



Centre Neuchâtelois de cuisine solaire
ULOG Suisse Romande

Dr. Michael Götz
Rue Matile 71, CH-2000 Neuchâtel

☎ 032 724 06 76 (Deutsch)
☎ 032 725 38 16 (Français, fax)
cuisine.solaire@suisse.org
www.cuisinesolaire.com

Tages-Hitzespeicher für einen konzentrierenden Solarkocher

Stockage de chaleur diurne pour un cuiseur solaire à concentration



Forschungsarbeit ausgeführt im Auftrag des Bundesamtes für Energie im Sommer 2002



Der 2m² Parabolspiegelkocher mit dem Hitzespeicher. Der Reflektor bündelt das Sonnenlicht auf die Unterseite des Speichers, der etwas erhöht auf dem Ständer steht. Der Reflektor richtet sich automatisch nach der Sonne.

Zusammenfassung

Zwei Hitzespeicher für automatische solare Parabolspiegelkocher wurden hergestellt und getestet. Der eine besteht aus Aluminium und speichert die sensible Wärme, der zweite ist mit Zinn gefüllt und speichert zudem die latente Wärme des Phasenübergangs (fest-flüssig).

Der Latentwärmespeicher zeichnet sich durch einen höheren nutzbaren Anteil der gespeicherten Hitze aus (72% statt 58%) und erreicht seine Arbeitstemperatur bedeutend schneller. Die gespeicherte Energiemenge (1kWh) reicht aus, um für eine Familie am Abend zu kochen.

Résumé

Deux éléments de stockage de chaleur pour des cuiseurs solaires paraboliques à réglage automatique ont été fabriqués et testés. Le premier consiste en un block d'aluminium, il stocke la chaleur sensible. Le deuxième est rempli d'étain, il stocke en plus la chaleur latente du changement de phase (solide-liquide).

Les avantages du stockage de chaleur latente sont une plus grande partie utile de la chaleur stockée (72% par rapport à 58% pour le premier stock) et le fait qu'il atteint rapidement sa température de travail. L'énergie stockée (1kWh) suffit pour cuisiner pour une famille le soir.

Abstract

Two heat storage elements for automatic parabolic solar cookers have been fabricated and tested. The first one consist of solid aluminium, il stores the sensible heat. The second is filled with tin and uses the latent heat of the solid-liquid phase change as well.

The advantages of the phase-change element is the higher useful part of the stored energy (72% as compared to 58% for the solid element) and the fact, that it quickly reaches its working temperature. The stored energy of 1 kWh is enough to cook for a family in the evening.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
 2. Geschichte : Solarkocher, Schefflerspiegel, Hitzespeicher
 3. Speichermedien im Vergleich
 4. Aufbau der Speicher dieser Studie
 5. Theoretische Aufheizzeiten und Verluste
 6. Tests und Messungen, quantitative Auswertung
 7. Qualitative Beurteilung
 8. Anwendungen / Markt
 9. Ausblick
 10. Quellen
- Anhänge

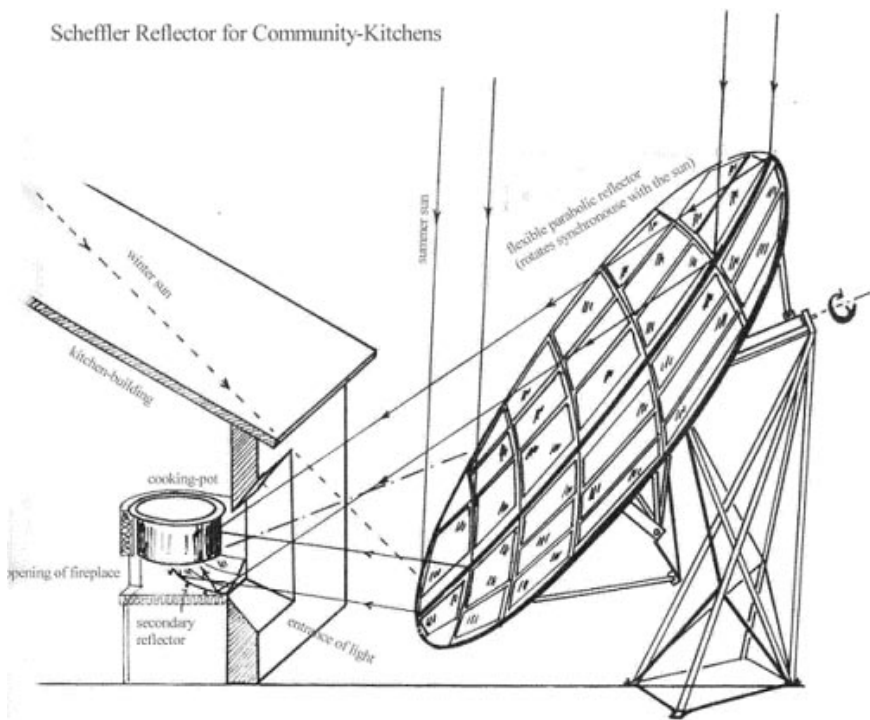
2. Geschichte : Solarkocher, Schefflerspiegel, Hitzespeicher

Solarkocher

Die Geschichte der Solarkocher basiert auf den Experimenten von Horace-Benedict de Saussure (1740-1799, Kollektoren, die auf dem Treibhauseffekt basieren) und Auguste Mouchot (1825-1911, Parabolspiegel für Motoren, Destillation von Alkohol oder Meerwasser). Ein erstes Interesse am *Kochen* mit Sonnenenergie kam in den 50er Jahren in China und Indien auf. Beide Prinzipien – Treibhausboxen und Parabolspiegel – wurden seither weiterverfolgt und werden weltweit angewandt. Erst die Ölkrise in den 70er Jahren brachte das Solare Kochen nach Europa und in die USA. Pioniere in Europa sind Ulrich Oehler ('ULOG' Sonnenofen) aus der Schweiz, Roger Bernhard aus Frankreich und Dr. Seifert (manuelle Parabolspiegel 'SK14') aus Deutschland. Heute wird solares Kochen in vielen Entwicklungsprojekten verbreitet. In den reichen Gebieten USA, Australien und Europa wird es in einem relativ kleinen Rahmen (Hobby, Solidarität mit Afrika, ökologische Verantwortung) betrieben.

Schefflerspiegel

Am klassischen Parabolspiegel mit zentralem Fokus kann sich (aus physikalischen Gründen) wenig ändern; hier sind nur der einfache, aber solide Aufbau des Kochers und das Reflektormaterial von Bedeutung. In den 80er Jahren erfand jedoch der österreichische Ingenieur Wolfgang Scheffler einen ausgeklügelten Parabolspiegel, der eine fixe Position des Ständers und einen fixen Fokus während des ganzen Jahres erlaubt. Die Stellung und die Form des Spiegels kompensieren die Bewegung der Sonne. Mit einem solchen 'Schefflerspiegel' kann die Kochstelle *innerhalb* des Hauses liegen, das Licht wird durch ein Loch in der Wand unter die Pfanne gebündelt !



*Skizze eines 8m²
Schefflerspiegels. Der
Reflektor spiegelt das Licht
durch ein Loch in der Wand
dirket unter den Kochtopf !
(Technische Details siehe
Anhang E)*

Der Schefflerspiegel wird seit bald 20 Jahren weiterentwickelt und wurde in Entwicklungsprojekten in 17 Ländern, u.a. Sudan, Namibia, Ägypten, Indien, Nepal eingesetzt. Das grössere Modell mit 8 m² Spiegelfläche wird inzwischen in Indien in Serie hergestellt, das kleinere Modell für Europa mit 1,8 m² Spiegelfläche wird im Moment erst in Einzelstücken angefertigt. Inzwischen wurden über 70 Küchen installiert mit über 350 Reflektoren. Die grössten Anlagen stehen in Indien: die Solarküche der 'Bramakumaren' in 'Abu Road' (Yogazentrum, Rajastan) ist mit 86 Reflektoren die weltgrösste Anlage überhaupt. Dort wurden bis zu 33'000 Mahlzeiten pro Tag zubereitet !

Der grösste einzelne Scheffler-Reflektor hat eine Fläche von 50m^2 . Mit zwei solchen Spiegeln soll ein Krematorium in Indien betrieben werden.

Hitzespeicher

Es wurden schon einzelne Hitzespeicher für die ‘Schefflerspiegel’ hergestellt. Diese beruhten auf Eisen als Speichermedium. In Portugal wurde ein 50kg Eisenblock für einen 2 m^2 Reflektor aufgebaut. Dieser hat nur eine nicht isolierte Seite, die gleichzeitig als Absorber und Herdplatte dient. Sie wird von unten aufgeheizt und der ganze Speicher zum Gebrauch umgedreht. In Indien wurde ein 300 kg Eisenspeicher für einen 8 m^2 Reflektor hergestellt. Der Speicher ist auf Schienen gelagert und kann aus dem Fokus herausgerollt werden.

In Semesterarbeiten der Universität Stuttgart wurde ein Latentwärmespeicher mit Natriumnitrat/-nitrit getestet [Wippermann]. Ein neues Prinzip wurde von William Illboudo [Illboudo] in einer Diplomarbeit erforscht: Ein Eisenspeicher diente als Dampferzeuger; sobald die Küche Wärme benötigte, wurde etwas Wasser auf den Eisenblock getropft und als Dampf (ohne Druck) zum Kochtopf geleitet.

3. Speichermedien im Vergleich

Wir können unterscheiden zwischen Speichern, die nur die Wärmekapazität eines Mediums nutzen (‘Sensible Wärme’) und Speichern, die einen Phasenübergang in die Energiespeicherung einbeziehen (‘Latentwärme’). Für die sensible Wärme kommen die meisten Metalle in Frage. Die Wahl eines Metalls vereinfacht den Wärmetransport in und aus dem Speicher.

Die Literaturrecherche nach geeigneten Latentwärmespeichern hat viele Möglichkeiten aufgezeigt. Nach ersten Kochversuchen wurde jedoch ein Bereich von Phasenübergangstemperaturen zwischen 200°C und 250°C angestrebt. In diesem Bereich war die Auswahl bescheiden. Wir können zwei Gruppen von Latentwärmespeichern unterscheiden: Salze und Metalle. Die folgende Liste fasst die gefundenen Speichermöglichkeiten und einige Kenndaten zusammen ([Meinel], [CRC], [Dumon]):

Material	T_m	ΔH_{fus} J/g	C_p J/g*K	ρ kg/l	α	ΔH_{fus} / C_p	Kommentar
Latentwärmespeicher:							
NaNO_3	307°	176					Zersetzung bei 380°C , hygroskopisch, Dünger, Sprengstoff
NaNO_2	271°						Zersetzung bei 320°C , etwas hygroskopisch, giftig
$\text{NaNO}_3 + \text{NaNO}_2$	$175^\circ / 228^\circ$	125 108	1.6			146	Das Gemisch hat zwei Phasenübergänge
Sn	232°	60.4	0.228	7.3-6.8 $20^\circ\text{C}-500^\circ\text{C}$	23	265	
Sn + 3% Cu	$\cong 250^\circ$						Lot für Rohrleitungen, unscharfer Phasenübergang
50% Sn 50% Pb	214°						50/50 Lot
Pb	(327)	23	0.13	11.3	29	176	
LiNO_3	264°	88 cal/g					Nicht näher untersucht
Al_2Cl_6	190°	63 cal/g					Flüchtig bei RT, nicht näher untersucht

Material	T _m	ΔH_{fus} J/g	C _p J/g*K	ρ kg/l	α	ΔH_{fus} / C _p	Kommentar
Speicher für sensible Wärme:							
Al	(660°)	(400)	0.897	2.7	23.8		
Fe			0.449	7.87			
Stahl			0.49	7.9	12		

Ursprünglich war es geplant, das Natriumnitrat/-nitritsystem gemäss [Wippermann] zu verwenden. Von den beiden Phasenübergängen des 1:1 Gemisches liegt jedoch nur einer im interessanten Temperaturbereich. Angaben über andere Mischungsverhältnisse konnten keine gefunden werden. Von den einzelnen Salzen des Gemisches könnte das Nitrit ev. interessant sein; dieses zersetzt sich allerdings schon bei 320°. Der Speicher sollte jedoch auf 400° aufgeheizt werden können. Eine Zersetzung ist auch für das *Gemisch* bei einer Temperatur unter 400°C zu erwarten (Gasentwicklung ? Explosionsgefahr ?).

Das unbekannte Verhalten bei höheren Temperaturen und das wenig dokumentierte Langzeitverhalten der Salze veranlasste uns, Metalle und Legierungen in Betracht zu ziehen. Erstaunlicherweise werden diese in der Literatur über Latentwärme vernachlässigt.

In dieser Gruppe schien uns vor allem reines Zinn interessant. Es ist weniger umweltgefährdend als Blei und hat ein sehr interessantes Verhältnis Uebergangsenergie zu Wärmekapazität ($\Delta H_{\text{fus}}/C_p$). Die Schmelztemperatur von ca. 230° scheint ideal und das Recycling ist problemlos, da es sich um ein reines Metall handelt.

Für den weiteren Vergleich wurden 4 Systeme (rechnerisch) so ausgelegt, dass sie im nützlichen Bereich über 180°C bis 350°C etwa 1 kWh speichern können. Die Aufheizzeit bis 200°C und die 'Nutzladezeit' von 200° bis 350°C wurden berechnet (bei einer angenommenen konstanten effektiven Heizleistung von 420 Watt) und der prozentuale Anteil über 200°C der gespeicherten Energie bestimmt.

Eisen: 50kg Fe Volumen: 6.3 Liter Aufheizzeit: 2.7h / Nutzladezeit 2.2h Energiegehalt über 180°: 1.06kWh Anteil der Energie über 200°C = 45% 👉 Preis 👉 Gewicht, Aufheizzeit	Aluminium: 25kg Al Volumen: 9.3 Liter Aufheizzeit: 2.7h / Nutzladezeit 2.2h Energiegehalt über 180°: 1.06kWh Anteil der Energie über 200°C = 45% 👉 Gewicht , Wärmeleitung 👉 Aufheizzeit, Volumen, Preis
Zinn: 30kg Sn + 6.5kg Fe Volumen (Zinn): 4.4 Liter Aufheizzeit: 1.2h / Nutzladezeit 2.2h Energiegehalt über 180°: 0.98kWh Anteil der Energie über 200°C = 65% 👉 Aufheizzeit, Volumen, Verhältnis $c_p/\Delta H_{\text{fus}}$ 👉 Preis, Gewicht	Nitrit/Nitrat: 10kg Salzmischung + 7kg Al Volumen (Salz): 4.7 Liter Aufheizzeit: 3.5h / Nutzladezeit 2.2h Energiegehalt über 180°: 1.04kWh Anteil der Energie über 200°C = 39% 👉 Gewicht , (Phasenübergang) 👉 Aufheizzeit, Wärmeleitung, Zersetzung, unsichere Langzeitstabilität (Der Vorteil des Phasenübergangs geht in diesem Fall verloren, da einer der beiden Übergänge unter 180°C liegt und das Aufheizen verlängert!)

Die genannten Nachteile des Nitrat/Nitritgemisches haben uns veranlasst, den Latentwärmespeicher mit Zinn herzustellen, dies trotz des höheren Gewichts. Für den 'Massespeicher', der als Vergleich dienen sollte, wurde Aluminium ausgewählt.

4. Aufbau der Speicher dieser Studie

Die Speicher wurden in der Werkstatt der ‚Solaren Brücke‘ in Aislingen bei Ulm (Deutschland) hergestellt. Im einen Fall handelt es sich um einen Aluminiumzylinder, im anderen um ein Gefäß aus Stahl, das mit flüssigem Zinn gefüllt wurde. Die Speicher wurden in einer Edelstahlhülle an Edelstahldrähten aufgehängt und mit einer ‚Hi-Tec‘ Isolation versehen. Alle Details sind in Anhang F beschrieben.

Bau des Speichers in Bildern:



Der Aluminiumspeicher in seiner Aufhängung.

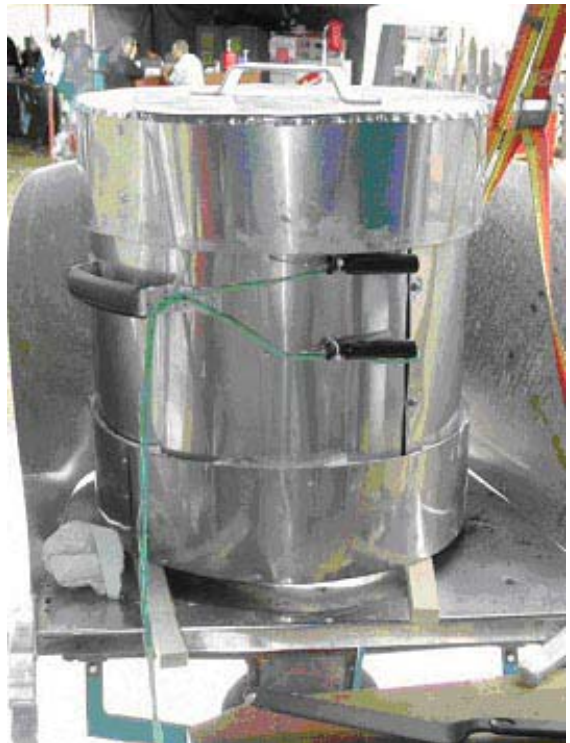


Der Unterteil des Zinnspeichers. Die Stifte beherbergen die Thermometer.



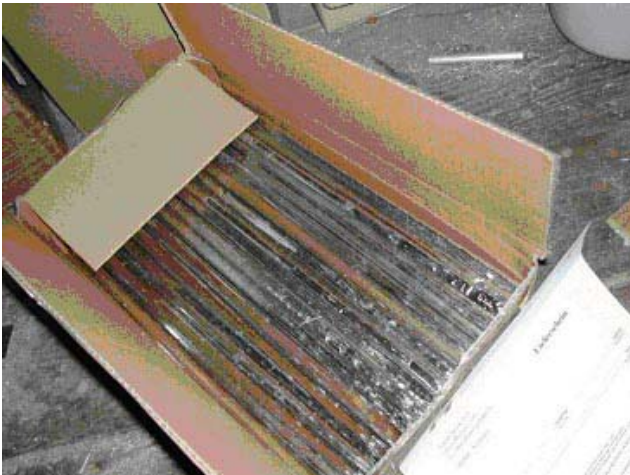
Der zugeschweisste Zinnspeicher.

Rechts: Der fertige Aluspeicher mit Untersatz und Deckel auf dem Kocher.



Auffüllen des Zinnspeichers:

Der Zinnspeicher wurde mit Hilfe eines 8m^2 Schefflerspiegels gefüllt. Dazu wurde der noch leere Speicher in den Fokus des Spiegels gebracht und das Zinn – Stange um Stange – durch ein Loch im Absorberblech des Speichers eingefüllt. Die Zinnstange schmolz jeweils beim Eintauchen in das schon flüssige Zinn im Innern. Um jegliche Explosionsgefahr beim späteren Betrieb zu vermeiden, wurde der Speicher bei ca. 400°C zugeschweisst. Da das Zinn einen leicht höheren Ausdehnungskoeffizienten als Stahl besitzt, ist das Gefäß so bei seiner höchsten Betriebstemperatur unter Normaldruck, bei tieferen Temperaturen herrscht Unterdruck. (Da die Leistung des Reflektors am Nachmittag wegen Beschattung durch einen Baum abnahm, musste der Speicher beim Zuschweiszen mit einer Gasflamme nachgeheizt werden.)



30kg Zinn in Stangen zum Einfüllen bereit.



Im Fokus eines 8m^2 Reflektors wird das Zinn geschmolzen und dann heiss zugeschweisst.

Effektive Massen der Speicher:

	Aluminium	Zinn
Masse	25.6 kg Al	28.2 kg Sn + 6.4 kg Fe
Masse inkl. Isolation, etc.	31.0 kg	38.8 kg
Masse Deckel		2.8 kg
Masse Untersatz		2.5 kg

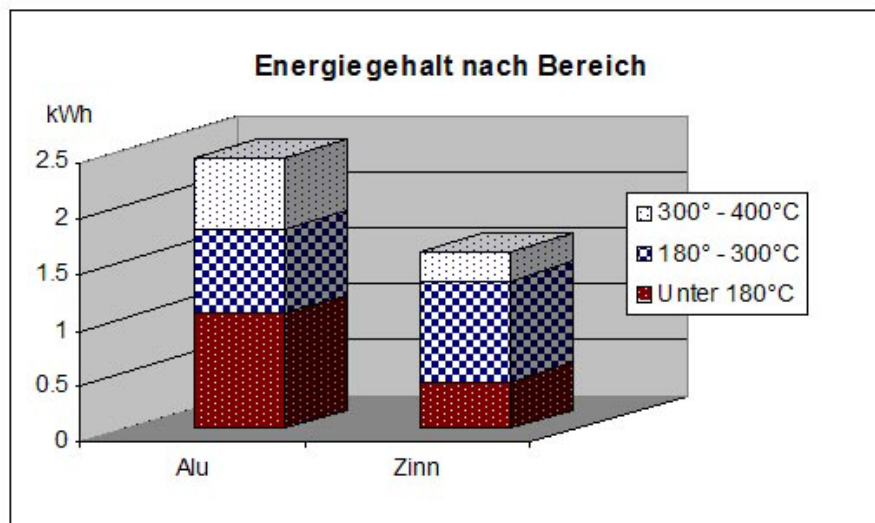
5. Theoretische Aufheizzeiten und Verluste

Energiegehalt mit obigen Massedaten:

	Aluminium	Zinn
$20^\circ\text{-}180^\circ\text{C}$ (c_p) (bei Heizleistung 600W)	1.02 kWh 1.7 h	0.42 kWh 0.7 h
$180^\circ\text{-}400^\circ\text{C}$ (c_p) (bei Heizleistung 450W)	1.4 kWh 3.1 h	0.58 kWh 1.3 h
Phasenübergang (bei Heizleistung 600W)		0.47 kWh 0.78h
Heizzeit $20^\circ\text{-}400^\circ\text{C}$	4.8 h	2.8 h

Nützlicher Anteil der Energie (> 180°C)	58 %	72 %
--	------	------

Die angenommenen Heizleistungen wurden aus der Messung vom 7.7.02 abgeschätzt.



Der Vergleich zeigt, dass beim Zinnspeicher ein viel höherer Anteil der Energie im interessanten mittleren Bereich gespeichert wird. Der untere Bereich ist verloren, der obere Bereich mit grossen Verlusten verbunden.

Der Aluminiumspeicher ist etwas grösser als geplant (1.4 kWh 'Nutzenergie'). Der Zinnspeicher entspricht in etwa der Vorgabe von 1 kWh 'Nutzenergie'; knapp die Hälfte der 'Nutzenergie' geht in den Phasenübergang.

Ein Beispiel: Bei vollem Sonnenschein im Sommer ist der Zinnspeicher schon nach $\frac{3}{4}$ Stunden einsatzbereit, er speichert gut $\frac{3}{4}$ Stunden Sonnenenergie im Phasenübergang und gut $\frac{5}{4}$ Stunden Sonnenenergie in seiner Masse. Die im Phasenübergang gespeicherte Energie kann knapp 5 Liter Wasser zum Kochen bringen, die in der Masse gespeicherte bringt knapp 6 Liter Wasser zum Kochen.

Der Aluminiumspeicher braucht im gleichen Fall $1\frac{3}{4}$ Stunden bis zur Einsatzbereitschaft, danach speichert er gut 3 Stunden Sonnenenergie in seiner Masse und könnte damit 14 Liter Wasser zum Kochen bringen.

Die theoretischen Verluste wurden für die verschiedenen 'Verlustwege' des Speichers und verschiedene Zustände (mit / ohne Deckel, mit / ohne Untersatz) ausgerechnet:

WATT	Aluspeicher				Zinnspeicher			
	100°C	200°C	300°C	400°C	100°C	200°C	300°C	400°C
Strahlungsverlust durch Unterseite (Absorber)	30	110	262	434	25	92	220	365
Strahlungsverlust durch Herdplatte (ohne Deckel)	30	110	262	434	30	110	262	434
Leitung obere Edelstahlfolie	3.5	8	13	17	3.5	8	13	17
Wände 5cm Microtherm	10.4	24	38	52	5	13	20	27.4
Deckel /	4.2	10	15.5	21	4.2	10	15.5	21

Untersatz 5cm Microtherm, je								
---------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Nota bene: die 'Nutzenergie' des Speichers ist 1 kWh.

Wir sehen, dass beim Aufheizen und im Gebrauch die Strahlungsverluste gegenüber den Wärmetransportverlusten dominieren. Sobald der Speicher jedoch oben und unten isoliert ist, werden die Isolationsverluste wichtig, da der Speicher mehrere Stunden lang heiss bleiben soll.

Die vom Metall absorbierte Leistung (ohne Verluste) kann 600W überschreiten. Bei dieser Leistung kann bei abgedeckter Herdplatte eine maximale Temperatur von über 400°C erreicht werden, da die Strahlungsverluste durch das untere Absorberblech (die mit ΔT^4 zunehmen !) bei 400°C um 400 Watt betragen und die Verluste durch die Isolation rund 100 Watt.

6. Tests und Messungen

Folgende Tests und Messungen wurden durchgeführt:

- Kochtests ohne Speicher, um den nützlichen Temperaturbereich (am Beispiel von Crêpes) zu kennen
- Aufheiz- und Abkühlversuche auf Solarkochern
- Betrieb der Speicher als Crêperie, bzw. zum kochen
- Aufheiz- und Kochtests des Speichers mit einer elektrischen Heizquelle

Nutzbarer Temperaturbereich für Crêpes:

1. Versuch in Neuchâtel, Crêpespfanne auf Solarkocher:

Erste Seite der Crêpes: 200° - 280° C (gut = 230° - 270°)

Zweite Seite der Crêpes (nach dem Wenden): 190° - 270° C (gut = 220°C – 260°C)

2. Versuch in Aislingen, Alublock 25kg ohne Isolation

Temperatur zu Beginn des Backens: 180°C – 270° C möglich (Temperaturverlust pro Crêpe 6°C)

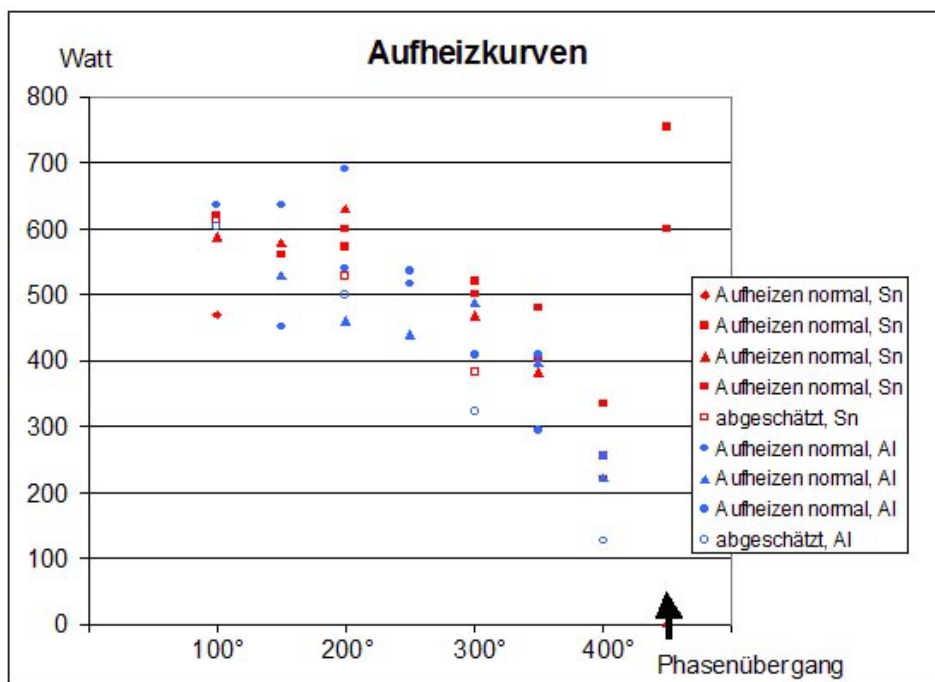
Experimente auf dem Solarkocher:

Die Speicher wurden fünfzehn mal während 1 bis 3 Tagen benutzt und ausgemessen. Alle Experimente sind in Anhang A zusammengefasst. Ein Beispiel wird etwas später vorgestellt, ein zweites im Anhang D.

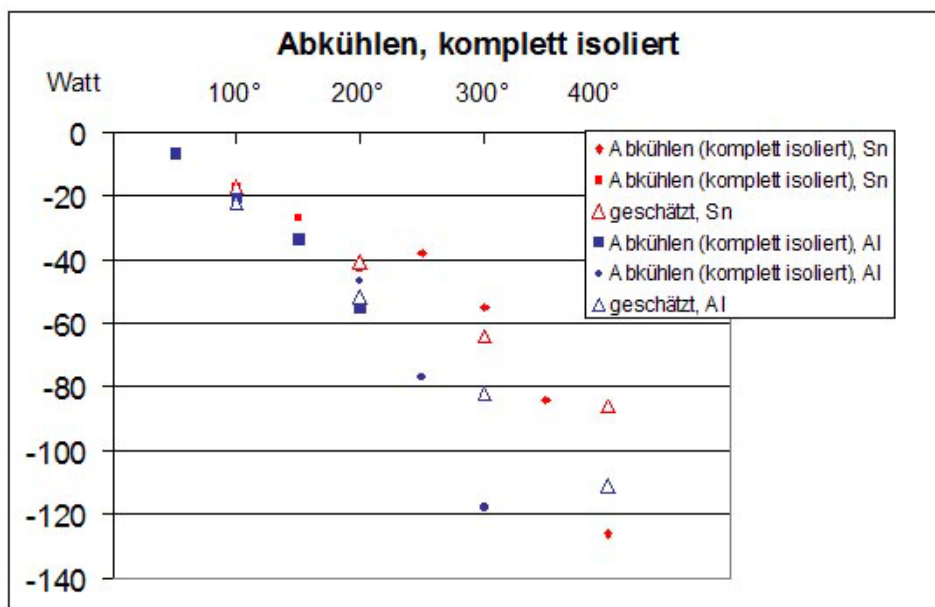
Resultate der Aufheiz- und Abkühlversuche

Die Auswertung der Versuche ist in Anhang B dargestellt. Die Heizleistung ist bei guter Sonneneinstrahlung beeindruckend. **Die effektive Leistung kann über 600W betragen und selbst bei 400°C Speichertemperatur können noch 200W – 300W aufgenommen werden.** Die gewünschte Maximaltemperatur von 400°C wird bei guten Bedingungen problemlos erreicht. Der Verlauf der Heizkurve deutet an, dass der Speicher ca. 500°C erreichen würde; die Experimente wurden jedoch bei 430°C abgebrochen, um die Thermometer nicht zu zerstören.

Die Übereinstimmung der gemessenen Verlustleistungen mit den errechneten Werten aus Kapitel 6 ist recht gut. Wie erwartet sind die Verluste für den (voluminöseren) Aluminiumspeicher höher. Nur die gemessenen Werte der Energieaufnahme des Phasenübergangs sind etwas zu hoch. Dieser Messfehler kann durch die nicht homogene Temperatur des Speichers erklärt werden (er wird ja laufend aufgewärmt, bzw. abgekühlt).



Die gemessene Heizleistung der beiden Speicher an je 3 bzw. 4 Tagen (volle Symbole) und die aus den errechneten Verlusten geschätzte Leistung (leere Symbole).



Die gemessene Abkühlleistung der beiden komplett isolierten Speicher an je 2 Tagen (volle Symbole) und die errechnete Verlustleistung (leere Symbole).

Trotz der 'Hi-Tec' Isolation sind die Verlustleistungen immer noch recht hoch. Falls der Speicher um 15 Uhr komplett voll ist (400°C) und dann ganz isoliert wird, so finden wir für ein frühes, bzw. spätes Abendessen *oder* für das Frühstück noch folgende Temperaturen und Energien (gemittelten Verlustleistungen aus den Messkurven):

Komplett isoliert	Aluminium	Zinn
Abendessen um 18 Uhr	70% der Energie bei 340°C	75% der Energie bei 300°C
Abendessen um 21 Uhr	50% der Energie bei 280°C	60% der Energie bei 230°C
Frühstück	Speicher auf 150°C	<10% der Energie bei 220°C

100% der Energie $\equiv 180^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$

Hätte man den Speicher um 15 Uhr nicht isoliert, sondern im Schatten auf dem Reflektor gelassen (mit Deckel, aber ohne Isolation unten), so wäre nur ein frühes Abendessen möglich:

Nur Deckel geschlossen	Aluminium	Zinn
------------------------	-----------	------

Abendessen um 18 Uhr	25% der Energie bei 240°C	40% der Energie bei 230°C
Abendessen um 21 Uhr	Speicher auf 175°C	Speicher auf 180°C

$100\% \text{ der Energie} \equiv 180^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$

Man muss sich die Frage stellen, wie der Speicher noch besser isoliert werden kann (ohne unvernünftig gross zu werden) oder ob die Masse zu klein ist, um Energie länger als nur wenige Stunden zu speichern.

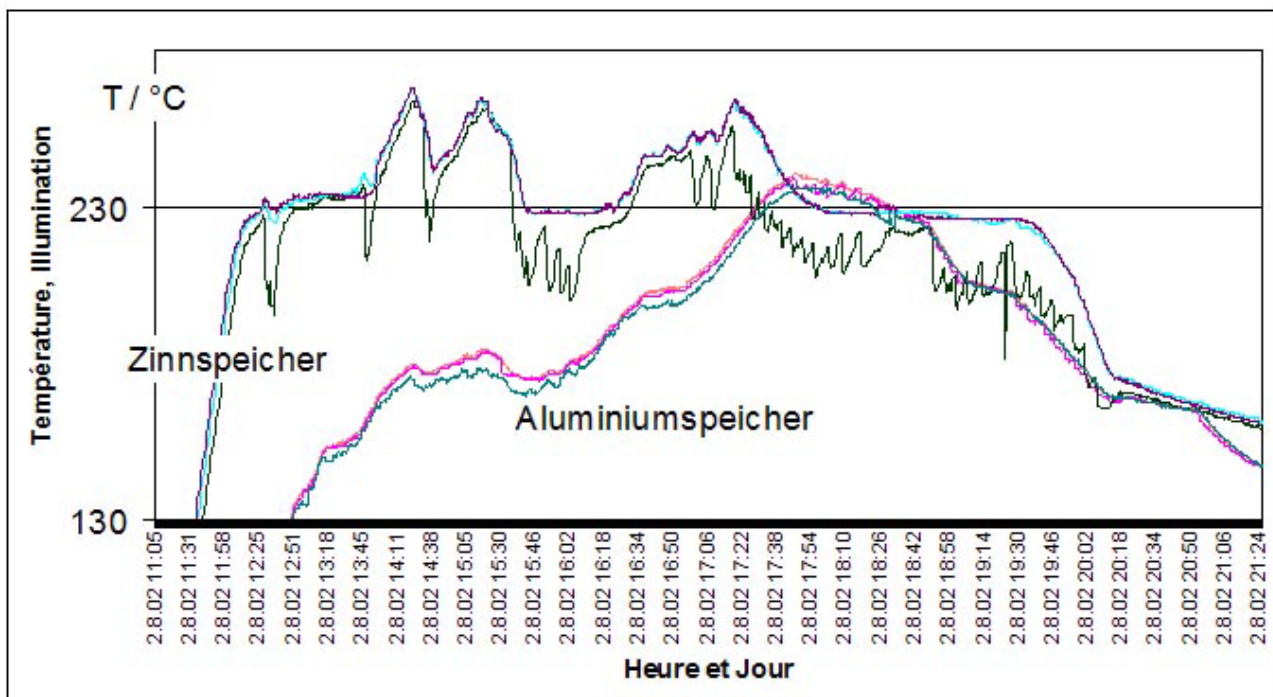
Resultate der Nutzung der Speicher als 'Crêperie':

Diese Experimente wurden (mit Ausnahme des im folgenden beschriebenen 'Laborversuchs') nicht *quantitativ* ausgewertet. Um so wichtiger sind die qualitativen Erfahrungen, die in Kapitel 9 zusammengefasst sind. Anhang D zeigt ein Beispiel eines Einsatzes.

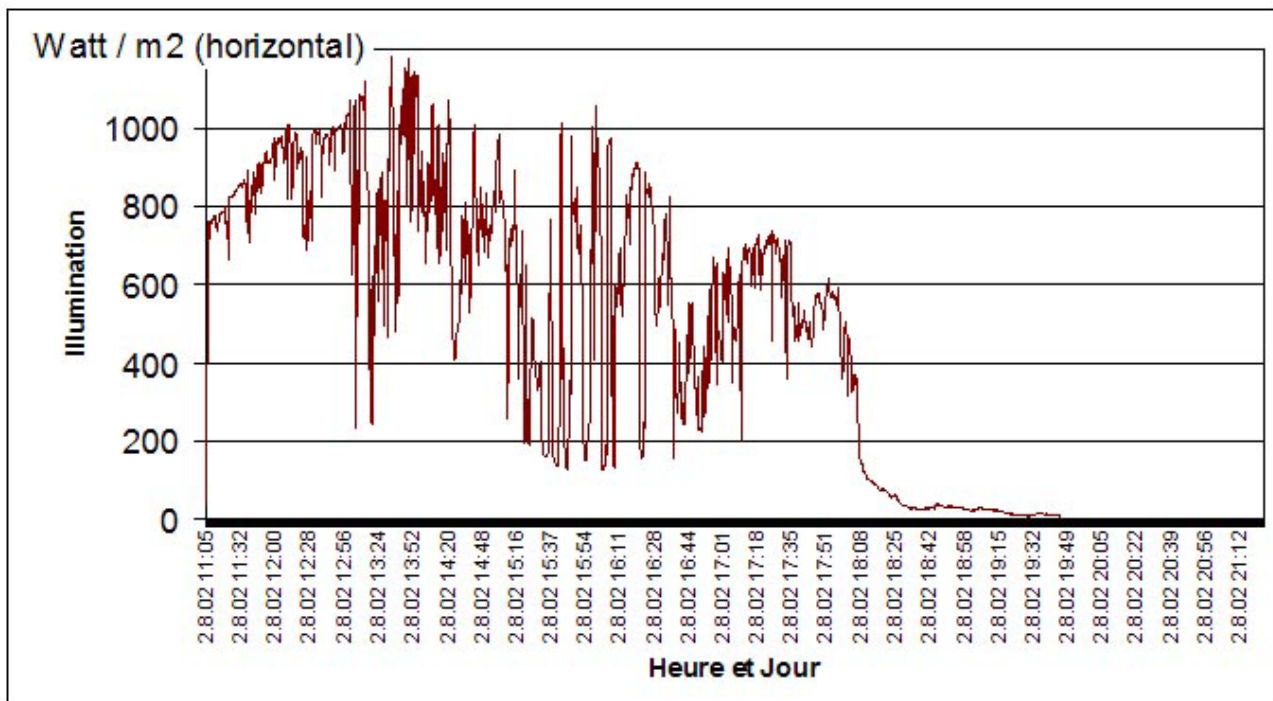
Es ist interessant zu beobachten, wie das Backen der Crêpes im Verlauf der Herdplattentemperatur ersichtlich ist! Sogar das Umdrehen des Pfannkuchens ist durch eine kleine Reduktion der Temperatur sichtbar.

Das folgende Beispiel zeigt den Einsatz der Crêperie am 2.8.02 am Festival 'Hors-Tribu' in Môtiers. Das Wetter war **wechselhaft**, wie die zweite Grafik zeigt. Bei diesen Bedingungen war der Zinnspeicher um 12 Uhr betriebsbereit, während der Aluminiumspeicher erst nach 17 Uhr benutzt werden konnte. In der Grafik zeigt die etwas tiefer liegende Kurve jeweils die Temperatur der Herdplatte, die etwas höher liegenden zeigen die Temperaturen in der Mitte und unten.

Auf dem Zinnspeicher wurden an diesem Tag ca. 40 Crêpes gebacken, auf dem Aluminiumspeicher knapp 20.



Temperaturverlauf der beiden Speicher am 2.8.02 in Môtiers.



Sonneneinstrahlung auf eine horizontale Fläche (abs. Werte etwas zu hoch) am 2.8.02 in Môtiers.



Einsatz der ‚Crêperie solaire‘ in Hauterive NE.

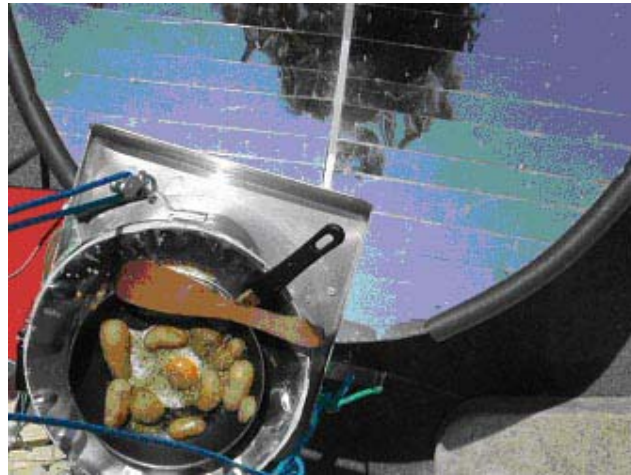
Resultate der Nutzung als Herdplatte:

Die Versuche sind im Anhang C zusammengefasst. Auf beiden Speichern wurden grössere Mengen (6 Liter) und kleinere Mengen (1 bis 2 Liter) Wasser erhitzt. Die Anfangstemperaturen lagen bei 200°C bis 400°C. Die Heizleistung vom Speicher zum Topf variierte von 200W bis >1 kW.

Die Versuche zeigten erstens, dass die gespeicherte Energie nicht überschätzt werden darf und zweitens, dass der Wärmeübergang zwischen Speicher und Topf eine Schwachstelle des Systems ist.

Nur wenn der Speicher über 300°C heiss ist, sind Heizleistungen über ½ kW möglich (N.B.: Immer noch tiefer als eine elektrische Herdplatte). Allerdings sind die tieferen Leistungen zwischen 200W und 300W bei Speichertemperaturen um 200°C immer noch ausreichend, um 1 bis 2 Liter Wasser (oder ein Mahl für eine kleine Familie) zu kochen.

Die effektiven Kochversuche (Kartoffeln, Teigwaren, Bohnen, Espresso, ...) verliefen alle positiv.



Bratpfanne auf dem Speicher.

Links: Espresso auf dem Speicher.

Experimente mit elektrischer Heizquelle:

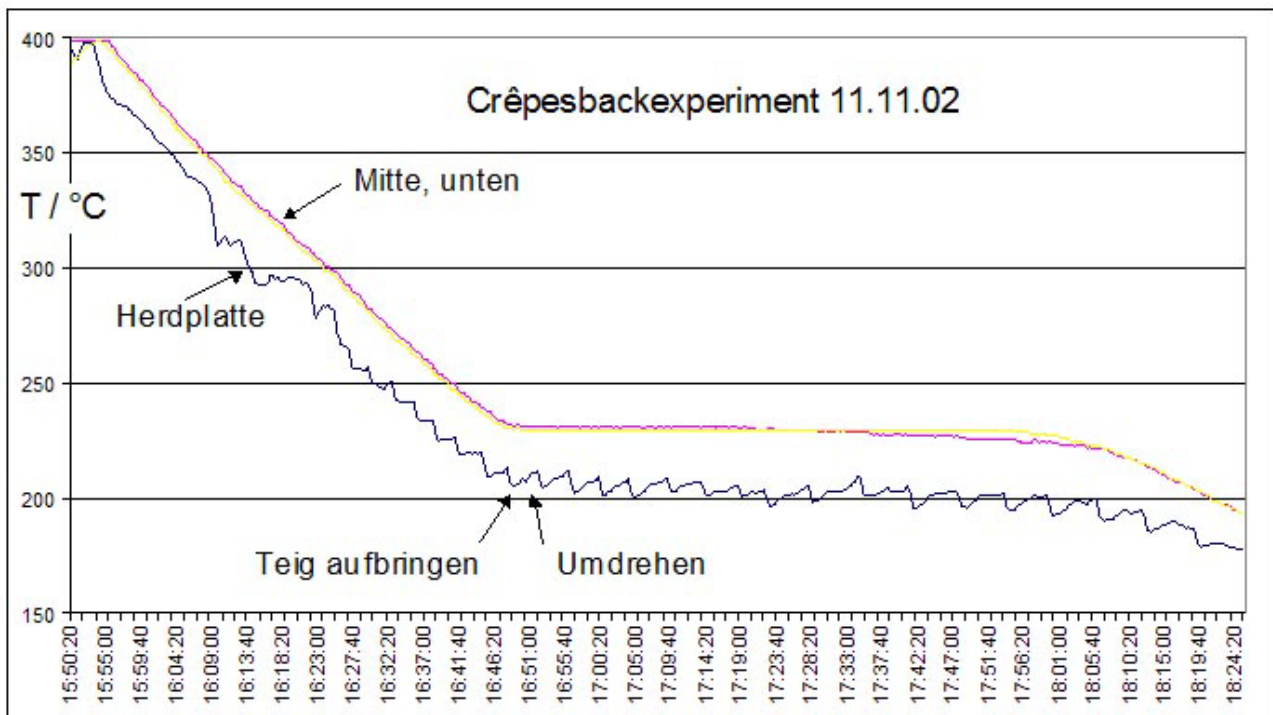
11. Nov.	Neuchâtel	Elektrische Heizplatte	Elektrisch heizen von oben (unten isoliert) 35 Crêpes	
14. Nov.	Neuchâtel	Elektrische Heizplatte		Elektrisch heizen von oben (unten isoliert) Abkühlen ohne Deckel / ohne Isolation unten

Aufheizkurven:

- Die Speicher wurden mit einer elektrischen Herdplatte von 1910 W_{el} von oben (Unterseite isoliert) aufgeheizt.
- Der Zinnspeicher brauchte 2,64 kWh elektrisch, um 1,47 kWh aufzunehmen ($\eta = 56\%$). Durch die grosse Heizleistung waren die Temperaturen unten / Mitte / oben sehr verschieden, was die Auswertung erschwerte.
- Der Aluminiumspeicher brauchte 4,58 kWh elektrisch, um 2,42 kWh aufzunehmen ($\eta = 53\%$). Die effektive Heizleistung plus die errechnete Verlustleistung lagen im ganzen Temperaturbereich um 1300W.
- Der Versuch hat keine neuen Erkenntnisse gebracht.

Crêpesbackversuch:

Da es bei den Versuchen im Sommer nie dazu kam, einen Speicher im ganzen Temperaturbereich (400°C bis 180°C) in einem Durchgang zum Crêpesbacken zu verwenden, wurde dies im Labor nachgeholt.



Temperaturverlauf (Unten / Mitte / Herdplatte) während des Experiments. Bei jedem Pfannkuchen ist ein Temperaturrückgang der Herdplatte sichtbar.

Auf dem Zinnspeicher konnten so 35 Crêpes gebacken werden. Das entspricht ca. 30 Wh pro Crêpe. Dies stellt die absolute Minimalenergiemenge dar, da nur bei wenigen Crêpes eine Beilage (Konfitüre) mitgeheizt wurde. Die Backzeit betrug min. 4 Minuten, d.h. etwa gleich viel wie im Direktbetrieb der Solarkocher bei sehr guter Sonneneinstrahlung. (Im Direktbetrieb wird für die zweite Seite der Pfannkuchen die Heizleistung reduziert. Dieser Verlust entspricht demnach dem Hitzeverlust des Speichers). Je nach Temperaturbereich ist das Backen mehr oder weniger praktisch:

- **Zwischen 280°C und 400°C muss in einer Bratpfanne gekocht werden, um den Wärmetransport zu reduzieren (sonst verbrennen die Crêpes). Die Backzeit beträgt 3 bis 4 Minuten. Praktisch !**
- Zwischen 280° und 300° muss immer noch in der Bratpfanne gekocht werden. Die Leistung ist etwas zu tief mit Bratpfanne, aber noch zu hoch ohne Bratpfanne... Backzeit 4 bis 5 Minuten.
- **Unter 280°C kann direkt auf dem Speicher gebacken werden. Während dem Phasenübergang (Heizplatte = 200°C – 215°C) beträgt die Backzeit ca. 4 Minuten. Praktisch !**
- Unter 200°C bis 180°C ist die Heizleistung sehr klein. Die Backzeit erhöht sich auf über 6 Minuten.

Der Temperaturunterschied zwischen Speichermitte und Herdplatte beträgt oft über 20°C. D.h. der Wärmetransport sollte noch verbessert werden oder es sollte ein Speichermedium mit $T_m = 250^\circ\text{C}$ (Sanitärzinn mit 3% Kupfer) verwendet werden.

Das Experiment bestätigt die Erfahrungen des Feldversuchs im Sommer.

7. Qualitative Beurteilung

- Für eine Benützung als Küche für die Familie ist der **Energiegehalt eines Speichers ausreichend**.
- Beim Gebrauch als Herdplatte ist der **dürftige Wärmeübergang zwischen Speicher und Pfanne** störend, ausser es werden sehr kleine Mengen geheizt (z.B. Espresso).
- Abends kochen funktioniert gut, am Morgen ist nur noch wenig Hitze vorhanden und dies nur, falls der Speicher am Abend vorher nicht benutzt wurde.
- Für den 'kommerziellen Einsatz' als **Crêperie** ist die **Speichermasse** (bzw. die gespeicherte Energie) **zu klein**. Es können theoretisch maximal 35 plus 45 Crêpes gebacken werden, falls der gesamte Speicherbereich genützt wird.
- Die Speicher haben sich sehr gut bewährt, um **kurzfristige Wetteränderungen auszugleichen**. Vorüberziehende Wolken legen nicht mehr jedes mal die Produktion lahm!
- Auch 'lateral' ist der Temperatenausgleich nützlich: Die Pfannkuchen werden schön **homogen**.
- Der Zinnspeicher ist dem Aluminiumspeicher bei kritischem Wetter überlegen, der zweite erreicht bei diesen Bedingungen die Betriebstemperatur gar nie.
- Für den Gebrauch als **mobile Anlage** sind die Speicher **zu schwer**. Sie mussten jedes Mal mit einem Flaschenzug auf den Reflektor geladen werden... Bei einer fix installierten Anlage wäre dieses Problem nicht relevant.
- Der Speicher sollte direkt im Fuss des Kochers **integriert** sein mit einer **Klappe**, um ihn unten zu isolieren, falls keine Sonne scheint. Es ist viel zu mühsam, den Speicher jedes mal vom Kocher wegzunehmen, um ihn in den isolierenden Untersatz zu stellen (was jedoch absolut nötig ist).

8. Anwendungen / Markt

Vorbemerkung: In diesem Kapitel wird nur der Verkauf der Solarkocher und Speicherelemente als kommerzielle Produkte in Europa diskutiert. Die Herstellung und der Gebrauch von Solarkochern in Entwicklungsländern sind sehr sinnvoll, sollen aber hier nicht dokumentiert werden.

Die Marktchancen des Hitzespeichers können nicht unabhängig vom dazugehörenden Reflektor beurteilt werden. Ebenso wenig macht eine Markteinführung des Speichers alleine Sinn. Deshalb soll zuerst der Reflektor betrachtet werden und danach der Speicher.

Traumpreise wären 1000 Euro (oder sogar 1000 Franken) für den Reflektor und ein Aufpreis von 300 Euro für den Speicher. Von diesen Preisen sind wir jedoch noch weit entfernt, wie die Aufstellungen zeigen:

Der ‚Schefflerspiegel‘ S140

Der verwendete Schefflerspiegel wird erst von Hand in Einzelstücken hergestellt. Es handelt sich um eine Luxusmodell (‚Rolls Royce‘), das in Konkurrenz zum industriell hergestellten ‚VW‘ steht, dem Modell K14 aus Deutschland. Dieses bedeutend einfachere Modell mit manueller Nachführung hat eine annähernd hohe Leistung (die jedoch auf einer grösseren Fläche erzeugt wird: es sind keine ähnlich hohen Temperaturen möglich) und kostet in der Schweiz 290 Franken. Dieser Preis ist dank serieller Herstellung in einem Industriebetrieb (‚Koch‘) und dem extrem einfachen Aufbau des Kochers möglich.

Die Schefflerspiegel würden im Moment – bei manueller Herstellung in Zentraleuropa - etwa 10 mal mehr kosten als das oben erwähnte Modell, wie die folgende grobe Abschätzung zeigt:

Material	600 Fr.
Arbeit: 40 Stunden à 40.-	1600 Fr.
Vertrieb und Marketing	<u>500 Fr.</u>
Verkaufspreis ohne MWSt.	2700 Fr.

Der hohe Anteil der Arbeit legt nahe, den Kocher entweder in einem Land mit tieferen Lohnkosten¹ oder in einem industrielleren Rahmen herzustellen. Eine Produktion (immer noch in handwerklichem Rahmen) in Portugal steht im Gespräch.

Der Hitzespeicher

Ein wichtiger Punkt des Latenwärmespeichers ist der Preis des Zinns. Der tiefste gefundene Preis für die Menge *eines* Speichers war ca. 10 Euro pro kg. Der Welthandelspreis liegt bei 4.20\$ pro kg. Für eine etwas grössere Menge könnte man von ca. 7 Euro / kg ausgehen, d.h. 210 Euro pro Speicher. Man könnte dann den folgenden Aufpreis abschätzen (Herstellung in Zentraleuropa):

Material ohne Zinn	250 Fr. (Hi-Tec Isolation!)
Zinn	315 Fr.
Arbeit: 8 Stunden à 40.-	320 Fr.
Vertrieb und Marketing	<u>100 Fr.</u> (parallel mit Kocher)
Verkaufspreis	985 Fr.

Auch in diesem Fall ist der Preis zu hoch. Für eine ‚low tec‘ Variante würde auf den Einsatz der Latentwärme verzichtet (Eisenspeicher) und zusätzlich nur mit günstiger Glaswolle isoliert.

Kundengruppen

Wie erwähnt handelt es sich um ein Luxusmodell unter den Solarkochern. Nur schon der Platzbedarf macht ihn für Hausbesitzer oder Umweltorganisationen sinnvoll, für Bewohner einer Wohnung jedoch uninteressant.

Klimatisch gesehen wäre der Mittelmeerraum ein idealer Absatzmarkt. Da das Interesse für Umweltfragen in Europa jedoch von Süd nach Nord zunimmt, wären Personen aus Zentraleuropa auch eine interessante Kundengruppe.

Ideal wären Anwendungen, wo diese Punkte zusammenkommen: solche Kocher könnten z.B. für Tourismusbetriebe am Mittelmeer mit Kunden aus Zentraleuropa sehr interessant sein. Dort wären sogar die grösseren Modelle denkbar.

Ein weiterer Einstiegsmarkt könnten die Zentraleuropäer sein, die am Mittelmeer ein Haus besitzen (Ferienhaus oder Alterswohnsitz).

¹ Die Produktion in einem richtigen ‘Billigbetrieb’, z.B. in China, ist ausgeschlossen. Nur eine ‘sozialverträgliche’ Herstellung ist mit dem Produkt vereinbar.

9. Schlussfolgerungen und Ausblick

- Die Hitzespeicher haben sich im Einsatz bewährt.
- Das Backen von Crêpes funktioniert sehr gut, der Gebrauch als Herdplatte relativ gut.
- Der mobile Einsatz der Speicher ist wegen ihres hohen Gewichts nicht sinnvoll.
- Der Latentwärmespeicher ist dem Aluminiumspeicher überlegen. In der Theorie kann der Anteil an nützlicher Energie von 58% auf 72% gesteigert werden. In der Praxis kommt sogar der Fall vor (wechselhaftes Wetter), in dem der Aluminiumspeicher seine Arbeitstemperatur gar nicht erreicht, während der Zinnspeicher benutzbar ist.
- Die Wahl eines Metalls anstelle eines Salzes für den Phasenübergang war sinnvoll. Dies trotz dem höheren Preis und Gewicht.
- Die Isolation muss verbessert werden.
- Der Speicher sollte im Fuss des Kochers integriert werden und nicht ein separates Element darstellen.
- Preislich sind wir vom Traumpreis von 1000 Euro für den Kocher und 300 Euro für den Speicher noch weit entfernt.
- Ein weiterer Prototyp, der die obigen Bemerkungen berücksichtigt, sollte hergestellt werden und die Konstruktion von Kocher und Speicher sollten weiter vereinfacht werden.

10. Quellen

[CRC]	CRC Handbook, 82 nd edition
[Dumon]	R. Dumon, 'Energie solaire et stockage d'énergie'
[Meinel]	Meinel, 'Applied Solar Energy'
[Wippermann]	Klaus Wippermann, Wolfgang Scheffler, 'Solarherd mit thermischem Pufferspeicher und Spiegel mit festem Brennpunkt'
[Illboudo]	Semesterarbeit
[Scheffler]	www.dfg-vk.de/SolareBruecke/scheffler_d.htm

Anhang A: Ueberblick aller Versuche auf den Reflektoren

Datum	Ort	Wetter	Sn	Alu
6. Juni	Genf	Schön bis 14 Uhr	Normal aufheizen Abkühlen bei Wolken (mit Deckel)	
7. Juni	Genf	Sehr schön	Normal aufheizen Abkühlen mit Deckel Abkühlen ohne Deckel 8 Crêpes	
11. Juni	Neuchâtel	Sehr schön	Normal aufheizen Abkühlen mit Deckel	
12. Juni	Neuchâtel	Sehr schön		Normal aufheizen Abkühlen mit Deckel
27. Juni	Neuchâtel	Sehr schön	Normal aufheizen Komplett isoliert abkühlen	
28. Juni – 30. Juni	Neuchâtel -> Môtiers	Ziemlich schön	Komplett isoliert Betrieb (Start bei 230°C) Komplett isoliert	Betrieb (Start bei 30°C) Komplett isoliert
2. August	Môtiers	Wechselhaft	Betrieb als Crêperie	Betrieb als Crêperie
3. August – 4. August	Môtiers	Sehr wenig Sonne	Komplett isoliert Kurzer Betrieb (schlechtes Wetter) Komplett isoliert	Komplett isoliert Kurzer Betrieb (schlechtes Wetter) Komplett isoliert
15. August	Neuchâtel	Sehr schön		Normal aufheizen 2 Liter Wasser Kartoffeln Isoliert auf Spiegel
16. August	Neuchâtel	Sehr schön		Expresso am Morgen 6 Liter Wasser Isoliert am Boden 500g Bohnen im Dampf 6 Liter Wasser
17. August	Neuchâtel -> Hauterive	Schön		Aufheizen Isoliert am Boden Transport nach Hauterive
18. August	Hauterive	Schön /Wolken	Aufheizen Betrieb als Crêperie Isoliert im Bus	Aufheizen Betrieb als Crêperie Isoliert im Bus
19. August	Neuchâtel	Schön, Nachmittag Wolken	Aufheizen 1 Liter Wasser Expresso Zuchetti und Ei 5 Liter Wasser	
24. August	Cernier	Nur wenig Sonne	Aufheizen bei Wolken 1 Crêpe...	
25. August	Cernier	Nur wenig Sonne	Aufheizen bei Wolken 10 Crêpes	

Anhang B: Gemessene Leistungen

Zusammenfassung Leistungen WATT

Datum	Speicher	Wetter		50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	Phasenübergang
06.07.02	Sn	+/-	Aufheizen normal, Sn	470								
07.07.02	Sn	gut	Aufheizen normal, Sn	620		600			500	480	334	600
11.07.02	Sn	gut	Aufheizen normal, Sn	587	578	630			467	382	222	(790)
27.07.02	Sn	gut	Aufheizen normal, Sn		561	572			519	401	255	753
	Sn		abgeschätzt, Sn	612		527			382		220	
12.07.02	Al	gut	Aufheizen normal, Al	635	635	689	536		408	408	255	
16.08.02	Al	+/- gut	Aufheizen normal, Al		530	460	438		487	397	223	
17.08.02	Al	+/- gut	Aufheizen normal, Al		451	540	516		409	294		
	Al		abgeschätzt, Al	602		498			322		126	

Datum	Speicher	Wetter		50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	Phasenübergang
06.07.02	Sn	-	Abkühlen (mit Deckel), Sn	-17								
07.07.02	Sn	-	<i>(Abkühlen (mit Deckel), Sn)</i>							-101		
11.07.02	Sn	-	Abkühlen (mit Deckel), Sn	-53	-78	-138	-138		-200	-286	-400	
	Sn		abgeschätzt, Sn	-38		-123			-268		-430	
12.07.02	Al	-	Abkühlen (mit Deckel), Al					-102	-231	-408	-460	
15.08.02	Al	-	Abkühlen (mit Deckel), Al			-161	-210		-310	-380		
	Al		abgeschätzt, Al	-48		-152			-328		-524	

Datum	Speicher	Wetter		50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	Phasenübergang
07.07.02	Sn	-	Abkühlen (ohne Deckel), Sn			-149			-250			
	Sn		geschätzt, Sn	-63		-223			-515		-843	
14.11.02	Al		Abkühlen (ohne Deckel), Al	-29	-77	-130	-204	-269	-367	-479	-616	
	Al		geschätzt, Al	-74		-252			-575		-937	

Datum	Speicher	Wetter		50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	Phasenübergang
27.07.02	Sn	-	Abkühlen (komplett isoliert), Sn					-38	-55	-84	-126	-46
28.-30.7	Sn	-	Abkühlen (komplett isoliert), Sn	-6	-17	-27	-43					
	Sn		geschätzt, Sn		-17		-41		-64		-86	
28.-30.7	Al	-	Abkühlen (komplett isoliert), Al	-7	-21	-34	-55					
17.08.02	Al	-	Abkühlen (komplett isoliert), Al				-47	-77	-118			
	Al		geschätzt, Al		-22		-52		-82		-111	

Datum	Speicher	Wetter		50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	Phasenübergang
11.11.02	Sn	-	Elektrisch aufheizen (1910W), Sn				994		1003	869		1007
14.11.02	Al	-	Elektrisch aufheizen (1910W), Al	1251	1247	1109	1025	960	981	956	773	

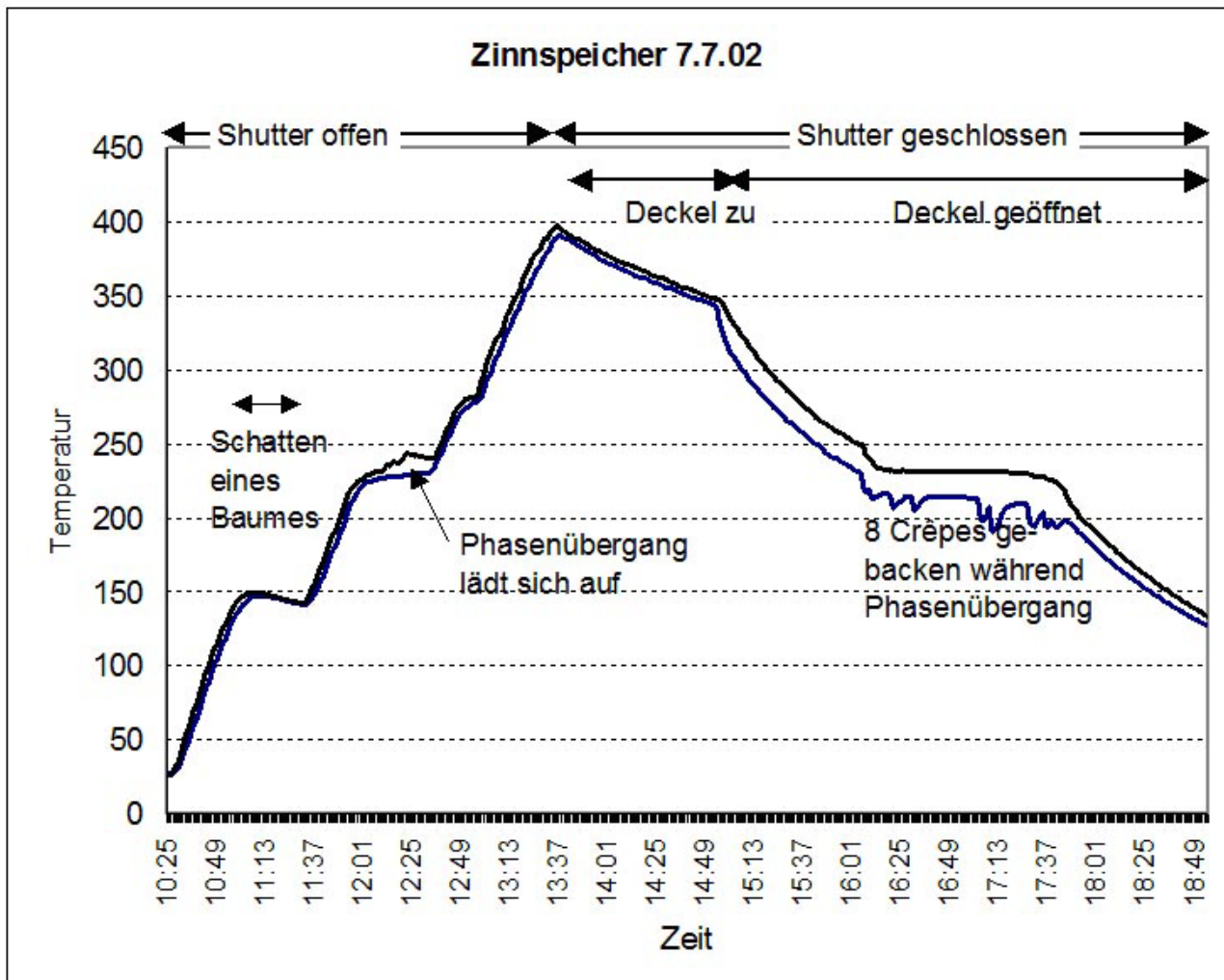
Um die Leistung zu berechnen, wurde jeweils zuerst die Steigung (in Grad Celsius pro Sekunde) der gemessenen Temperaturkurven bestimmt. Aus diesem Wert und der bekannten Wärmekapazität der Speicher konnte dann die Leistung bestimmt werden.

Anhang C: Wasser erhitzen auf dem Speicher

Datum	Kochgut, Kochtopf, Speicher	T _{Speicher}	Sonne 'ein/aus'	Heizleistung bei 40°/80°	Energiegehalt
				<i>(positive Zahl = Wasser + Topf, negative Zahl = Speicher)</i>	
15.8.02	2 Liter Wasser, 1kg, Al	200°C	ein	744W / 473W	
	Der Aluminiumspeicher war um 12 Uhr gerade genügend heiss, um (bei gleichzeitigem Aufheizen) 2 Liter Wasser in knapp ½ Stunde zu kochen.				
16.8.02	6 Liter Wasser, 1,9kg Stahl, Al	390°C -> 290°C	aus	1184W / 511W -1174W/-888W	0.58 kWh -0.7 kWh
	Bei ganz vollem Speicher ist die Heizleistung ausreichend. Es braucht knapp ¾ Stunden, um 6 Liter Wasser zu kochen. Die Heizleistung ist dabei grösser, als bei Direktbenützung ohne Speicher.				
16.8.02	6 Liter Wasser, 1,9kg Stahl, Al	240°C -> 170°C	aus	511W/-	0.37 kWh -0.98 kWh
	Die Speichertemperatur war zu tief, um 6 Liter Wasser zu kochen. Nach über 1 Stunde war das Wasser 80 Grad heiss.				
19.8.02	1 Liter Wasser, 1 kg Stahl, Sn	160°C	ein	272W / 199W	
	Die Temperatur von 160°C reichte aus, um (bei gleichzeitigem Aufheizen des Speichers) 1 Liter Wasser in knapp ½ Stunde zu kochen.				
19.8.02	5 Liter Wasser, 1,9kg Stahl, Sn	215°C (Zinn z.T. flüssig) -> 140°C	aus	459W / -	
	Der Speicher enthielt nicht genügend Energie, um 5 Liter Wasser zu kochen. Nach 1 ½ Stunden war das Wasser 80°C heiss.				

Anhang D: Beispiel einer Messung

Die folgende Grafik zeigt als Beispiel den Temperaturverlauf während einem sehr schönen Tag (7.7.02, Genf). Die etwas höhere Temperatur ist jeweils in der Mitte des Speichers gemessen, die etwas tiefere in der Herdplatte:



Temperaturverlauf des Zinnspeichers am 7.7.02 in Genf.

Anhang E: Technik der Schefflerspiegel

Die grundlegende Idee, die zur Entwicklung der Schefflerspiegel führte, war es, das solare Kochens so bequem wie möglich zu gestalten. Dazu sollte die Kochstelle ortsfest sein, am besten im Haus selbst. Der konzentrierende Spiegel befindet sich in der Sonne, vor dem Haus.

Gleichzeitig sollte das Gerät so gebaut sein, dass es in jeder ländlichen Schweisswerkstatt in südlichen Ländern nach einer gewissen Ausbildungsphase hergestellt werden kann. Wolfgang Schefflers Erklärung des grundlegenden Prinzips [Scheffler]:

‘Die beste Lösung dazu war die eines exzentrischen, verbiegbaren Parabolspiegels, der um eine Achse parallel zur Erdachse synchron mit der Sonne dreht. Durch Verbiegen wird er auf mechanisch einfache Weise auf die Jahreszeiten eingestellt.

Der Spiegel ist ein kleiner, seitlicher Ausschnitt eines wesentlich größeren, runden Paraboloids. Durch die schräge Schnittführung entsteht dabei die typische elliptische Kontur des Scheffler-Reflektors. Das von diesem Ausschnitt des Paraboloids reflektierte Licht fällt von der Seite auf den ein Stück weit entfernten Brennpunkt.

Die Achse für die tageszeitliche Nachführung liegt in Nord-Süd Richtung parallel zur Erdachse und läuft durch den Schwerpunkt des Reflektors.

So ist er immer im Gleichgewicht und das mechanische Uhrwerk muß nur mit einer geringen Kraft angetrieben werden um ihn synchron mit der Sonne zu drehen.

Damit sich der Brennpunkt dabei nicht bewegt liegt er auf der Rotationachse. Der Abstand zwischen Brennpunkt und Reflektormitte hängt von der gewählten Ausgangsparabel ab.

Das konzentrierte Licht wird so während des Tagesverlaufs nur um sein eigenes Zentrum rotieren, sich aber in keiner Richtung seitlich bewegen. Der Brennpunkt bleibt also fixiert, was natürlich praktisch ist, da der Kochtopf nun auch nicht bewegt werden muß.

Im Verlauf der Jahreszeiten ändert sich der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung um $\pm 23,5^\circ$ in Bezug auf die Senkrechte zur Erdachse. Um den gleichen Winkel muß nun auch das gesamte Paraboloid gekippt werden, da es immer auf die Sonne ausgerichtet bleiben muß. Sonst ergibt sich kein scharfer Brennpunkt. Die Mitte des Reflektors und die Lage des Brennpunkts sollen sich aber auf keinen Fall bewegen.

Dies ist nur zu bewerkstelligen, wenn dem Reflektor für jeden jahreszeitlichen Sonnenwinkel, d.h. für jeden Tag des Jahres, eine andere Parabel zugrunde liegt. Der Spiegel muss also seine Form verändern.

Der Spiegelrahmen des Schefflerspiegels wird für die Tag- und Nachtgleiche gebaut. Durch Kippen und elastische Verformung des Spiegelrahmens können dann alle anderen Parabeln ausreichend genau eingestellt werden.'

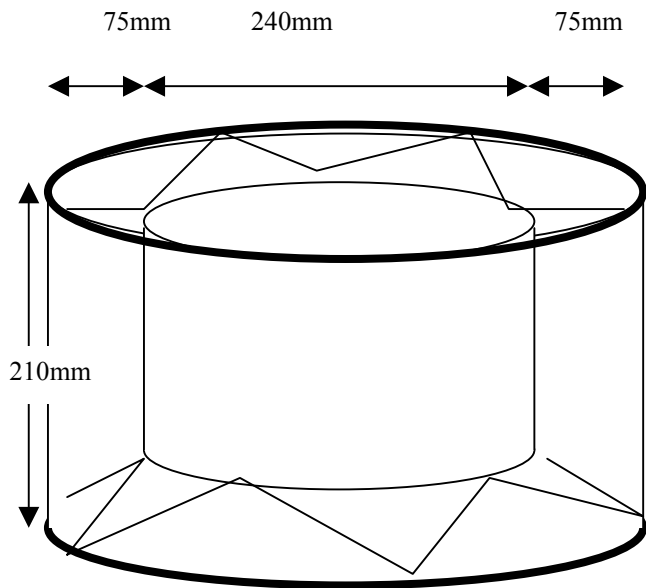
Die Experimente dieser Studie wurden mit drei verschiedenen 2m² Schefflerspiegeln durchgeführt. Zwei der Spiegel hatten ein Gestell aus Stahl. Der dritte und im Prinzip leistungsfähigste Spiegel aus Aluminium musste verstärkt werden, da sich die Konstruktion unter der Last der Speicher verbog und der Fokus ungenau wurde.

Anhang F: Details der Speicherelemente

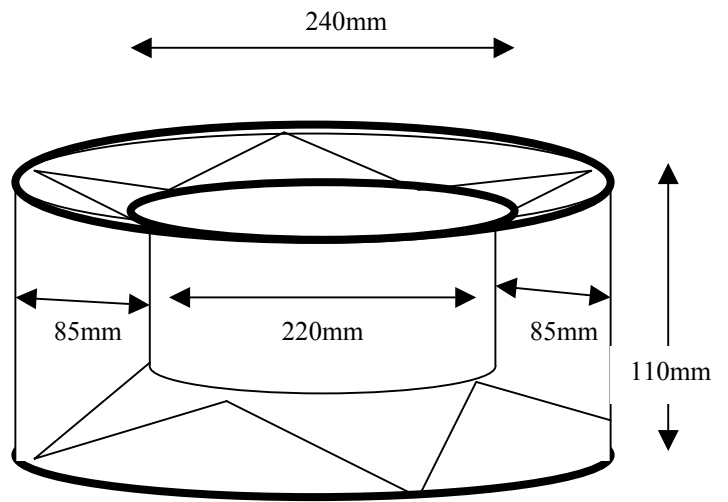
- Für den Aluminiumspeicher wurde ein Zylinder von 240mm Durchmesser und 210mm Länge verwendet (Kauffmann, La Chaux-de-Fonds).
- Für den Zinnspeicher wurde eine obere Crêpes- und Herdplatte aus Stahl von 240mm Durchmesser und 10 mm Dicke verwendet, als untere Absorberfläche eine Stahlplatte von 220mm Durchmesser und 5 mm Dicke (Heizmann, Lauingen). Mit einer Stahlplatte wurde ein Zylinder von 220mm Durchmesser und 110 mm Höhe zusammengeschweisst. Ein Loch auf der Absorberseite diente zum Einfüllen des Zinns.
- Unter die Herdplatte wurden Stahlstäbe angeschweisst, um den Wärmeübergang Zinn-Stahl zu verbessern. Leider ist es nicht gelungen, die Eisenplatte zu verzinnen (trotz Flussmittel).
- Das Zinn wurde in der Feinhütte Halsbrücke GmbH zu einem Preis von 10,25 Euro / kg bestellt.
- Als Isolation wurde ein 'Hi-Tec' Material verwendet ('Microterm'). Dieses keramische Material hat (laut Hersteller) eine Wärmeleitfähigkeit von unter 0.03 W/m²K bei 400°C (im Vergleich zu Werten von 0.08 – 0.12 W/m²K bei 400°C für Faserisolationen). Die Beschaffung einer kleinen Menge des in Belgien hergestellten Materials war aufwendig: es wurde über einen tschechischen Keramikofenhersteller eingekauft. Im Deckel und im Untersatz wurde 2.5 - 5cm 'Microtherm' plus Glaswolle verwendet (total 10cm).
- Die Aussenhaut der Speicher besteht aus einem 0.5mm dicken Edelstahlblech, die obere Abdeckung der Isolation aus einer 0.2mm dicken Edelstahlfolie und die untere Abdeckung der Isolation aus Glasfasergewebe. Die Beschaffung der Edelstahlfolie war schwierig.
- Die Speicher wurden in je 2 Aluminiumringen von 390mm Durchmesser an Edelstahldrähten aufgehängt. Die Aussenhaut wurde daraufhin um die Aluminiumringe herum befestigt.

Skizzen der Speicher:

Aluminiumspeicher:



Zinnspeicher:



Anhang G: Weitere Eutektikas, die als Latentwärme- Speichermedium in Frage kommen

Eutektikas, deren T_m ausserhalb des gewünschten Bereichs liegen:							
45%NaCl 55%CaCl	506°						
40%NaCl 60% MgCl	450°						
40% NaF 60% BeF	340°						
40% KCl 60% FeCl ₂	355°C						
KCl + AlCl ₃	140°						
NaCl + AlCl ₃	110°						
NaCl + FeCl ₃	156°						
NaNO ₃ + NaNO ₂ + KNO ₃	143°						