

EOS

Abschlußbericht

Ertragsverbesserung und Optimierung von Energie Systemen

Klemens Schwarzer, Robert Höller



F.-Kz.:17700796

Abschlußbericht

- Projekt:** Ertragsverbesserung von Solaranlagen zur Wärmebereitstellung im Verbund mit konventioneller Energietechnik durch Optimierung der Regelung
- Kurztitel:** Ertragsverbesserung und Optimierung von Energie Systemen (EOS)
- Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. Klemens Schwarzer
Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich
Fachbereich Energie- und Umweltschutztechnik, Kerntechnik
Ginsterweg 1, 52428 Jülich
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Robert Höller
- Förderkennz.:** 1700796
- Laufzeit:** August '96 bis Dezember '97

1. Einführung	4
1.1 Ausgangssituation	4
1.2 Vorarbeiten	4
2. Lösungsansatz	5
2.1 Zweipunkt-Regler	5
2.2 "Matched Flow" Regler	5
2.3 Intelligenter Zweipunkt-Regler	6
3. Software	8
3.1 Entwicklungsumgebung	8
3.1.1 FORTH Target Compiler (T4)	8
3.1.2 "FUzzy Development GENerator" (FUDGE)	8
3.2 Der Regelalgorithmus	9
3.2.1 Die "Net heAt Source Temperature" (NAST)	10
3.2.2 Die "Net stOrage Temperature" (NOT)	11
3.2.3 Korrektur der instationären Meßsituation	12
3.2.4 Ein- / Ausschaltkriterium	18
3.3 Diverse Softwarekomponenten	19
3.3.1 Anzeigesteuerung	19
3.3.2 Gebrochen-rationale Integer Arithmetik	19
3.3.3 Kalibrierung der Temperatureingänge	19
4. Hardware	21
4.1 uP Baugruppe	21
4.1.1 Kernbeschaltung	21
4.1.2 Anzeige	23
4.1.3 Digitale Ausgänge	23
4.1.4 Analoge Eingänge	23
4.2 Prozeß-"Interface"	23
4.2.1 PT100 Eingangsverstärker	23
4.2.2 Pumpensteuererausgang	25
5. Simulation	27
5.1 Modellerstellung	27
5.1.1 Das Wetter	28
5.1.2 Das Kollektormodell	28
5.1.3 Das Rohrleitungsmodell	29
5.1.4 Das Speichermodell	29
5.1.5 Das Reglermodell	30
5.1.6 Temperaturfühlermodell	31
5.1.7 Die Pumpe	31
5.2 Ergebnisse	32
6. Zusammenfassung und Ausblick	34

1. Einführung

1.1 Ausgangssituation

Seit über 10 Jahren werden am Fachbereich für Energie- und Umwelttechnik der Fachhochschule Aachen (Abt. Jülich) meßtechnische Untersuchungen an Solaranlagen durchgeführt. Insbesondere im Rahmen der Drittmittelprojekte "VELS I" (BMBF 0328768A) und "VELS II" (BMBF 0328768F) wurden eine große Anzahl im Betrieb befindlicher Anlagen vermessen und bewertet. Bei diesen Untersuchungen traten zum Teil erhebliche Mängel zu Tage. Häufig war die Regelung dieser Systeme die Problemursache. Dies führte dazu, daß einige der betrachteten solarthermischen Brauchwasseranlagen bis zu 30% unter dem zu erwartenden Anlagenwirkungsgrad blieben. Eine systematische Analyse der beobachteten Fehlfunktionen im Bereich der Regelung ergab 2 Gruppen von Ursachen:

1. Fehlerhafte Einstellung der Regelung durch den Installateur. Da die individuellen Systemparameter der fertigen Anlage im Detail gar nicht bekannt waren, konnten Sie bei der Einstellung der Regelung auch nicht korrekt berücksichtigt werden.
2. Fehlerhafte Anbringung der für die Regelung notwendigen Sensoren. Hierbei waren sowohl aufgrund längeren Betriebs eingetretene Verschlechterungen der Betriebsbedingungen (Korrosion o.ä.) zu beobachten als auch bereits vom Hersteller falsch montierte Sensoren (z.B. mangelhafter thermischer Kontakt des Kollektorfühlers zur Absorberfläche).

Es war und ist (bis jetzt) kein Regler bekannt, der die oben genannten Fehlermöglichkeiten gezielt berücksichtigt und damit ein erhebliches, zusätzliches energetisches Nutzungspotential im Betrieb solarthermischer Brauchwasseranlagen erschließt.

1.2 Vorarbeiten

Neben den oben genannten Untersuchungen VELS I und VELS II, betreibt die Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich eine Reihe von Testständen für solare Brauchwasseranlagen an denen regelmäßig Diplomarbeiten durchgeführt werden. Dadurch kann auf eine große Menge von Meßdaten zur Analyse realer Anlagenzustände zurückgegriffen werden. Außerdem beschäftigt sich eine Gruppe von Mitarbeitern des Fachbereichs für Energie- und Umwelttechnik mit der Simulation solarthermischer Anlagen, so daß auch hier auf das systemtechnische Know-how der Fachhochschule zurückgegriffen werden konnte.

2. Lösungsansatz

2.1 Zweipunkt-Regler

Stand der Technik und seit über 20 Jahren in den meisten Solaranlagen im Einsatz ist der sogenannte Zweipunkt-Regler. Es wird die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausgang und dem Speicher gemessen, und wenn die Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{ein}$) groß genug ist, wird die Pumpe des Solarkreises angeschaltet. Sinkt die Kollektorausgangstemperatur und kommt damit in die Nähe der Speichertemperatur, so wird die Pumpe wieder abgeschaltet. Die Ausschalt-Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{aus}$) ist mehr oder weniger weit von $\Delta\vartheta_{ein}$ entfernt, um ein ständiges Aus- und Einschalten der Pumpe zu vermeiden.

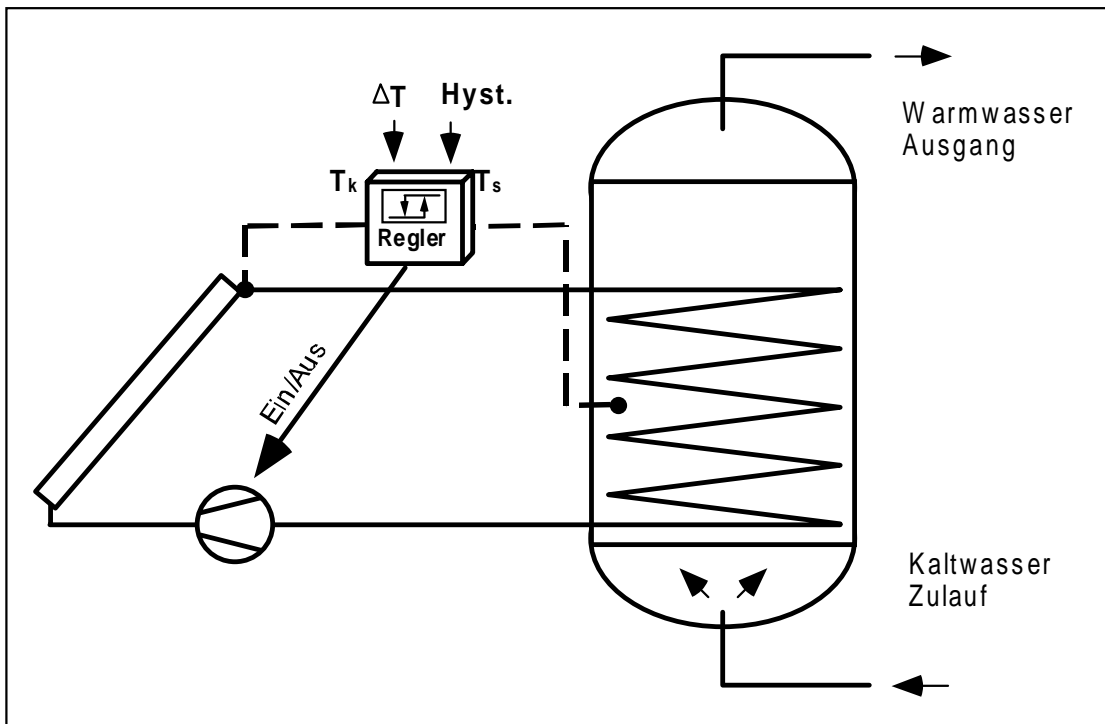


Bild 1 : Anlagenschema mit standard 2-Punkt Regler

Die entscheidenden Kriterien für die Funktion des Zweipunkt-Reglers /BTL94/ sind die Wahl der Einschalttemperaturdifferenz /KW86/ ($\Delta\vartheta_{ein}$) und deren Abstand zur Ausschalt-Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{hyst} = \Delta\vartheta_{ein} - \Delta\vartheta_{aus}$) /KS94/. Die Einschalttemperaturdifferenz wird so gewählt, daß auch wirklich Wärme zum Speicher transportiert wird, und nicht umgekehrt /MRM91/.

Leider ist die Frage, ab welcher Kollektortemperatur es Sinn macht, Wärme zum Speicher zu transportieren nicht so einfach zu beantworten. Durch den Einsatz von stark geschichteten Speichern kann über einen weiten Temperaturbereich Wärme eingekoppelt werden. Trotzdem kann es unter bestimmten Gesichtspunkten günstiger sein auf eine höhere Kollektortemperatur zu warten z.B. um die geforderte Brauchwassertemperatur ohne Nachheizung zu erreichen.

Bei einem einfachen Zweipunkt-Regler, wie er zur Zeit am Markt erhältlich ist, kann mit der festen Temperaturdifferenzeinstellung nur ein Kompromiß erreicht werden. Trotzdem erreichen optimal eingestellte Zweipunkt-Regler durchaus gute Ergebnisse.

2.2 "Matched Flow" Regler

Der Grundgedanke bei diesem Reglertyp besteht darin, den Massenstrom des Primärkreislaufes so einzustellen, daß sich während des Pumpenbetriebs ein stationärer Arbeitspunkt einstellt. Beispielsweise kann der Massenstrom so eingestellt werden, daß sich eine konstante Kollektor-Austrittstemperatur einstellt.

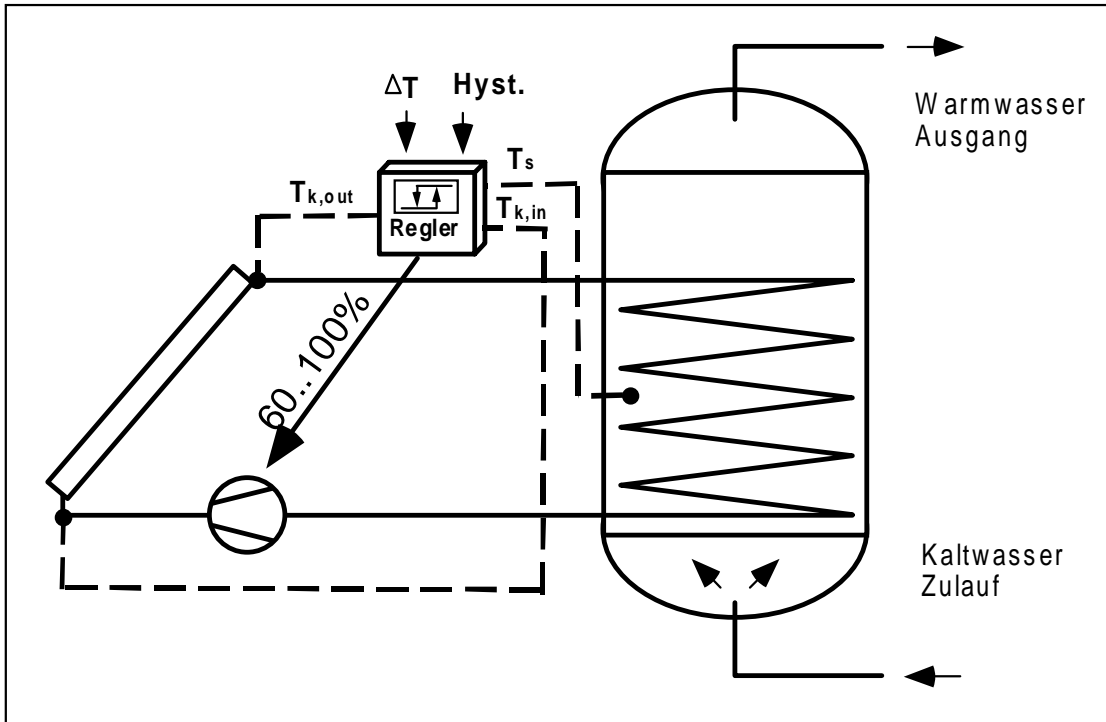


Bild 2 : "matched flow" geregelte Anlage

Voraussetzung für diese Art der Regelung ist der Einsatz einer Pumpe, deren Massenstrom (möglichst) beliebig eingestellt werden kann. Eine "matched flow" - Pumpe erlaubt in der Regel Einstellungen zwischen 60 und 100% der Nennzahl (vgl. Bild 2). Solche Pumpen sind aber deutlich teurer als einfache Modelle, wie sie in Zweipunkt-Regelungen eingesetzt werden. In jüngster Zeit scheint der Preisunterschied aber zu schrumpfen.

Ob mit einer solchen aufwendigeren Regelung ein höherer Anlagenwirkungsgrad erreicht werden kann, hängt nicht zuletzt von der verwendeten Regelstrategie ab /CBHL92/. Stellt man dem Massenstrom so ein, daß über dem Kollektor eine konstante Temperaturdifferenz entsteht, so kann mit einer Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades um einige Prozent gerechnet werden /CBHL92/. Mit anderen Regelstrategien wurden signifikantere Verbesserungen insbesondere bei niedriger Einstrahlung gemessen /NW84/.

2.3 Intelligenter Zweipunkt-Regler

Ausgehend von der Erkenntnis, daß für eine einfache solare Brauchwasseranlage kaum Wirkungsgradverbesserungen durch den Einsatz einer "matched flow" Regelung gegenüber einem Zweipunktregler zu erwarten sind, liegt in diesem Vorhaben der Schwerpunkt auf der Verbesserung des Zweipunktregler-Konzeptes.

In den breit angelegten Untersuchungen VELS I und VELS II konnte beobachtet werden, daß einer der Hauptgründe für mangelhafte Anlagenfunktion in der fehlerhaften Parametrierung der eingesetzten Regler lag. Daher wird in diesem Vorhaben ein Regelungsverfahren entwickelt, das ohne manuelle Parametrierung durch den Anlagen-Installateur auskommt.

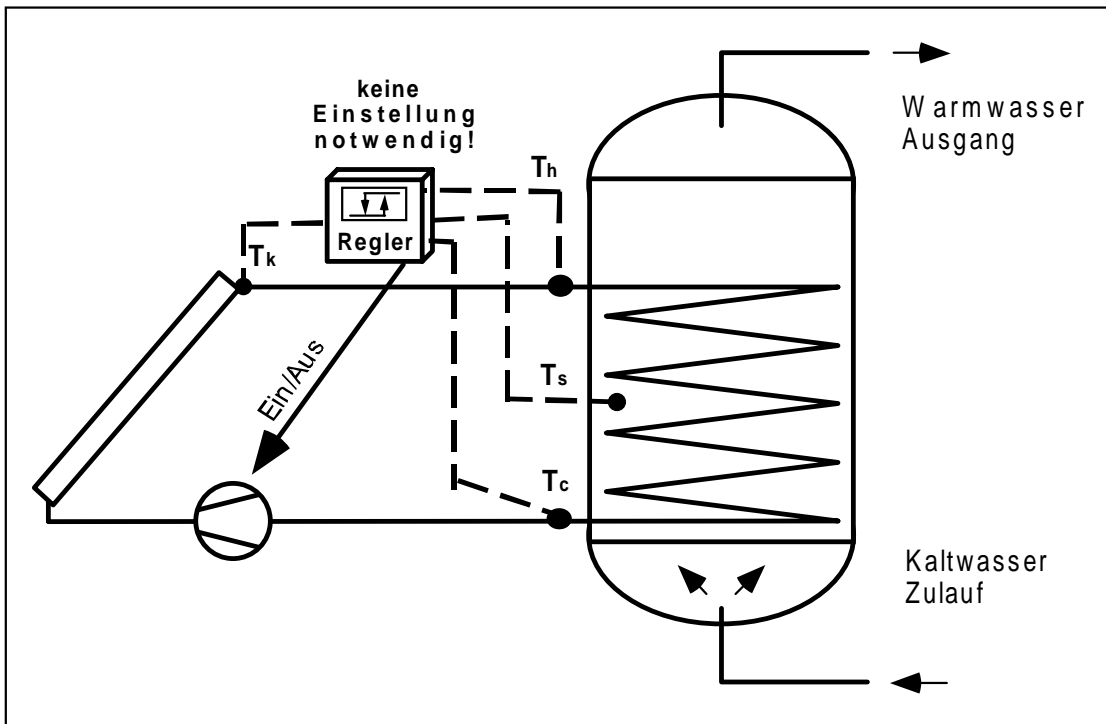


Bild 3 : Intelligenter Zweipunkt-Regler

Das Verfahren benötigt zwei zusätzliche Temperaturfühler am Solar-Wärmetauscher. Durch diese Fühler kann eine teilweise Bilanzierung des Wärmestroms vom Kollektor zum Speicher durchgeführt werden. Es wird eine Kombination von Lernfähigkeit und Fuzzy-Logic eingesetzt um eine automatische Anpassung der Regelparameter an den Prozeß zu erreichen. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in Kapitel 4.2 (Software → Der Regelalgorithmus).

3. Software

Die im folgenden Kapitel beschriebene Hardware bildet die Basis, das sogenannte Zielsystem für die in diesem Kapitel dargestellte Software. Diese Software stellt die eigentliche Umsetzung des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Regelalgorithmus dar. Da dieser Regelalgorithmus aus einer wissensbasierten Komponente ("Fuzzy Logic") und einem prozeduralen Teil (Algorithmus) besteht, ergeben sich einige Anforderungen an Entwicklungsumgebung und Realisierung, die im Folgenden erläutert werden.

3.1 Entwicklungsumgebung

An die Entwicklungsumgebung sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Der erzeugte Code muß auf dem Zielsystem lauffähig sein.
- Es muß eine nahtlose Integration von prozeduralen und wissensbasierten Komponenten möglich sein.
- Der erzeugte Code sollte möglichst kompakt sein.
- Es muß eine Arithmetik mit ausreichender Genauigkeit vorhanden sein.
- Die verwendete Programmiersprache sollte problemlos den Durchgriff auf die Hardware ermöglichen.

Unter Berücksichtigung o.g. Kriterien wurde zur Realisierung der prozeduralen Komponenten ein FORTH Target-Compiler eingesetzt, während die "Fuzzy-Logic" Komponente mit einem vom Prozessorhersteller (Motorola) frei zur Verfügung gestellten Werkzeug realisiert wurde.

3.1.1 FORTH Target Compiler (T4)

Der "tiny4th" (T4) Target-Compiler für die Prozessoren 68HC11 und 68HC16 wurde 1994 von Karl E. Lund (<http://www.seanet.com/~karllunt>) als Shareware Programm der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um eine Untermenge der Programmiersprache FORTH. Der Target-Compiler erzeugt äußerst kompakten Maschinencode für den 68HC11 und erlaubt auf einfache Weise die Integration von fremden Assembler-Routinen ("code definitions").

Der Target-Compiler (T4) erzeugt zunächst aus dem vorliegenden FORTH "source code" (eos.t4) eine Datei mit Assembler Anweisungen (eos.asc). Diese Datei wird dann mit einem Assembler (asmhc11.exe) in Maschinencode umgewandelt (eos.s19). Für die Prototypentwicklung wird diese Datei weiter in eine "Binary-Image"-Datei umgewandelt (eos.256). Diese Datei kann nun entweder direkt in ein EPROM (z.B. 27C256) gebrannt werden oder mittels eines Terminal Programms (z.B. Laptalk) über die serielle Schnittstelle in einen EPROM-Simulator übertragen werden.

Sollen nun fremde Assembler Routinen eingebunden werden, so müssen diese nur an den von T4 erzeugten Assemblercode (eos.asc) angehängt und zusammen assembliert werden. Innerhalb von T4 CODE Anweisungen kann nun auf die Assembler-Label des fremden Codes zugegriffen werden. Insbesondere kann auf diese Weise ein Unterprogramm aus dem fremden Code aufgerufen werden.

Mit T4 wurde die Ablaufsteuerung des Programms sowie der arithmetische Teil des Algorithmus realisiert. Der mit FUDGE erzeugte wissensbasierte Teil des Algorithmus wird aus dem FORTH Code heraus als Assembler-Unterprogramm aufgerufen (s.o.) nachdem vorher die relevanten Ein- und Ausgangs-Variablen gesetzt wurden. Die genaue Abfolge der einzelnen Schritte, die zur Erzeugung eines ausführbaren "Binary-Images" notwendig sind, wird in einem "Makefile" festgelegt. Dieses Makefile kann von jedem GNU-Make Programm interpretiert werden.

3.1.2 "FUZZY Development GEnerator" (FUDGE)

Der "Fuzzy Development Generator" ist eine Software zur Generierung von Fuzzy-Reglern, die von der Fa. Motorola kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Es handelt sich um eine graphische Entwicklungsumgebung, die unter Windows lauffähig ist.

Die Zugehörigkeitsfunktionen für die unscharfen Eingangsvariablen können graphisch oder als Zahlenwerte editiert werden. Es können nur trapezoide Zugehörigkeitsfunktionen definiert werden. Für die Ausgangsvariablen sind nur "Singletons" zugelassen. Die Regelbasis wird in Textform eingegeben:

"IF input1 IS small AND input2 IS large THEN output IS medium"

Zur Überprüfung des definierten Fuzzy-Reglers existieren 2 Werkzeuge. Erstens der "Fuzzy Rule Evaluator" hier können einzelne Eingangsvariablen mit der Maus manipuliert werden und das Ergebnis ändert sich sofort sichtbar. Dabei ist auch erkennbar welche Zugehörigkeitsfunktionen gerade in welchem Maße aktiv sind. Weiterhin gibt es noch die "Control Surface" Ansicht. Hier wird ein Eingangsparameter über seinen gesamten Wertebereich variiert, während alle andere anderen Eingänge konstant gesetzt werden. Das Ergebnis ist eine zweidimensionale Darstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen der betrachteten Eingangsvariablen und der Ergebnisvariablen.

Mit FUDGE kann Code für gängige Motorola-Prozessoren (6805, 68HC11, 68HC16, 68000) sowie ANSI-C generiert werden. Im vorliegende Fall wird die Codeerzeugung für den 68HC11 genutzt. Dabei wird von FUDGE nur eine Reihe von Assembler-Konstanten erzeugt, die in kompakter Form die unscharfen Variablen-Definitionen sowie die Regelbasis darstellen. Der eigentliche Fuzzy-Regler (Inferenz-Maschine) ist in einem eigenen Assemblerfile realisiert ("fuzz11b3.asc"). Der von FUDGE erzeugte Definitionen-File (hier: "fuzzdat.asc") muß beim abschließenden Assemblerlauf an der entsprechenden Stelle in "fuzz11b3.asc" eingefügt werden¹.

Die Entwicklungsumgebung FUDE hat zwei gravierende Nachteile, die aber im vorliegenden Fall umgangen werden konnten:

1. Der zulässige Wertebereich der scharfen ("crisp") Eingangsvariablen, ist auf 8 Bit beschränkt! Im vorliegenden Fall wurde daher für die Eingangsvariablen ein normierter Werte gewählt, um den eingeschränkten Wertebereich voll ausnutzen zu können. Das heißt, alle Werte werden in "Prozent * 2,55" angegeben. Dabei wird der minimal vorkommende Wert auf 0, der maximal vorkommenden Wert auf 255 abgebildet. Die Berechnung der Normierung wird im Hauptprogramm durchgeführt.
2. Es sind nur einstufige Fuzzy-Regler möglich. Das heißt, Ausgangsvariablen eines Reglers können nicht als Eingangsvariablen des nächsten Reglers verwendet werden. Im vorliegenden Fall wurde diese Einschränkung dadurch umgangen, das die Regeln eines ursprünglich zweistufigen Designs in einer Regelbasis ausdekodiert wurde. Das führt zwar zu einer drastisch erhöhten Anzahl von Regeln, aber bei der relativ einfachen Struktur des vorliegenden Fuzzy-Regler war das Ergebnis gerade noch überschaubar.

3.2 Der Regelalgorithmus

Beim herkömmlichen Zweipunkt-Regler sind es vor allem die folgenden drei physikalischen Effekte, die die manuelle Parameter Einstellung so schwierig machen:

1. Wärmeverluste zwischen Kollektor (Dach) und Speicher (Keller) führen dazu, daß am Speichereintritt eine geringere Temperatur gemessen wird als am Kollektoraustritt. Diese Temperaturdifferenz muß bei der Einstellung der Einschalttemperaturdifferenz berücksichtigt werden. Da dieser Wärmeverlust in der Regel nicht bekannt ist, muß der resultierende Korrekturwert geschätzt werden.
2. Der für die Einschaltbedingung gemessene Wert der Kollektortemperatur wird bei stehender Pumpe (Massenstrom = 0) ermittelt. Es handelt sich also um eine (instationäre) Stillstandstemperatur. Wird nun die Pumpe eingeschaltet, so setzt der Massenstrom ein und als Folge davon sinkt die Kollektortemperatur ab. Diese, dann stationäre Fluidtemperatur soll ja eigentlich über der Speichertemperatur liegen. Das Maß der Temperaturabsenkung hängt von den Einstrahlungsbedingungen sowie von der Wärmekapazität des Kollektor ab und kann daher ebenfalls kaum korrekt bei der Reglereinstellung berücksichtigt werden.
3. Der gemessene Speichertemperaturwert entspricht in der Regel nicht der Temperatur der niedrigsten einkoppelbaren Wärme. Der Speichertemperaturfühler kann hier nur eine vom Einbauort abhängige Näherung liefern. Bei welcher Fluidtemperatur sich gerade noch Wärme in den Speicher einkoppeln läßt, hängt jedoch unter anderem von dynamischen Parametern wie der Schichtung des Speichers ab.

Der hier vorgeschlagene Regelalgorithmus realisiert im wesentlichen einen Zweipunkt-Regler, bei dem durch eine Kombination von herkömmlicher Bilanzierungsrechnung und Fuzzy-Logic eine automatische Parameteranpassung erreicht wird.

¹ Wird automatisch via INCL Anweisung durchgeführt

Zur Durchführung der Bilanzierung sind zwei zusätzliche Temperatur-Meßpunkte notwendig. Wie in Abb. 3 zu sehen, wird zusätzlich zu den traditionell üblichen Meßpunkten an Kollektor und Speicher noch die Wärmetauscher Ein- und Austrittstemperatur gemessen. Hier sollten möglichst präzise Sensoren eingesetzt werden, da auf diesen Meßwerten die Bilanzierungsrechnung aufsetzt.

3.2.1 Die "Net heAt Source Temperature" (NAST)

Für die Berechnung der Einschaltbedingung eines Zweipunkt-Reglers ist eigentlich nicht die Kollektortemperatur entscheidend, sondern die Fluidtemperatur, die am Speicher wirklich ankommt. Diesem Umstand wird bei herkömmlichen Reglern durch eine (hoffentlich) geschickte Wahl der Einschalttemperaturdifferenz Rechnung getragen. Die einzustellend Einschalttemperaturdifferenz ist dabei abhängig von den Rohrverlusten die auf dem Weg vom Dach bis zum Speicher auftreten, sowie von eventuell fehlerhaften Kollektortemperatur-Meßwerten. Solche Fehler können aus einer falschen Sensoranbringung, einem Alterungsprozeß der Anlage oder aus der schlechten Qualität der eingesetzten, preiswerten Sensoren resultieren.

Um die Verluste, sowie stationäre Meßfehler des Kollektor-Sensors auszugleichen, wird folgender Ansatz gemacht:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_w(T_{NAST} - T_{Coll}) \quad (1)$$

$$\dot{Q} = kA(T_{Amb} - \frac{T_{NAST} + T_{Coll}}{2}) \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

\dot{Q}	der Verlustwärmestrom
\dot{m}	Massenstrom des Wärmeträgerfluids
c_w	Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
kA	Produkt aus Wärmeübergangskoeff. und wärmeübertragender Fläche
T_{Amb}	mittlere Umgebungstemperatur
T_{Coll}	Kollektor Austrittstemperatur (Standard-Meßpunkt)
T_{Store}	Speichertemperatur (Standard-Meßpunkt)
T_{Hot}	Eingangstemperatur des Solarwärmetauschers (neuer Meßpunkt)
T_{Cold}	Ausgangstemperatur des Solarwärmetauschers (neuer Meßpunkt)
T_{NAST}	Temperatur, die am Ende der Rohrleitung zum Speicher, nach Abzug der Verluste noch vorhanden ist (berechnet)
T_{NOT}	niedrigste Temperatur, bei der sich Wärme in den Speicher einkoppeln läßt (berechnet)

Gleichung (1) beschreibt den Wärmeverlust zwischen Kollektor und Speicher wie er sich durch den Unterschied zwischen Anfangs- und End-Temperatur der Rohrleitung darstellt. Gleichung (2) beschreibt den selben Wärmeverlust durch Wärmeleitung an die Umgebung. Diese beiden Gleichungen können wir zusammenfassen zu:

$$T_{NAST} - T_{Coll} = \frac{kA}{\dot{m}c_w} (T_{Amb} - \frac{T_{NAST} + T_{Coll}}{2}) \quad (3)$$

Hierbei stellt $NC = \frac{kA}{\dot{m}c_w}$ (der "Netto-Koeffizient") eine charakteristische Konstante für eine Solaranlage dar. Die reale stationäre Speichereintrittstemperatur kann so berechnet werden als:

$$T_{NAST} = \frac{2 - NC}{2 + NC} T_{Coll} + \frac{2NC}{2 + NC} T_{Amb} \quad (4)$$

mit

$$NC = \frac{T_{Hot} - T_{Coll}}{T_{Amb} - \frac{T_{Hot} + T_{Coll}}{2}} \quad (5)$$

Ist also der "Netto-Koeffizient" (NC) einer Solaranlage bekannt, so kann die korrigierte Eintrittstemperatur in den Speicher berechnet werden. NC kann durch Messung der entsprechenden Temperaturen im stationären Zustand der Anlage nach Gleichung (5) ermittelt werden.

Zur Vereinfachung der Berechnung wird im Programm folgende Vereinfachung verwendet:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_w(T_{NAST} - T_{Coll}) \quad (1a)$$

$$\dot{Q} = kA(T_{Amb} - T_{Coll}) \quad (2a)$$

daraus ergibt sich:

$$T_{NAST} - T_{Coll} = \frac{kA}{\dot{m}c_w}(T_{Amb} - T_{Coll}) \quad (3a)$$

und somit vereinfachen sich die Berechnungsvorschriften für die Software zu:

$$T_{NAST} = T_{Coll} + (T_{Amb} - T_{Coll}) * NC \quad (4a)$$

sowie

$$NC = \frac{T_{Hot} - T_{Coll}}{T_{Amb} - T_{Coll}} = \frac{NCB}{NCA} \quad (5a)$$

Die Vereinfachung besteht darin, daß in Gleichung (2a) für den Verlust durch Wärmeleitung die Kollektortemperatur statt der mittleren Rohrtemperatur² angesetzt wird. Diese Vereinfachung ist zulässig, wenn die Temperaturen T_{Coll} sowie T_{Hot} keine allzu großen Änderungen erfahren, seit der letzten Berechnung von NC . Daher wird im vorliegenden Fall NC ständig ermittelt und aktualisiert.

Aus Gründen der numerischen Genauigkeit werden Dividend und Divisor von NC einzeln berechnet und verwendet (NCB / NCA).

3.2.2 Die "Net stOrage Temperature" (NOT)

Die Speichertemperatur wird üblicherweise in einer Solaranlage gemessen um ein Maß für die niedrigste Temperatur zu haben, die sich noch im Speicher unterbringen läßt. Ist die Speichertemperatur hoch, so wird auch vom Kollektor eine hohe Fluidtemperatur gefordert. Leider haben wir es in der Realität überwiegend mit geschichteten Speichern zu tun; d.h. es gibt keine einheitliche Speichertemperatur sondern ein Temperaturprofil über die Speicherhöhe. Der Speichertemperaturfühler wird in solchen Anlagen irgendwo auf Höhe des Solarwärmetauschers angebracht. Da dieser Ort aber fest ist kann so unterschiedlichen Ladezuständen des Speichers³ keine Rechnung getragen werden. Bei Speichern mit Schichtenladeeinrichtung herrscht hier noch größere Unsicherheit bei der Wahl des Anbringungsortes.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird zur Ermittlung der niedrigsten, in den Speicher einkoppelbaren Temperatur die Wärmetauscher-Austrittstemperatur (T_{Cold}) im stationären Zustand herangezogen. Die Wärmetauscher-Austrittstemperatur ist sicher kleiner-gleich der niedrigsten in den Speicher einkoppelbaren Temperatur. Leider kann

² Der Ansatz des arithmetischen Mittels für die mittlere Rohrtemperatur stellte bereits eine Vereinfachung dar, da sich der Temperaturverlauf in eine Rohr i.d.R. nicht linear einstellt.

³ mit unterschiedlichen Ausprägungen des Temperaturprofils...

bei stehender Pumpe über diese Temperatur keine Aussage gemacht werden, da der Wärmetauscher ja nicht in Betrieb ist und beliebige Ausgleichsvorgänge zu diesem Zeitpunkt die Temperatur bestimmen.

Der Trick besteht nun darin, im stationären Zustand der Anlage (Pumpe läuft, Temperaturen in etwa konstant) sich die Differenz ($T_{Store} - T_{Cold}$) zu merken und bei stehender Pumpe (instationärer Fall) zur Korrektur der gemessenen Speichertemperatur zu verwenden. Auf diese Weise kann die tiefste Temperatur der in den Speicher einkoppelbaren Wärme ausgedrückt werden als:

$$T_{NOT} = T_{Store} - \Delta_{NOT} \quad (8)$$

mit

$$\Delta_{NOT} = T_{Store} - T_{Cold} \quad (9)$$

3.2.3 Korrektur der instationären Meßsituation

Die beiden vorangegangenen Kapitel beschäftigen sich mit Ermittlung von Korrekturwerten für den (nach dem Einschalten der Pumpe) zu erwartenden stationären Zustand der Solaranlage. Diese Werte können problemlos durch einfache, thermodynamische Zusammenhänge ermittelt werden.

Ein zentraler Punkt wurde jedoch bisher noch nicht angesprochen: Wie verhält sich die Kollektortemperatur nach dem Einschalten der Pumpe? Ist z.B. die Einstrahlung hoch und erreicht der Kollektor eine bestimmte, fixe Einschalttemperatur so wird sich in etwa die als T_{NAST} berechnete Temperatur am Speichereingang einstellen. Ist die Einstrahlung aber nur mäßig und die Einschalttemperatur wird trotzdem erreicht (vielleicht nur gerade eben, nach langer Aufheizphase) so wird unmittelbar nach dem Einschalten der Pumpe die Kollektortemperatur stark absinken, da die schwache Einstrahlung im stationären Zustand den erforderlichen Wärmestrom nicht zur Verfügung stellt. In diesem Fall wäre es ratsam die Einschalttemperatur anzuheben, um ein unnötiges Takten der Anlage zu vermeiden.

Dieses Anheben der Einschalttemperatur kann z.B. in Abhängigkeit von der gemessenen Einstrahlung durchgeführt werden. Um den meßtechnischen Aufwand nicht weiter in die Höhe zu treiben, soll hier versucht werden anhand einer eingehenden Betrachtung der Kollektortemperatur die Einstrahlung abzuschätzen. Da es sich um eine mit gehöriger Unschärfe behaftete Abschätzung eines in der Zukunft zu erwartenden Wärmestromes handelt wird hier eine "Fuzzy-Logic" Algorithmus eingesetzt.

3.2.3.1 Ein- und Ausgänge

Der Fuzzy-Logic Regler arbeitet mit drei Eingängen und einem Ausgang. Aus der Kollektortemperatur T_{Coll} sowie deren Änderung in der Zeit $\frac{dT_{coll}}{dt}$ und der (bereits korrigierten) Speichertemperatur T_{NOT} wird ein Korrekturwert dTe ermittelt, der die Temperaturabsenkung durch Einschalten der Pumpe wiedergibt. Dabei wird die Kollektortemperatur und deren Ableitung zur Abschätzung der Einstrahlung herangezogen während die Speichertemperatur Rückschlüsse über die Kollektor-Eintrittstemperatur zuläßt.

3.2.3.1.1 Änderung der Kollektortemperatur

Die Änderung der Kollektortemperatur $\frac{dT_{coll}}{dt}$ wird als Maß für die Einstrahlung herangezogen. Ist die Änderung groß, so ist (abhängig vom Kollektortemperatur-Niveau) eher mit einer hohen Einstrahlung zu rechnen als bei einer kleinen Änderung. Die maximal mögliche Änderung der Kollektortemperatur wird von der Gesamtwärmekapazität des Kollektors beschränkt.

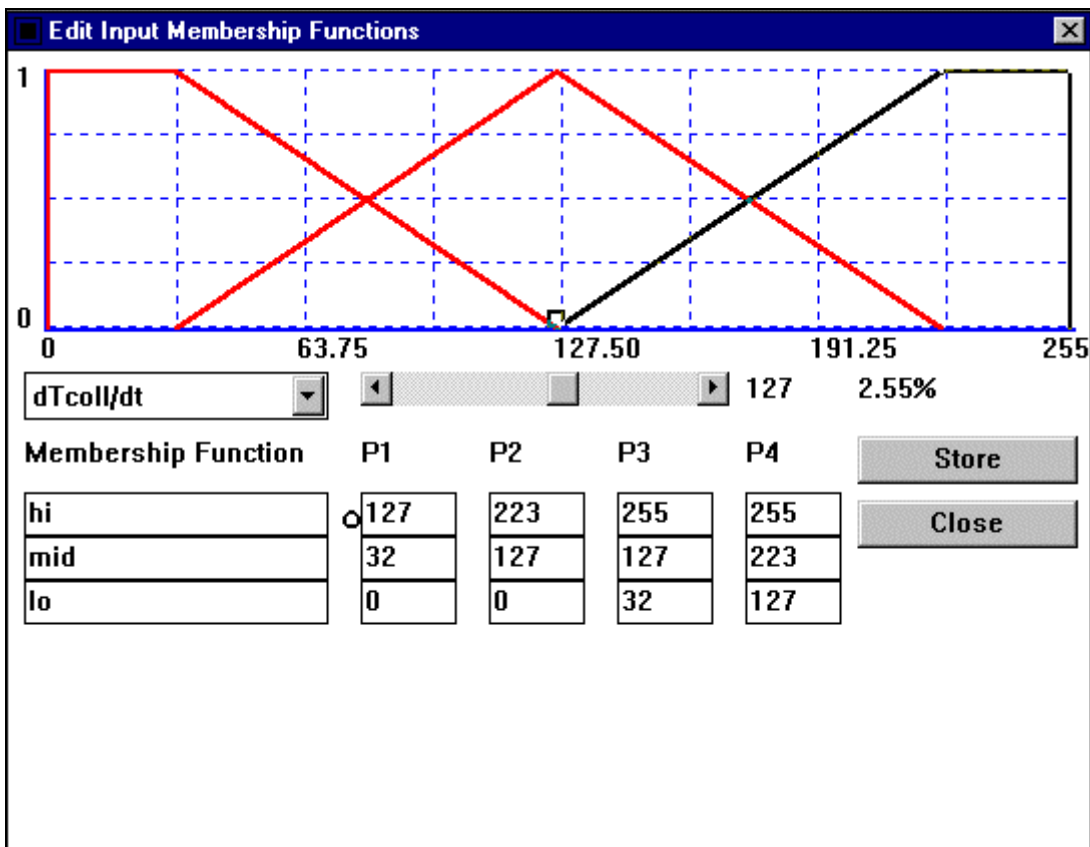


Bild 4: Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Variablen $\frac{dT_{coll}}{dt}$

Unter Vernachlässigung aller Verluste und bei stehender Pumpe läßt sich der Temperaturverlauf in der Zeit als einfache DGL schreiben zu:

$$C_{Coll} \frac{dT_{Coll}}{dt} = I \quad (10)$$

dabei ist:

C_{Coll} die effektive Gesamtwärmekapazität des Kollektors⁴ in $\left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$

$\frac{dT_{coll}}{dt}$ die Änderung der Kollektortemperatur über der Zeit in $\left[\frac{K}{s}\right]$

I die dem Kollektor zugeführte, wirksame Einstrahlung in $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

Bei einer typischen effektiven Wärmekapazität von $10 \left[\frac{kJ}{m^2 K}\right]$ sowie einer maximalen Einstrahlung von $1000 \left[\frac{W}{m^2}\right]$ ergibt sich mit:

$$\left. \frac{dT_{Coll}}{dt} \right|_{\max} = \frac{I_{\max}}{C_{Coll}} \quad (11)$$

für die Änderung der Kollektortemperatur eine max. Obergrenze von $0.1 \left[\frac{K}{s}\right]$. Für andere Kollektor-Typen z.B.

Röhrenkollektoren mit ihrer deutlich geringeren Wärmekapazität muß hier ein höherer Wert eingesetzt werden. Eine automatische Ermittlung der Kollektorwärmekapazität ist in der gegenwärtigen Version nicht enthalten. Im

⁴ inkl. Wärmeträgerfluid

Hauptprogramm wird die gemessene Kollektortemperaturänderung skaliert, so daß eine Änderung von $0 \left[\frac{K}{s} \right]$ auf 0 und eine Änderung von $0.1 \left[\frac{K}{s} \right]$ auf 255 abgebildet wird.

3.2.3.1.2 Kollektortemperatur

Die Kollektortemperatur T_{coll} wird zusammen mit der Änderung der Kollektortemperatur $\frac{dT_{coll}}{dt}$ zur Abschätzung der Einstrahlungsverhältnisse herangezogen (vgl. Kapitel "Unscharfe Regelbasis"). Auch die Kollektortemperatur wird auf den max. Wertebereich einer 8bit Variablen normiert. Dazu muß eine sinnvolle Annahme über die minimale bzw. maximale Kollektortemperatur getroffen werden. Für Testzwecke wird von einer minimalen betrachteten Kollektortemperatur von $40^{\circ}C$ ($\rightarrow 0$) und einer maximal betrachteten Kollektortemperatur von $120^{\circ}C$ ($\rightarrow 255$) ausgegangen. Damit entspricht $80^{\circ}C$ ($\rightarrow 127$) einer mittleren Kollektortemperatur.

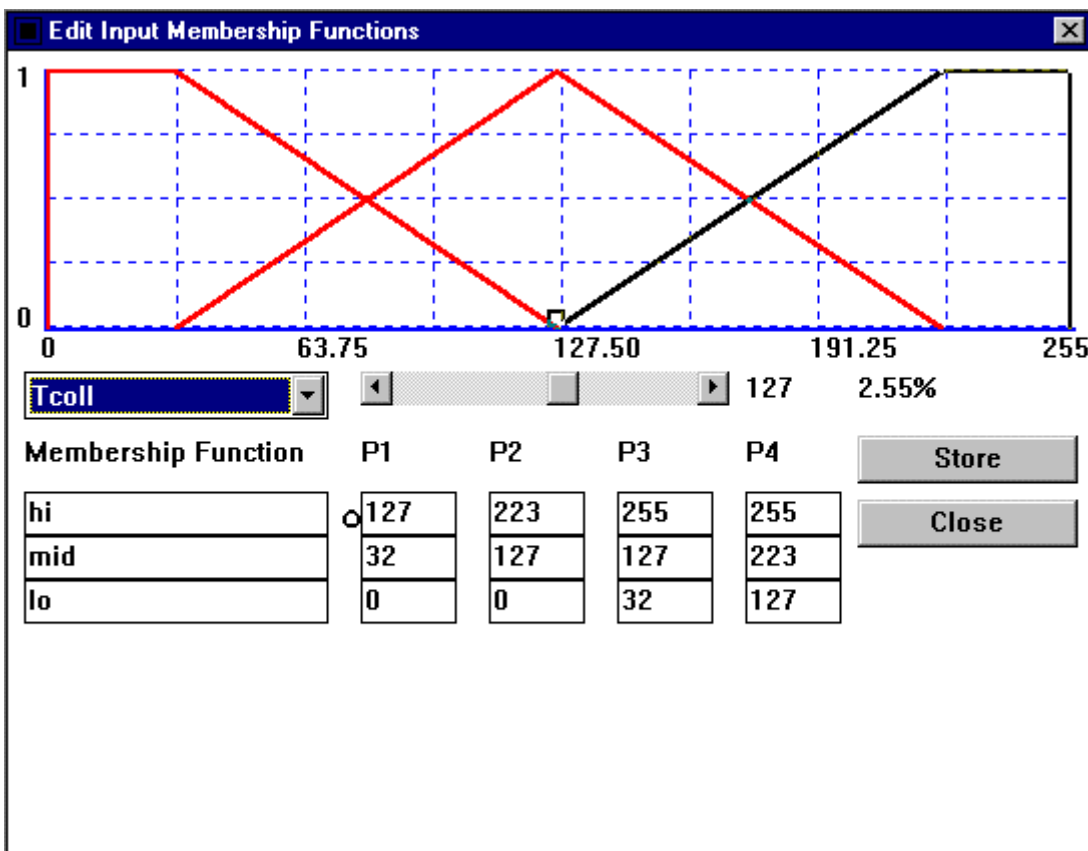


Bild 5: Zugehörigkeitsfunktion der Kollektortemperatur T_{coll}

3.2.3.1.3 Speichertemperatur

Für die Berechnung der Einschaltbedingung des Reglers wird (vgl. Kapitel 4.2.2) nicht die gemessene Speichertemperatur sondern der korrigierte Wert T_{NOT} verwendet. Hier wird zur Skalierung ein Minimalwert von $10^{\circ}C$ ($\rightarrow 0$) sowie ein Maximalwert von $70^{\circ}C$ ($\rightarrow 255$) angenommen. Damit entspricht $40^{\circ}C$ ($\rightarrow 127$) einer mittleren Temperatur.

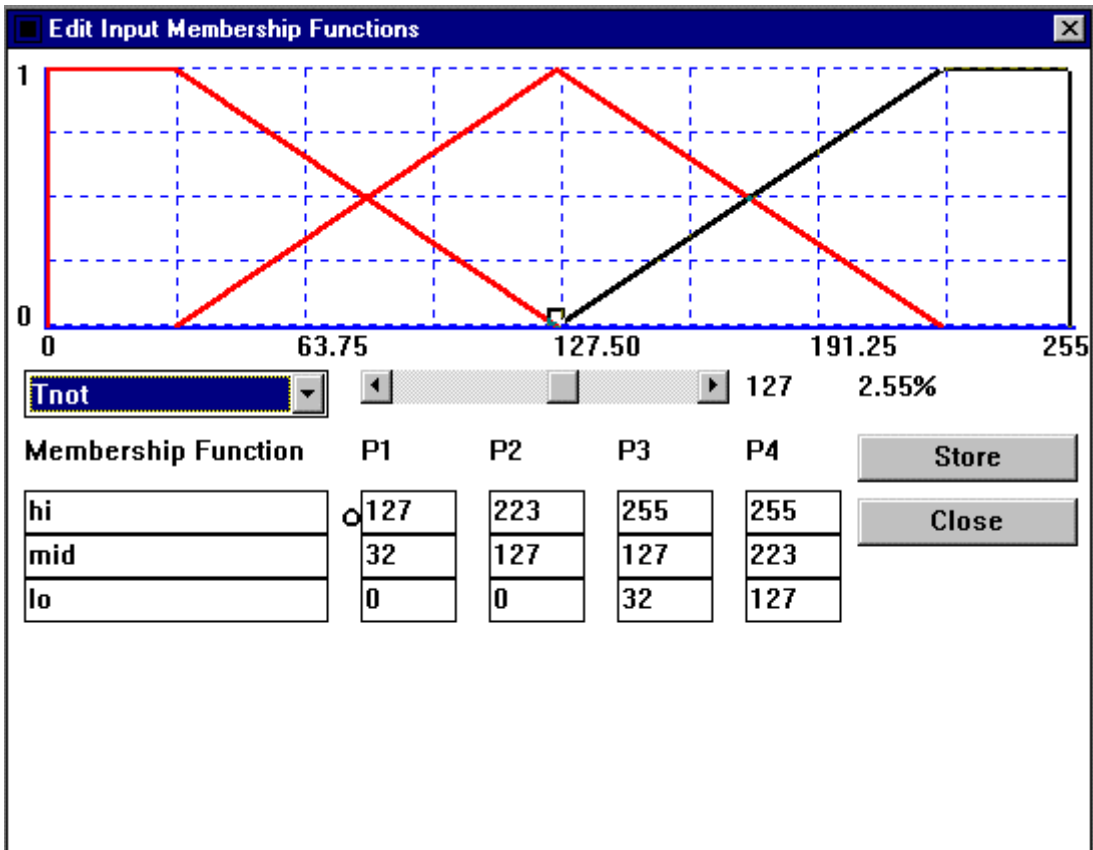


Bild 6: Zugehörigkeitsfunktion der Speichertemperatur T_{NOT}

3.2.3.1.4 Instationärer Korrekturwert

dTe ("delta_T_estimated") ist der instationäre Korrekturwert, um den die Einschalttemperatur (je nach Einstrahlungsverhältnissen) nach oben verschoben werden kann. Aus praktischen Erfahrungen mit herkömmlichen Reglern wird hier ein Maximalwert von 10°C ($\rightarrow 255$) angenommen. Das heißt: ermittelt der Fuzzy-Regler ein Ergebnis $dTe = 255$ so wird die Einschalttemperatur um 10°C angehoben.

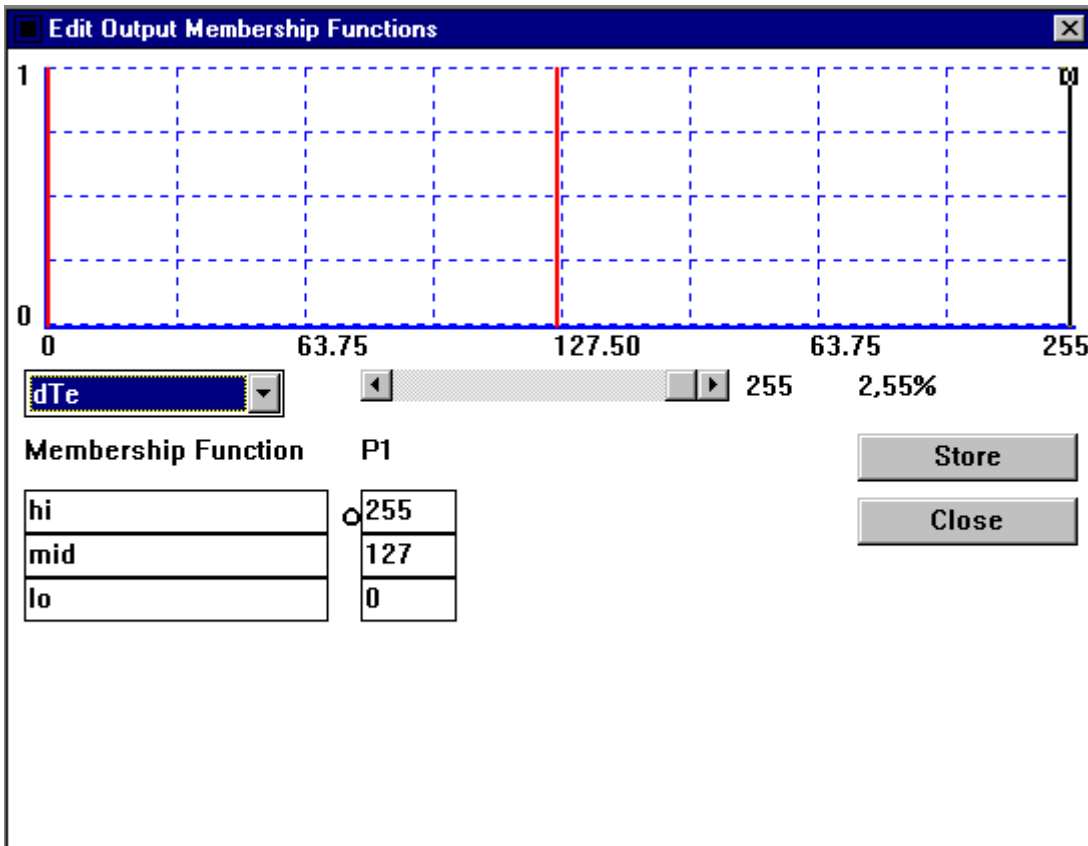


Bild 7: Zugehörigkeitsfunktion des instationären Korrekturwertes dTe

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die eingesetzte Fuzzy-Logic Entwicklungsumgebung (FUDGE) für Ausgangsvariable nur Singleton-Zugehörigkeitsfunktionen unterstützt. Diese Maßnahme reduziert die Flexibilität der zum Einsatz kommenden Defuzzifizierungsmethode etwas, führt aber zu drastisch kürzeren Rechenzeiten.

3.2.3.2 Unscharfe Regelbasis

Die beiden Eingangsgrößen dT_{coll} und T_{coll} also die Kollektortemperatur und deren erste Ableitung nach der Zeit wird dazu verwendet die momentane Einstrahlung I abzuschätzen. Das läßt sich folgendermaßen in einer unscharfen Regelbasis darstellen:

(wenn)	$T_{coll} = \text{hoch}$			(dann)	$I := \text{hoch}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{mittel}$	(und)	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	(dann)	$I := \text{niedrig}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{mittel}$	(und)	$dT_{coll} = \text{mittel}$	(dann)	$I := \text{mittel}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{mittel}$	(und)	$dT_{coll} = \text{hoch}$	(dann)	$I := \text{hoch}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{niedrig}$	(und)	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	(dann)	$I := \text{niedrig}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{niedrig}$	(und)	$dT_{coll} = \text{mittel}$	(dann)	$I := \text{niedrig}$
(wenn)	$T_{coll} = \text{niedrig}$	(und)	$dT_{coll} = \text{hoch}$	(dann)	$I := \text{mittel}$

Zur Bestimmung des endgültigen Korrekturwertes, wird nun die Einstrahlung I mit der korrigierten Speichertemperatur T_{not} verknüpft:

(wenn)	$I = \text{niedrig}$	(und)	$T_{not} = \text{niedrig}$	(dann)	$dTe := \text{hoch}$
(wenn)	$I = \text{niedrig}$	(und)	$T_{not} = \text{mittel}$	(dann)	$dTe := \text{hoch}$
(wenn)	$I = \text{niedrig}$	(und)	$T_{not} = \text{hoch}$	(dann)	$dTe := \text{mittel}$
(wenn)	$I = \text{mittel}$	(und)	$T_{not} = \text{niedrig}$	(dann)	$dTe := \text{hoch}$
(wenn)	$I = \text{mittel}$	(und)	$T_{not} = \text{mittel}$	(dann)	$dTe := \text{mittel}$
(wenn)	$I = \text{mittel}$	(und)	$T_{not} = \text{hoch}$	(dann)	$dTe := \text{mittel}$
(wenn)	$I = \text{hoch}$	(und)	$T_{not} = \text{niedrig}$	(dann)	$dTe := \text{mittel}$
(wenn)	$I = \text{hoch}$	(und)	$T_{not} = \text{mittel}$	(dann)	$dTe := \text{niedrig}$
(wenn)	$I = \text{hoch}$	(und)	$T_{not} = \text{hoch}$	(dann)	$dTe := \text{niedrig}$

Der eingestrahle Wärmestrom I geht als Zwischenergebnis ("fuzzy intermediate variable") in die Bestimmung des Korrekturwertes ein. Leider ist die verwendete Entwicklungsumgebung (FUDGE) nicht in der Lage solche Zwischenergebnisse darzustellen. Daher müssen in der endgültigen Regelbasis die Regeln für die Ausgangsvariable dTe explizit ausformuliert werden:

I = niedrig:

1	$T_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{niedrig}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
2	$T_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{mittel}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
3	$T_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{hoch}$	\Rightarrow	$dTe := \text{mittel}$
4	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{niedrig}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
5	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{mittel}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
6	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$T_{not} = \text{hoch}$	\Rightarrow	$dTe := \text{mittel}$
7	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$T_{not} = \text{niedrig}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
8	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$T_{not} = \text{mittel}$	\Rightarrow	$dTe := \text{hoch}$
9	$T_{coll} = \text{niedrig}$	\wedge	$dT_{coll} = \text{mittel}$	\wedge	$T_{not} = \text{hoch}$	\Rightarrow	$dTe := \text{mittel}$

I = mittel:

10	Tcoll = mittel	∧	dTcoll = mittel	∧	Tnot = niedrig	=>	dTe := hoch
11	Tcoll = mittel	∧	dTcoll = mittel	∧	Tnot = mittel	=>	dTe := mittel
12	Tcoll = mittel	∧	dTcoll = mittel	∧	Tnot = hoch	=>	dTe := mittel
13	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = niedrig	=>	dTe := hoch
14	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = mittel	=>	dTe := mittel
15	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = hoch	=>	dTe := mittel

I = hoch:

16	Tcoll = hoch					=>	dTe := mittel
17	Tcoll = hoch					=>	dTe := niedrig
18	Tcoll = hoch					=>	dTe := niedrig
19	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = niedrig	=>	dTe := mittel
20	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = mittel	=>	dTe := niedrig
21	Tcoll = niedrig	∧	dTcoll = hoch	∧	Tnot = hoch	=>	dTe := niedrig

3.2.4 Ein- / Ausschaltkriterium

Alle in den vorangegangenen Kapiteln (4.2.1 bis 4.2.3) besprochenen Maßnahmen dienen dazu das Einschaltkriterium des EOS-Reglers automatisch der Solaranlage und den Einstrahlungsverhältnissen anzupassen. Zusammenfassend ist das Einschaltkriterium erfüllt (die Pumpe wird eingeschaltet), wenn gilt:

$$(T_{NAST} - T_{NOT} - dT_E) > 0 \quad (12)$$

Soll der Energieverbrauch der Pumpe noch mit berücksichtigt werden, d.h. soll die Pumpe erst dann eingeschaltet werden wenn zu erwarten ist, daß mehr Energie in den Speicher transportiert wird, als von der Pumpe im gleichen Zeitraum verbraucht wird, so lautet das Kriterium:

$$(T_{NAST} - T_{NOT} - dT_E) > \frac{P_{el,Pumpe}}{\dot{m}_W c_W} \quad (13)$$

Das Ausschaltkriterium des EOS-Reglers ist vergleichsweise einfach zu formulieren, da ja durch die zusätzlichen Temperaturmeßstellen am Solar-Wärmetauscher (T_{Cold} und T_{Hot}) die Richtung des Wärmetransports festgestellt werden kann. Würde T_{Cold} größer als T_{Hot} , so würde Energie aus dem Speicher abtransportiert werden anstatt hinein. Wir formulieren also für das Ausschaltkriterium:

$$(T_{Hot} - T_{Cold}) \leq 0 \quad (14)$$

Auch hier kann mit wenig Aufwand die Pumpenenergie berücksichtigt werden:

$$(T_{Hot} - T_{Cold}) \leq \frac{P_{el,Pumpe}}{\dot{m}_W c_W} \quad (15)$$

Das Problem die Pumpenenergie zu berücksichtigen liegt darin, daß weder die Pumpenleistung noch der Massenstrom, noch die Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids⁵ bekannt sind. Will man auf eine Reglerkonfiguration durch den Installateur vor Ort verzichten, so ist man hier darauf angewiesen sinnvolle, durchschnittliche Werte fest vorzugeben. Bei einer möglichen späteren Erweiterung um eine Wärmezählerfunktion, wird der Massenstrom dann ohnehin gemessen.

⁵ Die Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids ändert sich je nach Frostschutzkonzentration zwischen ca. 3 und 4,2 $\left[\frac{kJ}{kgK} \right]$

3.3 Diverse Softwarekomponenten

Im folgenden werden einige Softwarekomponenten besprochen, die zwar mit dem eigentlichen Regler nichts zu tun haben, deren Realisierungskonzept aber aus dem einen oder anderen Grund für die Durchführung dieses Projektes wichtig war.

3.3.1 Anzeigesteuerung

Der EOS-Regler verfügt über ein LC-Display mit 2 Zeilen à 16 Zeichen. Dieser Anzeigebereich ist für die vorliegende Anwendung völlig ausreichend. Software und Hardware wurden aber so ausgelegt, daß auch Displays mit bis zu 64 Zeichen pro Zeile und beliebiger Zeilenzahl eingesetzt werden können. Dazu brauchen nur die entsprechenden Parameter im Kopf der Datei "lcd.t4" angepaßt werden.

Das Display belegt nur zwei Adressen im Adreßraum des Prozessors (vgl. Kap. 3.1.2). Über das Kontrollregister werden Steuerinformationen wie Cursor-Positionierungs Kommandos und Modus Einstellsequenzen übertragen. ACHTUNG: die interne Verarbeitung eines Schreibkommandos (Daten- oder Kontrollregister) dauert 1 µs. Ist die Zykluszeit des Prozessors schneller, so sollte die entsprechende Zeit gewartet werden, bevor ein erneuter Schreibzugriff stattfinden kann. Ob eine Schreibzugriff abgeschlossen ist, kann auch durch "pollen" des Busy-Bits im Kontrollregister festgestellt werden.

In "lcd.t4" werden folgende Anwenderfunktionen (Wörter) definiert:

lc_emit	gibt ein einzelnes Zeichen an der akt. Cursorposition aus
lc_bs	"destructive backspace"
lc_cr	erzeugt einen Zeilenvorschub
initLCD	setzt verschiedene Displayparameter und installiert "lc_emit" als Standard-Ausgabefunktion

Wie unter FORTH üblich sind die Ein- und Ausgabefunktionen des Systems vektorisiert. So kann durch simples Ersetzen der Standardausgabevektoren: "OutVector" und "crVector" die Systemausgabe auf das LC-Display umgeschaltet werden.

3.3.2 Gebrochen-rationale Integer Arithmetik

An verschiedenen Stellen der Software sind Rechenoperationen mit rationalen Zahlen notwendig. Leider verfügt der hier verwendete Target-Compiler (T4) nicht über einen "floating point" Datentypen. Der Compiler kennt nur vorzeichenlose und vorzeichenbehaftete 16bit Integer-Typen. Damit trotzdem rationale Zahlen verwendet werden können wird in der vorliegenden Anwendung jede rationale Zahl durch zwei Integerzahlen dargestellt. Da sich jede rationale Zahl als Bruch darstellen läßt, wird einfach eine Integerzahl als Zähler, eine andere als Nenner der darzustellenden rationalen Zahl verwendet. Auf diese Weise wird z.B. die Multiplikation mit dem "Netto-Korrekturfaktor" (NC) durch eine Multiplikation mit dem NC-Zähler (NCB) und einer anschließenden Division mit dem NC-Nenner (NCA) erreicht.

3.3.3 Kalibrierung der Temperatureingänge

Können wir von der Annahme ausgehen, das die Datenerfassungselektronik in etwa eine lineare Übertragungsstrecke darstellt (vgl. → Kap. 4.2.1) so läßt sich die von einem PT100 erfaßte Temperatur in erster Näherung⁶ wie folgt darstellen:

$$\vartheta = m * adc + c \quad (16)$$

⁶ Der genaue Verlauf der PT100 Temperatur-Widerstandskennlinien ist in DIN 43760 bzw. IEC 751 niedergelegt. Im vorliegenden Bereich müßte die Kennlinie danach durch eine quadratische Funktion angenähert werden.

dabei bedeutet:

ϑ die Temperatur in ° Celsius
 adc der von prozessorinternen Analog-Digital-Wandler gelieferte Wert
 m, c Steigung und Offset der Kalibriergeraden.

Steigung (m) und Offset (c) dieser Funktion werden für jeden Sensor in einem Kalibrierversuch ermittelt. Für m und c gilt dann:

$$m = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{adc_1 - adc_2} \quad (17) \quad \text{und} \quad c = \vartheta_1 - m * adc_1 \quad (18)$$

Ein typisches Wertepaar für m und c aus einem der vorliegenden Kalibrierversuche lautet $m = 0.5275$ und $c = 119.2615$. Mit der Genauigkeit von 16 Bit Integerzahlen läßt sich die Skalierung (Glg. 21) nicht durchführen. Programmintern werden die Temperaturen in 100stel Grad dargestellt. Das würde einer Multiplikation mit 52.75 entsprechen. Diese Multiplikation führen wir, gemäß den Ausführungen im vorigen Kapitel durch, indem wir erst mit 5275 multiplizieren, um danach durch 100 zu dividieren.

Die Multiplikation mit 5275 überschreitet nun leider den Wertebereich einer 16 Bit Integerzahl. Um diese in jeder Skalierungsoperation vorkommende Problematik zu umgehen wird ein Skalierungsoperator ($*/$)⁷ eingeführt. Der Operator führt zunächst die Multiplikation zweier 16 Bit Operanden durch und erzeugt dabei ein 32 Bit Zwischenergebnis. Danach wird die Division des Zwischenergebnisses mit dem dritten 16 Bit Operanden durchgeführt. Das Ergebnis ist dann wieder eine 16 Bit Integerzahl. Die Addition des Offsets (11926) führt zu keinen Problemen mehr mit dem Wertebereich des Ergebnisses.

⁷ Dieser Operator ist in FORTH Systemen durchaus üblich, war aber in der verwendeten Programmierumgebung nicht vorhanden. Da es sich um eine, auch für andere Programmierumgebungen recht nützliche Einrichtung handelt, wird der Skalierungsoperator hier kurz angesprochen.

4. Hardware

Der Ansatz eines "intelligenten" Zweipunktreglers bedingt den Einsatz von "Intelligenz", also eines Mikroprozessors in der elektronische Realisierung des Reglers. Zu dem Mikroprozessor mit seiner Peripherie-Beschaltung verfügt der Regler noch über ein Prozess-Interface. Hier werden die Prozessgrößen (Temperaturen) erfaßt und Mikroprozessorgerecht aufbereitet. Hier befindet sich aber auch der Leistungsausgang zur Steuerung der Pumpe.

4.1 uP Baugruppe

Als Mikroprozessor wurde die MCU 68HC11 vom Motorola eingesetzt. Der Baustein ist preiswert, verfügt über eine ausreichende Anzahl analoger und digitaler Eingänge sowie über digitale Ausgänge. Außerdem ist für diesen Baustein eine Vielzahl von Entwicklungswerkzeugen vorhanden. Insbesondere liefert Motorola als einziger Prozessor-Hersteller ein kostenloses Entwicklungswerkzeug zur Realisation von "Fuzzy" Reglern.

4.1.1 Kernbeschaltung

Die MCU wird (siehe Bild 4) im "extended multiplexed mode" betrieben. Dabei werden Port B und Port C dazu verwendet den Prozessorbus zu treiben. Das Latch IC2 demultiplext Adress- und Datenbus. Der Prozessor wird mit 8MHz getaktet, was zu einer Zykluszeit (e-clock) von 2MHz führt. IC3 erzeugt den Reset der Baugruppe. Um den Speicher, sowie weitere speicheradressierbare Bausteine adressieren zu können, ist mit IC4 ein universeller Dekoder realisiert (Tabelle 1). Zum Einlesen der Temperaturen werden die Analogkanäle AN0 bis AN3 (PE0..PE3) verwendet.

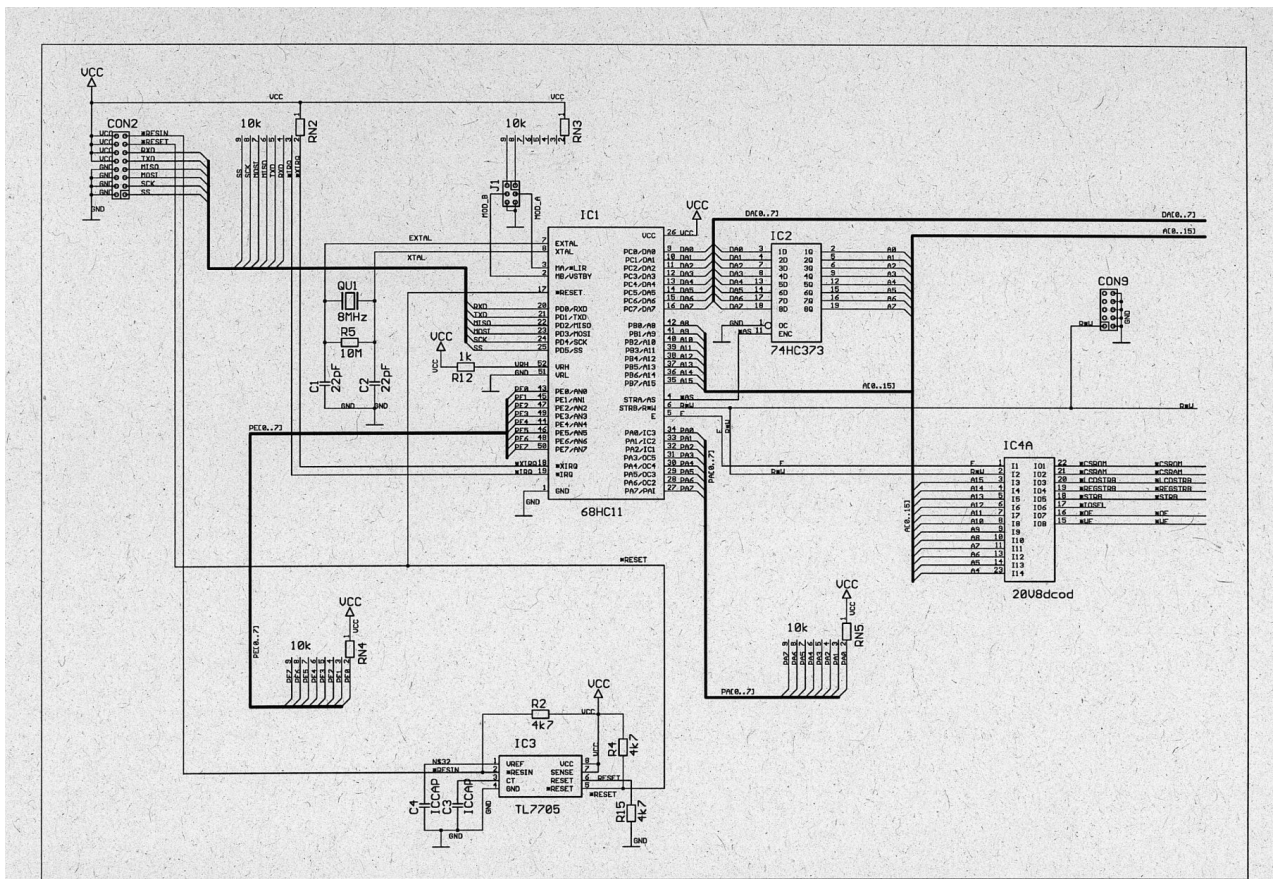


Bild 8: MCU Beschaltung

Signal	Adreßbereich von	Adreßbereich bis	Bemerkungen
*CSRAM	\$0000	\$7EFF	32kB RAM
*CSROM	\$8000	\$FFFF	32kBROM
*STRB	\$7FD0	\$7FDF	für zukünftige Erweiterungen
*REGSTRB	\$7FE0	\$7FEF	8bit Ausgaberegister (Transistor Array)
*LCDSTRB	\$7FF0	\$7FFF	2 Zeilen LC Display

Tabelle 1: Speicher Aufteilung

In Bild 8 ist die Verschaltung der Speicherbausteine (EPROM+RAM), der Anschluß für die Flüssigkristallanzeige (LCD1) und das Ausgaberegister zur Ansteuerung des Transistor-Arrays (IC22) dargestellt. Die beiden Speicherbausteine sind je 32kB groß. Das LC Display benötigt zwei Adressen und das Register eine Adresse. Da im Dekoder (IC4) nicht alle Adreßleitungen ausdekodiert werden können, belegen Display und Register je 16 Adressen innerhalb derer die Bausteine 8 bzw. 16 mal gespiegelt vorkommen. Das Trimpotentiometer P1 dient zur Einstellung des Anzeigekontrasts.

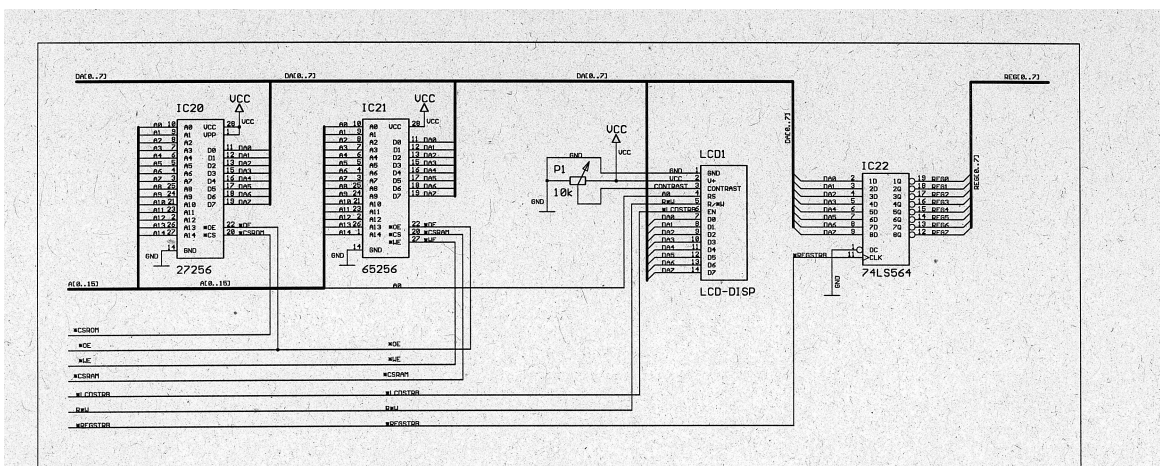


Bild 9: Speicheradressierbare Bausteine

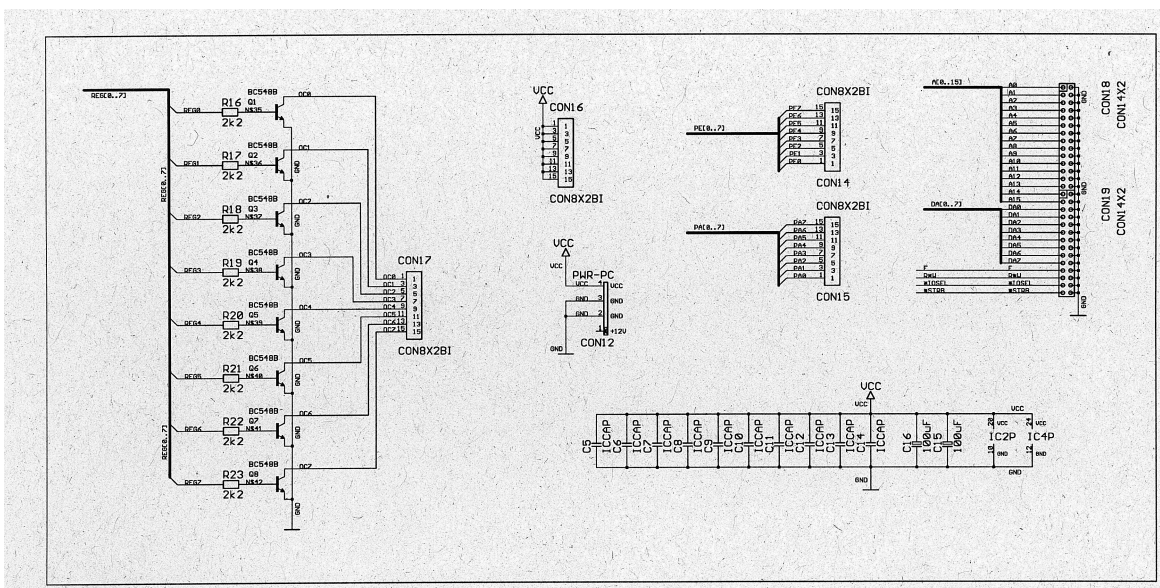


Bild 10: Steckverbinder und Transistor-Array

Bild 9 zeigt die Anschlußbelegung der eingesetzten Steckkontakte, sowie die Verschaltung des Transistor-Arrays. Das Transistor-Array kann in "Open-Collector"-Schaltung Ströme von bis zu 500mA pro Kanal schalten. Transistor Q1 (Register Bit 0) schaltet die Leistungsendstufe der Pumpe.

4.1.2 Anzeige

Als Anzeigeeinheit findet ein 2-zeiliges Flüssigkristall Textdisplay mit einer Zeilenlänge von 16 Zeichen Verwendung (z.B. Philips Typ LTN211). Das Display ist mit einer eigenen Steuerelektronik inklusive Zeichengenerator ausgestattet. Die Kommunikation zwischen Prozessor und Display wird über zwei Register (ein Daten- und ein Kontrollregister) abgewickelt. Der Dekoder legt dafür folgende Speicheradressen fest:

Kontrollregister	\$7FF0
Datenregister	\$7FF1

Tabelle 2: Adressen Display

Das Display verfügt über einen 4 und einen 8 Bit Zugriffsmodus, hier wird der 8 Bit Modus verwendet. Ein Schreibzugriff auf das Display ist erst nach Ablauf von 1 μ S abgeschlossen. Erst danach darf ein weiterer Schreibzugriff erfolgen. Da das Display nicht über ein asynchrones Businterface verfügt, muß der Abschluß einer Schreiboperation durch Software sichergestellt werden.

4.1.3 Digitale Ausgänge

Für die Regleranwendung wird nur ein digitaler Ausgang benötigt - Transistor Q1 des Transistorarrays. Der Dekoder legt für das zugehörige Ausgaberegister die folgende Adresse fest:

Transistor-Array Adresse	\$7FE0	Bit 0 entspricht Transistor Q1
--------------------------	--------	--------------------------------

Tabelle 3: Adresse Transistor-Array Ausgang

Aufgrund der invertierenden Charakteristik der Ausgaberegisterstufe muß eine 0 in das entsprechende Registerbit geschrieben werden, um ein Durchschalten des Transistors zu erreichen. Die Registerwerte können nicht zurückgelesen werden.

4.1.4 Analoge Eingänge

Die MCU 68HC11 verfügt über 8 analoge Eingänge mit einer Auflösung von 8 Bit. Von diesen 8 Eingängen können jeweils 4 über einen internen Multiplexer blockweise zusammen gelesen werden. Für die vorliegende Anwendung werden die Kanäle AN0 bis AN3 verwendet.

4.2 Prozeß-"Interface"

Das Prozeßinterface der Mikroprozessorbaugruppe hat einerseits die Aufgabe analoge Meßgrößen (hier Temperaturen) so aufzubereiten, daß sie vom Mikroprozessor erfaßt werden können. Zum anderen erfüllt das Prozeßinterface aber auch die Aufgabe dem Mikroprozessor steuernden Eingriff auf den Prozeß zu ermöglichen. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, eine mit 240 V betriebene Pumpe ein- bzw. auszuschalten.

4.2.1 PT100 Eingangverstärker

PT100 Temperatursensoren setzen eine Temperatur in einen definierten Widerstand um. Bei einer Temperatur von 0°C hat eine PT100 in der Regel genau einen Widerstand von 100 Ω . Allgemein lautet der Zusammenhang nach DIN 43760 / IEC 751 (im Bereich von 0 bis +850 °C):

$$R = 100\Omega * (1 + A * \vartheta - B * \vartheta^2)$$

mit:

$$A = 3.90802 * 10^{-3} \left[\frac{1}{^{\circ}C} \right] \quad \text{sowie} \quad B = 0.580195 * 10^{-6} \left[\frac{1}{(^{\circ}C)^2} \right]$$

Das führt bei 100°C zu einem Widerstand von 138.5 Ω und bei 150°C zu einem Widerstand von 157.3 Ω.

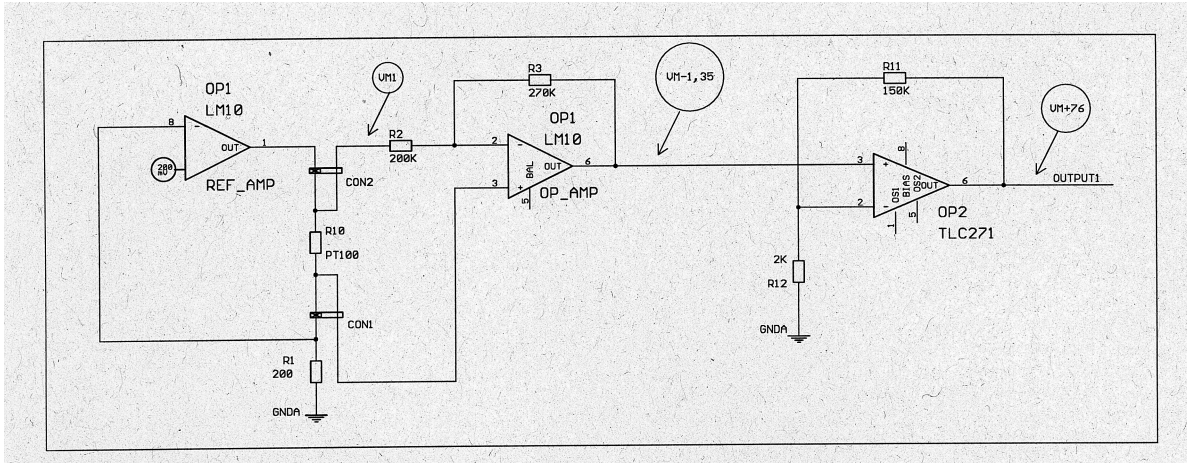


Bild 11: PT100 Vorverstärker

Um den Widerstandsbereich von 100 bis ca. 150 Ω möglichst genau auf den Eingangsspannungsbereich der MCU Analogeingänge (0..5V) abzubilden wurde eine spezielle Verstärkerschaltung entwickelt (Bild 7). Dies wurde nötig, da alle bekannten Standard-Verstärkerschaltungen für diesen Zweck ihren Nullpunkt bei 0 Ω haben. Wird aber der gesamte Meßbereich von 0 bis 150 Ω verstärkt, so ist die Auflösung der MCU Analogeingänge (8 Bit) nicht ausreichend.

Zunächst wird mit der Referenzspannungsquelle, dem Referenzverstärker (1/2 OP1) und dem Präzisionswiderstand R1 eine Präzisionsstromquelle (1mA) aufgebaut. Diese Präzisionsstromquelle produziert einen Spannungsabfall im PT100. Dieser Spannungsabfall ist in der Spalte ΔV_{PT100} , Tabelle 4, für drei Temperaturen aufgeführt. Auf Massepotential bezogen entspricht das der Spannung V_{M1} .

ϑ	R_{PT100}	ΔV_{PT100}	V_{M1}	$V_{M-1,35}$	V_{M+76}
0°C	100 Ω	100 mV	300 mV	65 mV	4,94 V
115°C	144,2 Ω	144,2 mV	344 mV	5,33 mV	0,405 V
130,5°C	150 Ω	150 mV	350 mV	(-2,5 mV)	(-0,19 V)

Tabelle 4: PT100 Verstärker Meßpunkte

Der zweite in OP1 enthaltene Operationsverstärker ist als Inverter mit der Verstärkung (-1,35) geschaltet. Am Ausgang dieser Stufe ergibt sich die Spannung $V_{M-1,35}$. Der einer Temperatur von 130,5 °C entsprechende Spannungswert ist hier bereits negativ. Aufgrund der unipolaren Versorgungsspannung der Anologschaltung befindet sich der Meßwert 150 Ω also bereits außerhalb des Meßbereichs (vgl. Bild 8). Bild 8 zeigt aber ebenfalls das mit dieser Anordnung eine gute Linearität bis etwa 144 Ω ($\approx 115^{\circ}C$) erreicht werden kann.

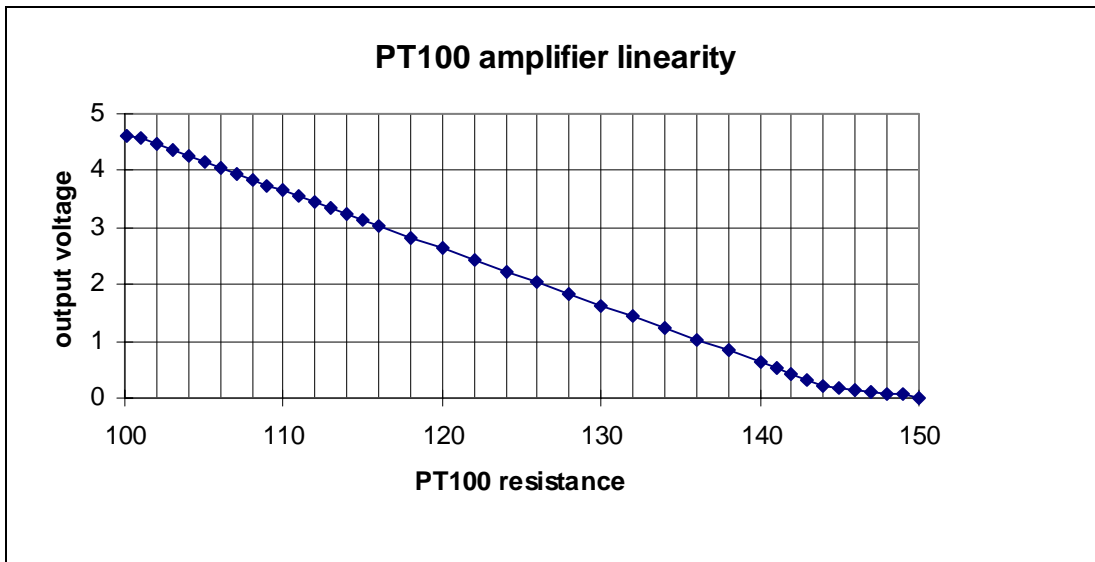


Bild 12: Linerität des PT100 Verstärkers

Die folgende, mit dem externen Operationsverstärker OP2 aufgebaute Stufe verstärkt das Signal noch einmal um den Faktor (+76). Damit wird die Temperatur 0°C auf ca. 5V und 130°C auf ca. 0V abgebildet. Diese Verschaltung invertiert zwar den Zusammenhang zwischen Temperatur und Meßspannung, kommt dafür aber mit extrem wenig Komponenten aus. Die geringe Anzahl von Komponente hat nicht nur einen günstigen Preis, sondern ebenfalls ein günstiges Signal zu Rausch Verhältnis zur Folge.

4.2.2 Pumpensteuerungsausgang

Um eine möglichst hohe Betriebssicherheit sowie eine gute "Elektro-Magnetische-Verträglichkeit" (EMV) zu erreichen, wurde der Schaltausgang zur Ansteuerung der Pumpe als Halbleiterschalter ausgeführt (vgl. Bild 9).

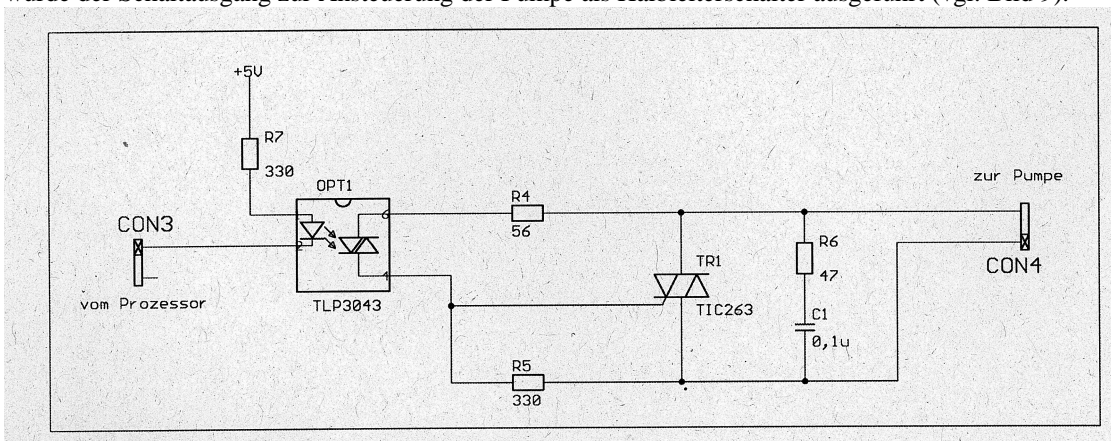


Bild 13: 240V 1-Phasen Steuerausgang

Die eigentliche Schaltaufgabe wird von einem TRIAC (TIC263) durchgeführt. Der TRIAC ist mit einem RC-Glied ("snubber network") beschaltet, zum einen, um elektromagnetische Störungen zu unterdrücken und zum anderen, um den maximalen Spannungsanstieg (dV/dt) über dem TRIAC beim Schalten induktiver Lasten zu begrenzen.

Der TRIAC wird von einem speziellen Ansteuerbaustein (TLP 3043) gezündet. Dieser Baustein enthält eine galvanische Trennung (Optokoppler) um die Mikroprozessorschaltung vor den hohen, zu schaltenden Spannungen zu schützen. Außerdem ist in diesem Baustein bereits ein Nullspannungsdetektor integriert, der dafür sorgt, daß der TRIAC (und damit die Pumpe) nur im Nulldurchgang der Netzwechselfspannung geschaltet wird. Auf diese Weise werden steile Spannungsanstiege, die ja letztendlich für elektromagnetische Störungen verantwortlich sind, vermieden.

5. Simulation

Um die Auswirkungen einer verbesserten, automatischen Reglereinstellung untersuchen zu können, wurden diverse Simulationsrechnungen durchgeführt. Übliche Simulationsumgebungen aus dem solarthermischen Bereich eignen sich nicht für die Simulation regelungstechnischer Fragestellungen. Dafür gibt es zwei Hauptgründe:

1. Die erreichbare zeitliche Auflösung ist nicht hoch genug um die für die Regelungstechnik interessanten Phänomene aufzulösen. Aufgrund der Tatsache das die meisten Simulationsumgebungen nicht über eine dynamische Zeitschrittanpassung verfügen, würde bei einer herkömmlichen Simulationsumgebung die Simulation mit der erforderlichen Zeitschrittweite zu lange dauern (langsamer als Echtzeit) oder die hochdynamischen Effekte der Regelung (z.B. Ein- Ausschaltverhalten) nicht erfassen.
2. Die unter einer solchen Umgebung erstellten Modelle sind, entsprechend dem Einsatzgebiet der Simulationsumgebung, nicht geeignet sehr schnelle Vorgänge korrekt abzubilden. Es geht bei diesen Systemen in erster Linie darum relativ langsame Vorgänge, z.B. zur Berechnung eines Jahreswirkungsgrades, zu akkumulieren. Der Einfluß hochdynamischer Effekte wie z.B. der Einfluß des Taktens der Regelung, werden hier vernachlässigt.

Aus diesem Grund wird hier eine Simulationsumgebung eingesetzt, die in der Regelungstechnik sehr verbreitet ist. Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Simulationsrechnungen stützten sich auf die universelle Simulationssoftware MATLAB / SIMULINK[®]. Die Modelle selbst wurden in der Regel in der Programmiersprache C entwickelt und in Simulink eingebunden.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, das o.g. Nachteile anderer Simulationsumgebungen wegfallen; der Nachteil besteht darin, daß zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht auf eine Bibliothek von vorgefertigten Modellen zurückgegriffen werden kann. Es wird aber im Fachbereich für Energie und Umwelttechnik (FB7) der Fachhochschule Aachen (Abt. Jülich) an einer diesbezüglichen Standardisierung von Modellen unter MATLAB / SIMULINK[®] gearbeitet.

5.1 Modellerstellung

Eine solarthermische Brauchwasseranlage besteht im wesentlichen aus den folgenden, zu simulierenden Teilen:

1. Wetter, bzw. Einstrahlung
2. Kollektor
3. Rohrleitungen
4. Warmwasser Speicher
5. Regelung
6. Temperaturfühler
7. Pumpe
- 8.

Im folgenden wird kurz auf die spezifischen Charakteristika der verwendeten Modelle eingegangen. Alle Modelle verwenden einen Standard "Flow-Vector" als Ein- bzw. Ausgang und könne auf diese Weise im Graphik-Editor von Simulink beliebig zusammengestöpselt werden.

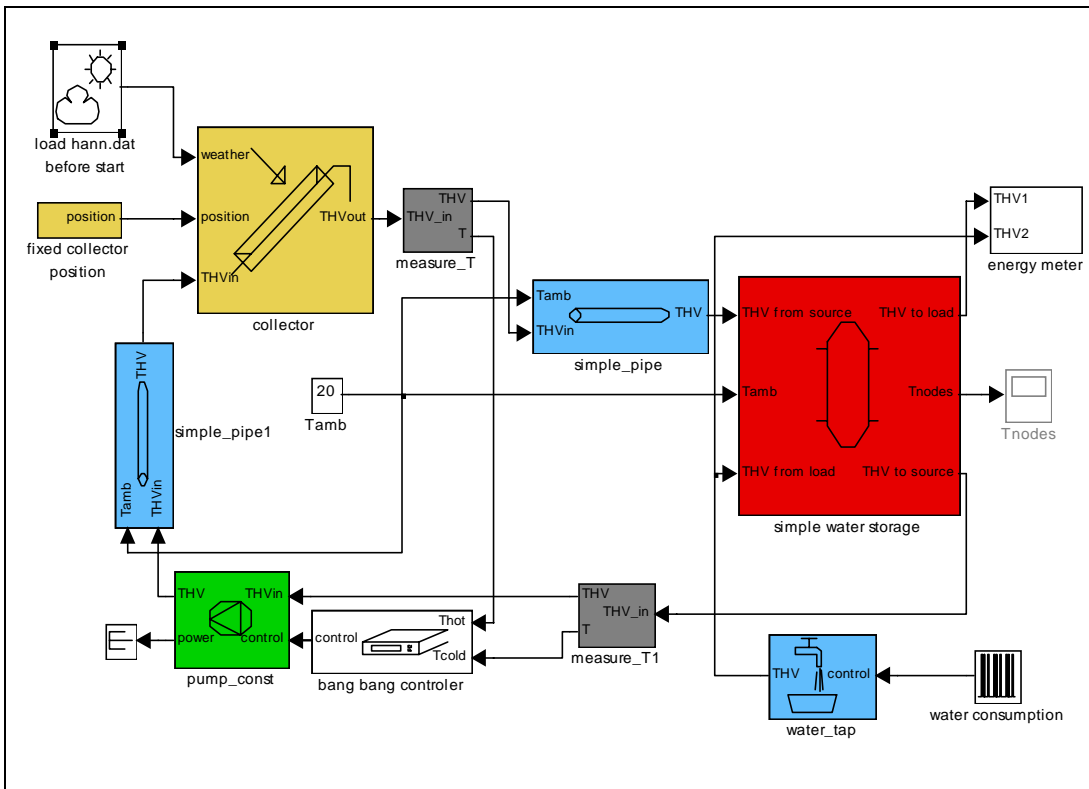


Bild 14: Anlagenschaubild der Standard-Anlage unter Simulink

5.1.1 Das Wetter

Die verwendeten Wetterdaten basieren auf dem Testreferenzjahr für Hannover. Die Daten sind vorverarbeitet, so daß in der Simulation nur noch die Einstrahlwinkel⁸ auf die geneigte Fläche des Kollektors berechnet werden müssen.

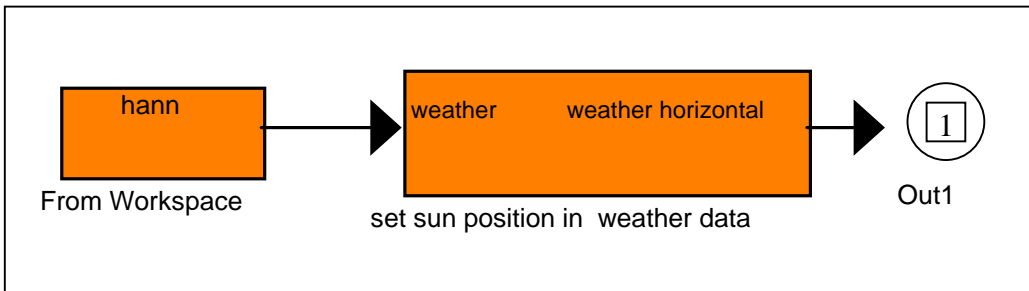


Bild 15: Wetter Umrechnung

5.1.2 Das Kollektormodell

Das Kollektormodell wurde im Rahmen einer Diplomarbeit /W96/ entwickelt und basiert auf dem Ansatz von Per Isakson /191/ (Energiebilanz für ein Volumenelement):

$$\frac{(mC)_{eff}}{A} * \frac{\partial T_{f(x,t)}}{\partial t} + \frac{\dot{m}_{(t)} c_f}{nW} * \frac{\partial T_{f(x,t)}}{\partial x} = F' * \left[(\tau\alpha) I_{(t)} - U_L (T_{f(x,t)} - T_{a(t)}) \right] \quad (19)$$

darin sind:

⁸ Zenit- und Azimuth-Winkel

$(mC)_{eff}$	die effektive Kollektorkapazität
A	Absorberfläche
$T_{f(x,t)}$	Fluidtemperatur an der Stelle "x" zum Zeitpunkt "t"
$\dot{m}_{(t)}$	Massenstrom zum Zeitpunkt "t"
c_f	Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
nW	Anzahl der Rippen (n) mal Rippenbreite (W)
F'	Absorberwirkungsgradfaktor
$(\tau\alpha)$	optischer Wirkungsgrad
$I_{(t)}$	Einstrahlung zum Zeitpunkt "t"
U_L	effektiver Gesamtwärmeverlustkoeffizient
$T_{a(t)}$	Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt "t"

Im vorliegenden Fall wird ein Flachkollektor mit 8 m² Absorberfläche modelliert. Dabei wird der Temperaturverlauf im Kollektor mit 5 Rechenknoten⁹ ausreichend genau nachgebildet.

5.1.3 Das Rohrleitungsmodell

Die in einer solaren Brauchwasseranlage eingesetzten Rohre werden, wie auch der Kollektor als Mehrknoten Finite-Volumen-Modell ausgeführt. Dabei werden folgende Mechanismen berücksichtigt:

1. Wärmetransport durch das strömende Wärmeträgerfluid
2. Axiale Wärmeleitung durch das Wärmeträgerfluid
3. Axiale Wärmeleitung durch die Rohrwandung
4. Radialer Wärmeübergang durch die Rohrwandung
5. Wärmekapazität des Wärmeträgerfluids
6. Wärmekapazität des Rohrmantels

Insbesondere die genaue Modellierung der Wärmekapazität ist für die Darstellbarkeit hochdynamischer Prozesse entscheidend.

5.1.4 Das Speichermodell

Hier kommt ein einfaches, geschichtetes Speichermodell zum Einsatz. Es handelt sich wieder um ein eindimensionales Finite-Volumen-Modell nach dem "upwind" - Verfahren. Für Grenzwertbetrachtungen kann die thermische Schichtung durch Reduzierung der Knotenzahl auf eins abgeschaltet werden. Wärmetauscher werden in diesem einfachen Modell nicht gesondert modelliert.

Neben den Ein- und Ausgangs Fluidströmen stellt dieser Speicher noch eine Anzahl von Temperaturmeßstellen über die Höhe des Speichers verteilt zur Verfügung. Die Anzahl der Temperaturmeßstellen kann unabhängig von der Anzahl der berechneten Knoten eingestellt werden. Mit diesen Temperaturmeßstellen kann die fehlerhafte Anbringung von Speichertemperaturfühlern simuliert werden. Bild 16 zeigt das Ausbilden der Schichtung unmittelbar nach Start der Simulation.

⁹ Es handelt sich um ein "Finite-Volumen"- Mehrknoten-Modell

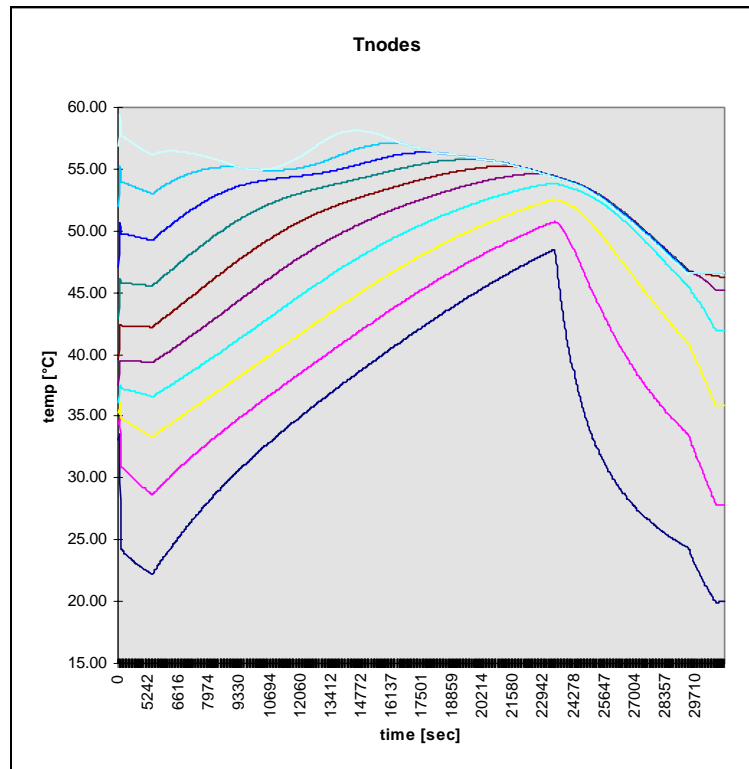


Bild 16: Temperaturverteilung über verschiedene Höhen des Speichers (1 Tag)

5.1.5 Das Reglermodell

Der einfache Zweipunkt-Regler wird hier mit einfachen Simulink Standardsymbolen realisiert. Als Parameter werden Ein- und Ausschalt-Temperaturdifferenz verwendet, da sich diese Parameter eher für den Vergleich mit dem intelligenten Zweipunkt-Regler Konzept eignen als die üblichen Parameter Temperaturdifferenz und Hystereseis.

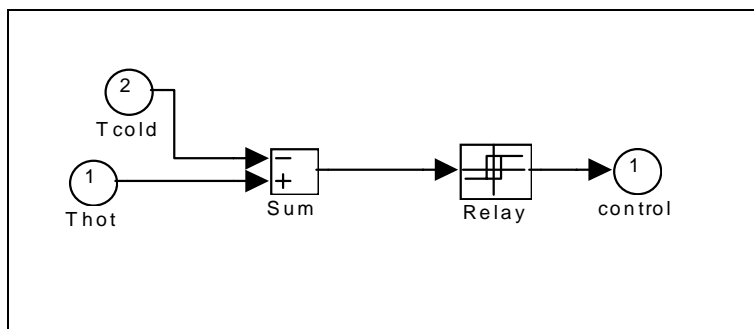


Bild 17: Einfacher Zweipunkt-Regler realisiert mit Simulink-Blöcken

Bild 18 zeigt das Schaltbild des in diesem Vorhaben entwickelten Reglerkonzepts. Die einzelnen, im Kapitel Software besprochenen Komponenten des Regelalgorithmus sind hier jeweils als Blöcke wiederzufinden. Ein- und Ausschaltbedingung werden hier getrennt berechnet. Die Einschaltbedingung wird durch den Block "sum" zusammengefaßt. Wird das Ergebnis von "sum" positiv, so schaltet der Regler ein. Wird hingegen das Ergebnis von "sum2" negativ, so schaltet der Regler wieder aus.

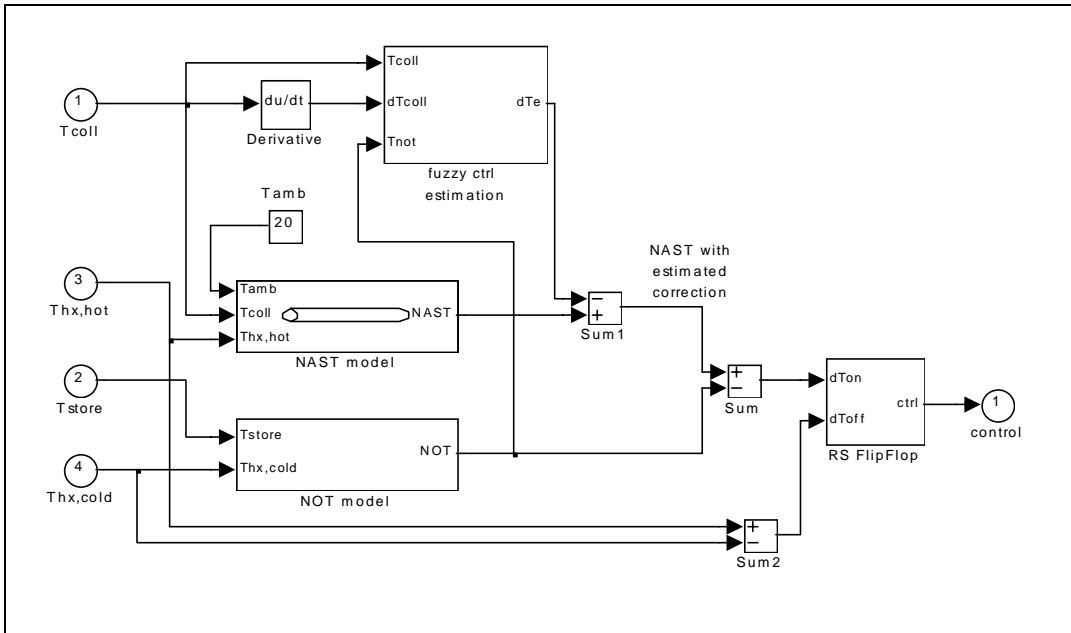


Bild 18: Simulink Schaltbild des EOS Reglers

5.1.6 Temperaturfühlermodell

Zur präzisen Modellierung der dynamischen Effekte bei der Temperaturmessung, wurde der Temperaturfühler mit einer Wärmekapazität ausgestattet. Dadurch besteht die Möglichkeit auch das zeitliche Ansprechverhalten des Temperaturfühlers realistisch nachzubilden.

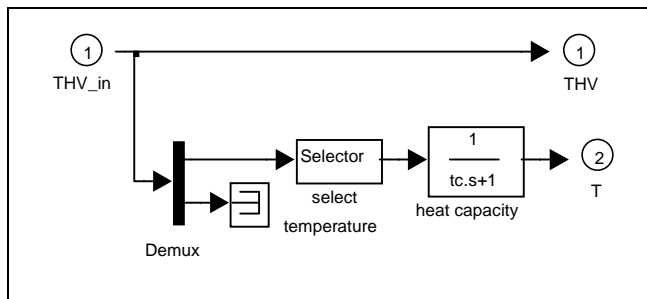


Bild 19: Modell des Temperaturfühlers

5.1.7 Die Pumpe

In dieser Simulation findet ein simples Pumpenmodell Verwendung. Wird die Pumpe eingeschaltet, so liefert sie Ihren Nennmassenstrom. Die Pumpe verfügt über eine Wärmekapazität aber auf eine Modellierung einer Pumpenkennlinie (Massenstrom als Funktion des Druckverlusts im System) wurde hier aus Laufzeitgründen verzichtet.

5.2 Ergebnisse

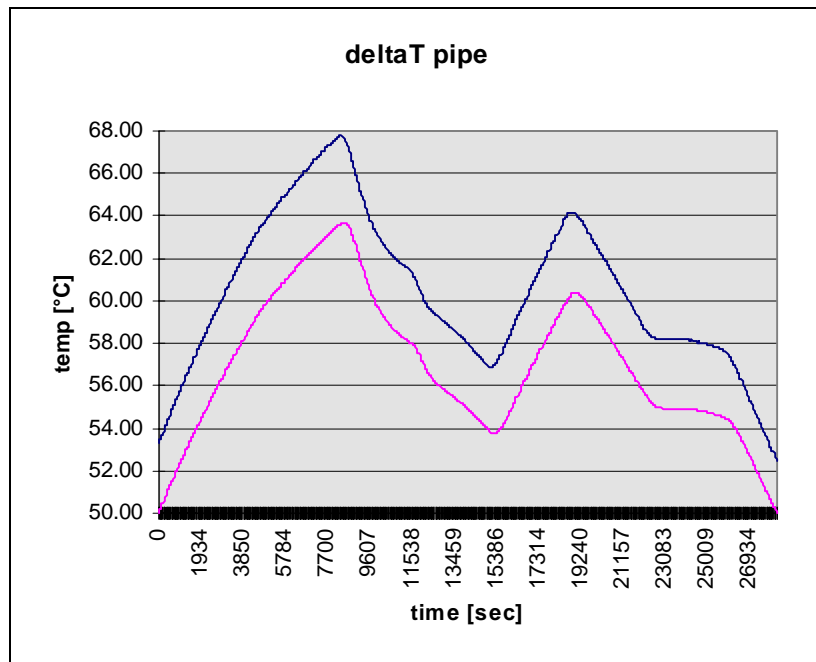


Bild 20: Verluste durch die Verrohrung vom Kollektor zum Speicher

In den Simulationen zum Jahresertrag unterschiedlicher Regler-Konfigurationen wurden folgende kritischen Parameter untersucht:

1. Einfluß der Rohrleitungsverluste in Verbindung mit der Einschalttemperatur des Zweipunkt-Reglers. Bild 20 zeigt den Temperaturverlust durch ein praktisch nicht isoliertes Kupferrohr zwischen Kollektor und Speicher mit einer Länge von 10m.
2. Einfluß eines fehlerhaft angebrachten Kollektor-Temperaturfühlers. Der Wärmeübergang zum Kollektor-Fühler wird durch ein 2 cm langes Rohrstück zwischen Kollektor und Fühler simuliert.
3. Fehlerhafte Anbringung des Speicher-Temperaturfühlers. Dies wird durch die Verwendung der nächst höheren Speicher-Knotentemperatur ($t_{Nodes[2]}$) als Regler-Eingangsgröße simuliert. Der dabei gemachte Fehler beträgt, je nach Ausprägung der Temperaturschichtung im Speicher, zwischen 0 und 5°C (vgl. Bild 16)

In Bild 21 sind die Ergebnisse der Simulationsläufe zusammengefaßt:

Säule 4 zeigt den Jahresertrag des EOS-Reglers. Der EOS-Regler zeigt den höchsten Jahresertrag, was die Funktion des Konzeptes in der Simulation verifiziert.

Säule 3 zeigt den Jahresertrag für einen korrekt eingestellten Zweipunkt-Regler ($\Delta T_{\text{ein}} = 7^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{aus}} = 2^\circ\text{C}$). Der Jahresertrag liegt leicht unter dem des EOS-Reglers, da hier die Parameter fest eingestellt sind, während sich der EOS Regler unterschiedlichen Einstrahlverhältnissen anpassen kann.

Säule 2 zeigt den Jahresertrag eines Systems mit fehlerhaft angebrachtem Speicher-Temperaturfühler. Der Jahresertrag verringert sich hier bereits um 8,7%.

Säule 1 zeigt den Jahresertrag einer Anlage, bei der mehrere Fehler zusammentreffen. Die Rohrverluste der Speicherzuleitung sind hier extrem hoch, die Einschalttemperaturdifferenz hingegen sehr niedrig ($\Delta T_{\text{ein}} = 2^\circ\text{C}$). Zusätzlich wird noch die bereits bei Säule 2 verwendete, fehlerhafte Speichertemperatur angenommen. In der Summe kann hier ein Verlust von 28% beobachtet werden.

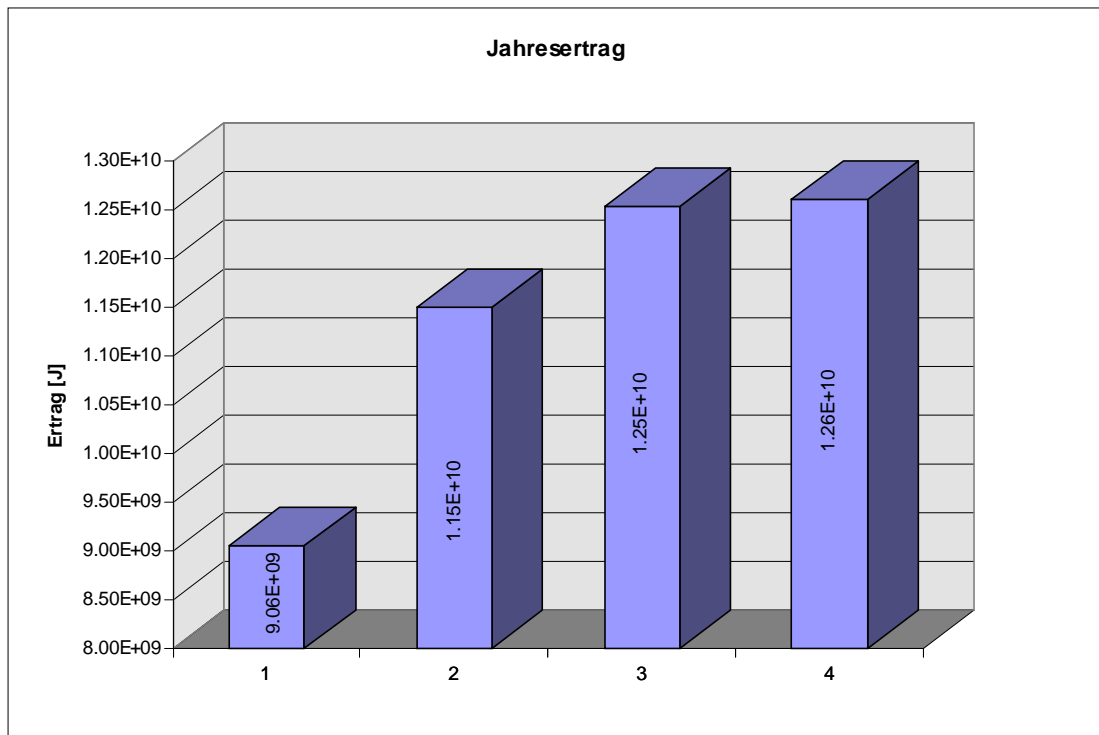


Bild 21: Vergleich der verschiedenen Simulationsläufe

Anlagen, wie die in Säule 1 simulierte, konnten in den Untersuchungen im Rahmen des VELS I und VELS II Projektes mehrfach beobachtet werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein regelungstechnisches Konzept entwickelt, daß vollständig ohne manuelle Einstellungen am Regler auskommt. Dadurch wird eine der Haupt-Fehlermöglichkeiten eliminiert, die nach unseren Beobachtungen in der Vergangenheit zu Wirkungsgradeinbußen bei solaren Brauchwasseranlagen geführt haben. Durch die automatische Anpassung des Reglers an das vorhandene System wird die Solaranlage immer optimal geregelt.

Diese automatische Regler Konfiguration wurde erreicht durch den Einsatz einer einfachen, modellgestützten Adaptionstechnik in Verbindung mit einer Fuzzy-Logic Komponente zur Modellierung der Unsicherheit bei der Abschätzung stationärer Parameter mit Hilfe instationärer Meßdaten.

Es wurde ein Prototyp gebaut der sich zur Zeit in der Erprobung befindet. Bild 22 zeigt den Prototypen vor dem Einbau in die Versuchsanlage. Der Prototyp wurde so konzipiert, daß eine kostengünstige Realisierung eines marktfähigen Produktes möglich ist. Erste entsprechende Verhandlungen mit interessierten Unternehmen wurden bereits durchgeführt.

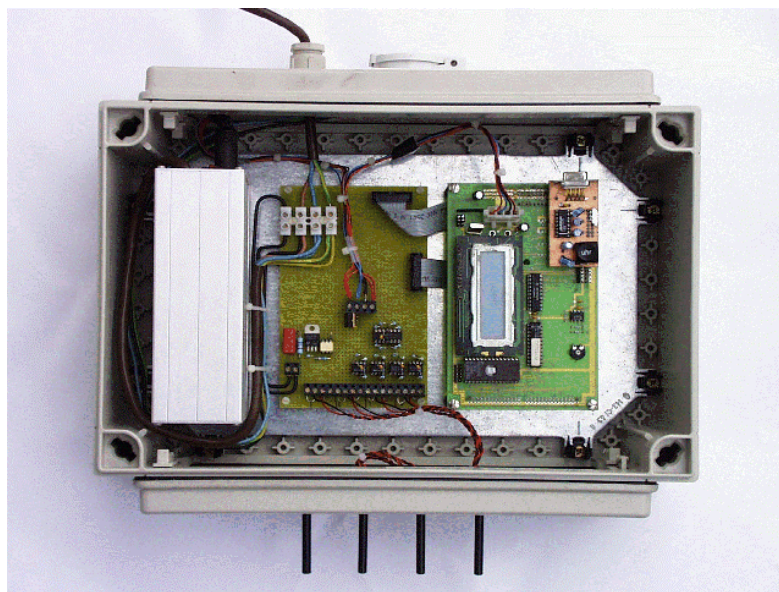


Bild 22: Prototyp des EOS Reglers

Für die Zukunft soll das EOS-Regler Konzept weiter ausgebaut werden, mit den folgenden Schwerpunkten:

1. Automatische Anpassung der effektiven Kollektorwärmekapazität. Die gegenwärtige Version des Reglers ist auf den Betrieb mit Flachkollektoren ausgelegt. Eine automatische Adaption an Kollektoren unterschiedlicher Wärmekapazität würden den Einsatzbereich des Regler nochmals erweitern.
2. Zusätzlicher Einbau einer Wärmemengenzähler-Funktion. Da die entsprechenden Temperaturmeßstellen ohnehin vorhanden sind, muß nur die Software um die Modellierung der Stoffdaten von Wasser-Glykol Gemischen erweitert werden und Volumenstrommessung vorgesehen werden.

3. Am Fachbereich für Energie- und Umweltschutztechnik wird zur Zeit das Konzept einer Volumenstrommessung auf Basis von thermischer Korrelationsmeßtechnik erarbeitet. Die Kombination einer solchen Meßtechnik mit dem EOS-Regler wäre äußerst vorteilhaft, da auf diese Weise für die Volumenstrommessung (→ Wärmemengenzähler-Funktion) keine zusätzlichen Kosten entstehen würden.

Literatur

- /AP94/ H.-O. Arend and D.Pfannenstiel, "Neue Heizungsregelung durch den Einsatz von Fuzzy Logik", vol.3 of *Fuzzy Logic*, ch.4, pp.41--61. Oldenbourg Verlag München Wien, 1994.
- /BTL94/ W.Beckman, J.Thornton, S.Long, and B.Wood, "Control problems in solar domestic hot water systems", *Solar Energy*, vol.53, no.3, pp. 233--236, 1994.
- /CBB94/ E.F. Camacho, M.Berenguel, and C.Bordons, "Adaptive generalized predictive control of a distributed collector field", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.2, no.4, pp.462--467, 1994.
- /CBHL92/ G.Csordas, A.Brunger, K.Hollands, and M.Lightstone, "Plume entrainment effects in solar domestic hot water systems employing variable-flow-rate control strategies," *Solar Energy*, vol.49, no.6, pp.497--505, 1992.
- /D92/ A.Dounis, *Fuzzy-logic expert system for visual and thermal comfort control in Buildings*. PhD thesis, Technical University of Crete, Greece, 1992.
- /HKH87/ R.C. Harrell, G.A. Kranzler, and C.S. Hsu, "Adaptive control of the fluid heat exchange process", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME*, vol.190, pp.49--52, May 1987.
- /I96/ P. Isakson, "Matched Flow Solar Kollektor Model for TRNSYS - Users and Programmers Manual", November 1991
- /K92/ B.Kosko, *Neural Networks and Fuzzy Systems*, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, 1992
- /KS94/ A.Karbach and W.Schulz-Nigmann, "Zusätzliche Energiegewinne durch optimierte Regelung Einfluss des Sollwerts bei der Regelung einer solarthermischen Anlage auf den Energiegewinn", *HLH, Heizung, Lüftung/Klima Haustechnik*, vol.45, no.6, pp.273--277, 1994.
- /KW86/ G.Kahwaji and C.B. Winn, "Effect of the cycling rate on energy collection for bang-bang controllers", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol.108, no.3, pp.206--213, 1986.
- /MRM91/ G.K. Muralidhar, N.J. Raju, and S.Mohan, "Differential temperature controller. An energy conservative device for solar water heating systems", *Energy Conversion and Management*, vol.31, no.1, pp.61--63, 1991.
- /NW84/ P.Nauman and R.Wolfson, "Proportional versus on/off control: A detailed comparison", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol.106, pp.423--427, November 1984.
- /RBC95/ F.R. Rubio, M.Berenguel, and E.F. Camacho, "Fuzzy logic control of a solar power plant," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol.3, no.4, pp.459--468, 1995.
- /TH91/ T.Tobi and T.Hanafusa, "A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system", *Int. Journal of Approximate Reasoning*, no.5, pp.331--348, 1991
- /W82/ C.Win, "Controls in solar-energy systems", *Advances in Solar Energy*, no.1, 1982.
- /W96/ T.Weinzierl, "Modellerstellung zur Systemidentifikation eines solarthermischen Flachkollektors mit dem mathematischen Software-Paket MATLAB", Dipl.-Arbeit, Fachhochschule Aachen, Jülich, Oktober 1996.
- /WS94/ G.Wollscheid and K.Schwarzer, "In situ Vermessung und Bewertung von solarthermischen Großanlagen (VELS II)", in *Viertes Symposium Thermische Solarenergie*, pp.219--224, 1994.