

### **Der Autor**

Jahrgang 1932, Diplomingenieur, Promotion 1965 (Thema der Dissertationsarbeit: Dynamik des Trocknens von flachförmigen Textilmaterialien). Prof. an der FH Gießen, dort Leiter des Institutes für Energiewirtschaft und Wärmeübertragung. Besonderes Interesse an Infrarot- und Strahlungstechnologie.

### **Kälte – Wärme – Klima – Aktuell**

Berichte aus den Fachbereichen Kälte, Wärme, Klima, Lüftung, Energie, Regelung, Gebäudeautomation, Schallschutz

Band 24

# **Krafterzeugung durch Sonnenenergie**

von **Manfred Künzle**



CFM

**Verlag C. F. Müller Karlsruhe**

Bei der Erstellung des Manuskriptes haben freundlicherweise mitgewirkt: Ursula Schilling, Wolfgang Fischbach, Edwin Frühwirth, Joachim Ledwig, Wolfgang Hollenriegel, Hans-J. Dietrich und Rudolf Knierim. Dafür gilt ihnen besonderer Dank.

| I N H A L T S V E R Z E I C H N I S   | Seite |
|---|-------|
| 1.0 Beschreibung der Aufgabe . . . . .  | 1     |
| 2.0 Wärmetechnische Fragen bei der Heißluftmaschine                                 |       |
| 3.0 Kreisprozesse allgemein . . . . .   | 3     |
| 3.1 Carnot-Prozeß . . . . .   | 3     |
| 3.2 Joule-Prozeß . . . . .  | 7     |
| 3.3 Ericson-Prozeß . . . . .  | 11    |
| 3.4 Stirling-Prozeß . . . . .   | 15    |
| 4.0 Sonnenstrahlung . . . . .   | 19    |
| 4.1 Extraterrestrische Sonnenstrahlung . . . . .                                    | 19    |
| 4.1.1 Die Sonne . . . . .   | 19    |
| 4.1.2 Die Solarkonstante . . . . .  | 21    |
| 4.1.3 Die spektrale Verteilung der extraterrestrischen Strahlung . . . . .          | 23    |
| 4.2 Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche . . . . .                                 | 26    |
| 4.2.1 Definitionen . . . . .  | 26    |
| 4.2.2 Schwankungen der extraterrestrischen Strahlung . . . . .                      | 28    |
| 4.2.3 Schwächung der direkten Strahlung . . . . .                                   | 29    |
| 4.2.4 Diffuse Strahlung auf dem Boden . . . . .                                     | 36    |
| 4.2.5 Die Richtung der direkten Strahlung . . . . .                                 | 37    |
| 4.2.6 Richtung der diffusen Strahlung . . . . .                                     | 44    |
| 4.2.7 Sonnenzeit und Zeitgleichung . . . . .  | 44    |
| 5.0 Sonnenkollektor als Energiewandler . . . . .                                    | 47    |
| 6.0 Die Problematik der Abdeckung der Flachsonnenkollektoren . . . . .              | 49    |
| 6.1 Der Vorgang auf der äußeren Fläche der Abdeckung . . . . .                      | 49    |
| Reflexion an der Oberfläche . . . . .   | 49    |
| 6.2 Der Vorgang innerhalb der transparenten Abdeckung . . . . .                     | 55    |
| 6.2.1 Die Schärfe des Überganges von der partiellen zur totalen Reflexion . . . . . | 55    |
| 6.2.2 Die mehrfache Reflexion in der transparenten Schicht . . . . .                | 57    |

---

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Künzel, Manfred**

Krafterzeugung durch Sonnenenergie / von Manfred Künzel. —

Karlsruhe: Müller, 1978. —

(Kälte, Wärme, Klima aktuell; Bd. 24)

ISBN 3-7880-7104-4

---

ISBN 3-7880-7104-4

© 1978 Verlag C. F. Müller, Karlsruhe

Gesamtherstellung:

C. F. Müller, Großdruckerei und Verlag GmbH, Karlsruhe

|  | Seite |   | Seite |
|--|-------|---|-------|
| 6.2.3 Die Strahlungsabsorption in den partiell-transparenten Medien . . . . .                                      | 60    | 8.3 Einsatzfähige Form des Stirling-Motors für die Ausnutzung der Sonnenenergie . . . . . | 117   |
| 6.2.4 Die Wechselwirkung zwischen der Reflexion, Transmission und Absorption bei transparenten Schichten . . . . . | 65    | 9.0 Wärmespeicherung . . . . .  | 121   |
| 6.2.5 Spektrales Transmissionsvermögen . . . . .   | 68    | 10.0 Wärmetransport . . . . .   | 128   |
| 6.2.6 Partieller sphärischer Transmissionsgrad für das gesamte Wellenlängengebiet . . . . .                        | 74    | 10.1 Funktionsprinzip des Wärmerohrs . . . . .  | 128   |
| 6.2.7 Prozentsatz der Sonnenstrahlung im gewissen Wellenlängenbereich . . . . .                                    | 75    | 10.2 Wichtige Eigenschaften von Wärmerohren . . . . .                                     | 130   |
| 6.2.8 Transmissionskurve mit/ohne Berücksichtigung der Reflexion . . . . .   | 78    | 10.3 Temperaturbereiche und Materialien . . . . .   | 131   |
| 6.3 Die Wechselwirkung zwischen dem Absorber und der Abdeckung ((t.a <sub>A</sub> )-Produkt) . . . . .             | 82    | 10.4 Konstruktionsprinzipien . . . . .  | 132   |
| 6.3.1 Durchschnittswert des diffusen Reflexionsgrades . . . . .  | 83    | 10.5 Grenzen des Energietransports in Wärmerohren . . . . .                               | 135   |
| 7.0 Solare Kraftwerke . . . . .  | 85    | 11.0 Konzept eines solaren Kleinkraftwerkes mit dem Spilling-Motor . . . . .              | 138   |
| 7.1 Sonnenkraftwerke auf der Flachkollektoren-Basis . . . . .  | 87    | 11.1 Arbeitsweise des Sonnenkraftwerkes . . . . .   | 139   |
| 7.2 Solar-Farm . . . . .   | 90    | 11.2 Spilling-Motor . . . . .   | 142   |
| 7.2.1 Prinzip und Arbeitsweise der Solar-Farm . . . . .  | 90    | 11.2.1 Die Baukastenbauweise und ihre Vorteile . . . . .                                  | 143   |
| 7.2.2 Leistungsspektrum der Solar-Farm . . . . .   | 93    | 11.3 Auswahl des Kollektortyps . . . . .  | 145   |
| 7.2.3 Strahlungsempfänger . . . . .  | 94    | 11.4 Anordnung der Kollektorfläche . . . . .  | 146   |
| 7.2.4 Energiewandler . . . . .   | 96    | 11.5 Auswahl des Kältemittels . . . . .   | 147   |
| 7.2.5 Einsatzmöglichkeiten der Solar-Farm . . . . .  | 99    | 11.6 Technische Daten . . . . .   | 148   |
| 7.2.6 Typische Merkmale der Solar-Farm . . . . .   | 101   | Schlußwort . . . . .  | 150   |
| 7.3 Solar-Tower . . . . .  | 102   | Anhang . . . . .  | 151   |
| 7.4 Sonnenkraftwerke auf der kombinierten Flachkollektoren- und Solar-Farm-Basis . . . . .                         | 101   | Schrifttum . . . . .  | 157   |
| 8.0 Umwandlung von Sonnenenergie in mechanische Energie durch den Stirling-Motor . . . . .                         | 109   |   |       |
| 8.1 Arten der Primärenergie für den Antrieb des Stirling-Motor . . . . .   | 112   |   |       |
| 8.2 Die adaptierfähige Form des Stirling-Motors für die Ausnutzung der Sonnenenergie . . . . .                     | 112   |   |       |

## 11.0 KONZEPT EINES SOLAREN KLEINKRAFTWERKES MIT DEM SPILLING-MOTOR

Die Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie vollzieht sich in folgenden Schritten:

1. Sammlung der Sonneneinstrahlungsenergie und deren Umwandlung in Wärmeenergie,
2. Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Energie,
3. Umwandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie.

Für jeden dieser Schritte existieren gute Methoden und Geräte bzw. Maschinen, nur sind leider insbesondere die Schritte 1. und 2. nicht bestens aufeinander abgestimmt. Die in großer Zahl vorhandenen und preiswerten solaren Flachkollektoren erzeugen Temperaturen von weniger oder bestenfalls von etwas über  $100^{\circ}\text{C}$ , während die gebräuchlichen Wärmekraftmaschinen (Kolbendampfmaschinen und Turbinen) Heißdampf von mehreren hundert Grad Celsius und entsprechenden Druck benötigen, um mit einem guten Wirkungsgrad zu arbeiten (Carnot-Kreisprozeß).

Um normale Wärmekraftmaschinen verwenden zu können, müßten also hochwertige Parabolkollektoren gebaut werden, wobei die Wirtschaftlichkeit hier nur bei großen Einheiten gegeben ist.

Trotz des hohen Aufwandes werden schon die sogenannten "solar power farms" und "solar power towers" in Gegenden hoher Sonneneinstrahlung geplant und errichtet.

Bis zum Enderfolg dieser Systeme werden aber noch Jahre vergehen und gerade in Entwicklungsländern, die weitab jeglicher Infrastruktur liegen, wäre es besonders wünschenswert kleinere Solarkraftwerke zu bauen, um gewisse Gebiete dezentral mit Energie zu versorgen.

Am Institut für Energiewirtschaft und Wärmeübertragung an der Fachhochschule Gießen ist ein Konzept eines kleinen solaren Kraftwerkes ausgearbeitet worden.

Das Kraftwerk kann mit einfachsten und billigsten Mitteln gebaut werden und ist für die dezentrale Versorgung mit Energie in Entwicklungsländern gedacht.

### 11.1. ARBEITSWEISE DES SONNENKRAFTWERKES

Da auch unter günstigen Bedingungen in solaren Flachkollektoren Temperaturen über  $120^{\circ}\text{C}$  kaum erreichbar sind, erscheint der Einsatz von Wasser als Arbeitsmedium ungeeignet, weil der dabei entstehende Dampf zu Krafterzeugung ungeeignet ist.

Ein Kältemittel hingegen, welches bei den erreichbaren Temperaturen vergleichsweise höhere Drücke als Wasser aufweist, bietet sich zur Entspannung in einer geeigneten Kraftmaschine an. Anstelle einer Turbine ist für die Entspannung des Kältemitteldampfes ein Spilling- Dampfmotor gewählt worden, da dieser unter den gegebenen Bedingungen einen günstigeren thermodynamischen Wirkungsgrad aufweist.

Aus wirtschaftlichen und technischen Aspekten wurde ein Zweikreisssystem gewählt, wobei im Primärkreislauf Wasser, im Sekundärkreislauf Kältemittel als Arbeitsmittel dient. In den Abbildungen 11.1 und 11.2 sind räumliche Anordnung und Schaltbild des Kraftwerkes dargestellt.

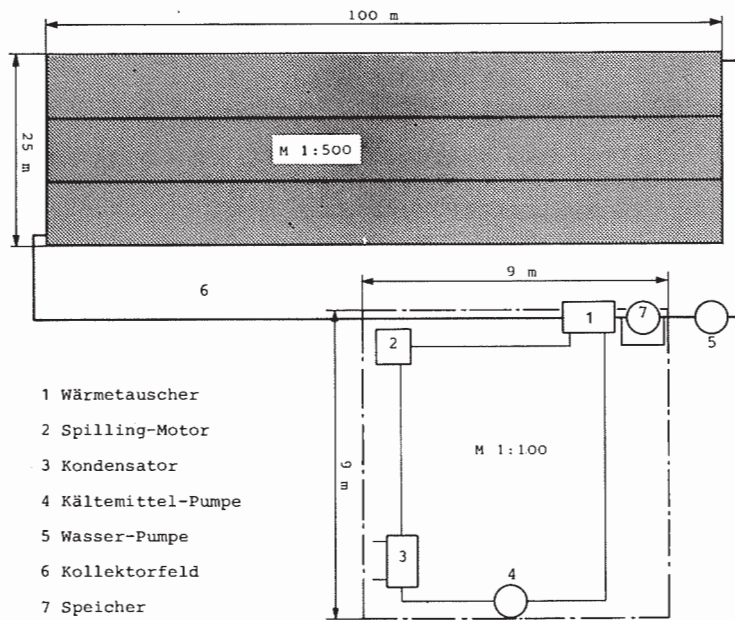


Abb.11.1: Räumliche Anordnung des Sonnenkraftwerkes

Das Wasser des Primärkreislaufes wird in den Flachkollektoren (6) erwärmt und durch eine Umwälzpumpe (5) zum Wärmetauscher (1) gepumpt, in dem der Wärmeaustausch zum verdampfenden Kältemittel stattfindet. Das Kältemittel, welches den Wärmetauscher als Satttdampf verläßt, gelangt zum Spilling-Motor (2), wo die Wärmeenergie unter Enthalpieabnahme in mechanische Energie umgewandelt wird. Der Kältemitteldampf wird im Kondensator (3) durch Meerwasser verflüssigt. Das Kondensat wird durch eine Umwälzpumpe (4) wieder dem Wärmetauscher zugeführt. Damit der Spilling-Motor kontinuierlich arbeiten kann, ist in den Primärkreislauf ein Speicher (7) integriert, welcher bei wechselnder Sonneneinstrahlung als Wärme-Puffer wirkt. Die Inbetriebnahme der Pumpen während des Anfahrvorganges erfolgt durch ein Anlaßaggregat.

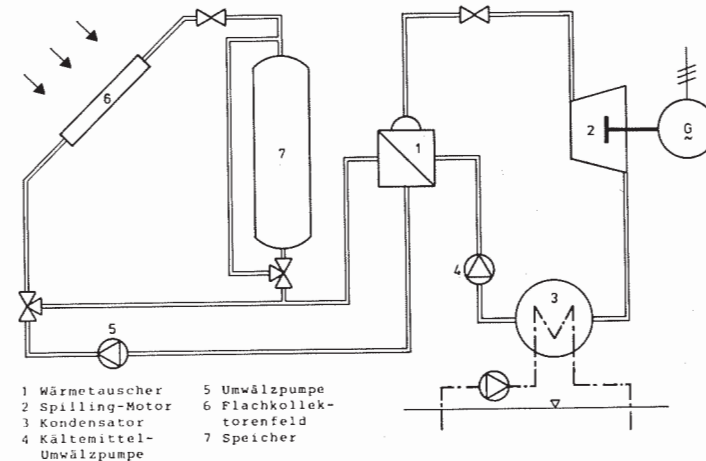


Abb.11.2: Schaltbild des solaren Kleinkraftwerkes mit Spillingmotor (Entwurf FH-Gießen)

## 11.2 SPILLING MOTOR

Die Auslegung der Anlage beruht auf dem von der Fa. Spilling angebotenen Dampfmotor-Basismodell von 37 kWel. Durch die Baukastenbauweise des Spillingmotors kann die Leistung durch Aneinanderreihung von mehreren Einheiten bis zu ihrem fünf-fachen Wert gesteigert werden, bei entsprechender Dampfversorgung. Die Normdrehzahlen der Grund-Leistungseinheiten betragen 750, 1000 und 1500 1/min. Da dies Normdrehzahlen für Drehstromgeneratoren sind, ist eine direkte Kopplung möglich. Abb. 11.3 zeigt das Basismodell des Spilling-Motors von 37 kW (mit Kupplung).

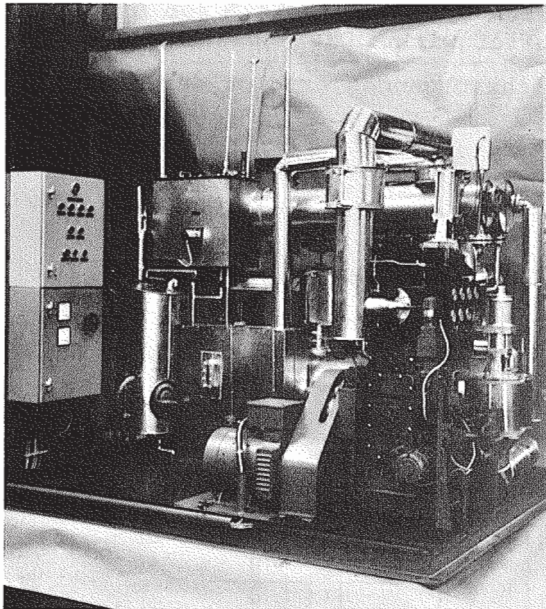


Abb.11.3: Das Basismodell des Spilling-Motors der Fa. Spilling, Hamburg

Der optimale Einsatz des Spilling-Motors liegt bei Druckverhältnissen von Eintrittsdruck zu Austrittsdruck zwischen 2,5 und 4,0 bar absolut. In diesem Druckbereich kann mit Gütegraden zwischen 85 und 75 % gerechnet werden. Der mechanische Wirkungsgrad liegt bei ca. 90 %. Richtwerte für den optimalen Einsatz des Spilling-Motors sind in der Abb.11.4 schematisch dargestellt.

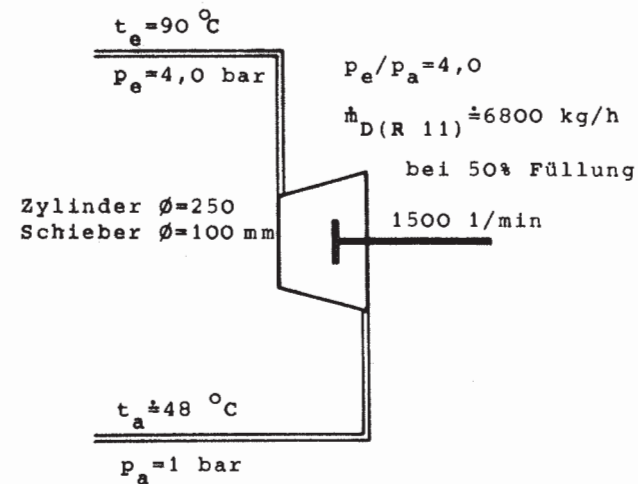


Abb.11.4: Richtwerte für den optimalen Einsatz des Spillingmotors in einem solaren Kraftwerk. Arbeitsmedium: R11

### 11.2.1 Die Baukastenbauweise und ihre Vorteile

Die Baukastenweise beruht darauf, daß die nach ihr gebaute Maschine konstruktiv aus mehreren in sich geschlossenen

Bauelementen besteht, die baukastenartig zur fertigen Maschine zusammengebaut werden. Beim Spilling-Dampf-motor ist dieses Baukasten-Prinzip in einer Weise durchgeführt und vervollkommenet, wie sie im Welt-Kraftmaschinenbau einmalig ist.

Im Gegensatz zu anderen Dampfmaschinen ist der Spilling-Dampfmotor nicht horizontal, sondern vertikal gegliedert. Ein Vierzylinder-Motor besteht hier also nicht aus einer Grundplatte, einem Gehäuse und den Zylindern, sondern seine "Grundbausteine" sind:

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1 Triebwerksblock + 1 Zylinderblock        | = 1 Motoblock      |
| 1 Motorblock (Leistungseinheit)            | = 1 Einzyl.-Motor  |
| 1 Motorblock + 1 Motorblock                | = 1 Zweizyl.-Motor |
| 1 Motorblock + 1 Motorblock + 1 Motorblock | = 1 Dreizyl.-Motor |

usw. bis zum Zehnzylinder-Motor

Die Erweiterungsfähigkeit des Basismodells ist in der Abb.11.5 schematisch dargestellt.

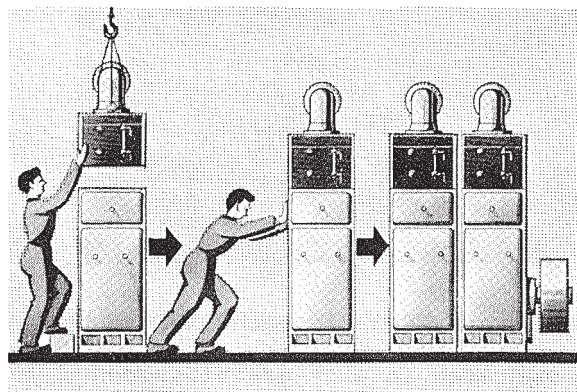


Abb.11.5: Schematische Darstellung der Erweiterungsfähigkeit des Basismodells

Durch diese Bauweise aus baukastenartig zusammengefügt Motorblöcken bzw. Leistungseinheiten ergibt sich die Möglichkeit der leistungsmäßigen Erweiterung des Spilling-Motors am Aufstellungsort.

Erweist sich also die Leistung des aufgestellten Dampf-motors nach längerer Betriebszeit als nicht mehr ausreichend, so kann sie durch nachträglichen Anbau eines oder mehrerer Motorblöcke bzw. Leistungseinheiten entsprechend erhöht und dem gestiegenen Bedarf angepaßt werden. Bei Neuplanungen braucht man daher auch keine höheren Maschinenleistungen mit Reservezuschlag und damit größeren Kapitalaufwand zu wählen, als es dem tatsächlichen augenblicklichen Bedarf entspricht, weil der Spilling-Dampfmotor mit dem Betrieb selbst wachsen kann. Der Baukasten besteht aus Zylinder- und Triebwerksblock sowie einer zugehörigen Steuerwelle.

### 11.3 AUSWAHL DES KOLLEKTORTYPS

Um einen möglichst geringen Bauaufwand zu erreichen, wurden Flachkollektoren eingesetzt. Als Berechnungsgrundlage dienten Unterlagen der Fa. John & Co. Zu den technischen Daten gehören:

- . Länge x Breite = 2,0 x 1,3 m,
- . Gesamtfläche = 2,6 m<sup>2</sup>, effektive Nutzfläche = 2,4 m<sup>2</sup>,
- . k-Wert nach oben und nach unten = 2,32 bzw. 0,46 W/m<sup>2</sup> K,

. Gesamtabsorptions-, -emissions- und -transmissionsgrad

$$a = 0,945; \epsilon = 0,725; t = 0,8.$$

Weitere Angaben sind direkt den Unterlagen der Fa. John & Co. zu entnehmen.

#### 11.4 ANORDNUNG DER KOLLEKTORFLÄCHE

Die Gesamtanordnung der Kollektorfläche, die sich aus dem Rechengang ergab, ist mit ihren Abmessungen in der Abb.11.6 dargestellt. Die gesamte Rohrführung (Vorlauf-, Rücklauf- und Verteilungsleitungen) ist rechnerisch untersucht worden.

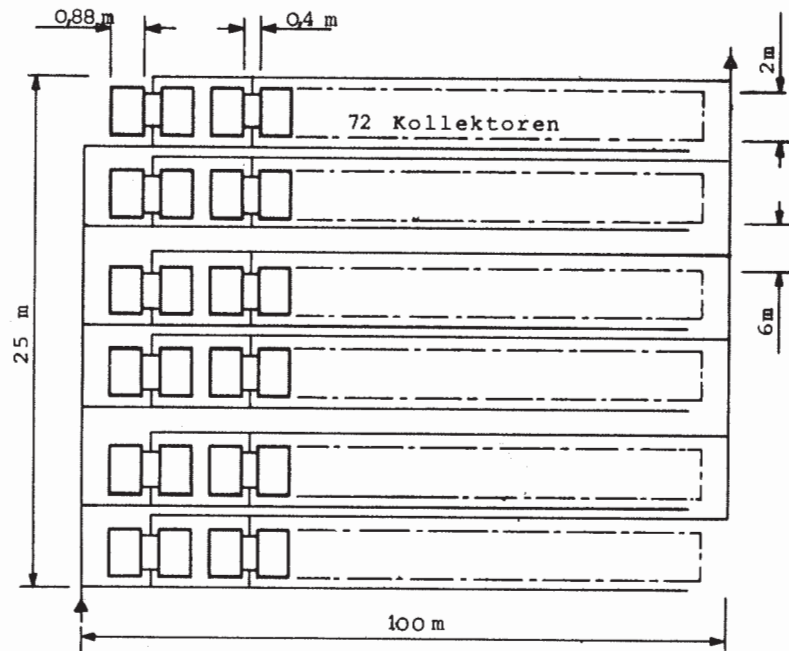


Abb. 11.6: Anordnung der Kollektorfläche

#### 11.5 AUSWAHL DES KÄ

Um bei gegebener Kondensationstemperatur eine größtmögliche Enthalpiedifferenz im Spilling-Dampfmotor nutzen zu können, wurde aus einer Anzahl geeignet erscheinender Kältemittel (R12, R113, R114, R11) das Kältemittel R11 als Wärmeträger gewählt, da dieses bei dem vorgegebenen Druckverhältnis  $p_v/p_k = 4$  die größte Enthalpiedifferenz aufweist. Die dazu gehörende Verdampfungstemperatur beträgt  $t_v = 93^\circ\text{C}$ . (Siehe dazu Tabelle III, Anhang).

Die Abb.11.7 zeigt die Zustandsänderung für das gewählte Kältemittel R11.

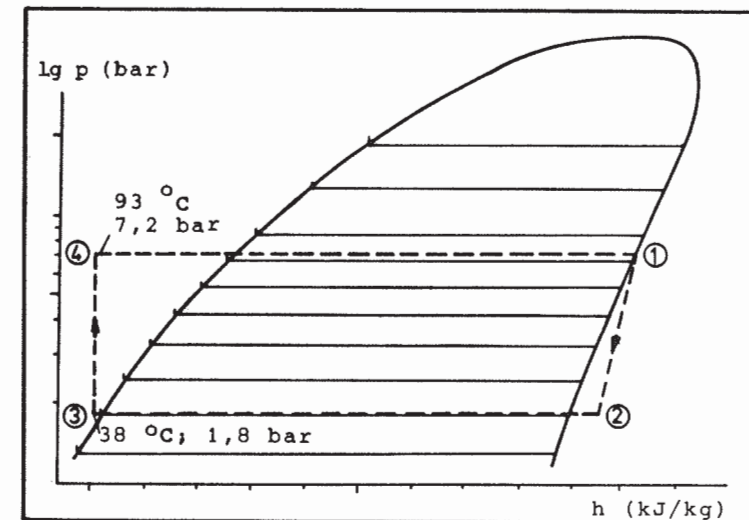


Abb.11.7: Verlauf der Zustandsänderung für R11 als Wärmeträger



## 11.6 TECHNISCHE DATEN

### Solarkreis

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| Kollektor                   | - | Flachkollektor d.Fa. John & Co.   |
| Kollektorfläche             | - | 732 m <sup>2</sup> Netto  |
| Spezifische Kollektorfläche | - | 24,4 m <sup>2</sup> /kW (Netto)   |
| Wassereintrittstemperatur   | - | 70 °C   |
| Wasseraustrittstemperatur   | - | 95 - 120 °C   |
| Wasserdurchsatz             | - | 3,95 kg /S  |
| Speicher                    | - | Ermöglicht den kontinuierlichen Betrieb der Anlage, bei einer Temperaturabsenkung im Solar-kreis auf 80 °C, für eine halbe Stunde |
| Speicherkapazität           | - | 5,0 m <sup>3</sup>  |

### Frigenkreis

|                     |   |                         |
|---------------------|---|-------------------------|
| Arbeitsmedium       | - | R 11                    |
| Kraftmaschine       | - | Spillingmotor Typ 40/50 |
| abgegebene Leistung | - | 33 kW                   |
| Drehzahl            | - |                         |
| Eintrittstemperatur | - | 93 °C                   |
| Eintrittsdruck      | - | 7,2 bar                 |
| Ausgangstemperatur  | - | 53 °C                   |
| Ausgangsdruck       | - | 1,8 bar                 |
| Wärmetauscher       | - | 512 kW                  |
| Frigendurchsatz     | - | 2,42 kg /S              |

### Kondensatorkreis

|                           |   |         |
|---------------------------|---|---------|
| Kühlmittel                | - | Wasser  |
| Wassereintrittstemperatur | - | 28 °C   |
| Wasseraustrittstemperatur | - | 40 °C   |
| Wasserdurchsatz           | - | 3 kg /S |
| Kondensatorleistung       | - | 470 kW  |

### Generator

|          |   |  |
|----------|---|--|
| Typ      | - | Drei-Phasen-Drehstrom-generator mit Normdrehzahl |
| Leistung | - | 30 kVA   |
| Spannung | - | 380 V  |