



# Energieverbrauchsminimierung von Kühlschränken durch thermische Optimierung

## JAHRESBERICHT 2008

Autor und Koautoren	Dr. Matthias Koebel, Thomas Doerwaldt
beauftragte Institution	Empa Dübendorf
Adresse	Überlandstrasse 129
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 823 4780
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	102855 / 153665
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	15.11.2008 – 31.8.2009
Datum	8.12.2008

### Zusammenfassung

Das Kühlschrankprojekt zwischen der Forster Küchen und Kühltechnik AG und der Abteilung Bautechnologien der Empa Dübendorf erlebte einen glücklichen Start auf Ende Jahr. Seit dem Startschuss Mitte November sind bereits erste Messungen an Kühlgeräten erfolgt sowie Vorbereitungen zur Erstellung eines thermischen 3D Modells von Kühlgeräten durchgeführt worden. Die Vorversuche zeigen einerseits, dass Unterschiede zwischen verschiedenen geschäumten Schränken in Ihrer Isolationsleistung ( $k \cdot A$  Werte) messbar sind. Die Abweichung von identisch geschäumten Schränken ist gering, was wiederum auf eine gleichmässige Qualität des Schaums und eine homogene Schaumverteilung schliessen lässt. 3D Konstruktionszeichnungen werden im Moment vereinfacht und wichtige Detaillösungen (Türabdichtung, Wärmebrücken) für vertiefte Untersuchungen sondiert. So wird in Kürze ein umfassendes thermisches Modell erstellt werden, welches Einflüsse von Material- und Designänderungen abschätzbar macht. Alle weiteren im Projektantrag definierten Aufgaben werden im neuen Jahr in Angriff genommen.

# Projektziele

Mit zunehmender Energieverknappung sowie der wachsenden Erkenntnis globaler Klimawandlungen gilt es, den Einsatz fossiler Brennstoffe zu reduzieren. Ein möglicher Ansatzpunkt zur Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs ist die Effizienzsteigerung von elektrischen Kleinverbrauchern wie etwa Haushaltsgeräten. Seit mehreren Jahren ist im europäischen Raum die Klassifizierung solcher Haushaltsgeräte bezüglich Effizienz üblich. Ziel dieses Projekts ist es, die Haupteinsparmöglichkeiten von Kühlschränken durch Optimierung der thermischen Isolation ausfindig zu machen. Verbesserungsmöglichkeiten werden sowohl seitens des Designs (Wärmebrücken, Dichtheit etc.) sowie bei der Wahl der Isolation (PU-Ausschäumung, Zuschlagsstoffe, Hochleistungsisolation) gesucht. Das Gesamtprojekt besteht aus den folgenden drei Teilaufgaben (Work packages, WP):

## WP 1 Thermische 3D-Modell Optimierung

**WP 1a:** Aufgrund von 3D Zeichnungen wird ein thermisches Modell erstellt, welches die Gesamt-wärmeverluste abschätzt, Schwachstellen aufzeigt, sowie den Einfluss der Variation von Design und Materialparametern aufzeigt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergibt sich ein Optimierungspotential für das Design bzw. den Fließbandherstellungsprozess.

**WP1 b:** Zum Vergleich sollen die unter WP 2a sowie 2b gemessenen Daten dienen, was wiederum eine Validierung des Modells ermöglicht.

## WP 2 PU-Isolationsausschäumung

**WP 2a:** Versuche am Gerät (Kühlschrank): Wärmeverluste messen für verschieden geschäumte Testobjekte. Es sollen zwischen 10 und 20 Kühlschränke an der Empa ausgemessen werden. Hier stellt sich einerseits die Frage nach der Reproduzierbarkeit sowie nach systematischen Unterschieden in den jeweils verwendeten Schaumrezepturen.

**WP 2b:** Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schaumproben welchen an verschiedenen Orten aus dem geschäumten Gerät ausgeschnitten wurden. Diese Messungen sollen die Isolationseigenschaften des Materials genauer charakterisieren.

**WP 2c:** Thermographie: Während dem Betrieb sollen Fehlstellen am Gerät mittels IR Kamera sichtbar gemacht werden.

**WP 2d:** Ausschäumungsversuche im Labormassstab an der Empa mit und ohne Zuschlagsstoffe. Dabei soll wie folgt vorgegangen werden: Ausschäumen von Kartonschachteln, Tranchen schneiden und zum Schluss Messung der Wärmeleitfähigkeit des so produzierten Schaums. Als erster Zuschlagsstoff soll Aktivkohle als „opacifier“ verwendet werden, Aerogelgranulat wird als technisch schwierig durchführbar eingestuft. Dennoch sollen auch Versuche mit Aerogelzuschlagsstoffen durchgeführt werden. Bringen derartige Zuschlagsstoffe eine Verminderung der  $\lambda$ -Werte und wenn ja mit welchen Mehrkosten (pro Gerät) ist diese verbunden ?

**WP 2e:** Ein Teil der unter d) hergestellten Proben soll an Luft bei Raumtemperatur bzw. bei 70°C gealtert werden, um den Einfluss der Alterung / Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit aufzuzeigen.

## WP 3 Hochleistungsisolation

**WP 3a:** Hauptziel einer ersten Versuchsreihe ist die Herstellung eines low-cost VIP, wobei eine verminderte Lebensdauer von 15 Jahren in Kauf genommen wird. Existierende Kontakte (H. Simmler, T. Doerwaldt) zu allen drei deutschen Herstellern Va-Q-Tec, Proextherm und Variotec sollen zur Bemusterung mit Kernmaterialien / Folien dienen. Aus diesen Materialien sollen neue VIP Prototypen an der Empa hergestellt werden. Was die Kernmaterialien betrifft, gilt es, den Anteil an pyrogener Kieselsäure (teuer) so weit als möglich zu reduzieren und durch gefällte Kieselsäure oder andere kostengünstigere Materialien zu ersetzen. Die so hergestellten „low-cost“ VIP Panele werden dann einzeln getestet ( $\lambda$  Wert Messung, Dichtigkeit, künstliche Alterung).

**WP 3b:** Eine Untersuchung von ausgewählten produktionstechnischen Aspekten bei der VIP-isolierten Kühlgeräteherstellung soll folgende Fragen beantworten:

- Mit welchem Fertigungsmehraufwand ist der VIP Einsatz verbunden ?
- Wo ist der Einbau sinnvoll (Tür, Seite, Rückwand) ? Hierfür werden verschiedene Szenarien mit dem unter WP 1 erstellten 3D Modell durchgespielt.
- Welcher zeitliche Verlust der „Isolierleistung“ bzw. Anstieg des elektrischen Verbrauchs ist durch die Alterung der VIP Panele (konventionell / „low cost“) zu erwarten ?

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Als erstes wurden die Messungen am Gerät (WP2a) sowie das thermische 3D Modell (WP1a) in Angriff genommen, da diese den grössten Zeitaufwand aufweisen. Alle anderen Aufgaben werden im neuen Jahr (2009) in Angriff genommen.

*WP1a thermisches Modell:* Eine erste Analyse der Konstruktionszeichnungen ist erfolgt. Wichtige Elemente wurden identifiziert und mögliche Vereinfachungen werden zur Zeit zusammengestellt. Das Modell wird Anfang 2009 aufgestellt bzw. aufgrund der existierenden 3D Konstruktionszeichnungen vereinfacht und in ein thermisch numerisches Rechenprogramm eingespielen. Erste Resultate sind gegen Ende Februar zu erwarten.

*WP2a Versuche am Gerät (Kühlschrank):* Forster AG lieferte Anfang November 2008 vier verschieden geschäumte Kühlschränke des Typs Duoplus EK1422. Dabei kamen der zurzeit im Produktionsbetrieb eingesetzte Schaumtyp sowie drei weitere PU-Schaumrezepturen zum Einsatz.

Die Messung an den Geräten erfolgte nach dem Prinzip einer kalorimetrischen Messung, wobei eine bestimmte Temperaturdifferenz Innen/Aussen eingestellt ( $\Delta T \sim 20^\circ\text{C}$ ) und die dazu benötigte elektrische Leistung ( $P_{el} \sim 32 \text{ W}$ ) aufgezeichnet wurde. Im Rahmen eines ersten Vorversuchs (Aufbau 1) wurde die Kühlkammer des Geräts mit einer Widerstandsheizung und einem Lüfter versehen. Die elektrischen Durchführungen wurden als dünnes Band aufgebracht, was Wärmeverluste bei den Türdichtungen minimierte. Im Inneren des Kühlschranks wurden an verschiedenen Orten Temperaturfühler angebracht um die Temperaturverteilung innerhalb des Geräts verfolgen zu können. Die Kühlgeräte wurden in einem klimatisierten Raum mit  $T_{\text{Raum}} = 16.8 \pm 0.3^\circ\text{C}$  aufgestellt. Im Laufe einer Vorversuchsreihe unter Verwendung von Aufbau 1 machte sich eine deutliche Temperaturverteilung innerhalb der Schränke bemerkbar. Dennoch sind Unterschiede in der Isolationsleistung der verschiedenen Schaumtypen klar sichtbar:

### Resultate Vorversuch (Aufbau 1)

	LuTa [ $^\circ\text{C}$ ]		LuTi [ $^\circ\text{C}$ ]		Leistung [W]		Leistung / Differenztemp.	
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
<b>Schrank 12</b>	16.19	0.476	36.92	0.187	34.00	0.036	1.640	0.006
<b>Schrank 2</b>	15.97	0.080	36.96	0.610	33.64	0.080	1.602	0.005
<b>Schrank 9</b>	16.50	0.139	36.80	0.892	32.08	0.063	1.578	0.003
<b>Schrank 4</b>	15.98	0.108	36.95	0.379	33.61	0.088	1.607	0.006

Bemerkung zu den tabellierten Resultaten: Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (Stabw) für die Lufttemperaturen innen (LuTi) und aussen (LuTa) wurden sowohl zeitlich (24h) sowie räumlich (4 Thermoelemente als Temperaturfühler) für die jeweilige Messung aufgezeichnet. Für den Vorversuch waren zur Messung von LuTa nur zwei Fühler im Einsatz, für den Hauptversuch (Aufbauten 2,3,4, siehe Anhang, Daten siehe unten) waren es deren 8.

Weitere Versuche wurden unternommen um die oben beschriebenen Schichtungseffekte besser kontrollieren bzw. minimieren zu können. Nur so ist die Vertraulichkeit der Kühltischinnentemperatur und somit der gemessenen Temperaturdifferenz  $\Delta T$  Innen-Aussen gewährleistet. Eine Zusammenstellung der Aufbauten und der damit verbundenen Veränderungen sind im Anhang zusammengestellt. Die letzte Versuchsanordnung „Aufbau 4“ zeigte die besten Resultate.

Die untenstehenden Tabellen zeigen die Resultate für die ersten drei gemessenen Kühlgeräte, welche jeweils mit einer anderen PU-Schaummischung bei Forster AG ausgeschäumt und bei der Empa in Dübendorf zur Messung angeliefert worden waren. Aus den Resultaten geht hervor, dass von den drei gezeigten Ausschäumungen Schrank 1 am schlechtesten, Schrank 4 mittelmässig und Schrank 7 thermisch am besten isolieren. Die Resultate zeigen zudem dass mit abnehmender Schichtung der Luft auch die gemessenen  $P_{el} / \Delta T$  Werte abnehmen.

### Resultate Schrank 1

	LuTa [°C]		LuTi [°C]		Leistung [W]		Leistung / Differenztemp.	
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
<b>Aufbau 2</b>	17.02	0.341	37.38	0.404	34.99	0.065	1.680	0.004
<b>Aufbau 3</b>	16.66	0.310	36.90	0.494	33.98	0.094	1.634	0.005
<b>Aufbau 4</b>	16.64	0.398	36.94	0.365	32.48	0.043	1.591	0.003

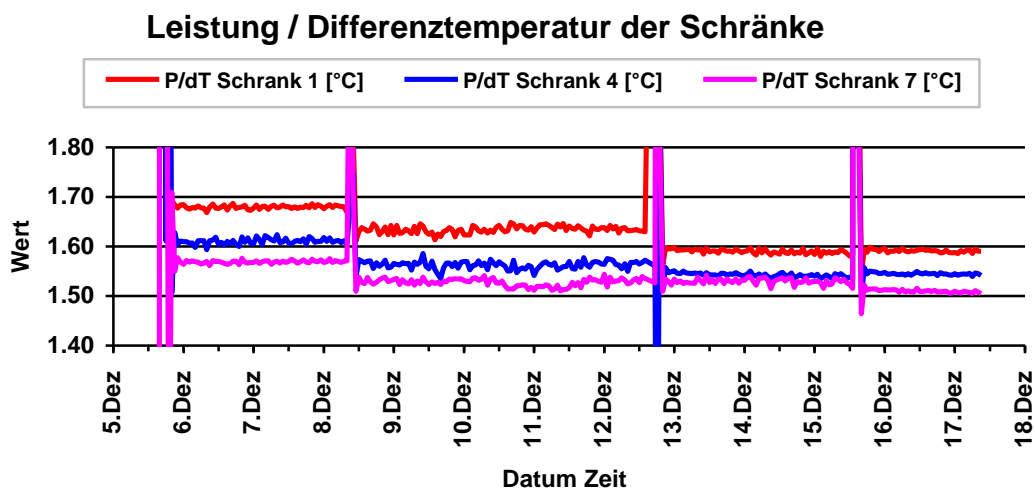
### Resultate Schrank 4

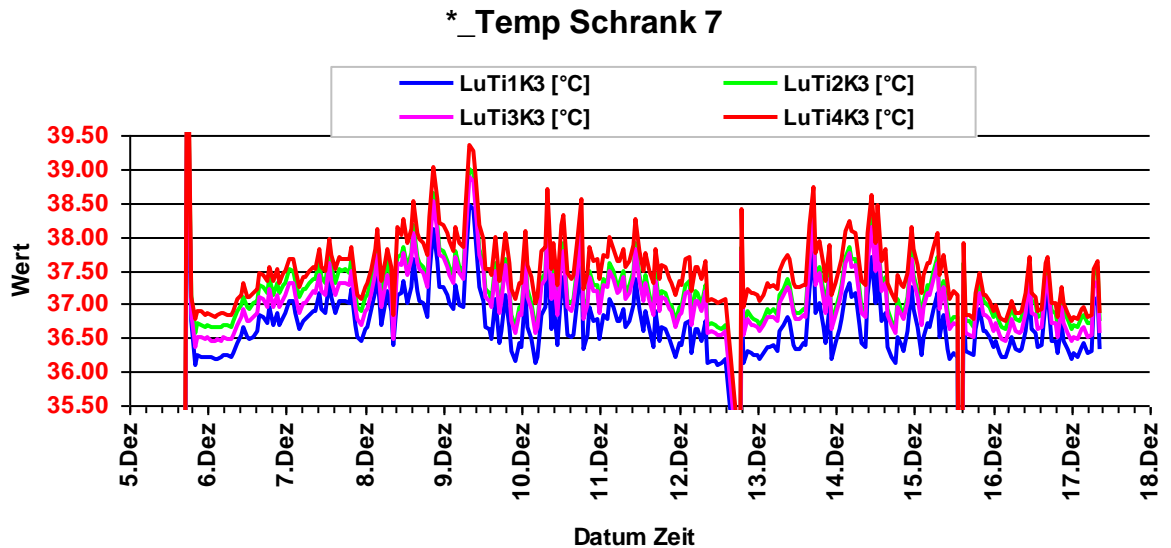
	LuTa [°C]		LuTi [°C]		Leistung [W]		Leistung / Differenztemp.	
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
<b>Aufbau 2</b>	17.02	0.341	36.85	0.391	32.61	0.055	1.611	0.004
<b>Aufbau 3</b>	16.66	0.310	36.36	0.446	31.59	0.124	1.566	0.006
<b>Aufbau 4</b>	16.64	0.398	36.52	0.357	31.19	0.024	1.544	0.002

## Resultate Schrank 7

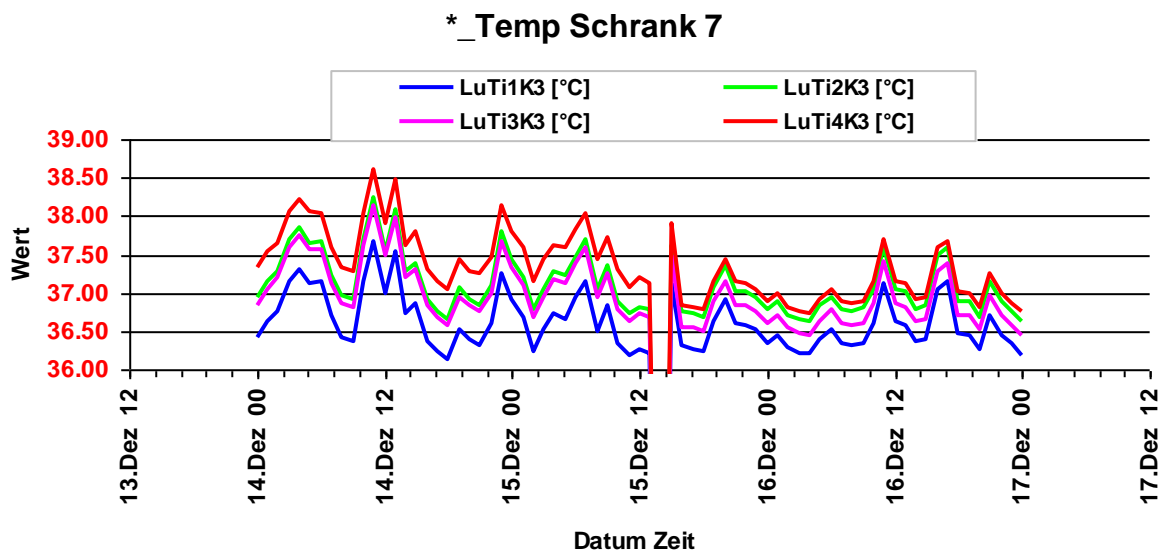
	LuTa [°C]		LuTi [°C]		Leistung [W]		Leistung / Differenztemp.	
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
<b>Aufbau 2</b>	17.02	0.341	36.95	0.346	31.83	0.045	1.570	0.003
<b>Aufbau 3</b>	16.66	0.310	36.44	0.403	30.88	0.107	1.531	0.006
<b>Aufbau 4</b>	16.64	0.398	36.54	0.371	30.52	0.027	1.509	0.002

Die untenstehende Grafik zeigt sehr schön wie die Resultate durch den Aufbau der Heizung beeinflusst werden. Am 7. Dezember war Aufbau 2 in den Schränken. Am 9. Dezember wurden die zusätzlichen Ventilatoren unter dem Dach montiert. Am 13. Dezember erfolgte der Umbau auf die sogenannten Kamine, ein Halbkartonrohr mit quadratischem Querschnitt, wie sie im Anhang, Aufbau 4 ersichtlich sind. Die Änderungen wurden am 13. 12 nur an den beiden Schränken 1 und 4 vorgenommen. Am 16. Dezember wurde dann auch der Schrank Nr. 7 mit dem Kamin ausgerüstet.





Die obige Grafik zeigt die Temperaturverteilung im Schrank 7. Die Temperaturschichtung ist ab dem Umbau auf Aufbau 4. vom 16.12. immer deutlich unterhalb von einem Grad Celsius.



Die Grafik zeigt die Veränderung durch den Umbau am 13. Dezember. Vor dem Umbau ist der Aufbau 3 mit Zusatzventilator unter der Decke aktiv. Durch den verbesserten Aufbau 4 mit Kamin wird eine bessere Durchlüftung / Durchmischung des Innenraumes erreicht. Da die Heizleistung vergleichsweise und die Abkühlungseffekte bedeutend sind, entspricht die Temperaturverteilung nicht einer natürlichen Temperaturschichtung (oben warm, unten kalt). Der Fühler LuT1K3 ist der oberste und der Fühler LuTi4 ist der unterste Fühler im Schrank. Die Warmluft tritt unten aus und sie wird an den kalten Wänden abgekühlt. Der kälteste Punkt im Schrank befindet sich mit dieser Anordnung unter der Decke.

## **Nationale Zusammenarbeit**

Die Zusammenarbeit zwischen der Abteilung Bautechnologien der Empa Dübendorf und der Forster Küchen- und Kühltechnik AG erwies sich bis dato als durchaus fruchtbar. Weitere nationale Zusammenarbeiten im Universitären Forschungsbereich bezüglich PU-Isolierschaumbverbesserungen und Zuschlagsstoffe (e.g. WP2d) sind denkbar.

## **Internationale Zusammenarbeit**

Die deutschen Hersteller von Vakuumisulationspanelen (VIP) Va-Q-Tec, Proextherm und Variotec könnten in ein Folgeprojekt mit einbezogen werden, falls es uns gelingen sollte im Rahmen des WP3a ein low-cost VIP mit verminderter Lebensdauer produzieren zu können.

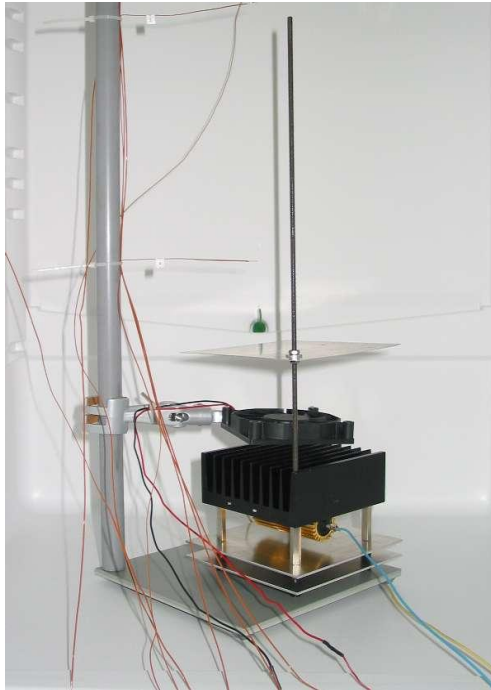
## **Bewertung 2008 und Ausblick 2009**

Die bereits in Angriff genommenen Arbeiten sind nach Plan verlaufen und es scheint als sei unsere Messmethode geeignet um systematische Unterschiede in der Isolationsleistung der mit verschiedenen PU-Präparationen ausgeschäumten Schränke 1, 4 und 7 reproduzierbar aufzuzeigen. Optimierungen der Messanordnung haben eine Verbesserung der Vertraulichkeit der Ergebnisse bzw. eine geringere Standardabweichung der Resultate mit sich gebracht. Da das Projekt erst Mitte November gestartet wurde, liegt bisweilen erst ein beschränktes Volumen an Resultaten vor. Alle weitere Workpackages werden im Jahr 2009 in Angriff genommen und voraussichtlich gemäss Termin abgeschlossen.



## Anhang

Aufbauten / Messanordnung zur Bestimmung des Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten ( $k$ -A – Werte) für WP 2a



### Aufbau 1

**Beschreibung:** (von unten nach oben)

Grundplatte

2x Alublech als Strahlungsschutz

El. Widerstand 15 Ohm = 60W Heizleistung

Kühlblech zur Wärmeverteilung

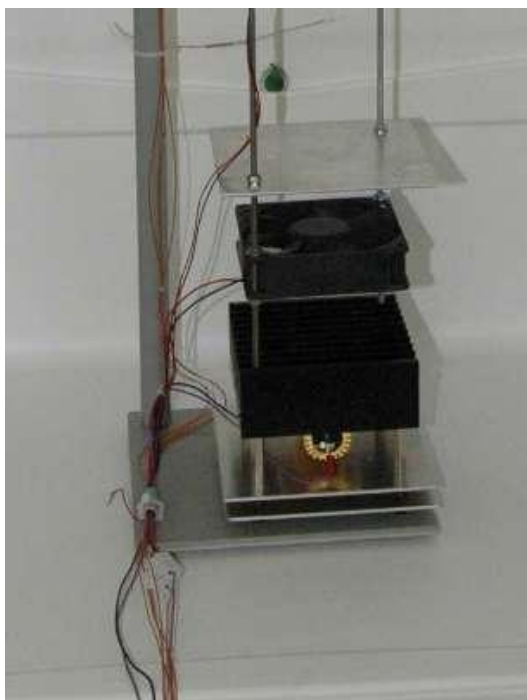
Ventilator mit 36 m<sup>3</sup>/h Förderleistung

1x Alublech als Strahlungsschutz

Kunststoffrohr mit 4 Thermoelementen

**Bemerkungen:**

Der Luftumsatz war zu klein und die Temperaturschichtung im Schrank war ungenügend



### Aufbau 2

**Beschreibung:** (von unten nach oben)

Grundplatte

2x Alublech als Strahlungsschutz

El. Widerstand 10ohm = 90W Heizleistung

Kühlblech zur Wärmeverteilung

Ventilator mit 83 m<sup>3</sup>/h Förderleistung

1x Alublech als Strahlungsschutz

Kunststoffrohr mit 4 Thermoelementen

**Bemerkungen:**

Die Temperaturschichtung im Schrank wurde besser. Der Dachbereich blieb aber noch ungenügend.



### Aufbau 3

**Beschreibung:** (von unten nach oben)

Grundplatte

2x Alublech als Strahlungsschutz

El. Widerstand 10 Ohm = 90W Heizleistung

Kühlblech zur Wärmeverteilung

Ventilator mit 83 m<sup>3</sup>/h Förderleistung

1x Alublech als Strahlungsschutz

1x Alublech als Strahlungsschutz Dachbereich

Ventilator mit 36m<sup>3</sup>/h nach oben blasend

Kunststoffrohr mit 4 Thermoelementen

**Bemerkungen:**

Der zweite Ventilator verbesserte die Situation im Dachbereich. Es bildeten sich aber zwei warme Zonen im Boden und im Deckenbereich.



### Aufbau 4

**Beschreibung:** (von unten nach oben)

Grundplatte

2x Alublech als Strahlungsschutz

El. Widerstand 10 Ohm = 90W Heizleistung

Kühlblech zur Wärmeverteilung

Ventilator mit 83 m<sup>3</sup>/h Förderleistung

1x Alublech als Strahlungsschutz

„Kamin“ aus Halbkarton

Kunststoffrohr mit 4 Thermoelementen

**Bemerkungen:**

Der Kamin saugt die Luft aus dem Deckenbereich. Die Luft wird dadurch im ganzen Schrank umgewälzt. Die Homogenität der Lufttemperatur verbessert sich nochmals zusätzlich.