_1 = \frac{g s_1^3 (\vartheta_A - \vartheta_{G1})}{T_1 \nu_L^2} \quad (22)$$

und Pr die Prandtlzahl. Die Prandtlzahl von Luft liegt bei Umgebungsdruck zwischen 0,71 bei - 40 [C] und 0,69 bei 100 [C] ([44], S. Db 7). Es genügt deshalb die Prandtlzahl in allen Fällen 0,70 zu setzen.  $T_1$  ist die mittlere absolute Temperatur im Spalt:

$$T_1 = \frac{\vartheta_A + \vartheta_{G1}}{2} + 273,15 \quad (23)$$

Die kinematische Viskosität der Luft  $\nu_L$  wird für die mittlere Spalttemperatur aus der folgenden Zahlenwertgleichung bestimmt ( $\nu_L$  in  $[m^2/s]$ ,  $\vartheta$  in [C]):

$$\nu_L = 1,34 \cdot 10^{-5} + 8,543 \cdot 10^{-8} \vartheta + 7,23 \cdot 10^{-11} \vartheta^2 \quad (24)$$

Diese vermag die in [44], S. Db 7 tabellierten Viskositäten von Luft bei Umgebungsdruck im ganzen Bereich von - 40 [C] bis 100 [C] mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 2\%$  wiederzugeben.

In Flachkollektoren zur Warmwasserbereitung mit den im 4. Kapitel beschriebenen Abmessungen kommen Werte von  $Gr_1 Pr > 1,5 \cdot 10^5$  kaum vor. Die Extrapolation mit der Gl. (20) bis zum Bereich reiner Wärmeleitung  $Nu_1 = 1$  scheint allerdings gerechtfertigt. Zwar ist bei laminarer Grenzschicht eher ein Exponent 0,25 des Produktes aus  $Gr_1 Pr$  anstelle der 0,33 der Gl (20) zu erwarten ([49], S. 185/195, [51], S. 262/283). Der Koeffizient müsste dann aber so angepasst werden, dass für  $Gr_1 Pr = 1,5 \cdot 10^5$  die gleiche Nusseltzahl  $Nu_1$  resultiert. Damit ergäben sich Abweichungen, die bis zum Wärmeleitungsbereich in den Genauigkeitsgrenzen solcher Beziehungen für die freie Konvektion liegen. Deshalb wird die Gl. (20) - wie im VDI - Wärmeatlas ebenfalls angedeutet - auch für kleinere Werte von  $Gr_1 Pr$  benützt. Sobald die Nusseltzahl nach der Gl. (20)  $\leq 1$  wird, ist nur noch die Wärmeleitung massgebend. Die Nusseltzahl  $Nu_1$  wird dann 1 gesetzt.

Den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_1$  erhält man aus der Definitionsgleichung für die Nusseltzahl  $Nu_1$ :

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_L}{s_{G1}} \quad (25)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Luft  $\lambda_L$  lässt sich für die mittlere Spalttemperatur ebenfalls aus einer Zahlenwertgleichung berechnen ( $\lambda$  in [W/mC],  $\vartheta$  in [C]):

$$\lambda_L = 2,452 \cdot 10^{-2} + 7,570 \cdot 10^{-5} \vartheta - 3,333 \cdot 10^{-8} \vartheta^2 \quad (26)$$

Die maximale Abweichung der mit der Gl. (26) bestimmten Wärmeleitfähigkeit der Luft bei Umgebungsdruck von den in [44], S. 7 tabellierten Werten beträgt im Bereich  $- 40 < \vartheta < 100$  [C] maximal  $\pm 1\%$ . Der durch Konvektion und Wärmeleitung verursachte Wärmestrom folgt aus:

$$\dot{q}_1 = \alpha_1 (\vartheta_A - \vartheta_{G1}) \quad (27)$$

Den Wärmeverlust durch Strahlung im ebenen Spalt zwischen dem Absorber und der Scheibe erhält man aus ([44], S. Ka 3, [49], S. 243/245):



$$\dot{q}_{s1} = C_s \left( \frac{1}{\epsilon_A} + \frac{1}{\epsilon_{G1}} - 1 \right) \left[ \left( \frac{T_A}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{G1}}{100} \right)^4 \right] \quad (28)$$

Die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers  $C_s$  beträgt  $5,67 \text{ [W/m}^2\text{K]}$  ([44], S. Ka 1).  $\epsilon_A$  ist der Emissionskoeffizient des Absorbers (Tabelle 1)  $\epsilon_{G1}$  der Emissionskoeffizient der Scheibe (Glas:  $\epsilon_{G1} = 0,876$ ).  $T_A$  und  $T_{G1}$  sind die absoluten Absorber- bzw. Scheibentemperaturen.

Die gesamte Verlustwärmestromdichte auf der Vorderseite des Absorbers

$$\dot{q}_V = \dot{q}_1 + q_{s1} \quad (29)$$

kann nun mit den Gln. (20) bis (29) bis auf die noch unbekannte Scheibentemperatur  $\vartheta_{G1}$  berechnet werden. Diese lässt sich über eine Wärmestromdichtebilanz (Bild 9)

$$\dot{q}_1 + \dot{q}_{s1} + \dot{q}_a + \dot{q}_{da} - \dot{q} - \dot{q}_s = 0 \quad (30)$$

ermitteln. Dazu müssen die Wärmestromdichten  $\dot{q}$  und  $\dot{q}_s$  an der Scheibenaussenseite noch bestimmt werden. Die durch Absorption der Sonnenstrahlung in der Scheibe entstehende Wärmestromdichte  $\dot{q}_a + \dot{q}_{da}$  ist aus den Gln. (15) und (18) bereits bekannt. Beim Wärmeverlust an der Scheibenaussenseite ist zwischen Wärmeverlust durch freie Konvektion, erzwungener Konvektion und Wärmestrahlung zu unterscheiden. Wärmeverlust durch freie Konvektion kommt praktisch kaum vor, wird aber als Grenzfall für minimale Wärmeverluste trotzdem ins Auswertungsprogramm eingebaut. Die Nusseltzahl für freie Konvektion an vertikalen ebenen Wänden kann für  $Gr Pr > 10^8$  aus

$$Nu_f = 0,12 (Gr Pr)^{1/3} \quad (31)$$

und für  $Gr Pr < 10^8$  aus

$$Nu_f = 0,557 (Gr Pr)^{0,25} \quad (32)$$

bestimmt werden ([41], S. 104, [44], S. Fa 1/2, [49], S. 194). Die Grashofzahl wird mit der Plattenhöhe  $b$  (= Kollektorbreite) gebildet:

$$Gr = \frac{g \cdot b^3 (\vartheta_{G1} - \vartheta_o)}{T \nu_L^2} \quad (33)$$

Darin ist T die mittlere absolute Temperatur

$$T = \frac{\vartheta_{G1} + \vartheta_o}{2} + 273,15 \quad (34)$$

und  $\nu_L$  die für  $(\vartheta_{G1} + \vartheta_o) / 2$  aus der Gl. (24) berechnete dynamische Viskosität der Luft. Den Wärmeübergangskoeffizienten erhält man aus der Definitionsgleichung für die Nusseltzahl:

$$\alpha_f = \frac{Nu_f \lambda_L}{b} \quad (35)$$

$\lambda_L$  folgt für  $(\vartheta_{G1} + \vartheta_o) / 2$  aus der Gl. (26). Da die Abhängigkeit der Nusseltzahl  $Nu_f$  vom Kollektorneigungswinkel gering ist ([51], S. 274/275), wurde auf deren Berücksichtigung verzichtet. Auch der Einfluss der Umgebungsverhältnisse [53] wird in den Gln. (31) und (32) vernachlässigt. Dies bleibt ohne Wirkung auf die späteren Auswertungen, da der Fall freier Konvektion selten vorkommt.

Die häufigsten Luftgeschwindigkeiten w liegen in Zürich-Kloten während der für die Sonnenenergienutzung interessanten Tageszeit etwa zwischen 1 und 6 [m/s] [48]. Eine Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit auf den Wärmeverlust der Kollektoren ist mit der Annahme einer kollektorparallelen Anströmung näherungsweise möglich. Die Annahme trifft für nach Süden orientierte Kollektoren bei West- und Ostwind zu. Bei Südwind ergibt sie zu kleine, bei Nordwind zu grosse konvektive Wärmeverluste. Auf die berechneten nutzbaren Wärmeströme wirken sich diese Abweichungen aber nicht so stark aus, dass dies den erheblichen Mehraufwand durch eine Miteinbeziehung der stündlichen Windrichtungen rechtfertigen würde. Der Wärmeübergang bei parallel angeströmten Platten der Länge L (= Kollektorlänge) wird im ganzen Bereich  $10 < Re < 10^7$  durch die Gleichung

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (36)$$

mit

$$Nu_{lam} = 0,664 \sqrt{Re} \sqrt[3]{Pr} \quad (37)$$

und

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (38)$$

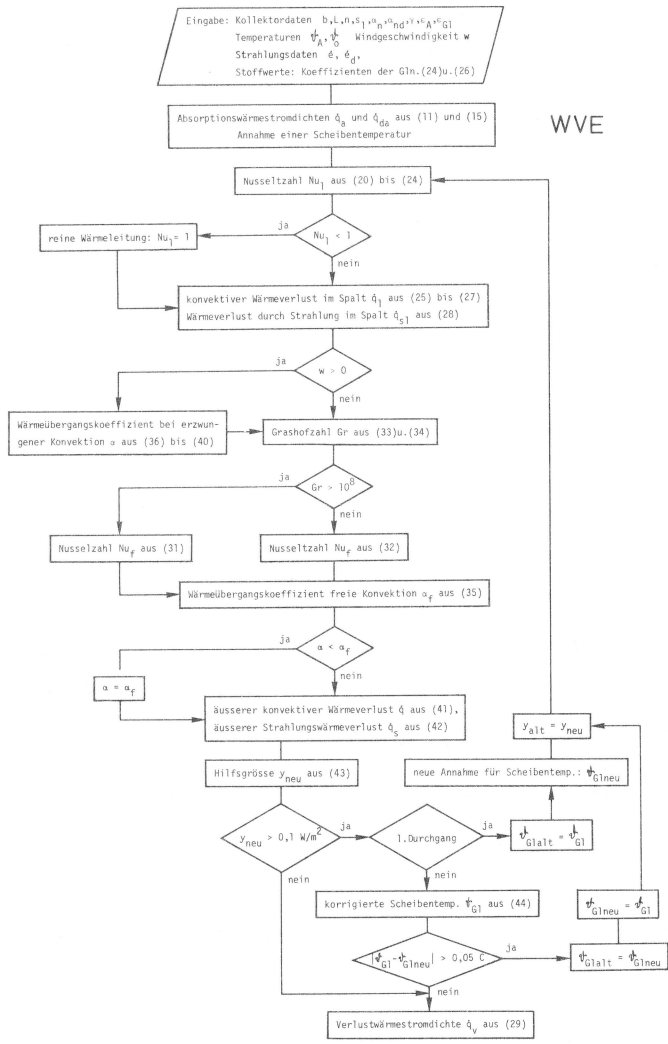


Bild 10:  
Rechnungsgang zur Bestimmung  
der vorderseitigen Wärmeverluste  
bei einer Scheibe  
(Unterprogramm WVE).

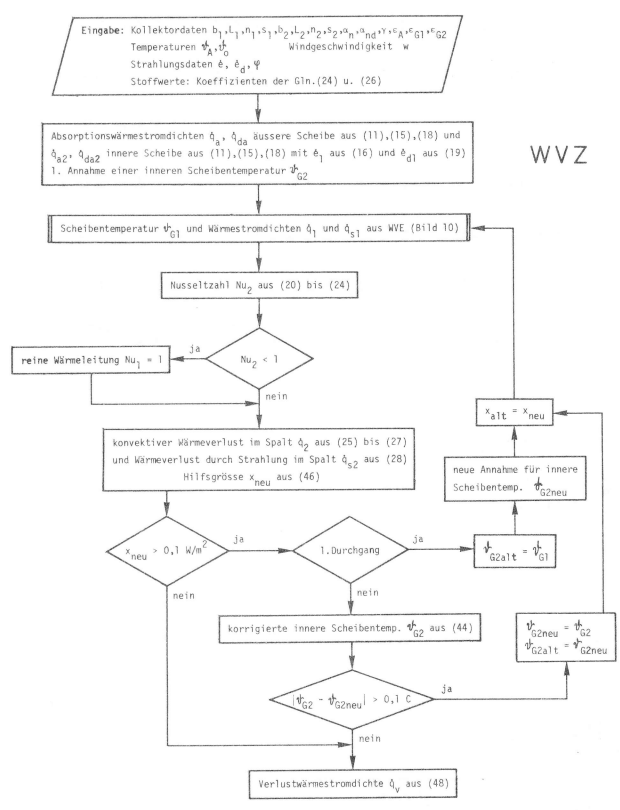


Bild 11:  
Rechnungsgang zur Bestimmung  
der vorderseitigen Wärmeverluste  
bei zwei Scheiben  
(Unterprogramm WVZ). Bei den auch  
für die zweite Scheibe benutzten  
Gleichungen sind die Indizes  
entsprechend zu vertauschen.

hinreichend genau wiedergegeben ([44], S. Ga 1/2). Die Reynoldszahl wird mit der Plattenlänge L und der dynamischen Viskosität für  $(\vartheta_{G1} + \vartheta_o)/2$  aus der Gl. (24) gebildet:

$$Re = w \cdot L / \nu_L \quad (39)$$

Die Definitionsgleichung der Nusseltzahl liefert aus der Gl. (36) den Wärmeübergangskoeffizienten für erzwungene Konvektion an der Scheibenaussenseite:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{L} \quad (40)$$

Der konvektive Wärmeverlust wird mit dem grösseren der beiden Wärmeübergangskoeffizienten aus (35) und (40) berechnet:

$$\dot{q} = \alpha (\vartheta_{G1} - \vartheta_o) \quad (41)$$

Der Wärmeverlust durch Strahlung beträgt ([44], S. Ka 3)

$$\dot{q}_s \approx \epsilon_s \epsilon_{G1} \left[ \left( \frac{T_{G1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \quad (42)$$

Die Gl. (42) ist nur eine Näherung, weil darin die Temperatur der wärmestrahlungsabsorbierenden Gase der Atmosphäre der Umgebungstemperatur gleichgesetzt wird.

Nun kann die Glastemperatur  $\vartheta_{G1}$  und damit der vorderseitige Wärmeverlust mit dem NEWTONschen Verfahren (z.B. [54], S. 18/24, [55], S. 508) iterativ bestimmt werden. Zunächst werden dazu die Absorptionswärmeverluste  $\dot{q}_a$  und  $\dot{q}_{da}$  berechnet: Bild 10. Dann werden die durch Konvektion und Strahlung im Spalt und an der Scheibenaussenseite hervorgerufenen Wärmestromdichten  $\dot{q}_1$ ,  $\dot{q}_{s1}$ ,  $\dot{q}$  und  $\dot{q}_s$  für eine angenommene Scheibentemperatur  $\vartheta_{G1}$  ermittelt. Diese Wärmeströme werden in die Bilanzgleichung eingesetzt und ergeben im allgemeinen einen von Null verschiedenen Wert y:

$$\dot{q}_1 + \dot{q}_{s1} + \dot{q}_a + \dot{q}_{da} - \dot{q} - \dot{q}_s = y \quad (43)$$

Eine zweite Durchrechnung mit einer neuen Annahme für die Scheibentemperatur  $\vartheta_{G1}$  ergibt einen neuen Wert der Hilfsgrösse y. Nun kann die Scheibentemperatur mit der Gleichung

$$\vartheta_{G1} = \vartheta_{G1neu} - \frac{y_{neu} (\vartheta_{G1alt} - \vartheta_{G1neu})}{(y_{alt} - y_{neu})} \quad (44)$$

und erneuten Durchrechnungen rasch auf einen hinreichend genauen Wert korrigiert werden. Mit den bei der letzten Durchrechnung erhaltenen Werten für  $\dot{q}_1$  und  $\dot{q}_{s1}$  liefert die Gl. (29) schliesslich die gesuchte vorderseitige Verlustwärmestromdichte  $\dot{q}_V$ .

Die Berechnung des vorderseitigen Wärmeverlusts bei zwei Scheiben erfolgt allerdings mit entsprechend vertauschten Symbolen - ebenfalls mit den Gln. (11) bis (44). Der Rechenaufwand wird aber bedeutend grösser, weil nun beide Scheibentemperaturen über Wärmestromdichtebilanzen iterativ bestimmt werden müssen. Die der Gl (30) der äusseren Scheibe entsprechende Bilanzgleichung für die innere Scheibe lautet:

$$\dot{q}_2 + \dot{q}_{s2} + \dot{q}_{a2} + \dot{q}_{da2} - \dot{q}_1 - \dot{q}_{s1} = 0 \quad (45)$$

Zu Beginn der Rechnung werden die durch die Absorption in den beiden Scheiben verursachten Wärmestromdichten  $\dot{q}_a$ ,  $\dot{q}_{da}$  (äussere Scheibe)  $\dot{q}_{a2}$  und  $\dot{q}_{da2}$  (innere Scheibe) bestimmt: Bild 11. Dann wird für die zweite Scheibe eine Temperatur angenommen, und dafür die Temperatur der ersten Scheibe und die Wärmestromdichten im äusseren Spalt  $\dot{q}_1$  und  $\dot{q}_{s1}$  nach dem Bild 10 iterativ ermittelt. Die Wärmestromdichten im inneren Spalt  $\dot{q}_2$  und  $\dot{q}_{s2}$  können mit der angenommenen Scheibentemperatur  $\vartheta_{G2}$  durch entsprechende Vertauschung der Indices ebenfalls aus den Gln. (20) bis (28) berechnet werden. Setzt man die so ermittelten Wärmestromdichten in die Bilanzgleichung (45) ein, erhält man eine im allgemeinen von Null verschiedene Hilfsgrösse  $x$ :

$$\dot{q}_2 + \dot{q}_{s2} + \dot{q}_{a2} + \dot{q}_{da2} - \dot{q}_1 - \dot{q}_{s1} = x \quad (46)$$

Eine zweite Annahme für die innere Scheibentemperatur liefert in gleicher Weise einen neuen  $x$ -Wert. Nun lässt sich die innere Scheibentemperatur ebenfalls mit dem NEWTONschen Verfahren rasch zu einem genügend genauen Wert verbessern:

$$\vartheta_{G2} = \vartheta_{G2\text{neu}} - \frac{x_{\text{neu}} (\vartheta_{G2\text{alt}} - \vartheta_{G2\text{neu}})}{(x_{\text{alt}} - x_{\text{neu}})} \quad (47)$$

Ist dieser erreicht, folgt die vorderseitige Verlustwärmestromdichte bei zwei Scheiben aus den zuletzt berechneten Wärmestromdichten:

$$\dot{q}_V = \dot{q}_2 + \dot{q}_{s2} \quad (48)$$

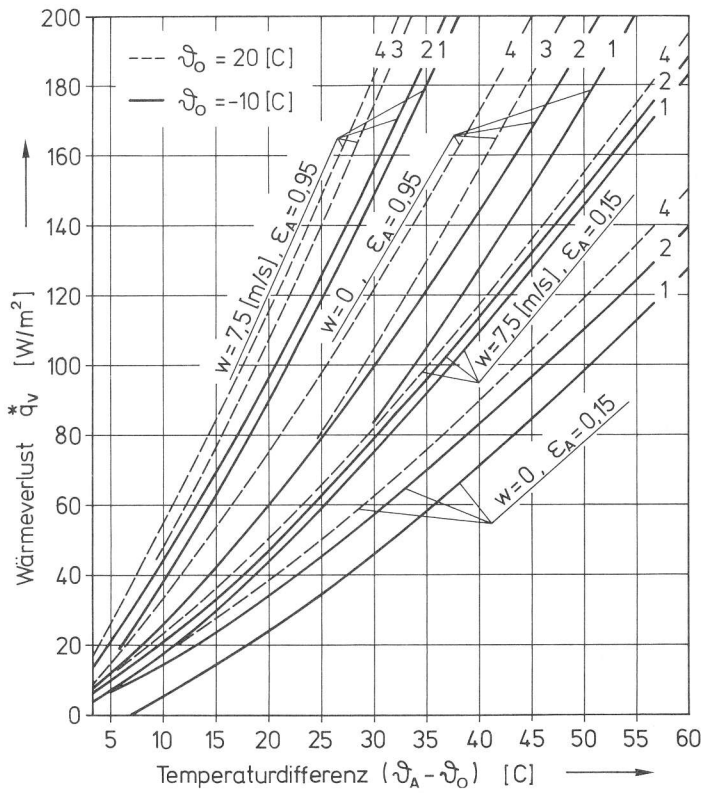


Bild 12: Vorderseitige Verlustwärmestromdichte für Kollektoren mit einer Scheibe, Neigungswinkel  $50^\circ$ , Einfallswinkel  $20^\circ$ . 1:  $\vartheta_o = -10$  [C],  $\dot{e} = 700$  [W/m<sup>2</sup>]; 2:  $\vartheta_o = -10$  [C],  $\dot{e} = 100$  [W/m<sup>2</sup>]; 3:  $\vartheta_o = 20$  [C],  $\dot{e} = 700$  [W/m<sup>2</sup>]; 4:  $\vartheta_o = 20$  [C],  $\dot{e} = 100$  [W/m<sup>2</sup>].

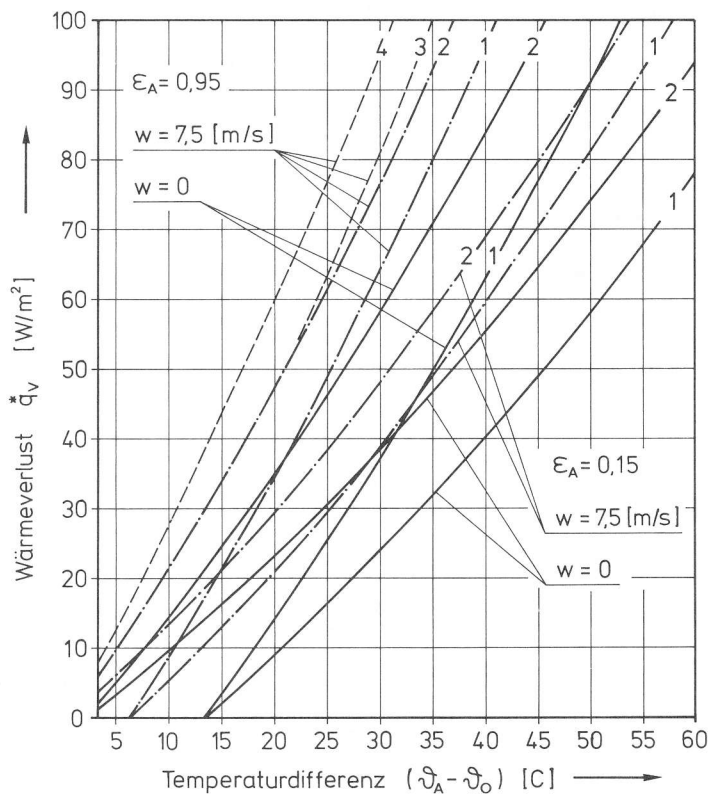


Bild 13: Vorderseitige Verlustwärmestromdichte für Kollektoren mit zwei Scheiben. Neigungswinkel  $50^\circ$ , Einfallswinkel  $20^\circ$ . 1:  $\vartheta_o = -10$  [C],  $\dot{e} = 700$  [W/m<sup>2</sup>]; 2:  $\vartheta_o = -10$  [C],  $\dot{e} = 100$  [W/m<sup>2</sup>]; 3:  $\vartheta_o = 20$  [C],  $\dot{e} = 700$  [W/m<sup>2</sup>]; 4:  $\vartheta_o = 20$  [C],  $\dot{e} = 100$  [W/m<sup>2</sup>].

Das Bild 12 zeigt das Ergebnis der numerischen Auswertung für die Kollektoren 1-1 und 1-2 mit einer Scheibe (Tabelle 1). Ueber der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung ist die vorderseitige Verlustwärmestromdichte für einen Kollektorneigungswinkel  $\gamma$  von  $50^\circ$ , einen Einfallswinkel  $\varphi$  von  $20^\circ$  und eine direkte Strahlung auf die Kollektorebene  $\dot{e}$  von 100 sowie 700 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass bei Temperaturdifferenzen unter  $\approx 5$  [C] negative Wärmeverluste auftreten können. Die Scheibe erwärmt sich in diesen Fällen durch die Absorption der Sonnenstrahlung über die Absorbententemperatur. Daraus ergibt sich anstelle eines Wärmeverlusts ein Wärmegewinn. Auch bei höheren Temperaturdifferenzen sind die Diagrammkurven - besonders beim selektiv beschichteten Kollektor ( $\epsilon_A = 0,15$ ) - noch ziemlich stark gekrümmt. Dies zeigt deutlich, dass eine Berechnung des Wärmeverlusts auf der Kollektorvorderseite mit konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten nicht in Frage kommt. Die selektive Beschichtung des Absorbers vermag die vorderseitigen Wärmeverluste im Temperaturdifferenzbereich von 10 bis 60 [C] auf etwa die Hälfte der Werte ohne selektive Beschichtung ( $\epsilon_A = 0,95$ ) zu reduzieren. Wie man aus dem Bild 12 weiter erkennt, ist der vorderseitige Wärmeverlust recht stark von der Windgeschwindigkeit abhängig. Weniger ausgeprägt ist die Beeinflussung durch die Strahlung (Kurven 1 und 3 für 700 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], Kurven 2 und 4 für 100 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]). Besonders bei kleineren Temperaturdifferenzen, wie sie z.B. während dem täglichen Aufheizen des Kollektors vorkommen, ergeben grössere Strahlungswerte aber deutlich geringere Wärmeverluste. Auch die Umgebungstemperatur wirkt sich auf den vorderseitigen Wärmeverlust aus. Er liegt bei 20 [C] (Kurven 3 und 4) im untersuchten Bereich etwa 10 bis 20 % über den Werten bei -10 [C] (Kurven 1 und 2).

Im Bild 13 ist die vorderseitige Verlustwärmestromdichte für die Kollektoren 2-1 und 2-2 mit zwei Scheiben (Tabelle 1) für das gleiche Beispiel dargestellt. Um das Bild nicht zu überladen, wurden die Ergebnisse für die Umgebungstemperatur von 20 [C] (Kurven 3 und 4) nur für den Fall mit den grössten Wärmeverlusten ( $w = 7,5$  [m/s],  $\epsilon_A = 0,95$ ) eingezeichnet. Die Wärmeverluste sind gegenüber der Einfachscheibenabdeckung noch etwa halb so gross. Bei den selektiv beschichteten Absorberr bringt die Doppelscheibenabdeckung allerdings weniger als bei den gewöhnlichen Absorberrn. Die Beeinflussung der vorderseitigen Wärmeverluste durch die Windgeschwindigkeit und jene durch eine selektive Absorberbeschichtung ist erwartungsgemäss geringer als bei den Kollektoren mit

einer Scheibe. Dem geringen Wärmestrahlungsanteil entsprechend, ergibt sich bei den Kollektoren mit Doppelscheibe eine deutlichere Abhängigkeit des Wärmeverlusts von der Umgebungstemperatur.

### 5.5.2 Wärmeverlust auf der Kollektorrückseite

Die Kollektorrückseite lässt sich leicht gegen Wärmeverluste isolieren. Bei allen untersuchten Kollektoren wurde eine 50 [mm] dicke Isolation mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 [w/mK] vorgesehen (Glasfaser- oder Steinwolle). Die Wärmestromdichte in der Isolation beträgt:

$$\dot{q}_I = \lambda_I \cdot \frac{\vartheta_A - \vartheta_I}{s_I} \quad (49)$$

Vernachlässigt man den Temperaturabfall in der 1 [mm] Stahlblechabdeckung, kann die Aussentemperatur der Isolation  $\vartheta_I$  auf dem bereits gezeigten iterativen Weg durch entsprechende Vertauschung der Indices aus den Gln. (31) bis (42) und einer Wärmestromdichtebilanz berechnet werden. Die maximale rückseitige Verlustwärmestromdichte folgt mit  $\vartheta_I = \vartheta_a$  aus der Gl. (49) (unendlich grosser äusserer Wärmeübergangskoeffizient). Das Ergebnis der numerischen Rechnung ist im Bild 14 für freie Konvektion (senkrechte Platte) und einen mit 7,5 [m/s] parallel angeströmten Kollektor dargestellt. Der maximal mögliche Wärmeverlust liegt nur wenig über jenem bei 7,5 [m/s]. Ein Vergleich mit den Bildern 12 und 13 lässt erkennen, dass der rückseitige Wärmeverlust schon bei dieser relativ dünnen Isolation viel kleiner ist als der vorderseitige. Eine dickere rückseitige Isolation würde das Ergebnis der Nutzwärmeberechnungen folglich nur unwesentlich ändern. Die Frage nach der wirtschaftlichsten Isolationsdicke ([56], [41], S. 713/716) muss hier aber noch offen gelassen werden. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit ist gemessen an den nutzbaren Wärmestromdichten recht gering. Da aus ästhetischen Gründen ohnehin ein Einbau der Flachkollektoren anstelle üblicher Dachbedeckungen anzustreben ist, wird die rückseitige Verlustwärmestromdichte in den folgenden Berechnungen mit der Näherung

$$\dot{q}_I = 0,658 (\vartheta_A - \vartheta_o) + 2,67 \cdot 10^{-4} (\vartheta_A - \vartheta_o)^2 \quad (50)$$



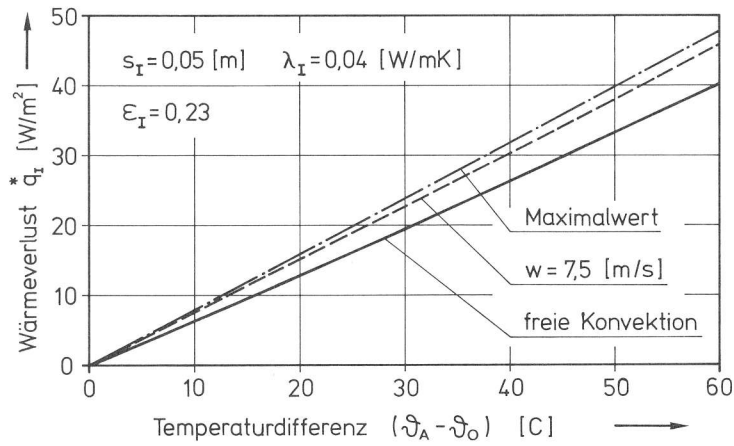


Bild 14: Rückseitige Verlustwärmestromdichte bei einer Isolation mit 50 [mm] Dicke, einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 [W/mK] und einem Emissionskoeffizienten der Abdeckung von 0,23 im Temperaturbereich  $-10 \text{ [C]} \leq \vartheta_0 \leq 20 \text{ [C]}$ .

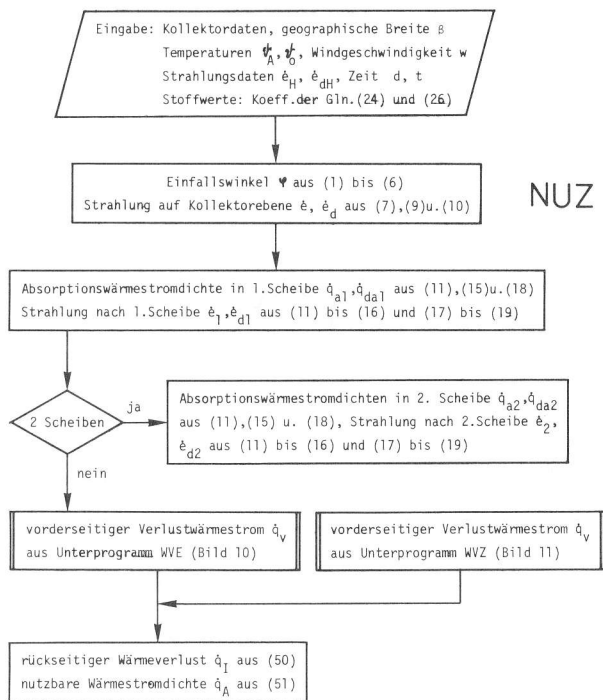


Bild 15: Berechnung der nutzbaren Wärmestromdichte eines Flachkollektors (Unterprogramm NUZ).

für freie Konvektion bestimmt. Diese gibt die Ergebnisse der numerischen Rechnungen im interessierenden Bereich  $-20 [C] < \vartheta_o < 30 [C]$  und  $\vartheta_A - \vartheta_o < 80 [C]$  für eine Isolation mit einer Dicke von 50 [mm] ( $\lambda_I = 0,04 [W/mK]$ ) und einer verzinkten Stahlblechabdeckung (Dicke 1 [mm],  $\lambda = 47 [W/mK]$ ,  $\epsilon = 0,23$ ) hinreichend genau wieder.

## 5.6 Nutzbare Wärmestromdichte und Wirkungsgrad

Die auf die Kollektorebene treffende direkte und diffuse Sonnenstrahlung erfährt in einer oder zwei Deckscheiben die in Abschnitt 5.4 erläuterten optischen Verluste. Von der noch auf den Absorber gelangenden Sonnenstrahlung wird nur der durch den Absorptionskoeffizienten des Absorbers bestimmte Anteil in Wärme umgewandelt. Der Absorptionskoeffizient  $\epsilon_{aA}$  ist je nach dem Material der absorbierenden Schicht mehr oder weniger winkelabhängig. Da die Absorber zur Erzielung hoher Absorptionskoeffizienten mit dielektrischen Schichten überzogen sind, ist diese Winkelabhängigkeit bis zu Einfallswinkeln von etwa  $60^\circ$  gering. Bei grösseren Einfallswinkeln ist die Sonnenstrahlung nicht mehr intensiv und wird durch die dann bedeutenden optischen Verluste in den Scheiben vor dem Auftreffen auf den Absorber noch stark geschwächt. Die bei Einfallswinkeln über  $60^\circ$  anfallende Strahlung fällt darum für die direkte Nutzung kaum mehr ins Gewicht. Aus diesem Grund wird der Absorptionskoeffizient  $\epsilon_{aA}$  für die folgenden Ueberlegungen als winkelunabhängiger Mittelwert angenommen: Tabelle 1.

Von der absorbierten Sonnenstrahlung gehen die vorder- und rückseitigen Verlustwärmestromdichten  $\dot{q}_v$  und  $\dot{q}_I$  verloren. Die nutzbare Wärmestromdichte beträgt somit noch:

$$\dot{q}_A = (\dot{e}_1 + \dot{e}_{d1}) \epsilon_{aA} - \dot{q}_v - 1,1 \dot{q}_I \quad (51)$$

Die Gl. (51) ist für eine Scheibe angeschrieben. Bei zwei Scheiben sind lediglich die Indices 1 durch 2 zu vertauschen. Die seitlichen Wärmeverluste werden durch den Faktor 1,1 in der Gl. (51) berücksichtigt. Das Bild 15 veranschaulicht den Rechnungsablauf zur Ermittlung der nutzbaren Wärmestromdichte von Flachkollektoren.

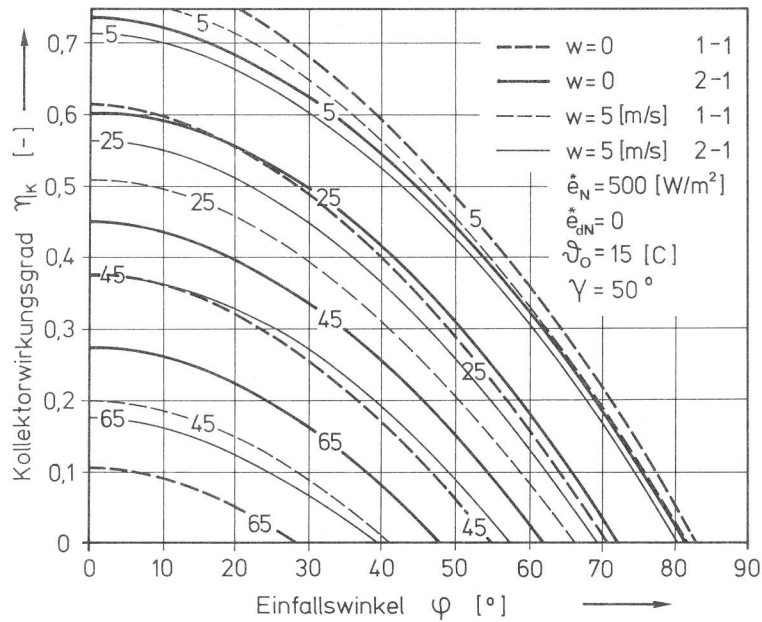


Bild 16: Kollektorwirkungsgrad bei einer direkten Strahlung auf eine Normalebene von  $500$  [W/m<sup>2</sup>], einer Umgebungstemperatur von  $15$  [C] und einem Kollektorneigungswinkel von  $50^\circ$  in Abhängigkeit des Einfallswinkels. Kollektortypen 1-1 und 2-1 (Tabelle 1). Zahlen in den Diagrammkurven: Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung in [C].

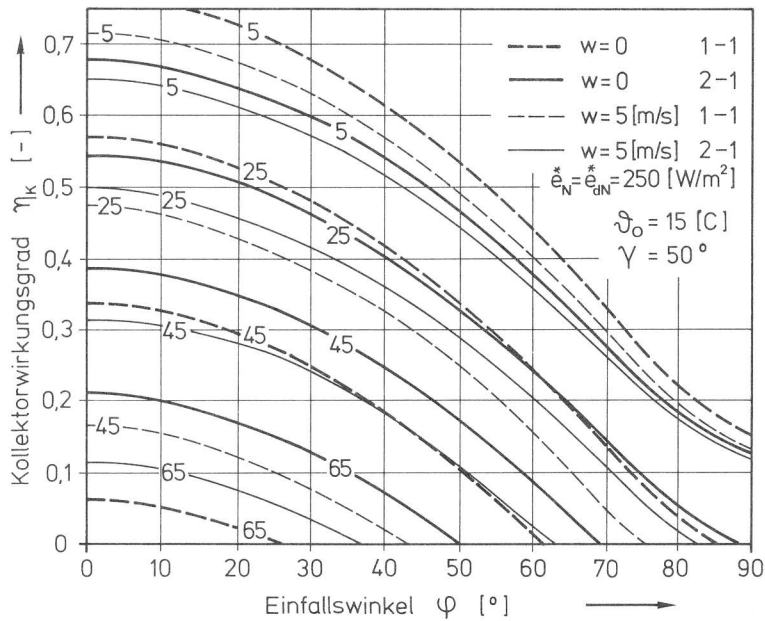


Bild 17: Kollektorwirkungsgrad bei einem direkten Strahlungsanteil auf eine Normalebene von  $250$  [W/m<sup>2</sup>] und einem diffusen Strahlungsanteil von  $250$  [W/m<sup>2</sup>]. Zahlen in den Diagrammkurven: Temperaturdifferenz  $\vartheta_A - \vartheta_o$  in [C].

Das Verhältnis der nutzbaren Wärmestromdichte zur Globalstrahlung auf eine Normalebene zur Sonnenstrahlung gibt Aufschluss über die Wärmeverluste, die optischen Verluste und den Absorptionskoeffizienten eines Kollektors. Es enthält auch die durch den Verzicht auf eine Nachführung bedingte Einbusse und wird im folgenden als Kollektorwirkungsgrad bezeichnet:

$$\eta_K = \frac{\dot{q}_A}{(\dot{e}_N + \dot{e}_{dN})} \quad (52)$$

Der Kollektorwirkungsgrad lässt sich mit der direkten Strahlung auf die Kollektorebene aus den Gln. (7) und (8)

$$\dot{e} = \dot{e}_N \cos \varphi$$

und der diffusen Strahlung auf die Kollektorebene

$$\dot{e}_d \approx \mu \dot{e}_{dN} + (1 - \mu) \dot{e}_{dN} \cos \varphi$$

nach dem im Bild 15 gezeigten Rechnungsgang bestimmen. Im Bild 16 ist das Ergebnis für die Kollektoren 1-1 und 2-1, eine direkte Strahlung auf eine Normalebene von  $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$ , einer Umgebungstemperatur von  $15 \text{ [C]}$  und ein Kollektorneigungswinkel von  $50^\circ$  aufgezeichnet. Zunächst fällt die erwartete starke Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Einfallswinkel auf. Sie wird zwar mit zunehmendem Anteil an diffuser Strahlung schwächer. Aber auch bei gleichen Anteilen von diffuser und direkter Strahlung ist diese Abhängigkeit noch beträchtlich: Bild 17. Wirkungsgradunterlagen, welche ohne Angaben über den Einfallswinkel publiziert werden, sind somit wertlos. Man kommt auch bei Messungen nicht umhin, die Einfallswinkelabhängigkeit zu erfassen. Sie verschwindet nur bei ausschliesslich diffuser, winkelunabhängiger Strahlung. Dieser Fall kommt nur bei stark bedecktem Himmel näherungsweise vor und ist deshalb in diesem Zusammenhang von geringer Bedeutung. Die Bilder 16 und 17 zeigen weiter, dass der Wirkungsgrad von Kollektoren mit einer Scheibe denjenigen von Kollektoren mit zwei Scheiben bei kleinen Temperaturdifferenzen  $\vartheta_A - \vartheta_0$  übersteigt. Die Grenze gleicher Wirkungsgrade sinkt zwar mit zunehmender Luftgeschwindigkeit, weil sich der dadurch erhöhte Wärmeübergang an der Aussenseite bei nur einer Scheibe stärker auswirken kann als bei zwei Scheiben. Der Bereich mit kleinen Temperaturdifferen-

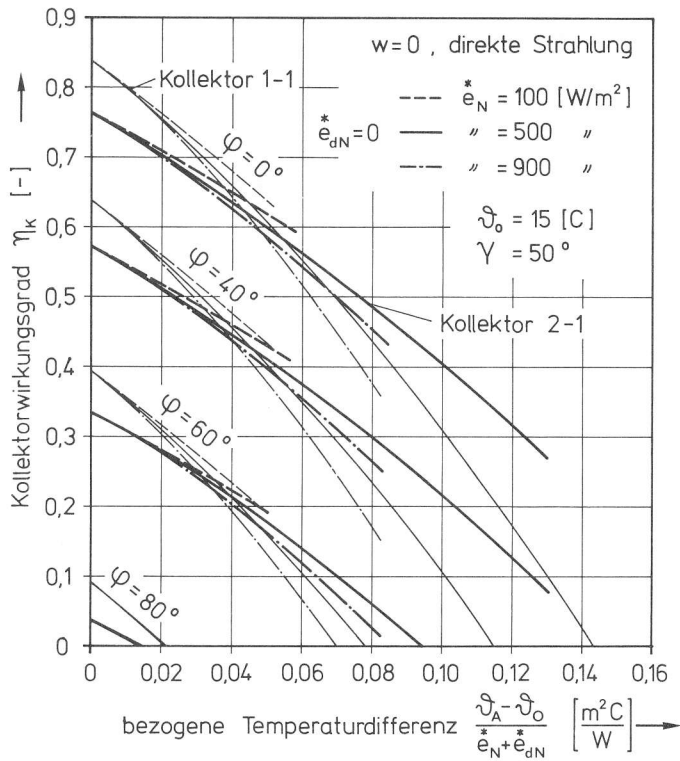


Bild 18: Wirkungsgrad der Kollektoren 1-1 und 2-1 bei direkter Strahlung ( $\dot{e}_{dN} = 0$ ) und freier Konvektion.

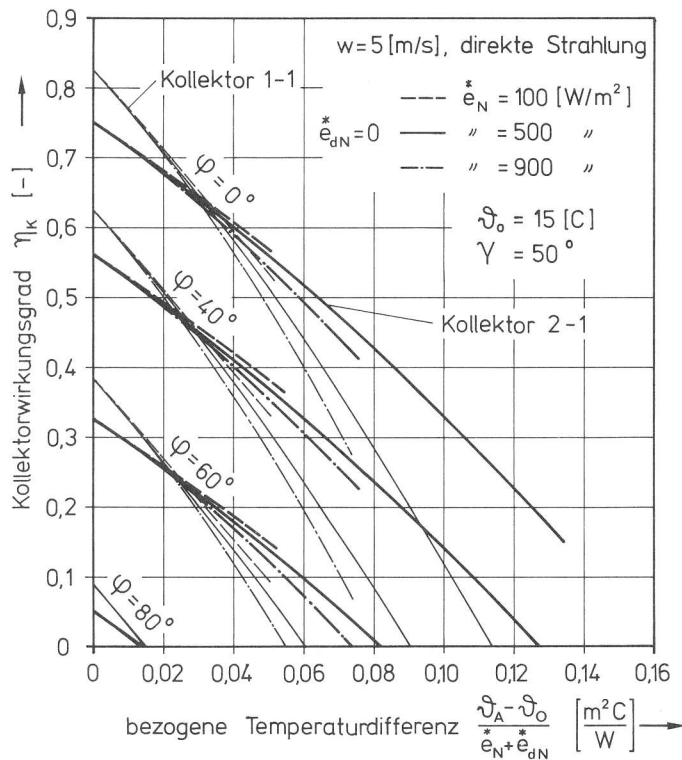


Bild 19: Wirkungsgrad der Kollektoren 1-1 und 2-1 bei direkter Strahlung ( $\dot{e}_{dN} = 0$ ) und einer Windgeschwindigkeit von 5 [m/s]

zen, in welchem der Kollektor mit einer Scheibe einen höheren Wirkungsgrad aufweist, ist bei der Warmwasserbereitung wichtiger, als man zunächst annimmt. Er wird auch an schönen Tagen des Sommerhalbjahres beim täglichen Aufheizen des Kollektors vor der Inbetriebnahme der Umwälzpumpe durchlaufen.

Die Globalstrahlung nach der 1. Scheibe  $\dot{e}_1 + \dot{e}_{d1}$  ist für einen bestimmten Einfallswinkel der auf eine Normalebene auftreffenden Globalstrahlung  $\dot{e}_N + \dot{e}_{dN}$  proportional. Die Wärmeverluste sind in sehr grober Näherung der Temperaturdifferenz  $\vartheta_A - \vartheta_o$  proportional. Die Gl. (51) lässt sich damit auf die folgende Form bringen:

$$\dot{q}_A = c (\dot{e}_N + \dot{e}_{dN}) - k (\vartheta_A - \vartheta_o) \quad (53)$$

Darin gibt der Koeffizient  $c$  die optischen Verluste und der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  die Wärmeverluste an. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist allerdings besonders bei kleinen Temperaturdifferenzen durchaus keine konstante Grösse, sondern von der Temperaturdifferenz, der Strahlung und der Windgeschwindigkeit abhängig (Bilder 12 und 13). Durch Einsetzen der Gl. (53) in die Gl. (52) würde man bei konstantem Wärmedurchgangskoeffizienten eine Geradengleichung für den Kollektorwirkungsgrad erhalten:

$$\eta_K = c - k \frac{\vartheta_A - \vartheta_o}{(\dot{e}_N + \dot{e}_{dN})} \quad (54)$$

In den Bildern 18 und 19 ist der Kollektorwirkungsgrad der Kollektoren 1-1 und 2-1 für Windgeschwindigkeiten von 0 und 5 [m/s] über der bezogenen Temperaturdifferenz  $(\vartheta_A - \vartheta_o) / (\dot{e}_N + \dot{e}_{dN})$  aufgetragen. Für die einzelnen Einfallswinkel entstehen Kurvenscharen mit der Strahlung als Parameter. Die Bilder lassen die bezogenen Temperaturdifferenzen, unterhalb welcher die Kollektoren mit einer Scheibe höhere Wirkungsgrade ergeben, deutlich erkennen. In den Bildern 20 und 21 sind die Ergebnisse für gleiche Anteile an direkter und diffuser Strahlung wiedergegeben. Im Vergleich zu den Diagrammen für ausschliesslich direkte Strahlung stellt man etwas tiefere Wirkungsgrade bei kleinen und deutlich höhere Wirkungsgrade bei grossen Einfallswinkeln fest.

Wirkungsgraddiagramme der gezeigten Art besitzen nur eine beschränkte Aussagekraft, weil die Häufigkeitsverteilungen der wesentlichen Ein-

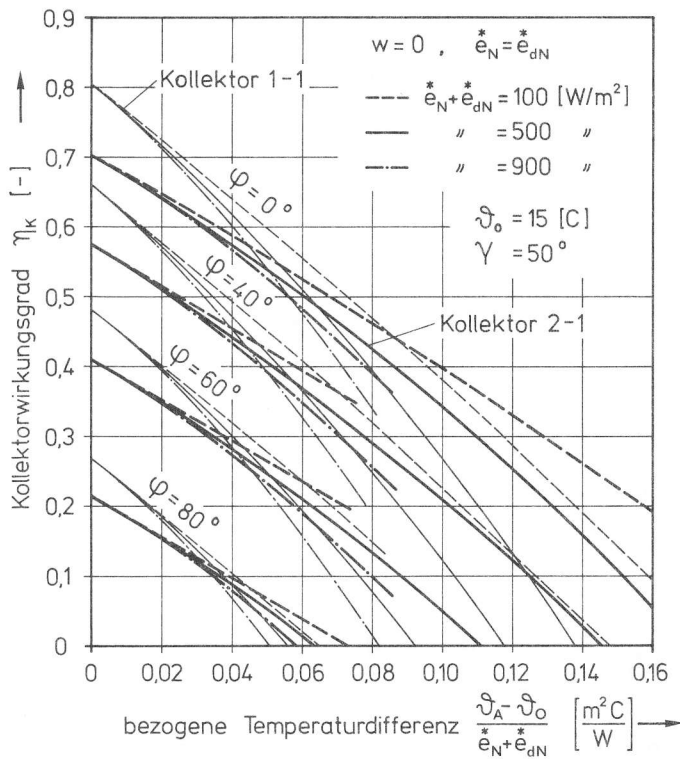


Bild 20:

Wirkungsgrad der Kollektoren 1-1 und 2-1 für gleiche Anteile der direkten und diffusen Strahlung ( $\dot{e}_N = \dot{e}_{dN}$ ) bei freier Konvektion.

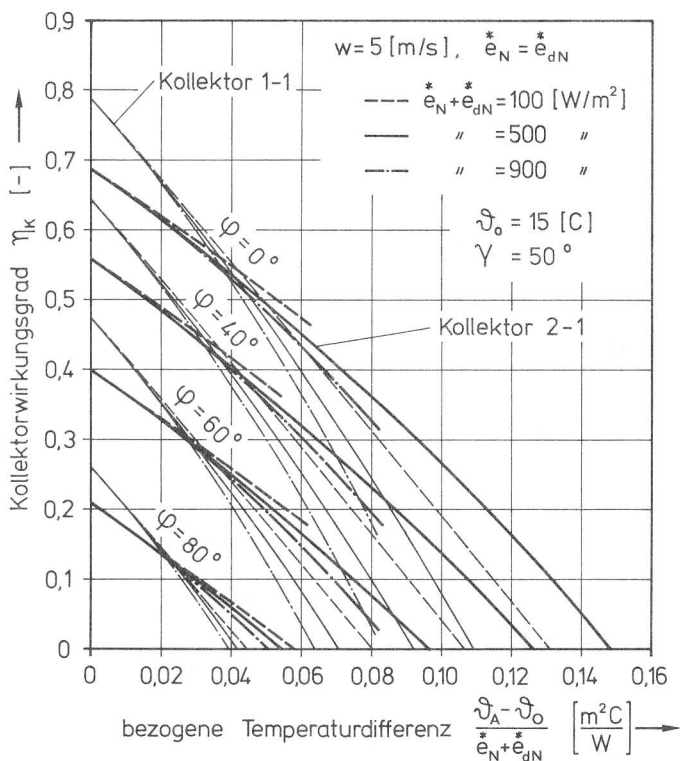


Bild 21:

Wirkungsgrad der Kollektoren 1-1 und 2-1 für gleiche Anteile der direkten und diffusen Strahlung bei einer Windgeschwindigkeit von 5 [m/s].

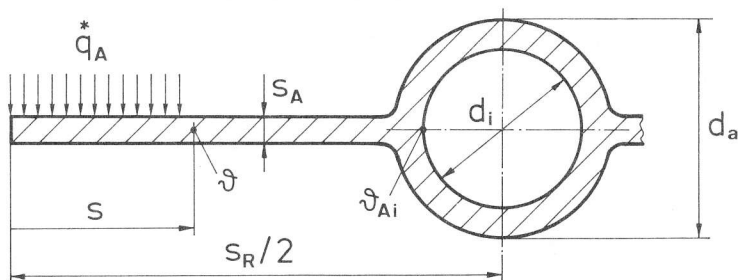


Bild 22:

Zur Bestimmung der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Absorberblech und Innenwand der Absorberrohre.

flussgrößen nicht bekannt sind, und die Temperatur des Absorbers weitgehend durch jene im Wärmespeicher der betreffenden Anlage diktiert werden. Deshalb wird auf die Wiedergabe der Wirkungsgraddiagramme der Kollektoren 1-2, 1-3, 1-4, 2-2, 2-3 und 2-4 verzichtet. Nicht der unterschiedliche Wirkungsgradverlauf dieser Kollektoren, sondern ihr Einfluss auf die Warmwasserbereitung ist von unmittelbarem Interesse. Wirkungsgradangaben würden aber einen interessanten Vergleich mit Messergebnissen an entsprechenden Kollektoren ermöglichen.

Leider wurden bisher nur wenig experimentell ermittelte Wirkungsgraddaten bekannt (z.B. [57], S. 229/232). Da Angaben über den jeweiligen Einfallswinkel und andere wichtige Einflussgrößen fehlen, sind sie für einen Vergleich mit den in diesem Abschnitt berechneten Wirkungsgraden wie auch für die Auslegung einer Warmwasserbereitungsanlage nicht geeignet. Messungen des Kollektorwirkungsgrades sind nur sinnvoll, wenn gleichzeitig Einfallswinkel, Windgeschwindigkeit und Anteil der diffusen Strahlung erfasst werden.

Der Wirkungsgrad allein vermag die Eigenschaften eines Flachkollektors nicht zu beschreiben. Wie noch gezeigt wird, sind für die Beurteilung eines Kollektors auch der durch die Wärmeleitung im Absorber hervorgerufene Temperaturabfall, der Wärmeübergang aus Wärmeübertragungsmittel und die Wärmekapazität von Absorber und Wärmeübertragungsmittel (täglichem Aufheizvorgang!) von Bedeutung.

## 6. Wärmeübertragung vom Kollektor zum Wärmespeicher

Nach der Inbetriebnahme der Umwälzpumpe (Bild 2) wird die Absorberrtemperatur weitgehend durch die Speichertemperatur festgelegt. Die Absorberrtemperatur liegt dann nämlich um die Temperaturabfälle durch Wärmeleitung vom Absorberblech zu den Rohrleitungen, den Wärmeübergang aus Wärmeübertragungsmittel und den Wärmedurchgang vom Wärmeübertragungsmittel an das Speicherwasser über der Temperatur des Speisewassers.

### 6.1 Wärmeleitung im Absorberblech

Die auf dem Absorber erzeugte Wärme muss durch das Absorberblech zu den Rohrleitungen transportiert werden (Bild 3). Das Bild 22 zeigt einen



Absorberausschnitt. Die Stelle  $s = 0$  ist die Mitte zwischen zwei Rohrleitungen. Auf dem Absorberstück der Breite  $s$  und der Länge  $L$  entsteht bei konstanter nutzbarer Wärmestromdichte  $\dot{q}_A$  der Wärmestrom:

$$\dot{Q}_A = \dot{q}_A \cdot L \cdot s \quad (55)$$

Dieser muss durch Wärmeleitung im Absorberblech abgeführt werden:

$$\dot{Q}_A = - \lambda_A \frac{d\vartheta}{ds} L \cdot s_A \quad (56)$$

Durch Gleichsetzen dieser Ausdrücke, Trennung der Variablen und Integration erhält man den Temperaturverlauf im Absorber. Daraus folgt bei Vernachlässigung des Temperaturabfalls im Rohr der folgende integrale Mittelwert der Temperaturdifferenz zwischen Absorberblech und Rohrwand:

$$\vartheta_A - \vartheta_{Ai} = \frac{\dot{q}_A}{\lambda_A s_A} (s_R - d_a)^2 \quad (57)$$

Er ist der nutzbaren Wärmestromdichte proportional und beträgt bei  $\dot{q}_A = 500 \text{ [W/m}^2\text{]}$  für den Aluminiumabsorber mit den Abmessungen aus dem Abschnitt 5.1 ca.  $0,4 \text{ [C]}$ .

## 6.2 Wärmeübergang in den Rohrleitungen

Der Wärmeübergang in den Rohrleitungen des Absorbers und in den Rohrleitungen des Speichers wird mit der Gleichung von HAUSEN [58] berechnet:

$$Nu_i = 0,0235 (Re_i^{0,8} - 230) (1,8 Pr_F^{0,3} - 0,8) \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (58)$$

Darin ist  $Re_i$  die mit der mittleren Rohrgeschwindigkeit  $w_F$  und dem Rohrinwendurchmesser  $d_i$  gebildete Reynoldszahl ( $z$ : Anzahl parallel geschalteter Rohre):

$$Re_i = \frac{w_F \cdot d_i}{\eta_F} = \frac{4 \dot{V}}{\pi d_i \eta_F z} \quad (59)$$

und  $Pr_F$  die Prandtlzahl des Wärmeübertragungsmittels. Der Volumenstrom des Wärmeübertragungsmittels  $V_F$  wird durch die Charakteristik der Umwälzpumpe und den Druckverlust im Absorber, den Verbindungsleitungen und den Rohrleitungen des Speichers festgelegt. Im sinnvollen Einsatz-

bereich liefern Kreiselpumpen einen in erster Näherung vom Volumenstrom unabhängigen Ueberdruck ([59], S. 91/94). Er wurde für die folgenden numerischen Rechnungen mit 0,5 [bar] = 50'000 [Pa] angenommen. Der Druckverlust in hydraulisch glatten Rohren folgt im Bereich  $2000 < Re_i < 10^5$  aus dem BLASIUSschen Gesetz ([60], S. 30/45):

$$\Delta p = 0,2414 \frac{\rho_F^{0,75} \eta_F^{0,25} \cdot L}{d_i^{4,75}} \left( \frac{\dot{V}_F}{z} \right)^{1,75} \quad (60)$$

Aus der Forderung, dass die Summe der Druckverluste in den Rohrleitungen dem von der Pumpe erzeugten Ueberdruck entsprechen muss, lässt sich der Volumenstrom des Wärmeübertragungsmittels berechnen.

Die Wärmeübertragungskoeffizienten in den Absorberrohren und der Rohrschlange des Speichers erhält man aus der Gl. (58) zu:

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \lambda_F}{d_i} \quad (61)$$

Der Wert für die Absorberrohre und die Absorberoberfläche pro Rohr ( $s_R L$ ) liefert für die Temperaturdifferenz zwischen der Innenwand der Absorberrohre und dem Wärmeübertragungsmittel:

$$\vartheta_{Ai} - \vartheta_F = \frac{\dot{q}_A s_R}{\pi d_i \alpha_i} \quad (62)$$

Mit  $\alpha_i$  für die Rohrschlangen im Speicher, der gesamten Kollektorfläche A und der Anzahl parallel geschalteter Rohrschlangen z findet man die Temperaturdifferenz zwischen dem Speichermedium und der Rohrschlange:

$$\Delta \vartheta_{FR} = \frac{\dot{q}_A \cdot A}{\pi \cdot z d_i L \alpha_i} \quad (63)$$

Der Temperaturabfall in den Wänden der Rohrschlange ist vernachlässigbar klein.

### 6.3 Wärmeübergang ans Speicherwasser

Die Wärmeübertragung von den Rohrschlangen ans Speicherwasser erfolgt durch freie Konvektion. Für die hier benötigte Genauigkeit genügt die

Anwendung der Beziehung ([51], S. 281)

$$Nu_a = 0,53 (Gr_a Pr_S)^{0,25} \quad (64)$$

für horizontale Einzelrohre ( $1700 < Gr_a Pr_S < 10^8$ ). Sie liefert mit der Grashofzahl

$$Gr_a = \frac{g \beta'_S \Delta\theta_{RS} d_a^3}{\nu_S^2} \quad (65)$$

und den Beziehungen

$$\alpha_a = \frac{Nu_a \lambda_S}{d_a} \quad (66)$$

$$\Delta\theta_{RS} = \frac{\dot{q}_A A}{z d_a L \alpha_a} \quad (67)$$

den nachstehenden Ausdruck für die Temperaturdifferenz zwischen der Rohrschlange und dem Speicherwasser:

$$\Delta\theta_{RS} = 0,665 \left( \frac{\dot{q}_A \cdot A}{z \lambda_S L} \right)^{0,8} \frac{\nu_S^{0,4}}{(g \beta'_S d_a^3 Pr_S)^{0,2}} \quad (68)$$

#### 6.4 Bestimmung der Absorbenttemperatur aus der Speichertemperatur

Das Wärmeübertragungsmittel wird in den Kollektoren um die Temperaturdifferenz

$$\Delta\theta_F = \frac{\dot{q}_A A}{\dot{V}_F \rho_F c_{pF}} \quad (69)$$

aufgewärmt bzw. im Speicher um die gleiche Temperaturdifferenz abgekühlt. Mit der Annahme eines längs der Rohrschlange konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten erhält man für die Temperatur des Wärmeübertragungsmittel am Austritt aus der Rohrschlange:

$$\vartheta_{F\alpha} = \vartheta_S + \frac{\Delta\vartheta_F}{\exp\left(\frac{\Delta\vartheta_F}{\Delta\vartheta_{FR} + \Delta\vartheta_{RS}}\right) - 1} \quad (70)$$

Die mittlere Wärmeübertragungsmitteltemperatur beträgt somit:

$$\vartheta_F = \vartheta_{F\alpha} + \Delta\vartheta_F/2 \quad (71)$$

Die mittlere Absorbertemperatur bei quasistationärem Betrieb folgt daraus durch Addition der aus den Gln. (57) und (62) berechneten Temperaturdifferenzen.

Für die numerischen Rechnungen wurde als Wärmeübertragungsmittel ein Wasser-Aethylenglykolgemisch mit gleichen Volumenanteilen der beiden Komponenten (Stockpunkt nach DIN 51583: - 47 [C]) gewählt. Zur Bestimmung der mittleren Absorbertemperatur mit einem als "WUE" bezeichneten Unterprogramm wurden auf den Angaben in [61] gestützte Näherungsgleichungen für die Stoffwerte  $\rho_F$ ,  $\nu_F$ ,  $c_{pF}$  und  $\lambda_F$  dieses Gemischs benützt. Entsprechende Gleichungen für die Abhängigkeit der Stoffwerte  $\nu_S$ ,  $\lambda_S$ ,  $Pr_S$  und  $\beta_S$  des Speicherwassers von der Temperatur beruhen auf den Angaben in [44], S. Db 1. Die Daten der Rohrleitungen des Absorbers, der Verbindungsleitungen und der Rohrspiralen des Speichers sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Die Absorberfläche A wurde mit 10 [m<sup>2</sup>] angenommen. Die übrigen Angaben zum Absorber sind im Abschnitt 5.1 aufgeführt. Die mit diesen Angaben berechneten mittleren Temperaturdifferenzen zwischen dem Absorber und dem Speicherinhalt sind im Bild 23 dargestellt. Auch hier muss betont werden, dass die gewählte Anordnung zur Wärmeübertragung ein realisierbares Beispiel aber kein

		Rohre im Absorber	Verbindungsleitungen Kollektor-Speicher	Rohrspirale im Speicher
Aussendurchmesser	$d_a$ [m]	0,011	0,032	0,012
Innendurchmesser	$d_i$ [m]	0,008	0,027	0,010
Länge	L [m]	2,0	2 x 10	12,5
Anzahl parallel geschalteter Rohre	z [-]	13	-	6

Tabelle 3. Abmessungen der Rohrleitungen.

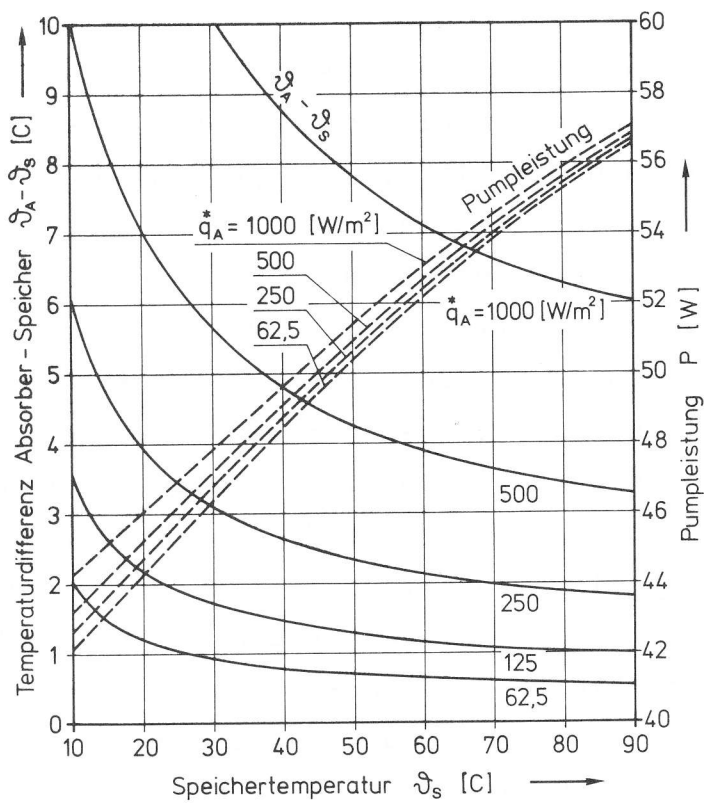


Bild 23: Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Speicherwasser mit Wasser-Aethylenglykol als Wärmeübertragungsmittel. Ueberdruck der Umwälzpumpe 0,4 [bar] = 40'000 [Pa]. Absorberfläche  $A = 10 \text{ m}^2$ . Uebrigere Angaben in der Tabelle 3 und im Text.

Ergebnis einer Optimierung ist. Da die Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Speicherinhalt für dieses Beispiel bereits recht klein sind, ist eine für die Auswertung der meteorologischen Unterlagen zur Warmwasserbereitung ins Gewicht fallende Verbesserung mit vertretbarem Aufwand nicht zu erwarten. Bei der späteren Auswertung ist diese Temperaturdifferenz lediglich für die Bestimmung der nutzbaren Wärmestromdichte des Kollektors von Bedeutung. Ein bis zwei Grade Unterschied ergeben deshalb nur geringfügige Änderungen der Gesamtergebnisse.

Im Bild 23 ist auch die Pumpleistung

$$P = \dot{V}_F \Delta p \quad (72)$$

eingetragen. Da der durch die Pumpe erzeugte Ueberdruck als konstant angenommen wurde ( $\Delta p = 40'000$  [Pa]), gibt diese Kurve auch Auskunft über den mit steigender Speichertemperatur zunehmenden Volumenstrom des Wärmeübertragungsmittels.

## 7. Betriebsperioden der Warmwasserbereitungsanlage

### 7.1 Aufheizen des Absorbers ohne Wärmeentnahme

In der Nacht wird der Absorber stark abgekühlt. Er muss deshalb täglich neu auf eine um einen gewissen Betrag über der Speichertemperatur liegende Temperatur aufgeheizt werden. Während dieser Zeit kann die einfallende Strahlung nicht genutzt werden. Dadurch entsteht ein Verlust, der umso höher wird, je grösser die Wärmekapazität des Absorbers mit dem darin enthaltenen Wärmeübertragungsmittel ist, und je höher die Speichertemperatur liegt. Dies ist ein weiterer Grund, Anlagen mit Flachkollektoren bei möglichst tiefen Speichertemperaturen zu betreiben. Die Aufheizverluste lassen sich aber auch durch entsprechende Gestaltung des Absorbers (Wandstärke, Rohrabstand und Rohrdurchmesser) zur Erzielung einer kleinen Wärmekapazität verkleinern. Dem sind allerdings Grenzen gesetzt, da damit die im vorangegangenen Kapitel berechnete Differenz zwischen mittlerer Absorbertemperatur und Speichertemperatur zu- und der Kollektorstromwirkungsgrad entsprechend abnimmt. Die bezüglich dem Gesamtwirkungsgrad einer Anlage optimalen Absorberabmessungen können nicht losgelöst von

der Gesamtanlage erfolgen, weil die Aufheizzeit und damit das Gewicht dieser Verluste von der täglich ändernden Speichertemperatur abhängt. Deshalb bleibt eine Optimierung der Absorberabmessungen späteren Arbeiter vorbehalten. Abschätzungen haben aber gezeigt, dass durch eine optimiere Absorbergestaltung keine wesentlichen Verbesserungen der im folgenden berechneten jährlich nutzbaren Energie zur Warmwasserbereitung zu erwarten ist.

Da der zeitliche Verlauf der Strahlungswerte nur in stündlichen Abständen bekannt ist, genügt es, die Zeitabhängigkeit der nutzbaren Wärmestromdichte innerhalb dieser Intervalle durch einen linearen Ansatz zu erfassen:

$$\dot{q}_A = \dot{q}_{A0} + c_q t \quad (73)$$

Weil die Umwälzpumpe während dem Aufheizvorgang nicht läuft, wird dem Absorber ausser den bei der Bestimmung von  $\dot{q}_A$  nach dem Bild 15 bereits berücksichtigten Wärmeverlusten keine Wärme entzogen. Die Erwärmung des Absorbers folgt somit aus einer Energiestrombilanz zu:

$$\dot{q}_A = \left( \frac{M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA}}{A} \right) \frac{d\vartheta_A}{dt} \quad (74)$$

Die auf einen Quadratmeter bezogene Wärmekapazität des Absorbers  $M_A c_{pA}/A$  beträgt bei den Kollektoren der Tabelle 1 mit einem Zuschlag für den Flüssigkeitssammler von 10% 4940 [J/m<sup>2</sup>K], jene des Fluids im Absorber  $M_{FA} c_{pFA}/A$  bei einem Zuschlag für den Flüssigkeitssammler von 100% 4580 [J/m<sup>2</sup>K]. Durch Einsetzen der nutzbaren Wärmestromdichte aus der Gl. (73) in die Gl. (74), Trennung der Variablen und Integration von 0 bis  $\Delta t$  bzw. von 0 bis  $\Delta\vartheta_A$  findet man für die Erwärmung des Absorbers während der Zeit  $\Delta t$

$$\Delta\vartheta_A = \frac{A \left[ \dot{q}_{A0} \cdot \Delta t + (c_q/2) \Delta t^2 \right]}{M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA}} \quad (75)$$

oder die für eine Erwärmung um die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_A$  benötigte Zeit:

$$\Delta t = \frac{-\dot{q}_{A0} + \sqrt{\dot{q}_{A0}^2 + 2 c_q (M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA}) \Delta\vartheta_A / A}}{c_q} \quad (76)$$

Für die tägliche Aufwärmung des Absorbers wird davon ausgegangen, dass die Absorbertemperatur um 0,500 der Umgebungstemperatur entspreche. Die Aufwärmung ist beendet, sobald die Temperatur des Absorbers mit dem darin enthaltenen Wärmeübertragungsmittel so weit über der Speichertemperatur liegt, dass die Mischungstemperatur mit dem Wärmeübertragungsmittel in der Verbindungsleitung und in den Rohrschlangen des Speichers mindestens so hoch ist wie die Speichertemperatur:

$$\vartheta_A = \frac{(M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA} + M_V c_{pV}) \vartheta_s - M_V c_{pV} \vartheta_V}{(M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA})} \quad (77)$$

Andernfalls würde man dem Speicher beim Einschalten der Umwälzpumpe Wärme entziehen. Bei einer Gesamtkollektorfläche von 10 [m<sup>2</sup>] beträgt  $M_A c_{pA} + M_{FA} c_{pFA}$  in den durchgerechneten Beispielen 95'200 [J/K] und die Wärmekapazität der Verbindungsleitung (Kunststoff) samt Inhalt (Abmessungen: Tabelle 3)  $M_V c_{pV} = 49'000$  [J/K]. Damit kann die Endtemperatur des Absorbers nach dem Aufheizen bei bekannter Speichertemperatur  $\vartheta_s$  und bekannter Temperatur des Wärmeübertragungsmittels in den Verbindungsleitungen vor der Inbetriebnahme der Umwälzpumpe  $\vartheta_V$  berechnet werden. Wie schon eine Ueberschlagsrechnung zeigt, kühlen sich die Verbindungsleitungen über Nacht fast auf Umgebungstemperatur ab. Diese kann je nach Leitungsführung sehr verschieden sein. Nimmt man  $\vartheta_V$  zu 17,5 [C] an, liefert die Gl (77) mit den erwähnten Zahlenwerten der Wärmekapazitäten für eine Speichertemperatur von 40 [C] eine Absorbertemperatur von 51,6 [C]. Die notwendige Temperaturdifferenz  $\vartheta_A - \vartheta_s$  bei Inbetriebnahme der Pumpe beträgt in diesem Fall 11,6 [C]. Bei nur halb so grosser Wärmekapazität der Verbindungsleitung (mit Inhalt) wäre für die Inbetriebnahme der Pumpe nur noch ein  $\vartheta_A - \vartheta_s$  von 5,8 [C] notwendig. Ginge diese Reduktion auf Kosten des Rohrquerschnitts, würde der Druckverlust allerdings entsprechend höher. Mit zunehmender Speichertemperatur ist nach der Gl. (77) eine grössere Temperaturdifferenz  $\vartheta_A - \vartheta_s$  erforderlich. Da dann der Kollektorwirkungsgrad stark abnimmt, kann es vorteilhafter sein, die Pumpe schon vor dem Erreichen der aus der Gl. (77) berechneten Absorbertemperatur einzuschalten und damit einen anfänglichen Wärmeverlust im Speicher in Kauf zu nehmen. Um eine preisgünstige Steuerung verwenden zu können, muss die Umwälzpumpe bei einer konstanten Temperaturdifferenz eingeschaltet werden. In den folgenden Auswertungen wird dafür 10 [C] eingesetzt. Ausgeschaltet wird die Umwälzpumpe dagegen erst, wenn die Absorbertemperatur auf die Speichertemperatur gesunken ist.



## 7.2 Abkühlung des Speichers ohne Wärmezufuhr

Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden, nämlich die Abkühlung während der Nacht (2200 bis 0600) ohne Warmwasserentnahme und die Abkühlung am Tag bei ausgeschalteter Umwälzpumpe (Aufheizvorgang, zu geringe Sonnenstrahlung). Es genügt, die Abkühlung bei Warmwasserentnahme zu verfolgen, da die Abkühlung während der Nacht als Spezialfall daraus hervorgeht.

Die Abkühlung des Speichers wird mit den nachstehenden Annahmen berechnet:

1. Die zeitliche Temperaturänderung des Speicherwassers, der Rohrschlangen samt Inhalt und des Speicherbehälters sind gleich.
2. Die Warmwasserentnahme erfolgt bei konstantem Volumenstrom  $\dot{V}_1$ .

Da die Wärmekapazität des Speicherwassers jene der Rohrschlangen mit Inhalt und des Behälters bei weitem übertrifft, ist die erste Annahme ohne weiteres gerechtfertigt. Die Auswirkungen der zweiten Annahme auf die im Abschnitt 9 erläuterten Ergebnisse sind gegenüber jenen von Vergleichsrechnungen mit der Annahme, dass je ein Drittel des Warmwassers um 0700, 1200 und 1900 gebraucht werde, ebenfalls gering.

Die Temperaturänderung im Speicher folgt aus einer Wärmestrombilanz:

$$\dot{Q} + \dot{Q}_V + M_S c_{pS} \frac{d\vartheta_S}{dt} = 0 \quad (78)$$

Darin ist  $\dot{Q}$  der Nutzwärmestrom (Bild 2)

$$\dot{Q} = \dot{V}_1 \rho_W c_{pW} (\vartheta_S - \vartheta_e) \quad (79)$$

und  $\dot{Q}_V$  der Verlustwärmestrom durch die Speicherisolation. Da für diese eine 150 [mm] dicke Schaumstoffschicht vorgesehen ist, kommt dem Wärmeübergang an der Aussenseite der Isolation nur noch eine untergeordnete Bedeutung zu. Der Verlustwärmestrom kann deshalb mit einem konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten und der Temperaturdifferenz zwischen dem Speicher und der Umgebung bestimmt werden:

$$\dot{Q}_V = k_S A_S (\vartheta_S - \vartheta_u) \quad (80)$$

Durch Einsetzen dieser Ausdrücke in die Gl. (78), Trennung der Variablen und Integration erhält man die folgende Abhängigkeit der Speichertemperatur von der Zeit ( $\vartheta_{S0}$  = Speichertemperatur zur Zeit  $t = 0$ ):

$$\vartheta_S = (\vartheta_{S0} - \tau) \exp - \left[ \frac{(\dot{V}_1 \rho_w c_{pw} + k_S A_S) t}{M_S c_{pS}} \right] + \tau \quad (81)$$

mit

$$\tau = \frac{\dot{V}_1 \rho_w c_{pw} \vartheta_e + k_S A_S \vartheta_u}{\dot{V}_1 \rho_w c_{pw} + k_S A_S} \quad (82)$$

Der Volumenstrom  $\dot{V}_1$  stimmt bis zu Speichertemperaturen, welche der geforderten Warmwassertemperatur entsprechen ( $\vartheta_S \leq \vartheta$ ) mit dem Entnahmestrom  $\dot{V}$  (Bild 2) überein. Zur grösstmöglichen Nutzung der Sonnenenergie darf das mit  $\vartheta_S \leq \vartheta$  aus dem Speicher tretende Wasser nur auf die geforderte Warmwassertemperatur  $\vartheta$  erwärmt werden. Falls die Speichertemperatur über der geforderten Warmwassertemperatur liegt ( $\vartheta_S > \vartheta$ ), wird an den Zapfstellen kaltes Wasser beigemischt. Dadurch wird der durch den Speicher strömende Wasservolumenstrom entsprechend kleiner ( $\rho_w c_{pw}$  als konstant angenommen):

$$\dot{V}_1 = \frac{\vartheta - \vartheta_e}{\vartheta_S - \vartheta_e} \dot{V} \quad (83)$$

Die Änderung der Speichertemperatur während der Nacht folgt mit  $\dot{V}_1 = 0$  aus den Gln. (81) und (82):

$$\vartheta_S = (\vartheta_{S0} - \vartheta_u) \exp - \left( \frac{k_S A_S t}{M_S c_{pS}} \right) + \vartheta_u \quad (84)$$

### 7.3 Erwärmung des Speichers

Die Berechnung der Erwärmung des Speichers beruht neben den im Abschnitt 7.2 aufgeführten Ausnahmen auf zwei weiteren:

1. Die zeitlichen Temperaturänderungen des Speichers, der Verbindungsleitung und der Absorber samt Inhalt sind gleich ( $d\vartheta_S / dt = d\vartheta_V / dt = d\vartheta_A / dt$ ).
2. Die vom Absorber abgegebene nutzbare Wärmestromdichte hängt innerhalb der einzelnen Stundenintervalle linear von der Zeit ab (Gl. (73))

Da die Wärmekapazität des Speichers  $M_S \cdot c_{pS}$  den weitaus grössten Anteil an der gesamten Wärmekapazität von Speicher, Verbindungsleitung und Absorbern samt Inhalt  $M_G c_{pG}$  hat, sind mögliche Abweichungen von der ersten Annahme ohne wesentlichen Einfluss auf die Berechnung der Erwärmung des Speichers. Die meteorologischen Daten sind stündlich bekannt. Innerhalb der damit berechneten Stundenwerte der nutzbaren Wärmestromdichte  $\dot{q}_A$  ist der lineare Ansatz nach der Gl. (73) durchaus genügend.

Die zeitliche Temperaturänderung des Speichers folgt ebenfalls aus einer zur Gl. (78) analogen Wärmestrombilanz. Nur kommt jetzt noch der von den Absorbern gelieferte nutzbare Wärmestrom dazu (Gl. (73)), und die Wärmekapazität des Speichers ist durch die Gesamtwärmekapazität  $M_G c_{pG}$  zu ersetzen (A: gesamte Absorberfläche):

$$\dot{V}_1 \rho_W c_{pW} (\vartheta_S - \vartheta_e) + k_S A_S (\vartheta_S - \vartheta_u) + M_G c_{pG} \frac{d\vartheta_S}{dt} = (\dot{q}_{Ao} + c_q t) A \quad (85)$$

Die Lösung dieser linearen Differentialgleichung für die Speichertemperatur in Abhängigkeit der Zeit lautet ([55], S. 470/471):

$$\vartheta_S = \left\{ \vartheta_{So} + \left[ \frac{b}{a} + \frac{c}{a^2} (at - 1) \right] \exp(at) - \left[ \frac{b}{a} - \frac{c}{a^2} \right] \right\} \exp(-at) \quad (86)$$

mit

$$a = \frac{k_S A_S + \dot{V}_1 \rho_W c_{pW}}{M_G c_{pG}} \quad (87)$$

$$b = \frac{A \dot{q}_{Ao} + k_S A_S \vartheta_u + \dot{V}_1 \rho_W c_{pW} \vartheta_e}{M_G c_{pG}} \quad (88)$$

$$c = \frac{c_q \cdot A}{M_G c_{pG}} \quad (89)$$

## 8. Nutzwärmeberechnung

### 8.1 Erläuterungen zum Programmablaufplan

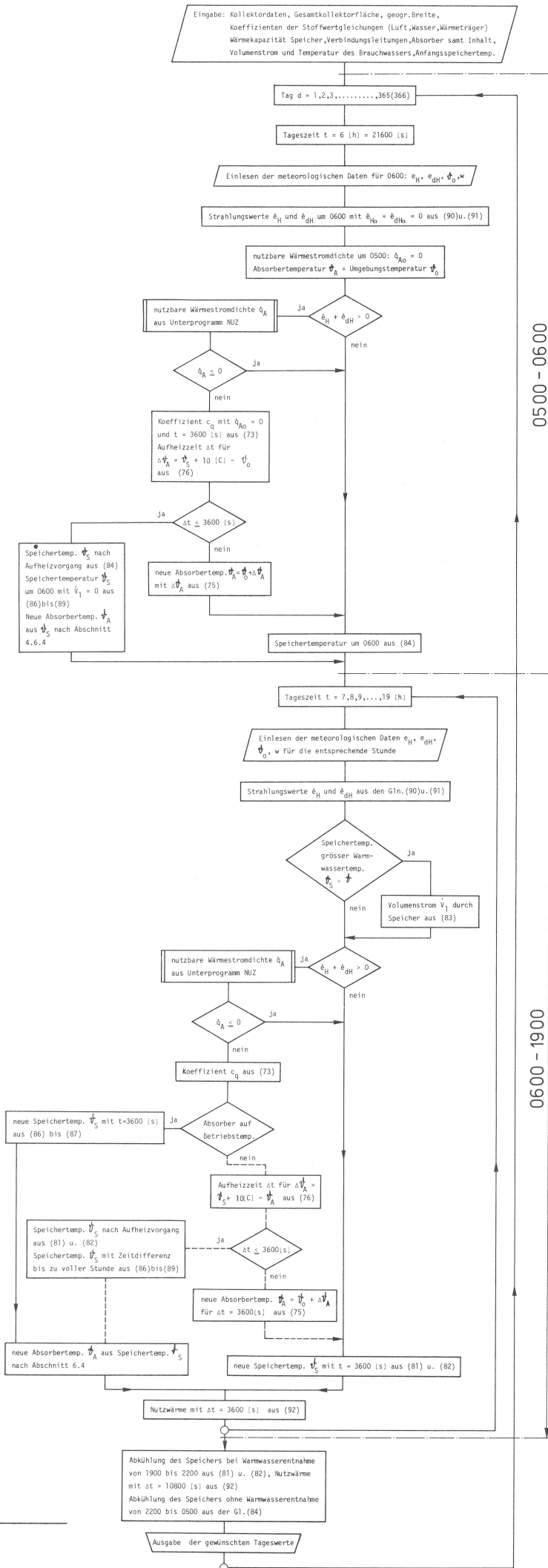
Mit den in den vorangehenden Abschnitten erläuterten Grundlagen kann die in einer dem Bild 2 entsprechenden Warmwasserbereitungsanlage nutzbare Sonnenenergie berechnet werden. Der dazu notwendige Aufwand ist allerdings beträchtlich und nur mit Hilfe eines leistungsfähigen Computers zu bewältigen. Der Programmablauf wird nachstehend anhand des Bildes 24 für die Auswertung der meteorologischen Daten während eines Jahres erläutert. Für jeden Tag wird von 0600 bis 2200 mit einer Warmwasserentnahme bei konstantem Volumenstrom gerechnet. Die Rechnung beginnt am 1. Januar ( $d = 1$ ) um 0600. Nach dem Einlesen der von 0500 bis 0600 auf eine Horizontalfläche von einem Quadratmeter eingefallenen direkten und diffusen Strahlungsenergie ( $e_H, e_{dH}$ ), der Umgebungstemperatur  $\vartheta_o$  und der Windgeschwindigkeit  $w$  um 0600 werden die Strahlungswerte um 0600 mit der Annahme einer linearen Änderung zwischen den Werten am Anfang und am Ende des Stundenintervalls berechnet ( $\Delta t = 3600$  [s]):

$$\dot{e}_{H\omega} = \frac{2 e_H}{\Delta t} - \dot{e}_{H\alpha} \quad (90)$$

$$\dot{e}_{dH\omega} = \frac{2 e_{dH}}{\Delta t} - \dot{e}_{dH\alpha} \quad (91)$$

Da um 0500 während dem ganzen Jahr keine Nutzung der Sonnenenergie möglich ist, werden die Strahlungswerte  $\dot{e}_{H\alpha}$  und  $\dot{e}_{dH\alpha}$  und die nutzbare Wärmestromdichte  $\dot{q}_{A\alpha}$  für das erste Intervall (0500 bis 0600) Null gesetzt. Die Absorbtemperatur  $\vartheta_A$  um 0600 wird der Umgebungstemperatur  $\vartheta_o$  gleichgesetzt. Die Speichertemperatur um 0500 wird für den ersten Tag eingelesen und für die folgenden aus der Rechnung des Vortages bestimmt. Wenn um 0600 bereits Sonnenstrahlung vorhanden ist ( $\dot{e}_H + \dot{e}_{dH} > 0$ ), wird die nutzbare Wärmestromdichte  $\dot{q}_A$  um 0600 mit dem Unterprogramm NUZ (Bild 15) ermittelt. Falls diese negativ ist, wird die Absorbtemperatur nicht verändert. Wenn die nutzbare Wärmestromdichte schon um 0600 positiv ist, wird der Koeffizient  $c_q$  für die lineare Änderung der nutzbaren Wärmestromdichte aus der Gl. (73) bestimmt. Dann wird die benötigte Zeit für eine Erwärmung des Absorbers auf eine Temperatur, welche um  $10$  [C] über der Speichertemperatur liegt, aus der Gl (76) berechnet. Liegt diese innerhalb eines Stundenintervalls ( $\Delta t < 3600$  [s]),

Bild 24:  
Berechnung der  
Warmwasserbereitung  
mit Sonnenenergie.



wird die Speichertemperatur am Ende des Aufheizvorgangs aus der Gl. (84) und die Speichertemperatur um 0600 für die restliche Zeit bis 0600 mit  $\dot{V}_1 = 0$  aus den Gln. (86) bis (89) bestimmt. Beträgt die Aufheizzeit über 3600 [s], folgt die Absorbierertemperatur um 0600 aus der Gl. (75). In diesem Fall wird - wie für  $\dot{q}_A \leq 0$  - die Speichertemperatur um 0600 aus der Gl. (84) ermittelt. Da bis 0600 kein Warmwasser benötigt wird, gibt die Anlage noch keinen Nutzwärmestrom ab.

Der Rechnungsgang für die folgenden Stunden verläuft analog, wenn die Betriebstemperatur des Kollektors noch nicht erreicht wurde (im Bild 24 gestrichelt). Andernfalls wird die neue Speichertemperatur mit  $t = 3600$  [s] aus den Gln. (86) bis (89) und die neue Absorbierertemperatur nach den Ausführungen im Abschnitt 6.4 ermittelt.

Nun kann die während dem Stundenintervall der Anlage entzogene Wärme, die Nutzwärme, mit dem Volumenstrom  $\dot{V}_1$  (Bild 2) und der Differenz zwischen der mittleren Speichertemperatur und der Kaltwassereintrittstemperatur bestimmt werden:

$$Q = \dot{V}_1 \cdot \rho_W c_{pW} \left( \frac{\vartheta_{S\alpha} + \vartheta_{S\omega}}{2} - \vartheta_e \right) \Delta t \quad (92)$$

Die einzelnen Stundenwerte werden summiert. Nach 1900 ist keine Nutzung der Sonnenenergie mehr möglich. Ab dieser Zeit bis 2200 erfolgt die Abkühlung im Speicher mit Warmwasserentnahme. Auch in diesem Zeitabschnitt wird der Anlage Nutzwärme entzogen. Von 2200 bis 0500 erfolgt die Abkühlung des Speichers nur noch durch den Wärmeverlust an die Umgebung.

## 8.2 Daten für die Nutzwärmeberechnung

Die Kollektordaten wurden bereits im Abschnitt 5.1 und in der Tabelle 1 zusammengestellt. Die Abmessungen der Rohrleitungen findet man in der Tabelle 3. Die numerische Auswertung erfolgte namentlich mit drei Speichergrößen und Entnahmevermögenströmen: Tabelle 4. Die gesamte Absorberfläche wurde bei allen Varianten mit  $10 \text{ [m}^2\text{]}$  angenommen. Gemeinsam sind den drei Varianten auch die Kollektor- und Rohrleitungsdaten sowie die mit  $40 \text{ [C]}$  angenommene Warmwassertemperatur und die Wasserzulauftemperatur  $\vartheta_e$  von  $10 \text{ [C]}$ . Bei Vernachlässigung des Temperaturabfalls in den Hausleitungen genügt diese Warmwassertemperatur

	Symbol	Einheit	Variante		
			A	B	C
Gesamtoberfläche der Absorber	A	m <sup>2</sup>	10	10	10
Warmwassertemperatur	$\vartheta$	C	40	40	40
Warmwasservolumenstrom	V	m <sup>3</sup> /s <sup>1)</sup>	3,472 · 10 <sup>-6</sup>	6,944 · 10 <sup>-6</sup>	1,389 · 10 <sup>-5</sup>
Speichervolumen	V <sub>S</sub>	m <sup>3</sup> /d	0,2	0,4	0,8
Wärmekapazität Speicher	M <sub>S</sub> <sup>c</sup> ps	m <sup>3</sup>	0,6	1,2	2,4
Wärmekapazität Speicher, Absorber und Verbindungsleitungen mit Inhalt	M <sub>G</sub> <sup>c</sup> pG	J/K	2,58 · 10 <sup>6</sup>	5,16 · 10 <sup>6</sup>	1,03 · 10 <sup>7</sup>
Mittlere Dichte, Brauchwasser	ρ <sub>W</sub>	J/K	2,70 · 10 <sup>6</sup>	5,28 · 10 <sup>6</sup>	1,04 · 10 <sup>7</sup>
Mittlere spezifische Wärme, Brauchwasser	c <sub>pW</sub>	kg/m <sup>3</sup>	996	996	996
Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient und Speicheroberfläche	k <sub>S</sub> A <sub>S</sub>	J/kgK	4178	4178	4178
		W/K	1,68	2,67	4,23

Tabelle 4.  
 Daten der für die Warmwasserbereitung untersuchten Varianten. (1) von 0600 bis 2200)

für alle Warmwasseranwendungen ausser dem Abwaschen ([32], S. 1232). Sie wurde absichtlich so niedrig gewählt, um zu sehen, was sich bei der Warmwasserbereitung mit verschiedenen Kollektoren bestenfalls erreichen lässt. Schreibt man höhere Warmwassertemperaturen vor, muss man sich mit einer kleineren Jahresnutzwärme begnügen.

Das Speichervolumen wurde so gewählt, dass die Nutzwärme bei einer weiteren Vergrösserung des Speichervolumens nicht mehr spürbar gesteigert werden kann. So wäre die Einbusse an der im Sommerhalbjahr zu gewinnenden Nutzwärme bei nur halb so grossen Speichern kleiner als 4 % (Bild 29). Da es hier darum geht, zu untersuchen welche Nutzwärme bestenfalls zu gewinnen ist, wird auf eine Optimierung des Speichervolumens verzichtet. Es sei nur bemerkt, dass das optimale Speichervolumen dem Wasservolumenstrom keineswegs proportional sein muss und die Werte der Tabelle 4 nicht erreichen wird.

Die Wärmekapazität des Speichers setzt sich aus dem Wert des Wasserinhalts der Rohrschlangen und der Behälterwände (3 [mm] - Stahlblech, innerer Behälter mit 0,15 [m<sup>3</sup>] Inhalt für das durchströmende Brauchwasser) zusammen. Als mittlere Dichte und mittlere spezifische Wärmekapazität des Wassers wurden die Werte für 30 [C] eingesetzt. Der Wärmeverlust des zylindrischen Speichers wird für eine 150 [mm] dicke Behälterisolation mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 [W/mK] aus der Gl. (80) berechnet. Für freie Konvektion an der Behälterausseiwand, eine Behälterhöhe von 1,5 [m] und einen Zuschlag von 10 % für die Wärmeverluste durch die Pratten und Rohrleitungen erhält man einen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_S$  von 0,234 [W/m<sup>2</sup>K]. Das Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient und Behälteroberfläche ist für die drei Varianten in der Tabelle 4 zusammengestellt.

## 9. Ergebnisse für Zürich-Kloten

Die Durchrechnung der Warmwasserbereitungsanlage erfolgte am Beispiel der meteorologischen Messwerte für Zürich-Kloten. Diese sind im Rahmen der hier erreichten Genauigkeit für das ganze Schweizerische Mittelland genügend repräsentativ. Eine eingehende Untersuchung für die verschiedenen Kollektortypen und Anlagenvarianten wurden für das Jahr 1967 durchgeführt. Die Auswertung der Messwerte der Jahre 1964 bis 1972 erfolgte an drei Beispielen.



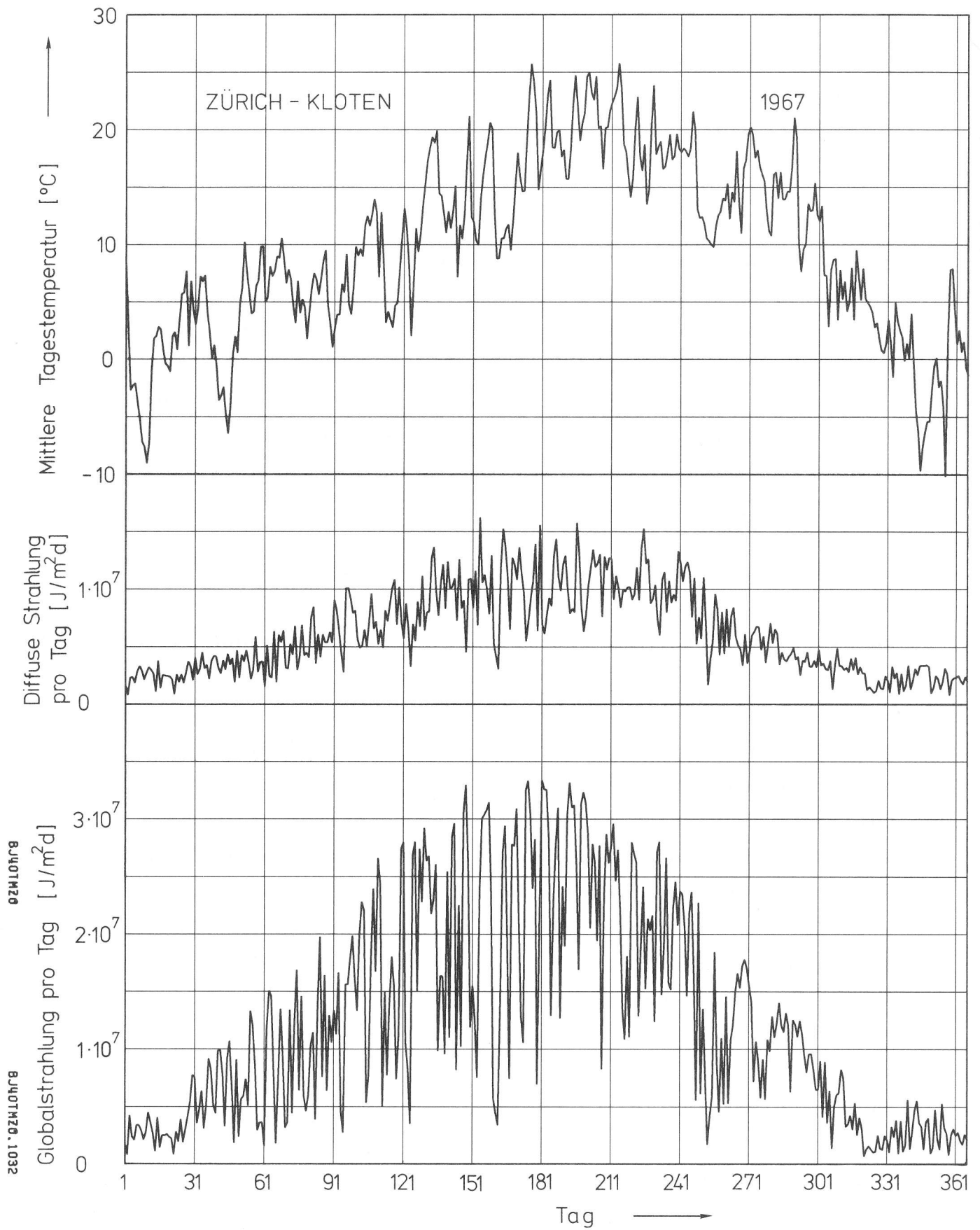


Bild 25: Mittelwert der Temperatur, der täglichen diffusen Strahlung und der Globalstrahlung auf eine Horizontalfläche aus Stundenwerten von 0500 bis 1900 für Zürich-Kloten(1967)[48].

## 9.1 Auswertung der meteorologischen Daten von 1967

Die vollständige Berechnung des Nutzwassertemperaturverlaufs nach dem Bild 24 stützt sich auf die stündlichen Messwerte der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung auf eine Horizontalfläche, der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit [48]. Davon werden die Werte von 0600 bis 1900 benötigt. Der Jahresverlauf der berechneten Nutzwassertemperatur stützt sich somit auf 20'440 meteorologische Messwerte. Der Jahresverlauf der täglich von 0500 bis 1900 auf eine Horizontalfläche einfallenden globalen und diffusen Strahlung und die von 0500 bis 1900 arithmetisch gemittelte Umgebungstemperatur sind im Bild 25 wiedergegeben. Man erkennt daraus deutlich die schwache Strahlung (allerdings auf eine Horizontalfläche!) bei tiefen Temperaturen im Winterhalbjahr. Dies stellt - wie bereits erwähnt - eine wirtschaftliche Nutzung der Sonnenenergie zur direkten Raumheizung im Winterhalbjahr sehr in Frage. Im Sommerhalbjahr liegen die Verhältnisse dagegen bedeutend günstiger. Damit ist aber zumindest beim derzeitigen Stand der Wärmespeichertechnik die Nutzung zur Warmwasserbereitung am aussichtsreichsten.

Im Bild 26 ist der Tagesverlauf der meteorologischen Daten für ein Beispiel eines ausgesprochenen Schönwettertages (120. Tag: 30. April 1976) über der Tageszeit aufgetragen. Zwischen den einzelnen Stundenwerten wurde eine lineare Änderung der Strahlung auf eine Horizontalfläche (Gln. (90) und (91), der Temperatur und der Windgeschwindigkeit angenommen. Die Windgeschwindigkeit in der zweiten Tageshälfte ist in diesem Beispiel aussergewöhnlich hoch. Bei einem Kollektorneigungswinkel  $\gamma$  von  $50^\circ$ , dem Kollektortyp 1-2 (Tabelle 1: einfachverglaster Kollektor mit selektiver Absorberbeschichtung) und der Anlagenvariante B (Tabelle 4) betrug die Speichertemperatur an diesem Tag um 0500 55,2 [C]. Der mit dem im Bild 24 dargestellten Verfahren berechnete Verlauf der Speicher- und Absorbtemperatur ist im Bild 27 über der Tageszeit aufgetragen. Zunächst muss der Absorber von der Umgebungstemperatur um 0600 auf eine Temperatur, welche um 10 [C] über derjenigen des Speicherinhalts liegt, erwärmt werden. Gleichzeitig kühlt sich der Speicherinhalt infolge der Warmwasserentnahme und der Wärmeverluste ab. Dann wird die Umwälzpumpe eingeschaltet. Die neue Absorbtemperatur wird nun über den Wärmetransport in den Speicher bestimmt (Bild 23). Sobald die Absorbtemperatur auf jene des Speichers abgesunken ist, (nutzbare Wärmestromdichte = 0) wird die Umwälzpumpe ausgeschaltet. Der Speicher kühlt sich nun wie während der Aufheizperiode durch

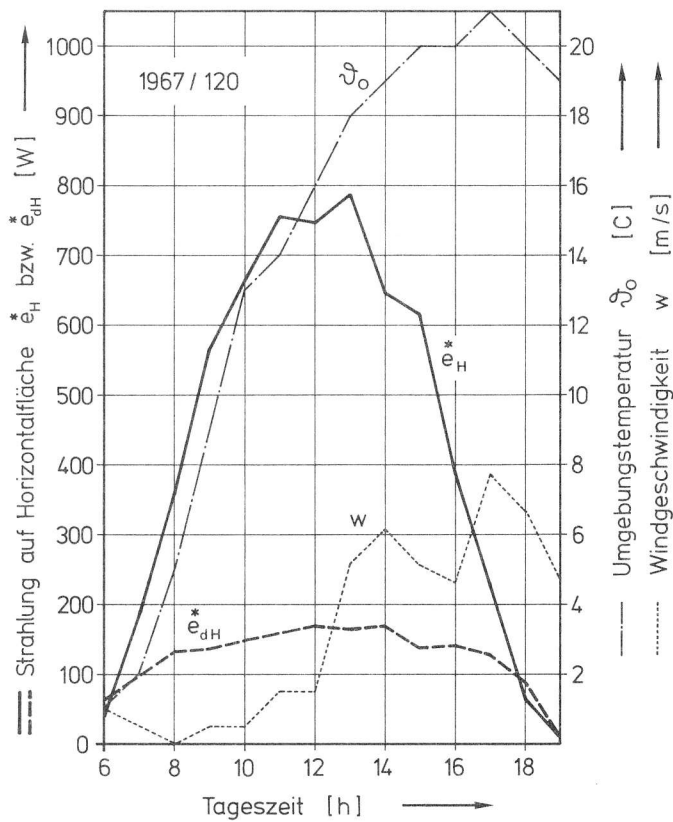


Bild 26: Tagesverlauf der Strahlung auf eine Horizontalfläche (direkte:  $\dot{e}_H^*$ , diffuse  $\dot{e}_{dH}^*$ ), der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit am 120. Tag des Jahres 1967 in Zürich Kloten [48].

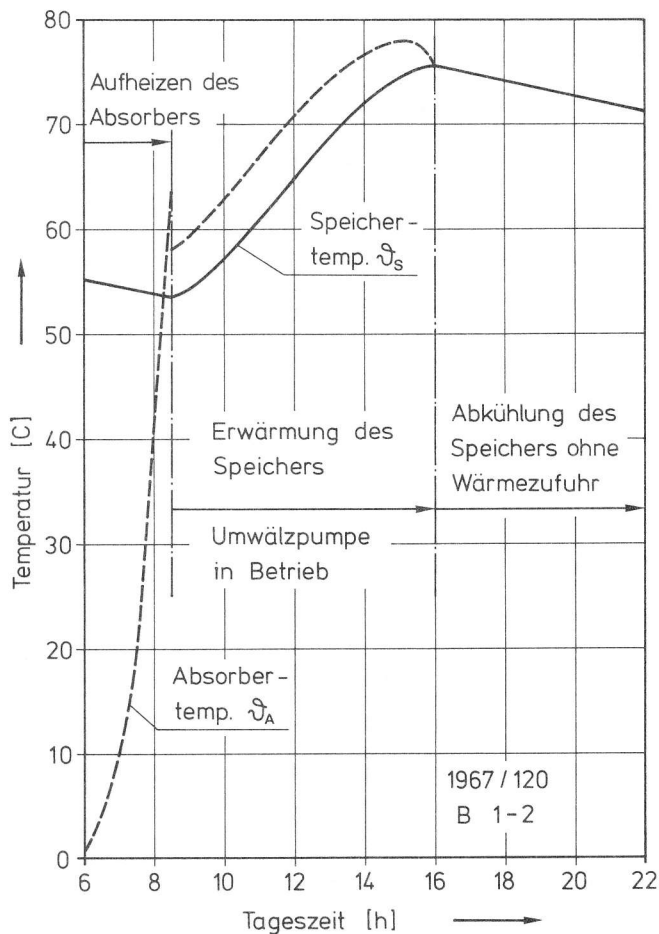


Bild 27: Verlauf der Speicher- und der Absorbentemperatur für den 120. Tag des Jahres 1967 in Zürich-Kloten. Kollektor 1-2, Anlagevariante B.

Warmwasserentnahme und Wärmeverluste ab. Wenn im Strahlungsverlauf ausgeprägte Zwischenminima auftreten, wird die Umwälzpumpe erneut in Betrieb genommen, sobald die Absorbtemperatur die Speichertemperatur wieder übersteigt.

Im gezeigten Beispiel kann die Sonnenenergie nur von etwa 0830 bis 1600 genutzt werden. Die vor diesem Zeitintervall anfallende Strahlung geht für das Aufheizen des Absorbers verloren. Er lässt sich durch eine Optimierung der Kollektorwandstärke und des Rohrleitungsabstands wohl noch etwas reduzieren. Dem sind aber Grenzen gesetzt, führt doch eine Reduktion der Wärmekapazität des Absorbers zu grösseren Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Speicher und damit zu schlechteren Kollektorwirkungsgraden bei der Erwärmung des Speichers.

Im Bild 28 ist der Verlauf der Speichertemperatur um 1200 (wahrer Mittag) und der pro Tag und Quadratmeter Absorberfläche gewonnenen Nutzwärme für die mit dem Kollektor 1-2 ausgerüstete Anlagenvariante B für das ganze Jahr 1967 aufgezeichnet. Man sieht daraus, dass die geforderte Warmwassertemperatur von 40 (C) im Sommerhalbjahr meistens wesentlich überschritten, im Winterhalbjahr dagegen relativ selten erreicht wird. Auch der Nutzwärmegewinn ist im Sommerhalbjahr erwartungsgemäss höher als im Winterhalbjahr. Sobald die Speichertemperatur die geforderte Warmwassertemperatur von 40 (C) überschreitet, bleibt die Nutzwärme allerdings konstant, da dann der durch den Speicher tretende Wasservolumenstrom nach der Gl. (83) abnimmt. Dies ist auch der Grund dafür, dass zeitweise sehr hohe Speichertemperaturen auftreten. Man könnte folglich während diesen Tagen wesentlich mehr Warmwasser entnehmen. Falls dies nicht geschieht, müsste eine Steuerung dafür sorgen, dass Speichertemperaturen von ca. 90 (C) nicht überschritten würden. Am Betrag der Jahresnutzwärme würde sich dadurch nichts ändern.

Wie im Abschnitt 8.2 bereits angedeutet, konnte im Rahmen dieser Arbeit aus finanziellen Gründen (Rechenzeit) keine wirtschaftlich optimale Speichergrösse ermittelt werden. Im Bild 29 ist die pro

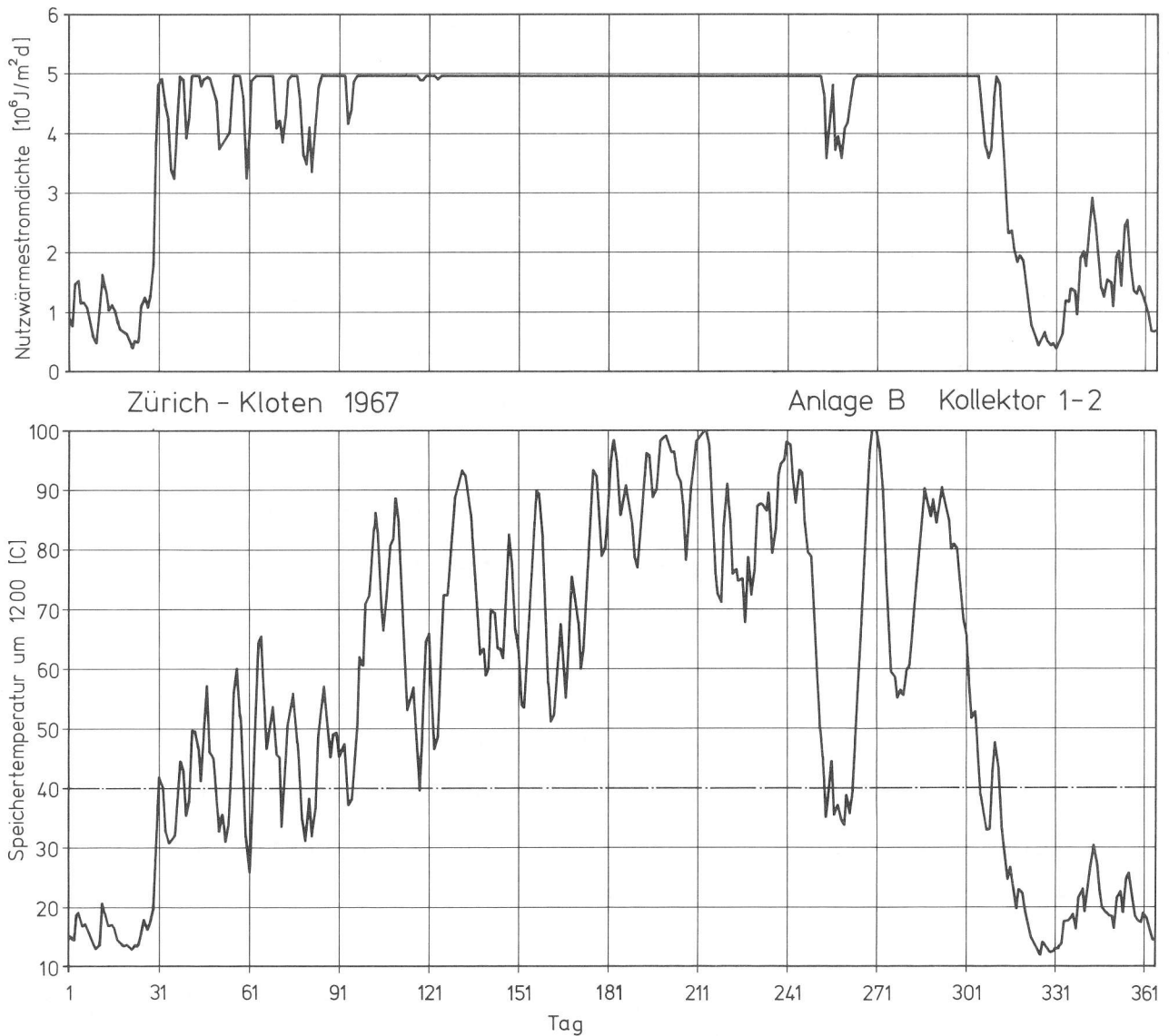


Bild 28: Jahresverlauf der Speichertemperatur um 1200 und der pro Tag und Quadratmeter Absorberfläche gewonnenen Nutzwärme. Kollektor-  
neigungswinkel  $50^\circ$ , Kollektor 1-2, Anlagevariante B, Zürich-Kloten 1967.

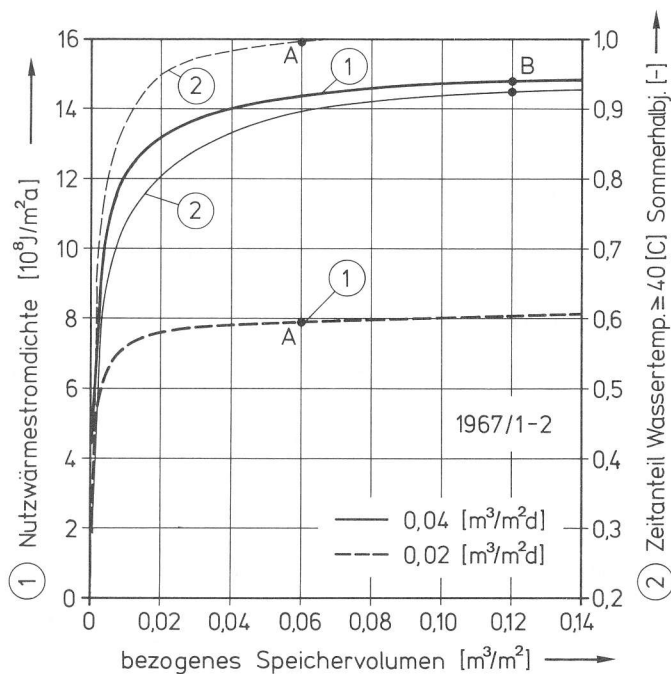


Bild 29:  
Abhängigkeit der Nutzwärme  
pro Jahr und des Zeitanteils  
für Warmwassertemperaturen  
über  $40^\circ \text{C}$   
von der Speichergrösse.  
Kollektorneigungswinkel  $50^\circ$ ,  
Kollektor 1-2,  
Zürich-Kloten 1967.

Quadratmeter Absorberfläche und Jahr mit unterschiedlichen Speichergrössen erreichbare Nutzwärme für den Kollektor 1 - 2 wiedergegeben. Die Punkte für die Anlagenvarianten A und B sind darin eingetragen. Man sieht daraus, dass sich die Nutzwärme durch die Verwendung grösserer Speicher kaum mehr steigern lässt. Neben der Nutzwärme ist auch der Zeitanteil im Sommerhalbjahr, während dem die Warmwasserbereitung ohne Zusatzheizung auskommt, von Interesse. Dieser lässt sich bei der Variante A bei einer Verdoppelung der Speichergrösse noch geringfügig erhöhen. Die folgenden Ergebnisse sind bezüglich der Speichergrösse als Höchstwerte aufzufassen, welche mit einem wirtschaftlich optimalen Speicher kaum erreicht würden. Es fällt auf, dass der Einfluss der Speichergrösse auf die Nutzwärme und auch auf den Zeitanteil für Warmwassertemperaturen über 40 (C) ab etwa 0,04 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) weniger ausgeprägt ist, als man vielleicht erwarten würde. Hier ist zu bedenken, dass sich kleinere Speicher rascher erwärmen als grosse. Der Volumenstrom  $\dot{V}_1$  des durch den Speicher fließenden Wassers nimmt bei Speichertemperaturen über 40 (C) nach der Gl. (83) ab. Er ist bei einer Speichertemperatur von 70 (C) nur noch halb so gross wie bei 40 (C).

Die Bilder 30 und 31 zeigen die Ergebnisse der Berechnung der im Jahr 1967 in Zürich-Kloten mit den drei Anlagenvarianten pro Quadratmeter Absorberfläche zu gewinnenden Nutzwärme in Abhängigkeit des Kollektorneigungswinkels. Im Sommerhalbjahr wird die geforderte Warmwassertemperatur besonders bei kleinen Volumenströmen häufig stark überschritten. Man stösst dann an eine Nutzungsgrenze (Bild 28). Da der Kollektorwirkungsgrad und die Dauer des Absorberaufheizvorgangs zudem speichertemperaturabhängig sind, ergeben die drei Anlagevarianten sehr unterschiedliche Nutzwärmen. Mit zunehmendem Warmwasservolumenstrom nimmt die Speichertemperatur und damit auch die Absorbtemperatur ab. Wie die Bilder 32 und 33 verdeutlichen, verursacht dies nicht nur die gewünschte höhere Jahresnutzwärme, sondern auch eine wesentliche Abnahme der Anzahl Tage, an denen auf eine Zusatzerwärmung zur Erreichung der geforderten Warmwassertemperatur mit Oel, Gas oder elektrischer Energie verzichtet

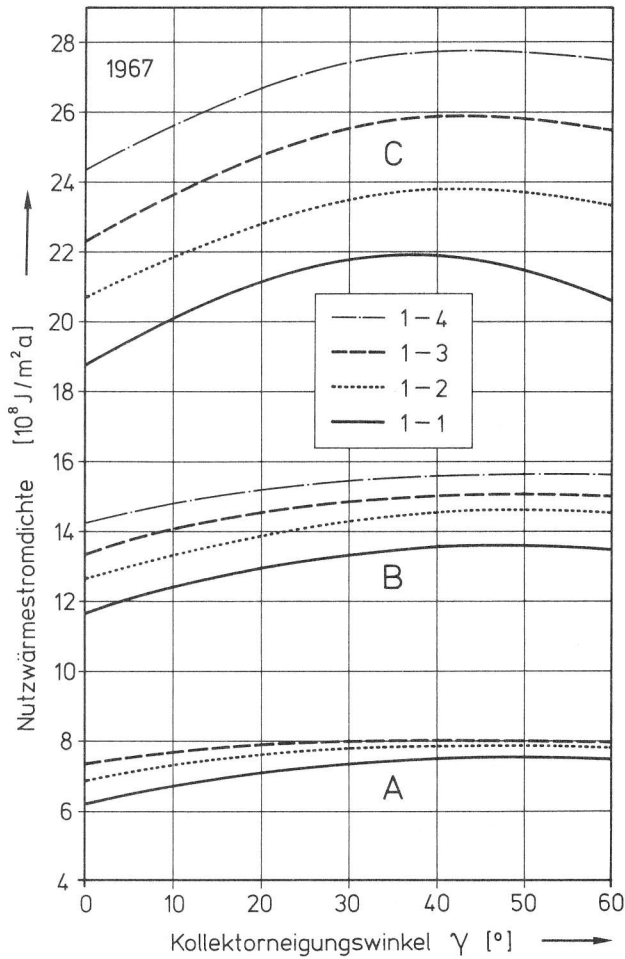


Bild 30:  
 Auf einen Quadratmeter  
 Absorberfläche bezogene  
 Jahresnutzwärme bei Kollektoren  
 mit einer Scheibe.  
 Zürich-Kloten 1967.  
 Kollektortypen: Tabelle 1,  
 Anlagevarianten: Tabelle 4

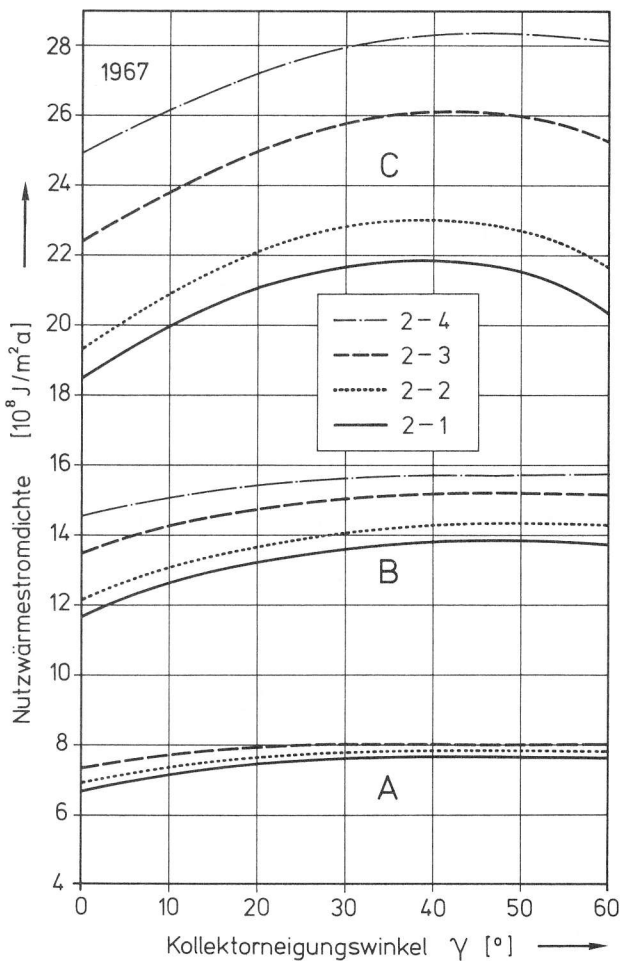


Bild 31:  
 Auf einen Quadratmeter Absorber-  
 fläche bezogene Jahresnutzwärme  
 bei Kollektoren mit zwei Scheiben.  
 Zürich-Kloten 1967. Kollektortypen:  
 Tabelle 1,  
 Anlagevarianten: Tabelle 4.

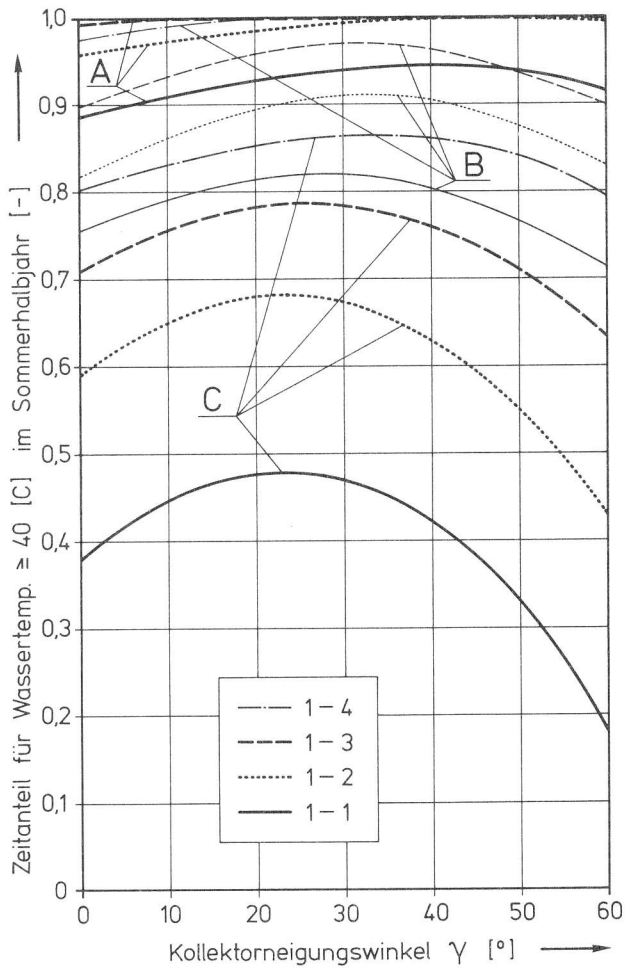


Bild 32:

Zeitanteil für eine Warmwassertemperatur über 40 [C] vom 80. bis zum 262.Tag (Sommerhalbjahr) für Kollektoren mit einer Scheibe. Zürich-Kloten 1967, Kollektortypen: Tabelle 1, Anlagevarianten: Tabelle 4.

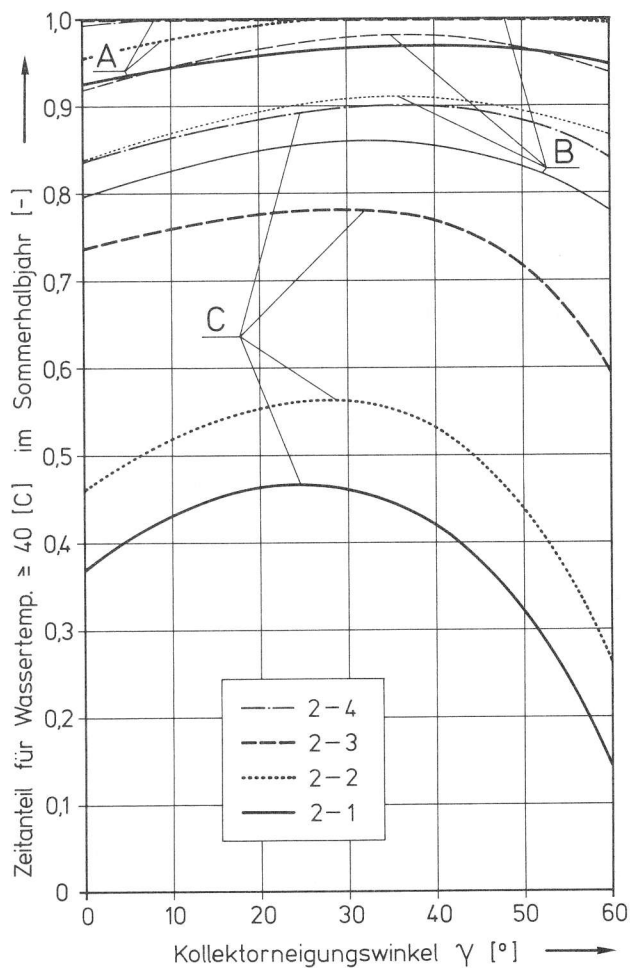


Bild 33:

Zeitanteil für eine Warmwassertemperatur über 40 [C] vom 80. bis zum 262. Tag (Sommerhalbjahr) für Kollektoren mit zwei Scheiben. Zürich-Kloten 1967, Kollektortypen: Tabelle 1, Anlagevarianten: Tabelle 4.



werden kann. Bei der mit gewöhnlichen Flachkollektoren betriebenen Anlagevariante C überwiegen auch im Sommerhalbjahr die Tage, an denen zum Erreichen der geforderten bescheidenen Wassertemperatur von 40 (C) eine Hilfsheizung benötigt wird. Für die Warmwasserbereitung ist der bei der Variante C gewählte Warmwasservolumenstrom zu hoch. Die Variante C gibt eher die bei der Schwimmbadheizung zu gewinnende Nutzwärme wieder.

Das Maximum der Jahresnutzwärme wird bei Kollektorneigungswinkeln zwischen 40<sup>0</sup> und 50<sup>0</sup> erzielt. Möchte man im Sommerhalbjahr möglichst weitgehend ohne Zusatzerwärmung auskommen, müssten die Kollektoren allerdings mit einem noch kleineren Neigungswinkel aufgestellt werden. Wie aus den Bildern 32 und 33 hervorgeht, liegt der diesbezüglich optimale Kollektorneigungswinkel zwischen 30<sup>0</sup> und 40<sup>0</sup>. Falls die Kollektoren aus ästhetischen Gründen der Dachneigung angepasst werden müssen, ist die Einbusse an Jahresnutzwärme und am Zeitan- teil für Warmwassertemperaturen über 40 (C) auch bei noch kleineren Neigungswinkeln nicht so erheblich, wie oft angenommen wird. Für eine optimale Nutzung der Sonnenenergie zur Warmwasserbereitung ist somit ein Kollektorneigungswinkel von rund 40<sup>0</sup> anzustreben.

Falls die Zusatzerwärmung elektrisch durchgeführt wird, legt man den Schwerpunkt auf eine hohe Jahresnutzwärme. Man wird dann eher ein der Anlagenvariante B ähnliches Verhältnis von Absorberfläche zu Warmwasservolumenstrom wählen. Erfolgt die Zusatzerwärmung in einem Kombikessel, legt man grösseren Wert auf einen möglichst hohen Zeit- anteil für Warmwassertemperaturen über 40 (C) im Sommerhalbjahr. Man wird dann ein der Anlagenvariante A entsprechendes grösseres Verhältnis von Absorberfläche zu Warmwasservolumenstrom bevorzugen und dafür pro Quadratmeter Absorberfläche eine Einbusse an Jahres- nutzwärme in Kauf nehmen.

Die Beeinflussungsmöglichkeit der Jahresnutzwärme durch Massnahmen am Kollektor wie selektive Beschichtung des Absorbers (Kollektoren 1-2 und 2-2) oder einer selektiven Beschichtung und der Verwendung von Scheiben mit geringeren Reflexions- und Absorptionsverlusten

(Kollektoren 1-3 und 2-3) ist für die Warmwasserbereitung bescheiden. Dies wird im Bild 34 für die Anlagenvariante B verdeutlicht. Es fällt auf, dass bei den Kollektoren ohne selektive Absorberbeschichtung derjenige mit nur einer Scheibe etwa die gleiche Jahresnutzwärme liefert. Dies bedeutet, dass die übers Jahr gemittelten zusätzlichen optischen Verluste zweier Scheiben die geringeren vorderseitigen Wärmeverluste aufheben. Es lohnt sich deshalb nicht, für die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie Kollektoren mit zwei Scheiben zu verwenden.

Die selektive Beschichtung der Absorberfläche bringt beim Kollektor mit einer Scheibe (1-2) wesentlich mehr ein als beim Kollektor mit zwei Scheiben (2-2), weil die Wärmestrahlungsverluste bei einer Deckscheibe höher sind. Aber auch beim Kollektor mit einer Scheibe beträgt der Gewinn an Jahresnutzwärme bei  $\gamma = 40^\circ$  nur etwa 7 %. Der einfachverglaste Kollektor ist nun dem doppeltverglasten sogar überlegen. Reduziert man zusätzlich die Absorptions- und Reflexionsverluste, erreicht man um rund 12 % höhere Jahresnutzwärmen (Kollektoren 1-3 und 2-3). Selbst bei ideal selektiven Oberflächen und Scheiben ohne jegliche Reflexions- und Absorptionsverluste (Kollektoren 1-4 und 2-4) lassen sich bei der Anlagenvariante B bei Neigungswinkeln von 40 bis  $50^\circ$  nur um rund 15 % höhere Nutzwärmen erzielen als bei der Verwendung gewöhnlicher, einfachverglaster Kollektoren. Dies, weil die Hauptnutzung im Sommerhalbjahr erfolgt. Dann wird die geforderte Warmwassertemperatur auch mit gewöhnlichen Kollektoren meist überschritten. Anders liegen die Verhältnisse bei der (für die Warmwasserbereitung allerdings weniger interessanten) Variante C. Die Zeit, während der die geforderte Warmwassertemperatur von 40 (C) erreicht wird, lässt sich hier durch kollektorseitige Verbesserungen wesentlich verlängern. Entsprechend bescheiden wirken sich kollektorseitige Massnahmen bei der Anlagevariante A aus.

Das Bild 35 zeigt den Einfluss kollektorseitiger Massnahmen auf den Zeitanteil für Wassertemperaturen über 40 (C) im Sommerhalbjahr für die Anlage B. Prinzipiell gilt das oben für die Jahresnutzwärme Festgestellte. Die hier erreichbaren Verbesserungen sind aber aus-

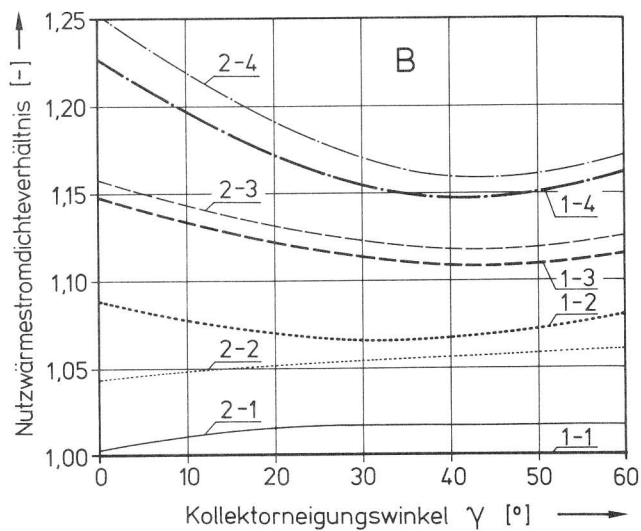


Bild 34: Vergleich der mit den verschiedenen Kollektortypen (Tabelle 1) gegenüber dem Kollektor 1-1 erreichbaren Jahresnutzwärme für die Anlagevariante B. Zürich-Kloten 1967.

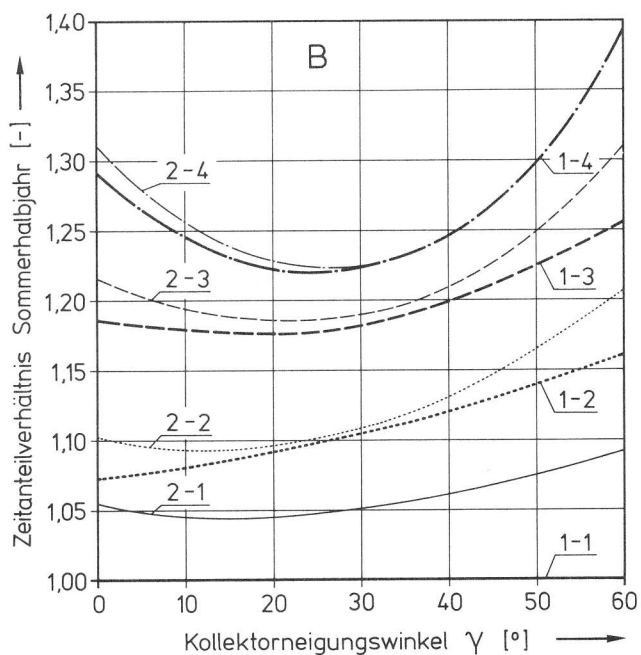


Bild 35: Vergleich des mit den verschiedenen Kollektorvarianten (Tabelle 1) gegenüber dem Kollektor 1-1 erreichbaren Zeitanteil für Warmwassertemperaturen über 40 [C] im Sommerhalbjahr (80. bis 262.Tag). Anlagevariante B. Zürich-Kloten 1967.

prägender. Bei der Variante A wird im Sommerhalbjahr schon mit den einfachen Kollektoren 1-1 und 1-2 ein derart hoher Zeitanteil erreicht (Bilder 32 und 33), dass weitere Massnahmen keine Verbesserungen mehr bringen können. Auch beim Zeitanteil für die fremdenergiefreie Warmwasserbereitung ist die auffallendste Verbesserung durch die selektive Beschichtung des Absorbers beim Kollektor mit einer Scheibe (Uebergang vom Kollektor 1-1 zum Kollektor 1-2) erreichbar.

Bei der Beurteilung der Massnahmen zur Erhöhung des Kollektorwirkungsgrades muss man auch die im Sommer bei Pumpenausfall auftretenden hohen Absorberrtemperaturen berücksichtigen. Sie lassen sich aus Kollektorwirkungsgraddiagrammen (Bilder 18 bis 21) für  $\eta_K = 0$  abschätzen. Die höchsten Werte werden bei vorwiegend direkter Strahlung, freier Konvektion und senkrechtem Strahlungseinfall ( $\varphi = 0$ ) erreicht. Beim Kollektor 1-1 mit einer Scheibe beträgt die maximale Absorberrtemperatur gemäss dem Bild 18 bei einer Umgebungstemperatur von 20 (C) und einer direkten Strahlung  $\dot{e}_N$  von 900 (W/m<sup>2</sup>) etwa 110 (C), während sie beim Kollektor 2-1 mit zwei Scheiben auf rund 155 (C) steigt. Die hohen "Leerlauftemperaturen" hochwertiger Flachkollektoren führen zu unerwünschten Einschränkungen bei der Wahl des Wärmeübertragungsmittels, des Scheiben- und Isolationsmaterials.

Nebenbei sei noch bemerkt, dass sich die Reduktion der optischen Verluste bei der Anlagenvariante C am stärksten auswirkt (Bilder 30 bis 33). Dies beruht darauf, dass die Nutzgrenze hier auch im Sommerhalbjahr oft nicht erreicht wird. Ferner sind die Aufheizzeiten der Kollektoren bei niedrigen mittleren Absorberrtemperaturen sehr kurz und die Kollektorwirkungsgrade entsprechend hoch. Damit können wesentlich mehr "Grenzfälle", bei denen es sonst gar nicht zur Wärmeübertragung an den Speicher reicht, noch genutzt werden.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die gegenüber dem Kollektor mit schwarzem Absorber und einer Scheibe (Typ 1-1) möglichen Verbesserungen für die Anwendung zur Warmwasserbereitung sehr begrenzt sind. Doppelverglaste Kollektoren sind für diesen Zweck ungeeignet. Am ehesten lohnt sich die selektive Absorberbeschichtung, aber nur wenn diese Beschichtung dauerhaft und sehr

Anlage	Kollektor	Einheit	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	Mittelwert
		direkte Strahlung $\dot{e}_H$ [ $10^9 J/m^2$ ]	2,119	1,640	1,952	2,221	1,879	1,800	1,674	2,087	1,676	1,894
		diffuse Strahlung $\dot{e}_{dH}$ [ $10^9 J/m^2$ ]	2,156	2,161	2,003	2,410	2,105	2,019	2,122	2,017	1,978	2,118
A	1-1	Nutzwärme pro Jahr [ $10^9 J/m^2$ ]	0,653	0,680	0,727	0,749	0,706	0,705	0,658	0,719	0,704	0,700
		Nutzwärme im Sommerhalbjahr [ $10^9 J/m^2$ ]	0,438	0,430	0,447	0,449	0,451	0,424	0,435	0,445	0,437	0,439
		Zeitanteil $\phi_S \geq 40$ [C] ganzes Jahr [-]	0,556	0,543	0,619	0,701	0,604	0,551	0,559	0,596	0,569	0,589
		" " " " Sommerhalbjahr [-]	0,920	0,835	0,928	0,946	0,971	0,826	0,844	0,914	0,888	0,886
		Pumpenergie pro Jahr [ $10^7 J/m^2$ ]	1,55	1,51	1,61	1,61	1,58	1,55	1,48	1,68	1,56	1,57
		" Sommerhalbjahr [ $10^7 J/m^2$ ]	1,09	1,01	0,979	0,989	1,03	0,973	0,978	1,09	0,951	1,01
		Maximale Speichertemperatur [C]	98,8	93,3	92,3	101,9	98,4	89,8	93,3	95,6	92,2	95,2
B	1-1	Nutzwärme pro Jahr [ $10^9 J/m^2$ ]	1,17	1,17	1,27	1,36	1,25	1,20	1,15	1,27	1,21	1,23
		Nutzwärme im Sommerhalbjahr [ $10^9 J/m^2$ ]	0,851	0,793	0,848	0,863	0,875	0,794	0,804	0,854	0,815	0,833
		Zeitanteil $\phi_S \geq 40$ [C] ganzes Jahr [-]	0,464	0,371	0,414	0,522	0,432	0,367	0,377	0,477	0,396	0,424
		" " " " Sommerhalbjahr [-]	0,850	0,633	0,716	0,803	0,819	0,671	0,640	0,792	0,659	0,791
		Pumpenergie pro Jahr [ $10^7 J/m^2$ ]	2,09	2,04	2,24	2,20	2,18	2,11	2,04	2,26	2,11	2,14
		" Sommerhalbjahr [ $10^7 J/m^2$ ]	1,53	1,40	1,42	1,38	1,46	1,39	1,41	1,52	1,36	1,43
		Maximale Speichertemperatur [C]	85,2	77,8	80,2	88,6	80,4	78,1	80,4	82,1	73,4	80,7
C	1-1	Nutzwärme pro Jahr [ $10^9 J/m^2$ ]	1,92	1,75	1,91	2,19	1,90	1,80	1,75	2,00	1,80	1,89
		Nutzwärme im Sommerhalbjahr [ $10^9 J/m^2$ ]	1,50	1,26	1,35	1,49	1,42	1,28	1,28	1,43	1,27	1,36
		Zeitanteil $\phi_S \geq 40$ [C] ganzes Jahr [-]	0,216	0,091	0,119	0,228	0,094	0,105	0,080	0,148	0,056	0,126
		" " " " Sommerhalbjahr [-]	0,417	0,180	0,230	0,423	0,188	0,210	0,147	0,284	0,111	0,243
		Pumpenergie pro Jahr [ $10^7 J/m^2$ ]	2,63	2,52	2,75	2,79	2,67	2,56	2,56	2,79	2,62	2,65
		" Sommerhalbjahr [ $10^7 J/m^2$ ]	2,01	1,77	1,81	1,82	1,84	1,75	1,80	1,93	1,77	1,83
		Maximale Speichertemperatur [C]	57,4	51,1	54,0	60,4	54,6	51,9	53,6	56,5	47,6	54,1

Tabelle 5. Ergebnisse der Auswertung der meteorologischen Daten von Zürich-Kloten für die Jahre 1964 bis 1972. Sommerhalbjahr: 80. bis 262. Tag. Anlagevarianten: Tabelle 4, Kollektortyp: Tabelle 1.

preisgünstig ist. Auch der eingangs erwähnten Aetztechnik zur Reduktion der Reflexionsverluste ist weiterhin Beachtung zu schenken.

## 9.2 Ergebnisse für die Jahr 1964 bis 1972

Die in den Jahren 1964 bis 1972 an einer Horizontalfläche in Zürich-Kloten von 0500 bis 1900 gemessenen Strahlungswerte sind im Bild 36 und in der Tabelle 5 zusammengestellt (Werte aus [48]). Man sieht daraus, dass das im Abschnitt 9.1 untersuchte Jahr 1967 von 1964 bis 1972 das sonnenreichste war. Im Mittel werden deshalb die dort berechneten Jahresnutzwärmen und die Zeitanteile für Warmwassertemperaturen über 40 (C) nicht erreicht. Im Mittel der neun Jahre ist die diffuse Strahlung um etwa 12 % grösser als die direkte. Der Temperaturverlauf wurde mit den drei Anlagenvarianten für alle neun Jahre durchgerechnet. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurde die Untersuchung auf den Kollektor 1-1 beschränkt. (Es sind je 184'000 Messdaten auszuwerten!) Der Kollektorneigungswinkel wurde zu 40° angenommen. Mit den im vorangehenden Abschnitt für 1967 wiedergegebenen Ergebnissen ist die Interpolation mit genügender Genauigkeit auch auf andere Kollektortypen und Kollektorneigungswinkel möglich. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Die Angabe der Nutzwärmestromdichten beziehen sich auf einen Quadratmeter Absorberfläche. Die Tabelle enthält auch Angaben über die im Sommerhalbjahr erreichte Nutzwärme, den Zeitanteil für die fremdenergiefreie Warmwasserbereitung und die zur Umwälzung des Wärmeübertragungsmittels benötigte Pumpenergie für das ganze Jahr und das Sommerhalbjahr. Für die Wahl der Speicher- und Rohrleitungswerkstoffe ist ferner die in den einzelnen Jahren erreichte maximale Speichertemperatur von Interesse.

Die Mittelwerte der in den neun Jahren pro Quadratmeter Absorberfläche erreichten Jahresnutzwärme betragen bei der Anlagenvariante A mit dem gewöhnlichen einfachverglasten Kollektor 1-1 17,4 %, bei der Anlagenvariante B 30,7 % und bei der Variante C 47,1 % der im Mittel

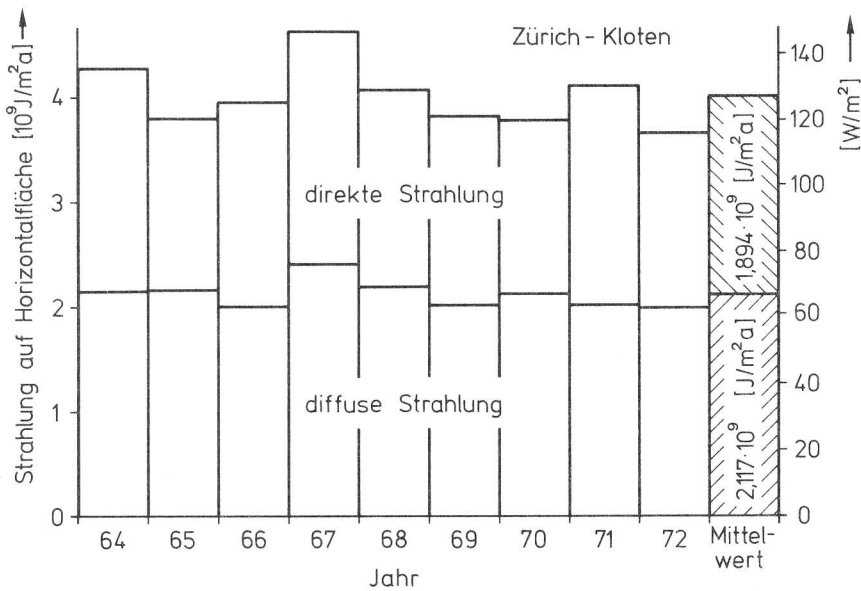


Bild 36:

Direkte und diffuse Strahlung auf eine Horizontalfläche in Zürich-Kloten: Summe der Stundenwerte von 0500 bis 1900 für die Jahre 1964 bis 1972 [48].

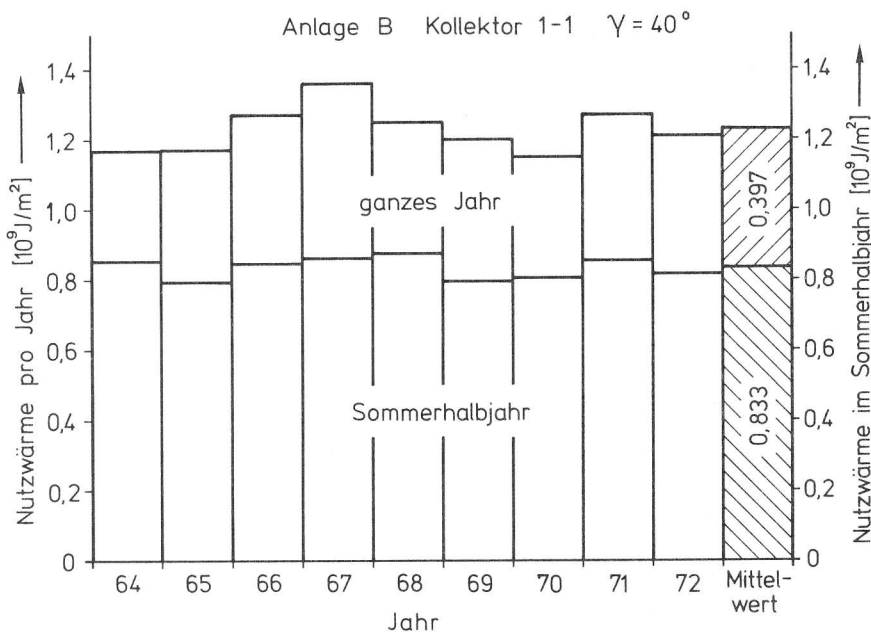


Bild 37:

Nutzwärme pro Quadratmeter Absorberfläche der Anlage B/1-1 von 1964 bis 1972 fürs ganze Jahr und für das Sommerhalbjahr. Kollektorneigungswinkel  $40^\circ$ . Zürich-Kloten.

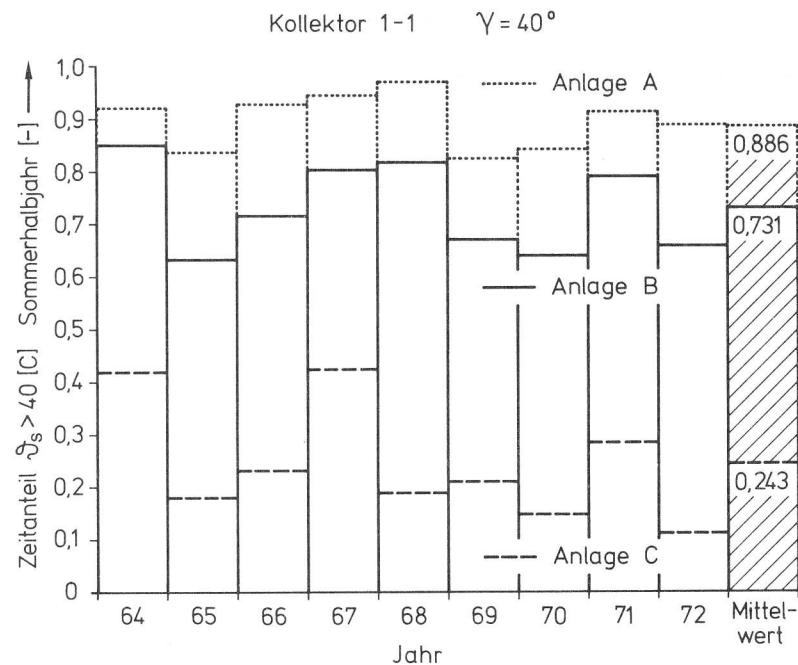


Bild 38:

Zeitanteile für Warmwassertemperaturen über  $40 \text{ [C]}$  im Sommerhalbjahr der Anlagen A/1-1, B/1-1 und C/1-1. Kollektorneigungswinkel  $40^\circ$ . Zürich-Kloten 1964 bis 1972.

auf eine Horizontalfläche eingefallenen Jahresglobalstrahlung. Die im Sommerhalbjahr gewonnene Nutzwärme erreicht bei der Anlage A/1-1 63 %, bei B/1-1 68 % und bei C/1-1 72 % der Jahresnutzwärme. Die im Mittel für die Umwälzung des Wärmeübertragungsmittels (ohne Verluste in der Umwälzpumpe und dem Antriebsmotor) benötigte Fremdenergie beträgt im Mittel 2,2 % der Jahresnutzwärme bei A/1-1, 1,7 % bei B/1-1 und 1,4 % bei C/1-1. Die Anlage A/1-1 vermag die geforderte Warmwassertemperatur im Mittel während 59 % des Jahres ohne Zusatzerwärmung zu liefern. Die Anlage B/1-1 ist dazu im Mittel nur noch während 42 % und die Anlage C/1-1 noch während 13 % des Jahres imstande.

Falls die Zusatzerwärmung in einem Kombikessel erfolgt, ist man an einem hohen Zeitanteil ohne Zusatzerwärmung im Sommerhalbjahr interessiert. Im Mittel beträgt dieser vom 80. bis zum 262. Tag 89 % bei der Anlage A/1-1, 73 % bei der Anlage B/1-1 und nur noch 24 % bei der Anlage C/1-1. Durch Verbesserungen am Kollektor liesse sich dieser Zeitanteil allerdings noch merklich steigern. Längerfristig scheint es möglich, preisgünstige Kollektoren mit den Eigenschaften des Typs 1-3 herzustellen. Ueberträgt man die damit im Jahr 1967 gegenüber dem Typ 1-1 erreichte relative Erhöhung des Zeitanteils für Warmwassertemperaturen über 40 (C) (Bild 32) auf das Mittel der Jahre 1964 bis 1972, erhält man einen Näherungswert für die Anlage A/1-3 von 94 %, von 88 % für B/1-3 und von 45 % für C/1-3. Die Bilder 37 und 38 veranschaulichen die Unterschiede der einzelnen Jahresergebnisse an einigen Beispielen. Während die Nutzwärmen für die einzelnen Jahre ähnliche Werte aufweisen, treten bei den Zeitanteilen für eine zusatzerwärmungsfreie Warmwasserbereitung im Sommerhalbjahr von der Anlage A zur Anlage C zunehmend stärkere Abweichungen vom Mittelwert auf. Falls eine Warmwasserbereitungsanlage mit gewöhnlichen Flachkollektoren im Sommerhalbjahr möglichst fremdenergiefrei arbeiten sollte, ist folglich ein Verhältnis von Absorberfläche zu Warmwasservolumenstrom anzustreben, das jenem der Variante A entspricht (  $5 \text{ (m}^2\text{) pro } 0,1 \text{ (m}^3\text{/d)}$  ).



	Einheit	Variante A'	Variante B'	Variante C'
Absorberfläche total	[m <sup>2</sup> ]	15	7,5	3,75
Warmwassertemperatur	[C]	40	40	40
Wasservolumenstrom	[m <sup>3</sup> /d]	0,3	0,3	0,3
	[m <sup>3</sup> /s] <sup>1)</sup>	5,208.10 <sup>-6</sup>	5,208.10 <sup>-6</sup>	5,208.10 <sup>-6</sup>
Speichervolumen	[m <sup>3</sup> ]	0,9	0,9	0,9
Kollektor (Tabelle 1)		1-1	1-1	1-1
Nutzwärme ganzes Jahr	[J]	10,5.10 <sup>9</sup>	9,23.10 <sup>9</sup>	7,09.10 <sup>9</sup>
Nutzwärme Sommerhalbjahr	[J]	6,59.10 <sup>9</sup>	6,25.10 <sup>9</sup>	5,10.10 <sup>9</sup>
Pumpenergie ganzes Jahr	[J]	2,36.10 <sup>8</sup>	1,61.10 <sup>8</sup>	0,993.10 <sup>8</sup>
Energiebedarf für Warmwasserbereitung in einem Jahr	[J]	13,7.10 <sup>9</sup>	13,7.10 <sup>9</sup>	13,7.10 <sup>9</sup>
davon durch Sonnenenergie gedeckt		76,6%	67,4%	51,8%
Energiebedarf für Warmwasserbereitung im Sommerhalbjahr	[J]	6,84.10 <sup>9</sup>	6,84.10 <sup>9</sup>	6,84.10 <sup>9</sup>
davon durch Sonnenenergie gedeckt		96,3%	91,3%	74,6%
Energieeinsparung bei Elektroboiler	[kwh/a]	3650	3200	2460
Heizöleinsparung im Sommerhalbjahr	[kg]	767	728	594
Heizöleinsparung ganzes Jahr	[kg]	881	815	652

Tabelle 6. Vergleich von drei Warmwasserbereitungsanlagen für einen täglichen Warmwasserbedarf von 0,3 [m<sup>3</sup>] à 40 [C].

(1) von 0600 bis 2200)

## 10. Wirtschaftlichkeit der Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie

Nachstehend werden die im Kapitel 9 zusammengestellten Ergebnisse zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie am Beispiel einer Anlage für ein Einfamilienhaus ausgewertet. Der Warmwasserverbrauch wird für höhere Ansprüche mit 0,06 bis 0,1 ( $\text{m}^3$ ) pro Person und Tag angegeben ([32], S. 1232). Für die folgenden Überlegungen wird von einem Warmwasserverbrauch von 0,3 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) ausgegangen. Dies entspricht etwa einem Bedarf für 3-4 Personen. Eine der Variante A entsprechende Anlage muss dazu eine Absorberfläche von 15 ( $\text{m}^2$ ) und einen Warmwasserspeicher mit einem Inhalt von 0,9 ( $\text{m}^3$ ) aufweisen (Tabelle 4). Die der Variante B und C entsprechenden Warmwasserbereitungsanlagen weisen ebenfalls einen Speicher von 0,9 ( $\text{m}^3$ ), aber nur eine Absorberfläche von 7,5 bzw. 3,75 ( $\text{m}^2$ ) auf. Diese Anlagen werden mit A', B' und C' bezeichnet: Tabelle 6. Gegenüber den untersuchten Anlagen A, B und C ergeben sich unterschiedliche Verhältnisse der Speicherwärmeverluste zum Wasservolumenstrom durch den Speicher, und über die verschiedenen Leitungsdimensionen wird auch die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Speicher und damit der Kollektorwirkungsgrad geringfügig beeinflusst. Diese Feinheiten können aber durchaus vernachlässigt werden. Man kann dann die Mittelwerte der Tabelle 5 für die Anlagen A/1-1, B/1-1 und C/1-1 übernehmen und erhält damit die in der Tabelle 6 aufgeführten Nutzwärmen und Pumpenergien. Die pro Jahr für die Erwärmung der 0,3 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) Warmwasser von 10 (C) auf 40 (C) notwendige Energie beträgt  $13,7 \cdot 10^9$  (J). Davon werden bei der Anlage A' 76,6, bei B' 67,4 und bei C' 51,8 % durch Sonnenenergie gedeckt. Im Sommerhalbjahr werden bei A' sogar 96,3 %, bei B' 91,3 und bei C' 74,6 % durch Sonnenenergie aufgebracht. Auffallend ist der geringe Unterschied der Varianten A' und B' im Sommerhalbjahr. Er ist darauf zurückzuführen, dass die Nutzungsgrenze auch bei B' noch häufig erreicht wird und dass infolge des für höhere Absorberrtemperaturen rasch abnehmenden Kollektorwirkungsgrades mit 15 ( $\text{m}^2$ ) Absorberfläche nicht viel höhere Spitzentemperaturen erreicht werden als mit

nur 7,5 (m<sup>2</sup>) Kollektorfläche. Zur Ueberbrückung von Schlechtwetterperioden steht somit bei 15 (m<sup>2</sup>) Absorberfläche auch nicht viel mehr Speicherwärme zur Verfügung als bei 7,5 (m<sup>2</sup>). Bei schönem Wetter genügt sogar die Absorberfläche der Variante C' zum Erreichen der geforderten Warmwassertemperatur von 40 (C).

Die jährlichen Kapitalkosten K für eine Warmwasserbereitungsanlage können mit der Amortisationszeit t<sub>A</sub> und dem Kapitalzinsfuß f aus den Anschaffungskosten I berechnet werden:

$$K = \frac{I}{t_A} \left[ 1 + \frac{f}{2} (t_A + 1) \right] \quad (93)$$

Zu diesen Kapitalkosten kommen noch die Unterhaltskosten und die Kosten für die Pumpenergie. Die Nutzung der Sonnenenergie ist wirtschaftlich, wenn die Summe dieser Kosten kleiner oder gleich den jährlich eingesparten Kosten für elektrische Energie, Heizoel oder andere Brennstoffe ist.

Falls die Warmwasserbereitung ohne Anlage zur Nutzung der Sonnenenergie mit einem Elektroboiler erfolgt, rechnet man bei Nachtaufheizung mit einem Betriebswirkungsgrad von 80 % ((32), S. 1193). Die jährliche Einsparung an elektrischer Energie beträgt dann bei der Anlagenvariante A' 1,38 · 10<sup>10</sup> (J) = 3650 (kWh), bei B' 1,15 · 10<sup>10</sup> (J) = 3200 (kWh) und bei C' 8,86 · 10<sup>9</sup> (J) = 2460 (kWh). Davon muss allerdings noch die zum Betrieb der Umwälzpumpe benötigte Energie abgezogen werden. Nimmt man das Produkt aus Pumpenwirkungsgrad und Wirkungsgrad des Elektromotors als 0,5 an, werden für die Umwälzpumpe bei der Variante A' jährlich 4,72 · 10<sup>8</sup> (J) = 131 (kWh), bei B' 3,22 · 10<sup>8</sup> (J) = 89,4 (kWh) und bei C' 1,99 · 10<sup>8</sup> (J) = 55,2 (kWh) an elektrischer Energie benötigt. Falls der Preis dieser tagsüber benötigten elektrischen Energie doppelt so hoch ist wie jener der Nachtaufheizenergie, ergeben sich mit einer Amortisationszeit t<sub>A</sub> von 15 (a), einem Kapitalzinsfuß f von 6,0 % und einem Unterhaltsaufwand von 10 % der jährlichen Kapitalkosten die im Bild 39 gezeigten Wirtschaftlichkeitsgrenzen.

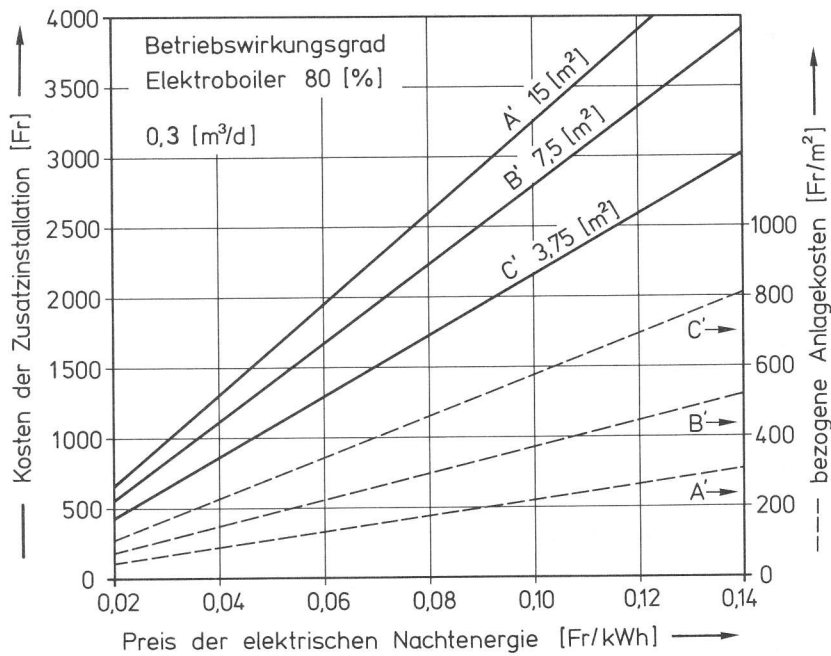


Bild 39: Wirtschaftlichkeitsgrenze für die Ergänzung eines Elektroboilers mit den Warmwasserbereitungsanlagen A', B' und C' (Tabelle 6) bei der Verwendung gewöhnlicher Flachkollektoren mit einer Scheibe für Zürich-Kloten 1964 - 1972. Gestrichelt: auf einen Quadratmeter Absorberfläche bezogene Werte. Kapitalzins 6%, Amortisationszeit 15 [a], Unterhaltskosten 10% der Kapitalkosten.

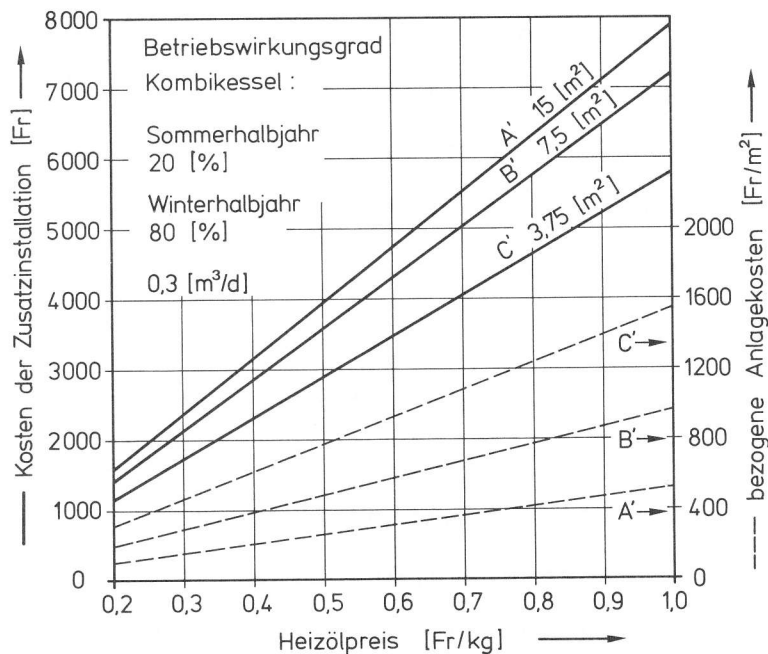


Bild 40: Wirtschaftlichkeitsgrenze für die Ergänzung eines ölgefeuerten Kombikessels mit den Warmwasserbereitungsanlagen A', B' und C' (Tabelle 6) bei der Verwendung gewöhnlicher Flachkollektoren mit einer Scheibe für Zürich-Kloten 1964 - 1972. Gestrichelt: auf einen Quadratmeter Absorberfläche bezogene Werte. Kapitalzins 6%, Amortisationszeit 15 [a], Unterhaltskosten 10% der Kapitalkosten.

Bei einem Preis der elektrischen Nachtenergie von 0,08 (Fr/kWh) dürfte die Anlage A' zur Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie (Zusatzinstallation) beispielsweise höchstens Fr. 2590.--, die Anlage B' bei gleicher Wirtschaftlichkeit wie der Elektroboiler höchstens Fr. 2230.-- und die Anlage C' höchstens Fr. 1730.-- kosten. Pro Quadratmeter Absorberfläche darf die Anlage A' also maximal Fr. 173.-- die Anlage B' Fr. 300.-- und die Anlage C' Fr. 462.-- kosten.

Für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit beim Anbau an einen bestehenden Kombikessel mit Oelbrenner muss der stark unterschiedliche Betriebswirkungsgrad während der Heizperiode und bei reiner Warmwasserbereitung im Sommer berücksichtigt werden. Während der Heizperiode kann mit einem Betriebswirkungsgrad des Kessels von 80 % gerechnet werden. Infolge der geringen Kesselbelastung werden im Sommer nur Betriebswirkungsgrade von 20 % erreicht ([32], S. 1221). Nimmt man vereinfachend 80 % für das Winterhalbjahr und 20 % für das Sommerhalbjahr an, erhält man mit einem unteren Heizwert des Heizöls extra-leicht von  $4,29 \cdot 10^7$  (J/kg) die in die Tabelle 6 eingetragenen Heizöleinsparungen. Mit einer Amortisationszeit von 15 (a), einem Kapitalzinsfuß von 6,0 %, einem Unterhaltsaufwand von 10 % der Kapitalkosten und einem Pumpenstrompreis von 0,15 (Fr/kWh) ergeben sich die im Bild 40 eingetragenen Wirtschaftlichkeitsgrenzen für die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie.

In [62] findet man eine Kostenzusammenstellung für eine 1976 in ein bestehendes Haus installierte Anlage mit einer Absorberfläche von  $12,6 \text{ (m}^2\text{)}$  und einem  $0,3 \text{ (m}^3\text{)}$  Speicher. Da es sich dabei noch um eine Einzelanlage handelt, sind die Gesamtkosten recht hoch. Verteilt man die vom Hersteller bei grösseren Komponentenserien auf 40 % geschätzte Verbilligung gleichmässig auf die Dachanlage, die Kellerinstallation, Steuerung, Projektierung und Abnahme, belaufen sich die Kosten der Dachanlage pro Quadratmeter Absorberfläche auf  $200 \text{ (Fr/m}^2\text{)}$  und die restlichen - von der Absorberfläche weitgehend unabhängigen - Kosten auf 3000 (Fr). In diesem Preis ist eine elektrische Zusatzheizung, aber nur ein Speicher mit  $0,3 \text{ (m}^3\text{)}$  Inhalt eingeschlossen. Eine Optimierung des Speichervolumens konnte in dieser Arbeit nicht

durchgeführt werden. Anhand der im Bild 29 gezeigten Beispiele sieht man aber, dass eine Halbierung des Speichervolumens ohne merkliche Nutzwärmeeinbusse möglich ist. Die angegebenen Kosten können deshalb für die Annahme einer Kleinserieproduktion übernommen werden. Sie ergeben für die Anlagenvariante A' einen Anschaffungspreis von 6000 (Fr), von 4500 (Fr) für die Variante B' und von 3750 (Fr) für die Variante C'.

Mit dem angenommenen Betriebswirkungsgrad des Elektroboliers von 80 % ist damit der wirtschaftliche Einsatz der Anlagenvariante A' erst ab einem Preis der elektrischen Energie von 0,185 (Fr/kWh), jener der Variante B' von 0,162 (Fr/kWh) und jener der Variante C' von 0,173 (Fr/kWh) gegeben. Mit dem angenommenen Preis der Dachinstallationen ist die Variante B' am günstigsten. Man muss allerdings beachten, dass die Variante B' nur während rund 73 % des Sommerhalbjahres Warmwasser über 40 (C) zu liefern vermag (Tabelle 5). In der übrigen Zeit ist aber die Auslastung des Boilers so gering, dass der Betriebswirkungsgrad für die Zusatzerwärmung die angenommenen 80 % nicht mehr erreicht. Dies spricht für die Wahl einer Anlage mit grösserer Absorberfläche, damit der Elektroboiler öfters gar nicht mehr in Betrieb genommen werden muss. Das Optimum dürfte für die geforderte Warmwassertemperatur von 40 (C) und einem Verbrauch von 0,3 (m<sup>3</sup>/d) bei rund 10-15 (m<sup>2</sup>) Absorberfläche liegen. Gegenüber dem mit billiger Nachtenergie arbeitenden Elektroboiler ist die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie bei den erwähnten Anlagepreisen heute noch nicht wirtschaftlich. Baut man die Heizschlangen direkt in einen genügend grossen Hausboiler ein, sind die Anlagekosten aber tiefer als oben angenommen. Man wird sich allerdings überlegen müssen, ob es überhaupt noch sinnvoll ist, hochwertige elektrische Energie für das direkte Erwärmen von Haushaltwasser einzusetzen.

Die Ergänzung eines ölgefeuerten Kombikessels durch eine Warmwasserbereitungsanlage A' ist mit den getroffenen Wirkungsgradannahmen und einem Anlagenpreis von 6000 (Fr) ab einem Heizölpreis von 0,76 (Fr/kg) wirtschaftlich. Die Anlage B' erreicht die Wirtschaftlichkeitsgrenze

schon bei einem Heizölpreis von 0,63 (Fr/kg) und die Anlage C' bei 0,65 (Fr/kg) (Bild 40). Da die Zusatzerwärmung in einem sehr schlecht ausgelasteten Kessel erfolgt, der Betriebswirkungsgrad somit noch tiefer sinkt, wird man auch hier zu grösseren Absorberflächen als bei der Anlage B' tendieren. Die heutigen Preise für Heizöl müssten sich etwa verdoppeln, bis die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie bei den hier angenommenen Anlagepreisen und Amortisationszeiten konkurrenzfähig wird. Im Hinblick auf die Preissteigerung in den vergangenen zehn Jahren und die begrenzten Vorräte liegt eine Verdoppelung des Heizölpreises innerhalb der nächsten fünfzehn Jahre durchaus im Bereich des Möglichen.

Die Wirtschaftlichkeitsgrenzen der Bilder 39 und 40 basieren auf einer Amortisationszeit von fünfzehn Jahren. Es wird möglich sein, einen Grossteil der Anlagekomponenten wesentlich länger zu benutzen, gibt es doch weder im Speicher noch in den Kollektoren bewegliche Teile. In diesem Zusammenhang ist der Korrosionsverhütung grösste Bedeutung beizumessen. Bei einer Grossproduktion sollte es weiter möglich sein, einfache Kollektoren mit einer Scheibe für etwa 100 (Fr/m<sup>2</sup>) herzustellen. Auch am Speicher und den Armaturen wäre bei Grossproduktion eine Verbilligung möglich. Hier, auf der Produktionsseite muss die Entwicklung ansetzen. Gelingt es, bei einer Grossproduktion die Grenzwerte der Bilder 39 und 40 für die jeweiligen Energiepreise annähernd oder ganz zu erreichen, ist die Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie konkurrenzfähig.

Weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Sonnenenergienutzung liegen in kollektorseitigen Verbesserungen wie selektive Absorberschichtung und Reduktion der Absorptions- und Reflexionsverluste der Scheibe. Wie aus dem Bild 30 und der Tabelle 5 ersichtlich ist, darf man von solchen Massnahmen allerdings nicht zu viel erwarten. Sie lohnen sich für die Warmwasserbereitung nur, wenn sie sehr preisgünstig sind.

## SYMBOLVERZEICHNIS

A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
b	Breite	[m]
c	Koeffizient	
c <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]
c <sub>q</sub>	Koeffizient der zeitlichen Nutzwärmestromdichteänderung	[W/m <sup>2</sup> s]
C <sub>s</sub>	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
d	Tag (ab 1. Januar gezählt)	[-]
d <sub>a</sub>	Aussendurchmesser	[m]
d <sub>i</sub>	Innendurchmesser	[m]
e <sub>dH</sub>	diffuse Strahlungsenergie auf Horizontalfläche	[J/m <sup>2</sup> ]
e <sub>H</sub>	direkte Strahlungsenergie auf Horizontalfläche	[J/m <sup>2</sup> ]
ē	direkte Sonnenstrahlung auf Kollektorebene	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>d</sub>	diffuse Sonnenstrahlung auf Kollektorebene	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>H</sub>	direkte Sonnenstrahlung auf Horizontalebene	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>dH</sub>	diffuse Sonnenstrahlung auf Horizontalebene	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>N</sub>	direkte Sonnenstrahlung auf Normalebene zur Strahlungsrichtg.	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>r</sub>	reflektierte direkte Sonnenstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
ē <sub>dr</sub>	reflektierte diffuse Sonnenstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
f	Zinsfuß	[1/a]
g	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
I	Anschaffungskosten	[Fr]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
K	jährliche Kapitalkosten	[Fr/a]
L	Länge	[m]
M	Masse	[kg]
n	Brechzahl	[-]
p	Druck	[Pa]
P	Leistung	[W]
Q	Nutzwärme	[J]
q̇	Wärmestromdichte	[W/m <sup>2</sup> ]
Q̇	Wärmestrom	[W]
s	Länge	[m]
s <sub>R</sub>	Rohrabstand	[m]
t	Zeit	[s]
t <sub>A</sub>	Amortisationszeit	[a]



T	Temperatur	[K]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
w	Luftgeschwindigkeit	[m/s]
x	Hilfsgrösse	
y	Hilfsgrösse	
z	Anzahl parallel geschalteter Rohre	[-]
Gr	Grashofzahl	[-]
Nu	Nusseltzahl	[-]
Pr	Prandtlzahl	[-]
Re	Reynoldszahl	[-]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha^*$	Sonnenazimut	[-]
$\alpha_n$	natürlicher Absorptionskoeffizient	[1/m]
$\alpha_{nd}$	natürlicher Absorptionskoeffizient für diffuse Strahlung	[1/m]
$\beta$	geographische Breite	[-]
$\beta'$	thermischer Ausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\delta$	Deklination	[-]
$\epsilon$	Emissionskoeffizient	[-]
$\epsilon_a$	Absorptionskoeffizient	[-]
$\eta_K$	Kollektorwirkungsgrad	[-]
$\vartheta$	Temperatur	[C]
$\Theta_a$	Jahreszeitwinkel	[-]
$\Theta_d$	Tageszeitwinkel	[-]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
$\mu$	Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung	[-]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Dichte	[m <sup>3</sup> /kg]
$\varphi$	Einfallswinkel	[-]
$\psi$	Sonnenhöhenwinkel	[-]

#### Indices

a	aussen	A	Absorber	d	diffus
e	Wasserzulauf	f	freie Konvektion	F	Wärmeübertragungsmittel
G	gesamt	H	Horizontalebene	i	innen
I	Isolation	L	Luft	N	Normalebene

R	Rohrschlange	r	Reflexion	s	Wärmestrahlung
S	Speicher	u	Speicherumgebung	v	Verlust
V	Verbindungsleitung	W	Wasser		
1	äussere Scheibe oder äusserer Spalt				
2	innere Scheibe oder innerer Spalt				
$\alpha$	Anfang des Zeitintervalls				
$\omega$	Ende des Zeitintervalls				

## Literaturverzeichnis

- [1] Scala, S.M.: Betrachtungen über die Nutzenanwendung der Sonnenenergie, VDI-Ber. (1974) 224, 93/110
- [2] Hottel, H.C.: Solar energy, Chem. Engng. Progr. 71 (1975) 7, 53/65
- [3] Derksen, J.J.: Zonne-energie activiteiten in de USA, Ingenieur Den Hag 86 (1974) 14, 268/271
- [4] Schneider, W.: Zum Strahlungsproblem in Mitteleuropa, Klima+Kälte-Ing. 4 (1976) 3, 119/122
- [5] Schumacher, E., Leutwyler, S.: Speicherung von Sonnenenergie als chemische Energie, Kraft'erzeugung mit Sonnenenergie und Langzeit-Speicherung, Symposium III, G. Duttweiler-Institut, Rüschtikon (1975)
- [6] Blässer, G.: Wege zur chemischen Speicherung der Sonnenenergie, Wärme 81 (1976) 6, 113/117
- [7] Bonnet, D., Selders, M.: Nutzung der Sonnenenergie mit Solarzellen und superschwarzen Absorbern, Maschinenmarkt 81 (1975) 87, 1624/1626
- [8] Knoernschild, E.: Thermionik als "Abfallprodukt" der Weltraumtechnik, VDI-Z. 116 (1974) 11, 859/863
- [9] Epple, R., Fischer, H.: Trends und Probleme bei modernen Hochleistungs-solarzellen, Funkschau (1974) 1, 6/10, 59/60
- [10] Rowe, D.M.: Elektrizität aus Sonnenenergie, Arch. Energiewirtsch. 30 (1976) 1, 29/35.
- [11] Hottel, H.C.: Combustion and energy for the future, 14th Sympos. Combustion (1973), 1/23
- [12] Köhler, H.W.: Billige Solarzellen als Ziel, VDI-Nachrichten 30 (1976) 9, 6
- [13] Fischer, H.: Grosstechnische Erschließung der Sonnenenergie durch Halbleiter, elektron.-Anz. 7 (1975) 12, 297/299
- [14] Centrale solaire française au Mexique, Rev. gén. Electr. 84 (1975) 12, 989
- [15] Abraham, B.M., Schreiner, F.: General principles underlying chemical cycles which thermally decompose water into the elements, I[EC Fundam. 13 (1974) 4, 306/310
- [16] Hofmann, H.: Die Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe thermochemischer Reaktionen, Chemie-Ing. Techn. 48 (1976) 2, 87/91
- [17] Knoche, F., Cremer, H.: Exergetische Bewertung thermochemischer Wasserzersetzungprozesse, Brennst.-Wärme-Kraft 28 (1976) 2, 48/53
- [18] Bunn, P.D.: Sonnenenergie als Dauerlösung zur Ueberwindung der Energiekrise?, Arch. Energiewirtsch. 28 (1974) 9, 455/460
- [19] Ledinegg, M.: Heizung mit Sonnenenergie, Oesterreichische Ingenieur-Zeitschrift 18 (1975) 5, 135/139
- [20] Telkes, M.: Das Speichern von Sonnenenergie zum Heizen und Kühlen, Klima+Kälte-Ing. 2 (1974) 11, 465/470

- [21] Schröder, J.: Energiespeicherung in Form von Wärme, VDI-Ber. (1974) 223, 67/72
- [22] Laing, N.: Kristallisations-Wärmespeicher und deren Anwendung, VDI-Ber. (1974) 223, 49/65
- [23] Laing, N.: Latentenergiespeicher, Schweizerische Blätter für Heizung und Lüftung 42(1975)1, 7/10
- [24] Dietrich, G.: Raumheizung mit Sonnenenergie in der Bundesrepublik Deutschland, Brennst.-Wärme-Kraft 28(1976)1, 23/28
- [25] Birnbreier, H.: Nutzung von Sonnenenergie zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, BBC-Nachrichten (1975) 8/9, 503/509
- [26] Le Vaguerese, P.: Was gibt's Neues unter der Sonne Frankreichs?, Klima+Kälte-Ing. 4(1976)3, 103/106
- [27] Kesselring, P.: Die Nutzung der Sonnenenergie in der Schweiz - Hintergründe divergierender Prognosen, Elektrizitätsverwertung 50(1975)3, 65/72
- [28] Ziegenbein, V., Liemert, K.: Das BBC-Solarhaus - Planung einer Sonnenenergieheizanlage für ein Einfamilienhaus, Klima+Kälte-Ing. 4(1976)3, 95/98
- [29] Elsner, N., Schneider, M., Büttner, H.-J.: Berechnungsmodell zur optimalen Auslegung einer Wärmepumpenanlage, Luft- u. Kältetechn. 11(1975)2, 59/63
- [30] Justi, E.: Stand und Aussichten der Sonnenenergie, Nachr. Chem. Techn. 23(1975)16, 351/335
- [31] Ede, E.: Solar-Energie, Grundlagen und Aussichten für eine technische Nutzung, Chemie-Ing.-Techn. 47(1975)21, 873/879
- [32] Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 58. Aufl., R. Oldenbourg, München/Wien (1974)
- [33] Birnbreier, H.: Sonnenenergie zur Warmwasserbereitung in Haushalten - Messergebnisse von Untersuchungen in Mitteleuropa, Klima+Kälte-Ing. 4(1976)3, 99/102
- [34] Pielke, R.: Möglichkeiten der Sonnenenergienutzung in Deutschland, Klima+Kälte-Ing. 4(1976)3, 91/94
- [35] Hörster, H., Kersten, R., Mahdjuri, F.: Sonnenkollektoren mit hohem Wirkungsgrad, Klima+Kälte-Ing. 4(1976)3, 113/118
- [36] Russell, J. L.: Central station solar power - making a viable system economic, Power Engng. 78(1974)11, 39/41
- [37] Jurisson, J., Peterson, R. E., Mar, H. Y. B.: Principles and applications of selective solar coatings, J. Vac. Sci. Technol. 12(1975)5, 1010/1015
- [38] Apfel, J. H.: Optical coatings for collection and conservation of solar energy, J. Vac. Sci. Technol. 12(1975)5, 1016/1022
- [39] Hütte - des Ingenieurs Taschenbuch, Physikhütte, Bd. 2, 29. Aufl., W. Ernst [Sohn], Berlin/München/Düsseldorf (1971)
- [40] Fritz, W., Küster, W.: Beitrag zur Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe, Wärme- und Stoffübertragung 3(1970)3, 156/168
- [41] Gregorig, R.: Wärmeaustausch und Wärmeaustauscher, 2. Aufl., Sauerländer, Aarau/Frankfurt (1973)

- [42] Eckert,E.R.G.,Drake,R.M.:Analysis of heat and mass transfer,McGraw-Hill,  
New York (1972)
- [43] DIN 1349,Blatt 1 vom Juni 1972
- [44] VDI-Wärmeatlas, 2.Aufl.,VDI-Verlag, Düsseldorf(1974)
- [45] Valko,P.:Das kurzwellige Strahlungsfeld der Atmosphäre - Richtwerte für  
Ingenieure und Architekten, Schweizerische Blätter für Heizung und Lüftung  
37(1970),24/32,56/60,115/119, 38(1971),121/126
- [46] Kuczera,M.Günther,R.:Berechnung der Sonnendirekteinstrahlung auf ein  
Sonnenkraftwerk mit Parabolspiegeln, Brennst.-Wärme-Kraft 27(1975)11,418/421
- [47] Amstutz,G.:Kollektor zur thermischen Nutzung der Sonnenenergie, Diplomarbeit  
Kant.Technikum, Burgdorf(1976)
- [48] Unterlagen zur Reihe "Klimatologie der Schweiz", Messungen der Schweizerischen  
Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich-Kloten
- [49] Eckert,E.R.G.:Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch, 3.Aufl.,Springer,  
Berlin/Heidelberg/New York (1966)
- [50] Özisik,M.N.: Radiative Transfer, John Wiley & Sons,New York/London/Sydney/  
Toronto (1973)
- [51] Grigull,U.: Gröber/Erk/Grigull - Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 3.Aufl.,  
Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg(1963)
- [52] DIN 5496 vom Juli 1971
- [53] Bovy,A.J.,Woelk,G.:Untersuchungen zur freien Konvektion an ebenen Wänden,  
Wärme- und Stoffübertragung 4(1971)2,105/112
- [54] Zurmühl,R.:Praktische Mathematik,5.Aufl.,Springer,Berlin/Heidelberg/New York  
(1965)
- [55] Arnold,G.: Formeln der Mathematik,2.Aufl.,Carl Hanser, München/Wien (1975)
- [56] Grigull,U.: Die Ermittlung der wirtschaftlichen Isolierdicke, Brennst.-Wärme-  
Kraft 2(1950)5,125/127
- [57] Kreider,J.F.,Kreith,F.: Solar heating and cooling, Mc Graw-Hill, New York(1975)
- [58] Hausen,H.: Erweiterte Gleichung für den Wärmeübergang in Rohren bei  
turbulenter Strömung, Wärme- und Stoffübertragung 7(1974)4,222/225
- [59] Leuschner,G.: Kleines Pumpenhandbuch für Chemie und Technik, Verlag Chemie,  
Weinheim(1967)
- [60] Brauer,H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Sauerländer,  
Aarau/Frankfurt(1971)
- [61] Glysantin, Kühlerfrostschutz, Broschüre 22722 c II - 1096-172, BASF,  
D-6700 Ludwigshafen
- [62] Kesselring,P.:Sonnenenergie, Sonnenenergienutzung, Schweizer Mustermesse,  
Basel(1976),S.4/15
- [63] Valko,P.: Meteorologische Daten zur Sonnenenergienutzung, Schweizerische  
Meteorologische Zentralanstalt, Zürich (1976)

# Die Blaue TR-Reihe

	Fr./DM		Fr./DM
Heft 1	3.80	Heft 71	14.80
Heft 3	2.80	Heft 72	8.80
Heft 5	2.80	Heft 73	9.80
Heft 6	5.80	Heft 75	10.80
Heft 15	10.80	Heft 76	12.80
Heft 17	5.80	Heft 77	5.80
Heft 24	5.80	Heft 78	8.80
Heft 25	8.80	Heft 79	10.80
Heft 26	14.80	Heft 80	14.80
Heft 33	5.80	Heft 81	8.80
Heft 35	12.80	Heft 82	12.80
Heft 39	4.80	Heft 83	7.80
Heft 40	9.80	Heft 84	5.80
Heft 42	4.80	Heft 85	12.80
Heft 43	4.80	Heft 86	16.80
Heft 44	10.80	Heft 87	12.80
Heft 46	7.80	Heft 88	5.80
Heft 48	3.20	Heft 89	7.80
Heft 50	5.80	Heft 90	12.80
Heft 51	4.80	Heft 91	10.80
Heft 54	6.80	Heft 92	22.80
Heft 55	8.80	Heft 93	12.80
Heft 57	8.80	Heft 94	14.80
Heft 58	8.80	Heft 95	7.80
Heft 60	8.80	Heft 96	6.80
Heft 63	5.80	Heft 97	9.80
Heft 64	12.80	Heft 98	16.80
Heft 65	4.80	Heft 99	16.80
Heft 66	12.80	Heft 100	18.80
Heft 67	7.80	Heft 102	14.80
Heft 68	7.80	Heft 103	16.80
Heft 70	12.80	Heft 104	14.80
		Heft 105	7.80
		Heft 106	12.80
		Heft 107	12.80
		Heft 108	10.80
		Heft 109	14.80
		Heft 110	8.80
		Heft 111	16.80
		Heft 112	22.80
		Heft 113	20.80
		Heft 114	18.80
		Heft 115	22.80
		Heft 116	14.80
		Heft 117	20.80
		Heft 121	14.80
		Heft 125	18.80
		Heft 127	7.80

VERLAG «TECHNISCHE RUNDschau»

im Hallwag Verlag, CH-3000 BERN 1, Nordring 4  
 HALLWAG GmbH, D-7302 Ostfildern-Kemnat bei Stuttgart,  
 Marco-Polo-Strasse 1  
 Firma Dr. Franz Hain, A-1011 Wien 1, Wallnerstrasse 4

Heft 128