

# Wirkungsweise und Effektivität einer Wasserwand als Abschirmung gegen Wärmestrahlung.



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung – Motivation für das Projekt
2. Theorie
3. Experiment (Labor)
4. Feldversuch
5. Ausblick und Zusammenfassung

# 1. Einleitung

# Motivation

Wie sind wir auf das Problem gestoßen?

→ Praktischer Hintergrund: Feuerwehr

→ Frage, ob eine Abschirmung von Wärmestrahlung durch eine Wasserwand erfolgen kann und wie effizient dies ist.



# 2. Theorie

# Wärmestrahlung

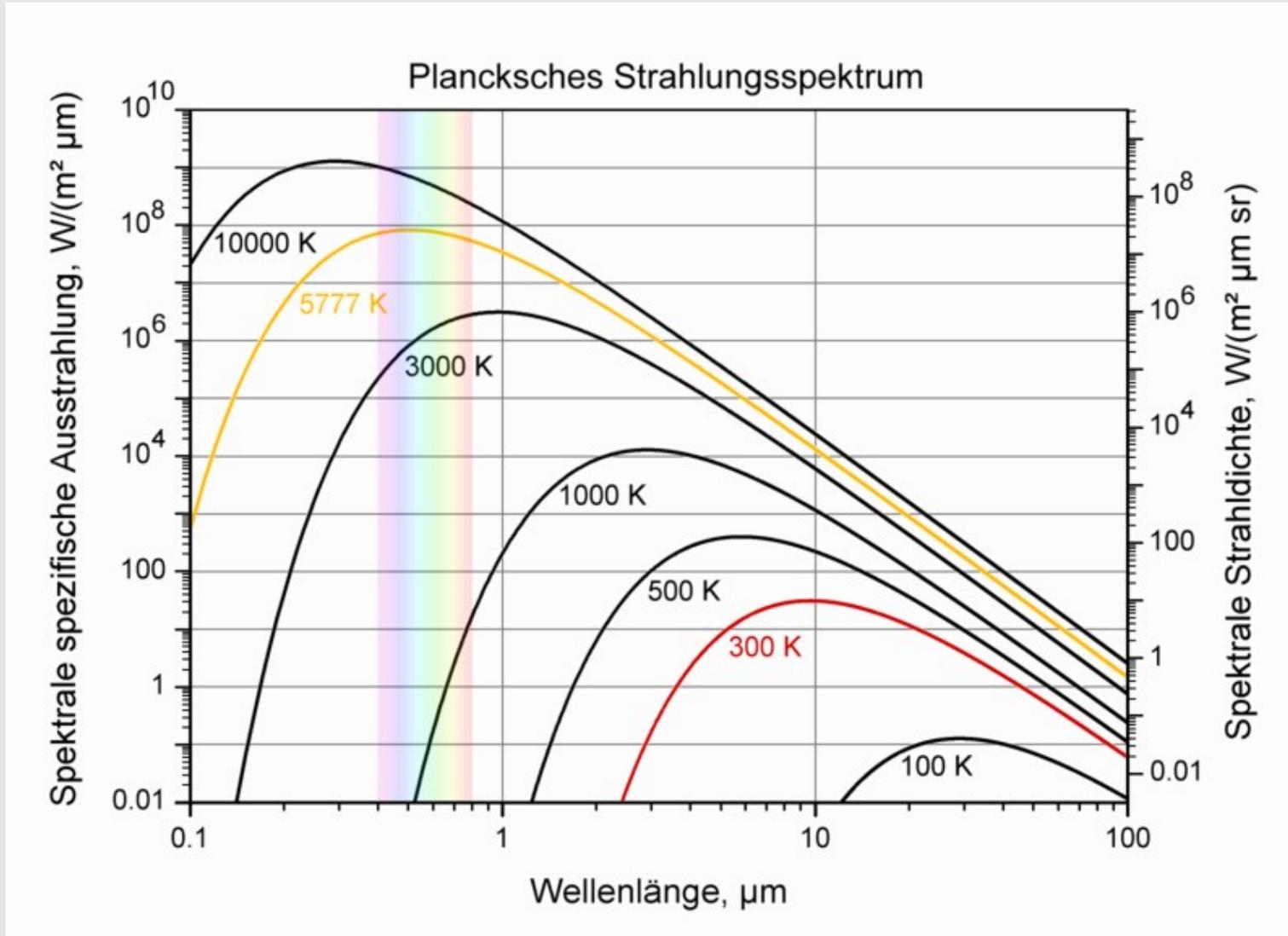
## Elektromagnetische Strahlung

- Festkörper und Flüssigkeiten
  - kontinuierliches Spektrum (siehe schwarzer Strahler)
- Gase
  - charakteristisches Linienspektrum

Großteil der Wärmestrahlung → Infrarot-Bereich

Aber: Wärmestrahlung auch im sichtbaren Bereich

# Plancksches Strahlungsgesetz



# Schwarzer Strahler / Schwarzer Körper

Idealisierter Körper mit folgenden Eigenschaften:

- Absorption aller Wellenlängen
- Aussendung eines charakteristischen Spektrums, das nur von der Temperatur abhängt
- Absorptions- und Emissionsgrad = 1

# Absorptionsgesetz

Allgemeine Form des Lambert-Beerschen-Gesetzes:

$$\omega(d) = \omega_0 \cdot \exp\{-\mu \cdot d\}$$

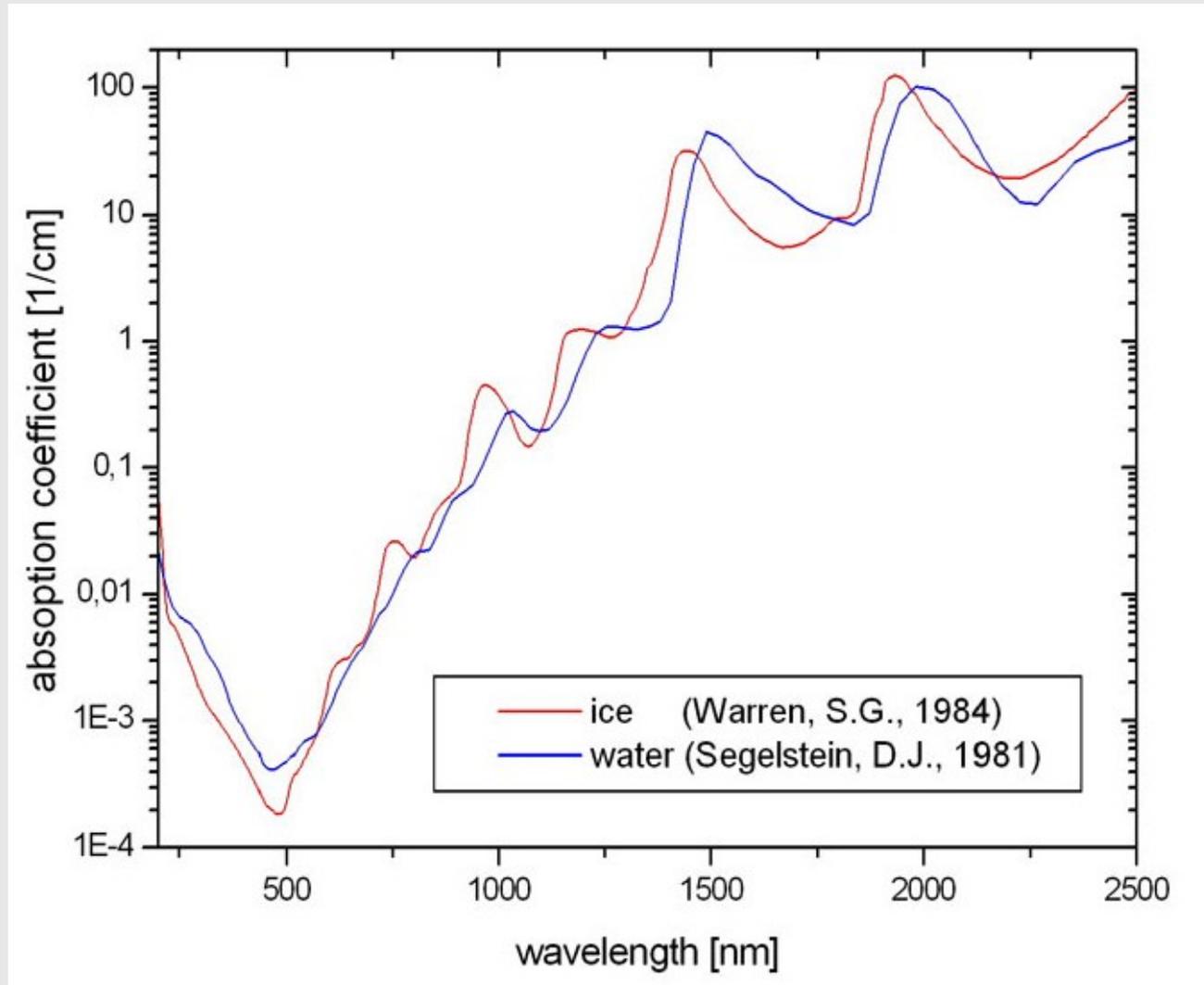
$\omega(d)$ : Intensität in Abhängigkeit von  $d$

$\omega_0$ : Intensität bei  $d = 0$

$\mu$ : Absorptionskoeffizient

$d$ : Schichtdicke

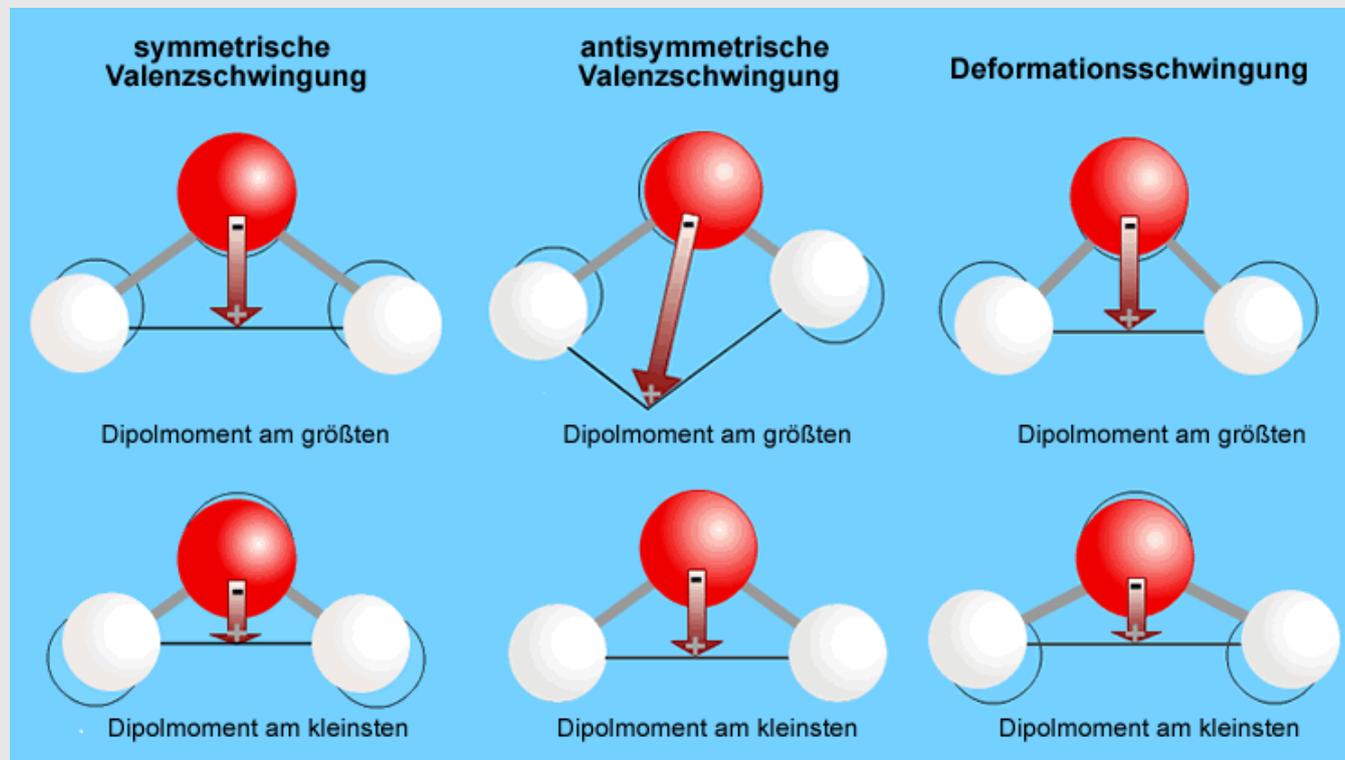
# Absorptionskoeffizient von Wasser



# Wie funktioniert die Absorption in Wasser?

Wärmestrahlung energetisch im Bereich der Rotationsniveaus kleiner Moleküle bzw. der Schwingungsniveaus von Molekülbindungen.

→ Änderung des Dipolmoments

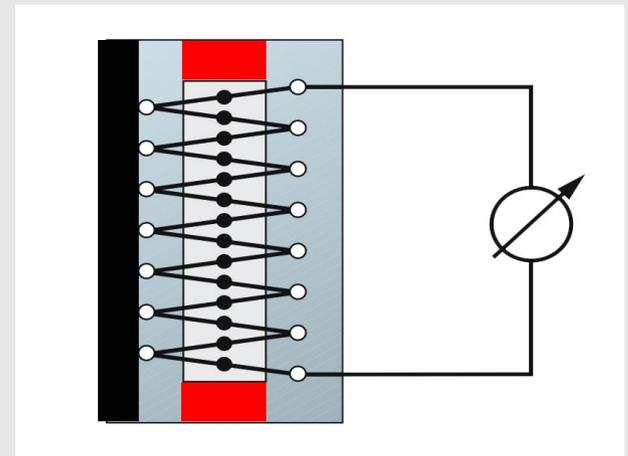


# Thermosäule

Konische Öffnung durch die die Strahlung direkt oder indirekt auf die geschwärzte Detektorfläche trifft.

Zwei verschiedene Metalle

→ es kommt auf Grund des Temperaturunterschieds zu einer Thermospannung (Seebeck-Effekt)



# Wiensches Verschiebungsgesetz

- näherungsweise auch für die von nicht schwarzen Strahlern abgegebene Wärmestrahlung geeignet
- Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  bei der die größte Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Temperatur abgestrahlt wird

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m K}{T}$$

## Stefan Boltzmann Gesetz für nicht-schwarze Strahler

- verbindet Intensität mit Temperatur
- Strahlungsdichte in alle Richtungen konstant („Lambert-Strahler“)

$$\omega = \epsilon(T) \sigma T^4$$

$\sigma$  : Stefan – Boltzmann Konstante

$\epsilon \in (0..1)$  : Emissionsgrad

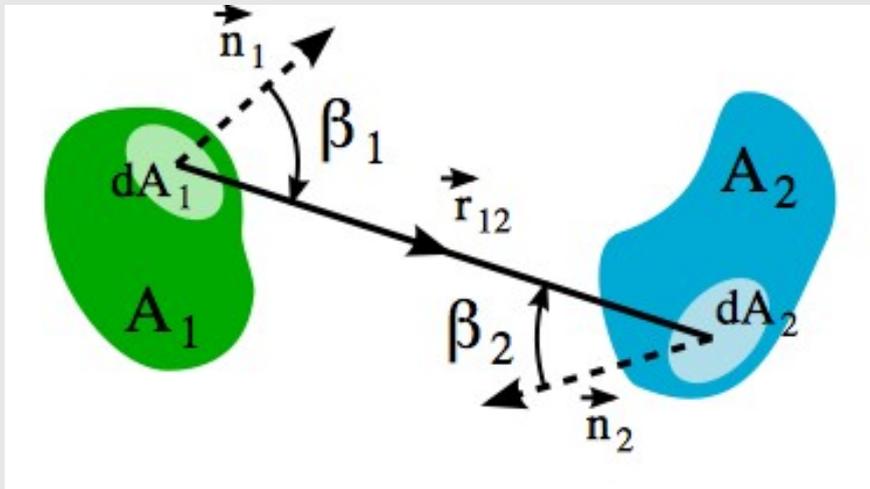
$$\omega : \frac{\text{Leistung}}{\text{Fläche}} = \text{Intensität} = \frac{\phi}{A_S} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Annahme:  $\epsilon(T) = \text{const.}$

# Fotometrisches Grundgesetz

- Strahlungsausbreitung von Infrarotstrahlung
- Annahme: ideale Strecke zwischen Sender und Empfänger

$$d^2 \phi = L \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{r^2} dA_1 dA_2 = L \cdot \cos(\beta_1) dA_1 d\Omega$$



$\phi$  : Strahlungsleistung [W]

$L$  : Strahlungsdichte [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$ ]

$\alpha_1$  : Ausstrahlungswinkel

$\alpha_2$  : Einstrahlungswinkel

$dA_i$  : Flächenelement

$r$  : Abstand Sender und Empfänger

## Rechnung (ohne Wasserwand)

gemessen wird eine Thermospannung  $U$

$$U = \eta \cdot \Phi \quad \eta : \text{Empfindlichkeit}$$

$$d^2 \phi = L dA_1 d\Omega$$

$$\Rightarrow \phi = L \int dA_1 \int d\Omega = L A_1 \int_0^\pi \int_0^{\pi/2} \sin(\theta) d\theta d\alpha = L A_1 \pi$$

$$\text{mit } \omega = \frac{\phi}{A_1} \quad \text{folgt} \quad L = \frac{\omega}{\pi}$$

Aus  $d^2 \phi = \frac{L}{r^2} \cos(\alpha_1) \cos(\alpha_2) dA_1 dA_2$  wird mit  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$

$$\phi = \frac{L A_1 A_2}{r^2}$$

folglich  $U = \eta \phi = \eta \frac{L A_1 A_2}{r^2} = \eta \frac{\omega A_1 A_2}{\pi r^2} = \eta \frac{A_1 A_2}{\pi r^2} \epsilon \sigma T^4$

mit  $L = \frac{\omega}{\pi}$  und dem Stefan Boltzmann Gesetz.

# 3. Experiment (Labor)

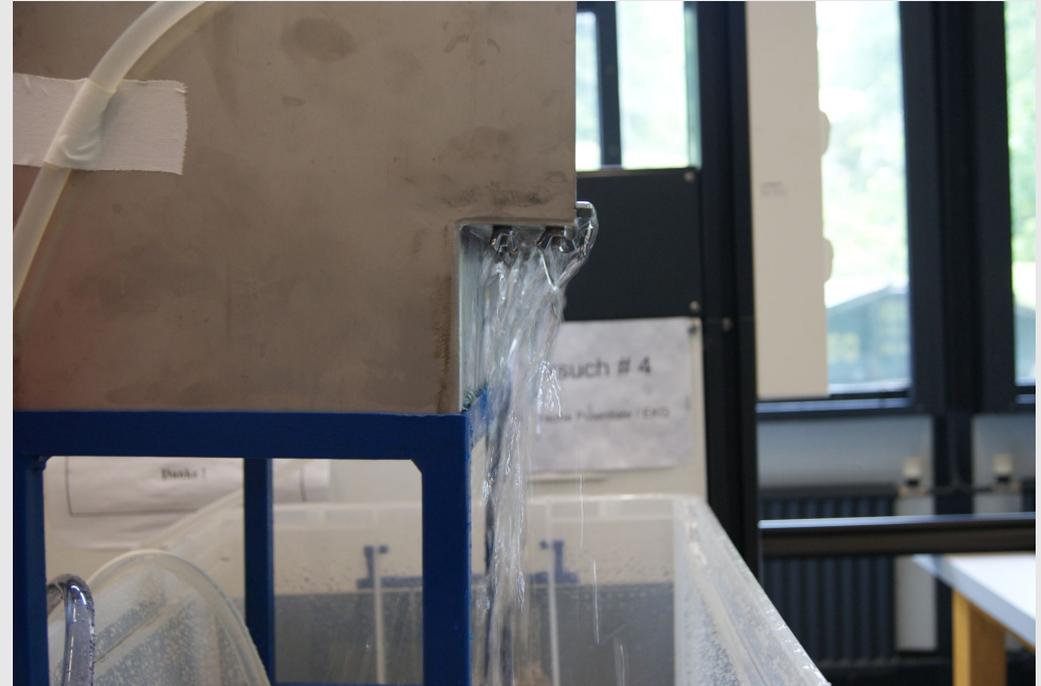
# Aufbau

## Wasserwand

Idee: überlaufendes Wasserbecken, angeschlossen an Pumpprozess



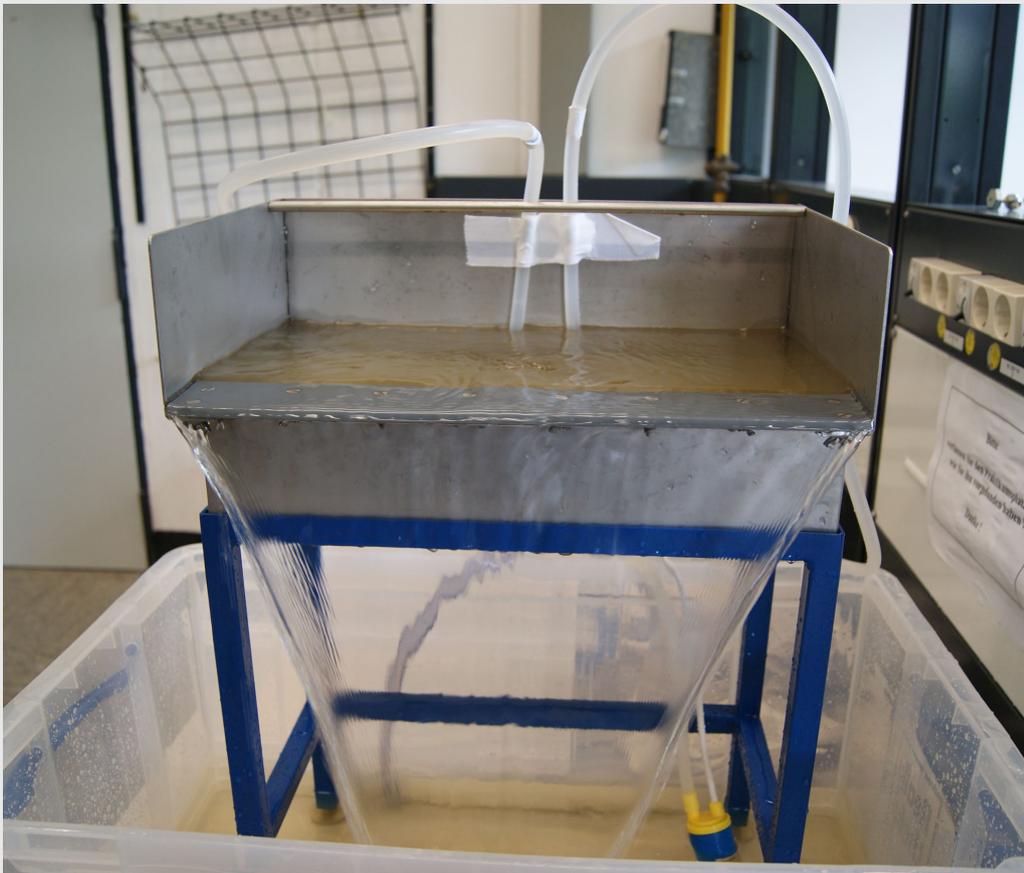
## Problem: optimale Abrisskante?



→ Dreiecksprofil eignet sich am besten

## Problem: zu geringe Pumpleistung

→ 12 V-Pumpe & 9 V-Pumpe (max. Laufzeit begrenzt)



nahezu homogene Wasserwand;

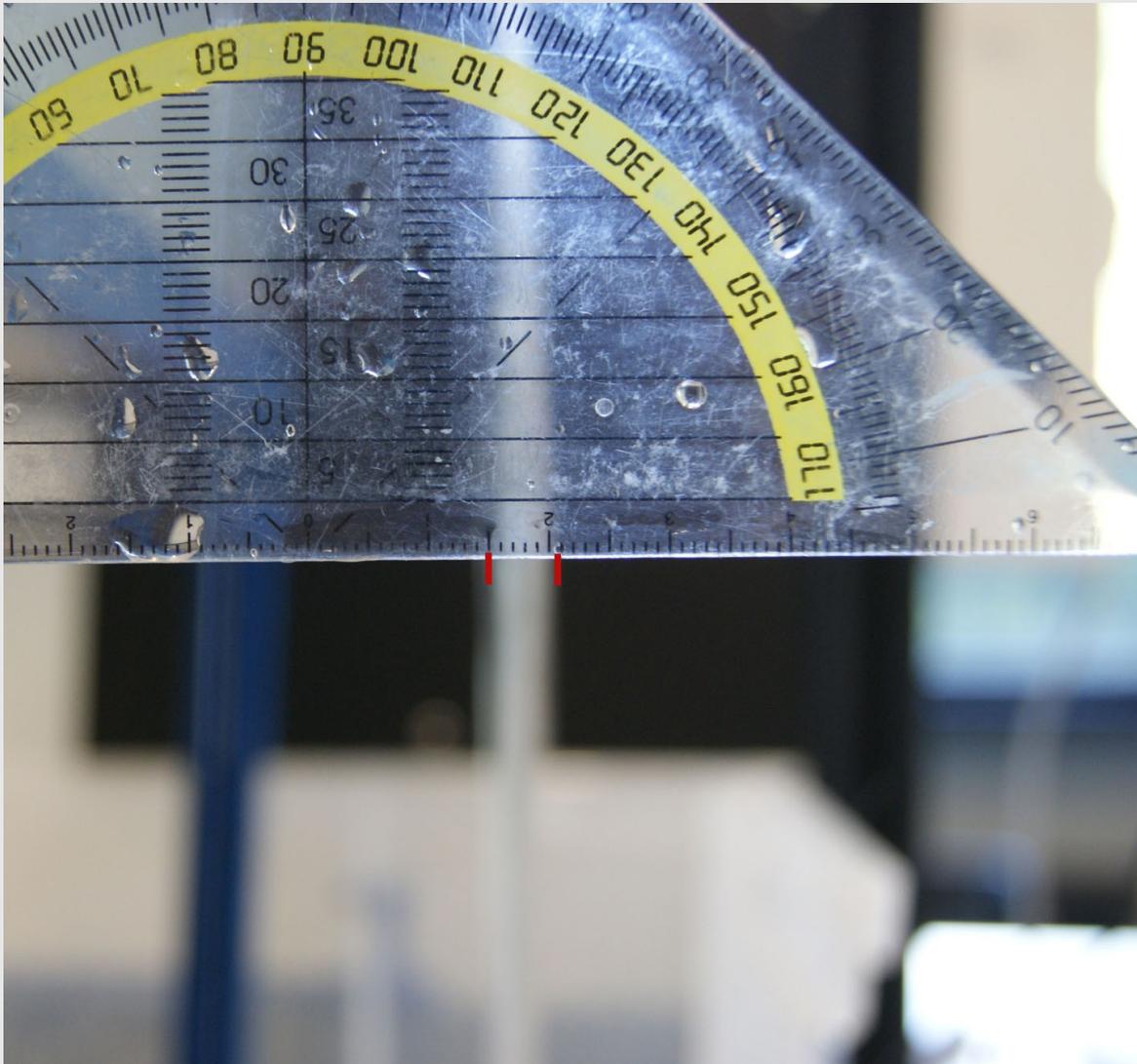
Messfenster:

Breite ca. 12 cm

Höhe ca. 6 cm

Dicke ca. 4 mm

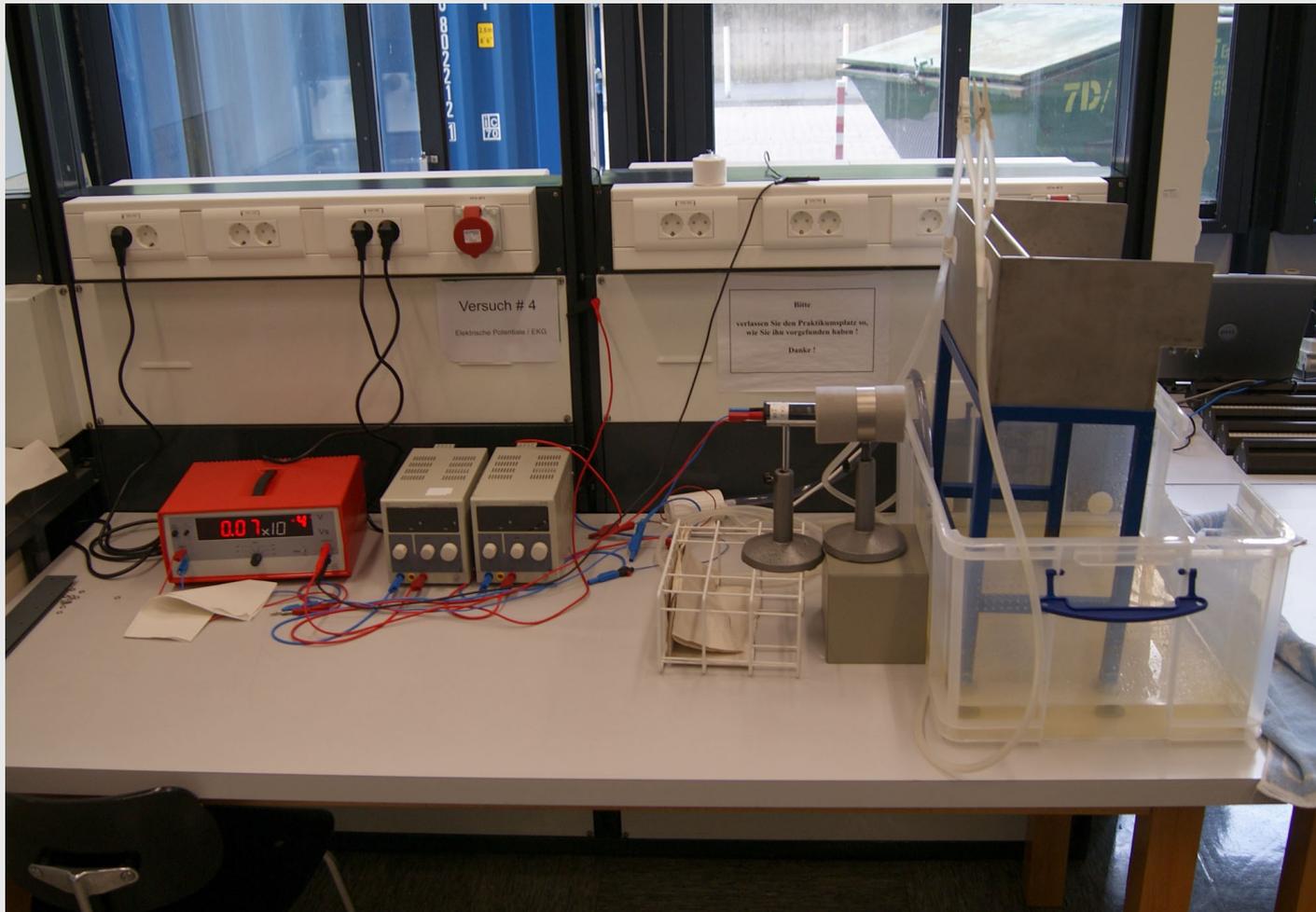
# Bestimmung der Wasserwanddicke



- Mittelwertbildung aus 12 Bildern
- inhomogene Ränder durch Einschnürung der Wasserwand

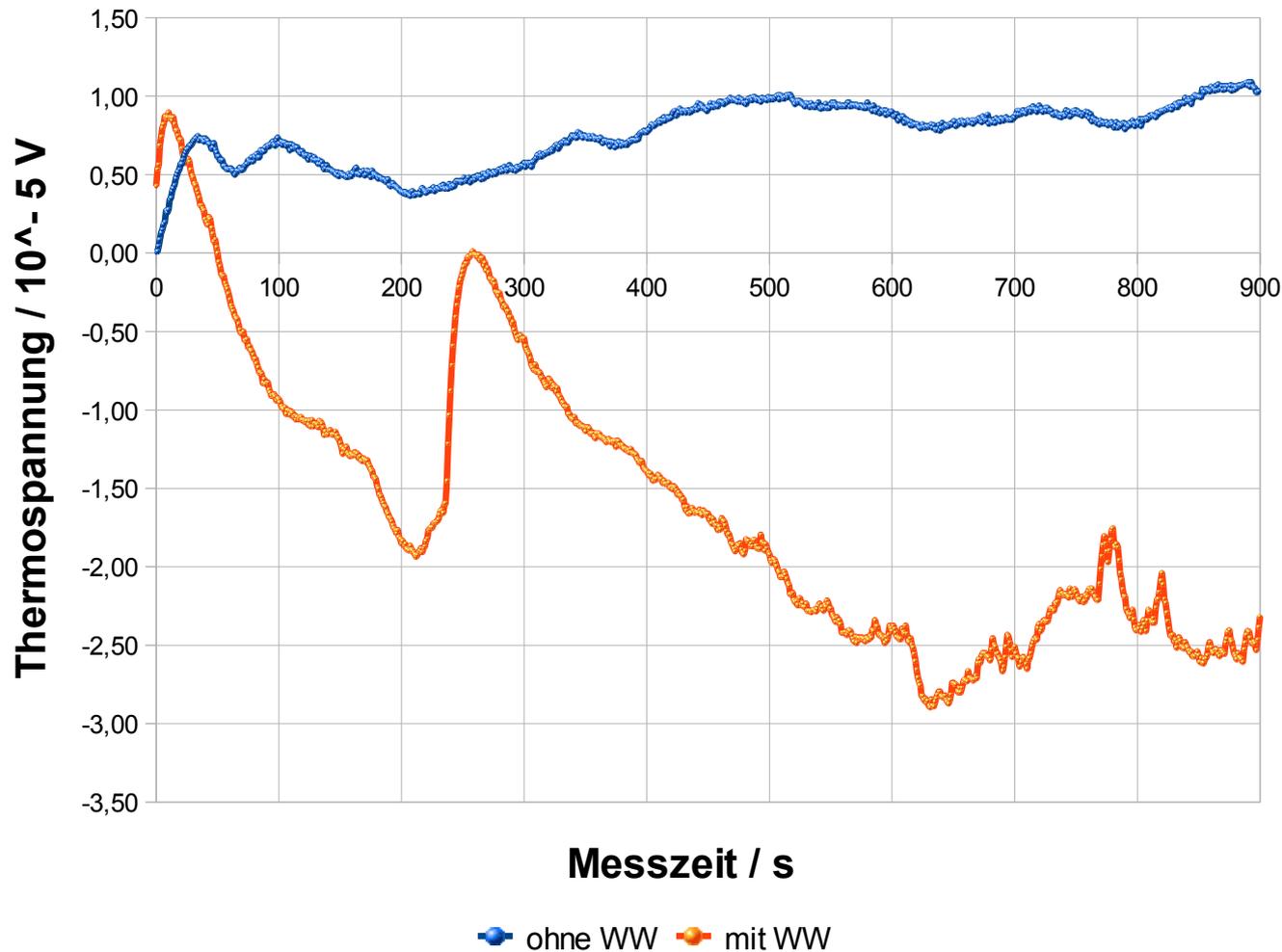
# Thermosäule

- Anschluss an Cassy



# Eichung der Thermosäule

**Vergleichende Eichmessung zwischen Nullpunkt mit und ohne eingeschalteter WW**



$\Delta U_{\text{sys}}$  mit WW :  
 $0,4 \cdot 10^{-4} \text{ V}$

$\Delta U_{\text{sys}}$  ohne WW :  
 $0,1 \cdot 10^{-4} \text{ V}$

# Wärmequelle

## *Ideen:*

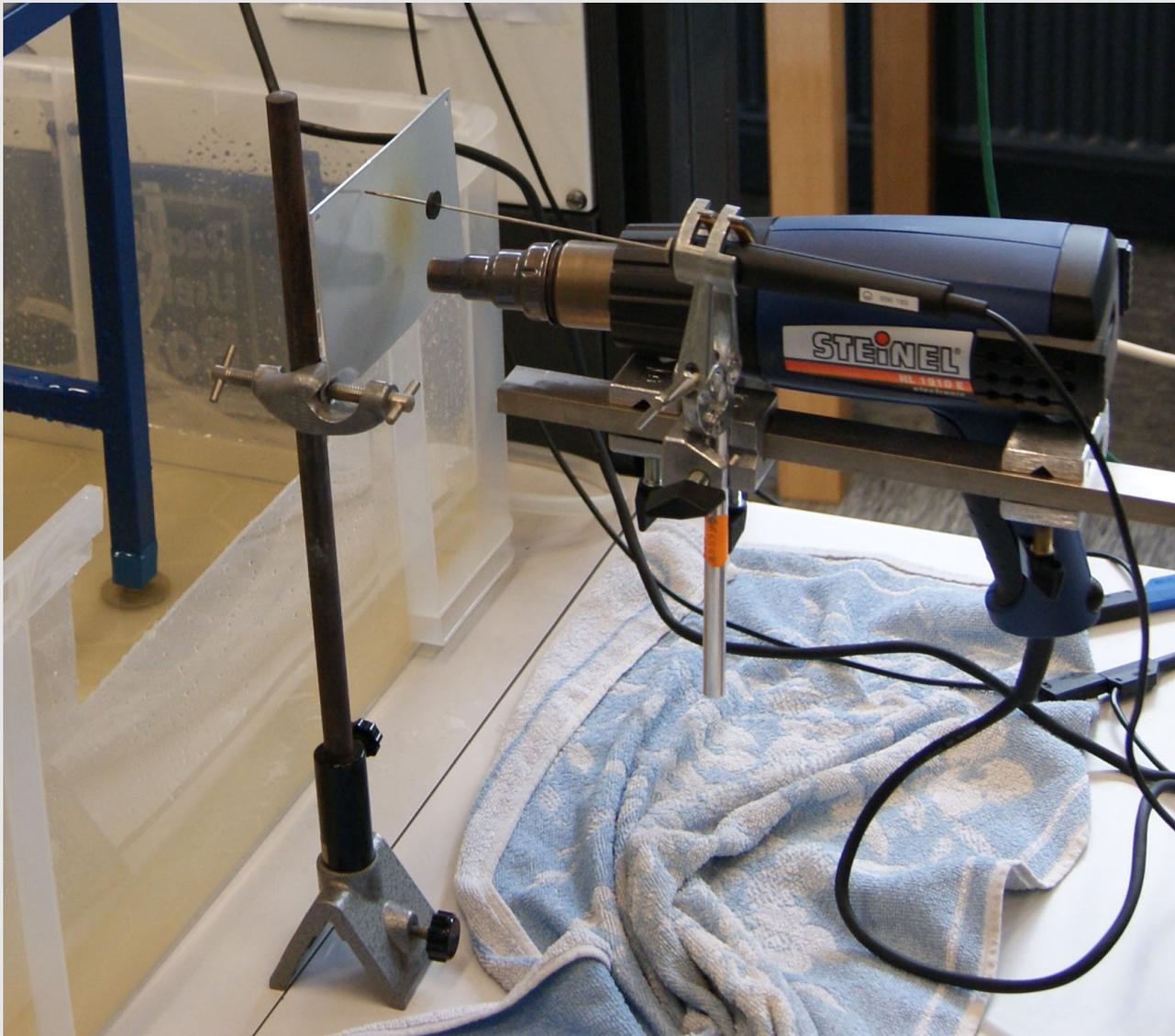
- Heizofen → zu geringe Strahlungsintensität
- Paladiumstreifen → zu geringe Strahlungsintensität
- Fön → Wasserwandstörung
- Bunsenbrenner → Wasserwandstörung
- erhitzte Metallplatte ✓

# Metallsorte

- Kupfer & Messing
  - x Platten zu dick
  - x Zeit zum Erhitzen und Abkühlen zu lang
- Aluminium
  - ✓ schnelles Erhitzen
  - ✓ schnelles Abkühlen
  - ✓ reproduzierbare Ergebnisse

→ Halterung der Aluminiumplatte und Erhitzen?

# Halterung 1

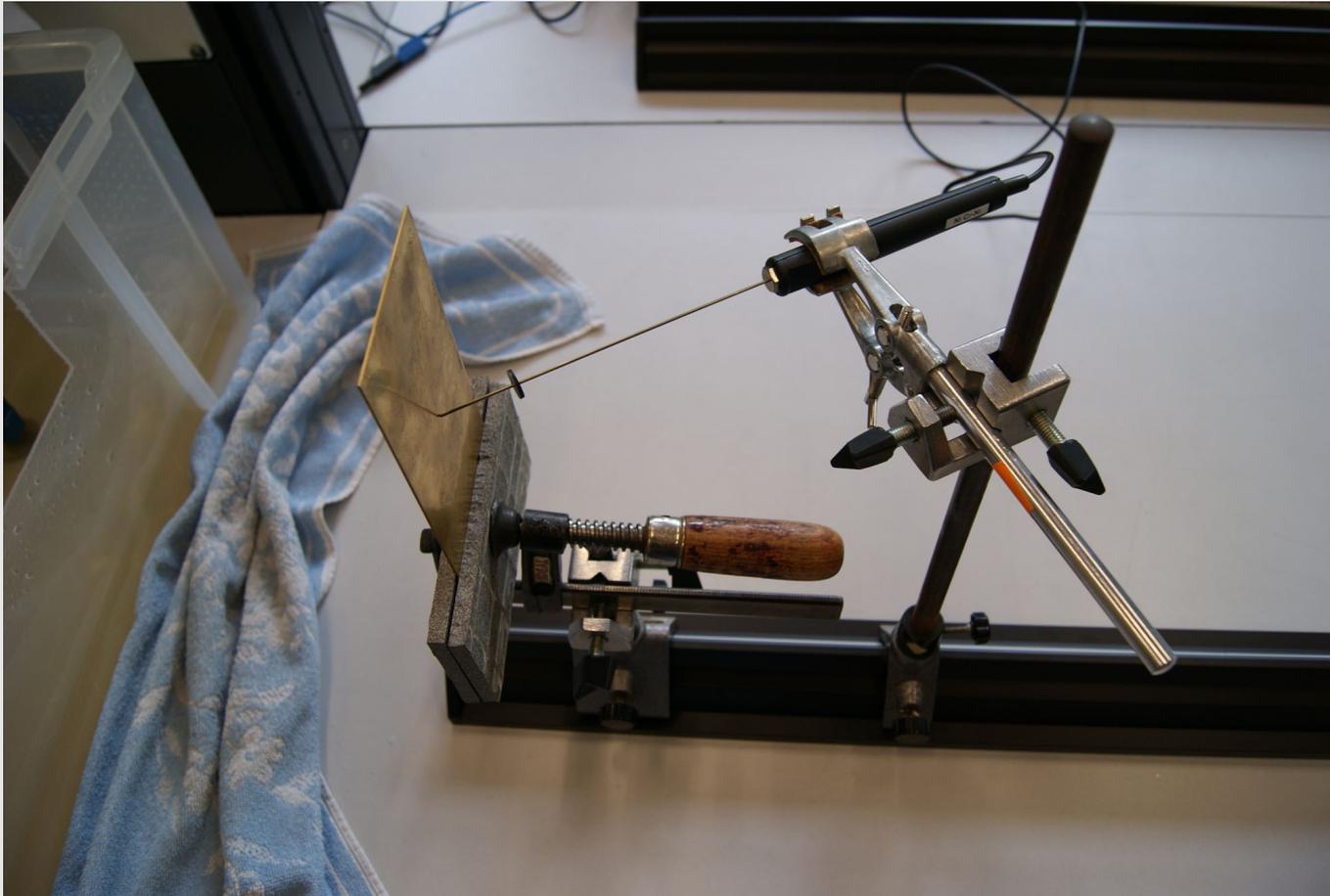


Problem dieser

Halterung:

Halterung wird zu heiß

## Halterung 2



- hitzebeständig
- geringe  
Wärmeleitfähigkeit

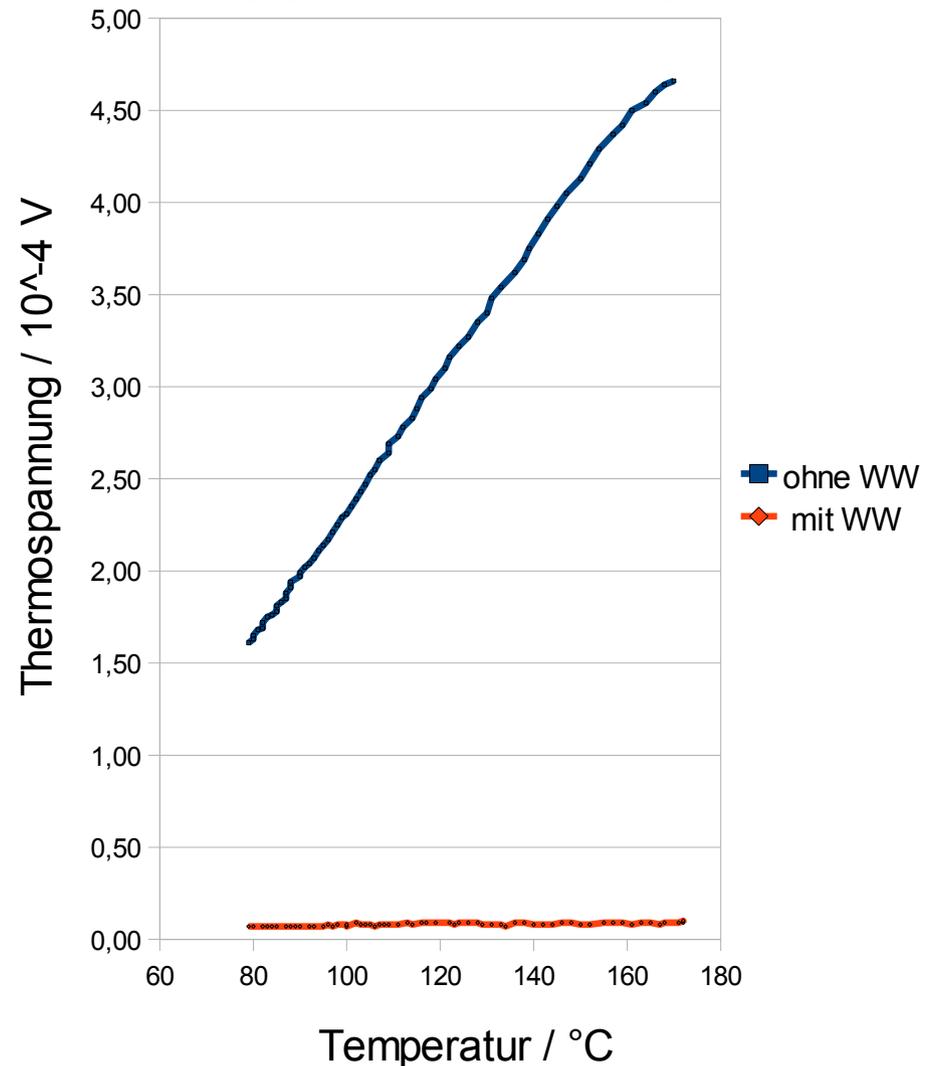
# Erhitzen durch Heißluftfön

- linearer Zusammenhang?

↳ Aluplatte muss stärker erhitzt werden

→ Bunsenbrenner

Vergleich der Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur



## Der etwas andere Bunsenbrenner

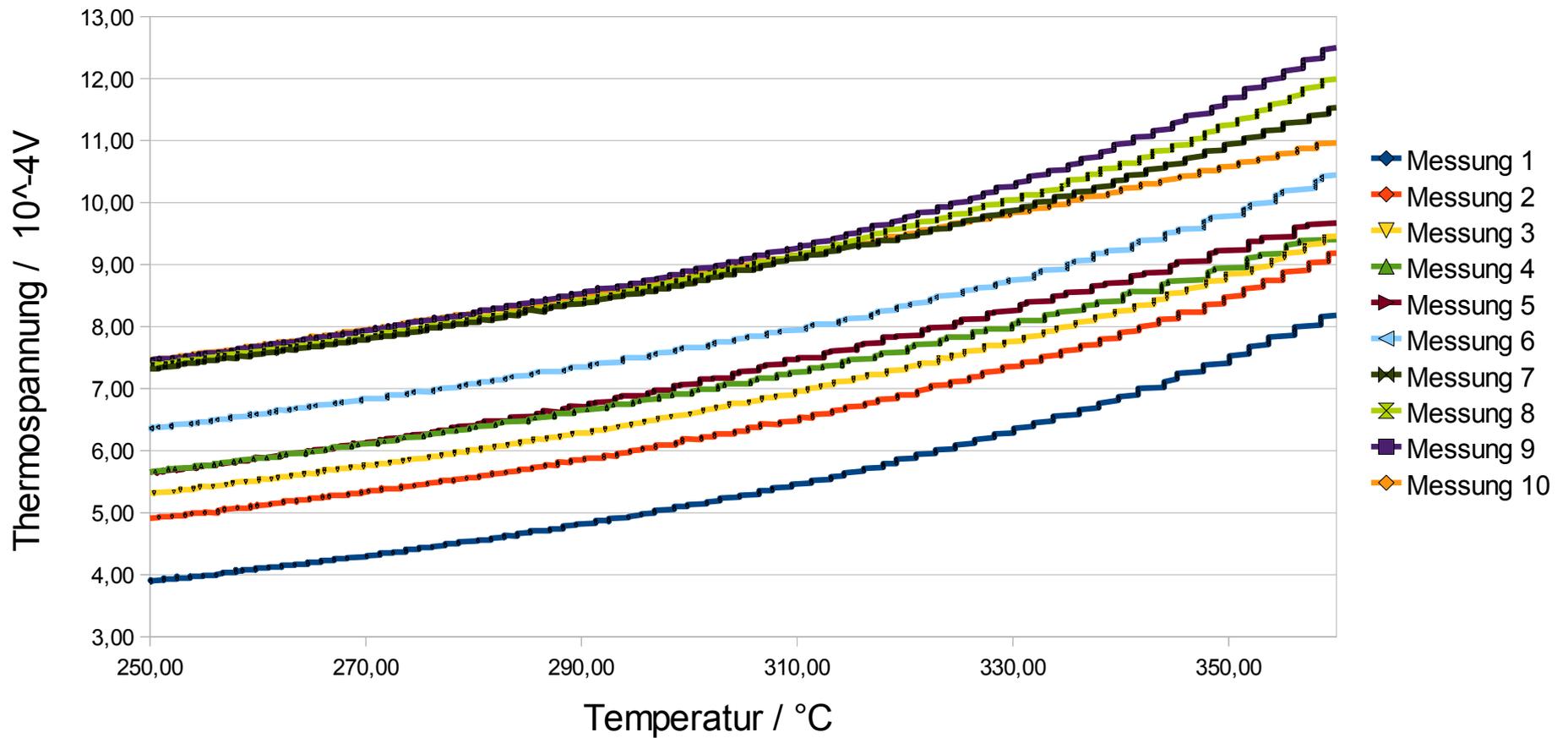


# Endgültiger Aufbau



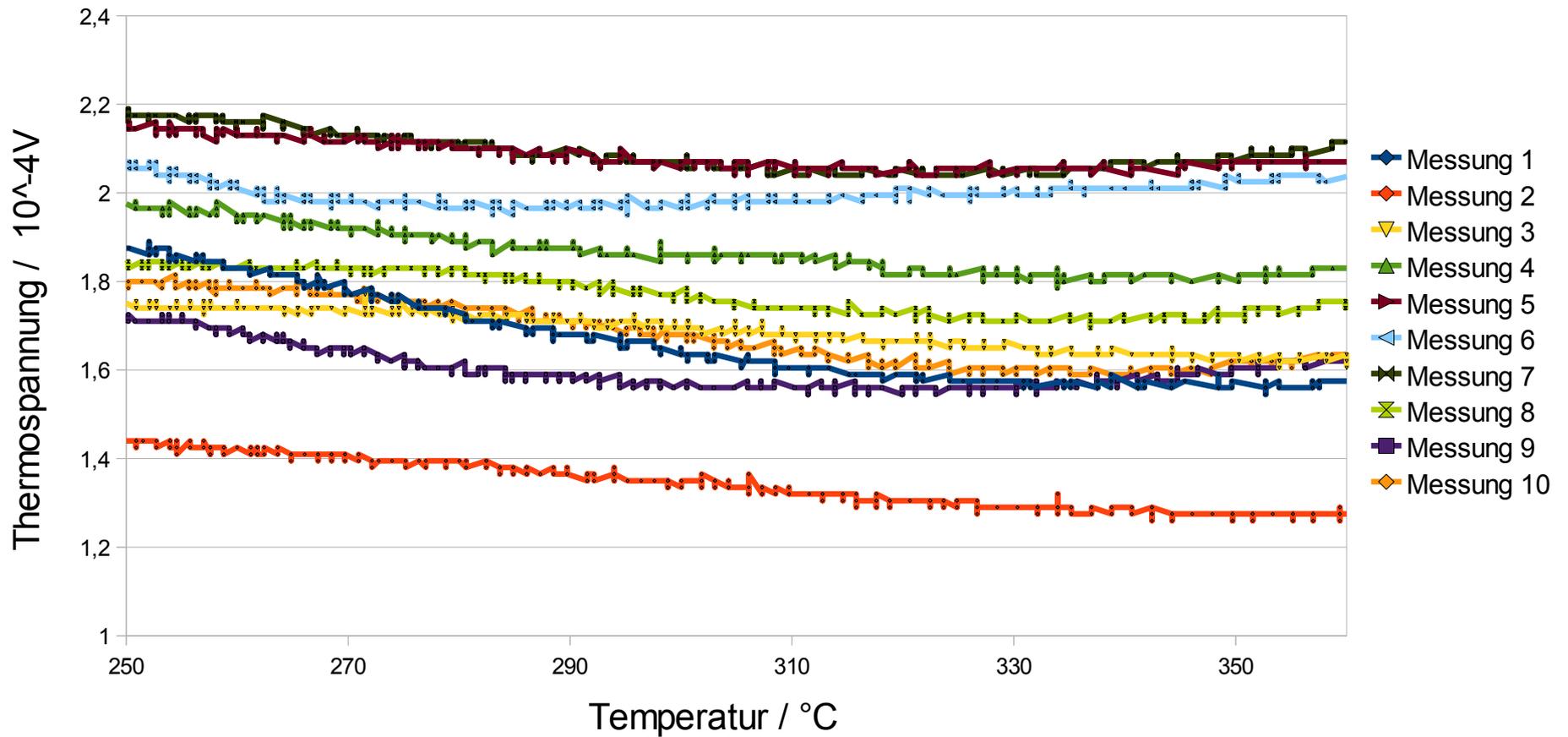
# Messungen ohne Wasserwand

Thermospannung in Abhängigkeit der Temperatur der Aluminiumplatte ohne Wasserwand



# Messungen mit Wasserwand

Thermospannung in Abhängigkeit der Temperatur der Aluminiumplatte mit Wasserwand



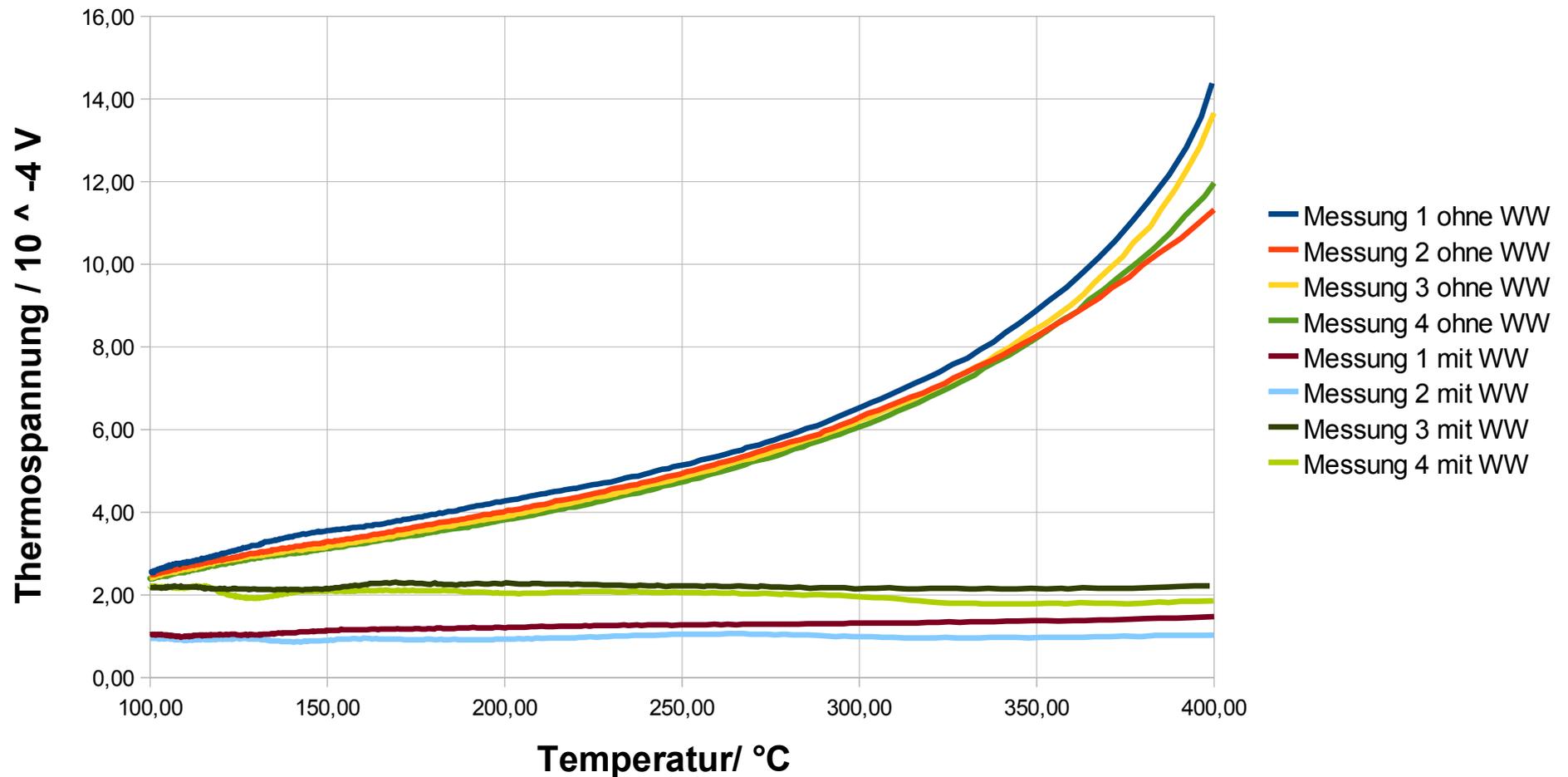
# Statistische Daten

	<u>ohne Wasserwand</u>		<u>mit Wasserwand</u>		Abschwächung
	T / °C	U / 10 <sup>-4</sup> V	T / °C	U / 10 <sup>-4</sup> V	%
MW	359,86	10,35	359,81	1,75	83
S td.abw.	0,76	1,39	0,69	0,27	
MW	299,91	7,47	300,22	1,77	76
S td.abw.	0,5	1,32	0,39	0,23	
MW	260,02	6,36	260,06	1,86	71
S td.abw.	0,15	1,26	0,18	0,22	

→ statistische Abweichungen bei der Thermospannung unter 20%

# Gesamtmesskurven

**Vergleich der Messungen der Thermospannungen in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich zwischen 100° und 400 °**



## Auswertung ohne WW

$$\text{ohne WW: } U = \eta \epsilon (T) \frac{\sigma A_1 A_2}{\pi r^2} T^4 = \alpha T^4$$

$$\eta = 0,1 \text{ V/W}$$

$$R = 0,665 \text{ m}$$

$$A_1 = 0,01344 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 5,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

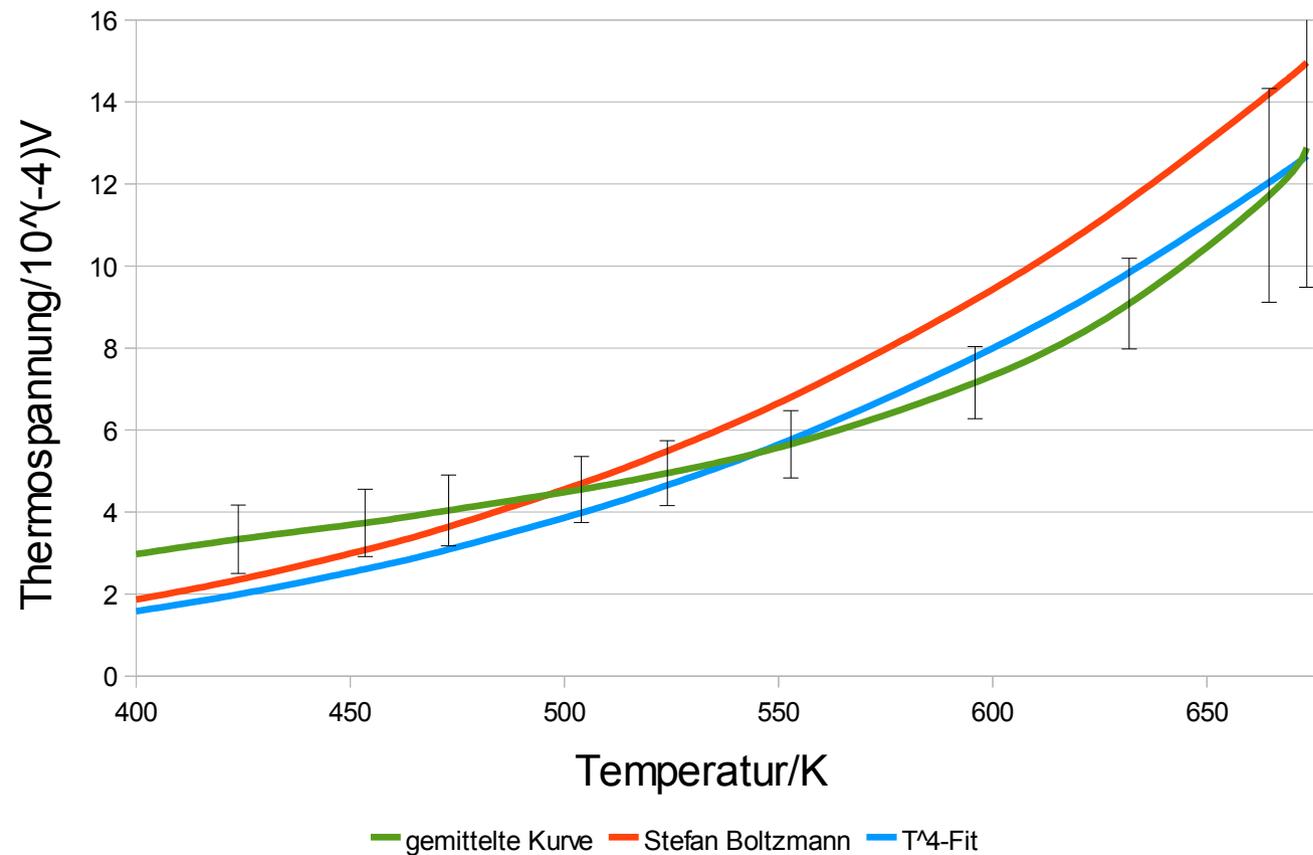
$$\epsilon = 0,2 - 0,3$$

$$\Rightarrow \alpha \approx 7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{V}}{\text{K}^4}$$

$$\text{Fit: } \alpha \approx 6 \cdot 10^{-11} \frac{\text{V}}{\text{K}^4}$$

Abweichung  $\approx 14 \%$

### Fehlerbetrachtung



## Auswertung mit WW

- keine Temperaturabhängigkeit mehr vorhanden
- konstanter Verlauf, aber keine komplette Abschirmung, da positive Thermospannung gemessen wird

### Vermutung:

- Graph wird durch Abschwächungsfaktor so weit nach rechts verschoben, dass wir nur den nahezu geradlinigen (fehlerbehafteten) Ausläufer sehen

## Erläuterung

Nach dem Stefan Boltzmann Gesetz gilt

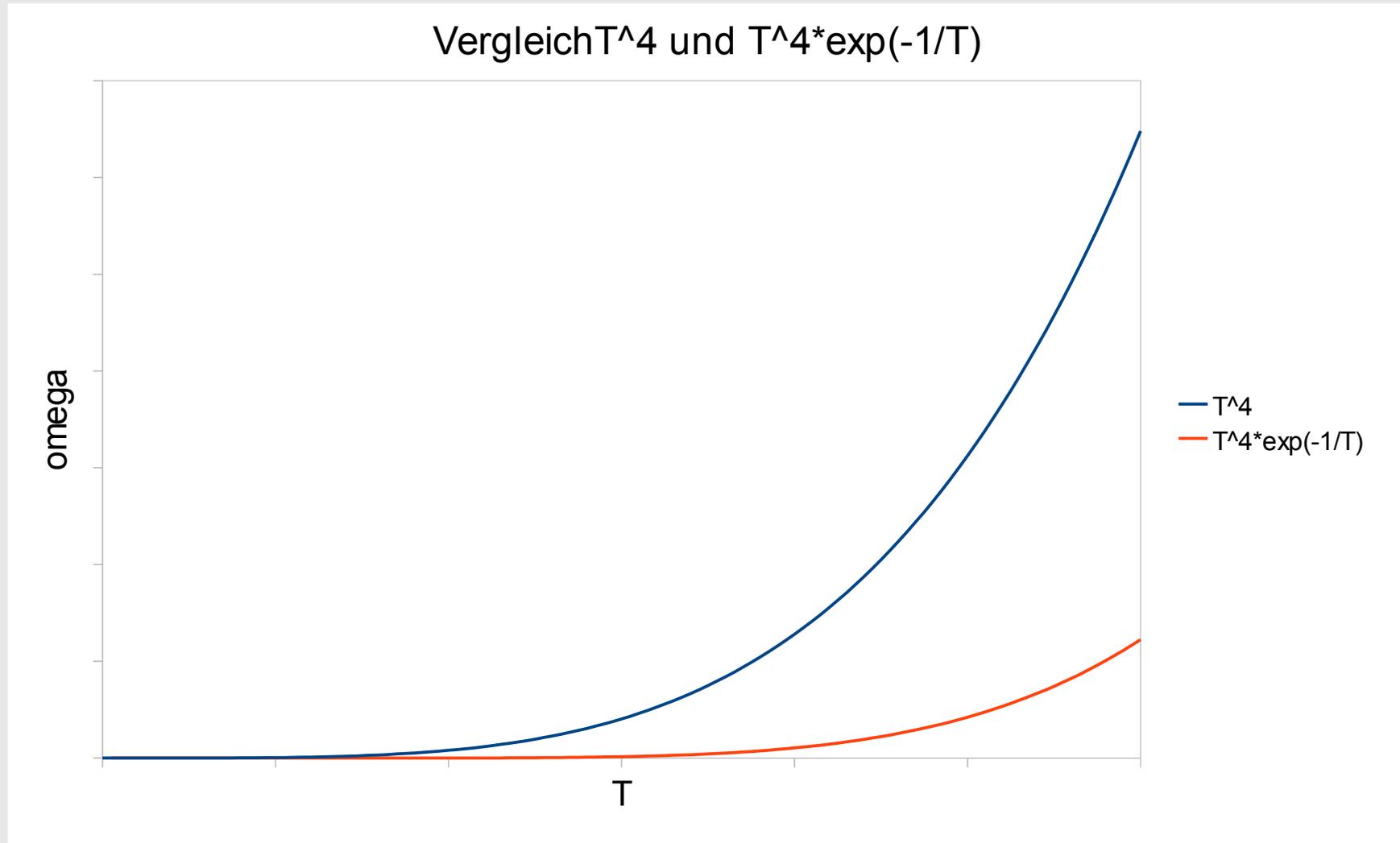
$$\omega_0 \sim T^4 \quad \omega_0 : \text{Strahlungsintensität ohne WW}$$
$$\omega_W = \omega_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d) \quad \omega_W : \text{Strahlungsintensität mit WW}$$

$$\Rightarrow \omega_W \sim T^4 \cdot \exp(-\mu \cdot d)$$

mit der Annahme , dass  $\mu \sim \lambda \sim \frac{1}{T}$  und der Relation  $U \sim \omega$  folgt :

$$\omega_W \sim T^4 \cdot \exp\left(-\frac{1}{T}\right)$$

# Graphische Darstellung



# Fehlerquellen

- Luftzirkulationen im Raum
- zusätzliche Wärmestrahlung durch Heizung & BeobachterInnen
- Inhomogenität der Wasserwand durch Strömungseffekte und Randerscheinungen
- Pumpenlaufzeit beschränkt

# 4. Feldversuch

# Aufbau des Feldversuchs



# Einsatz des Hydroschilds



## Technische Daten: Hydroschild

Anschluss: B-Leitung (75 mm Innendurchmesser)

Nennleistung: 1400 l/min (bei 5 bar Eingangsdruck)

Wurfhöhe: 7 m (=a)

Wurfweite: 13 m (=b)

Abgedeckte Fläche:  $A_{\text{HS}} = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2} \approx 143 \text{ m}^2$

→ sehr geringe Dicke der Wasserwand

# Hydroschild-Wasserwand



# Verbrennungstemperatur von Propangas

Gemessener Wert (nach Literatur): 1925 °C

Theoretischer Wert:

$$t_b - t_U = \frac{H_U}{c_p \cdot \left(1,24 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot H_U + 1\right)} \Rightarrow t_b \approx 2293 \text{ K} \approx 2020 \text{ °C}$$

$t_b$  = Verbrennungstemperatur

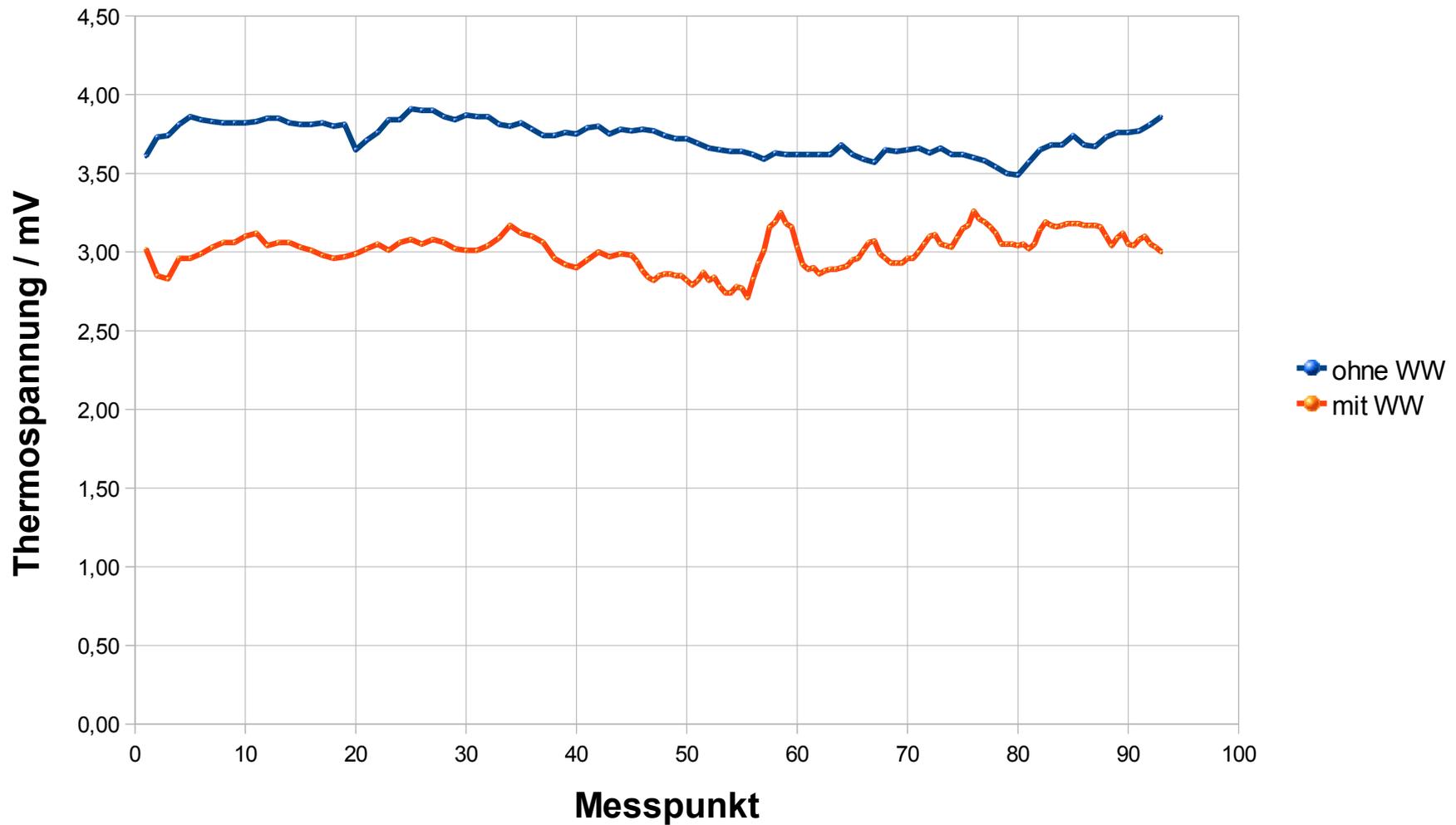
$t_U$  = Umgebungstemperatur = 295 K

$H_U$  = Heizwert =  $12,89 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität der Abgase =  $3,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kWh}}{\text{kgK}}$

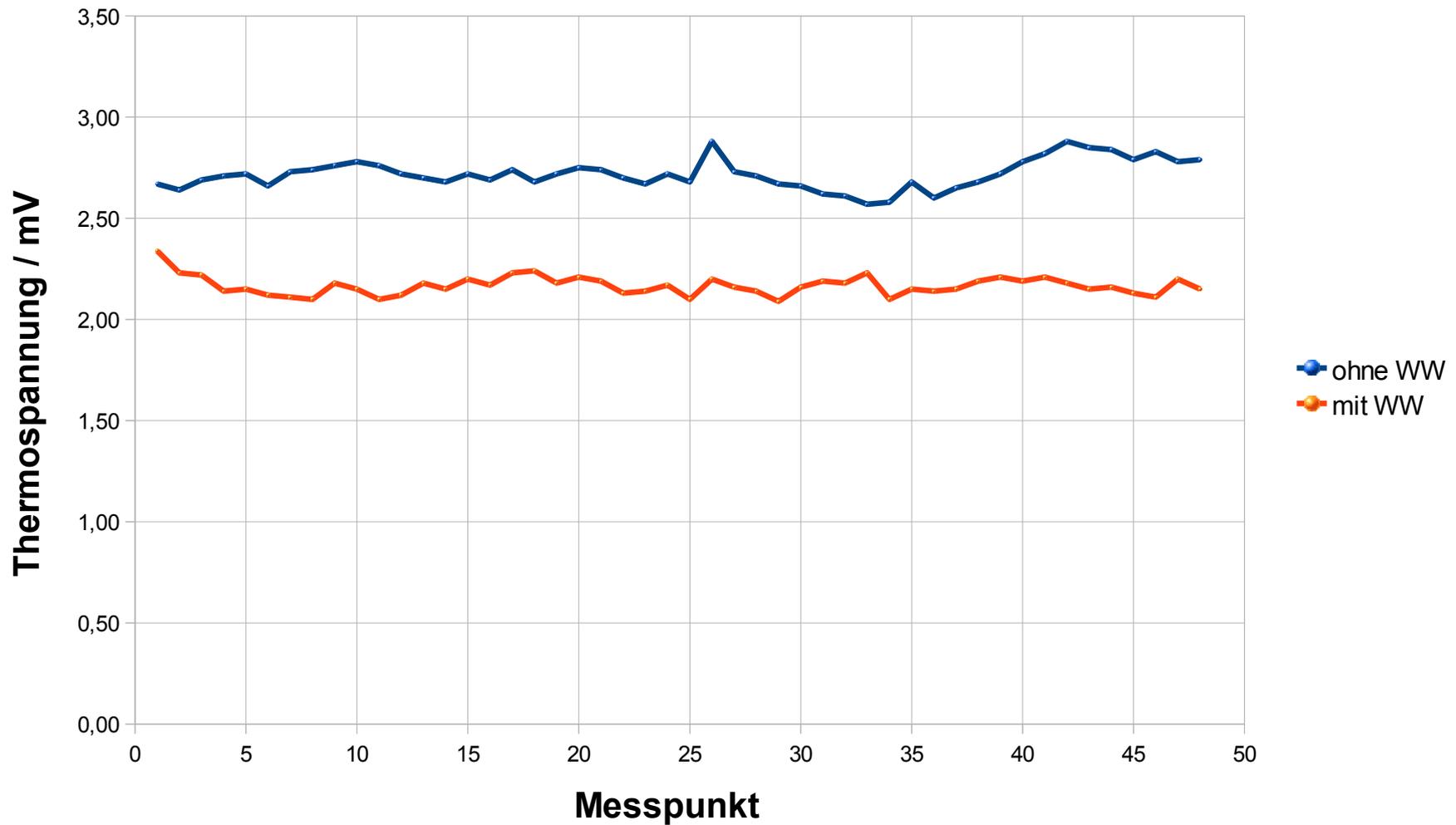
# Messkurve (Cassy)

## Ergebnisse des Feldversuchs (mit Cassy gemessen)



# Messkurve (Multimeter)

Ergebnisse des Feldversuchs (mit dem Multimeter gemessen)



# Zusammenfassung der Ergebnisse

## Versuch mit dem Multimeter

	ohne WW	mit WW
	Thermosp. in mV	Thermosp. in mV
<b>Mittelwert</b>	2,72	2,17
<b>Standardabw.</b>	0,07	0,05

Differenz	0,55
in %	20,22

Fehler:	0,09	entspricht in %	3,16
---------	------	-----------------	------

**Schwächung (20 ± 3) %**

## Versuch mit Cassy

	ohne WW	mit WW
	Thermosp. in mV	Thermosp. in mV
<b>Mittelwert</b>	3,73	3,01
<b>Standardabw.</b>	0,10	0,12

Differenz	0,72
in %	19,3

Fehler:	0,16	entspricht (in%)	4,19
---------	------	------------------	------

**Schwächung (19 ± 4) %**

# 5. Fazit und Ausblick

# Fazit

## Laborexperiment:

- es lässt sich keine prozentuale Abschwächung über unsere Temperaturintervall bestimmen
- signifikante Abschwächung ist jedoch vorhanden

## Feldversuch:

- Abschwächung der Wärmestrahlung liegt bei ca. 20%  
→ Effizienz für Einsatzzwecke der Feuerwehr zu gering

## Ausblick (Laborversuch)

- wesentlich höhere Temperaturen
- homogenere Strahlungsquelle, bestenfalls schwarzer Strahler
- Laborwasserwand an Hydroschildwasserwand anpassen
- bestenfalls Vakuumaufbau
- Absorptionskoeffizienten von Wasser aufnehmen

# Quellenverzeichnis

- Bild Deckblatt: Pressestelle Feuerwehr Herdecke (FFH)
- Rechtes Bild Folie 4: Pressestelle Feuerwehr Herdecke (FFH)
- Grafik Folie 7: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de) (Urheber: Sch)
- Graph Folie 10: [www.staff.uni-mainz.de](http://www.staff.uni-mainz.de)
- Grafik Folie 11: [www.chemgapedia.de](http://www.chemgapedia.de)
- Oberes Bild Folie 12: [www.phywe.de](http://www.phywe.de)
- Unteres Bild Folie 12: Ursprünglich Gerthsen Physik, 23. Auflage, Springer, 2006, S.589 – durch uns bearbeitet.
- Bild Folie 15: [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de) (Urheber: Cepheiden)
- Emissionswert Folie 36: [www.thermografie-xtra.de](http://www.thermografie-xtra.de)
- Literatur zur Folie 45: Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik und Wirtschaftlichkeit, Hirschberg, Springer, 1999

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

---

Dank an alle Mitarbeiter des Praktikums, der Werkstatt  
und an die Feuerwehr Herdecke,  
die uns bei diesem Projekt tatkräftig unterstützt haben!