



Einreichung

HTBLVA-Mödling, Abteilung für Elektronik

Technikerstraße 1 – 5

A-2340 Mödling

Adrian CZERMAK, A-3413 Hintersdorf, Hauptstraße 125

Lukas FRÖHLING, A-2571 Altenmarkt an der Triesting, Klauswies 152

Dipl. Ing. Dr. Peter FRÖHLING

Industrietechnik

Solarpaneel-Steuerung



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Durch meine Signatur berechtere ich die Bosch Gruppe, die Einreichung zeitlich und räumlich unbeschränkt entweder selbst oder durch von ihr beauftragte Dritte unter Nennung der Urheber in Druckwerken, Internet, auf elektronischen Datenträgern sowie in der darauf bezogenen Werbung unverändert zu veröffentlichen.

17. April 2009



Projekt Kurzbeschreibung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Steuerung für ein Solarpaneel zu entwickeln und aufzubauen.

Da aus Kosten- und Raumanforderungsgründen keine komplette Anlage aufgebaut werden kann, wird eine Modellanlage hergestellt und in Betrieb genommen. Bei der Hard- und Softwareentwicklung ist darauf zu achten, dass die einzelnen Module leicht austauschbar sind und durch Austausch nur weniger Module die Modellanlage zur Steuerung einer beliebig großen Solarpaneel-Steuerung herangezogen werden kann.

Die optimale Ausrichtung des Sonnenkollektors bringt in unseren Breiten im Winter eine Leistungssteigerung um den Faktor 1.3 und im Sommer einen Faktor von 1.7, also einen beachtlichen Gewinn gegenüber einer unbeweglichen Anlage.

Bei der Bestimmung der Leistungsverluste durch die Dämpfung der Atmosphäre und nicht optimaler Ausrichtung wurde erkannt, dass die Nachführung in azimutaler Richtung alleine einen bedeutend größeren Gewinn als die ausschließliche Nachführung in der Elevation bringt.



Inhaltsverzeichnis

Zielsetzung

Anlagenkonzept

Die Berechnung der Sonnenposition

Leistungseinbußen am Solarpaneel

Die tatsächliche Leistung am Paneel

Die Software zur Steuerung des Paneels

Die DCF77-Signale

Die Berechnung der einzustellenden Winkel

Die Hardware zur Steuerung

Der mechanische Aufbau des Solarkollektormodells

Zusammenfassung

Literatur



Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine elektronische Steuerung für ein Solarpaneel zu entwickeln und aufzubauen.

Da aus Kosten- und Raumanforderungsgründen keine komplette Anlage aufgebaut werden kann, soll eine Modellanlage hergestellt und in Betrieb genommen werden. Bei der Hard- und Softwareentwicklung ist darauf zu achten, dass die einzelnen Module leicht austauschbar sind und durch Austausch nur weniger Module die Modellanlage zur Steuerung einer beliebig großen Solarpaneel-Steuerung herangezogen werden kann.

Die theoretischen Grundlagen der Sonnenpositionsbestimmung sind herzuleiten und für die Implementierung auf Mikroprozessoren aufzubereiten.

Sicherheitsmaßnahmen sind vorzusehen, sodass die Anlage nicht durch Wind oder Hagelschlag Schaden erleidet.

Die Modellanlage ist herzustellen und in Betrieb zu nehmen.



Anlagenkonzept

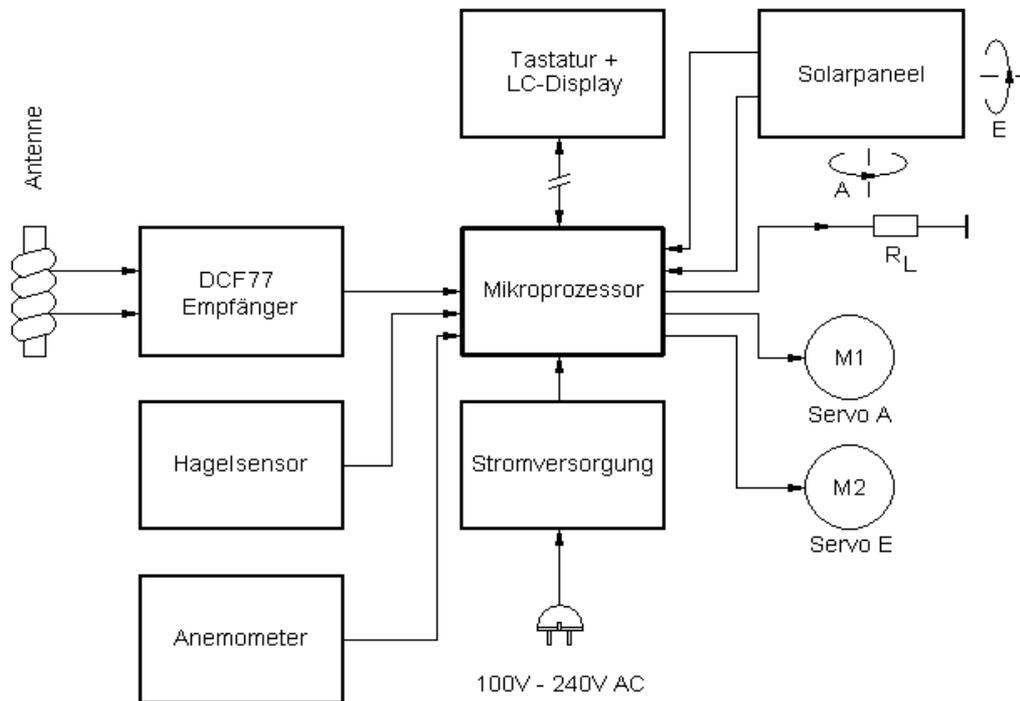
Das Solarpaneel soll so dem Lauf der Sonne nachgeführt werden, so dass die Richtung der Sonneneinstrahlung stets senkrecht auf die Kollektorfläche ist.

Die Kollektorfläche ist also in der azimuthalen Ebene („nach links und rechts“) und in der Elevationsebene („nach oben und unten“) zu bewegen, wobei in geografischen Positionen über dem nördlichen Wendekreis bzw. unter den südlichen Wendekreis mit einem Elevationsbereich von 0° bis 90° das Auslangen gefunden wird. Liegt der Aufstellungsort zwischen dem nördlichen und südlichen Wendekreis, ist wegen der Neigung der Rotationsachse der Erde gegen die Ekliptik ein Elevationsbereich von 180° vorzusehen. Je näher der Aufstellungsort zu den Polen liegt, desto größer ist der notwendige azimuthale Winkelbereich. Oberhalb des nördlichen und unterhalb des südlichen Polarkreises sind für diese Drehrichtung $\pm 180^\circ$ vorzusehen, da es in diesen Gebieten vorkommt, dass die Sonne bis zu einem halben Jahr nicht unter den Horizont taucht.

Die Sonnenposition wird aus dem Datum und der Uhrzeit des Zeitzeichensenders DCF77 /1/ berechnet. Die Messung der Sonnenposition ist sowohl aus mechanischen Gründen und wegen Messfehlern durch Verschmutzung zum Scheitern verurteilt.



Anlagenkonzept



Datum und Uhrzeit wird vom DCF77-Empfangsmodul zur Verfügung gestellt.

Hagelsensor u. Anemometer dienen zum Schutz der Anlage.

Tastatur und LC-Display werden nur für die Inbetriebnahme und Service benötigt.

Die Azimut- und Elevationsdrehung des Solarpaneels werden mit den Servos A und E ausgeführt.

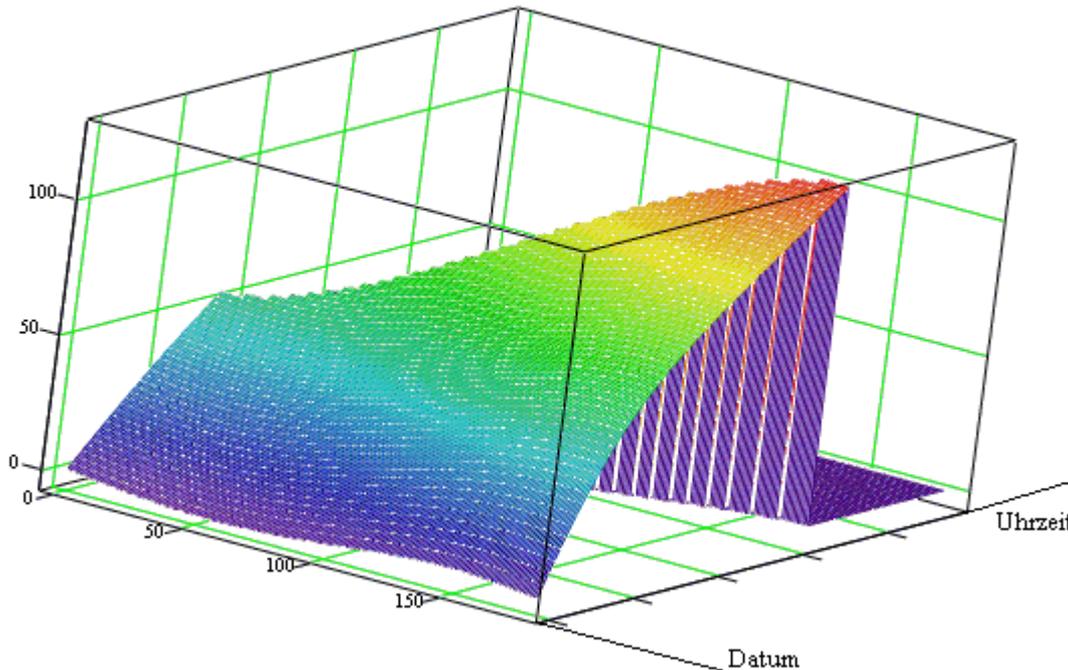
In R_L wird die elektrische Leistung in Wärme umgesetzt.



Die Berechnung der Sonnenposition

Sonnenstand in azimuthaler Richtung

Azimet als Funktion von Datum und Uhrzeit



Der Verlauf des azimuthalen Sonnenstands vom Sonnenhöchststand bis zum Sonnenuntergang bzw. von der Winter- bis zur Sommersonnenwende /2/, /3/, /4/.

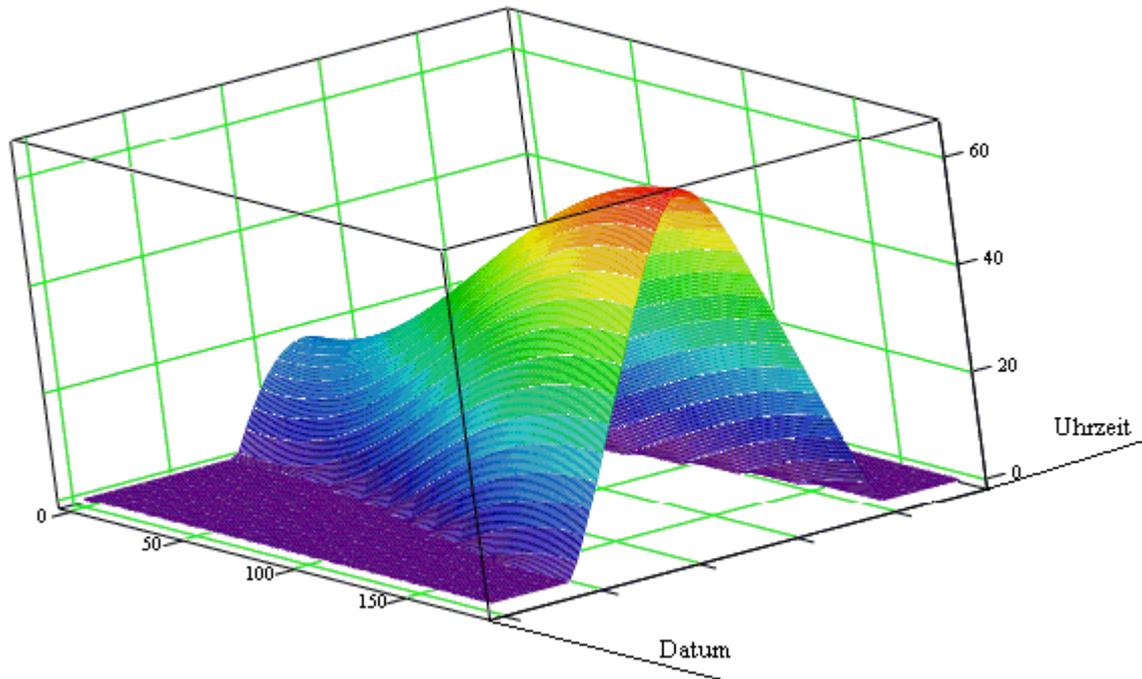
Diese Funktion ist sowohl unter Verwendung transzendenter Funktionen exakt, als auch in Form einer Polynomnäherung (mit einer mittleren Abweichung von 0.53°) im Mikroprozessor implementiert.



Die Berechnung der Sonnenposition

Sonnenstand in Elevationsrichtung

Elevation als Funktion von Datum und Uhrzeit



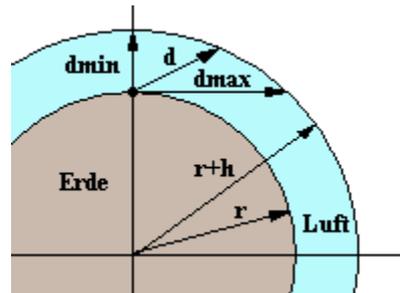
Der Verlauf der Elevation vom Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang bzw. von der Winter- bis zur Sommersonnenwende / 2/, /3/, /4/.

Diese Funktion ist sowohl unter Verwendung transzendenter Funktionen exakt, als auch in Form einer Polynomnäherung (mit einer mittleren Abweichung von 2.2°) im Mikroprozessor implementiert.



Leistungseinbußen am Solarpaneel

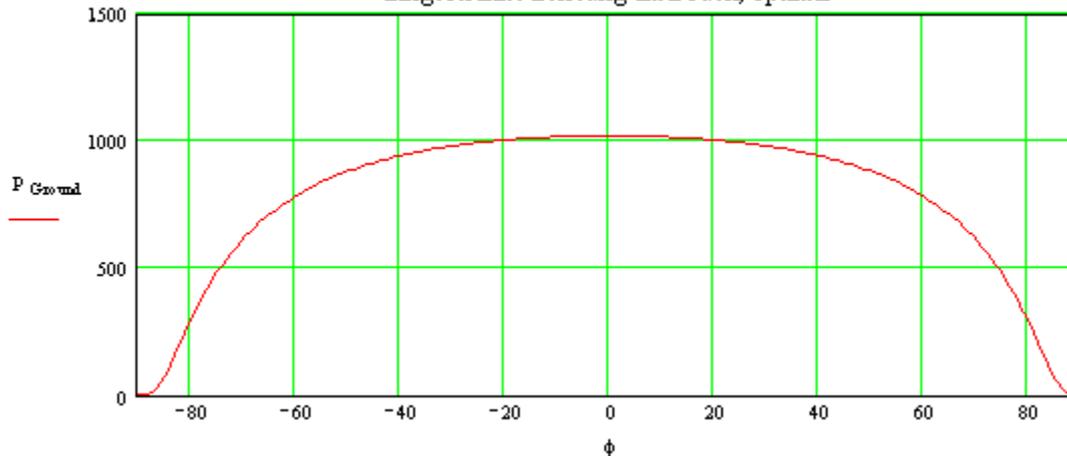
Die Dämpfung der Luftschicht



Die Dämpfung der Luftschicht ist von ihrer effektiven Dicke abhängig, die im Zenit 3812 m beträgt. Ist die Sonne am Horizont sichtbar, ist sie 220350 m.

$$d(\phi) = -r_{earth} * \cos(\phi) + \sqrt{(r_{earth} + d_{min})^2 - r_{earth}^2 * \sin(\phi)^2}$$

Eingestrahelte Leistung am Boden, optimal

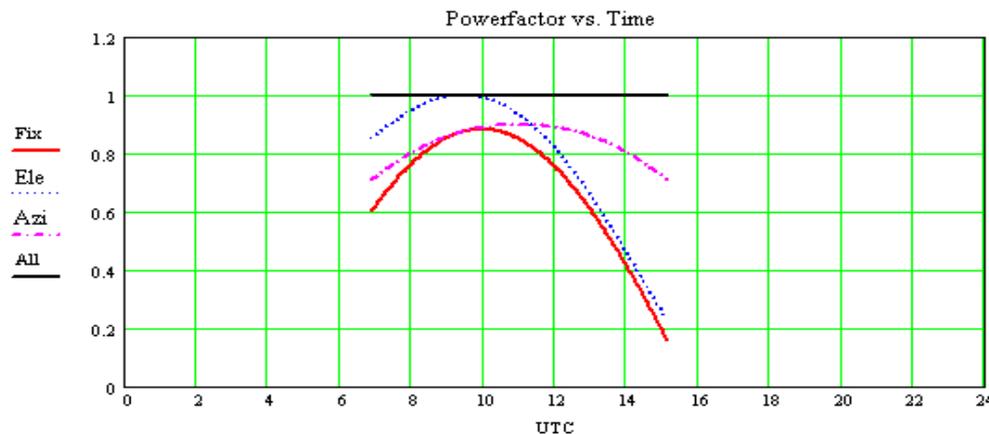
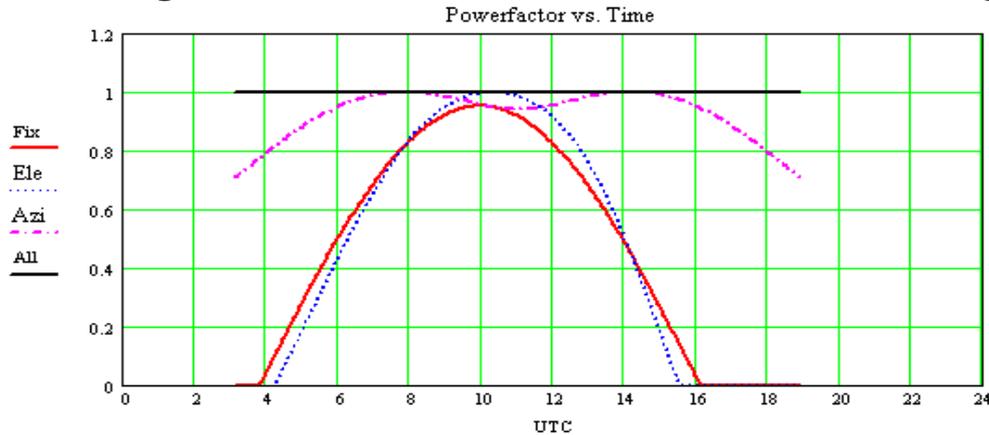


Daher gilt in unseren geografischen Breiten der nebenstehende Verlauf der eingestrahelten Leistung pro m² auf Meereshöhe, senkrecht zur Einfallsrichtung gemessen.



Leistungseinbußen am Solarpaneel

Leistungseinbuße auf Grund der Fehlausrichtung



Der Tagesverlauf der Leistungsdichte bei einem fix montierten (Fix), einem nur in der Elevation beweglichen (Ele), einem nur im Azimut beweglichen (Azi) und einem frei beweglichen (All) Paneel zur Sommer- (oben) und Wintersonnenwende (unten) ohne Berücksichtigung der Luftschichtdämpfung /5/, /6/.

Aufstellungsort:

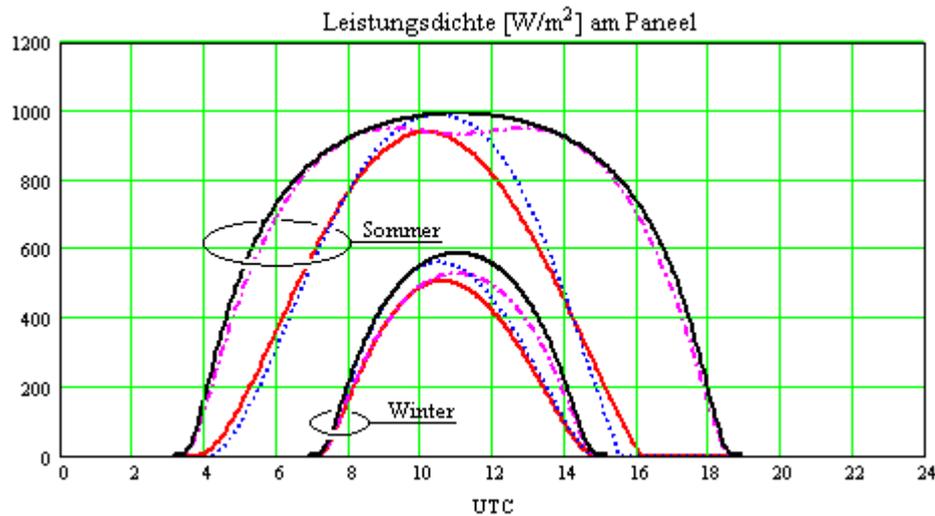
16.006° Ost, 48.021 Nord

Ausrichtung:

SSW, Dachschräge: 45°



Die tatsächliche Leistung am Paneel



Die Leistungsdichte am Paneel zur Wintersonnenwende (Winter) und Sommer Sonnenwende (Sommer) bei fixen (—), einem in der Elevation beweglichen (—), nur im Azimut beweglichen (—) und einem frei beweglichen Kollektor (—).

| Ort: $\lambda = 16.006^\circ$, $\varphi = 48.021^\circ$ Montage: SSO, Neigung = 45° | im Winter | im Sommer |
|--|-----------------------|-----------------------|
| | W/m^2 | W/m^2 |
| fixe Montage | 100.0 | 100.0 |
| in der Elevation beweglich | 112.0 | 101.2 |
| im Azimut beweglich | 113.6 | 153.7 |
| frei beweglich | 130.7 | 166.8 |

Der relative Gewinn gegenüber einer unbeweglichen Anlage zur Winter- und Sommersonnenwende.



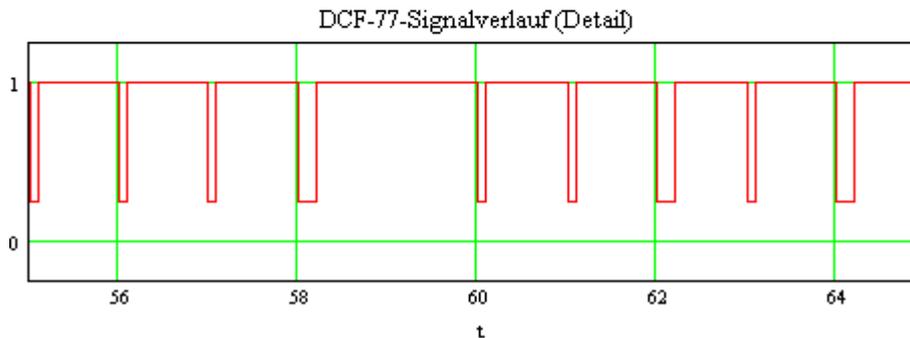
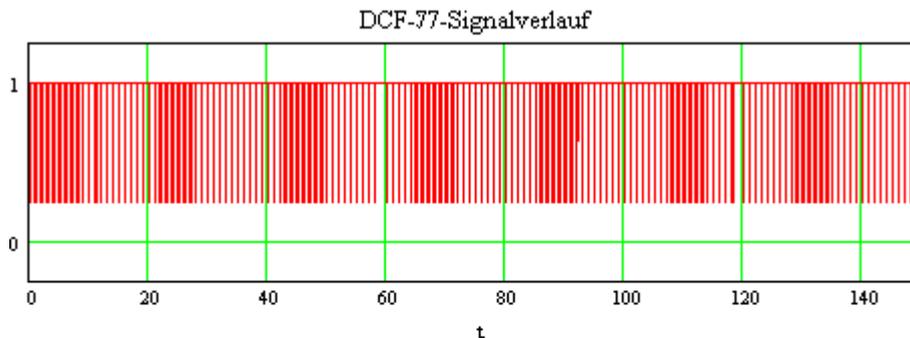
Die Software zur Steuerung des Paneels

Die Software ist in ihren wesentlichen Teilen in C geschrieben, zeitkritische Teile sind in Assembler-Code verfasst. Sie ist in sechs Teile gegliedert:

1. Erfassung des Datums und der Uhrzeit aus den Signalen des DCF77 Senders,
2. Berechnung der einzustellenden Winkel am Solarpaneel,
3. Steuerung der Servomotoren,
4. Auswertung der externen Sensoren,
5. Protokollierung der im Kollektor umgesetzten eingestrahlten Solarleistung und
6. Kalibrierung der Anlage bei der Inbetriebnahme



Die DCF77-Signale



| Bit | Information | Bit | Information | Bit | Information |
|-----|-------------------|-----|-----------------|-----|------------------|
| 0 | nach Bedarf | 20 | S | 40 | Kalendertag (10) |
| 1 | nach Bedarf | 21 | Minute (1) | 41 | Kalendertag (20) |
| 2 | nach Bedarf | 22 | Minute (2) | 42 | Wochentag (1) |
| 3 | nach Bedarf | 23 | Minute (4) | 43 | Wochentag (2) |
| 4 | nach Bedarf | 24 | Minute (8) | 44 | Wochentag (4) |
| 5 | nach Bedarf | 25 | Minute (10) | 45 | Monat (1) |
| 6 | nach Bedarf | 26 | Minute (20) | 46 | Monat (2) |
| 7 | nach Bedarf | 27 | Minute (40) | 47 | Monat (4) |
| 8 | nach Bedarf | 28 | Prüfbit 1 | 48 | Monat (8) |
| 9 | nach Bedarf | 29 | Stunde (1) | 49 | Monat (10) |
| 10 | nach Bedarf | 30 | Stunde (2) | 50 | Jahr (1) |
| 11 | nach Bedarf | 31 | Stunde (4) | 51 | Jahr (2) |
| 12 | nach Bedarf | 32 | Stunde (8) | 52 | Jahr (4) |
| 13 | nach Bedarf | 33 | Stunde (10) | 53 | Jahr (8) |
| 14 | nach Bedarf | 34 | Stunde (20) | 54 | Jahr (10) |
| 15 | Rufbit | 35 | Prüfbit 2 | 55 | Jahr (20) |
| 16 | Ankündigungsbit 1 | 36 | Kalendertag (1) | 56 | Jahr (40) |
| 17 | Zeitzonebit 1 | 37 | Kalendertag (2) | 57 | Jahr (80) |
| 18 | Zeitzonebit 2 | 38 | Kalendertag (4) | 58 | Prüfbit 3 |
| 19 | Ankündigungsbit 2 | 39 | Kalendertag (8) | 59 | |

Der zeitliche Verlauf der DCF77-Signale und ihre Bedeutung



Die Berechnung der einzustellenden Winkel

Aus dem Datum, der Uhrzeit und den Koordinaten des Aufstellungsortes wird die Position der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne berechnet und durch die ekliptikale Länge, Rektaszension und Deklination ausgedrückt /7/:

```
Ek1Len = fmod(4.8949584 + 17.2027924e-3 * dn, dpi);  
g = fmod(6.2400408 + 0.0172019703 * dn, dpi);  
Ek1Len = (Ek1Len + 3.36846e-3 * sin(g) + 349.06585e-6 * sin(2.0 * g));  
g = 0.40908772 - 6.9813e-9 * dn;  
Rekt = atan2(cos(g) * sin(Ek1Len), cos(Ek1Len));  
Dekl = asin(sin(g) * sin(Ek1Len));
```

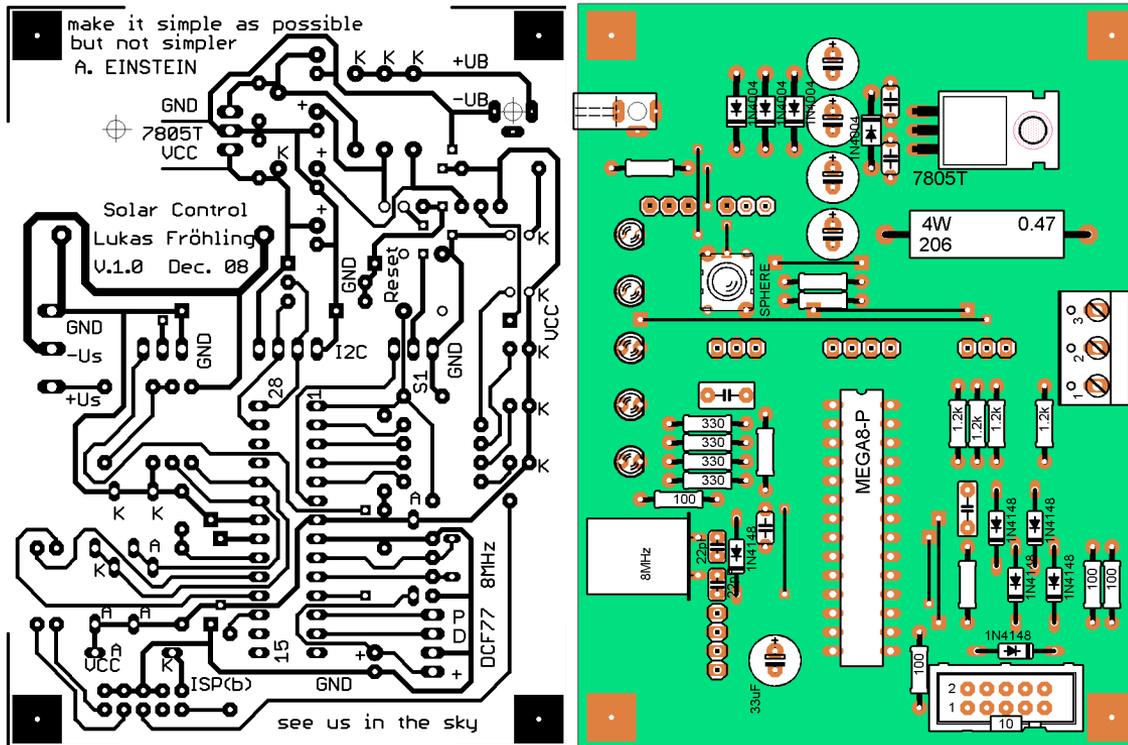
Daraus werden der Azimut- und Elevationswinkel berechnet:

```
Azimut = atan2(sin(g), t * t0 - tan(Dekl) * dn);  
Elevation = asin(cos(Dekl) * t * dn + sin(Dekl) * t0);
```

Diese Werte werden in die Signale zur Servobetätigung transformiert.



Die Hardware der Steuerung



Es wurden Platinen für Mikroprozessortypen ATmega8, ATmega16 und ATmega32 entwickelt und gebaut.

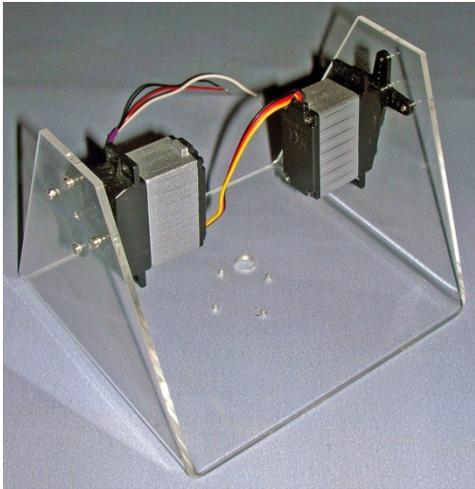
Der DCF77-Empfänger, die Servos, die Tastatur und das Serial-Incircuit-Programming (SIP) Interface ist mit Steckern, das Solarpaneel ist mit Schraubklemmen verbunden.

Fünf LEDs dienen zur Anzeige von internen Betriebszuständen.

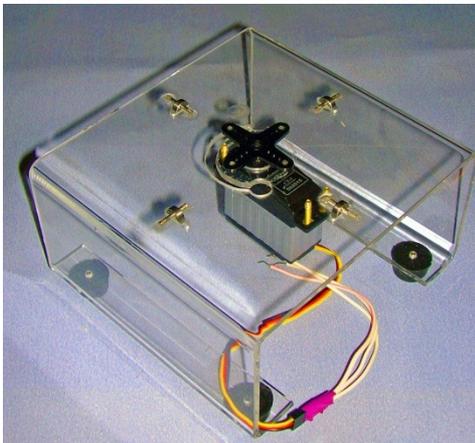
Leiterbahnführung und Bestückung der ATmega8-Platine
75mm x 100mm



Der mechanische Aufbau des Solarkollektormodells



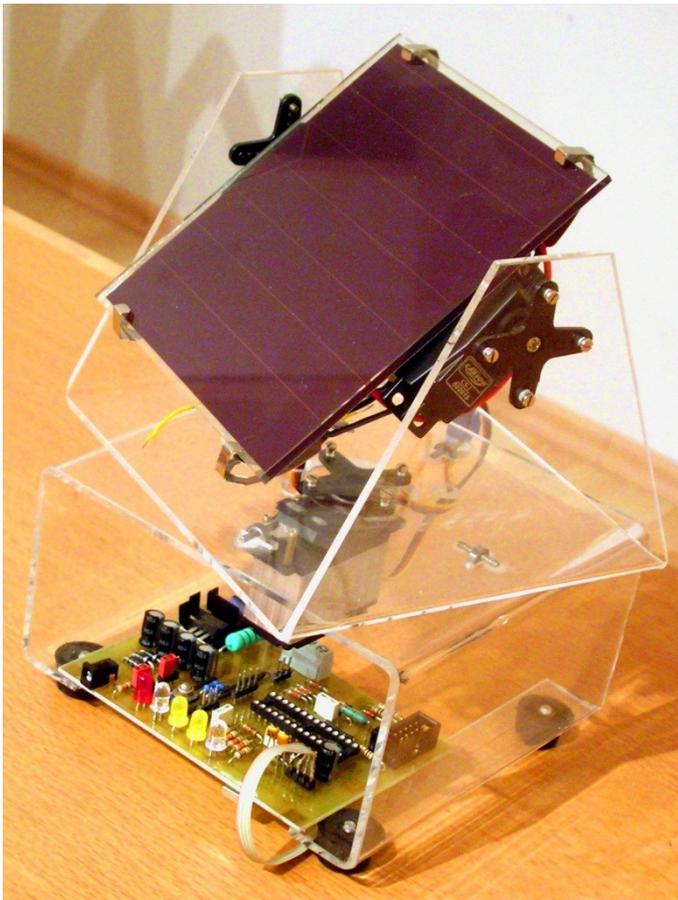
Der Ober- und Unterteil ist aus je einem Stück Acrylglas gebogen, um das Modellinnenleben sichtbar zu machen. Der drehbare Oberteil ist kugellagert, das Azimutservo ist von Druckkräften entlastet. Ein Elevationsservo wird angesteuert, das zweite Servo dient nur als Gegenlager. Dadurch wird die Mechanik wesentlich vereinfacht.



Die Standfläche beträgt 140mm x 130mm, die horizontale Achse ist 160mm über dem Boden.



Der mechanische Aufbau des Solarkollektormodells



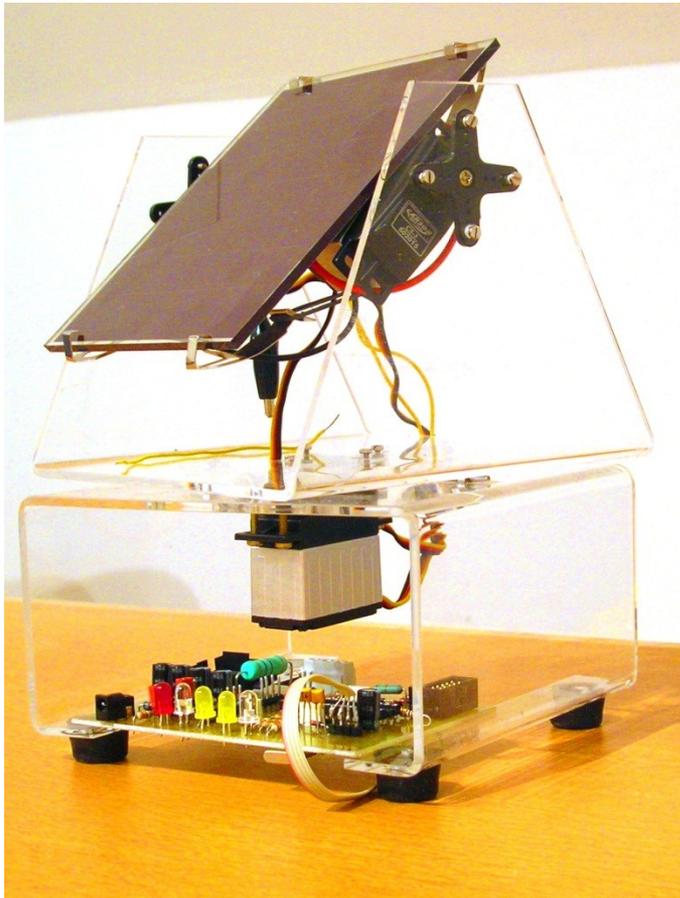
Die Solarzelle ist 114mm x 123mm, sie liefert typisch 80mA bei 8.4V.

Die Stromversorgung erfolgt über ein Stecker-Netzgerät für 9V_{DC} / 500mA.

Das ATmega8-Board kann ohne Änderungen in der Mechanik durch die ATmega16- oder ATmega32-Boards ersetzt werden.



Zusammenfassung



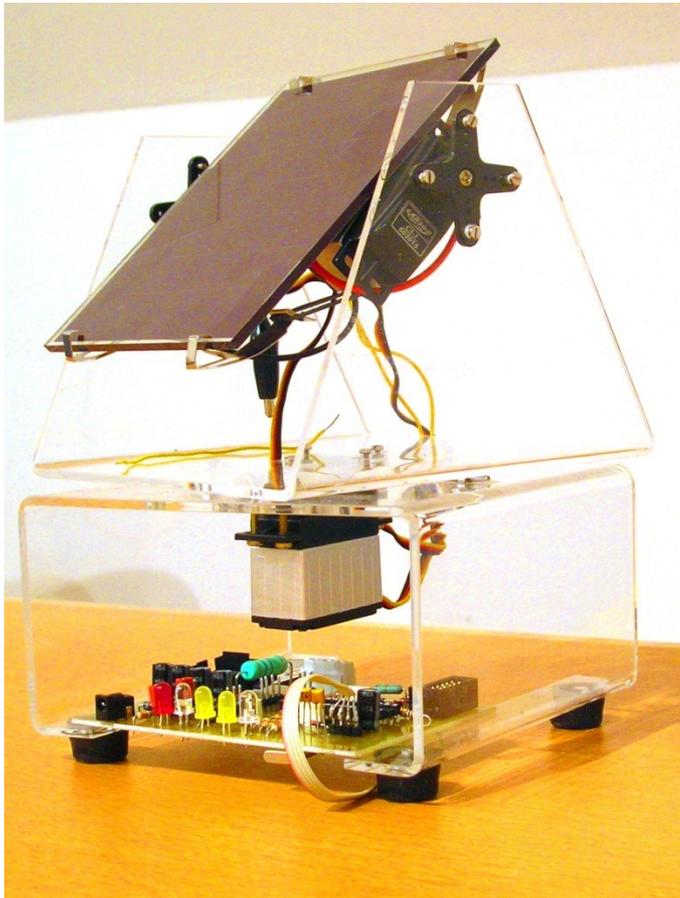
Die optimale Ausrichtung des Sonnenkollektors bringt in unseren Breiten im Winter eine Leistungssteigerung um den Faktor 1.3 und im Sommer einen Faktor von 1.7, also einen beachtlichen Gewinn gegenüber der gut ausgerichteten, unbeweglichen Anlage.

Bei der Bestimmung der Leistungsdichte durch die Dämpfung der Atmosphäre und nicht optimaler Ausrichtung wurde erkannt, dass die Nachführung in azimuthaler Richtung alleine einen bedeutend größeren Gewinn als die ausschließliche Nachführung in der Elevation bringt.

Das stellt einen wesentlichen Faktor bei der Kosten-Nutzen-Rechnung dar.



Zusammenfassung



Wird auf die Bewegungsfreiheit in der Elevation verzichtet, ist in der Risikoabschätzung zu beachten, dass das Senkrechtstellen bei Hagelschlag nicht möglich ist und dies eine wesentliche Gefährdung der Anlage darstellt.

Soll die Windangriffsfläche minimiert werden, genügt es, den Kollektor in horizontale Richtung zu drehen - die Windrichtung ist unerheblich.

Ist der Kollektor ohne Elevationsfreiheitsgrad gefertigt, muss auch die Windrichtung bekannt sein, um die richtige Drehung zu veranlassen.

Das ist ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt in der Kosten-Nutzen-Rechnung.



Literatur

- /1/ D. Pister, P. Hetzel, A. Bauch: „Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77“, PTB-Mitteilungen 114 (2004), Heft 4, pp. 345-368
- /2/ P. Fröhling: „Sonnenstand.mcd“, MathCad-Arbeitsblatt, private Mitteilung
- /3/ A. T. Renner, P. W. Fröhling, „Numerische Methoden in der Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, TU-Wien, Institut für Nachrichtentechnik
- /4/ Carl Friedrich Gauss: *Theoria Combinationis Observationum Erroribus Minimis Obnoxiae, Pars Prior, Pars Posterior, Supplementum*, Translated by G.W. Stewart, Classics in Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, SIAM, 1995
- /5/ P. Fröhling: „SolEff.mcd“, MathCad-Arbeitsblatt, private Mitteilung
- /6/ R.C. Weast: *CRC-Handbook of Chemistry and Physics*, 64th Edition, CRC Press, Inc., Boca Raiton, Florida, 1984, pp. F-162
- /7/ Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery: *Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1992