

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Anlagenbeschreibung	9
2.1	Überblick	9
2.2	Die Adsorptionskältemaschine	10
2.3	Der Solarkollektor	13
2.4	Der Schichtladespeicher	14
2.5	Die Kühldecken im Gebäude	14
3	Programmtechnische Umsetzung	15
3.1	Einführung	15
3.2	Objektorientierte Programmierung	15
3.3	Die Klasse <i>TElement</i> und ihre Nachfahren	16
3.3.1	Die Klasse <i>TElement</i>	16
3.3.2	Die Klasse <i>TAdKM</i>	17
3.3.3	Die Klasse <i>TKollektor</i>	20
3.3.4	Die Klasse <i>TSpeicher</i>	21
3.3.5	Die Klasse <i>TKaelteVerbraucher</i>	25
3.4	Die Klasse <i>TTextBearb</i> und ihre Nachfahren	27
3.4.1	Die Klasse <i>TTextBearb</i>	27
3.4.2	Die Klasse <i>TReader</i>	27
3.4.3	Die Klasse <i>TWriter</i>	28
3.5	Die Klasse <i>TTimer</i>	28
3.6	Die Klasse <i>TCoordinator</i>	29
3.7	Stoffwerte	30
3.8	Vor- und Nachteile des Modells / Programms	31
4	Benutzer-Handbuch	32
4.1	Vorbemerkungen	32
4.2	Installation	32
4.3	Komponenten	33
4.3.1	Kollektorfeld	33
4.3.2	Speicher	33
4.3.3	Adsorptionskältemaschine	33
4.3.4	Kälteverbraucher	34
4.4	Bedienung	34
4.4.1	Allgemeines	34
4.4.2	<i>E/A</i> -Karte	34
4.4.3	<i>Kollektor</i> -Karte	37
4.4.4	<i>Speicher</i> -Karte	38
4.4.5	<i>AdKM</i> -Karte	38
4.4.6	<i>Verbraucher</i> -Karte	41
4.4.7	<i>Ergebnisse</i>	42
4.4.8	<i>Info</i>	43

5	Testrechnungen	44
5.1	Vorbemerkungen	44
5.2	Kurzzeitrechnungen	45
5.2.1	Vorgaben	45
5.2.2	Ergebnisse	46
5.3	Tagesrechnungen	50
5.3.1	Vorgaben	50
5.3.2	Ergebnisse	52
5.4	Jahresrechnungen	55
5.4.1	Vorgaben	55
5.4.2	Ergebnisse	55
6	Zusammenfassung und Ausblick	61

Abbildungsverzeichnis

1	Schema der Kälteanlage	9
2	Die Temperaturen an der AdKM	10
3	Aufbau einer AdKM	11
4	Sorptionsprozeß im Isosterendiagramm	12
5	Schnitt durch einen Flachkollektor	13
6	Mögliche Schaltzustände der AdKM	18
7	Schaltwege der AdKM	19
8	Entnahme eines Volumenelementes aus dem Speicher	22
9	Ein Speichersegment	23
10	PAP der Prozedur <i>TSpeicher.Mischen</i>	25
11	Nutzung der Feldvariablen durch die Objekte	29
12	Ansicht der <i>E/A</i> -Karte	35
13	Ansicht der <i>Kollektor</i> -Karte	37
14	Zur Definition von <i>Neigung</i> und <i>Ausrichtung</i> des Solarkollektors	38
15	Ansicht der <i>Speicher</i> -Karte	39
16	Ansicht der <i>AdKM</i> -Karte	39
17	Ansicht der <i>Verbraucher</i> -Karte	41
18	Ansicht der Karte <i>Ergebnisse</i>	43
19	Arbeitszyklen der AdKM im <i>Nennfall</i>	47
20	Arbeitszyklen der AdKM im Fall <i>Kamenz</i>	48
21	Das Betriebsverhalten der Anlage am 20. Juni	53
22	Das Betriebsverhalten der Anlage am 23. Mai	54
23	Ergebnisse der Jahresrechnung Grundvariante	56
24	Wärmemengen-Jahresbilanz der Grundvariante <i>Kamenz</i>	57
25	Einfluß der Kollektorfläche auf den Solarertrag	57
26	Einfluß des Speichervolumens auf den Solarertrag	58
27	Einfluß des Kühlbeginns auf den Solarertrag	59

Tabellenverzeichnis

1	Zur Analogie zwischen Variable und Objekt	15
2	Deklaration der Klasse <i>TElement</i>	17
3	Definition der Schaltzustände	18
4	Extern verwendete Ergebnisse der Funktion <i>TAdKM.Betrieb</i>	20
5	Extern verwendete Ergebnisse der Funktion <i>TKollektor.TempAus</i>	21
6	Die Methoden der Klasse <i>TKaelteVerbraucher</i>	26
7	Die Argumente der Funktion <i>TTextBearb.Teilstring</i>	27
8	Gegenüberstellung der Ergebnisdateien	28
9	Verwendete mittlere Stoffwerte von Wasser	31
10	Rechenzeiten verschiedener Prozessortypen für eine Jahressimulation	32
11	<i>AdSOL</i> -Verzeichnisstruktur	32
12	Auszug aus einer Wetterdatei	36
13	Zur Festlegung der Kennlinie der Heiztemperatur	40
14	Gebäudetypen	42
15	Schwellwerte zur Simulation der externen Regelung der AdKM	44
16	Schwellwerte zur Simulation der internen Regelung der AdKM	45
17	Projektdateien für die Kurzzeitrechnungen	45
18	Ergebnisübersicht zur externen Regelung	49
19	Ergebnisübersicht zur internen Regelung	50
20	Eingaben zur Berechnung der Teilanlage der solaren Klimatisierung des Malteser-Krankenhauses in Kamenz	51
21	Ergebnisübersicht zu den Tagesrechnungen	52
22	Solarerträge unterschiedlicher Flachkollektoren	58
23	Einfluß des Kühlbeginns auf die Jahres-Kältemenge	59
24	Einfluß der AdKM-Regelung auf den Solarertrag	60

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c	spez. Wärmekapazität	$kJ/(kg\ K)$
COP	Kälteverhältnis	–
D	Durchmesser	m
DG	solarer Deckungsgrad	–
H	Höhe	m
I	Solarstrahlung	W/m^2
$KNNG$	Kollektornutzungsgrad	–
m	Masse	kg
p	Druck	kPa
Q	Wärmemenge	kJ
\dot{Q}	Wärmestrom	kW
R	Wärmedurchgangswiderstand	K/W
t	Celsiustemperatur	$^{\circ}C$
T	absolute Temperatur	K
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/h
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2\ K)$
δ	Dicke	m
Δ	Differenz	
η	Einfallwinkel der Solarstrahlung	$^{\circ}$
λ	Wärmeleitkoeffizient	$W/(m\ K)$
ρ	Dichte	kg/m^3
τ	Zeit	s

Indexverzeichnis

Index	Bedeutung
<i>a</i>	außen
<i>Ab</i>	Austritt aus AdKM
<i>alt</i>	indiziert Wert aus vorangegangenem Rechenzyklus
<i>ax</i>	axial
<i>d</i>	diffus
<i>Ebene</i>	indiziert den ebenen Kopf und Fuß des Speichers
<i>Einstr</i>	Einstrahlung
<i>err</i>	errechnet
<i>ges</i>	gesamt
<i>Heiz</i>	Heizwasser
<i>i</i>	innen, Zählindex
<i>Iso</i>	Isolation
<i>Kalt</i>	Kaltwasser
<i>Koll</i>	Kollektor
<i>Kuehl</i>	Kühlwasser
<i>Nachheiz</i>	Nachheizung
<i>neu</i>	indiziert Wert aus aktuellem Rechenzyklus
<i>r</i>	radial
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>S</i>	Schwellwert
<i>Seg</i>	Speichersegment
<i>SO</i>	oberer Schwellwert
<i>Speise</i>	Einspeisung
<i>SU</i>	unterer Schwellwert
<i>theo</i>	theoretisch
<i>U</i>	Umgebung
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>W</i>	Wasser
<i>Zu</i>	Eintritt in AdKM
<i>Zyl</i>	Zylinder

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
<i>AdKM</i>	Adsorptionskältemaschine
<i>ASCII</i>	American Standard Code for Information Interchange
<i>BHKW</i>	Blockheizkraftwerk
<i>OOP</i>	Objektorientierte Programmierung
<i>PAP</i>	Programmablaufplan
<i>TWD</i>	transparente Wärmedämmung
<i>WÜ</i>	Wärmeübertrager

1 Einleitung

Heute werden für Klimatisierungsaufgaben große Energiemengen eingesetzt. Es ist abzusehen, daß der weltweite Klimatisierungsbedarf kurz- und mittelfristig weiter ansteigen wird.

“Kälteerzeugung“ durch Sorptionsprozesse bietet den Vorteil, daß sie durch thermische Energie “angetrieben“ werden kann. Aufgrund der guten zeitlichen Übereinstimmung von Klimatisierungsbedarf und Solarstrahlungsangebot, liegt der Einsatz von solarthermischen Anlagen zur Bereitstellung der Heizenergie auf der Hand. Damit wird nicht nur das Klima des Gebäudes sondern auch das globale Klima günstig beeinflusst. Auch die Abwärme von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die im Sommer kaum Abnehmer findet, kann zur Heizung verwendet werden. Damit wird die Brennstoffausnutzung und der Gesamtnutzungsgrad dieser Anlagen wesentlich erhöht, was ebenfalls zur Verminderung des Kohlendioxid-Ausstoßes führt.

Bisher standen der umfangreichen Nutzung der Sorptions- und Solartechnik die hohen Kosten im Weg. Es bleibt zu hoffen, daß zumindest in südlichen Ländern ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Technik zu verwirklichen ist.

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde für eine Anlage der solaren Klimatisierung mit einer Adsorptionskältemaschine ein Simulationsprogramm geschrieben und getestet.

Im Abschnitt 2 wird die physikalische Anlage beschrieben. Der Abschnitt 3 beschäftigt sich mit der Struktur des Programms sowie der Modellierung der Anlage. Die Handhabung des Programms wird im Abschnitt 4 beschrieben. Schließlich werden im Abschnitt 5 durchgeführte Testrechnungen besprochen.

Bei der Darstellung der verschiedenen Themen ließen sich gewisse Überschneidungen nicht vermeiden. So wird z.B. im Abschnitt 4 die bewußt allgemein gehaltenene Beschreibung der Anlage aus Abschnitt 2 vertieft.

2 Anlagenbeschreibung

2.1 Überblick

In Abbildung 1 wird die Konfiguration der Kälteanlage dargestellt. Ihre Hauptkomponenten bestehen aus einer Adsorptionskältemaschine (AdKM), einem Solarkollektorfeld, einem Schichtladespeicher, dem zu kühlenden Gebäude sowie Kühlturm und Nachheizung. Bevor auf die einzelnen Anlagenkomponenten näher eingegangen wird, soll zunächst deren Zusammenspiel beschrieben werden. Das Kollektorfeld wird im folgenden vereinfachend nur noch als Kollektor bezeichnet.

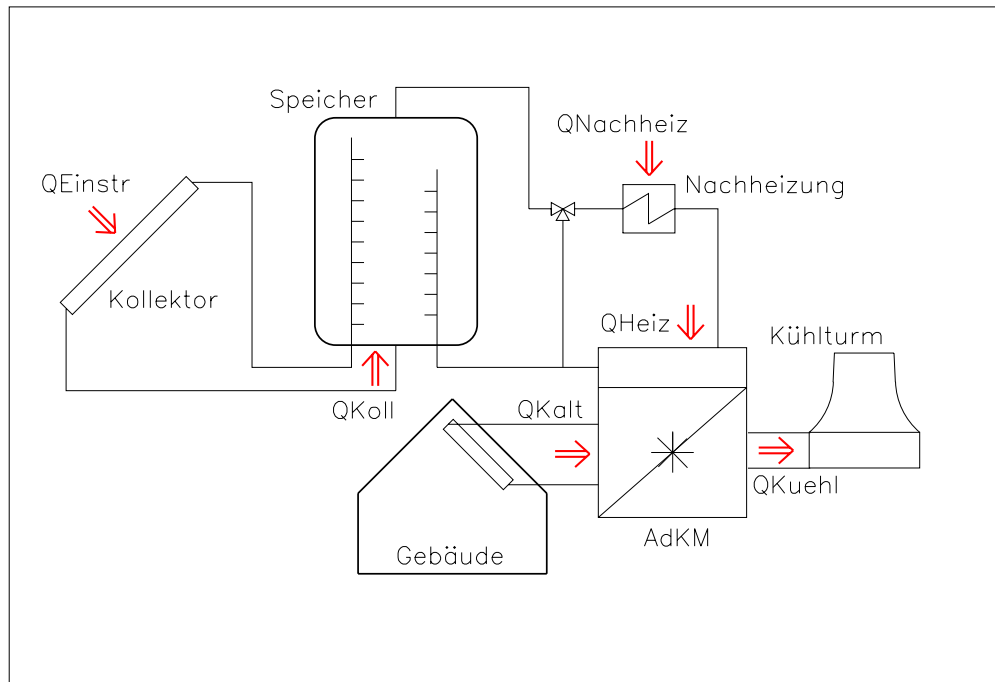


Abbildung 1: Schema der Kälteanlage

Vorrang bei der Deckung des Bedarfs an Heizenergie der AdKM hat der Solarkollektor. Das im Kollektor erwärmte Wasser wird über Schichtladerohre in definierte Schichten des Speichertanks gebracht. Dadurch wird eine Vermischung der Schichten unterschiedlicher Temperatur weitgehend vermieden. Von unten wird das Wasser für den Kollektor abgezogen.

Das Heizwasser für die Kältemaschine wird dem Speicher von oben entnommen. Die Heiztemperatur wird dabei durch Nachheizung bzw. Rücklaufbeimischung geregelt. Da die Heizungs-Austrittstemperatur immer noch vergleichsweise hoch ist, wird hier das Wasser ebenfalls über Schichtladerohre in den Speicher zurückgeführt. Nur im Fall, daß die Heizungs-Austrittstemperatur höher ist als die maximale Temperatur im Speicher, gelangt das Wasser über das Drei-Wege-Ventil wieder direkt zur Heizung.

Über Kühldecken wird die im Gebäude anfallende Wärme der AdKM zugeführt. Wie in Abschnitt 2.2 noch näher zu erläutern sein wird, entzieht die AdKM ihrerseits dem Kaltwasser wieder diese Wärme. Die Abwärme dieses Prozesses wird über einen Verdunstungskühlturm an die Umgebung abgegeben.

2.2 Die Adsorptionskältemaschine

Definition der Temperaturen an der AdKM

Für das Verständnis kommender Ausführungen ist es wichtig, die Temperaturen um die AdKM zu definieren. Dazu dient Abbildung 2.

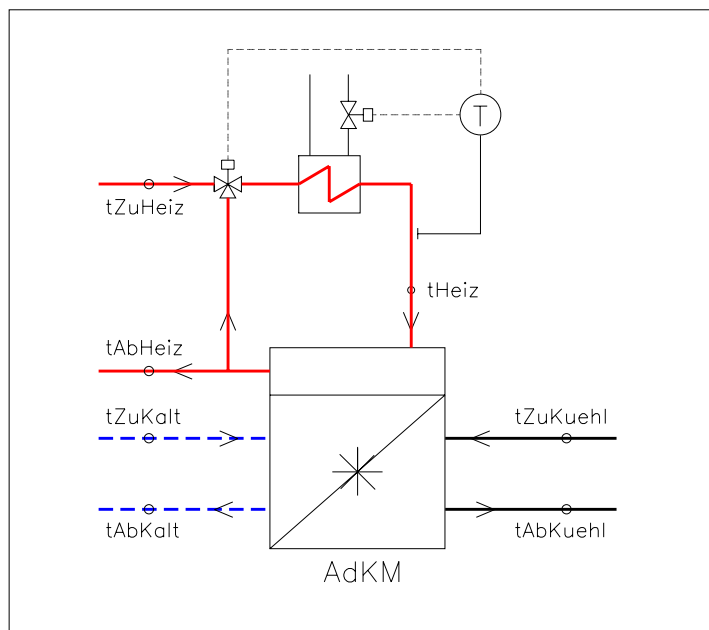


Abbildung 2: Die Temperaturen an der AdKM

Aufbau und Funktion der AdKM

Sorptionskältemaschinen arbeiten im Unterschied zu den Kompressionskältemaschinen nach dem Prinzip des *thermischen* Verdichters. Dieser besteht bei einer Adsorptionskältemaschine aus einem Kreislauf, in dem das Kältemittel von einem flüssigen Lösungsmittel aufgenommen (und auch wieder abgegeben) wird. Bei Adsorptionskältemaschinen kommen dagegen feste Sorptionsmittel zum Einsatz. In der untersuchten Anlage handelt es sich dabei um Silicagel. Als Kältemittel wird Wasser verwendet.

In der Abbildung 3 wird der Aufbau der AdKM vereinfacht dargestellt. Die in einem Arbeitszyklus der Maschine parallel ablaufenden Vorgänge sollen nun kurz beschrieben werden:

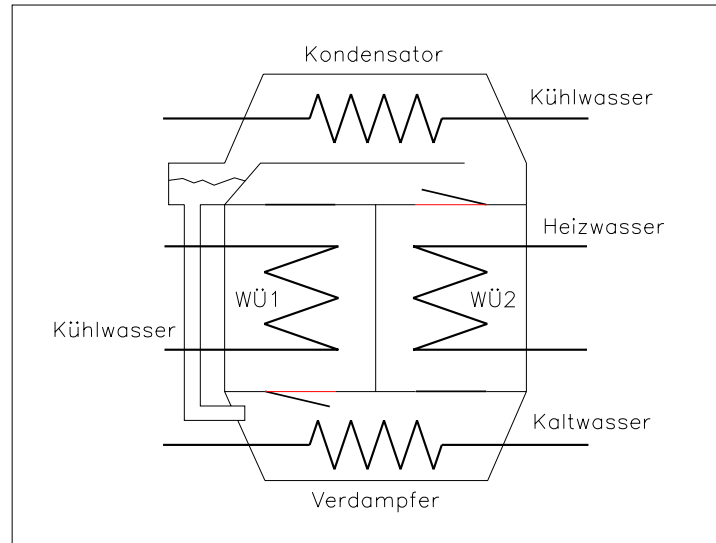


Abbildung 3: Aufbau einer AdKM

Im Desorber (WÜ2) wird unter Zufuhr von thermischer Energie an Silicagel angelagerter Wasserdampf ausgetrieben.

Im Kondensator wird dieser Wasserdampf unter Abfuhr von thermischer Energie kondensiert.

Das Wasser wird nun in den Verdampfer eingesprüht. Da hier ein starker Unterdruck vorherrscht, verdampft das Wasser unter Aufnahme von thermischer Energie. Das Kaltwasser erhält somit die gewünschte Vorlauftemperatur.

Der Wasserdampf gelangt in den Adsorber (WÜ1) und wird dort vom Silicagel gebunden. Dies geschieht unter Abgabe von thermischer Energie an das Kühlwasser.

Durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Sorptionsmittels Silicagel ist auch die Dauer des Arbeitszyklus begrenzt. Es folgt nun ein Umschalten, Heiz- und Kühlkreislauf werden so umgelenkt, daß WÜ1 und WÜ2 ihre Funktion tauschen. Ein Gesamtzyklus dauert ca. 7 min. Die zwischen den Arbeitszyklen liegende Umschaltphase kann zur Wärmerückgewinnung genutzt werden, indem Kühlwasser zunächst in die heiße Kammer und danach in die kalte Kammer geleitet wird. Details zu den Schaltungen in den verschiedenen Phasen des Gesamtzyklus sind in Abschnitt 3.3.2 zu finden.

Der theoretische Prozeßverlauf kann anschaulich in Abbildung 4 gezeigt werden. Der Druck im Verdampfer ist abhängig von der gewünschten Kaltwasser-Temperatur, er liegt ungefähr im Bereich zwischen 1 und 2 kPa. Der Druck im Kondensator hängt ab von der Temperatur des Kühlwassers. Hier dürften realistische Werte im Bereich zwischen 4 und 6 kPa liegen.

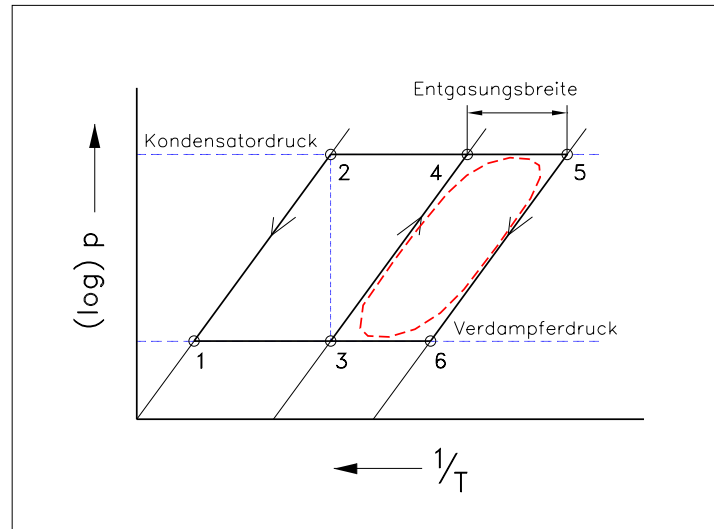


Abbildung 4: Sorptionsprozeß im Isosterendiagramm

Die schräg verlaufenden Geraden repräsentieren unterschiedliche Konzentrationen des Kältemittels. Die am weitesten links liegende Linie steht für das reine Kältemittel. Sie ist identisch mit der Dampfdruckkurve des Kältemittels (hier also des Wassers). Auf diese Linie befinden sich sowohl Verdampfer(1) als auch Kondensator(2).

Da Kondensator und Adsorber parallel mit Kühlwasser versorgt werden, also Kühlwasser gleicher Temperatur bekommen, und da sich der Adsorber auf dem Druckniveau des Verdampfers befindet, ist der Endpunkt(3) der Adsorption definiert.

Durch Erwärmung bei geschlossenen Ventilen wird der Druck auf Kondensatorniveau angehoben. Da sich die Konzentration nicht verändert, kann der Anfangspunkt(4) der Desorption bestimmt werden.

Es wird nun das Ventil zum Kondensator geöffnet und unter weiterer Wärmezufuhr wird der Endpunkt(5) der Desorption erreicht.

Danach schließt das Ventil, bei gleich bleibender Konzentration und unter Wärmeabfuhr wird wieder Verdampferdruck erreicht. Damit liegt der Anfangspunkt(6) der Adsorption ebenfalls fest.

Hier wird das Ventil zum Verdampfer geöffnet. Unter weiterer Wärmeabfuhr wird der Kältemitteldampf adsorbiert, bis der Endpunkt(3) der Adsorption wieder erreicht wird. Damit ist der Lösungsmittelkreislauf geschlossen.

Bedingt durch eine Reihe von Effekten, die auch in [1] beschrieben werden, weicht der reale Lösungsmittelkreislauf (in Abbildung 4 gestrichelt dargestellt) vom theoretischen Prozeß besonders in den Eckpunkten erheblich ab.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Kältebereitstellung durch Sorptionskältemaschinen wird das Kälteverhältnis herangezogen. Dies ist der Quotient aus Kälte- und Heizleistung. Günstig für große Entgasungsbreiten, und damit für hohe Kälteverhältnisse, sind eine niedrige Kühlwassertemperatur sowie hohe Heiz- und Kaltwassertemperaturen.

Vor- und Nachteile einer AdKM

Abschließend noch ein Blick auf Vor- und Nachteile von Adsorptionskältemaschinen mit dem Stoffpaar Silicagel/Wasser:

Vorteile:

- Desorption ist schon bei geringen Heiztemperaturen (55°C) möglich
- großer Temperaturhub (Differenz zwischen Kühl- und Kaltwassertemperatur) möglich
- keine Kristallisationsschäden möglich
- Medien sind nicht brennbar, nicht korrosiv, nicht giftig

Nachteile:

- Einfriergefahr
- geringe spezifische Kälteleistung
- diskontinuierlicher Prozeß
- hohe Investitionskosten

2.3 Der Solarkollektor

Den prinzipiellen Aufbau eines Flachkollektors zeigt Abbildung 5. Alternativ könnte auch ein Vakuumkollektor zum Einsatz kommen.

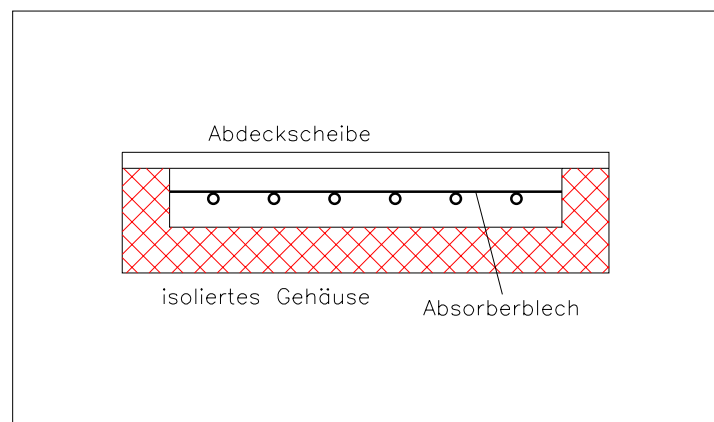


Abbildung 5: Schnitt durch einen Flachkollektor

Die Solarstrahlung trifft im Kollektor auf das Absorberblech. Dieses ist in der Regel mit einer selektiven Beschichtung versehen, um ein Maximum des Sonnenlichts zu absorbieren und gleichzeitig ein Minimum an Wärmestrahlung zu emittieren. Das

Absorberblech gibt die thermische Energie an den Wärmeträger ab, der durch den Absorber fließt. Aus Frostschutzgründen kommt als Wärmeträger meist ein Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz.

An der Abdeckscheibe treten Reflexions- und Transmissionsverluste auf, welche den maximalen bzw. optischen Wirkungsgrad bestimmen. Außerdem führt der Wärmedurchgang durch das Kollektorgehäuse zu weiteren Verlusten, die den Wirkungsgrad weiter absenken.

2.4 Der Schichtladespeicher

Um die natürliche Schichtung in einem Speicher zu erhalten und damit Exergieverluste zu vermeiden, werden Schichtladespeicher eingesetzt. Die eigentliche Schichtladeeinrichtung besteht aus einem oder mehreren oben offenen Kunststoffrohren, die senkrecht im Speicher montiert sind. Diese Rohre haben auf unterschiedlichen Höhen Membranklappen, die nur nach einer Seite öffnen können. Solange das Wasser im Rohr wärmer ist als das Wasser, das sich auf gleicher Höhe außerhalb des Rohres befindet, bleibt die Klappe geschlossen. Erst bei gleicher bzw. geringerer Temperatur im Rohr wird die entsprechende Klappe aufgrund der Gesamtdruckdifferenz aufgedrückt und das Wasser gelangt so in eine Ebene ungefähr gleicher Temperatur.

2.5 Die Kühldecken im Gebäude

Hinsichtlich ihrem thermischen Verhalten können Kühldecken mit Heizkörpern verglichen werden. Sie dienen der Abfuhr der fühlbaren Wärmelast aus Gebäuden. Da Kondensation vermieden werden soll, liegt das benötigte Temperaturniveau des Kaltwassers relativ hoch. In [2] wird als typische Vorlauftemperatur 17°C genannt. Wie bereits in Abschnitt 2.2 ausgeführt, wirkt sich dies günstig auf das Kälteverhältnis aus.

3 Programmtechnische Umsetzung

3.1 Einführung

Zur Simulation der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anlage wurde das Programm *AdSOL* geschrieben. Dazu wurde die Programmierumgebung *Delphi 4* der Firma *Borland* verwendet. Die zugehörige Programmiersprache heißt *Object Pascal*. Wie der Name schon verrät, ist dies eine objektorientierte Sprache. Deshalb soll im Abschnitt 3.2 ganz kurz auf Grundlagen der objektorientierten Programmierung (OOP) eingegangen werden. Dabei gehen die Ausführungen zur Theorie der OOP im wesentlichen auf die Lektüre von [3] zurück.

Die Darstellung des “Innenlebens“ des Programms beginnt mit der Beschreibung der einzelnen Klassen. Erst im Abschnitt 3.6 wird die Hauptprozedur des Programms besprochen.

3.2 Objektorientierte Programmierung

Um den Begriff des Objekts zu veranschaulichen, soll die in Tabelle 1 dargestellte Analogie verwendet werden.

HERKÖMMLICH		OBJEKTORIENTIERT	
Typ	<i>Integer</i>	Klasse	<i>TAuto</i>
Variable	<i>Ganzzahl</i>	Objekt	<i>Mercedes</i>

Tabelle 1: Zur Analogie zwischen Variable und Objekt

In herkömmlichen Programmen werden Variablen eines bestimmten Typs verwendet. Die Zuweisung eines bestimmten Typs erfolgt in der Variablendeklaration, z.B. sei die Variable *Ganzzahl* vom Typ *Integer*. Ein Objekt ist im Prinzip ebenfalls eine Variable und die Klasse entspricht analog dem Typ. So ist *Mercedes* ein Objekt vom Typ (oder besser gesagt der Klasse) *TAuto*. Wie das Beispiel zeigt, besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Variablen und Objekten darin, daß Objekte bzw. Klassen im allgemeinen viel komplexer sind als Variablen bzw. Typen.

Objekte haben nicht nur verschiedene Attribute - darin unterscheiden sie sich nicht von einer normalen *Record*-Variablen mit verschiedenen Feldern unterschiedlicher Typen - sondern auch Methoden. Diese Methoden sind entweder Funktionen oder Prozeduren. Schutzklassen, die wichtigsten sind *private* und *public*, regeln die Zugriffsrechte auf alle Attribute und Methoden.

Da Objektvariablen Zeigervariablen sind, besteht ein weiterer Unterschied zu normalen Variablen darin, daß es nicht ausreicht, das Objekt nur zu deklarieren. Vielmehr wird eine *Instanz* der Klasse, also ein Objekt, erst mit Hilfe eines *Konstruktors* geschaffen. Mit einem *Destruktor* wird der Speicherplatz wieder freigegeben. Darum

muß man sich gewöhnlich nicht weiter kümmern. Es reicht, vor der Verwendung des Objekts den Konstruktor aufzurufen und, nachdem das Objekt nicht mehr gebraucht wird, den Destruktor aufzurufen. Weiterhin kann man den Konstruktor für Initialisierungsaufgaben verwenden.

Die *Vererbung* ist eine weitere wesentliche Eigenschaft der objektorientierten Programmierung. Das bedeutet, daß von Klassen Unterklassen abgeleitet werden können, die alle Attribute und Methoden ihrer Vorfahren übernehmen bzw. erben. Es wäre z.B. denkbar, daß die Klasse *TAuto* von der Klasse *TFahrzeug* abstammt. Ein weiterer Nachfahr der Klasse *TFahrzeug* könnte dann die Klasse *TFahrrad* sein.

Abschließend noch eine Bemerkung zu den Klassennamen: Selbstverständlich können im Rahmen der Bezeichnerkonventionen beliebige Namen für Klassen vergeben werden. Jedoch hat es sich bewährt, den Klassennamen mit einem *T* zu beginnen. Dahinter steht die Tatsache, daß es sich bei einer Klasse ja letztendlich auch um einen Typ handelt. Beim Vergeben der Namen für die Objekte wird dann gewöhnlich nur das *T* weggelassen.

3.3 Die Klasse *TElement* und ihre Nachfahren

3.3.1 Die Klasse *TElement*

Die Klasse *TElement* ist der Vorfahr aller Klassen, die ein Bauelement gemäß Abbildung 1 darstellen. Dazu gehören:

- *TAdKM*
- *TKollektor*
- *TSpeicher*
- *TKaelteVerbraucher*

Da *TElement* jedoch nur der Ableitung weiterer Klassen dient und keine eigene Instanz gebildet wird, spricht man hier von einer *abstrakten* Klasse.

Alle Bauelemente bekommen durch *TElement* die Fähigkeit vererbt, bis zu 15 ihnen übergebene Parameter auf ihre Sinnfälligkeit zu überprüfen. Dies geschieht auf folgende Weise (vgl. dazu auch Tabelle 2):

TElement hat zunächst zwei sogenannte *Feldvariablen*. Die eine, *FParameter*, ist vom Typ *TV15*. Dies ist ein Vektor von 15 Zahlen. Sie kann somit bis zu 15 Parameter speichern. Die zweite Variable, *FGrenze*, ist vom Typ *TV15-2Dim*. Dies ist eine Matrix der Dimension (15,2). Hier können eine untere und eine obere Grenze gespeichert werden, in deren Rahmen sich *FParameter* bewegen darf.

Die Prozedur *SetParameter* ist die eigentliche Methode, die die Werte in *FParameter* schreibt. Sie bekommt als Argument den Wert *p*, ebenfalls vom Typ *TV15*, als Vorschlag für *FParameter*. Doch erst nach einem Vergleich mit *FGrenze*, wird *FParameter* geschrieben. Im Fall, daß ein Wert außerhalb des zulässigen Bereichs

SCHUTZKLASSE	NAME	ART
private	FParameter: TV15	Feldvariable
	FGrenze: TV15-2Dim	Feldvariable
	SetParameter(p: TV15)	Prozedur
public	Parameter: TV15 <i>read</i> FParameter <i>write</i> SetParameter	Property

Tabelle 2: Deklaration der Klasse *TElement*

liegt, wird der entsprechende Grenzwert aus *FGrenze* verwendet. Außerdem wird eine Warnung ausgegeben.

Der Schutz verborgener Attribute bzw. Methoden geschieht durch *Properties*. Dies sind öffentliche Eigenschaften, die nur Methoden zum Lesen und Schreiben von Werten in *Feldvariablen* beinhalten können. Im konkreten Fall kann der Lesezugriff auf *FParameter* also direkt erfolgen, der Schreibzugriff muß jedoch den Umweg über die Prozedur *SetParameter* gehen.

Der Aufruf dieser *Properties* geschieht in den Konstruktoren der jeweiligen Klasse.

3.3.2 Die Klasse *TAdKM*

Schaltzustände der AdKM

Zunächst ist es wichtig, mögliche Schaltzustände der AdKM zu definieren. In Abbildung 6 wird eine zeitliche Abfolge von Zuständen dargestellt, die für den Betrieb der AdKM typisch ist. Die Zustände 2 und 3 treten dabei alternativ auf. Der dritte dargestellte Zustand entspricht dem ersten Zustand, mit dem Unterschied, daß hier WÜ1 und WÜ2 ihre Funktion getauscht haben. In Tabelle 3 werden diese Schaltzustände näher erklärt.

In allen Zuständen fließt Kühlwasser durch den Kondensator und Kaltwasser durch den Verdampfer. In den Arbeitszyklen (2,3) wird außerdem ein Wärmeübertrager gekühlt und der andere geheizt. Beim Umschalten (Zyklus 1) tauschen die beiden Wärmeübertrager ihre Funktion. Um eine Wärmerückgewinnung zu ermöglichen, wird Kühlwasser durch den zukünftigen Adsorber und danach durch den zukünftigen Desorber geleitet. Danach kann ein neuer Arbeitszyklus beginnen. Im Bereitschaftszustand wird keiner der beiden Silicagel enthaltenden Wärmeübertrager durchströmt.

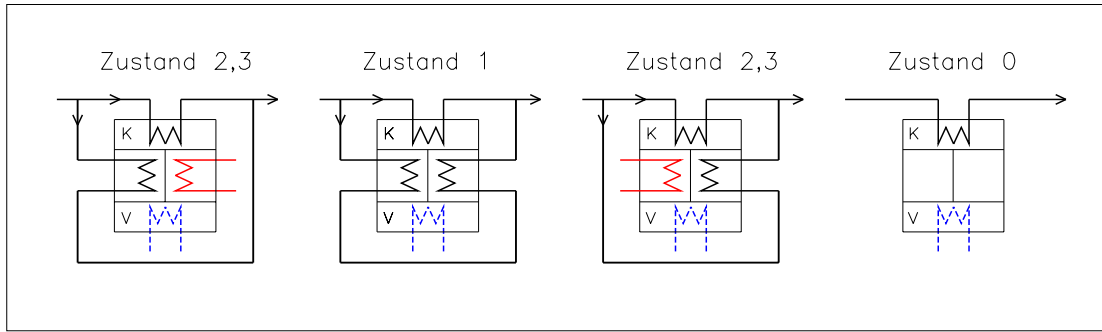


Abbildung 6: Mögliche Schaltzustände der AdKM

ZUSTAND	BEDEUTUNG	DAUER
0	Bereitschaft	beliebig
1	Umschalten	20 s
2	Kurzzyklus	400 s
3	Langzyklus	1240 s

Tabelle 3: Definition der Schaltzustände

Die möglichen Entscheidungen über die Abfolge der verschiedenen Zyklen werden in Abbildung 7 gezeigt. t_{AbKalt} ist die Austrittstemperatur des Kaltwassers aus dem Verdampfer. Der Vergleich dieser Temperatur mit den Schwellwerten t_{SOVL} und t_{SUVL} entscheidet darüber, ob die AdKM in oder außer Betrieb geht. t_{ZuKalt} ist die Eintrittstemperatur des Kaltwassers in den Verdampfer. Hier entscheidet der Vergleich mit dem Schwellwert t_{SRL} darüber, ob die AdKM im Kurz- oder Langzyklus arbeitet. Auch beim Erreichen des maximalen Zeitlimits eines Zustands wird ein neuer Zustand eingestellt. Der vom Kälteverbraucher signalisierte Kältebedarf hat ebenfalls Einfluß auf diese Entscheidung.

Zusätzlich gibt es noch den Zustand 9. Dieser bedeutet, daß die AdKM (z.B. im Winter) ausgeschaltet ist.

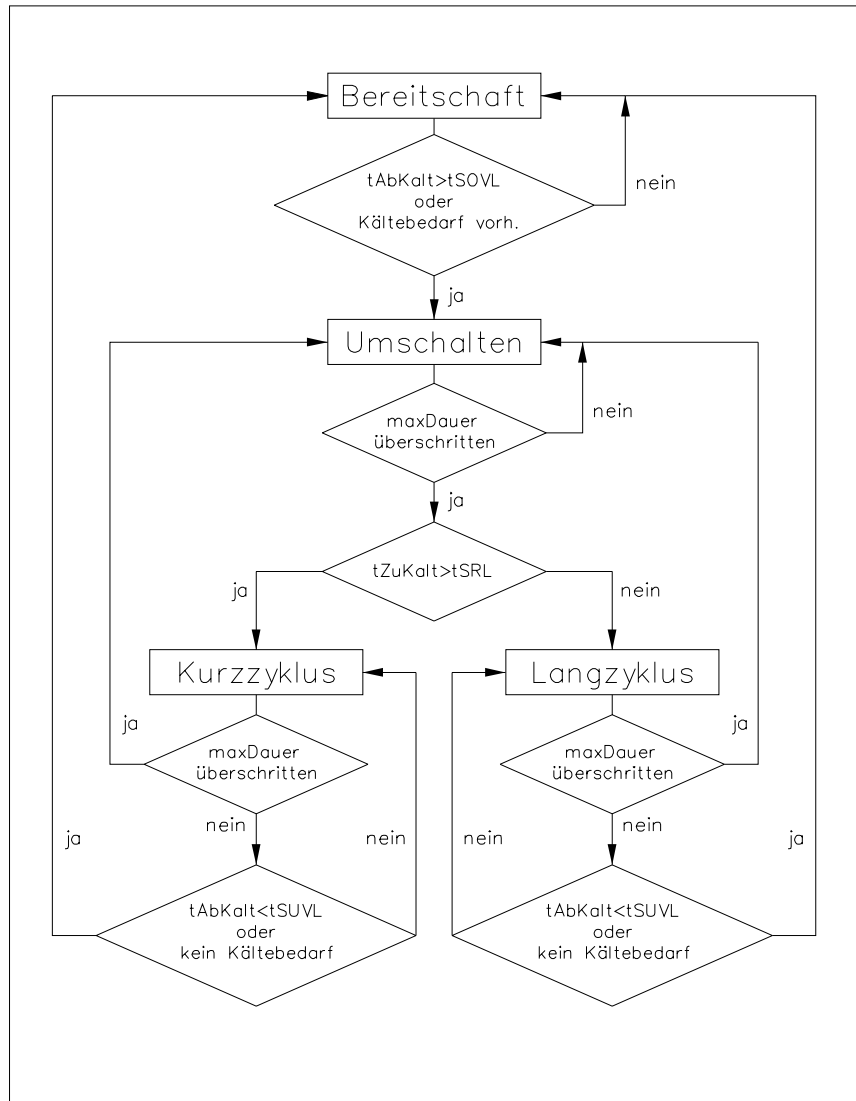


Abbildung 7: Schaltwege der AdKM

Die Funktion *Betrieb*

Kernstück der Klasse *TAdKM* ist die Funktion *Betrieb*. Der Berechnungsalgorithmus dieser Funktion beruht im wesentlichen auf [1] und [4].

Beim Aufruf der Funktion werden vier Argumente übergeben:

- die unregelte Eintrittstemperatur des Heizwassers in die AdKM
- die Eintrittstemperatur des Kühlwassers in die AdKM
- die Eintrittstemperatur des Kaltwassers in die AdKM
- die aktuelle Gebäudetemperatur

Die unregelmäßige Eintrittstemperatur des Heizwassers entspricht dabei entweder der obersten Speichertemperatur, oder, wenn die Austrittstemperatur aus dem Desorber höher ist als die oberste Speichertemperatur, der Austrittstemperatur aus dem Desorber.

Das Ergebnis der Funktion besteht aus den Werten für die Austrittstemperaturen der drei bilanzierten Volumenströme der AdKM. Dies sind jedoch nicht alle Ergebnisse, die in der Funktion *Betrieb* berechnet wurden. Weitere Ergebnisse werden als Feldvariablen gespeichert. Je nach den Nutzern dieser Werte können *Interna* und *Externa* unterschieden werden. Interna dienen dem Feedback der Funktion *Betrieb*. Dies sind z.B. aktuelle Temperaturen und Wasserdampf-Konzentrationen in Desorber und Adsorber, Dampfmasseströme sowie die Zeit, die ein Zustand schon andauert. Externa sind die Werte, die von anderen Objekten benötigt werden und die z.T. auch in Ergebnisdateien mitgeschrieben werden. In Tabelle 4 werden die extern verwendeten Werte aufgeführt.

VARIABLE	ERLÄUTERUNG	NUTZER
<i>FdVHeiz</i>	Heizvolumenstrom Speicher	<i>Speicher</i>
<i>FtHeiz</i>	Heiztemperatur	Ergebnisdatei
<i>FQHeiz</i>	Wärmeleistung Heizung	Ergebnisübersicht
<i>FQKalt</i>	Wärmeleistung Kälte	Ergebnisübersicht
<i>FQKuehl</i>	Wärmeleistung Kühlung	Ergebnisübersicht
<i>FQNachheiz</i>	Wärmeleistung Nachheizung	Ergebnisübersicht
<i>FZustand</i>	Zustand AdKM	Ergebnisdatei

Tabelle 4: Extern verwendete Ergebnisse der Funktion *TAdKM.Betrieb*

Genau genommen repräsentiert *FdVHeiz* keinen Volumenstrom sondern ein diskretes Volumen, das pro Rechartakt (eine Sekunde) dem Speicher entnommen und wieder zugeführt wird. Aufgrund der Regelung der Heiztemperatur schwankt dieses Volumen. Der Kaltwasser-Volumenstrom ist konstant. Er wird deshalb nur einmal im Konstruktor der Klasse *TAdKM* berechnet. Die Wärmeleistungen multipliziert mit der Taktzeiten ergeben diskrete Wärmemengen, die für die Ergebnisübersicht aufsummiert werden.

Die Temperatur *FtHeiz* ist die Temperatur des Heizwassers nach der Regelung. Sie ist linear abhängig von der Gebäudetemperatur und wird von der Funktion *Heiztemp* berechnet.

3.3.3 Die Klasse *TKollektor*

Mit der Klasse *TKollektor* können nicht konzentrierende Solarkollektoren modelliert werden. Die Wärmeverluste des Kollektors an die Umgebung werden mit einem

parabolischen k-Modell berechnet. Auch die Wärmekapazität des Kollektors wird berücksichtigt.

Die Hauptmethode der Klasse *TKollektor* ist die Funktion *TempAus*. Das Ergebnis dieser Funktion ist die Austrittstemperatur aus dem Kollektor. Die zu übergebenden Argumente werden nachfolgend aufgeführt. Zunächst die Werte, die durch das Objekt *Reader* berechnet bzw. ermittelt werden (vgl. dazu auch den Abschnitt 3.4.2):

- Kosinus des Raumwinkels zwischen Flächennormale des Kollektors und der direkten Solarstrahlung (Einfallswinkel)
- Einstrahlung auf den Kollektor
- Außentemperatur

Weiterhin:

- Eintrittstemperatur in den Kollektor
- Austrittstemperatur aus dem Kollektor aus dem vorangegangenen Rechenzyklus

Zusätzlich zur Austrittstemperatur werden noch die in Tabelle 5 aufgeführten Werte berechnet und in Feldvariablen abgespeichert und aufsummiert.

VARIABLE	ERLÄUTERUNG	NUTZER
<i>FQEinstr</i>	gesamte, auf den Kollektor eingestrahlte Wärmemenge	Ergebnisübersicht
<i>FQKoll</i>	vom Kollektor an den Speicher abgegebene Wärmemenge	Ergebnisübersicht

Tabelle 5: Extern verwendete Ergebnisse der Funktion *TKollektor.TempAus*

3.3.4 Die Klasse *TSpeicher*

Der zu modellierende zylindrische Schichtladespeicher wurde in zehn Zylinderscheiben gleicher Temperatur unterteilt. Diese Temperaturen werden in dem Feldvektor *FTempVerteilung* gespeichert. Mit Ausnahme der Prozedur *Schutz* verändern alle Prozeduren dieser Klasse die Werte in *FTempVerteilung*.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Klassen gibt es in der Klasse *TSpeicher* keine eindeutige Hauptfunktion. Vielmehr legte die Programmstruktur die Verwendung von Prozeduren nahe, die spezielle Berechnungen durchführen können. Da hier kein Hinweis auf Literatur, in der diese Rechenalgorithmen beschrieben werden, gegeben werden kann, sollen diese Prozeduren etwas ausführlicher besprochen werden.

Die Prozedur *EntnahmeOben*

Ein Speicherzyklus beginnt mit der Entnahme eines diskreten Volumens ΔV . Wie noch zu sehen sein wird, ist dies nur relevant, wenn dieses Volumenelement oben entnommen wird (Versorgung der AdKM mit Heizwasser). In diesem Fall rutschen die Zylinderscheiben um den Betrag ΔH nach oben. Die Abbildung 8 zeigt diesen Sachverhalt am Beispiel eines Speichers mit drei Schichten bzw. Segmenten.

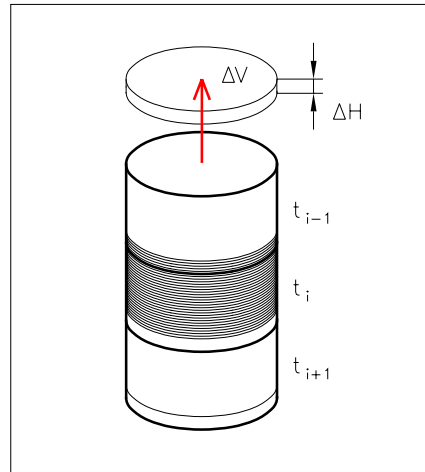


Abbildung 8: Entnahme eines Volumenelementes aus dem Speicher

Da die Grenzen für die Schichten aber unverrückt bleiben und in einer Schicht nur eine Temperatur vorherrschen soll, müssen die Temperaturen aller Schichten neu bestimmt werden. Einzig die unterste Schicht bleibt davon unberührt. Da sowohl Dichte als auch die spezifische Wärmekapazität des Wassers als konstant angenommen werden, geschieht dies nach der folgenden Gleichung:

$$t_{i,neu} = \frac{t_{i,alt} \cdot (V_{Seg} - \Delta V) + t_{i+1,alt} \cdot \Delta V}{V_{Seg}} \quad (1)$$

Bei einer Entnahme von unten (Versorgung des Kollektors) wird die Temperaturgrenzschicht nicht verschoben, damit entfällt die Vermischung.

Erst durch die Prozedur *Schichten* wird das nun fehlende Wasser im untersten Segment wieder aufgefüllt. Natürlich sieht dieser Vorgang in der Realität anders aus. Der Fehler wird möglicherweise aber durch die im vorliegenden Modell nicht berücksichtigten Vermischungseffekte beim Einschichten abgemildert.

Die Prozedur *Schichten*

Das Wasser, das vom Kollektor oder von der AdKM zurückkommt, wird in dieser Prozedur in die Schicht eingespeist, in der der Betrag der Temperaturdifferenz zwischen Schicht und einzuspeisendem Wasser minimal ist. Danach müssen die Temperaturen in der Speiseschicht und den darunterliegenden Schichten neu berechnet

werden. Für die Speiseschicht gilt:

$$t_{i,neu} = \frac{t_{i,alt} \cdot (V_{Seg} - \Delta V) + t_{Speise} \cdot \Delta V}{V_{Seg}} \quad (2)$$

Die Temperaturen der darunter liegenden Schichten berechnen sich zu:

$$t_{i+1,neu} = \frac{t_{i+1,alt} \cdot (V_{Seg} - \Delta V) + t_{i,neu} \cdot \Delta V}{V_{Seg}} \quad (3)$$

Die Prozedur *WaermeVerlust*

Unter idealen Bedingungen ist das Temperaturfeld im Speicher eine Funktion der Höhe, des Radius und der Zeit. Da jedoch pro Schicht nur eine Temperatur vorherrschen soll, wird das Modell weiter vereinfacht und die Temperatur ist nun nur noch von Höhe und Zeit abhängig.

Die instationäre Temperaturänderung wird durch ein quasistationäres Modell angenähert. Dabei wird für einen kleinen Zeitschritt ($\Delta\tau = 10$ Sekunden) davon ausgegangen, daß die Temperatur in der Schicht konstant bleibt. Für diese Zeit wird eine Wärmemenge errechnet, die die einzelne Schicht abgibt bzw. erhält. Danach wird die Temperatur der Schicht neu berechnet.

In Abbildung 9 wird ein Speichersegment mit seinen relevanten Größen dargestellt. Die Dicke der Isolation δ_{Iso} ist am Umfang sowie Kopf und Fuß des Speichers gleich.

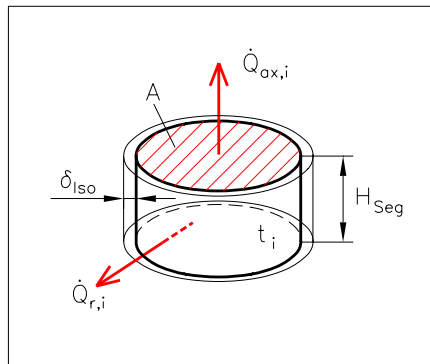


Abbildung 9: Ein Speichersegment

Folgende Wärmeströme werden durch das Modell berücksichtigt:

- Wärmedurchgang durch die Außenisolation des Speichers
- Wärmeleitung zwischen den Schichten im Speicher

Für den Wärmedurchgang werden zwei Wärmedurchgangswiderstände definiert:

$$R_{Ebene} = \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_{Iso}}{\lambda_{Iso}} \right) \frac{1}{A} \quad (4)$$

$$R_{Zyl} = \left(\frac{1}{\alpha_a D_a} + \frac{1}{2\lambda_{Iso}} \ln \frac{D_a}{D_i} \right) \frac{1}{\pi H_{Seg}} \quad (5)$$

Dabei werden der innere Wärmeübergang sowie die Wärmeleitung in der Stahlwand des Speichers vernachlässigt. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient α_a wurde mit $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ angesetzt. Mit den Wärmedurchgangswiderständen können nun axiale und radiale Wärmeströme an den Speichersegmenten berechnet werden:

$$\dot{Q}_{ax,0} = \frac{\lambda_W A}{H_{Seg}} (t_1 - t_0) + \frac{t_U - t_0}{R_{Ebene}} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{ax,9} = \frac{\lambda_W A}{H_{Seg}} (t_8 - t_9) + \frac{t_U - t_9}{R_{Ebene}} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{ax,i} = [(t_{i-1} - t_i) + (t_{i+1} - t_i)] \frac{\lambda_W A}{H_{Seg}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{r,i} = \frac{t_U - t_i}{R_{Zyl}} \quad (9)$$

Bei der Indizierung der Speichersegmente wurde oben mit 0 begonnen. Das unterste Segment trägt somit den Index 9 .

Die neue Temperatur des Speichersegments wird wie folgt berechnet:

$$t_{i,neu} = t_{i,alt} + \frac{\dot{Q}_{ax,i} + \dot{Q}_{r,i}}{m_{Seg} c_W} \cdot \Delta\tau \quad (10)$$

Die Prozedur *Mischen*

Da die oberste Schicht eine größere Oberfläche zur Umgebung hat als die darunter liegende Schicht, kommt es bei gleichen Ausgangstemperaturen dazu, daß nach der Ausführung der Prozedur *WaermeVerlust* in der obersten Schicht eine geringere Temperatur vorliegt als in der darunter liegenden. Auch durch eine Einspeisung in eine beliebige Schicht können bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen den Schichten solche Effekte auftreten. Unmögliche Schichtungen im Speicher zu verhindern ist die Aufgabe der Prozedur *Mischen*.

Das Mischen erfolgt in drei Stufen (vgl. dazu auch Abbildung 10). Ziel ist, die Prozedur möglichst zeitig über einen Seitenausgang zu verlassen, da die Stufe *Spezial* sehr rechenintensiv ist.

Die erste Stufe *Turbo* wird nur durchgeführt, wenn die Temperatur der obersten Schicht geringer als die der darauf folgenden Schicht ist. Dabei werden alle der obersten Schicht unmittelbar folgenden Schichten vermischt, wenn deren Temperaturdifferenz $(t_i - t_{i+1})$ kleiner als 0.01 K ist. Dies trifft in jedem Fall zu, wenn diese Temperaturdifferenz negativ ist, also eine unmögliche Schichtung vorliegt.

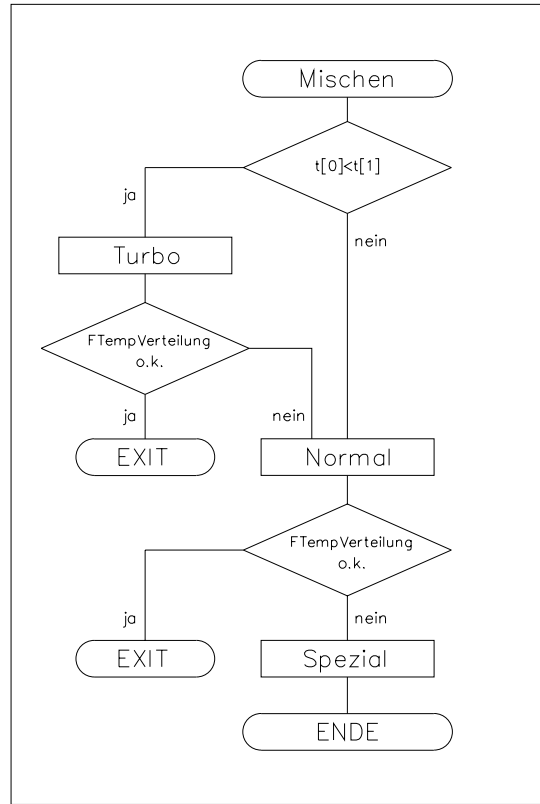


Abbildung 10: PAP der Prozedur *TSpeicher.Mischen*

Danach wird die Schichtung überprüft. Falls keine monotone Schichtung erreicht wurde, wird die zweite Stufe *Normal* durchgeführt. Hier werden von oben beginnend immer je zwei Schichten verglichen und bei Bedarf gemischt. In der Regel kann durch diese Stufe eine natürliche Schichtung erreicht werden.

Wenn auch diese Stufe nicht ausreichend war, muß die dritte Stufe *Spezial* ausgeführt werden. Dabei wird von unten beginnend die Schichtung geprüft. Bei Bedarf werden zwei Schichten vermischt. Danach muß erneut von unten beginnend die Schichtung überprüft werden. Diese Stufe kann erst verlassen werden, wenn eine natürliche Schichtung hergestellt ist.

Die Prozedur *Schutz*

Um ein Überheizen des Speichers zu verhindern, überprüft die Prozedur *Schutz* die oberste Temperatur im Speicher. Falls diese 90°C übersteigt, wird der Kollektor abgeschaltet. Dies geschieht, indem die Feldvariable *FLaden*, die vom Typ *Boolean* ist, auf *false* gesetzt wird. Erst wenn die oberste Speichertemperatur 80°C unterschreitet, wird *FLaden* wieder der Wert *true* zugewiesen.

3.3.5 Die Klasse *TKaelteVerbraucher*

Die Modellierung von Gebäuden ist im allgemeinen ein sehr komplexes Problem. Um trotzdem einen Verbraucher in die Berechnungen mit einbeziehen zu können,

wurde ein einfaches Modell geschaffen.

Ein Überblick über die Methoden der Klasse *TKaelteVerbraucher* wird in Tabelle 6 gegeben.

METHODE	NAME	BESCHREIBUNG
Funktion	<i>Waermelast</i>	Berechnung der Wärmelast
Prozedur	<i>HausAufheizung</i>	Erhöhung der Gebäudetemperatur durch die Wärmelast
Prozedur	<i>KaelteBedarfPruefen</i>	Vergleich von Soll- und Istwert der Gebäudetemperatur
Funktion	<i>Kuehldecke</i>	Berechnung des Wärmeabtransports durch die Kühldecke sowie der daraus resultierenden Absenkung der Gebäudetemperatur

Tabelle 6: Die Methoden der Klasse *TKaelteVerbraucher*

Die Wärmelast ist linear abhängig von der Außentemperatur. Die Koeffizienten der Geradengleichung werden im Konstruktor *TKaelteVerbraucher.Create* anhand der Eingaben ermittelt. Bei der Berechnung der Aufheizung des Gebäudes geht neben der Wärmelast auch die Wärmekapazität des Gebäudes ein. Diese wird ebenfalls im Konstruktor unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bauart des Gebäudes (vgl. Abschnitt 4.4.6) und der Annahme einer spezifischen Wärmelast von 15 W/m^3 berechnet.

Der Rückgabewert, den die Funktion *KaelteBedarfPruefen* liefert, ist vom Typ *Boolean*. Anhand dieses Wertes kann ein Zweipunktregelung der AdKM realisiert werden. Eine Schalthysterese kann durch geeignete Vorgaben ebenfalls verwirklicht werden (vgl. auch Abschnitt 4.4.6).

Die Hauptmethode der Klasse *TKaelteVerbraucher* ist die Funktion *Kuehldecke*. Die modellierte Kühldecke besitzt keine Wärmekapazität. Die Berechnung der Wärmeaufnahme erfolgt analog der Berechnung der Wärmeabgabe eines Heizkörpers. Dazu muß zunächst die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zwischen Gebäude und Kühldecke bestimmt werden. Das Produkt aus mittlerer logarithmischer Temperaturdifferenz und der spezifischen Kälteleistung der Kühldecke ergibt einen Wärmestrom und damit auch eine Anhebung der Temperatur des Kaltwassers. Für den Fall, daß die Austrittstemperatur aus der Kühldecke über der Gebäudetemperatur liegt, muß eine Korrektur erfolgen. Dabei wird die Austrittstemperatur aus der Kühldecke gleich der Gebäudetemperatur gesetzt und die aufgenommene Wärmemenge neu berechnet. Zum Schluß wird die neue Gebäudetemperatur bestimmt.

3.4 Die Klasse *TTextBearb* und ihre Nachfahren

3.4.1 Die Klasse *TTextBearb*

Außer den Klassen, die für reale Bauelemente stehen, sind für den Ablauf des Programms auch Klassen notwendig, die das Lesen und Schreiben von Dateien übernehmen. Diese Klassen sind Nachfahren der abstrakten Klasse *TTextBearb*. Die einzige Methode dieser Klasse ist die Funktion *Teilstring*. Die Aufgabe dieser Funktion besteht im Zertrennen von Zeichenketten an bestimmten Bruchstellen. Rückgabewert dieser Funktion ist ein Teilstück der übergebenen Zeichenkette. In Tabelle 7 werden die Argumente der Funktion erklärt.

ARGUMENT	TYP	BEDEUTUNG
<i>s</i>	<i>String</i>	Zeichenkette
<i>Nr</i>	<i>Integer</i>	Nr. des herauszutrennenden Teilstrings ($0 \Rightarrow$ erster Teilstring)
<i>Trenner</i>	<i>Char</i>	Zeichen, das Bruchstelle markiert

Tabelle 7: Die Argumente der Funktion *TTextBearb.Teilstring*

3.4.2 Die Klasse *TReader*

Die Aufgaben der Klasse *TReader* bestehen im Einlesen der Projekt- und der Wetterdateien. Da die Prozedur *ProDatEinlesen* von außerhalb der Unit *Elements* aufgerufen wird, mußte sie *public* deklariert werden.

Die Prozedur *WetDatEinlesen* liest die Wetterdatei ein und stellt zwei öffentliche Feldvariablen zur Verfügung: *FWetMatrix* und *FStartNr*. Dabei ist *FStartNr* die Stunden-Nummer des ersten Datensatzes der Wetterdatei. Dies ist nötig, damit die Wetterdatei auch später als am 1. Januar, 0 Uhr, beginnen kann.

In *FWetMatrix* werden im Stundenabstand folgende Werte gespeichert:

- die Einstrahlung auf den Solarkollektor (I_{Koll})
- der Kosinus des Einfallwinkels der Solarstrahlung ($\cos \eta$)
- die Außentemperatur

Damit ist *FWetMatrix* eine Matrix der Dimension $(3, n)$. n steht für die Anzahl der Stunden, für die Wetterdaten existieren. Während die Außentemperatur aus der Wetterdatei direkt gelesen werden kann, müssen die Werte für I_{Koll} und $\cos \eta$ erst berechnet werden. Dies geschieht mit der Funktion *StrahlungKollektor*. Folgende Werte gehen in die Berechnung ein:

Eingaben des Nutzers (vgl. dazu auch Abschnitt 4.4.3):

- geografische Lage des Kollektors
- Aufstellung des Kollektors

Werte aus der Wetterdatei:

- Zeit (Stunde im Jahr)
- diffuse Einstrahlung auf die Horizontale
- Gesamtstrahlung auf die Horizontale

In [5] wird die Berechnung ausführlich dargestellt.

3.4.3 Die Klasse *TWriter*

Die Methoden dieser Klasse besorgen das Schreiben der Projekt- sowie der Ergebnisdateien im ASCII-Format. Die zwei verschiedenen Typen der Ergebnisdateien werden in Tabelle 8 beschrieben.

	ADKM-DATEI(EN)	SPEICHER-DATEI
Name	z.B. <i>juli.sim</i>	<i>speicher.sim</i>
Anzahl	1 ... 12	1
Takt	10 Sekunden	1 Stunde
Geschrieben	nur wenn AdKM in Betrieb	immer
Werte	Zustand der AdKM Temperaturen an Ein- und Austritt der AdKM ungeregelte Heiztemperatur	Gebäudetemperatur Temperaturverteilung im Speicher Austrittstemperatur des Kollektors

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Ergebnisdateien

3.5 Die Klasse *TTimer*

Das Zeitmanagement wird von der Klasse *TTimer* erledigt. Durch die Prozedur *Zaehle* werden verschiedene öffentliche Zeit- und Schaltervariablen zur Verfügung gestellt, die in der Hauptprozedur des Programms benötigt werden (vgl. auch Abschnitt 3.6).

Aufgrund räumlicher Entfernungen treten in der Praxis zeitliche Verschiebungen

zwischen Austrittstemperaturen an einer Anlagenkomponente und den korrespondierenden Eintrittstemperaturen an der nächsten Anlagenkomponente auf. Besonders wichtig ist die Beachtung dieses Effektes zwischen Austritt der Kühldecke und Eintritt in den Verdampfer der AdKM. Die Aufgabe der Prozedur *TotzeitManager* besteht deshalb darin, die Werte für die Austrittstemperatur der Kühldecke zwischenzuspeichern und erst nach Ablauf der *Totzeit* an die AdKM weiterzugeben. Dies geschieht mit Hilfe der Feldvariable *FtZuKaltVektor*. Die Länge dieses Vektors ist so bemessen, daß alle im Verlauf der Totzeit anfallenden Werte und noch ein zusätzlicher Wert aufgenommen werden können. Damit wird ein Überschreiben eines noch benötigten Wertes verhindert.

Beim Inbetriebgehen der Anlage ist dieser Vektor noch leer. Deswegen wird vor Ablauf der Totzeit ein (recht willkürlicher) Startwert verwendet.

3.6 Die Klasse *TCoordinator*

Die Klasse *TCoordinator* mit ihrer Prozedur *Work* ist das Herzstück des vorliegenden Programms. Dies kommt gut in Abbildung 11 zum Ausdruck. Hier werden alle Objekte und deren Feldvariablen, sowie die direkte Nutzung dieser Feldvariablen

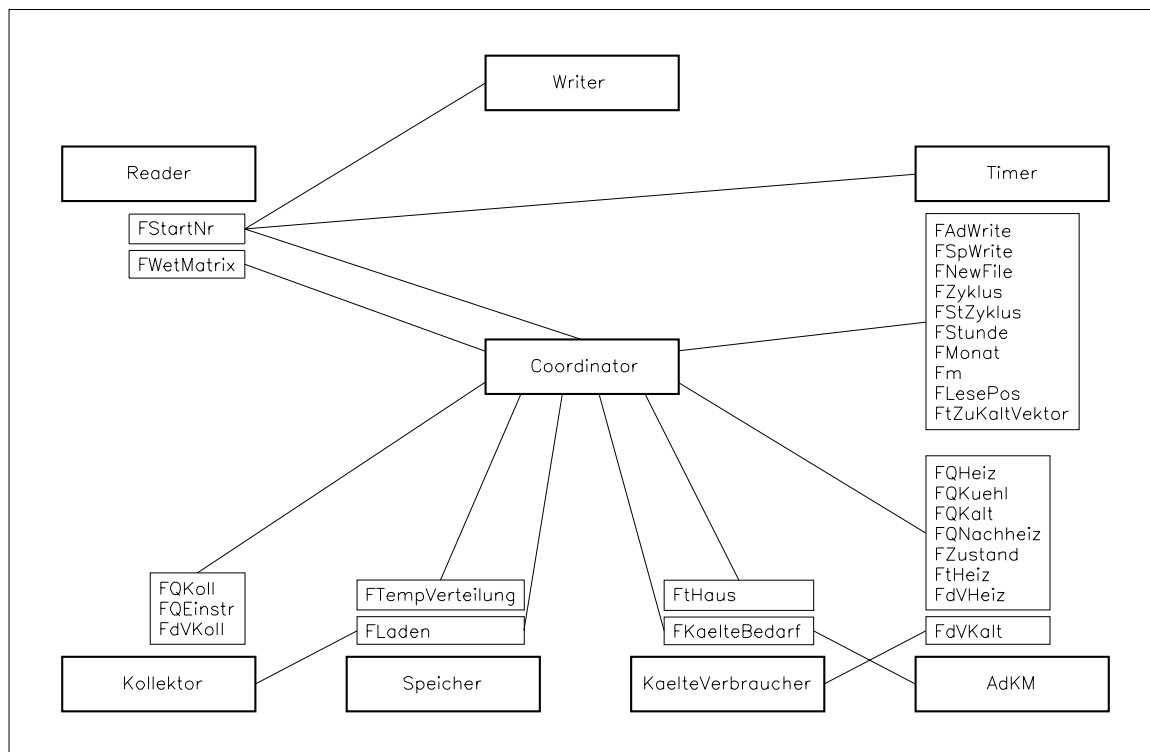


Abbildung 11: Nutzung der Feldvariablen durch die Objekte

angezeigt. Es werden nacheinander folgende Operationen durchgeführt:

- Erzeugung der Objekte *Reader* und *Kollektor*
- Erstellung der Wettermatrix

- Ermittlung der Anzahl der durchzuführenden Rechenzyklen
- Erzeugung der Objekte *Speicher*, *AdKM*, *KaelteVerbraucher* und *Timer*
- Initialisierung von Startwerten der Prozedur *Coordinator.Work*
- Erzeugung des Objektes *Writer*
- Anlegen von Ergebnisdateien (optional)
- *Rechenschleifen*
- Berechnung der Werte für die Ergebnisübersicht
- Übergabe der Ergebnisübersicht an die Tabelle
- Zerstörung aller Objekte

In den *Rechenschleifen* wird die eigentliche Simulation ausgeführt. Dabei wird im 10-Sekunden-Takt gerechnet. Für die Simulation eines Monats mit 31 Tagen müssen damit 267840 Schleifen abgearbeitet werden. Der Programmablaufplan einer *Rechenschleife* wird in Anhang A1 dargestellt.

Die Berechnung von AdKM und Kühldecke erfolgt im Sekundentakt. Demzufolge müssen an dieser Stelle 10 Unterschleifen durchlaufen werden. Mit den Durchschnittswerten für die Austrittstemperaturen von AdKM und Kühldecke wird danach die Berechnung fortgesetzt.

Die Austrittstemperatur des Kühlturms wird vorerst nur als Konstante angesetzt. Sie ist jedoch vom Nutzer des Programms frei wählbar.

Für die Ergebnisübersicht werden auch einige Kennziffern berechnet. Dies sind der Kollektornutzungsgrad (KNG), das Kälteverhältnis (COP) und der solare Deckungsgrad (DG). Nachfolgend die Definitionen:

$$KNG = \frac{Q_{Koll}}{Q_{Einstr}} \quad (11)$$

$$COP = \frac{Q_{Kalt}}{Q_{Heiz}} \quad (12)$$

$$DG = \frac{Q_{Heiz} - Q_{Nachheiz}}{Q_{Heiz}} \quad (13)$$

3.7 Stoffwerte

Für die Berechnungen werden auf eine Temperatur von $50^{\circ}C$ bezogene mittlere Stoffwerte verwendet, die in Tabelle 9 genannt werden. In zukünftigen Programm-Versionen ist die Verwendung von Stoffwert-Funktionen denkbar.

SYMBOL	WERT
c_W	$4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$
λ_W	$0.64 \frac{W}{m \cdot K}$
ρ_W	$988 \frac{kg}{m^3}$

Tabelle 9: Verwendete mittlere Stoffwerte von Wasser

3.8 Vor- und Nachteile des Modells / Programms

Abschließend noch eine Übersicht, in der die Vor- und Nachteile des Programms sowie des Modells gegenübergestellt werden:

Vorteile

- detaillierte Modellierung der Bauteile AdKM, Kollektor und Speicher
- Erweiterungen und Änderungen des Programms sind durch die Anwendung der OOP und modularen Programmaufbau leicht durchführbar
- benutzerfreundliche Ein- und Ausgabe sowie Handhabung des Programms

Nachteile

- keine Berücksichtigung von Wärmeverlusten in der AdKM sowie in den Rohren
- konstante Kühlturm-Austrittstemperatur
- konstante Stoffwerte
- primitives Gebäudemodell: nur eine mittlere Gebäudetemperatur, keine Aufheizung des Gebäudes durch Solarstrahlung oder innere Wärmequellen, keine (nächtliche) Auskühlung des Gebäudes
- kein Wärmeübertrager zwischen Kollektor und Speicher
- Wärmeträger im Kollektorkreis ist reines Wasser statt Wasser-Glykol-Gemisch mit geringerer spez. Wärmekapazität

Mit den genannten Nachteilen sind zukünftige Aufgaben für die Verbesserung des Programms bereits formuliert.

4 Benutzer-Handbuch

4.1 Vorbemerkungen

Das vorliegende Programm berechnet eine Anlage der solaren Klimatisierung, wie sie in Abschnitt 2 beschrieben wurde. Es erfolgt eine echte Simulation, alle Komponenten werden durch physikalische Modelle beschrieben. Die Ausgabe erfolgt sowohl textlich als auch grafisch.

Für detaillierte Betrachtungen können umfangreiche Ergebnisdateien erstellt werden. Die vorliegende Programm-Version ist für *Windows 9x* und *Windows NT* geeignet. Ungefähre Berechnungszeiten für eine Jahressimulation werden in Tabelle 10 gezeigt.

PROZESSOR	TAKTFREQUENZ	DAUER
486	100 MHz	25 min
Pentium	166 MHz	15 min
Pentium	266 MHz	5 min

Tabelle 10: Rechenzeiten verschiedener Prozessortypen für eine Jahressimulation

4.2 Installation

Die Diskette enthält eine *Zip*-Datei. Nach dem Entpacken - nutzen Sie dazu das Programm *WinZip* bzw. den *Norton Commander* - findet sich die in Tabelle 11 dargestellte Verzeichnisstruktur. Mitgeliefert werden neben dem eigentlichen Programm einige Wetter- und Projektdateien. Das Programm führt keine Installationsroutine durch und nimmt auch keinerlei Änderungen an der Konfiguration des PC durch. Durch Löschen aller Dateien und Verzeichnisse kann das Programm wieder spurlos beseitigt werden.

ADSOL/			
PROFILES/	RESULTS/	WETFILES/	adsol.exe
Projektdateien	Ergebnisdateien	Wetterdateien	Programmdatei

Tabelle 11: *AdSOL*-Verzeichnisstruktur

Das Programm kann durch Doppelklicken in einem Dateiverwaltungsprogramm (z.B. *Norton Commander* oder *Windows Explorer*) ausgeführt werden oder auch in die *Start*-Leiste aufgenommen werden. Klicken Sie dazu: *Start - Einstellungen - Taskleiste - Programme - Hinzufügen*.

4.3 Komponenten

4.3.1 Kollektorfeld

Das Kollektorfeld wird mit einem parabolischen k-Modell einschließlich Wärmekapazität abgebildet. Korrekturfaktoren für den Einstrahlungswinkel sind gegenwärtig noch nicht vorgesehen.

Das Modell ist für übliche Flach- und Röhrenkollektoren geeignet. Konzentrierende Systeme sind nicht berechenbar.

Regelung Kollektorkreis

Die Regelung des Kollektorkreises geschieht über eine ideale Temperaturdifferenz-Regelung ohne Hysterese. Der Volumenstrom ist konstant.

4.3.2 Speicher

Hierbei handelt es sich um einen Schichtladespeicher, der mit vertikalen Schichtladerohren der Firma *SOLVIS* bestückt ist. Nähere Informationen zu diesem Speicher sind auf der Internet-Seite www.solvis-solar.de zu finden. Die Schichtladung erfolgt sowohl für den Vorlauf des Kollektorfeldes als auch für den Rücklauf der Adsorptionskältemaschine. Berechnet werden zehn Schichten, wobei von einer idealen Schichtladung ausgegangen wird. Das Modell berücksichtigt unterschiedliche Dämmvarianten und Formfaktoren zylindrischer Speicher sowie den Schichtungsverlust durch Wärmeleitung und Konvektion im Speicher.

4.3.3 Adsorptionskältemaschine

Hierbei handelt es sich um die Adsorptionskältemaschinen vom Typ *NAK* des japanischen Herstellers *Nishiyodo*. Näherungsweise werden auch die Maschinen des Herstellers *Mycom* berechnet, wobei jedoch entgegen der Realität davon ausgegangen wird, daß Regelprinzip und Zyklusdauer identisch sind. Das Berechnungsmodell orientiert sich an der gekoppelten Wärme- und Stofftransportgleichung nach [1]. Es können die Vor- und Rücklauf-Schwelltemperaturen für die interne Maschinenregelung vorgegeben werden.

Regelung der Kältemaschine

Es erfolgt eine Ein/Aus-Regelung mit Hysterese anhand der mittleren Temperatur im Gebäude. Weiterhin kann die Heiztemperatur der Maschine als lineare Funktion in Abhängigkeit der mittleren Gebäudetemperatur eingestellt werden. Hier ist selbstverständlich auch ein konstanter Wert vorgebar.

Nachheizung

Wenn die oberste Speicherschicht kälter als die Heizsolltemperatur der Kältemaschine ist, wird der Heizvolumenstrom nachgeheizt. Die Nachheizung wird als idealer

Durchlauferhitzer mit starrer Leistungsbegrenzung, also ohne Temperaturabhängigkeit der Leistung berechnet. In der Praxis kann es sich hierbei um einen Kessel, ein BHKW, eine Fernwärme-Hausanschlußstation oder eine Brennstoffzelle handeln. Eine Nachkühlung des Kaltwassers durch eine Kompressionskältemaschine als Alternative zur Nachheizung des Heizwassers ist nicht vorgesehen.

4.3.4 Kälteverbraucher

Kälteverteiler

Die "Kälteverteilung" wird als typischer Wärmeübertrager berechnet. Praktisch handelt es sich hierbei um Kühldecken oder um Luftkühler innerhalb einer Klimaanlage. Oberes Temperaturniveau (also das, an welches die Kälte "übergeben" wird) ist stets die mittlere Gebäudetemperatur, so daß Kühldecken recht gut, Luftkühler in Klimaanlage aber nur höchst ungenau berechnet werden.

Gebäude

Das Gebäude wird als idealer einzonaler Speicher berechnet. Es sind unterschiedliche Bauartschweren vorgebar. Die thermische Belastung erfolgt proportional entsprechend der Außentemperatur. Hierzu gibt man eine untere Grenztemperatur sowie einen weiteren Wert für Außentemperatur und Wärmebelastung ein. Für die Zukunft ist die Aufnahme strahlungs- und innenquellenbezogener Terme geplant.

4.4 Bedienung

4.4.1 Allgemeines

Mit dem Start des Programms erscheint die durch Register strukturierte Programmoberfläche. Die technischen Komponenten werden in vier Registerkarten definiert. Daneben gibt es vier weitere Registerkarten für allgemeine Sachverhalte. Die erste Karte zeigt das Schaltbild, das auch in Abbildung 1 gezeigt wird. Die Auswahl der einzelnen Komponenten geschieht durch Anklicken der Registerkarten bzw. mit der Tabulator-Taste.

4.4.2 E/A-Karte

Die zweite Registerkarte (vgl. Abbildung 12) dient dem Datei-Management (*E/A* steht dabei für *Ein-* und *Ausgabe*). Von hier werden Wetter- und Projektdateien geladen sowie das Verzeichnis für die Ausgabe der Ergebnisdateien festgelegt. Außerdem erfolgt von hier der Start der Simulation.

Mit den Buttons *Start* und *Ende* wird die Simulation gestartet bzw. das Programm beendet.

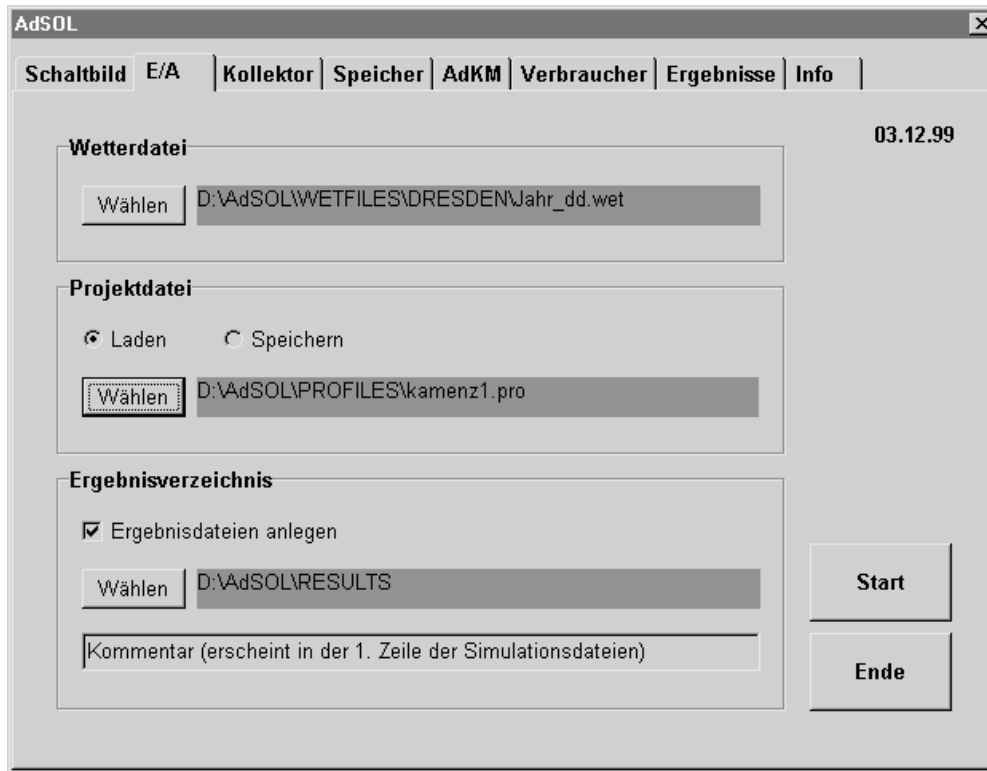


Abbildung 12: Ansicht der *E/A*-Karte

Wetterdatei

Mit dem *Wählen*-Button öffnet man hier ein typisches *Windows*-Auswahlfeld, mit dem an beliebigen Stellen auf dem Rechner befindliche Wetterdateien ausgewählt werden können. Der Wertebereich dieser Wetterdatei definiert zugleich den zu simulierenden Zeitabschnitt. Mitgeliefert werden nur Dateien, die für Dresden im Jahre 1954 real gemessene Werte umfassen. Vorhanden sind eine Jahresdatei, mehrere Monatsdateien und eine Tagesdatei für den wärmsten Tag des Jahres (20. Juni). Man kann eigene Wetterdateien leicht anpassen. Die Datei ist als ASCII-Datei folgender Struktur abzuspeichern:

```
<Kommentarzeile>
S
<Spaltenbezeichnungen>
<Spaltenwerte>
.
.
<Spaltenwerte>
E
```

In Tabelle 12 ist beispielhaft ein Auszug aus einer Wetterdatei dargestellt. Die durch Tabulator getrennten Spalten beinhalten folgende Werte:

1. Stundenummer im Jahresverlauf (1 steht für 1. Januar, 0 Uhr)

2. Diffuse Strahlung auf eine Horizontale in W/m^2
3. Gesamtstrahlung auf eine Horizontale (Globalstrahlung) in W/m^2
4. Außentemperatur in $^{\circ}C$
5. Monat
6. Tag
7. Uhrzeit

Dresden						
S						
Nr	Id	Iges	Temp	Monat	Tag	Stunde
3193	0	0	4.8	5	14	1
3194	0	0	3.8	5	14	2
3195	0	0	2.4	5	14	3
3196	23.1	46.1	2.6	5	14	4
.						
.						
E						

Tabelle 12: Auszug aus einer Wetterdatei

Die Spalten 5 bis 7 sind nicht zwingend erforderlich.

Projektdatei

Hier können Projekte geladen oder gespeichert werden. Bei Betätigung des *Wählen*-Buttons öffnet sich ein typisches *Windows*-Auswahlfenster.

Ergebnisverzeichnis

Standardmäßig werden nur die monatlichen Energiebilanzen sowie einige Kennziffern ausgegeben. Um auch die Temperaturverläufe zu erhalten, muß das Programm zur Ausgabe von Ergebnisdateien veranlaßt werden. Klicken Sie dazu die CheckBox *Ergebnisdateien anlegen*. Nach dem Klicken des *Wählen*-Buttons können Sie nun ein Verzeichnis angeben.

Erstellt wird eine Datei *speicher.sim*, in der die Temperaturen aller zehn Speicherschichten, die Kollektoraustritts- und die Gebäudetemperatur im Stundentakt enthalten sind. Weiterhin wird für jeden Monat eine Datei mit dem Zustand und den Ein- und Austrittstemperaturen der Kältemaschine sowie der unregulierten Temperatur des Heizwassers im 10-Sekunden-Takt erstellt. Eine Übersicht über die Ergebnisdateien finden Sie in Tabelle 8.

Weitere Buttons

Der *Start*-Button veranlaßt die Ausführung der Simulation. Falls Eingaben außerhalb zulässiger Grenzen liegen, wird von der verursachenden Komponente eine Fehlermeldung ausgegeben und die Berechnung erfolgt mit den entsprechenden Grenzwerten. Die Ausgabe um welchen konkreten Wert es sich hierbei handelt, ist aus technischen Gründen gegenwärtig nicht möglich.

Der Programmablauf wird durch ein kleines Fenster mit Fortschrittsbalken angezeigt. Ein Programmabbruch ist nicht möglich.

Mit dem Button *Ende* wird das Programm beendet.

4.4.3 Kollektor-Karte

Diese Registerkarte definiert den Sonnenkollektor einschließlich seiner Aufstellbedingungen (vgl. Abbildung 13). Die voreingestellten geografischen Größen entsprechen hierbei der Lage Dresdens. *Neigung* und *Ausrichtung* werden in Abbildung 14 definiert. Dabei ist *Ausrichtung* ein Winkel in der Horizontalen und nicht zu verwechseln mit dem Einfallswinkel η . Das *Albedo* beschreibt das Rückstrahlungsvermögen der Umgebung. Der Einfluß ist relativ gering. Üblich sind Werte von 0.2 oder 0.3. Bei einer Hanglage an einem großen See ist mehr einzutragen, zum Beispiel 0.5.

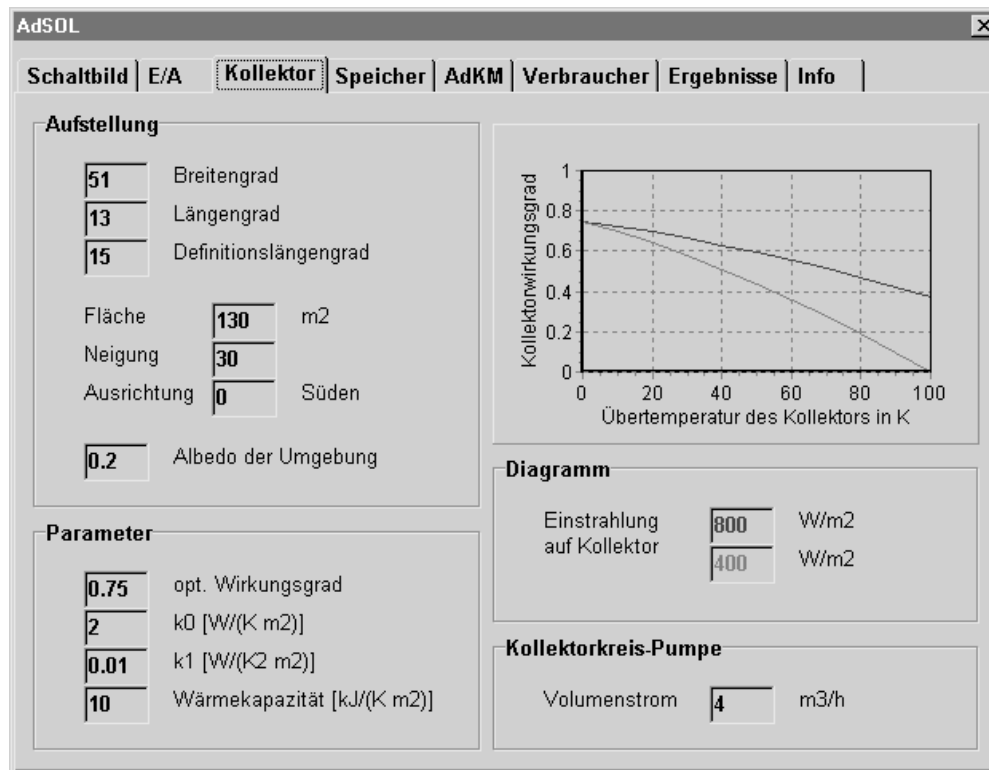


Abbildung 13: Ansicht der *Kollektor*-Karte

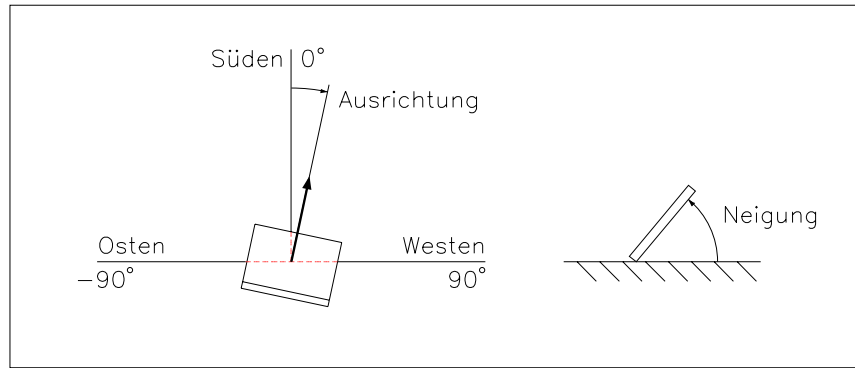


Abbildung 14: Zur Definition von *Neigung* und *Ausrichtung* des Solarkollektors

Die voreingestellten Kollektorkenndaten passen zu einem Flachkollektor mit einer transparenten Wärmedämmung aus Glas. Die genauen Werte sind Prüfberichten oder einer Marktübersicht zu entnehmen. Eine gute Quelle ist hierbei die Marktübersicht des Öko-Instituts Freiburg.

Das Diagramm dient nur zur Veranschaulichung der Kollektorkennwerte. Der Volumenstrom sollte so festgelegt werden, daß sich ein auf die Kollektorfläche bezogener mittlerer Volumenstrom von 15 bis 40 $l/(h m^2)$ ergibt. Wenn eine AdKM-Anlage ohne Solaranlage berechnet werden soll, ist beim Volumenstrom eine Null einzusetzen.

4.4.4 *Speicher-Karte*

Die Registerkarte *Speicher* ermöglicht die Eingabe der Anfangstemperaturen des Speichers, die Definition seines Volumens, seines Innendurchmessers, seiner Isolierung und seiner Aufstellbedingungen (vgl. Abbildung 15). Zur Berücksichtigung von Wärmebrücken-Faktoren kann der Wärmeleitwert der Isolierung verdoppelt werden. Die Isolierung kann durch Eingabe einer sehr großen Isolierdicke auch idealisiert gerechnet werden.

4.4.5 *AdKM-Karte*

Die Registerkarte *AdKM* ermöglicht die Definition aller die Adsorptionskältemaschine betreffenden Parameter (vgl. Abbildung 16).

Adsorptionskältemaschinen sind aufgrund ihrer niedrigen Desorptionstemperatur und des robusten Betriebsverhaltens sehr gut für die solare Klimatisierung geeignet. Eine präzise Beschreibung wäre für dieses Manual zu umfangreich. Es wird empfohlen, die Internet-Präsentation www.adsorber.de zu studieren.

Kaltwasserkreislauf

Hier sind der Kaltwasser-Volumenstrom und die Regelschwellwerte einzugeben. Der Kaltwasservolumenstrom ist aus einer Maschinenbeschreibung (z.B. www.adsorber.de oder www.GBUmbH.com) zu entnehmen. Wird die volle Leistung nicht benötigt,

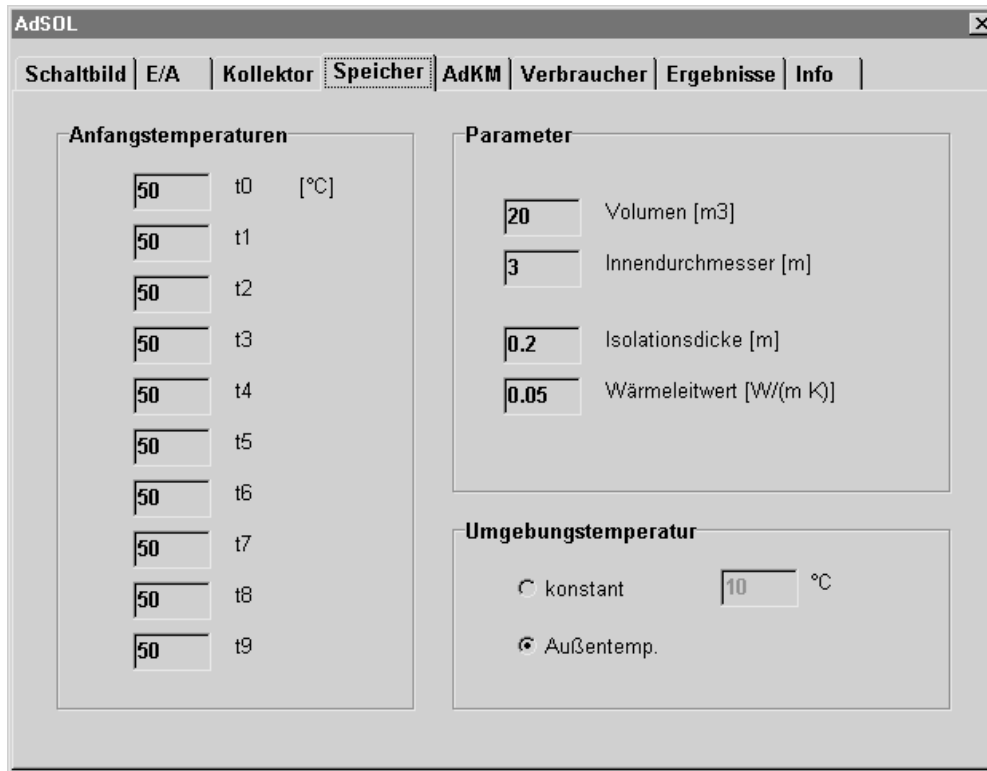


Abbildung 15: Ansicht der *Speicher*-Karte

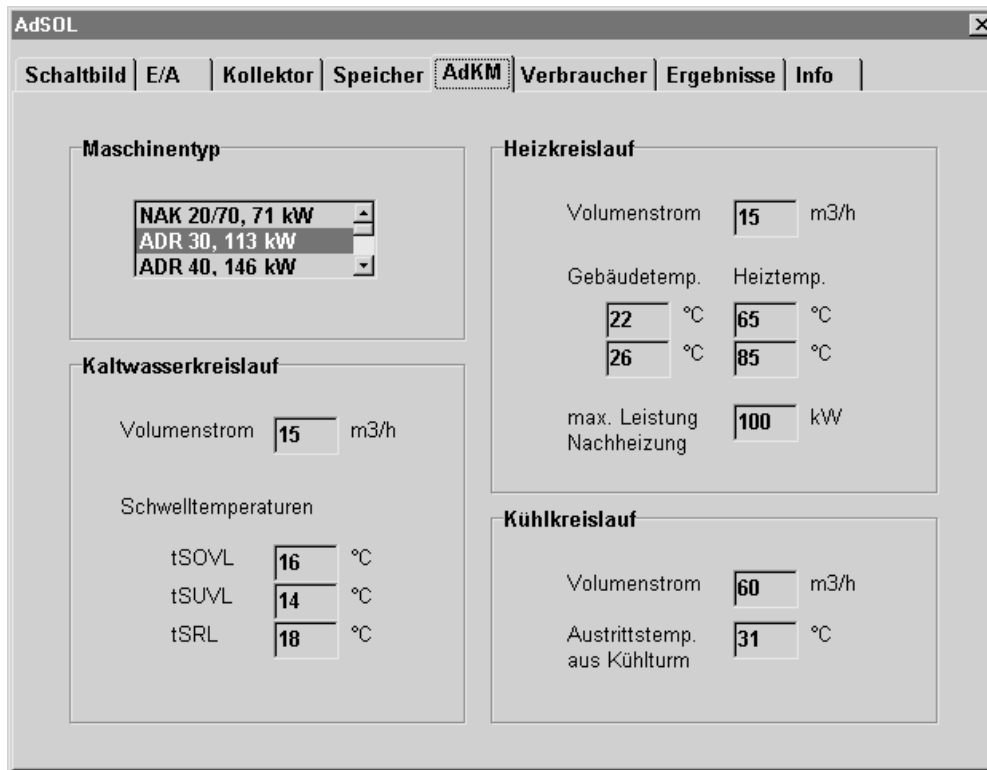


Abbildung 16: Ansicht der *AdKM*-Karte

kann auch ein etwas kleinerer Volumenstrom gewählt werden. Da die Maschine einfrieren kann, darf hier nur in geringem Maß gespart werden.

$tSOVL$ und $tSUVL$ sind die Schwellwerte für die Maschinenregelung nach der Verdampfer-Austrittstemperatur $tAbKalt$. Unterschreitet der Kältevorlauf den Wert $tSUVL$, gehen Heiz- und Kühlvolumenstrom in den Bypass. Damit steigt die Temperatur des Kältevorlaufs wieder an und bei Überschreiten von $tSOVL$ läuft die Maschine im nächsten Zyklus weiter. Dieses Regelprinzip ist sehr wirksam, führt aber zu einer Verschlechterung des Kälteverhältnisses.

$tSRL$ ist der Schwellwert für die Regelung nach der Verdampfer-Eintrittstemperatur $tZuKalt$. Liegt die Rücklaufftemperatur bei Zyklusumschaltung über diesem Wert, dauert der nächste Zyklus sieben Minuten (Kurzyklus), anderenfalls sind es 21 Minuten (Langzyklus). Diese Zyklusverlängerung führt zu einer Erhöhung des Kälteverhältnisses.

Die Ausführungen im Abschnitt 5.1 sollten zum besseren Verständnis der Temperaturschwellwerte dienen.

Heizkreislauf

Hier sind der Heizvolumenstrom sowie die Regelgrößen der Heizseite einzugeben. Der maximal mögliche Heizvolumenstrom ist aus den Maschinenunterlagen zu entnehmen. Wenn die Nennleistung der Maschine nicht benötigt wird, kann der Heizvolumenstrom bis auf etwa ein Drittel reduziert werden. Dies ist nur als konstanter Wert einstellbar, in der Praxis wird man hier vielleicht mit variablen Volumenströmen arbeiten.

In den weiteren Feldern wird die Kennlinie der Heiztemperatur vorgegeben. Es handelt sich hierbei um eine lineare Funktion in Abhängigkeit von der mittleren Gebäudetemperatur. Empfehlenswert sind die Eingaben in Tabelle 13.

GEBÄUDETEMPERATUR	KÜHLDECKENANLAGE	LUFTKLIMAANLAGE
$22^{\circ}C$	$50^{\circ}C$	$65^{\circ}C$
$26^{\circ}C$	$70^{\circ}C$	$85^{\circ}C$

Tabelle 13: Zur Festlegung der Kennlinie der Heiztemperatur

Die Regelung der Heiztemperatur ist in Verbindung mit einem Kollektorfeld als Hauptheizquelle den maschineninternen Regelungsvarianten überlegen. Wenn dennoch eine konstante Heiztemperatur vorgegeben werden soll, können zwei gleiche Temperaturen eingegeben werden.

Wenn die Temperatur im Speicher höher ist als der aktuelle Sollwert für die Heiztemperatur, wird der Sollwert durch Beimischen von Rücklaufwasser eingestellt. Ist die Temperatur geringer, tritt die Nachheizung in Aktion. Für die Nachheizung kann

auch eine maximale Leistung eingestellt werden. Soll nicht nachgeheizt werden, kann man hier eine Null vorgeben.

Beim Kühlkreislauf sind Volumenstrom und Kühlturm-Austrittstemperatur definierbar. Der Volumenstrom sollte gegenüber dem Nennwert nicht um mehr als ein Viertel reduziert werden, da sich die interne Wärmerückgewinnung sonst verschlechtert und der Heizwärmebedarf damit ansteigt. Die Kühlwasser-Temperatur ist standardmäßig 31°C . Falls niedrigere Werte möglich sind, kann man parallel zur Vorlauftemperatur des Kühlwassers auch die des Heizwassers absenken.

4.4.6 Verbraucher-Karte

Diese Registerkarte definiert die ‘‘Kälteverteilung‘‘, das Gebäude und eine Regelgröße (vgl. Abbildung 17).

Abbildung 17: Ansicht der *Verbraucher*-Karte

Kälteübergabe steht für die Wärmeabfuhr aus dem Gebäude. Diese geschieht mit Kühldecken und wird ähnlich wie bei einem Heizkörper berechnet. Aus den Katalogangaben zu den Kühldeckeneigenschaften sowie der Fläche kann die spezifische Kälteleistung der Kühldecke berechnet werden. Falls die Kühldeckeneigenschaften noch nicht bekannt sind, ist der Wert für die spezifische Kälteleistung ist so festzulegen, daß die mittlere Temperaturdifferenz (Quotient von Kälteleistung und spezifischer Kälteleistung) bei 5 bis 10 K liegt.

Näherungsweise ist damit auch ein Luftkühler berechenbar. Hier ist die mittlere Temperaturdifferenz auf 10 bis 18 K auszulegen. Weitere Effekte, wie Feuchteausfall werden nicht berücksichtigt.

Regelung der Kältemaschine meint hier die externe Ein- und Ausschaltung der Kältemaschine. Es handelt sich um eine Zweipunktregelung mit Hysterese anhand der mittleren Gebäudetemperatur. Es wird empfohlen, die Vorgaben zu übernehmen.

Die **Totzeit** ist ein für AdKM äußerst wichtiger Effekt des Kältenetzes. Die Kältemaschine verursacht eine charakteristische Schwingung des Kältevorlaufs. Diese findet sich auch im Rücklauf wieder und beeinflusst erneut den Vorlauf und damit das Betriebsverhalten der Kälteanlage. Die Schwingung des Rücklaufs ist gegenüber der des Vorlaufs gedämpft und verschoben. Die Verschiebung kann zwischen wenigen bis zu 20 Minuten liegen und wird als *Totzeit* bezeichnet. Sie entspricht ungefähr der Wegdauer eines Wassermoleküls für einen kompletten Umlauf im Kaltwassernetz. Voreinstellung ist Null, also keine Totzeit.

Mit der **thermischen Belastung** wird der Leistungsbedarf des Gebäudes definiert. Es handelt sich um eine proportionale Abhängigkeit von der Außentemperatur. Es gibt einen Minimalwert, bei dem der Wärmeeintrag beginnt und einen weiteren Wert, der den Anstieg der Geraden bestimmt. Die thermische Belastung ist hierbei der Wärmeeintrag in das Gebäude durch Wärmeleitung, Strahlung und innere Quellen.

Die Gebäudedämmung wird über die **Bauweise des Gebäudes** festgelegt. Die fünf möglichen Typen werden in Tabelle 14 aufgeführt.

TYP	BEISPIEL
Sehr leicht	Baracke
Leicht	Holztafel-Verbundbauweise oder Massivbau mit thermisch entkoppelter Wandverkleidung und Trockenausbauiinnenwänden
Mittel	Massivbau aus 36 <i>cm</i> dickem <i>Poroton</i>
Schwer	Massivbau aus Normalbeton
Sehr schwer	Burgen, Schlösser, Kirchen etc.

Tabelle 14: Gebäudetypen

4.4.7 *Ergebnisse*

Die Registerkarte *Ergebnisse* beinhaltet eine Kurzübersicht über die Ergebnisse der Simulation (vgl. Abbildung 18). Dargestellt sind die Energiebilanzen jeweils wahl-

weise als Tabelle oder als eine von drei Diagrammvarianten. Die Tabelle kann in einer mit Tabulator getrennten Text-Datei gespeichert werden, die Diagramme sind als *Windows-Metafiles* speicherbar.

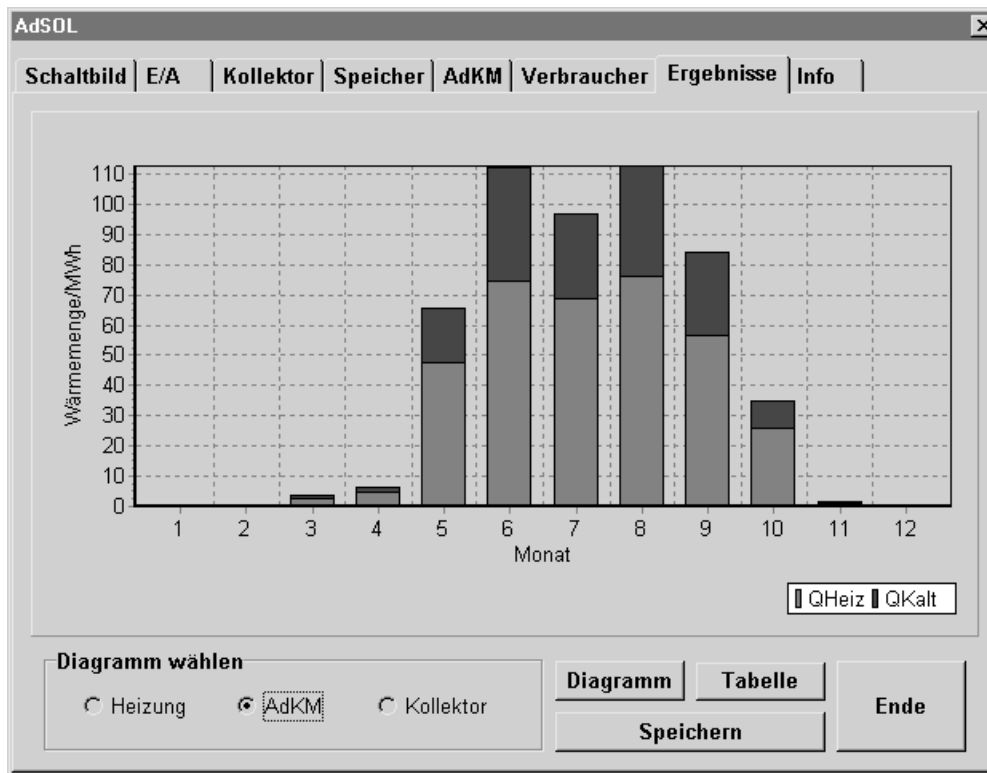


Abbildung 18: Ansicht der Karte *Ergebnisse*

Die Darstellung ist leider nur monats-, also nicht tage- oder stundenweise möglich. Solche Darstellungen kann jeder Nutzer selber unter Verwendung der Ausgabedateien und eines Tabellenkalkulationsprogramms erstellen.

4.4.8 Info

Die letzte Registerkarte beinhaltet Angaben zu Versionsnummer, Gültigkeit und Update des Programms.

Bitte beachten Sie, daß gegenwärtig nur beta-Versionen verfügbar sind. Diese werden personenbezogen erstellt, sind begrenzt gültig und dürfen nicht weitergegeben werden. Die Testergebnisse sind vertraulich zu behandeln und der TU Dresden mitzuteilen. Dem Kreis der beta-Tester kann sich jeder anschließen. Es ist lediglich eine Anmeldung über die mail-Routine von www.malteser-krankenhaus-kamenz.de erforderlich.

5 Testrechnungen

5.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt soll die Sinnfälligkeit der vom Programm *AdSOL* berechneten Ergebnisse überprüft werden. Dabei geht es vorrangig um qualitative Aussagen. Die quantitative Validierung von Simulationsergebnissen bleibt späteren Arbeiten vorbehalten.

Zur Gewinnung der Wetterdaten wurden die in Dresden-Wahnsdorf im Jahr 1954 gemessenen Werte verwendet. In einigen Testrechnungen wurden die Standorte Dresden und Cagliari verglichen. Dazu wurde zusätzlich ein Testreferenzjahr für Cagliari verwendet, das aus Wetterdaten der Jahre 1951 bis 1970 erstellt wurde.

Für die Anpassung der Kälteleistung an den Kältebedarf können prinzipiell zwei Konzepte unterschieden werden:

- **externe Regelung:** Anpassung der Heiztemperatur je nach mittlerer Gebäudetemperatur
- **interne Regelung:** konstante Heiztemperatur und maschineninterner Abbruch bzw. Beginn eines Arbeitszyklus anhand vorgegebener Schwellwert-Temperaturen

Um die externe Regelung, bei der ein Zyklusabbruch vermieden wird, zu simulieren, wurden die Schwellwert-Temperaturen $tSOVL$ und $tSUVL$ auf $0^{\circ}C$ gesetzt. Die Schwellwert-Temperatur $tSRL$ entscheidet darüber, ob die AdKM im Kurz- oder Langzyklus läuft. Wenn $0^{\circ}C$ eingestellt sind, kommt es in jedem Fall zum Kurzzyklus, bei $30^{\circ}C$ in jedem Fall zum Langzyklus (zur Einstellung des nächsten Maschinenzyklus vgl. bitte auch mit Abschnitt 3.3.2). Die Vorgaben zur externen Regelung werden in Tabelle 15 zusammengefaßt.

	$tSOVL$	$tSUVL$	$tSRL$
Kurzzyklus, ohne Abbruch	$0^{\circ}C$	$0^{\circ}C$	$0^{\circ}C$
Langzyklus, ohne Abbruch	$0^{\circ}C$	$0^{\circ}C$	$30^{\circ}C$

Tabelle 15: Schwellwerte zur Simulation der externen Regelung der AdKM

Weiterhin wurde das Betriebsverhalten der AdKM bei interner Regelung untersucht. Hier ist ein Abbruch der Arbeitszyklen "erwünscht". Deshalb müssen $tSOVL$ und $tSUVL$ entsprechend dem Kaltwasser-Temperaturniveau vorgegeben werden. In Tabelle 16 werden die Vorgaben gezeigt. Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf dem Fall *Kamenz*. Der entspricht weitgehend der Teilanlage der solaren Klimatisierung, die im Malteser-Krankenhaus in Kamenz im Entstehen begriffen ist. Der *Nennfall* dient dem Vergleich mit den Herstellerangaben in Abschnitt 5.2.2. Der Fall *Loge*

spiegelt die Kenndaten des Bürogebäudes *An der Loge* in Dresden wider. Aus Zeitgründen konnten für diesen Fall nur wenige Berechnungen durchgeführt werden. Im Abschnitt 5.2.2 werden die Ergebnisse tabellarisch dargestellt.

	NENNFALL	KAMENZ	LOGE
tSOVL	9°C	6°C	16°C
tSUVL	8°C	5°C	15°C
tSRL	0°C	0°C	0°C
tHeiz	75°C	85°C	70°C

Tabelle 16: Schwellwerte zur Simulation der internen Regelung der AdKM

Bei der Überprüfung der Wärmemengenbilanzen traten kleine Differenzen auf, die meist unter einem Prozent liegen. Diese Abweichungen sind wahrscheinlich auf nicht vollständig eingeschwungene thermodynamische Prozesse sowie Speichereffekte zurückzuführen.

5.2 Kurzzeitrechnungen

5.2.1 Vorgaben

In diesem Abschnitt geht es darum, Momentaufnahmen vom Betrieb der AdKM zu zeigen. Die für diese Berechnungen relevanten Vorgaben werden in Tabelle 17 gezeigt.

	NENNFALL	KAMENZ	LOGE
Maschinentyp	113 kW	113 kW	71 kW
Kaltwasser	9°C	6°C	16°C
Heizwasser	60 - 75°C	65 - 85°C	50 - 70°C
\dot{V}_{Heiz}	30 m ³ /h	15 m ³ /h	7 m ³ /h
\dot{V}_{Kuehl}	60 m ³ /h	60 m ³ /h	20 m ³ /h
\dot{V}_{Kalt}	18 m ³ /h	15 m ³ /h	11 m ³ /h
Kühlturm-Austritt	29°C	28°C	28°C
spez. Kälteleistung	6.5 kW/K	5 kW/K	6 kW/K
Totzeit	0	10 min	17 min
therm. Belastung	20 kW / 12°C 130 kW / 32°C	20 kW / 12°C 120 kW / 32°C	10 kW / 18°C 60 kW / 32°C
Gebäudeschwere	mittel	mittel	leicht

Tabelle 17: Projektdaten für die Kurzzeitrechnungen

Um den Einfluß von Speichereffekten zu verringern und ein “eingeschwungenes“ Betriebsverhalten zu untersuchen, wurde der zu simulierende Tag fünfmal hintereinander gerechnet. Ausgewertet wurden die Stundenmittelwerte vom Mittag des letzten Tages.

5.2.2 Ergebnisse

Externe Regelung

Als Wetterdaten wurden hier die Werte vom 20. Juni (wärmster Tag) in Dresden verwendet.

In den Abbildungen 19 und 20 sind die Temperaturverläufe an der AdKM jeweils für 40 Minuten dargestellt. Gezeigt werden nacheinander Kurz- und Langzyklen bei externer Regelung sowie Kurzzyklen bei interner Regelung.

Nur wenn die Desorber-Austrittstemperatur t_{AbHeiz} unter der maximalen Speichertemperatur liegt, gelangt das Wasser zurück in den Speicher. Dies ist nicht der Fall, wenn die Temperaturen t_{AbHeiz} und t_{ZuHeiz} praktisch gleich sind. Hier wird der Speicher umgangen. Die Temperatur t_{ZuHeiz} entspricht der unregulierten Heiztemperatur, die Temperatur t_{Heiz} steht für die tatsächliche Desorber-Eintrittstemperatur nach der Nachheizung (bzw. Rücklaufbeimischung). Ebenfalls gut erkennbar ist die Phasenverschiebung infolge der Totzeit zwischen t_{AbKalt} und t_{ZuKalt} im Fall *Kamenz*.

Die Ergebnisse für die Simulation der externen Regelung bzw. den Vergleich zwischen Kurz- und Langzyklus sind in Tabelle 18 zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß mit ca. 92 kW die *Nennfall*-Kälteleistung, die unter den gegebenen Parametern vom Hersteller mit 107 kW angegeben wird, nicht erreicht wurde. Auch die errechneten COP-Werte im Kurzzyklus liegen erheblich unter den Hersteller-Werten. Selbst wenn unterstellt wird, daß die Hersteller-Werte zu positiv ausfallen, sind die Abweichungen zu groß. Es besteht hier also der Bedarf, Parameter anzupassen.

Weiterhin wird deutlich, daß die Kälteleistung im Kurzzyklus etwas größer als im Langzyklus ist. Dafür kann im Langzyklus ein besseres Kälteverhältnis verzeichnet werden. Diese Ergebnisse stimmen mit der Praxis überein.

Interne Regelung

Um den Abbruch eines Arbeitszyklus zu ermöglichen, waren hier Wetterdaten notwendig, die einen Teillast-Betrieb der Anlage verursachen. Für *Kamenz* wurden die Werte vom 22. März, für den *Nennfall* und die *Loge* die Werte vom 23. Mai verwendet.

Im jeweils letzten Diagramm der Abbildungen 19 und 20 wird der “abgehackte“ Betrieb der AdKM gezeigt. Die interne Regelung bringt eine hohe Anzahl an Schaltvorgängen mit sich. Wie durch die wesentlich schlechteren Kälteverhältnisse deutlich wird (vgl. Tabelle 19), ist dies nicht nur für eine hohe Lebensdauer sondern auch für das Betriebsverhalten sehr ungünstig.

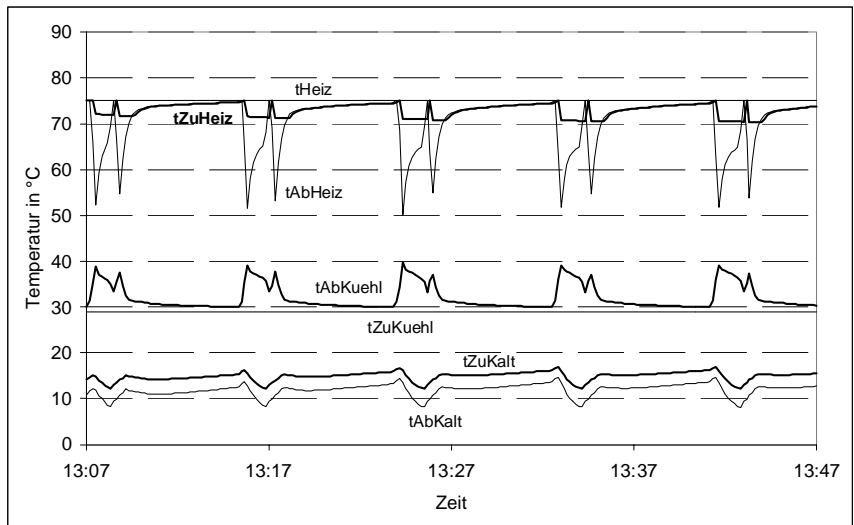
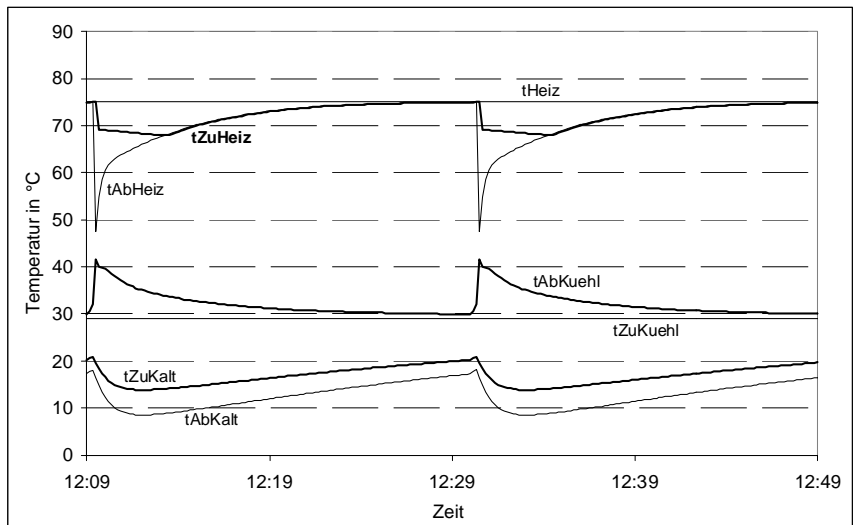
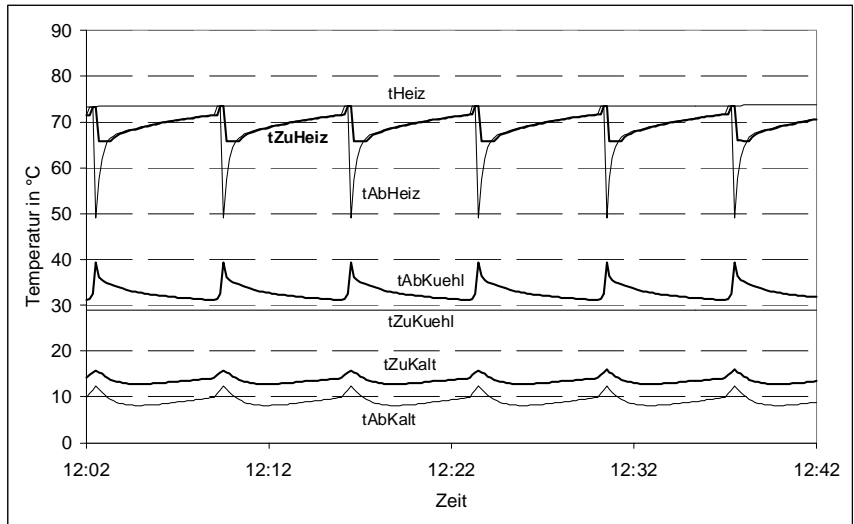


Abbildung 19: Arbeitszyklen der AdKM im Nennfall

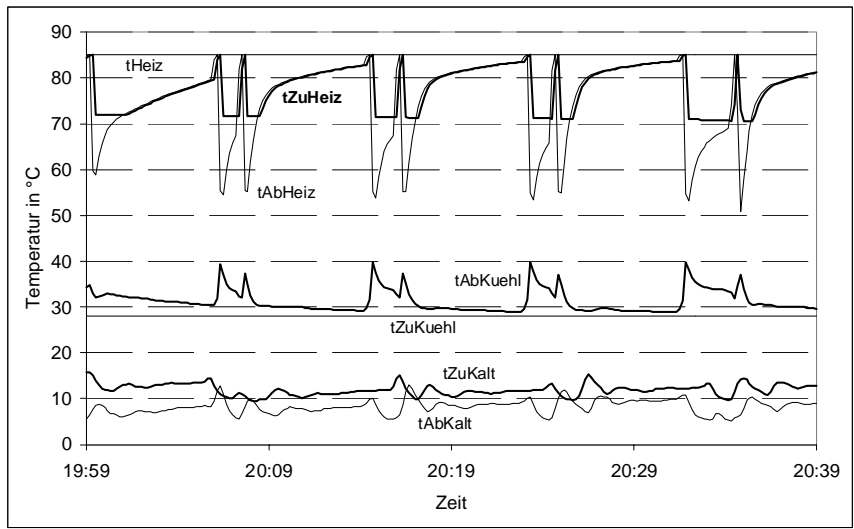
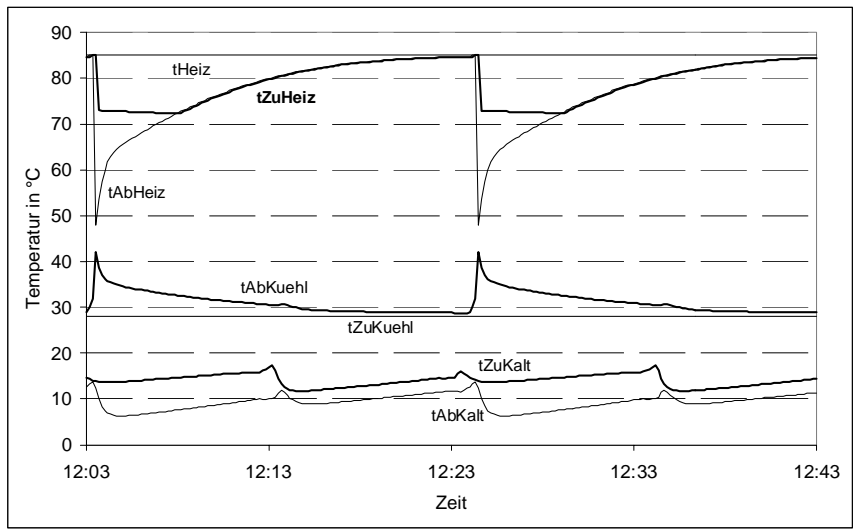
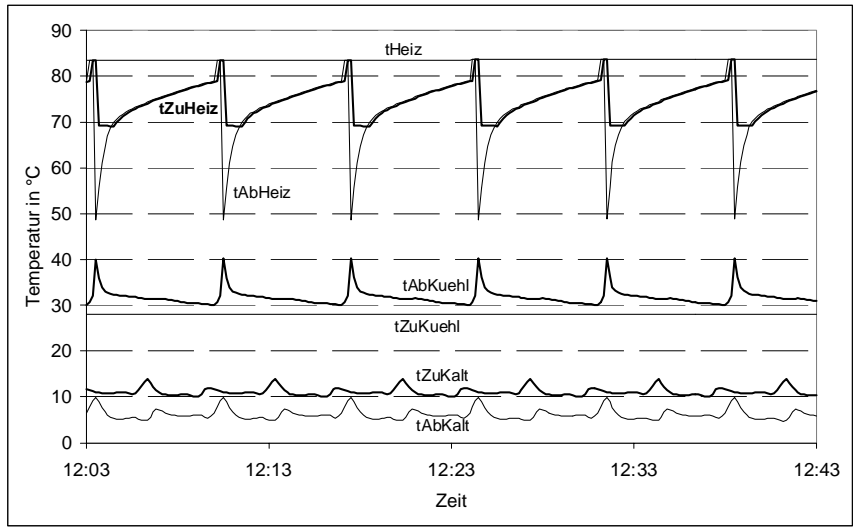


Abbildung 20: Arbeitszyklen der AdKM im Fall *Kamenz*

	KURZZYKLUS	LANGZYKLUS
Nennfall		
\dot{Q}_{Kalt}/kW	91.8	86.6
\dot{Q}_{Heiz}/kW	164.8	122.3
\dot{Q}_{Kuehl}/kW	258.4	209.1
$COP\ err./theo.$	0.557/0.6	0.708/0.635
$t_{Ab,Heiz}/^{\circ}C$	68.8	71.4
$t_{Zu,Heiz}/^{\circ}C$	69.5	72.4
$t_{Heiz}/^{\circ}C$	73.6	75.0
$t_{Ab,Kuehl}/^{\circ}C$	32.8	32.0
$t_{Zu,Kuehl}/^{\circ}C$	29.0	29.0
$t_{Ab,Kalt}/^{\circ}C$	9.2	12.8
$t_{Zu,Kalt}/^{\circ}C$	13.6	16.9
Kamenz		
\dot{Q}_{Kalt}/kW	84.6	80.4
\dot{Q}_{Heiz}/kW	172.0	122.2
\dot{Q}_{Kuehl}/kW	258.0	202.6
$COP\ err./theo.$	0.492/0.61	0.658/0.64
$t_{Ab,Heiz}/^{\circ}C$	73.7	77.9
$t_{Zu,Heiz}/^{\circ}C$	75.0	79.4
$t_{Heiz}/^{\circ}C$	83.7	85.0
$t_{Ab,Kuehl}/^{\circ}C$	31.7	30.9
$t_{Zu,Kuehl}/^{\circ}C$	28.0	28.0
$t_{Ab,Kalt}/^{\circ}C$	6.2	9.4
$t_{Zu,Kalt}/^{\circ}C$	11.1	14.0
Loge		
\dot{Q}_{Kalt}/kW	41.2	41.9
\dot{Q}_{Heiz}/kW	74.5	60.2
\dot{Q}_{Kuehl}/kW	115.4	101.4
$COP\ err./theo.$	0.552/0.665	0.696/0.67
$t_{Ab,Heiz}/^{\circ}C$	53.2	55.5
$t_{Zu,Heiz}/^{\circ}C$	56.2	58.3
$t_{Heiz}/^{\circ}C$	62.5	63.0
$t_{Ab,Kuehl}/^{\circ}C$	33.0	32.4
$t_{Zu,Kuehl}/^{\circ}C$	28.0	28.0
$t_{Ab,Kalt}/^{\circ}C$	15.9	16.0
$t_{Zu,Kalt}/^{\circ}C$	19.1	19.4

Tabelle 18: Ergebnisübersicht zur externen Regelung

	NENNFALL	KAMENZ	LOGE
\dot{Q}_{Kalt}/kW	61.0	67.7	24.5
\dot{Q}_{Heiz}/kW	141.1	171.5	114.1
\dot{Q}_{Kuehl}/kW	205.2	239.7	138.1
COP err./theo.	0.433/0.63	0.395/0.63	0.215/0.69
$t_{Ab,Heiz}/^{\circ}C$	70.9	75.0	55.8
$t_{Zu,Heiz}/^{\circ}C$	73.0	77.4	70.4
$t_{Heiz}/^{\circ}C$	75.0	85.0	70.0
$t_{Ab,Kuehl}/^{\circ}C$	32.0	31.5	34.0
$t_{Zu,Kuehl}/^{\circ}C$	29.0	28.0	28.0
$t_{Ab,Kalt}/^{\circ}C$	12.1	8.1	16.5
$t_{Zu,Kalt}/^{\circ}C$	15.0	12.0	18.4

Tabelle 19: Ergebnisübersicht zur internen Regelung

5.3 Tagesrechnungen

5.3.1 Vorgaben

In diesem Abschnitt soll das Verhalten der Kälteanlage in Kamenz weiter untersucht werden. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß damit nur die Teilanlage der solaren Klimatisierung gemeint ist. Parallel ist weiterhin ein Kompressionskältemaschine vorhanden, die zur Abdeckung des Spitzenbedarfs dient. Diese Teilanlage ist kein Gegenstand der Betrachtung.

Die Eingaben im Programm wurden nach Tabelle 20 vorgenommen. Die AdKM wurde extern geregelt, es waren nur Kurzzyklen möglich.

Weiterhin wurden zwei Typtage definiert:

- Heißer Tag: 20. Juni
- Warmer Tag: 23. Mai

Auf eine weitere Unterteilung nach Solarstrahlung wurde verzichtet, da die Wärmelast im Gebäude momentan nur in Abhängigkeit von der Außentemperatur berechnet wird.

Wie bereits im Abschnitt 5.2.1 beschrieben, wurden in den Wetterdateien die Wetterdaten des jeweiligen Tages wieder fünfmal aneinander gereiht. Ausgewertet werden die Daten des letzten Tages.

Kollektor	
Aufstellungsort	Dresden
Fläche	115 m ²
Neigung	30°
Ausrichtung	0°
Albedo	0.2
opt. Wirkungsgrad	0.75
k0	2 W/(m ² K)
k1	0.01 W/(m ² K ²)
Wärmekapazität	10 kJ/(m ² K)
Kollektor-Volumenstrom	4 m ³ /h
Speicher	
Speichertemperaturen	50°C
Volumen	20 m ³
Innendurchmesser	3 m
Isolationsdicke	0.2 m
Wärmeleitwert	0.05 W/(m K)
Umgebungstemperatur	Außentemperatur
AdKM	
Maschinentyp	ADR 30, 113 kW
Kaltwasser-Volumenstrom	15 m ³ /h
Heizwasser-Volumenstrom	15 m ³ /h
Kühlwasser-Volumenstrom	60 m ³ /h
tSOVL, tSUVL, tSRL	0°C
Heizkurve	65°C bei 22°C 85°C bei 26°C
max. Nachheizung	1000 kW
Kühlturm-Austrittstemperatur	28°C
Verbraucher	
spez. Kälteleistung	5 kW/K
Regelung der Kältemaschine	EIN bei 23°C AUS bei 22°C
Totzeit	10 min
Gebäudetemperatur am Beginn	22°C
therm. Belastung	20 kW bei 12°C 120 kW bei 32°C
Gebäudeschwere	mittel

Tabelle 20: Eingaben zur Berechnung der Teilanlage der solaren Klimatisierung des Malteser-Krankenhauses in Kamenz

5.3.2 Ergebnisse

Heißer Tag

Wie in den Diagrammen der Abbildung 21 zu erkennen ist, war die AdKM durchgehend in Betrieb. Aufgrund der schon seit fünf Tagen anhaltenden hohen Außentemperaturen liegt die Gebäudetemperatur auf einem hohen Niveau (ca. 26°C). Am Vormittag kann die Gebäudetemperatur etwas abgesenkt werden, dann steigt sie wieder. Abhilfe könnte hier eventuell eine steilere Heizkurve schaffen, die beispielsweise schon bei einer Gebäudetemperatur von 24°C ihr Maximum erreicht.

Gut zu erkennen ist die Schichtung im Speicher. Die maximale Temperatur beträgt etwa 70°C . Damit besteht keine Gefahr der Überladung des Speichers.

Die Fläche unter der Heizleistung entspricht der Tages-Wärmemenge, die für die Heizung der AdKM verwendet wurde. Die Fläche unter der Kurve der Kollektorleistung entspricht ungefähr der Wärmemenge, die dafür durch Solarenergie aufgebracht werden kann. Die Differenz dieser beiden Flächen steht damit für die Wärmemenge, die durch die Nachheizung aufzubringen ist. Der solare Deckungsgrad ist damit relativ gering.

Warmer Tag

Anhand der Verläufe von Wärmeleistungen und Gebäudetemperatur in Abbildung 22 kann man erkennen, daß die AdKM ungefähr die erste Tageshälfte außer Betrieb ist. Erst als die Gebäudetemperatur 23°C erreicht, geht die AdKM in Betrieb. Nach dem Verstreichen der zweiten Tageshälfte werden wieder die 22°C erreicht und die AdKM geht wieder außer Betrieb.

Bedingt durch die guten Wetterbedingungen (hohe Einstrahlung bei relativ geringer Außentemperatur) ist hier der solare Deckungsgrad wesentlich besser. Ob dieses Ergebnis auch bei Berücksichtigung der Wärmelast durch Solarstrahlung aufrecht erhalten werden kann, bleibt abzuwarten.

In Tabelle 21 werden die Tages-Wärmemengen und Kennziffern gegenübergestellt.

	20. JUNI	23. MAI
Q_{Einstr}/kWh	612	695
Q_{Koll}/kWh	340	335
Q_{Kalt}/kWh	2059	789
Q_{Heiz}/kWh	4068	1505
$Q_{Nachheiz}/kWh$	3738	1179
Q_{Kuehl}/kWh	6145	2308
COP	0.506	0.524
KN_G	0.556	0.482
DG	0.081	0.217

Tabelle 21: Ergebnisübersicht zu den Tagesrechnungen

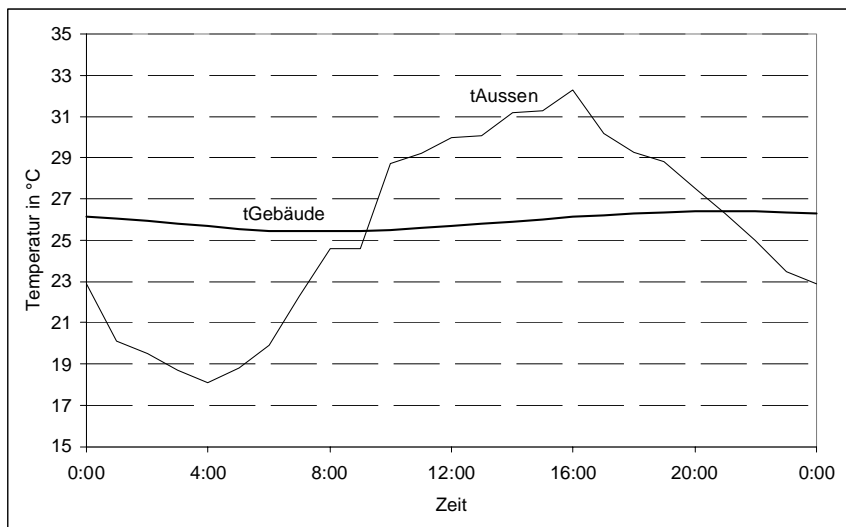
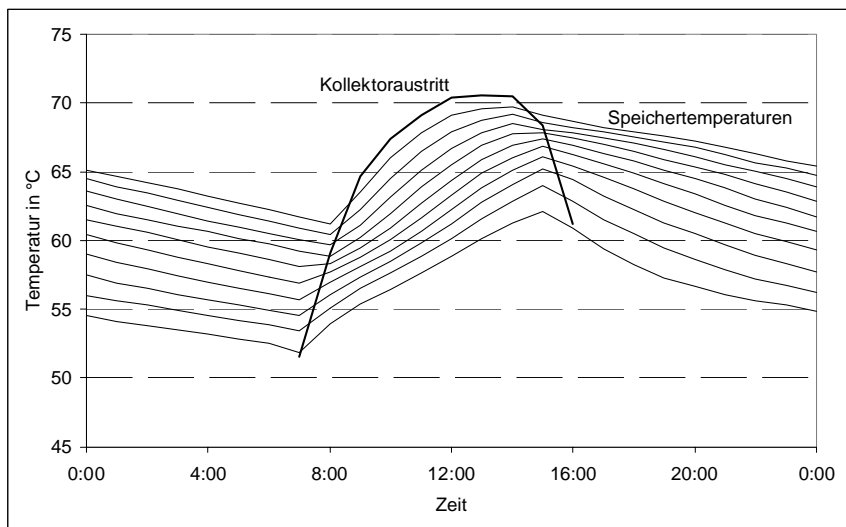
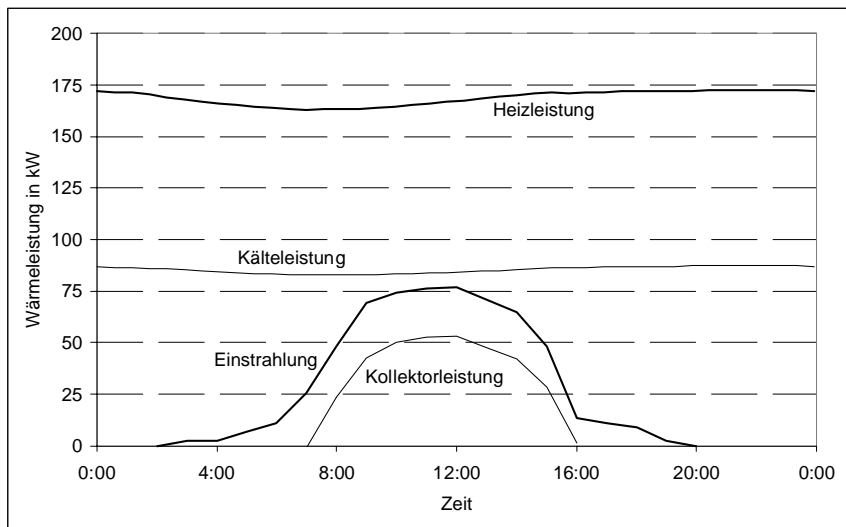


Abbildung 21: Das Betriebsverhalten der Anlage am 20. Juni

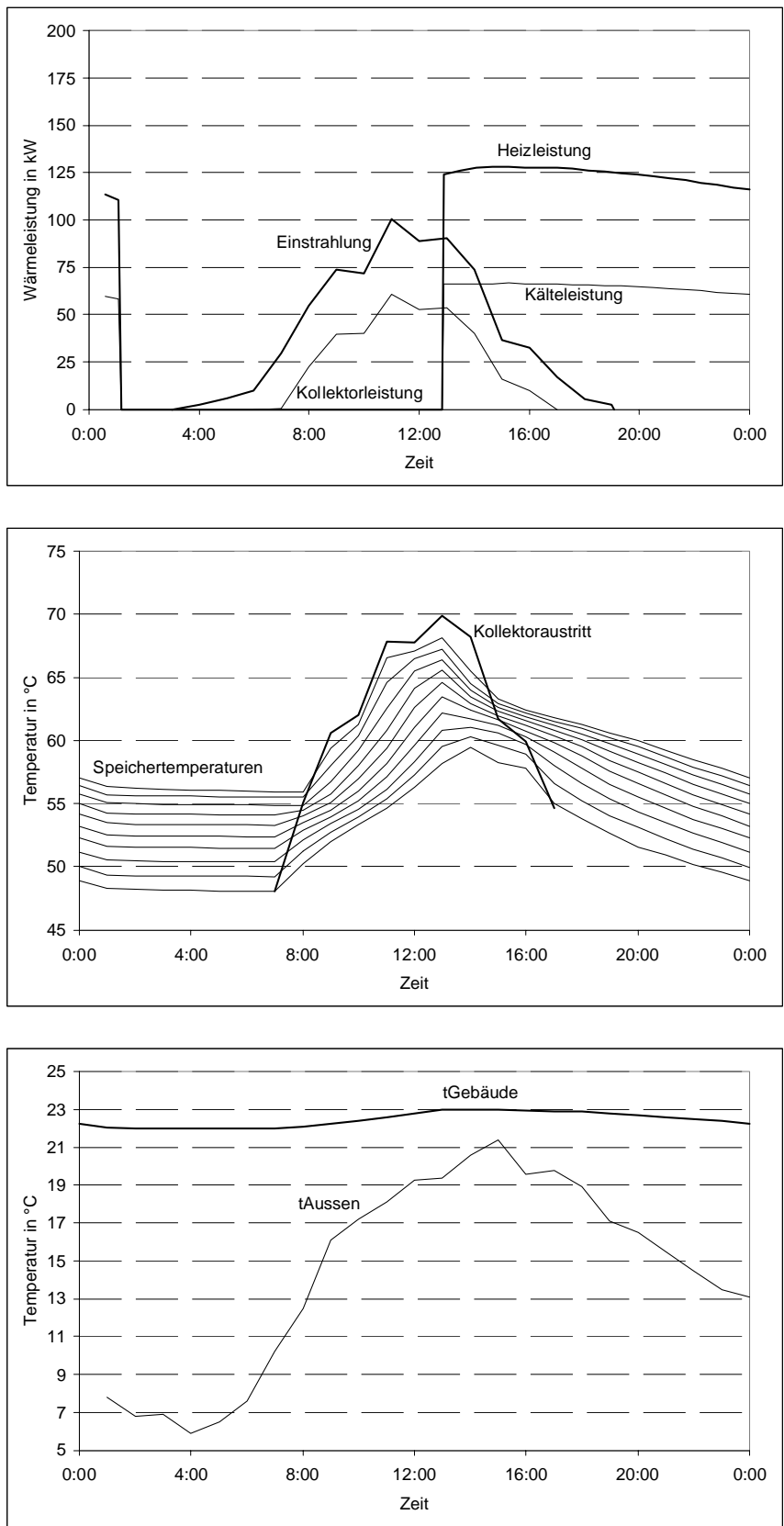


Abbildung 22: Das Betriebsverhalten der Anlage am 23. Mai

5.4 Jahresrechnungen

5.4.1 Vorgaben

Grundlage der Jahresrechnungen ist die Teilanlage der solaren Kälteerzeugung, wie sie derzeit im Malteser-Krankenhaus in Kamenz aufgebaut wird. Die Vorgaben für die Parameter der Anlage werden in Tabelle 20 zusammengefaßt.

Nach der Berechnung der Grundvariante wurden verschiedene Parameter variiert, um deren Einfluß auf das Betriebsverhalten zu untersuchen. Im einzelnen waren das folgende Größen:

- Kollektorfläche
- Speichervolumen
- Kühlbeginn
- Art der AdKM-Regelung
- Art des Kollektors
- Standort

5.4.2 Ergebnisse

Grundvariante

In Abbildung 23 werden die Ergebnisse der Berechnung für die Grundvariante zusammengefaßt. Es fällt auf, daß der Monat Juli recht kalt gewesen ist. Die Wärmemengen-Jahresbilanz dieser Variante wird in der Abbildung 24 in einem *Sankey*-Diagramm dargestellt. Der Anteil der Solarenergie bei der Heizung der AdKM ist mit 12.9 % relativ bescheiden. Um den solaren Deckungsgrad zu erhöhen, gibt es mehrere Ansatzpunkte:

- Verbesserung der Effizienz der AdKM (Erhöhung des COP-Wertes)
- Verbesserung der Ausnutzung der Solarenergie (Erhöhung des KNG)
- passive Maßnahmen zur Verminderung der Wärmelast des Gebäudes (hier nicht weiter betrachtet)
- Einsatz einer effizienteren Klimaanlage (hier ebenfalls nicht weiter betrachtet)

Der durchschnittliche COP-Wert betrug 52.1 %. Dies kann als relativ gut eingestuft werden. Der durchschnittliche Kollektornutzungsgrad lag bei 31.4 %.

Die Einsparpotentiale sind also begrenzt. Die folgenden Variationsrechnungen werden dies belegen.

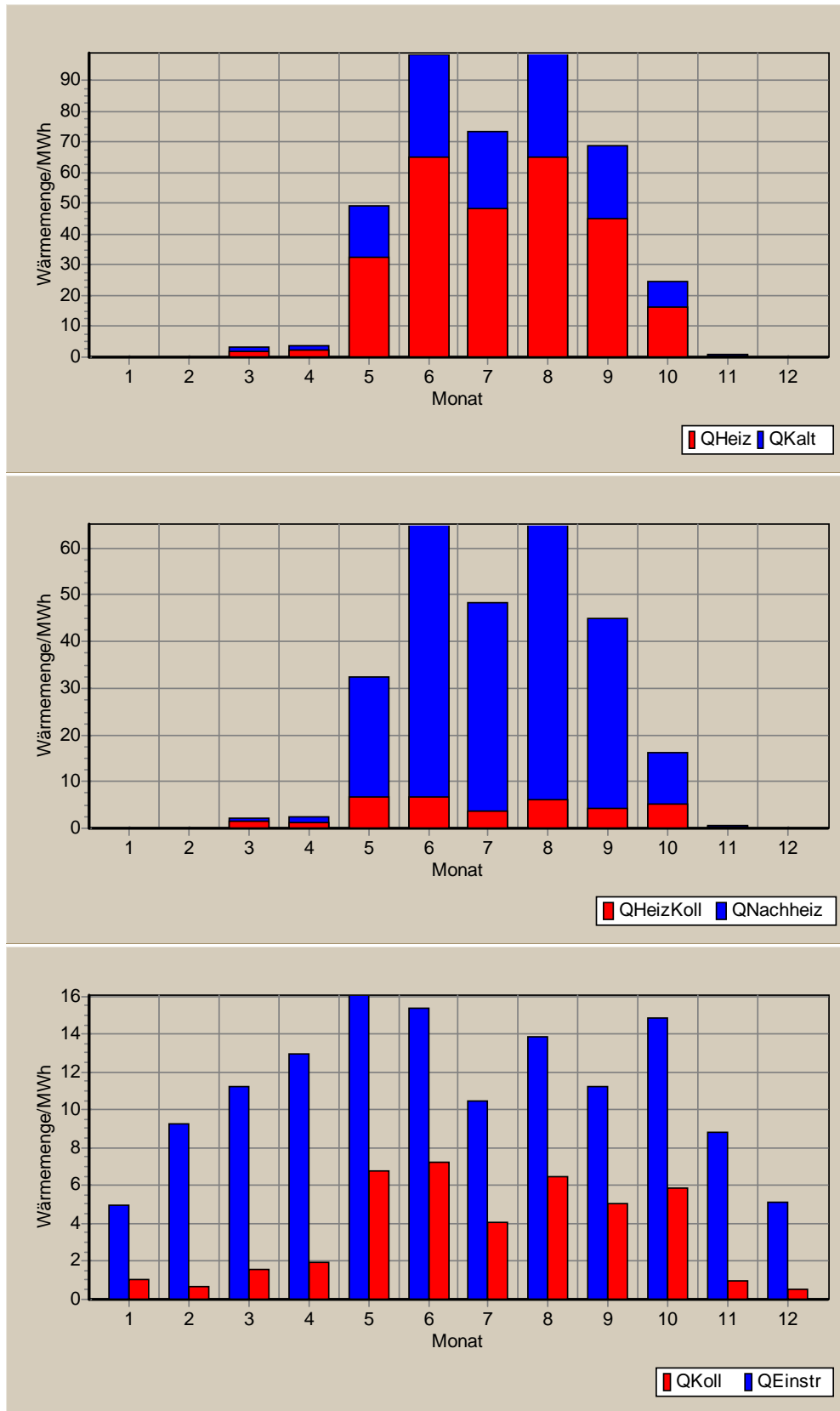


Abbildung 23: Ergebnisse der Jahresrechnung Grundvariante

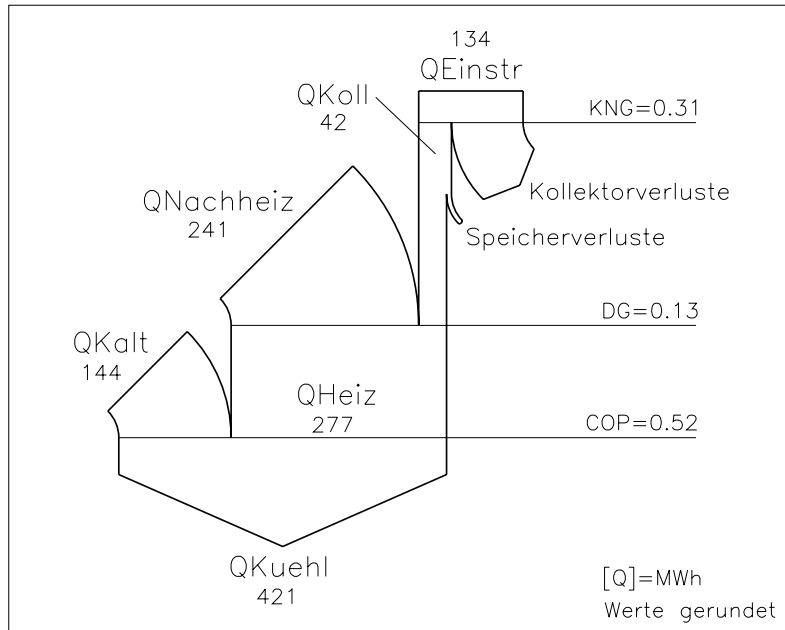


Abbildung 24: Wärmemengen-Jahresbilanz der Grundvariante *Kamenz*

Variation der Kollektorfläche

In Abbildung 25 ist der Einfluß der Kollektorfläche auf den Solarertrag dargestellt. Die Verläufe von Kollektornutzungsgrad und solarem Deckungsgrad sind gegenläufig. Der solare Deckungsgrad steigt mit zunehmender Kollektorfläche an, wobei der Anstieg verflacht. Interessant ist die Tatsache, daß der Deckungsgrad vom Standort relativ unabhängig ist. Dies dürfte mit dem größeren Klimatisierungsbedarf in Cagliari zu begründen sein.

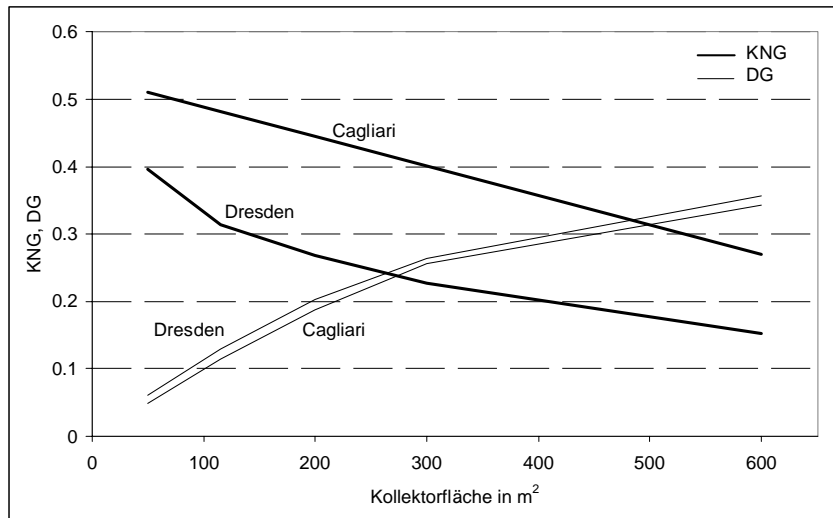


Abbildung 25: Einfluß der Kollektorfläche auf den Solarertrag

Variation des Speichervolumens

In Abbildung 26 wird deutlich, daß das Speichervolumen nur einen geringen Einfluß auf den solaren Deckungsgrad ausübt. Auch der Standort spielt hier kaum eine Rolle. Da in Cagliari praktisch ganzjährig Kältebedarf besteht, ist der Kollektornutzungsgrad jedoch um gut 10 % höher.

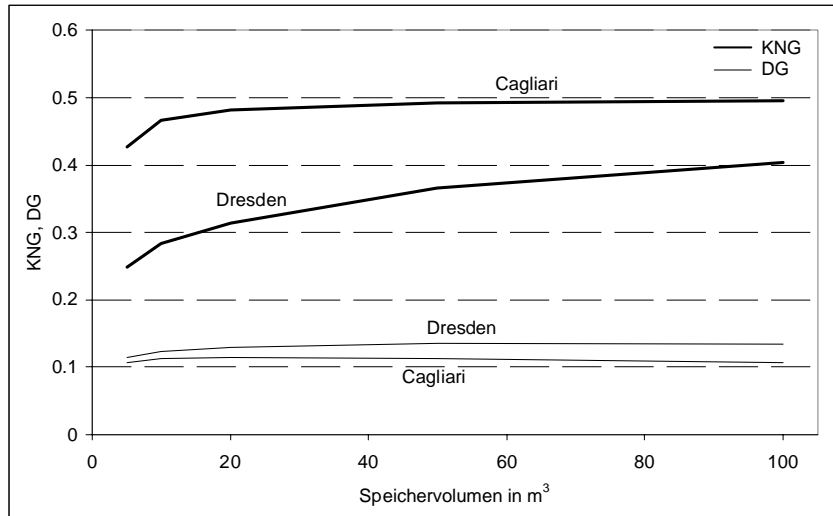


Abbildung 26: Einfluß des Speichervolumens auf den Solarertrag

Variation der Kollektorart

An dieser Stelle wurden die in Kamenz eingesetzten Flachkollektoren mit transparenter Wärmedämmung aus Glas mit normalen Flachkollektoren verglichen. Wie in Tabelle 22 zu sehen ist, schneidet dabei ein herkömmlicher (normaler) Flachkollektor etwas schlechter ab.

FLACHKOLLEKTOR	GLAS-TWD	NORMAL
η_{opt}	0.75	0.80
$k_0/W/(m^2 K)$	2.0	3.7
$k_1/W/(m^2 K^2)$	0.01	0.01
<i>KNG</i>	0.314	0.268
<i>DG</i>	0.129	0.107

Tabelle 22: Solarerträge unterschiedlicher Flachkollektoren

Variation des Kühlbeginns

Unter Kühlbeginn wird diejenige Außentemperatur verstanden, ab der im Gebäude eine Wärmelast gegeben ist. Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, hat der Kühlbeginn auf das Kälteverhältnis keinen Einfluß.

Anders verhält es sich mit dem solaren Deckungsgrad und dem Kollektornutzungsgrad. Deren Verläufe sind wieder gegenläufig und stimmen mit den Praxiserfahrungen überein.

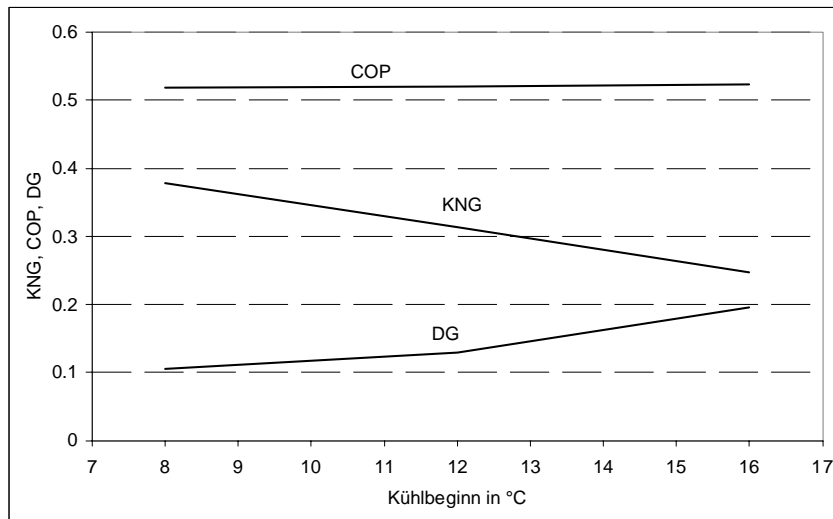


Abbildung 27: Einfluß des Kühlbeginns auf den Solarertrag

In Tabelle 23 werden die Jahres-Kältemengen bei unterschiedlichem Kühlbeginn angegeben.

Kühlbeginn/°C	8	12	16
Q_{Katt}/MWh	221	144	72

Tabelle 23: Einfluß des Kühlbeginns auf die Jahres-Kältemenge

Variation der AdKM-Regelung

Auch die Jahressimulationen bestätigen die im Abschnitt 5.2.2 gemachten Aussagen (vgl. Tabelle 24). Den höchsten COP-Wert, und damit den höchsten solaren Deckungsgrad, erzielt der Langzyklus bei externer Regelung der Kälteleistung der AdKM. Am schlechtesten schneiden die Werte für die interne Regelung ab.

	KNG	COP	DG
ext. Regelung, Kurzzyklus	0.314	0.521	0.129
ext. Regelung, Langzyklus	0.300	0.673	0.161
int. Regelung, Kurzzyklus	0.287	0.407	0.084

Tabelle 24: Einfluß der AdKM-Regelung auf den Solarertrag

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde ein Programm geschrieben, das Simulationsrechnungen für eine Anlage der solaren Klimatisierung durchführen kann. Dabei können Parameter der einzelnen Komponenten der Anlage variiert und umfangreiche Ergebnisdateien angelegt werden. Außerdem werden in einer Ergebnisübersicht die über den Simulationszeitraum aufsummierten Bilanz-Wärmemengen sowie einige Kennziffern ausgegeben.

Bei der Modellierung der Anlage mußten vor allem bedingt durch die knapp bemessene Zeit Prioritäten gesetzt werden. So wurde z.B. versucht, AdKM, Kollektor und Schichtladespeicher relativ detailliert beschreiben. Dagegen ist das Gebäude-Modell sehr einfach.

Trotzdem haben die Testrechnungen Ergebnisse erbracht, die in ihrer Tendenz als richtig eingestuft werden können. Gravierende Fehler traten nicht auf. Selbstverständlich sollten weitere und umfangreichere Simulationen unternommen werden, um zum einen diese Einschätzung zu bestätigen sowie um einige im Programm verankerte Parameter so anzupassen, daß die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse verbessert werden kann.

Der Einsatz der Programmierumgebung *Delphi* hat sich bewährt. Durch die Nutzung der objektorientierten Programmierung ist das Programm streng modular aufgebaut und kann so leicht angepaßt oder erweitert werden.

Wie bereits angedeutet, gibt es eine Reihe von Verbesserungen, die in der Zukunft in Angriff genommen werden sollten. Dies betrifft insbesondere eine Verbesserung des Gebäude-Modells, die Integration von Stoffwert-Funktionen, die Schaffung eines Kühlturm-Modells sowie die Einbindung eines Wärmeübertragers zwischen Kollektor und Speicher.

Die Möglichkeit, mit der Nachheizung den Speicher zu laden, sollte hinzugefügt werden. Auch die Programmierung völlig neuer Komponenten, wie etwa einer Brennstoffzelle, wäre im Hinblick auf eine bessere Simulation der Anlage im Malteser-Krankenhaus in Kamenz eine interessante Option für die Weiterentwicklung des Programms.

Schließlich könnte ein Diagramm-Werkzeug hinzugefügt werden, das auch die berechneten Temperaturverläufe darstellen kann.

Literatur

- [1] Gassel, A.: Die Adsorptionsanlage - Betriebserfahrungen und thermodynamische Berechnungen - In: Ki Luft- und Kältetechnik 8/1998
- [2] Dittmann, A.; Gassel, A.: Betriebsverhalten der Kälte- und Solaranlage im Bürogebäude *An der Loge* in Dresden - Dresden: TU Dresden, 1998
- [3] Ebner, M.; Klawun, C.: Pascal mit Delphi 4 - Bonn(u.a.): Addison-Wesley-Longman, 1998
- [4] Gassel, A.: Listing eines TRNSYS-FORTRAN-Programms zur Simulation einer Adsorptionskältemaschine - *www.malteser-krankenhaus-kamenz.de/haustech/simul/trnsys/type107.txt*, 1999
- [5] Dittmann, A.; Fischer, S.; Huhn, J.; Klinger, J: Repetitorium der technischen Thermodynamik - Stuttgart: B.G.Teubner, 1995

Anlagen

A1 Programmablaufplan der *Rechenschleife*

