

## 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	6
4.2	Messresultate	7

# 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 von zentraler Bedeutung. Da die 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. Das Thermoelement, das für die Messung der Gastemperatur zuständig 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.

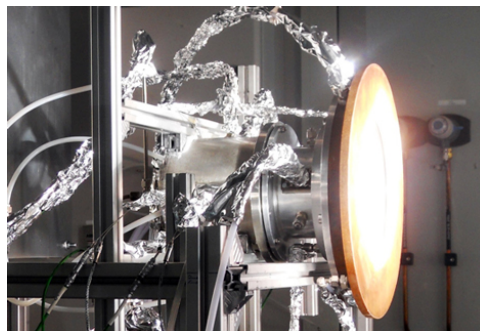


Abbildung 1.1: Reaktor im Betrieb. Quelle: [1]

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 zu beschreiben und zu quantifizieren. Wie dieses Effekt praktisch realisiert wird, wird im nächsten Kapitel im Detail erklärt.

## Kapitel 2

# Versuchsaufbau

In Abbildung 2.1 ist die Versuchsanordnung zu sehen. Stickstoff strömt in einen Rohrforn und wird erwärmt. Die Gastemperatur soll nun mit einem Thermoelement, welches die Temperatur misst, ermittelt werden. Wie es oben erwähnt wurde, die Messung wird erheblich durch die Wärmestrahlung beeinflusst, deswegen schirmt man das Thermoelement ab (Abbildung 2.2). Zusätzlich wird eine bekannte Konvektion erzwungen. Dies reduziert die Temperatur des Thermoelements und kühlt es fast auf die Gastemperatur.

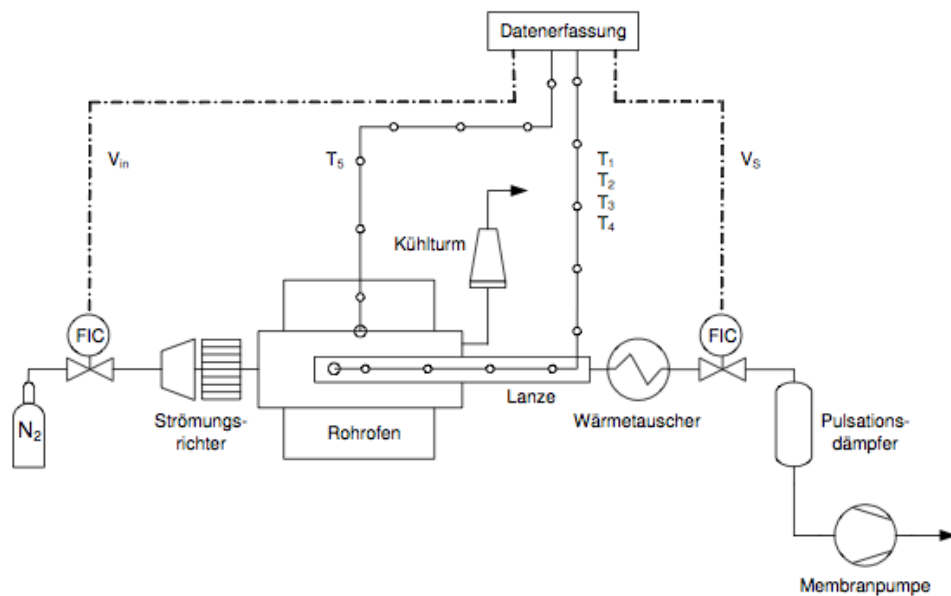


Abbildung 2.1: Schematische Versuchsanordnung

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.

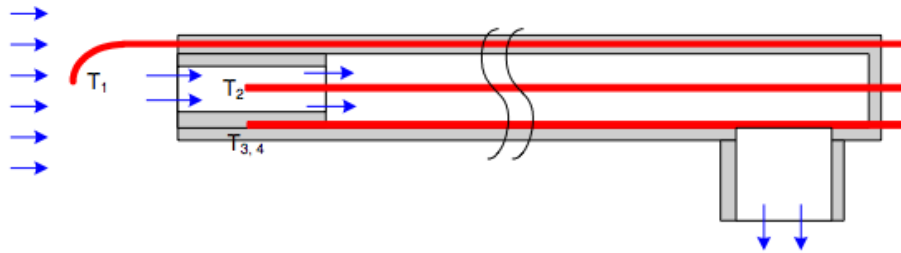


Abbildung 2.2: Querschnitt Absaugvorrichtung/Lanze mit den Thermoelementen (rot)

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.

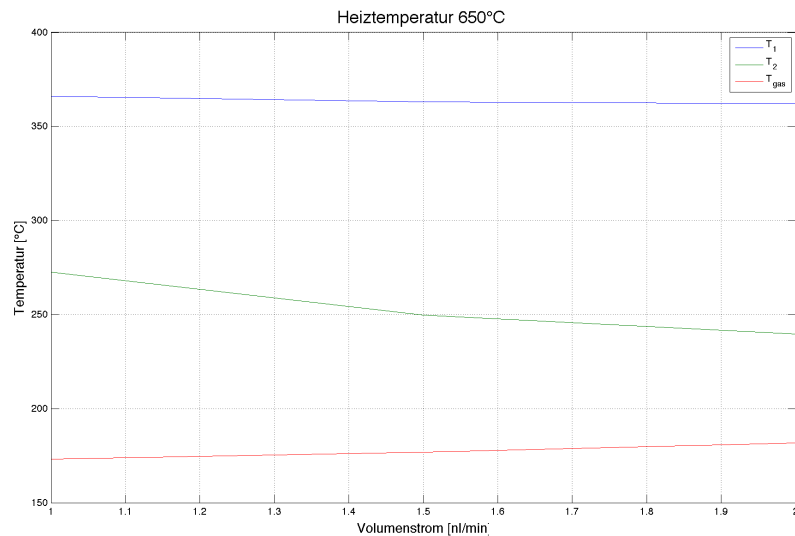


Abbildung 4.1: Messresultate

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.

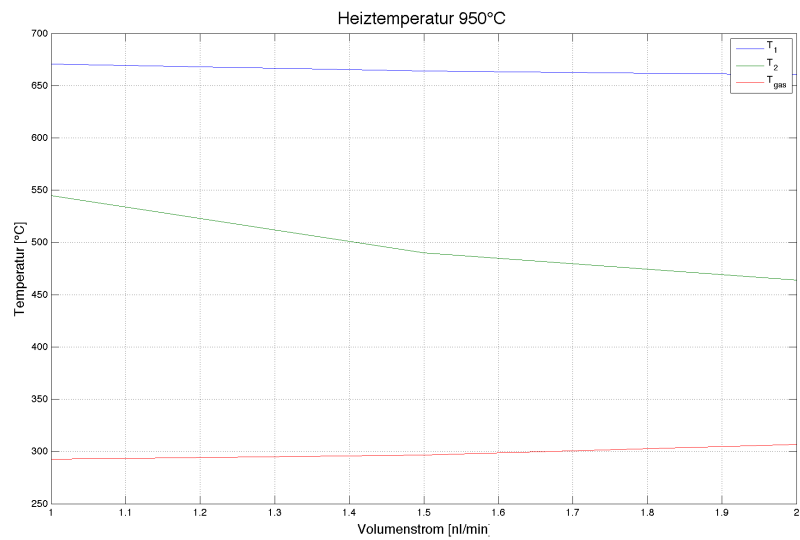


Abbildung 4.2: Messresultate

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 und so die 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

Team sheet		
Goalkeeper	GK	Paul Robinson
Defenders	LB	Lucus Radebe
	DC	Michael Duberry
	DC	Dominic Matteo
	RB	Didier Domi
Midfielders	MC	David Batty
	MC	Eirik Bakke
	MC	Jody Morris
Forward	FW	Jamie McMaster
Strikers	ST	Alan Smith
	ST	Mark Viduka

		$T = 650^\circ$			$T = 950^\circ$	
	$1 \frac{l}{s}$	$1.5 \frac{l}{s}$	$2 \frac{l}{s}$	$1 \frac{l}{s}$	$1.5 \frac{l}{s}$	$2 \frac{l}{s}$
$T_1 [^\circ C]$	366	363	362	670.5	664	660.5
$T_2 [^\circ C]$	272.5	249.7	239.6	544.9	490	463.8
$T_3 [^\circ C]$	0	0	0	0	0	0
$T_4 [^\circ C]$	0	0	0	0	0	0
$T_g [^\circ C]$	173.2	176.9	181.7	292.7	296.6	306.6