



## Laborbericht

# Experimentelle Methoden für Ingenieuranwendungen

## Strahlungskorrigierte Temperaturmessungen bei Temperaturen um 1000°C



Maximilian Boosfeld

Michel Heusser

Kaspar Schlegel

(November 2012)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Berechnungsmethode</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Resultate und Diskussion</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Fehlerquellen und Schlussfolgerungen</b>	<b>8</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>9</b>
<b>A</b>	<b>MATLAB Code</b>	<b>10</b>
<b>B</b>	<b>Messungen</b>	<b>12</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Reaktor im Betrieb. Quelle: [1]	1
2.1	Schematische Versuchsanordnung	2
2.2	Querschnitt Absaugvorrichtung/Lanze mit den Thermoelementen (rot)	3
4.1	Messresultate bei $T = 650^{\circ}C$	6
4.2	Messresultate bei $T = 950^{\circ}C$	7
B.1	Temperaturmessungen bei $T = 650^{\circ}C$ und $T = 950^{\circ}C$	12

# Kapitel 1

## Einführung

Im Gebiet der Hochtemperatur Solar-Chemie (z.B., für die Herstellung von Syngas durch den Zn/ZnO-Zyklus) sind zuverlässige Temperaturmessungen der Fluide in Frage, von zentraler Bedeutung. Da Wärmestrahlung proportional zur vierten Potenz der Temperatur ist, fällt diese bei höheren Temperaturen (ab  $800^{\circ}\text{C}$ ) ins Gewicht und übernimmt eine viel wichtigere Rolle. Der Thermoelement, der zuständig für die Messung der Gastemperatur ist, beginnt deswegen bei höheren Temperaturen zu lügen, weil es nicht nur vom heissen Fluid sondern auch von der Strahlung des heissen Reaktors geheizt wird. In der Abbildung 1.1 sieht man ein solches Solar-Reaktor im Betrieb.

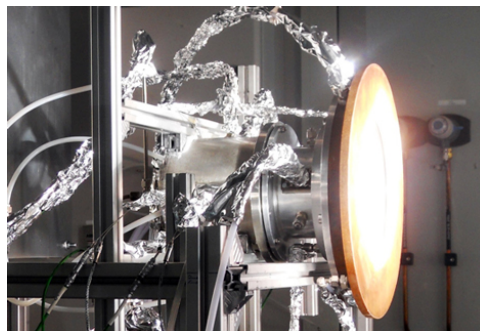


Abbildung 1.1: Reaktor im Betrieb. Quelle: [1]

Den oben erwähnten Effekt kann man verringern indem man das Thermoelement mit einem Strahlungsschild umschliesst um den Strahlungsaustausch mit der Umgebung zu verkleinern. Durch den schnellen Fluss des Betriebsgases, wird das Thermoelement durch Konvektion annähernd auf die eigentliche Gastemperatur abgekühlt. Die bekannte erzwungene Konvektion hilft uns dann die Messabweichung am Thermoelement beschreiben und quantifizieren. Wie dieses Effekt praktisch realisiert wird, wird im nächsten Kapitel im Detail erklärt.

# Versuchsaufbau

The diagram illustrates a gas chromatograph setup for measuring the vapor pressure of a liquid mixture. The system components and their connections are as follows:

- Gas Supply:** An  $N_2$  cylinder provides the carrier gas.
- Flow Control:** The gas passes through a flow controller (FIC) and a flow restrictor (Strömungs-richter).
- Sample Introduction:** The gas enters a sample tube (Lanze) housed within a furnace (Rohröfen).
- Temperature Monitoring:** Five temperature sensors ( $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ ) are placed along the sample tube and the cooling tower (Kühlturm) to monitor the temperature profile.
- Pressure Monitoring:** The inlet pressure ( $V_{in}$ ) and outlet pressure ( $V_s$ ) are measured.
- Heat Exchange:** The sample tube is surrounded by a cooling tower (Kühlturm) and a heat exchanger (Wärmetauscher) to maintain a controlled temperature environment.
- Flow Control and Pulsation Damping:** The gas flow is controlled by a second FIC and a pulsation damper (Pulsationsdämpfer) to ensure stable flow.
- Membrane Pump:** A membrane pump (Membranpumpe) maintains the vacuum at the end of the system.
- Data Acquisition:** A data acquisition unit (Datenerfassung) is connected to the temperature sensors and the flow controllers to record the data.

Der in den Ofen eintretende Gasstrom kann mittels Massendurchflussmesser gemessen und geregelt werden. Eine Lanze/Absaugvorrichtung saugt mithilfe einer Membranpumpe einen Teil des Gases ab. Der Aufbau der Lanze ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Insgesamt werden durch vier Thermoelemente vier Temperaturen gemessen.  $T_1$  ist die verfälschte Gastemperatur,  $T_2$  die Temperatur am geschützten Thermoelement und  $T_3$  und  $T_4$  die Temperatur des Schirms (für die Berechnung wird die Schirmtemperatur gemittelt). Die Datenerfassung der gemessenen Temperaturen übernimmt ein Computer. Das abgesaugte Gas wird danach gekühlt, um die nach-

folgenden Instrumente nicht allzu hohen Temperaturen auszusetzen. Der folgende Massendurchflussregler regelt und bestimmt den Gasstrom. Anschliessend geht das Gas an die Umgebung. Der grösste Teil des Gases wird jedoch nicht abgesaugt, sondern verlässt den Ofen und wird in einem Kühlturm auf Umgebungstemperatur gebracht und verlässt dann den Ofen.

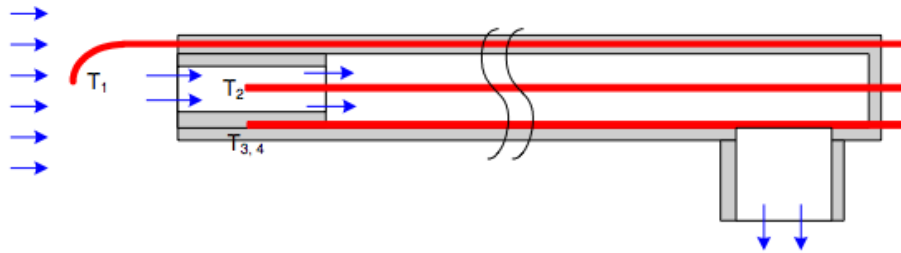


Abbildung 2.2: Querschnitt Absaugvorrichtung/Lanze mit den Thermoelementen (rot)

In unserem Experiment werden die Temperaturen  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  und  $T_4$  bei zwei verschiedenen Ofentemperaturen  $T_H$  und jeweils drei unterschiedlichen Absaugvolumenströmen  $V_s$  gemessen.

## Kapitel 3

# Berechnungsmethode

Um die Gastemperatur aus den gemessenen Temperaturen zu berechnen, betrachten wir die Spitze des geschützten Thermoelementes ( $T_2$ ) und wenden die Energieerhaltung an (siehe Gleichung 3.1). Dabei gibt es drei Arten von Wärmeübertragung: Konvektion vom Gas zum Thermoelement, Wärmestrahlung von der Innenwand des Schirmes zum Thermoelement und Wärmeleitung im Thermoelement selbst. Die Energieerhaltung ist also:

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cond} = 0 \quad (3.1)$$

Der konvektive Anteil  $\dot{Q}_{conv}$  ist mit der folgenden Gleichung 3.2 zu berechnen:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{tc} \bar{h} (T_{gas} - T_2) \quad (3.2)$$

Dabei ist  $A_{tc}$  die Fläche des Thermoelementes, welche dem Gas ausgesetzt ist und  $\bar{h}$  der gemittelte Wärmeübertragungskoeffizient. Der Wärmeübertragungskoeffizient kann ermittelt werden, da die Strömungsbedingungen bekannt sind und Korrekturfaktoren aus Kalibrierungsversuchen ermittelt wurden.

Die Wärmestrahlung  $\dot{Q}_{rad}$  ist durch die Gleichung 3.3 gegeben.

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{A_{tc} \sigma (T_{sh}^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_{tc}} + \frac{D_{tc}}{D_{sh}} \left( \frac{1}{\epsilon_{sh}} - 1 \right)} \quad (3.3)$$

Dabei ist  $T_{sh} = \frac{T_3 + T_4}{2}$  die gemittelte Temperatur des Schirmes,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann Konstante,  $\epsilon_{tc}$  und  $\epsilon_{sh}$  die Emissivitätskoeffizienten vom Thermoelement und vom Schirm und  $D_{tc}$  und  $D_{sh}$  die Durchmesser von Thermoelement und Schirm.

Und schliesslich lässt sich die Wärmeleitung mit Gleichung 3.4 berechnen.

$$\dot{Q}_{cond} = k_{eff} A_{cond} \frac{T_{sh} - T_2}{L_{tc}} \quad (3.4)$$

Mit der charakteristischen Länge  $L_{tc}$ , der Querschnittsfläche des Thermoelementes  $A_{cond}$  und  $k_{eff}$  der tatsächlichen Wärmeleitfähigkeit, welche über eine empirische Relation und Kalibrierungsmessungen bestimmt wird.

Schlussendlich kann man die Gastemperatur mit einer impliziten Gleichung lösen:

$$T_{gas} = T_{tc} - \frac{1}{A_{tc} \bar{h}} (\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{cond}(T_{gas})) \quad (3.5)$$

Die Berechnungen wurden mit einer bereitgestellten Excel-Datei gemacht, welche iterativ die Temperaturen ermittelt. Hierbei war vor allem auf die Umrechnung von Kelvin zu Grad Celsius zu achten um korrekte Resultate zu erhalten.



## Kapitel 4

# Resultate und Diskussion

Die Messergebnisse in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zeigen deutlich, dass die berechnete Gastemperatur ( $T_{gas}$ ) weit unter den gemessenen Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  liegt und somit  $\dot{Q}_{conv}$  stets negativ ist.  $\dot{Q}_{conv} < 0$  bedeutet das Gas nimmt Wärme von der Lanze auf, bzw. diese wird vom Gas gekühlt.

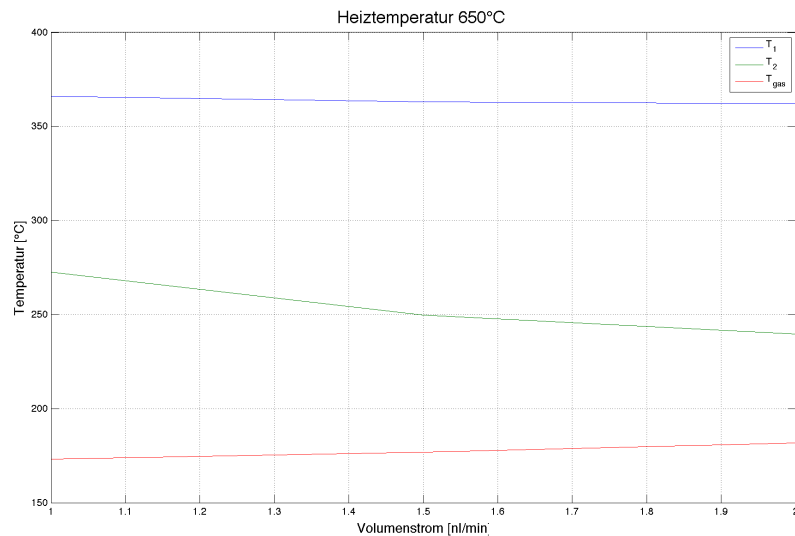


Abbildung 4.1: Messresultate bei  $T = 650^\circ C$

Ausserdem ist es offensichtlich, dass höhere Temperaturen eine grössere Verfälschung zwischen gemessenem und berechneten Wert verursachen, da die Wärmestrahlung mit der vierten Potenz der Temperatur zunimmt und die Messung des Thermoelements beeinflusst.

Des Weiteren ist zu beobachten dass die Temperatur  $T_1$  in beiden Messreihen annähernd konstant bleibt, obwohl der Volumenstrom zunimmt. Dies ist auch durch den grossen Einfluss der Wärmestrahlung des Rohrofens zu erklären, welche unabhängig vom Volumenstrom des Gases ist. Zudem spürt das Thermoelement, welches  $T_1$  misst, nur einen kleinen konvektiven Wärmeübergang, welcher durch das Absaugen kaum beeinflusst wird.

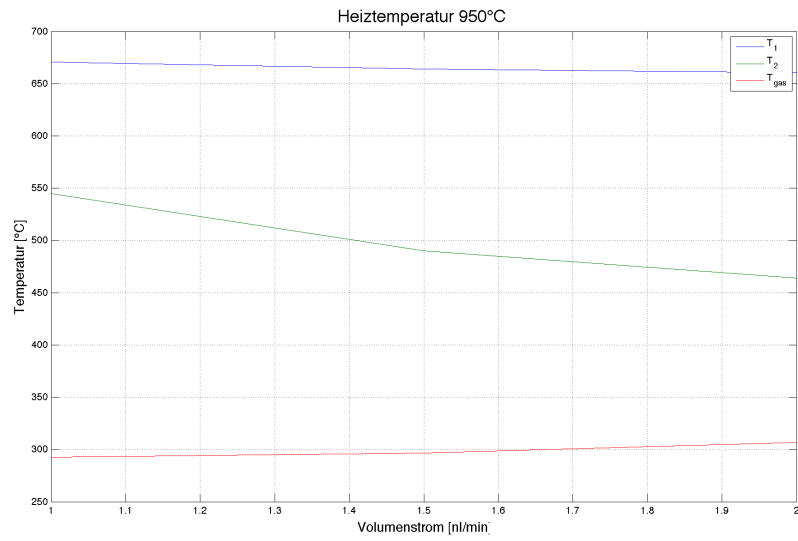


Abbildung 4.2: Messresultate bei  $T = 950^{\circ}\text{C}$

Im Fall von  $T_2$  spielt der konvektive Wärmeübergang des Gases eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Hier fällt die gemessene Temperatur mit zunehmendem Volumenstrom ab, da der erzwungene konvektive Wärmeübergang grösser wird und die Gastemperatur konstant bleibt.

## Kapitel 5

# Fehlerquellen und Schlussfolgerungen

Diese Laborübung hat uns gezeigt wie gross die Temperaturabweichung eines Thermoelementes sein kann, wenn höhere Umgebungstemperaturen vorhanden sind, also wenn Wärmestrahlung an Gewicht zunimmt. Man konnte trotzdem auf eine sehr plausible Approximation für die reale Gastemperatur kommen durch relativ wenige Messungen und eine einfache Wärmebilanz mit bekannten Beziehungen aus der Thermodynamik.

Ein klarer Fehler ist allerdings aufgetaucht. Die reale Gastemperatur  $T_{gas}$  sollte mit zunehmendem Volumenstrom annähernd konstant bleiben. Im Gegensatz dazu ist ein leichter Anstieg zu beobachten. Dieser lässt sich vermutlich auf Modellierungsfehler und vereinfachte Annahmen in den thermodynamischen Beziehungen zurückführen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Kathy Svitil. New reactor paves the way for efficiently producing fuel from sunlight. January 2011.

**Anhang A**

**MATLAB Code**

```
clear all;
close all;
clc;

% read temperature & flow
T_1_650=[366, 363, 362];
T_2_650=[272.5, 249.7, 239.6];
T_g_650=[173.2, 176.9, 181.7];
T_1_950=[670.5, 664, 660.5];
T_2_950=[544.9, 490, 463.8];
T_g_950=[292.7, 296.6, 306.6];
flow=[1, 1.5, 2];

% plot temperature
f1 = figure(1)
set(f1,'Position', [0 0 1000 600])
set(f1,'PaperPositionMode','auto')

f2 = figure(2)
set(f2,'Position', [0 0 1000 600])
set(f2,'PaperPositionMode','auto')

set(0,'CurrentFigure',f1)
s11 = plot(flow,T_1_650,flow,T_2_650,flow,T_g_650)
xlabel('Volumenstrom [nl/min]','FontSize',14)
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',14)
grid on
title('Heiztemperatur 650°C','fontsize', 18)
legend('T_1','T_2','T_{gas}')

set(0,'CurrentFigure',f2)
plot(flow,T_1_950,flow,T_2_950,flow,T_g_950)
xlabel('Volumenstrom [nl/min]','FontSize',14)
ylabel('Temperatur [°C]','FontSize',14)
grid on
legend('T_1','T_2','T_{gas}')
title('Heiztemperatur 950°C','fontsize', 18)

%Exporting to LaTeX
print(f1,'/Network/Servers/mlh34-0.ethz.k
ch/Volumes/01_MXS_RAID/01_StudentData/mheusser/Dropbox/experimentelle
methoden/High_Temperature/Report/pics/figure1','-dpng')
print(f2,'/Network/Servers/mlh34-0.ethz.k
ch/Volumes/01_MXS_RAID/01_StudentData/mheusser/Dropbox/experimentelle
methoden/High_Temperature/Report/pics/figure2','-dpng')

print('hightemp2.m','/Network/Servers/mlh34-0.ethz.k
ch/Volumes/01_MXS_RAID/01_StudentData/mheusser/Dropbox/experimentelle
methoden/High_Temperature/Report/pics/code','-dpng')
```

# Anhang B

## Messungen

$V_{in}$	$[nL/min]$	$T = 650^{\circ}C$			$T = 950^{\circ}C$		
		1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
$T_1$	$[^{\circ}C]$	366	363	362	670.5	664	660.5
$T_2$	$[^{\circ}C]$	272.5	249.7	239.6	544.9	490	463.8
$T_3$	$[^{\circ}C]$	446.6	439.6	434.9	762.4	747.2	738.9
$T_4$	$[^{\circ}C]$	451.9	444.2	439.3	768.1	752	744.1
$T_g$	$[^{\circ}C]$	173.2	176.9	181.7	292.7	296.6	306.6

Abbildung B.1: Temperaturmessungen