



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

ZfP-Sonderpreis der DGZfP beim Landeswettbewerb Jugend forscht

SACHSEN-ANHALT



Energiesparlampen - eine Lüge?

Sam Merk

Schule:

Paul-Gerhardt-Gymnasium
Schulstr. 6
06773 Gräfenhainichen

Jugend forscht

Wirkungsgraderhöhung von
Vakuumröhrenkollektoren durch Steuerung
eines Schutzsystems

Betreuung: M. Schnitzer

von
Tamer Totonji
Josua Kottke
Winckelmann-Gymnasium
Stendal
10. März 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Energiehaushalt	2
2.2	Solarthermie	4
2.3	Vakuumröhrenkollektoren	4
2.4	Schutzmechanismus	5
2.4.1	Schutz durch drehbare Halbrunde	5
2.4.2	Schutz durch Hebemechanismus	6
3	Systemanforderungen	7
4	Systemrealisierung	7
4.1	Mehrsensorensystem	7
4.1.1	Komponenten	8
4.1.2	Steuerung des Mehrensensorensystems	10
4.2	Analyse von Aufschlags- und Massenzunahmemustern	12
4.3	Zusätzliches	13
4.3.1	Spannungsversorgung	13
4.3.2	Heizsystem	13
4.3.3	Reduzierung der Schneebedeckung	13
5	Wirkungsgraderhöhung anhand von worst-case-Szenarien	13
6	Zusammenfassung	14
7	Diskussion	15
8	Danksagung	16
	Abbildungsverzeichnis	17
	Literatur	18

1 Einleitung

Energie ist die Grundlage einer modernen Gesellschaft. Momentan befindet sich die Welt jedoch in einer ökologischen Krise. Der Weltenergieverbrauch basiert derzeit fast zu 80% auf fossilen Energieträgern¹. Daher wächst die Bedeutung der Nutzung regenerativer Energiequellen immer mehr. Bis zum Jahr 2050 soll ihr Anteil an der Energiegewinnung in Deutschland auf etwa 50% steigen². So lag der Anteil der Warmwassergewinnung durch Solarkollektoren 2005 bei ca. 5%³.

Diesem Trend folgend hatten sich in der vergangenen Wettbewerbsrunde Schülerinnen des Winckelmann-Gymnasiums Stendal mit der Entwicklung einer Konstruktion zum Hagelschutz von Vakuumröhrenkollektoren beschäftigt. Immerhin beträgt der Investitionsaufwand zum Austausch von durch Hagel beschädigten Vakuumröhren einer durchschnittlichen Anlage mehrere Tausend Euro!

Ein dauerhaft wirksamer Schutz ist nur dann gewährleistet, wenn das mechanische System durch eine automatische Aktivierung ausgelöst wird. Dazu beschäftigen wir uns mit der Entwicklung eines niederschlagskategorisierenden Sensorsystems. Der höhere Wirkungsgrad der Vakuumröhren kommt insbesondere bei diffuser Strahlung eines bewölkten Tages zum Tragen, sodass selbst bei Regen ein Solareintrag erfolgen kann. Hagel hingegen kann zur Zerstörung der Glasröhren führen und Schneedecken verhindern jegliche Erträge, teilweise über Monate! Über die Kombination verschiedener Sensoren und die Analyse von Aufschlags- und Massezunahmemustern kann entschieden werden, ob der bereits von unseren Mitschülerinnen entwickelte mechanische Schutz aktiviert werden muss. So soll ein Beitrag zur Optimierung des Wirkungsgrades von Vakuumröhrenkollektoren geleistet werden. Letztendlich ist die Programmierung einer Steuerung (Mikrocontroller) geplant, die die Eingangssignale der Sensoren differenziert und situationsbedingt den Schutzmechanismus auslöst.

2 Theoretische Grundlagen

Es folgen Auszüge aus theoretischen Grundlagen, die nötig waren, um einen Lösungsansatz finden zu können.

2.1 Energiehaushalt

Der größte Anteil der Energie in den Haushalt wird für die Erwärmung von Wasser verwendet, sei es für die Erwärmung von Brauchwasser oder nur für die Heizung.

Demzufolge liegt das größte Sparpotential ebenfalls im Bereich Wassererwärmung. Dieser Energiebedarf verändert sich im Verlaufe des Jahres: Im Winter wird mehr Energie benötigt, da man beispielsweise mehr heizt, wohingegen im Sommer der Energiebedarf relativ gering ist (s. Abb. 2).

¹TZSCHEUTSCHLER, Dr.-Ing. Peter et al.: BWK 6-09 Nutzenergiebilanz. 2009 (URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=62>), vgl.

²Anteil erneuerbarer Energien... 2009 (URL: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2850>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

³KHAMMAS, Achmed: Buch der Synagie Teil C. 2011 (URL: http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_21_sonne_niedertemp_koll_ab_1996.htm) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

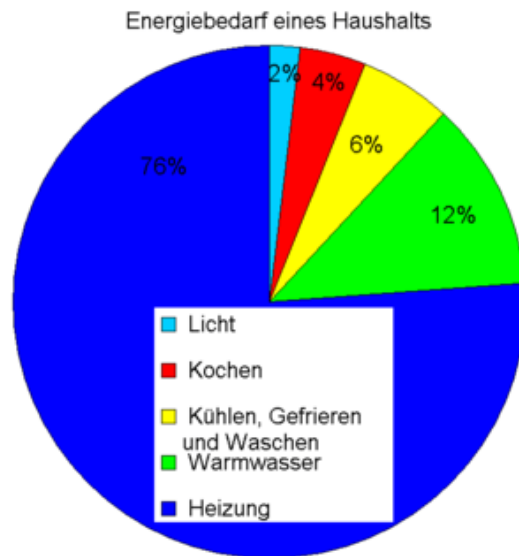


Abbildung 1: Grafische Darstellung der prozentualen Anteile verschiedener Komponenten im Haushalt bezüglich des Anteils am Gesamtstromverbrauch im Haushalt

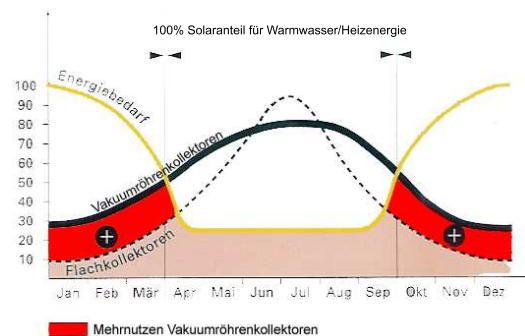


Abbildung 2: Grafische Darstellung der theoretischen jährlichen Energiebilanz von Flach- bzw. Vakuümrohrenkollektoren und der Deckungsrate des Energiebedarfs

Obwohl im Sommer weit mehr als 100% des Energiebedarfs abgedeckt werden könnte, kann es zur Überhitzung des Systems kommen und somit, trotz der großen Menge an zur Verfügung stehenden Energie, zu Ertragsverlusten. Dies tritt vorwiegend bei Vakuümrohrenkollektoren auf, da diese gegenüber Flachkollektoren einen um ca. 20% bis 30% höheren Wirkungsgrad haben.⁴ Im Winter hingegen ist der Energiebedarf wesentlich höher und kann nur teilweise durch eine solarthermische Anlage abgedeckt werden. Da Vakuümrohrenkollektoren auch bei diffuser Sonneneinstrahlung hochgradige Wirkungen erzielen, sind sie wiederum von Vorteil aufgrund des höheren Wirkungsgrades. Kommt es jedoch zu einer Verdeckung des Solarkollektors durch Schnee, so ist der Energieanteil, welcher durch den Kollektor abgedeckt wird, noch geringer.

⁴ECKHARDT, Jürgen: Umbau einer Finca auf Mallorca. 2000 (URL: <http://www.ca-wallau.com/solaranlage.htm>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

2.2 Solarthermie

Die Solarthermie bildet eines der zentralen Gebiete, die relevant für unser Projekt sind. Sie beschreibt die Umwandlung der Sonnenenergie in nutzbare Wärmeenergie⁵. Diese Wärme kann direkt zu Heizzwecken oder zur Brauchwassererwärmung eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu wandeln Photovoltaikanlagen die zugeführte Strahlungsenergie direkt in elektrische Energie um⁶. Dieser Vorgang erfolgt beispielsweise durch Sonnenkollektoren oder Sonnenwärmekraftwerke.

2.3 Vakuumröhrenkollektoren

Solar- oder Sonnenkollektoren sind - wie der Name andeutet - Vorrichtungen zur Sammlung der im Sonnenlicht enthaltenen Energie⁷. Hierbei wird typischerweise die Sonnenenergie dazu genutzt, ein Übertragungsmedium zu erhitzen. Solarthermische Kollektoren zur Anhebung der Temperatur können Systeme zur Konzentration der Strahlung beinhalten.

Vakuumröhrenkollektoren sind nach dem Thermoskannenprinzip aufgebaut. Zwischen zwei konzentrisch ineinander gebauten Glasröhren befindet sich ein Vakuum, das der thermischen Isolation dient. Dadurch kann der Wärmeverlust durch Konvektion bei Vakuumröhrenkollektoren gegenüber konventionellen Flachkollektoren wesentlich vermindert und vor allem bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Absorber die Leistungsfähigkeit um ca. 25% erhöht werden. Überdies arbeitet der Kollektor auch bei diffusem Licht bzw. keiner direkten Sonneneinstrahlung. Ein Vakuumröhrenkollektor besteht aus einer Anzahl miteinander verschalteter Röhren, die am Kopf durch einen Sammler verbunden sind. Darin laufen die gedämmten Vor- bzw. Rücklaufleitungen. Am Fuß werden die Röhren auf einer Schiene mit Röhrenhalterungen befestigt. Der Absorber ist hier entweder als flacher oder gewölbter Blechstreifen oder als eine auf dem innen liegenden Glaskolben aufgebraute Beschichtung eingebaut⁸.

Es wird zwischen zwei verschiedenen Bauarten unterschieden: Heatpipe- und direkt durchströmte Röhrenkollektoren. Zur letzteren Bauart folgen keine Erläuterungen, da diese unverbreitet ist.

Bei Heatpipe-Systemen bildet jede Röhre in sich einen geschlossenen Kreislauf. Innerhalb der Glasröhre befindet sich die Absorberfläche in Form eines beschichteten Kupferblechstreifens. Unter dem Absorberblech befindet sich nun ein mit einer schon bei geringen Temperaturen verdampfenden Flüssigkeit gefülltes Wärmerohr (engl. Heatpipe). Das einfallende Licht erwärmt diese Flüssigkeit, wodurch diese verdampft und nach oben steigt. Sie gelangt am oberen Ende des Wärmerohrs in einen Wärmetauscher (Kondensator), wo der Dampf kondensiert und die durch die Phasenänderung von gasförmig zu flüssig freigesetzte Energie an die Wärmeträgerflüssigkeit übertragen wird. Das Kondensat fließt anschließend zur erneuten Wärmeaufnahme zurück in den unteren Teil des Wärmerohrs (s. Abb. 3).

⁵Solarthermie. 2011 (URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

⁶Solarthermie. 2010 (URL: <http://www.toptarif.de/strom/strom-lexikon/solarthermie>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

⁷Sonnenkollektor. 2011 (URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenkollektor>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

⁸Solar-konzepte/Solarthermieprojekte. (URL: http://www.lbb-sonne.de/htm/solarthermie_solarkollektor.html) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.



Abbildung 3: Funktionsschema eines indirekt durchströmten Röhrenkollektors

Voraussetzung für diesen Vorgang ist eine Mindestneigung der Röhren von 25° ⁹. Der daraus resultierende Nachteil ist, dass diese Variante bei geringeren Dachneigungen oder gar waagerechten Dächern aufgrund des Wirkungsprinzips nicht verwendet werden kann.

2.4 Schutzmechanismus

2.4.1 Schutz durch drehbare Halbrunde

Diese Mechanik wurde bereits von L. Neidhardt und N. Müller entwickelt. Die Röhren sollen hierbei durch die Verwendung sogenannter Halbrunde aus Kunststoff geschützt werden, die eigentlich Hohlzylinderstümpfe sind. Diese sind unter den Röhren montiert und dienen als Reflektoren, um den Wirkungsgrad zu steigern und zudem eine Erwärmung des Wärmeträgermediums auch bei geringer Sonneneinstrahlung bzw. diffusem Licht zu gewährleisten, da die Lichtstrahlen sich durch die Reflexion in einem Brennpunkt, in dem sich die Röhre befindet, sammeln. Bei Hagel-, Überhitzungs- bzw. Schneegefahr treiben Elektromotoren einen Zahnriemen oder Zahnstangen an, die diese Röhrenhauben um 180° über die Vakuummantelröhren drehen. Dazu müssen die Halbrunde an mindestens einem Ende einen Zahnkranz tragen, so dass mit einer Steuerkette alle Röhren eines Moduls geschützt werden können. Mit Hilfe einer Führung erfolgt die Lagerung der Halbrunde (s. Abbildungen 4 und 5).

Hagelresistenz wird dadurch geleistet, dass Hagelkörner auf die Halbrunde aufprallen und die empfindlichen Röhren somit nicht treffen können. Bei Überhitzungsgefahr kommt es durch das Drehen der Halbrunde um 180° zu Schattenwürfen, bevor die Solarpumpen abgeschaltet werden. Auch Verdeckung der Röhren durch Schnee kann verhindert werden, indem beispielsweise durch mehrmaliges Hin- und Herdrehen der Schnee entfernt wird. Zudem sind die Reflektorrinnen außen schwarz gefärbt, damit durch die höhere Absorption der Sonnenstrahlen bereits getauter Teile der Schnee schneller abschmilzt.

So kann man diese Halbrunde während einer hohen Sonneneinstrahlung zur Erhöhung der Effizienz eines solchen Moduls nehmen und sie als Schutz für die Röhren verwenden.

⁹Solarthermie - Lust auf Sonne? (URL: <http://www.elektrotechnik-brauer.de/solarthermie.html>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

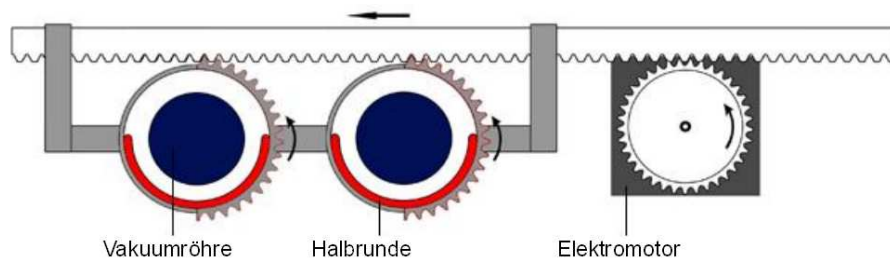


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Halbrunde mit Vakuumröhren bei Reflexionsfunktion

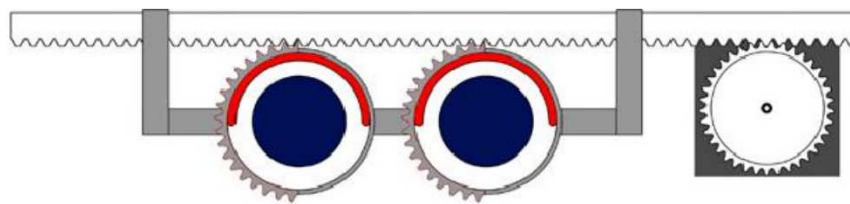


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Halbrunde mit den Vakuumröhren bei Schutzfunktion

2.4.2 Schutz durch Hebemechanismus

Eine alternative Schutzmöglichkeit wäre die Verwendung eines Mechanismus, der das gesamte Modul in eine zum Dach senkrechte Lage hebt. Ein Motor wird neben bzw. unter dem Modul befestigt. Er setzt die Gewindestange, die sich um die Längsachse drehen kann nach Aktivierung durch die Steuerung in Bewegung. Auf dieser Gewindestange ist eine Mutter, die sich durch die Bewegung der Gewindestange auf dieser auf und ab bewegt. An der Mutter ist ein Arm befestigt, in dessen Mitte ein Gelenk sitzt. Das andere Ende des Gelenkes sitzt fest am Modul. Bewegt sich die Mutter auf der Gewindestange nach „oben“, wird das Gelenk gestreckt und das Modul richtet sich auf.

Das Heben würde die Angriffsfläche und damit die angreifende Kraft des Hagels verringern. Dies würde die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung wesentlich senken. Durch das Ankippen des Moduls kann ebenfalls Schneeschutz gewährleistet werden, da dieser im Falle eines Ankippens hinunter rutschen würde. Auch könnten thermische Probleme durch diese Lösungsmöglichkeit vermieden werden, da durch das Ankippen der Einfallswinkel der Sonne verringert wird. Zudem kommt bei Heatpipe-Kollektoren hinzu, dass diese aufgrund ihrer Funktionsweise einen gewissen Neigungswinkel benötigen. Durch das Anklappen sammelt sich die Flüssigkeit im unteren Teil der Röhre und der heiße Dampf kann somit das Wasser im Sammler nicht mehr erwärmen.

Für diese Variante ist es aber nötig, dass die Schläuche in der Drehachse des Moduls flexibel sind und dadurch die Drehung unbeschadet überstehen. Weiterhin muss eine relativ hohe Kraft aufgewendet werden, um das Modul zu heben. Der Hebevorgang muss bei allen Röhren zeitgleich stattfinden, da sich sonst Verschraubungen der Flexröhre lösen könnten.¹⁰

¹⁰NEIDHARDT, Lisa/MÜLLER, Nora: Entwicklung einer Konstruktion zur Vermeidung von Hagelschäden... 1. Auflage. Stendal, 2010, vgl.

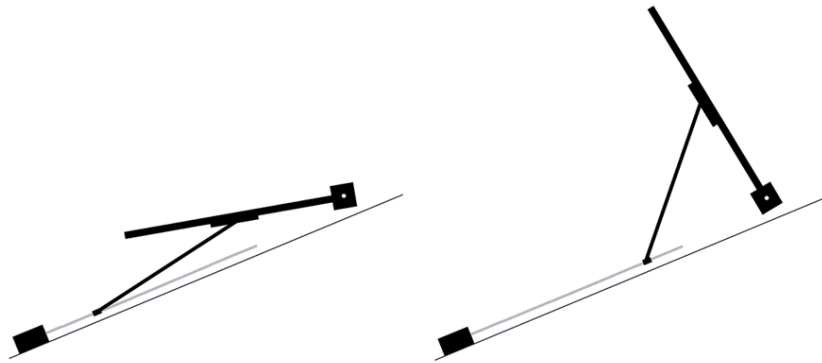


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Hebeschutzmechanismus

3 Systemanforderungen

Die von uns zu planende Steuerung der beschriebenen Mechanik muss eine automatische Regulierung ermöglichen. Damit der Sensor auch den Anforderungen des aktuellen Marktes gerecht wird, haben wir folgende Eigenschaften erörtert:

- automatische Aktivierung des Schutzmechanismus
- Gewährleistung einer leichten Installation
- Möglichkeit einer Nachrüstung
- schnelles Erkennen des Niederschlagsart und Auslösen des Schutzes
- geringer Investitionsbedarf

4 Systemrealisierung

Die Funktionsweise traditioneller Sensoren, insbesondere des Distrometers, und ihr abweichender Einsatzzweck bedingen einen sehr hohen Kostenaufwand. Dies widerspricht unseren Anforderungen an das System.

Um die Vakuurröhrenkollektoren optimal zu schützen und den Investitionsbedarf möglichst gering zu halten, reduzieren wir diese überflüssige Funktionsvielfalt auf die nötigsten Parameter. Dazu haben wir eine lichtdurchlässige Prallfläche (z.B. Plexiglas 10cm x 10cm) entwickelt, die zusammen mit weiteren Komponenten horizontal im Dachbereich fixiert wird.

Wir wollen zwei Varianten einer Umsetzung untersuchen. Bei der ersten Version ist der technische Aufwand größer, der Programmierbedarf jedoch relativ gering. Für die zweite Umsetzung benötigt man zwar weniger Sensoren, die zu implementierenden Algorithmen sind jedoch deutlich komplexer!

4.1 Mehrsensorensystem

Bei dieser Variante differenziert das System zwischen „gefährlichen“ und „ungefährlichen“ Situationen. Dazu messen verschiedene Sensoren Parameter, die zusammen die einzelnen Situationen charakterisieren. Das System besteht aus mehreren Komponenten:

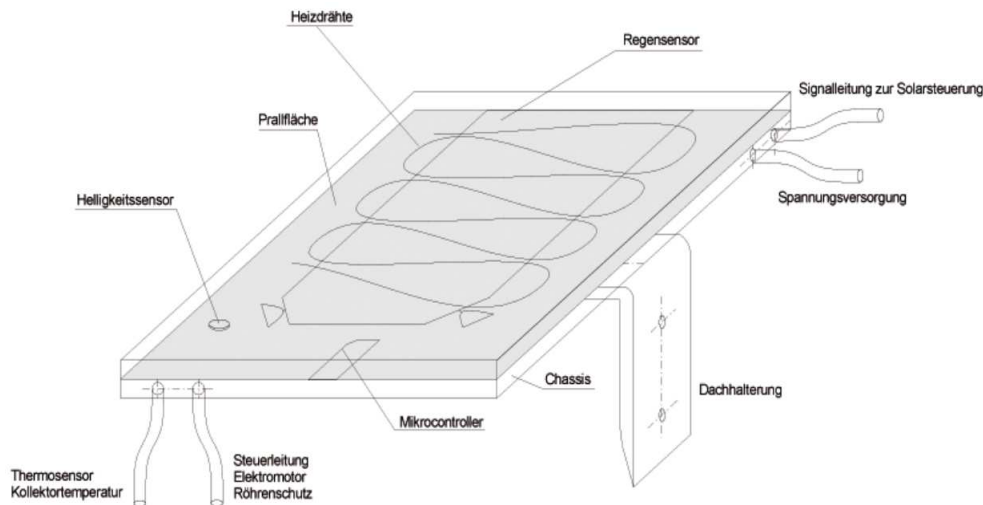


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Sensorsystems

- einer Messfläche,
- einem Mikrocontroller,
- einem Dehnungsmessstreifen,
- einem Regensensor,
- einem Temperatursensor,
- einem Helligkeitssensor,
- einem Windgeschwindigkeitsmessgerät,
- einer Signalleitung zur Solarsteuerung und
- einer Systemuhr.

4.1.1 Komponenten

4.1.1.1 Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (DMS) basieren auf der Änderung des Widerstands durch Längen- und Querschnittsänderung. Wird ein DMS gedehnt, so nimmt sein Widerstand zu. Wird er gestaucht (negative Dehnung), so nimmt sein Widerstand ab¹¹. Die Längen- bzw. Querschnittsänderung wird durch mechanische Belastung auf Grund des Aufschlags der Niederschlagstropfen auf eine geeignet positionierte Messfläche hervorgerufen. Bei unserem System werden so elektrische Signale (Spannungsschwankungen) des DMS an die Steuerung weitergeleitet und dort ausgewertet.

Der Dehnungsmessstreifen muss also zwischen Prallfläche und statisch mit dem Dach verbundenem Chassis platziert und durch eine Rückstellkraft in die obere Position zurückbewegt werde. Der Aufbau ähnelt dem einer elektronischen Küchenwaage. Der durch den auftreffenden Niederschlag auf die Prallfläche übertragene Impuls beschleunigt die Messplatte kurz in Richtung Chassis, wodurch die Spannung über dem DMS schwankt.

¹¹Dehnungsmessstreifen. 2011 (URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen>) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

4.1.1.2 Regensensor

Der Regensensor misst mittels eines optoelektronischen Verfahrens die Quantität von Flüssigkeiten auf einer Messfläche (bei unserem System ist diese Regenwasser). Dabei wird die physikalische Gesetzmäßigkeit der Reflexion an der Grenze vom optisch dichten zum optisch dünneren Medium genutzt (vgl. Abbildung 7).

Der Winkel des in der Glasscheibe schräg laufenden Lichtstrahls wird so gewählt, dass bei trockener äußerer Scheibenoberfläche die gesamte Lichtmenge totalreflektiert wird und zur Fotodiode läuft, da der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist. Beim Übergang des Lichtes von Glas ($n = 1,5$) zu Luft ($n = 1$) ergibt sich $\alpha_{Grenz} = 41$. Liegen nun Wassertropfen ($n = 1,33$) auf der Außenfläche der Glasfläche, verändert sich das Reflexionsverhalten, da für die Totalreflexion ein Winkel von größer als $\alpha = 61$ nötig ist. Nicht mehr die gesamte Lichtmenge wird reflektiert, sondern ein Teil wird gebrochen und die Lichtintensität an der Photodiode nimmt ab. An der Innenseite der Glasscheibe wird ein Prisma in geeignetem Winkel angebracht, damit die Brechung an der Innenseite (also beim Übergang von Luft zu Glas und später umgekehrt) verhindert wird¹².

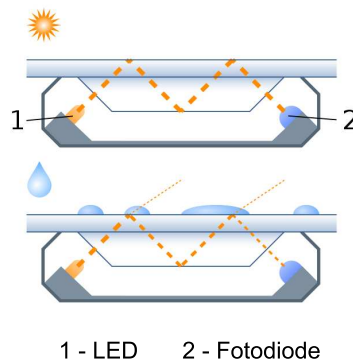


Abbildung 8: Schema eines Regensensors ohne und mit Flüssigkeitsmengen

4.1.1.3 Temperatursensor

Ein Temperatursensor ist ein Bauelement, bei dem sich in Abhängigkeit von der Temperatur die elektrische Leitfähigkeit ändert. In unserem System muss ein Thermosensor die Temperatur der Kollektorflüssigkeit messen, da wir vor Überhitzung der Anlage, durch die bei etwa 130°C zum Schutz der Pumpen eine Abschaltung erfolgen würde, eine Verschattung hervorrufen müssen.

4.1.1.4 Helligkeitssensor

Über ein lichtempfindliches Bauelement - etwa einen Fotowiderstand - kann die Umgebungshelligkeit über der gläsernen Messfläche erfasst werden. Dabei ändert sich die über dem Sensor abfallende Spannung bei Veränderung der Lichtstärke.

¹²Regensensor. 2011 [URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor](http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor) – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

4.1.1.5 Windgeschwindigkeitsmessgerät

Unabhängig von allen anderen Signalen können sehr starke oder böige Winde gelockerte Dachziegel, Äste oder anderen Material mitführen. Um die sehr empfindlichen Vakuumröhren davor zu schützen, sollte bei Registrierung derartiger Luftströmungen der Schutzmechanismus aktiviert werden, selbst wenn ein Solareintrag möglich wäre.

Dazu könnten die von einem üblichen Windgeschwindigkeitsmessgerät (ein Miniaturwindrad dreht einen Generator und erzeugt dadurch eine von der Drehzahl abhängige Spannung) gelieferten Werte genutzt werden.

In einer technisch sehr einfachen Alternative könnte quer zu der am Standort typischen Windrichtung eine zweite Messfläche vertikal „in den Wind“ gebaut werden, deren Windlast einen weiteren Dehnungsmessstreifen verformt.

4.1.1.6 Signalleitung zur Solarsteuerung

Das Arbeitsmedium erwärmt Nutzwasser im Solarspeicher. Wenn sich dieses auf ca. 90°C erwärmt hat, müssen die Pumpen abgeschaltet werden, da sonst der zulässige Systemdruck überschritten wird und unter Umständen Rohrsysteme platzen könnten! Um eine weitere Erwärmung des in den Sammlern stehenden Arbeitsmediums zu unterdrücken, sollte vorher eine Verschattung der Vakuumröhren veranlasst werden.

Das Erreichen der maximalen Speichertemperatur wird von der Solarsteuerung registriert (und führt zum Abschalten der Pumpe). Über eine Signalleitung kann unsere Sensorik über die Momentanspeichertemperatur informiert werden und bevor die Maximaltemperatur erreicht ist, den Schutzmechanismus und somit die Verschattung auslösen.

4.1.1.7 Systemuhr

Eine im Mikrocontroller (im „Hintergrund“) laufende Systemuhr kann die Differenzierung erleichtern, ob mangelnde Lichtstärken am Helligkeitssensor auf Schneemengen auf der Prallfläche oder Nachtzeit zurückzuführen ist.

Darüber hinaus könnte es sinnvoll sein, die Röhren nachts generell zu schützen, da solare Energieeinträge unmöglich sind. Gefahren durch Silvesterfeuerwerk, geworfene Steine oder vom Sturm mitgeführte „Geschosse“ könnten so ausgeschlossen werden.

Zusätzlich würden Teile des (hier nicht thematisierten) mechanischen Systems durch die regelmäßige Nutzung vor sich anreichernden Verunreinigungen geschützt werden.

4.1.2 Steuerung des Mehrensensorensystems

Die einzelnen Sensoren des Systems senden nun Signale an die Steuerung. Das sind zum einen die Spannung des Dehnungsmessstreifens im Ergebnis des mechanischen Aufpralls eventuellen Niederschlags bzw. seiner Häufung auf der Prallfläche (Schnee), das Signal der Fotodiode im Ergebnis der Flüssigkeitsmenge über der Messfläche, der Widerstand des Thermosensors, die Spannung über dem Helligkeitssensor, die Spannung des Windgeschwindigkeitsmessgerätes (durch Miniaturwindrad oder DMS), das Signal der Solarsteuerung und eventuell die Uhrzeit aus einer integrierten Systemuhr. Das Eintreten besonderer Messwerte bzw. Messwertverläufe sind die grundlegenden Ereignisse, die durch das Zusammenwirken der Sensoren bestimmte

Situationen charakterisieren. Liegt die Niederschlagssituation Hagel, eine bestimmte Masse Schnee oder eine bestimmte Grenztemperatur (im Kollektor oder Solarspeicher), eine erhebliche Windstärke oder Nachtzeit vor, wird der Motor aktiviert und damit der Schutzmechanismus ausgelöst.

Wir nennen die Ereignisse mechanischer Aufschlag A, Nachweis einer Flüssigkeitsmenge B, Erreichen des Temperaturgrenzwertes C, Unterschreiten eines Helligkeitsgrenzwertes D, die Registrierung erheblicher Windstärken oder von Windböen E, das Einsetzen der lichtlosen Nachtzeit F und die Feststellung der Solarspeicherhöchsttemperatur G.

Bei den weiteren Betrachtungen gehen wir von der Annahme aus, dass Niederschlag, der die Röhren beschädigen bzw. zerstören könnte, in vollständig fester Form auftritt und damit von unserer Messfläche abprallt. Da ausgenommen von Schnee, der liegen bleibt, Hagel die einzige feste Niederschlagsform ist, müsste jede andere einen Flüssigkeitsfilm auf dem Sensor hinterlassen.

Regnet es, würde also Ereignis $A \cap B$ registriert werden, da die Tropfen auf den Dehnungsmessstreifen prallen und gleichzeitig auf dem Regensensor einen Flüssigkeitsfilm hinterlassen. Zwar gibt es viele Formen von Regen, die sich in ihrer Intensität bezüglich Nässe und Aufschlag unterscheiden, aber trotzdem Information $A \cap B$ hervorrufen werden. In dieser Situation muss der Schutzmechanismus nicht ausgelöst werden. Sie muss aber trotzdem festgelegt sein, weil sie als „ungefährlich“ gilt.

Hagel dagegen hinterlässt den Flüssigkeitsfilm nicht und damit wird nur A registriert. Es gibt auch unterschiedliche Hagelstärken, aber da nicht sicher ist, dass sich während eines Wetterereignisses diese nicht ändert und die Steuerung nur unterscheiden kann, ob es einen mechanischen Aufschlag gibt oder nicht, muss um einen optimalen Schutz für die Vakuumröhrenkollektoren zu gewährleisten, der Schutzmechanismus immer bei Ereignis A ausgelöst werden.

Da Schnee das Licht hauptsächlich reflektiert, wird auf dem Regensensor kein Flüssigkeitsfilm angezeigt. Allerdings würde der Dehnungsmessstreifen ein signifikantes Signal senden, denn sein Aufschlag würde von einer stetigen Massenzunahme gekennzeichnet sein. Außerdem würde der die Messfläche verdeckende Schnee die beim Helligkeitssensor ankommende Lichtstärke verringern. Also muss eine Massenzunahme auf der Prallfläche und das Unterschreiten des Helligkeitsgrenzwertes bei Tageszeit registriert werden (das Signal wäre $A \cap D \cap \bar{F}$), um den Schutzmechanismus auszulösen, bei der die Schneedecke auf spezielle Weise, welche in 4.3.3 beschrieben ist, entfernt wird.

Die anderen Ereignisse sind von A unabhängig. Sie besitzen eine sehr hohe Priorität und lösen den Schutzmechanismus in jeder Ereigniskombination aus. Wenn der Temperaturgrenzwert des Übertragungsmediums im Kollektor (Ereignis C) oder die Solarspeicherhöchsttemperatur (Ereignis G) erreicht ist, erfolgt der Schutz durch die Halbrunden und damit die Verschattung. Die Vakuumröhrenkollektoren werden ebenfalls bei der Registrierung hoher Windstärken (Ereignis E) und bei Beginn der Nachtzeit (Ereignis F) geschützt.

Im Allgemeinen werden die Halbrunden über den Röhren wieder in ihre Ausgangsposition unterhalb gedreht, wenn ein oben genanntes Ereignis über eine definierte Zeit nicht mehr registriert wird und keine andere „gefährliche“ Situation begonnen hat. Bei den Temperaturgrenzwerten (C und G) wird die Ausgangsposition eingenommen, wenn eine Temperatur mit einer gewissen Differenz zum Grenzwert erreicht ist.

4.2 Analyse von Aufschlags- und Massenzunahmemustern

Alternativ kann der zeitliche Verlauf der Kraftwirkungen auf die Prallfläche analysiert werden. Der DMS misst die Kraft des Aufschlags der Niederschlagstropfen. Wir gehen davon aus, dass jede Niederschlagsart ein charakteristisches Muster durch die Aufschlagsanzahl und -intensität erzeugt und somit eine Differenzierung möglich ist.

Trifft Hagel auf den Sensor, wird eine relativ hohe Aufschlagkraft gemessen. Das Hagelkorn prallt nach dem Aufschlag sofort wieder ab. Eine hohe Anzahl an Aufschlägen je Zeiteinheit ist charakteristisch für Hagel. Bei seiner Registrierung ist die Auslösung des Schutzmechanismus dringend erforderlich.

Bei Regen wird auf dem DMS ein Aufschlag mit geringerem Impuls als bei Hagel registriert. Danach bleiben typischerweise Teile der Tropfmengen liegen. Da Regen nicht schadet, wird kein Schutzmechanismus eingeleitet.

Schneit es, treffen die Schneekristalle mit sehr geringem Impuls auf den Sensor. Hält der Schneefall an, steigt die Gewichtskraft an, da die Schneedecke den Sensor bedeckt. Wird dann über Heizspulen der Prallfläche thermische Energie zugeführt, schmelzen Teile des Schnees ab, wodurch die Gewichtskraft unter Umständen wieder sinken könnte.

Bei dieser Variante der Systemrealisierung sind der Regen- und Helligkeitssensor nicht mehr nötig, da die Differenzierung von Regen, Hagel und Schnee über die Analyse der Aufschlags- und Massenzunahmemuster erfolgt. Die anderen Komponenten sind wie in 4.1.1 beschrieben enthalten.

Das folgende Diagramm (Abb. 8) zeigt, die von uns erwarteten Aufschlags- und Massezunahmemuster von Regen, Hagel und Schnee.

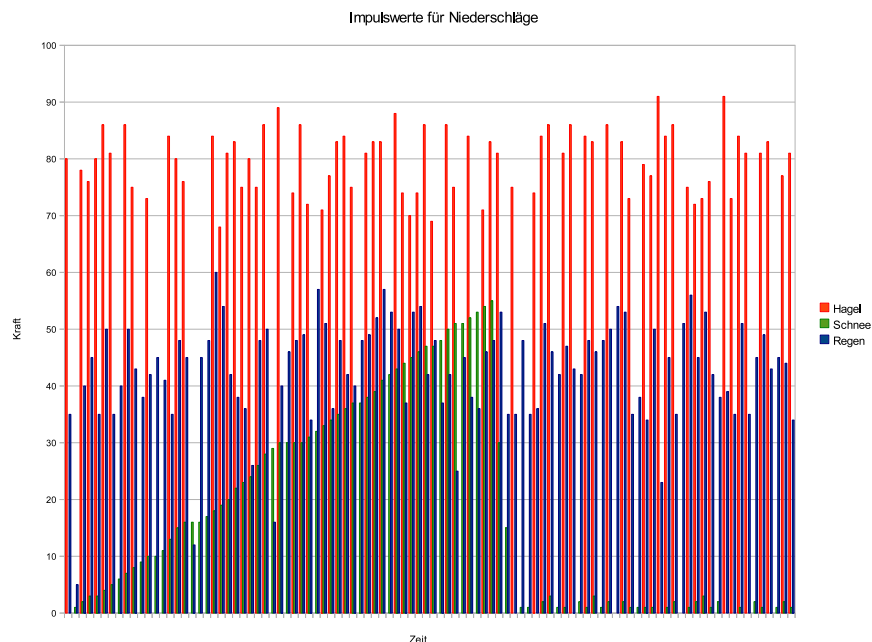


Abbildung 9: Zeit-Kraft-Diagramm für die Niederschlagsarten Regen, Hagel, Schnee; durchschnittliche Kraftwerte in % relativ zu einem maximalem Wert bei starkem Hagel

4.3 Zusätzliches

4.3.1 Spannungsversorgung

Angesichts der begrenzten Zugänglichkeit des auf dem Dach positionierten Systems und der nicht unerheblichen Leistungsaufnahme bei Einsatz der Heizdrähte (siehe 4.3.2) ist eine Spannungsversorgung über Akkus oder Batterien nicht realisierbar. Daher muss ein Netzteil zum Einsatz kommen.

4.3.2 Heizsystem

Heizdrähte sind nötig, um die falsche Interpretation mehrdeutiger Signale zu verhindern. Wetterereignisse können kurz nacheinander auftreten. Wenn es also geregnet hat und Hagel folgt, könnte sich immer noch ein Flüssigkeitsfilm auf dem Sensor befinden. Damit würde der Hagel fälschlicherweise als Regen erkannt und die Röhren würden nicht geschützt werden. Die Heizspulen unterstützen das Verdunsten des Wassers auf der Sensorfläche. So wird die Wahrscheinlichkeit dieser Verwechslung verringert.

Das Heizsystem wird ebenfalls benötigt, um die Messfläche von Schnee zu befreien, wenn der Schutzmechanismus die Schneebedeckung von den Röhren entfernt. Da es sonst zur Fehlinterpretation, dass Schnee auf dem Kollektor liegt, kommen würde.

Da der Energieaufwand für die Heizdrähte sehr groß ist, können sie nicht konstant Wärme abstrahlen, sondern werden nur in bestimmten Situationen eingeschaltet. Diese sind B (Flüssigkeit) und $A \cap D \cap \bar{F}$ (Schnee), d.h. bei Schnee wird gleichzeitig mit dem Auslösen des Schutzmechanismus der Schnee auf der Messfläche geschmolzen. Das Heizsystem läuft solange bis Ereignis B endet, also sich kein Flüssigkeitsfilm mehr auf der Messfläche befindet oder bis der Helligkeitsgrenzwert wieder erreicht ist (Ereignis \bar{D}) und damit nicht mehr die Situation Schnee registriert wird.

4.3.3 Reduzierung der Schneebedeckung

Unter ungünstigen Verhältnissen, wie sie auch in den letzten zwei Wintern in Deutschland vorlagen, können sich zentimeterdicke Schneedecken über Wochen oder gar Monate auf den Vakuumröhren halten. Das Eintragen thermischer Energie ist dann selbst bei strahlender Sonne unmöglich!

Wird Schnee registriert, steuert unsere Sensorik die Elektromotoren an, um die Röhren zu schützen. Um die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass sich auf den Halbrunden dicke Schneedecken aufbauen, die eine spätere Freigabe der Röhren verhindern würden, werden die Halbrunde bei andauernder Schneeregistrierung regelmäßig zyklisch hin- und hergedreht, um die Schneedecke „abzuschütteln“.

5 Wirkungsgraderhöhung anhand von worst-case-Szenarien

Um die Wirkungsgradsteigerungen durch den Schutzmechanismus darzustellen, haben wir Beispielrechnungen zu „worst-case-Szenarien“ durchgeführt. Dafür haben wir den Maximalertrag zu den bestimmten Zeiten als 100% des Wirkungsgrad angenommen.

Hagel könnte die Vakuumröhren komplett zerstören und somit jeglichen Energieertrag unmöglich machen. In diesem Fall hätten wir durch den Schutz eine Wirkungsgradsteigerung von 100%. Andererseits kommt es auch nur zu teilweisen Zerstörung, das bedeutet nur zu einer Zerstörung der äußeren Glasröhre. Demzufolge würde das Vakuum entweichen und die thermische Isolation nicht mehr stattfinden. Diese Isolation ist Grund für den 20% bis 30% höheren Wirkungsgrad der Vakuumröhrenkollektoren gegenüber konventionellen Flachkollektoren¹³. Also würde der Schutz in diesem Fall die Wirkungsgradverringerung verhindern.

Eine permanente Schneebedeckung (im Extremfall kann diese von November bis Februar ($\frac{1}{3}$ des Jahres) andauern) könnte den thermischen Ertrag verhindern. Somit würde unser Schutzsystem den Wirkungsgrad um 20% erhöhen, wenn man die Einträge im Winter im ganzen Jahr beachtet, denn im Winter werden nur ca. $\frac{1}{5}$ des Jahreseintrages gewonnen (s. Abb. 2)

In den heißen Sommermonaten (Juni bis August) kann es wegen der Überhitzung zur Abschaltung der Pumpen kommen, also die Wärmeenergie ist in dieser Zeit nicht nutzbar. In diesen Monaten scheint hier in Sachsen-Anhalt die Sonne zwischen 14-16 Stunden am Tag¹⁴. Etwa 50% des Tages werden aber die Wärmepumpen abgeschaltet. Dies bedeutet, dass von den ca. 35% des Energieeintrages des Jahres (s. Abb. 2), die in diesen Monaten gewonnen werden, nur etwa die Hälfte verwendbar ist. Unser System schützt aber vor Abschaltung der Pumpen durch Schattung und deshalb können die etwa 17,5% Verlust im Jahr wieder gewonnen werden können.

6 Zusammenfassung

Der prozentuale Anteil der Solarkollektoren in der alternativen Energiegewinnung wird in den nächsten Jahren sicherlich drastisch ansteigen. Hauptaugenmerk der Forschungsarbeit scheint bisher bei der Optimierung des Wirkungsgrades unter ertragsgünstigen Witterungsbedingungen gelegen zu haben. Immerhin kann die Kollektortemperatur an einem sonnigen Frosttag schnell bei 50°C liegen!

Vakuumröhrenkollektoren, die gegenüber Flachkollektoren einen wesentlich höheren Wirkungsgrad haben, weisen jedoch noch Defizite auf (Schäden durch Hagel, Ertragseinbußen bei Schneebedeckung und Überhitzung). Um diese Probleme und den Einsatz von Vakuumröhren zu erhöhen, wurde von Schülerinnen des Winkelmann-Gymnasiums Stendal in der vergangenen Wettbewerbsrunde eine mechanische Konstruktion zum Schutz entwickelt. Diese besteht aus Hohlzylinderstümpfen aus Kunststoff, die sich vor die Röhren drehen. Damit wird eine mechanische Zerstörung, eine kritische Erwärmung, sowie die Bedeckung durch Schnee verhindert.

Diese Konstruktion bedarf einer automatischen Aktivierung durch ein niederschlagskategorisierendes Sensorsystem, mit dessen Entwicklung sich unser Projekt beschäftigt. Somit ist ein stetiger Röhrenschutz gewährleistet und eine Steigerung des Wirkungsgrades möglich. Die moderne Technik bietet heutzutage Geräte (z.B. ein Distrometer), die hierbei zum Einsatz

¹³ECKHARDT: Umbau einer Finca auf Mallorca, vgl.

¹⁴GERDING, Guido: Sonnenstunden. 2011 (URL: <http://www.sonnenaufgang-sonnenuntergang.de/?month=8&year=2010&latitude=52&longitude=7&timezone=0&zenith=90.833333333333&location=&view=month&resulting=0>) – Zugriff am 2011-03-09, vgl.

kommen können, jedoch einer hohen Investition bedürfen. Um die Kosten möglichst gering zu halten, entschieden wir uns für die Reduzierung auf die nötigsten Parameter. Das System besteht aus einzelnen Komponenten, in ein Chassis eingebaut und mit einer lichtdurchlässigen Prallfläche überdacht, die Signale an einen Mikrocontroller senden. So kann eine Differenzierung spezieller Situationen erfolgen und entschieden werden, ob der Schutzmechanismus ausgelöst wird. Wir haben zwei Realisierungsmöglichkeiten untersucht.

Die Komponenten des Mehrensensoren-system sind ein Dehnungsmessstreifen, der einen mechanischen Aufprall registriert, ein Regensensor, der einen Flüssigkeitsfilm auf der Messfläche detektiert, ein Temperatursensor, der die Temperatur des Übertragungsmediums im Kollektor misst, ein Helligkeitssensor, der Auskunft über Umgebungshelligkeit gibt, ein Windgeschwindigkeitsmessgerät, eine Solarsteuerung, die die Temperatur im Solarspeicher registriert und eine Systemuhr.

Alternativ kann der Regen- und Helligkeitssensor eingespart werden, denn durch die Analyse von Aufschlags- und Massenzunahmemustern kann ebenfalls die Niederschlagsart kategorisiert werden.

Während die aktuelle Forschung über Jahre an Wirkungsgraderhöhungen von 1- 2 % arbeiten (s. Solarzelle), lieferte die Umsetzung unserer Innovation Effizienzverbesserung im zweistelligen Prozentbereich.

7 Diskussion

Die Formulierung dieser Wettbewerbsarbeit erfolgt genau zwischen den Phasen der detaillierten Planung und der konstruktiven und softwareseitigen Realisierung. Dadurch kann die Wirksamkeit des Systems noch nicht nachgewiesen werden.

Die Entscheidung zwischen beiden Systemrealisierungen ist davon abhängig, ob der technische oder der Programmieraufwand größer sein darf. Im zweiten Fall könnten Schwierigkeiten bei der eindeutigen Differenzierung der Aufschlagmuster auftreten, denn dazu sind unter Umständen komplexe Methoden der Signalanalyse nötig, z.B. die Fourier-Transformation¹⁵. Außerdem müsste die Hardware über größere Speicher verfügen, um Messwerte in entsprechenden Datenbanken vorübergehend zu hinterlegen.

Problematisch könnte das gleichzeitige Auftreten von Hagel und Schnee sein, da es zu einer Fehlinterpretation kommt, wodurch die Röhren beschädigt werden könnten.

Andere nicht detektierbare Ereignisse (z.B. Wurfgeschosse, Feuerwerkskörper) können die Vakuumröhren ebenfalls beschädigen. So bliebe trotz Installation unseres Schutzsystems ein Restrisiko.

Ein bautechnisches Problem stellt die Spannungsversorgung des Systems dar. Diese ist über Akkus nicht möglich. Daher muss ein Kabel die Dachfläche durchdringen, um die Spannung vom Netzteil (im Hausinneren) zur Elektronik zu bringen. Dazu müssen Folien, Isolierungen und unter Umständen Dachsteine oder Verkleidungen bearbeitet werden. Dies führt zu Dichtheitsrisiken und Installationskosten.

Der Investitionsaufwand, der sich aus der Anschaffung der beschriebenen Komponenten

¹⁵Fourier-Transformation. 2011 <URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Transformation>> – Zugriff am 2011-03-08, vgl.

ergibt, beträgt ohne Installation etwa 100€. Diesbezüglich haben wir unsere in den Systemanforderungen formulierten Ziele erreicht.

8 Danksagung

Ein besonderer Dank geht an unseren Betreuer Herrn Maik Schnitzer, der uns beraten hat und für unsere Fragen offen war. Wir danken Lisa Neidhardt und Nora Müller, die mit ihrem Projekt den Grundstein für unsere Arbeit gelegt und uns bei Problemen diesbezüglich geholfen haben. Weiterhin möchten wir dem Freundeskreis und der Schulleitung des Winckelmann-Gymnasiums Stendal für die Bereitstellung hervorragender Voraussetzungen für schulische Forschungsarbeit danken. Des Weiteren sprechen wir Dank an den Sponsorpool jugend.forscht Sachsen-Anhalt, durch dessen Fördermittel uns die Anschaffung notwendiger Komponenten ermöglicht wurde, an Prof. Dr. Abbas Omar, Leiter des Instituts für Elektronik, Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg aus, der uns Unterstützung bei der technischen Umsetzung dieses Projektes signalisiert hat und ebenso an Herrn Daniel Kottke, Student der genannten Universität, der uns bei der programmiertechnischen Verarbeitung geholfen hat. Wir danken auch Frau Doris Kottke, die uns bei der technischen Zeichnung des Systems geholfen hat.

Abbildungsverzeichnis

1	Grafische Darstellung der prozentualen Anteile verschiedener Komponenten im Haushalt bezüglich des Anteils am Gesamtstromverbrauch im Haushalt 2008 (URL: http://www.brand-feuer.de/images/e/ec/300px-Energiebedarf_eines_Haushalt.png) – Zugriff am 2011-03-08	3
2	Grafische Darstellung der theoretischen jährlichen Energiebilanz von Flach- bzw. Vakuumröhrenkollektoren und der Deckungsrate des Energiebedarfs GERDING: Sonnenstunden	3
3	Funktionsschema eines indirekt durchströmten Röhrenkollektors (URL: http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/elco_astron.jpg) – Zugriff am 2011-03-08	5
4	Schematische Darstellung der Halbrunde mit Vakuumröhren bei Reflexionsfunktion NEIDHARDT/MÜLLER: Entwicklung einer Konstruktion zur Vermeidung von Hagelschäden...	6
5	Schematische Darstellung der Halbrunde mit den Vakuumröhren bei Schutzfunktion a. O.	6
6	Schematische Darstellung des Hebeschutzmechanismus a. O.	7
7	Schematische Darstellung des Sensorsystems	8
8	Schema eines Regensensors ohne und mit Flüssigkeitsmengen 2011 (URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor) – Zugriff am 2011-03-08	9
9	Zeit-Kraft-Diagramm für die Niederschlagsarten Regen, Hagel, Schnee; durchschnittliche Kraftwerte in % relativ zu einem maximalem Wert bei starkem Hagel	12

Literatur

- [⟨URL: http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/elco_astron.jpg⟩](http://energieberatung.ibs-hlk.de/images/elco_astron.jpg) – Zugriff am 2011-03-08
- Solarkonzepte/Solarthermieprojekte. [⟨URL: http://www.lbb-sonne.de/htm/solarthermie_solarkollektor.html⟩](http://www.lbb-sonne.de/htm/solarthermie_solarkollektor.html) – Zugriff am 2011-03-08
- Solarthermie - Lust auf Sonne? [⟨URL: http://www.elektrotechnik-brauer.de/solarthermie.html⟩](http://www.elektrotechnik-brauer.de/solarthermie.html) – Zugriff am 2011-03-08
- 2008 [⟨URL: http://www.brand-feuer.de/images/e/ec/300px-Energiebedarf_eines_Haushalt.png⟩](http://www.brand-feuer.de/images/e/ec/300px-Energiebedarf_eines_Haushalt.png) – Zugriff am 2011-03-08
- Anteil erneuerbarer Energien... 2009 [⟨URL: http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2850⟩](http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2850) – Zugriff am 2011-03-08
- Solarthermie. 2010 [⟨URL: http://www.toptarif.de/strom/strom-lexikon/solarthermie⟩](http://www.toptarif.de/strom/strom-lexikon/solarthermie) – Zugriff am 2011-03-08
- 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor) – Zugriff am 2011-03-08
- Dehnungsmessstreifen. 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen) – Zugriff am 2011-03-08
- Fourier-Transformation. 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Transformation⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Transformation) – Zugriff am 2011-03-08
- Regensensor. 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Regensensor) – Zugriff am 2011-03-08
- Solarthermie. 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Solarthermie) – Zugriff am 2011-03-08
- Sonnenkollektor. 2011 [⟨URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenkollektor⟩](http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenkollektor) – Zugriff am 2011-03-08
- Eckhardt, Jürgen:** Umbau einer Finca auf Mallorca. 2000 [⟨URL: http://www.ca-wallau.com/solaranlage.htm⟩](http://www.ca-wallau.com/solaranlage.htm) – Zugriff am 2011-03-08
- Gering, Guido:** Sonnenstunden. 2011 [⟨URL: http://www.sonnenaufgang-sonnenuntergang.de/?month=8&year=2010&latitude=52&longitude=7&timezone=0&zenith=90.833333333333&location=&view=month&resulting=0⟩](http://www.sonnenaufgang-sonnenuntergang.de/?month=8&year=2010&latitude=52&longitude=7&timezone=0&zenith=90.833333333333&location=&view=month&resulting=0) – Zugriff am 2011-03-09
- Khammas, Achmed:** Buch der Synagie Teil C. 2011 [⟨URL: http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_21_sonne_niedertemp_koll_ab_1996.htm⟩](http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_04_21_sonne_niedertemp_koll_ab_1996.htm) – Zugriff am 2011-03-08

Neidhardt, Lisa/Müller, Nora: Entwicklung einer Konstruktion zur Vermeidung von Hagelschäden... 1. Auflage. Stendal, 2010, 6

Tzscheuschler, Dr.-Ing. Peter et al.: BWK 6-09 Nutzenergiebilanz. 2009 (URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=62>)