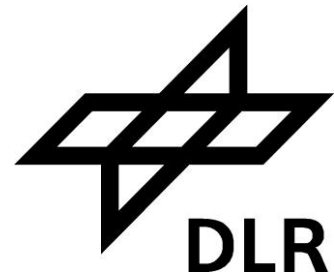




**Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin**

*University of Applied Sciences*



# **Bachelorarbeit**

## **Entwicklung einer Messvorrichtung zur Erfassung der Partikeltemperatur in einem Fallvorhang**

erstellt von

**Simon Hamann**

Studiengang Umwelttechnik/Regenerative Energien

Bearbeitungszeitraum: 01.10.2010 bis 15.12.2010

Erstprüfer (HTW Berlin):

Zweitprüfer (HTW Berlin):

Betreuer (DLR Stuttgart):

Prof. Dr.-Ing Petra Bittrich

Prof. Dr. Bert Stegmann

Dipl. Phys. Birgit Gobereit

Dipl. Ing. Lars Amsbeck



## Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Messvorrichtung zur Erfassung der Partikeltemperatur in einem Fallvorhang, wie er in künftigen Turmkraftwerken zur solarthermischen Energiewandlung eingesetzt werden könnte.

Am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt in Stuttgart befindet sich momentan ein Versuchsstand im Aufbau mit dem das aerodynamische und thermische Verhalten von frei fallenden Partikeln in einem solchen Fallvorhang, sowie eine Vorrichtung zur Partikelrezirkulation untersucht werden sollen. In diesem Teststand werden keramische Partikel mit einem mittleren Durchmesser von  $458 \mu\text{m}$  während des Herabfallens der Bestrahlung durch zwei Heizstrahler ausgesetzt. Die Überprüfung des thermischen Verhaltens der Partikel in diesem Teststand und der Effektivität der Energiewandlung setzt die genaue Kenntnis ihrer Temperatur voraus. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konstruktion der Messvorrichtung wie auch die Versuche zur Überprüfung ihrer Funktionalität. Der Messfehler der entwickelten Vorrichtung wird auf unter ein Prozent der gemessenen Temperatur geschätzt.

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Stuttgart, 15.12.2010

.....  
Simon Hamann

## Liste der verwendeten Formelzeichen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\Phi_e$	$W$	Strahlungsleistung
$\rho$	-	Reflexionsgrad
$\tau$	-	Transmissionsgrad
$\alpha$	-	Absorptionsgrad
$\varepsilon$	-	Emissionsgrad
$W$	$J$	Arbeit
$Q_{zu}$	$J$	zugeführte Wärme
$Q_{ab}$	$J$	abgeführte Wärme
$\eta_{th,C}$	-	Carnot-Wirkungsgrad
$T_{ab}$	$K$	Temperatur der Wärmesenke
$T_{zu}$	$K$	Temperatur der Wärmequelle
$A_\rho$	$m^2$	Reflektorfläche
$A_\alpha$	$m^2$	Absorberfläche
$C$	-	Konzentrationsfaktor
$C_{max}$	-	maximaler Konzentrationsfaktor
$C_{max,linear}$	-	maximaler Konzentrationsfaktor bei einachsiger Nachführung und Linienkonzentration
$T_{max}$	$K$	Maximale Temperatur
$T_{Sonne}$	$5777 K$	Temperatur der Sonne
$E_0$	$1367 W/m^2$	Solarkonstante
$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$r_{SE}$	$1,5 \cdot 10^{11} m$	Abstand Sonne –Erde
$r_S$	$6,963 \cdot 10^8 m$	Radius der Sonne
$E_{dir}$	$W/m^2$	Direktstrahlung
$E_{diff}$	$W/m^2$	Diffusstrahlung
$L_{ges}$	$W/m^2$	Gesamtstrahldichte

---

$L_{Obj}$	$W/m^2$	vom Messobjekt ausgehende Strahldichte
$L_{refl}$	$W/m^2$	vom Messobjekt reflektierte Strahldichte
$L_{Atm}$	$W/m^2$	von der Atmosphäre ausgehende Strahldichte
$A_{quer}$	$m^2$	Querschnittsfläche des TE
$A_{TE}$	$m^2$	Oberfläche des TE
$T_{TE}$	K	TE Temperatur
$T_P$	K	Partikeltemperatur
$T_W$	K	Wandtemperatur
$T_{Lu}$	K	Lufttemperatur
$T_U$	K	Umgebungstemperatur

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>II</b>
<b>Liste der verwendeten Formelzeichen</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhalt</b>	
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Vorwort/ Motivation .....	1
1.2 Thema/Aufgabenbeschreibung .....	2
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Solarthermie .....	3
2.1.1 Strahlung.....	3
2.1.2 Thermodynamik .....	5
<b>3 Technische Anwendung/ Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
3.1 Das Parabolrinnen Kraftwerk.....	10
3.2 Fresnel-Kraftwerke .....	11
3.3 Dish-Stirling .....	11
3.4 Das Solarturm-Kraftwerk.....	13
3.4.1 Receiverbauarten.....	13
<b>4 Temperaturmessung</b> .....	<b>19</b>
4.1 Berührende Verfahren.....	19
4.1.1 Das Ausdehnungsthermometer .....	20
4.1.2 Das Widerstandsthermometer .....	20
4.1.3 Das Thermoelement .....	22
4.2 Nicht berührenden Verfahren.....	23
4.2.1 Thermische Detektoren .....	25
4.2.2 Quantendetektoren .....	25
<b>5 Entwicklung der Messvorrichtung</b> .....	<b>28</b>
5.1 Versuchsaufbau .....	28
5.2 Modellrechnung.....	30
5.3 Messvorrichtung .....	36
<b>6 Ergebnisse</b> .....	<b>39</b>
6.1 Erster Funktionstest .....	39
6.1.1 Versuchsaufbau .....	40
6.2 Randbedingungen .....	41

Inhalt	VI
6.3 Zuführvorrichtung .....	42
6.4 Messungen mit einem Zylinder .....	45
6.5 Messungen mit zwei Zylindern .....	46
6.5.1 Reale Temperaturdifferenzen .....	50
<b>7 Fehlerbetrachtung .....</b>	<b>56</b>
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>57</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>58</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>60</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>66</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Vorwort/ Motivation

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Umweltbelastung durch die konventionelle Energiewandlung zu reduzieren. Zum einen, und dies ist auf kurze Sicht wahrscheinlich der effektivste Weg, ein verantwortungsbewusster Umgang mit Energie. Eine Auflistung all der Möglichkeiten, diesen in die Tat umzusetzen, wäre genauso lang wie müßig. Erfreulich ist, dass gerade in den letzten Jahren, mit steigender Präsenz dieses Themas in den Medien auch diejenigen für dieses Thema sensibilisiert werden, die sich auf eigene Initiative hin vielleicht noch nicht mit der Problematik der Endlagerung von radioaktivem Material oder dem CO<sub>2</sub> Ausstoß von fossilen Kraftwerken auseinandergesetzt hätten. Die andere Möglichkeit ist die Entwicklung von Techniken zur Energiewandlung bei denen die Umweltbelastung deutlich reduziert wird. Dies sind vor allem die Techniken der regenerativen Energiewandlung. Bei stetiger Weiterentwicklung dieser Techniken ist es möglich den Strom und Wärmebedarf in Deutschland in wenigen Jahrzehnten vollständig aus regenerativen Energiequellen zu decken. Gerade aber auch großen Schwellenländern wie Indien und China muss die Möglichkeit gegeben sein, ihren wachsenden Energiebedarf kostengünstig aus regenerativen Quellen decken zu können. In Anbetracht eines weltweit steigenden Energiebedarfs und schon heute teils nicht mehr zu übersehenden Auswirkung der konventionellen Energiewandlung auf unsere Umwelt, ist es von größter Dringlichkeit die Kosten für aus regenerativen Quellen stammender Energie weiter zu senken. Einen kleinen Teil hierzu beitragen zu können war die Motivation zu dieser Arbeit.

*"I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don't have to wait till oil and coal run out before we tackle that."*

Thomas Alva Edison, 1931

## 1.2 Thema/Aufgabenbeschreibung

Eine Möglichkeit der regenerativen Energiewandlung stellt die Solarthermische Energiewandlung dar. Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) ist seit langem eine der führenden Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der großtechnischen Nutzung der Solarenergie. An den Standorten Köln, Stuttgart und Almeria/Spanien wird insbesondere an der Weiterentwicklung und der Kostensenkung von Bauteilen für den Einsatz in Parabolrinnen- und Turmkraftwerken geforscht. Am Standort Stuttgart befindet sich zurzeit ein Versuch zur Untersuchung eines Partikelfallvorhangs, wie er in künftigen Turmkraftwerken Verwendung finden könnte, im Aufbau. In diesen werden Partikel während des Herabfallens konzentrierter Solarstrahlung ausgesetzt und dadurch erhitzt. Ein Teil dieser Versuche wird es sein, den Temperaturanstieg der Partikel während des Fallvorgangs zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Messvorrichtung entwickelt werden, die es ermöglicht die Absoluttemperatur der Partikel nach dem Herabfallen möglichst genau zu bestimmen.

## 2 Grundlagen

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um die Entwicklung einer Temperaturmessvorrichtung für eine solarthermische Anwendung handelt, werden hier zunächst die entsprechenden Grundlagen erläutert. Der erste Teil behandelt die solarthermischen Grundlagen und der zweite Teil die Grundlagen der Temperaturmessung.

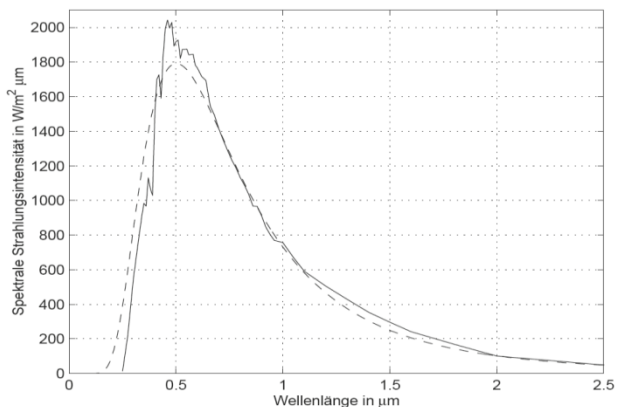
### 2.1 Solarthermie

Solarthermische Energiewandlung bedeutet ganz allgemein die Wandlung der von der Sonne ausgesandten Strahlung in thermische Energie. Die thermische Energie lässt sich auf vielfältige Weise nutzen, z.B. zur Strom-, Prozesswärme- oder Brennstoffproduktion. Bevor im nächsten Abschnitt auf die technischen Anwendungen der solarthermischen Energiewandlung eingegangen wird, werden hier kurz die zum Verständnis notwendigen physikalischen Grundlagen erläutert.

#### 2.1.1 Strahlung

Jeder Körper mit einer von 0 K verschiedenen Temperatur emittiert Wärmestrahlung – so, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, auch die Sonne. Die Wärmestrahlung der Sonne wird beim Auftreffen auf einen Körper, je nach seinen Oberflächeneigenschaften und seiner atomaren Struktur entweder reflektiert, transmittiert oder absorbiert. Welchen Anteil die jeweiligen Vorgänge an der gesamten auftreffenden Strahlungsleistung  $\Phi_e$  haben, wird durch den Reflexionsgrad  $\rho$ , den Transmissionsgrad  $\tau$  und den Absorptionsgrad  $\alpha$  beschrieben.

Die Summe dieser drei Anteile ergibt stets 1. Eine vierte Größe, der Emissionsgrad beschreibt den Strahlungsfluss den ein Körper



**Abbildung 2.1:** Strahlungsintensität der Sonne und eines schwarzen Körpers bei 5777 K

entsprechend seiner Temperatur abstrahlt. Laut Kirchhoff ist der Emissionsgrad  $\epsilon$  bei gegebener Wellenlänge gleich dem Absorptionsgrad  $\alpha$ . Der absorbierte Anteil der solaren Wärmestrahlung bewirkt einen Anstieg der inneren Energie und somit, außer während des Phasenübergangs, einen Anstieg der Temperatur des bestrahlten Körpers. Die Richtung der Reflexion wird durch die Oberflächenrauigkeit eines Körpers bestimmt. Ist die Rauigkeit eines Körpers klein gegenüber der Wellenlänge der auf ihn treffenden Strahlung wird die Strahlung gerichtet reflektiert, d.h. im gleichen Winkel

abgestrahlt wie sie auf den Körper trifft. Ist die Rauigkeit eines Körpers hingegen groß gegenüber der Wellenlänge der auf ihn treffenden Strahlung, wird sie diffus in den umgebenden Halbraum abgestrahlt. Bei der Transmission durch einen Körper erfolgt ebenfalls eine Ablenkung der Strahlung. Hierbei wird Strahlung an der Grenzfläche der beiden Medien entsprechend ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit in den jeweiligen Medien und ihrer Einfallrichtung gebrochen. Der Anteil, den die für die solare Wärmeengewinnung entscheidende Absorption an der gesamten Strahlungsleistung hat, wird außerdem zur Vereinfachung wie folgt beschrieben. Ein *schwarzer Strahler* absorbiert die gesamte auf ihn treffende Strahlung ( $\alpha = 1$ ), wohingegen ein *weißer Strahler* die gesamte auf ihn treffende Strahlung diffus reflektiert ( $\rho = 1$ ). Ein *grauer Strahler* absorbiert über den gesamten Wellenlängenbereich zu gleichen Teilen die auf ihn treffende Wärmestrahlung, d.h. sein Absorptionsgrad ist zwar von 1 verschieden jedoch über das gesamte Spektrum konstant, wohingegen der Absorptionsgrad eines *selektiven Strahlers* mehr oder weniger stark mit der Wellenlänge variiert. Die von einem schwarzen Strahler mit der Fläche  $A$  in den Halbraum ( $\Omega = 2\pi$ ) abgestrahlte Leistung im Wellenlängenbereich  $\lambda$  bis  $\lambda + d\lambda$  berechnet sich nach Max Planck<sup>1</sup> aus

$$dP_\lambda = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5} \frac{A}{e^{hc_0(k\lambda T)} - 1} \quad [2.1]$$

Ist also die Strahlungsleistung  $dP_\lambda$  bekannt, lässt sich hieraus die Temperatur des schwarzen Strahlers berechnen. In der Realität sind allerdings alle Strahler selektiv, was ihre Temperaturbestimmung über den Planck'schen Strahlungssatz erschwert. Ihre Strahlungseigenschaften lassen sich jedoch häufig ausreichend genau mit den jeweiligen Modellvorstellungen beschreiben. So kann z.B. die Sonne wie in Abb.1.1 ersichtlich für die meisten Fälle ausreichend genau als schwarzer Strahler beschrieben werden.

Da der Emissionsgrad  $\varepsilon$  für jeden beliebigen Körper bei gegebener Wellenlänge gleich dem Absorptionsgrad  $\alpha$  ist und sich das Maximum der Strahldichte laut Wien mit sinkender Temperatur zu höheren Wellenlängen verschiebt, können und werden die beschriebenen selektiven Eigenschaften nutzbringend in der Solarthermischen Energiewandlung eingesetzt. Hierzu werden die, die Solarstrahlung absorbierenden Körper, wo es technisch und finanziell sinnvoll ist, so beschichtet, dass sie im kurzwelligen Bereich, also dort wo die Strahldichte der Sonne am höchsten ist möglichst gut absorbieren und im langwelligeren Bereich möglichst wenig Wärmestrahlung emittieren. Hierdurch werden die Abstrahlverluste des Absorbers minimiert und sein Wirkungsgrad gesteigert.

---

<sup>1</sup> Max Karl Ernst Ludwig Planck (\*23. April 1858 in Kiel; † 4. Oktober 1947 in Göttingen) gilt als Begründer der Quantenphysik. Er erhielt 1918 den Nobelpreis für die Entdeckung des planck'schen Wirkungsquantums.

### 2.1.2 Thermodynamik

Eine der wichtigsten Anwendungen solarthermischer Energiewandlung ist, neben Prozesswärmeerzeugung und chemischer Umwandlung, die Wandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie. Hierbei wird die Wärmestrahlung der Sonne zunächst in thermische Energie gewandelt. In einer Wärmekraftmaschine wird diese thermische Energie dann in mechanische Energie und diese dann über einen Generator in elektrische Energie gewandelt. Grundlage der Wandlung thermischer in mechanische Energie sind verschiedene thermodynamische Kreisprozesse. In diesen Prozessen wird einem Arbeitsmedium Wärme zugeführt und durch anschließende Entspannung Arbeit erhalten. Diese Arbeit kann zum Antrieb einer Maschine oder eines Generators genutzt werden (Weigand et al., 2008). Diese Kreisprozesse werden oft an einem idealen Kreisprozess, dem Carnot Prozess, gemessen. Der Wirkungsgrad des rein theoretischen Carnot-Prozesses gibt an, welcher Teil der ihm zugeführten Wärme maximal in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann.

Die Wirkungsgrade aller realen Kreisprozesse liegen stets unter dem des Carnot-Prozesses. Die abgegebene Nutzarbeit aller Kreisprozesse berechnet sich aus der Differenz aus der ihm zugeführten Wärme  $Q_{zu}$  und der abgeführten Wärme  $Q_{ab}$ .

$$|W| = Q_{zu} - |Q_{ab}| \quad [2.2]$$

Der Carnot-Wirkungsgrad berechnet sich aus dem Quotient von abgegebener Nutzarbeit und der zugeführter Wärme.

$$\eta_{th,c} = \frac{|W|}{Q_{zu}} = \frac{T_{zu} - T_{ab}}{T_{zu}} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad [2.3]$$

Aus Gleichung [2.3] ist ersichtlich, dass die den Wirkungsgrad bestimmenden Parameter, die Temperatur der Wärmesenke  $T_{ab}$  und die Temperatur der Wärmequelle  $T_{zu}$  sind. Zur Erreichung möglichst hoher Wirkungsgrade sollte also der Ausdruck  $T_{ab}/T_{zu}$  möglichst gegen null laufen. Ein Wirkungsgrad von 100% ist also nur theoretisch bei einer unendlich hohen Temperatur der Wärmequelle oder unendlich kleiner Temperatur der Wärmesenke zu erreichen. Da bei realen Prozessen die untere Temperatur zumeist durch die Temperatur der Umgebungsluft oder die Temperatur des vorhandenen Kühlwassers gegeben ist, ist zur Erreichung hoher Wirkungsgrade eine möglichst hohe obere Prozesstemperatur notwendig. Die Wirkungsgrade moderner GuD-Kraftwerke überschreiten 60% und es werden Temperaturen oberhalb von 1500°C

erreicht<sup>2</sup>. Ziel der Solarforschung muss es also sein, über die Absorption der Sonnenstrahlung Wärme auf möglichst hohem Temperaturniveau bereitzustellen.

---

2

[http://www.siemens.com/innovation/de/publikationen/zeitschriften\\_pictures\\_of\\_the\\_future/pof\\_herbst\\_2007/materialien\\_fuer\\_die\\_umwelt/gasturbine\\_irsching.htm](http://www.siemens.com/innovation/de/publikationen/zeitschriften_pictures_of_the_future/pof_herbst_2007/materialien_fuer_die_umwelt/gasturbine_irsching.htm)

### 3 Technische Anwendung/ Stand der Technik

Die solarthermische Energiewandlung blickt auf eine jahrtausendealte Geschichte zurück. Nach Aristoteles sollen Seeleute in der Antike Meerwasser mit Hilfe von konzentriertem Sonnenlicht destilliert haben. Im Jahr 1615 wurde die erste Konstruktion einer solarbetriebenen Wasserpumpe veröffentlicht (Wesselack et al., 2009) und im Zweiten Weltkrieg wurde ein Parabolrinnen-Kraftwerk zerstört, welches eine Leistung von 40 kW zum Betrieb von Pumpen für die Bewässerung bereitgestellt hat (Vogel et al., 2010). Heute wird die solarthermische Energiewandlung in den unterschiedlichsten Formen angewandt. Ihre Anwendungsmöglichkeiten reichen von der Trink- und Brauchwassererwärmung, über die Kühlung und das Heizen von Gebäuden, bis hin zur Bereitstellung von Prozesswärme für die Industrie und der Erzeugung von elektrischem Strom, der Meerwasserentsalzung und der Erzeugung von Brennstoffen.

Ein generelles Problem der Regenerativen Energiewandlung ist die Speicherung der Energie. Es existiert zwar eine Vielzahl an Speichermöglichkeiten, jedoch sind die meisten dieser Möglichkeiten mit hohem technischen Aufwand, also hohen Kosten, oder schlechten Wirkungsgraden verbunden. Für die Speicherung photoelektrisch gewonnener Energie werden beispielsweise chemische Energiespeicher wie Batterien oder Wasserstoff mit Verlusten von 20-50% benötigt (Vogel et al., 2010). Ein Vorteil der solarthermischen Energiewandlung gegenüber anderen Technologien der regenerativen Energiewandlung, kann daher die relativ einfache und kostengünstige Speicherung, der solarthermisch „gewonnenen“ Wärme sein.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Temperaturmessung von Partikeln in Fallvorhängen, wie sie in künftigen Solarturm-Kraftwerken zur Erzeugung von Prozesswärme und von elektrischem Strom Verwendung finden könnten. In diesen wird die Solarstrahlung zur Erreichung höherer Energiedichten und letztendlich höherer Temperaturen mit Hilfe von Spiegeln konzentriert. Um die Besonderheiten des Solarturmkonzeptes verdeutlichen zu können, werden in den folgenden Abschnitten zunächst einige technische Anwendungen der konzentrierenden Solarthermie vorgestellt, bevor dann die Energiewandlung im Solarturm-Kraftwerk erläutert wird.

Wie in Abschnitt 1.1.2 erwähnt, sind zur Erreichung hoher Wirkungsgrade bei thermodynamischen Kreisprozessen hohe obere Prozesstemperaturen erforderlich. Diese hohen Temperaturen lassen sich in der Solarthermie nur durch die Konzentration der Solarstrahlung erreichen. Dazu wird die Solarstrahlung über Spiegel mit der Fläche  $A_p$  auf einen Absorber mit der Fläche  $A_\alpha$  konzentriert. Der Konzentrationsfaktor  $C$  beschreibt das Verhältnis dieser beiden Flächen zueinander:

$$C = \frac{A_p}{A_\alpha} \quad [3.1]$$

Aus dem Abstand  $r_{SE}$  der Sonne zur Erde und dem Radius  $r_S$  der Sonne lässt sich der auf der Erde theoretisch maximal erreichbare Konzentrationsfaktor  $C_{max} = 46211$  berechnen (Quaschnig, 2009). Dieser gilt für ideale, zweiachsig nachgeführte Punktkonzentratoren. Über die Solarkonstante  $E_0$  und die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  lässt sich hieraus die theoretisch auf der Erde durch konzentrierende Solarthermie maximal erreichbare Temperatur  $T_{max}$  berechnen.

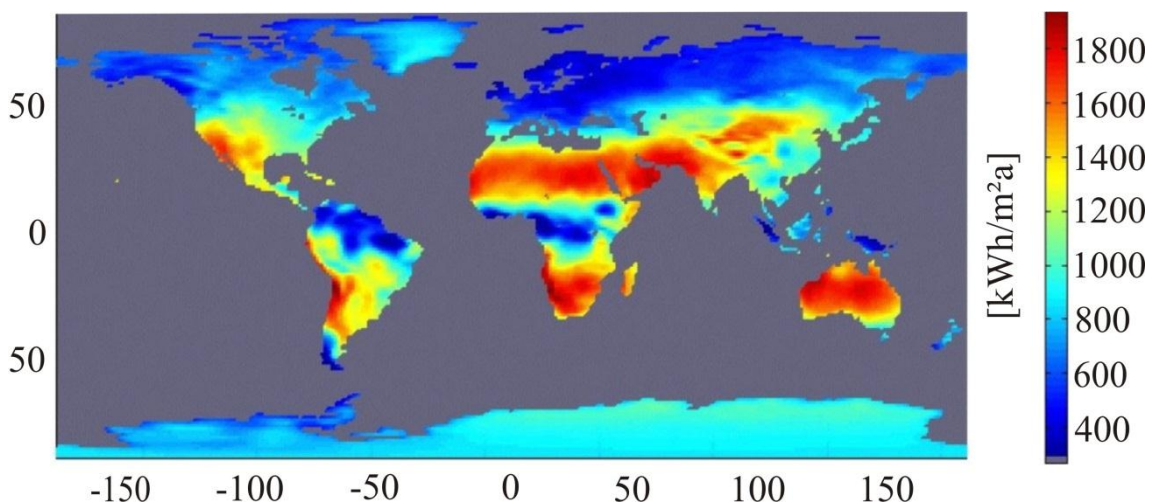
$$T_{max} = \sqrt[4]{\frac{C_{max}E_0}{\sigma}} = 5777 \text{ K} = T_{Sonne} \quad [3.2]$$

Für zweiachsig nachgeführte Linienkonzentratoren ergibt sich der theoretisch maximale Konzentrationsfaktor zu

$$C_{max,linear} = \sqrt{C_{max}} = 215 \text{ .} \quad [3.3]$$

Mit Gleichung [3.2] ergibt sich hieraus die bei Linienkonzentration theoretisch erreichbare maximale Temperatur von  $1509 \text{ K}$ .

Alle Systeme der konzentrierenden Solarthermie können nur den gerichteten Teil der Solarstrahlung  $E_{dir}$  nutzen. Es ist ihnen nicht möglich, den diffusen Anteil  $E_{diff}$  der Solarstrahlung auf einen Absorber zu konzentrieren. Abbildung 1.2 zeigt die Verteilung der Direkt-Horizontal-Strahlung im zehnjährigen Mittel für die Jahre 1983-1992. Hierauf sind deutlich die gut zur Energiewandlung mittels konzentrierender Solarthermie geeigneten Regionen erkennbar. Dies sind vor allem die äquatornahen Wüstengebiete in Nordafrika sowie im Nahen und Fernen Osten. Außerdem die Region um die Baja California, einige Orte in den Anden, der Süden Afrikas und Australien. In Deutschland beträgt die mittlere Direkt-Strahlung nur noch etwa 40% der Regionen mit der höchsten Direkt-Strahlung.



**Abbildung 3.1:** Weltkarte des zehnjährigen Mittelwertes der Direkt-Strahlung ( $E_{dir}$ ) für die Jahre 1983–1992. (Czisch, 2005) / (EZMW)



Da die Stromgestehungskosten solarthermisch erzeugten Stroms direkt von der Bestrahlungsstärke abhängig sind, ist ein wirtschaftlicher Betrieb solarthermischer Kraftwerke momentan nur in den oben genannten Regionen möglich.

### 3.1 Das Parabolrinnen Kraftwerk

Die am weitesten verbreitete und auch am längsten kommerziell genutzte großtechnische Anwendung konzentrierender Solarthermie ist das



**Abbildung 3.2:** Parabolrinnenkraftwerk

Parabolrinnenkraftwerk. Bei diesem Kraftwerkstyp wird die Solarstrahlung mittels einachsig nachgeführter Parabolspiegel, mit einer Länge von bis zu mehreren hundert Metern und einer Aperturweite von 2,5 m bis 5,76 m (4), auf ein Absorberrohr in der Brennpunktlinie des Spiegels konzentriert. In den Absorberrohren zirkuliert ein Wärmeträgermedium welches über Wärmetauscher Dampf für einen konventionellen Dampfturbinenprozess

erzeugt. Bei einem Überangebot an Wärme können mit der überschüssigen Wärme Wärmespeicher beladen werden, welche nachts oder bei Wolkendurchzug wieder entladen werden können. Um die Anlagen auch bei längeren Schlechtwetterperioden betreiben zu können und um ein Einfrieren des Wärmeträgers verhindern zu können besteht häufig die Möglichkeit einer konventionellen Zufeuerung.

Das Absorberrohr besteht aus einem selektiv beschichteten Metallrohr durch welches ein Wärmeträgerfluid strömt. Die Außenhaut des Absorberrohres wird gegenüber dem Wärmeträgermedium stets eine Übertemperatur aufweisen, was thermodynamisch ungünstig ist, da die Abstrahlverluste mit der Temperatur in der vierten Potenz steigen. Um die Konvektionsverluste möglichst gering zu halten ist das Absorberrohr von einem evakuierten Glasrohr umgeben. Übliche Wärmeträgermedien sind geschmolzenes Salz oder auch spezielle Thermoöle. Die maximale Temperatur des Wärmeträgermediums ist durch seine chemischen Eigenschaften begrenzt. So liegt die maximale Betriebstemperatur von Thermoöl bei etwa 390°C und die von Salz bei etwa 550°C (7). Die überwiegende Anzahl der heutigen Parabolrinnenkraftwerke werden mit Thermoöl bei Solarfeldauslasstemperaturen von bis zu 390°C betrieben. Höhere Temperaturen lassen sich bei der Verwendung von Salz als Wärmeträger realisieren. Jedoch steigen hierdurch die thermischen Verluste am Absorberrohr und der durch die höheren Temperaturen steigende Wirkungsgrad des sich anschließenden Wärmekraftprozesses wird ab einer bestimmten, von der Auslegung des Kraftwerks abhängigen Temperatur, überkompensiert.

### 3.2 Fresnel-Kraftwerke

Dieser Kraftwerkstyp funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie das Parabolrinnenkraftwerk. Statt mit Hilfe eine Parabolrinne wird das Sonnenlicht hier mit Hilfe vieler, ebenfalls einachsiger der Sonne nachgeführter, planarer oder leicht gebogener Spiegel, wie in Abbildung 3.3 gezeigt auf ein Absorberrohr konzentriert. Der Vorteil dieser Technologie gegenüber der Parabolrinne liegt vor allem in den geringeren Kosten für das Solarfeld. Allerdings steht diesen geringeren Kosten ein geringerer Kollektorwirkungsgrad gegenüber. Nach Berechnungen von Lerchenmüller et al. wird erwartet, dass die Vorteile die Nachteile überkompensieren und je nach Standort in 8 bis 17 % geringeren



**Abbildung 3.3:** Fresnel-Kraftwerk Stromgestehungskosten gegenüber denen von Parabolrinnen-Kraftwerken resultieren werden (Lerchenmüller et al., 2004). Da für die Fresnel-Kraftwerke, im Gegensatz zu den Parabolrinnen-Kraftwerken bisher nur wenige Betriebsdaten existieren, müssen diese Ergebnisse noch anhand eines Einsatzes im Kraftwerk validiert werden.

### 3.3 Dish-Stirling

Im Gegensatz zur bisher beschriebenen Parabol- und Fresneltechnologie eignen sich die Dish- Stirling Anlagen auch zur dezentralen und netzfernen Stromversorgung. Ebenso gut können die Anlagen aber auch in großer Anzahl zusammengeschlossen werden und ins Netz einspeisen. Ein einzelner von der Firma Stirling Energy Systems, Inc. produzierte Sun Catcher™ kann eine Leistung von bis zu 25 kW elektrisch bereitstellen<sup>3</sup>. Bei diesen Anlagen wird das Sonnenlicht mittels eines zweiachsiger der Sonne nachgeführten Parabolspiegels auf einen Receiver<sup>4</sup> im Brennpunkt des Spiegels konzentriert. Die so erzeugte Wärme wird an einen Stirling-Motor übertragen, der einen Generator betreibt und somit elektrischen Strom erzeugt. Spiegel, Receiver und Motor bilden hier eine fest miteinander verbundene Einheit. Bei der beim Euro-Dish verwendeten Receiver-Motor Kombination liegen die erreichten Maximaltemperaturen auf den Rohrvorderseiten des Receivers bei etwa 900°C und die Gastemperatur im Stirling-Motor bei etwa 650°C (Laing et al., 2002), was eine Übertemperatur von 250°C bedeutet. Trotz dieser hohen Übertemperaturen ist der Receiver aufgrund der hohen Konzentration noch sehr effizient. Ein Nachteil bei Dish-Stirling Systemen ist,

<sup>3</sup> <http://stirlingenergy.com/how-it-works.htm>

dass bei heutigen Anlagen noch keine Möglichkeit zur Speicherung der solar gewonnenen Wärme oder zur konventionellen Zufeuerung besteht.

---

<sup>4</sup> Siehe auch 3.4.1.1 Rohrreceiver

### 3.4 Das Solarturm-Kraftwerk

Bei den Solarturm-Kraftwerken werden, wie auch beim Dish-Stirling System, die das Sonnenlicht konzentrierenden Spiegel zweiachsig der Sonne nachgeführt. Allerdings konzentrieren hier mehrere Spiegel (Heliostate) das Sonnenlicht auf einen an der Spitze eines Turms montierten Receiver.



**Abbildung 3.4:** Solarturm-Kraftwerk PS 10 in der Nähe von Sevilla  
(Bildquelle: ecofuture.net)

Obwohl schon in den Jahren 1982 bis 1988 mit dem Solar-One Projekt in der kalifornischen Mojawewüste die grundsätzliche Machbarkeit der solarthermischen Stromerzeugung im Megawattbereich mittels Turmkraftwerk demonstriert wurde (Kibum Kim et al.; 2009), steht die Forschung zu allen Komponenten des Turmkraftwerks noch an den Anfängen und es hat sich noch keine Technik durchsetzen können. Es existieren die verschiedensten Konzepte was zum Beispiel die Heliostatengröße und Anzahl, die Bauart des Receivers, die Anzahl der Türme oder auch die Wahl des Wärmeträgermediums betrifft. Allen Konzepten gemein sind ihre hohen Kostenreduktionspotenziale. Aufgrund schon heute in Versuchsanlagen erreichten Receivertemperaturen von über 1000°C kann der nachgeschaltete Wärmekraftprozess nach Gleichung [2.3] höhere Wirkungsgrade als, beispielsweise der Dampfkraftprozess in einem Parabolrinnenkraftwerk, erreichen. Neben den mit der Temperatur steigenden Wirkungsgraden des sich anschließenden Wärme-Kraft-Prozesses ermöglichen die hohen Temperaturen außerdem die Produktion von solaren Brennstoffen.

#### 3.4.1 Receiverbauarten

Der Receiver ist eine der zentralen Komponenten eines Solarturm-Kraftwerkes. Sein Anteil an den solaren Investitionskosten ist zwar bei weitem nicht so hoch wie der des

Heliostatenfeldes, jedoch lässt sich mit jeder Wirkungsgradsteigerung beim Receiver das Heliostatenfeld direkt proportional verkleinern und dadurch die Stromgestehungskosten senken. Die den Wirkungsgrad eines Solar-Receiver bestimmenden Verlustmechanismen sind die Reflektion der Solarstrahlung, Wärmeleitung durch die den Receiver umhüllenden Wände und Konvektions- sowie thermische Abstrahlungsverluste durch die Receiveröffnung, die so genannte Apertur. Im Folgenden werden kurz die einzelnen Receiverotypen umrissen, bevor der, den diese Arbeit betreffende, Partikelreceiver erläutert wird.

#### 3.4.1.1 Rohrreceiver

Historisch gesehen steht der Rohrreceiver am Anfang der Entwicklung aller bekannten Receiverbauarten. Der Rohrreceiver ist ein indirekt absorbierender Receiver. Die auftreffende Solar-Strahlung wird nicht direkt vom Wärmeträger, sondern von einem mit dem Wärmeträger in Kontakt stehenden, opaken Feststoff absorbiert und anschließend auf den Wärmeträger übertragen.

Beim Rohrreceiver wird die Solarstrahlung von, zumeist aus hochtemperaturbeständigen Metallegierungen gefertigten Rohren absorbiert. In Ihnen zirkuliert ein Wärmeträger. Es wurden Versuche sowohl mit Luft, Wasser bzw. Dampf als auch mit Thermoölen und geschmolzenem Salz durchgeführt.

Momentan entsteht im spanischen Fuentes de Andalucia mit Gemasolar das erste kommerzielle Salz-Turmkraftwerk<sup>5</sup>. Hier wird Salz durch solar erhitze Rohre gepumpt und hierdurch erwärmt. Ein Tank, der das erhitze Salz auf einem Temperaturniveau von 565 °C speichert, erlaubt einen fünfzehnstündigen Betrieb der Anlage ohne Sonneneinstrahlung. Dies ermöglicht mit der in Spanien erlaubten Zufeuerung mit Erdgas eine Stromproduktion über 6500 h/a.

Die ersten ausschließlich kommerziellen Turmkraftwerke überhaupt wurden mit Planta Solar-10 und Planta Solar-20 in den Jahren 2007 und 2009 in der Nähe von Sevilla, Spanien errichtet. Statt des Salzes wird hier Wasserdampf als Wärmeträger verwendet. Diese Anlagen erlauben eine Receiverauslasstemperatur von 250-300 °C und haben eine Speicherkapazität von einer Stunde<sup>6</sup>.

Vorteil des Rohrreceivers gegenüber anderen Bauarten ist vor allem die zumeist einfache Bauweise. Problematisch ist die nicht homogene Temperaturverteilung im Receiverrohr und die hieraus resultierenden Thermospannungen im Material. Aus den Übertemperaturen der Rohraussenwand gegenüber dem Wärmeträger resultieren hohe Abstrahlverluste die den Wirkungsgrad des Receivers mindern. Außerdem sind die

---

<sup>5</sup> <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/central-tower-technology/en>

<sup>6</sup> [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=38](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38)

Temperaturen bei Verwendung von Metallrohren nach oben auf ca. 800-900°C begrenzt.

Bei der Verwendung von Salz als Wärmeträger ist es möglich, die solar gewonnene Wärme kostengünstig zu speichern. Bei der Verwendung von Wasserdampf oder Luft als Wärmeträger ist die Speicherung technisch aufwendiger und daher ökonomisch nur in geringerem Umfang sinnvoll.

#### 3.4.1.2 Volumetrische Receiver

Ebenso wie beim Rohrreceiver handelt es sich beim volumetrischen Receiver um einen indirekt absorbierenden Receiver. Allerdings wird die Solarstrahlung hier nicht von Rohren, sondern von, aus metallischen oder keramischen Feststoffen gefertigten Absorbern absorbiert, deren Geometrie es der Solarstrahlung erlaubt in sie einzudringen. Dies können, beispielsweise von gleichmäßigen Kanälen durchsetzte Metallkörper oder Keramiken, oder auch poröse Keramikschaume sein. Abbildung 2.5 zeigt diese in genannter Reihenfolge. Die Receiver geben ihre Wärme an durch sie strömende Luft ab, die entweder direkt einer Gasturbine zugeführt wird oder ihre Wärme an ein Speichermedium überträgt, oder zur Erzeugung von Dampf verwendet wird. Die kalte Luft kühlt die Receiveroberfläche beim Einströmen und wird in seinem inneren auf die Arbeitstemperatur erwärmt. Dies führt dazu, dass die Temperatur der Receiveroberfläche unter der Austrittstemperatur des Gases liegt. Außerdem ist die spezifische Oberfläche zur Wärmeübertragung des Absorbers sehr groß. Hierdurch werden die aus den Übertemperaturen resultierenden Abstrahlverluste, wie sie beim Rohrreceiver vorliegen, deutlich reduziert und so der Wirkungsgrad des Receivers gesteigert.



**Abbildung 3.5:** Poröse Materialien für volumetrische Solarreceiver

(Thomas Fend et al.; 1997)

Es existieren sowohl offene als auch geschlossene volumetrische Receiver. Beim geschlossenen volumetrischen Receiver wird die Apertur durch ein Quarzglasfenster verschlossen. Dies führt zum einen zu geringeren Konvektions- und Abstrahlverlusten durch die Apertur und zum anderen wird hierdurch ein Betrieb unter hohem Druck ermöglicht. Dies ermöglicht eine Verdichtung der kalten Luft vor Eintritt in den

Receiver und somit den Betrieb einer Gasturbine. Beim offenen volumetrischen Receiver wird der Strahlungsempfänger von der Umgebungsluft durchströmt und es ist keine energieeffiziente Verdichtung der Luft möglich. Mit dem offenen volumetrischen Receiver wird daher über einen Wärmeübertrager Dampf zum Betrieb einer Dampfturbine erzeugt.

Zwar lassen sich mit dieser Technik recht hohe Receiverwirkungsgrade erzielen, jedoch ist auch hier die Speicherung der gewonnenen Wärme, aufgrund der Verwendung von Luft als Wärmeträger technisch aufwendiger als bei der Verwendung von beispielsweise Salz als Wärmeträger.

#### 3.4.1.3 Partikelreceiver

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Konzepten handelt es sich bei den Partikelreceivern um direkte Absorber. Der Wärmeträger wird also direkt der Solarstrahlung ausgesetzt und hierdurch erhitzt. Übertemperaturen und hiermit erhöhte Abstrahlverluste, wie sie beim Rohrreceiver auftreten, werden so verringert.

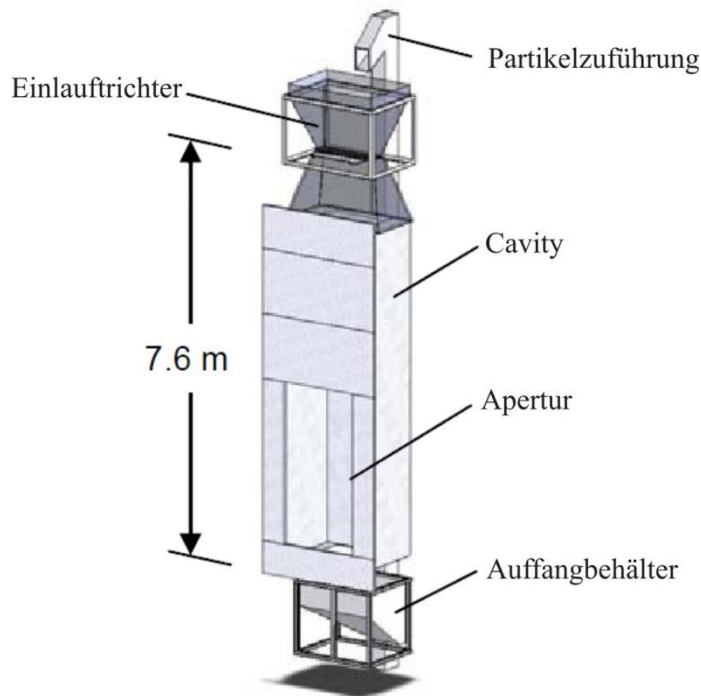
Vorteile beim Einsatz von Partikeln als Wärmeträger sind, dass eine effektive Nutzung der aufgeheizten Partikel als thermischer Feststoffspeicher möglich ist und bei Verwendung des Wärmeträgermediums als Speichermedium nur ein Wärmeübertrager zur Übertragung der Wärme auf das Arbeitsfluid benötigt wird. Diese kann sowohl über indirekte als auch über direkte Wärmeübertrager erfolgen.

In direkten Wärmeübertragern ermöglicht die hohe spezifische Oberfläche der Partikel eine gute Wärmeübertragung an das Gas, so dass auch hier nur geringe Übertemperaturen nötig sind. Ungeklärt ist hier allerdings noch die Frage der Gasreinigung. Die gewonnene Wärme kann zum einen zum Betrieb von Dampf- und Gasturbinen verwendet werden, zum anderen sind aber auch Prozesswärmeanwendungen vorstellbar. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Partikeln zur Direktabsorption der Solarstrahlung ist, dass aufgrund der hohen thermischen Beständigkeit der Partikel keine Temperaturbegrenzungen durch den Wärmeträger, wie bei der Verwendung von Thermoöl oder Salz gegeben sind.

Es ist also möglich mit dem Partikelreceiver die technisch einfach zu realisierende Speicherung der gewonnenen Wärme, wie sie beispielsweise bei der Verwendung von Salz als Wärmeträger gegeben ist, mit den hohen Temperaturen, wie sie beim volumetrischen Receiver erreicht werden können, zu vereinen.



Eine technisch relativ einfach umzusetzende Möglichkeit ist hier der Fallfilmreceiver. Hier werden Partikel mit einem Durchmesser von bis zu 1mm während des Herabfallens der Solarstrahlung ausgesetzt. Um eine Störung des Partikelvorhangs durch umgebende Luftströmungen zu vermeiden und thermische Verluste minimieren zu können, wird der Vorhang durch eine Umhüllung (Cavity) gegen die Umgebung isoliert.



**Abbildung 3.6:** Prototyp eines Partikelreceivers nach (Clifford K. Ho, 2009)

Abbildung 3.6 zeigt einen an den Sandia National Laboratories entwickelten und getesteten Prototypen eines Partikelreceivers. Da sich die Partikel während eines Fallvorgangs nicht auf die gewünschte Temperatur erwärmen, müssen die Partikel bei diesem Konzept rezirkuliert werden. Die Beschreibung eines Konzeptes zur Partikelrezirkulation erfolgt unter Abschnitt 5.1, der den Versuchsaufbau behandelt, Teil dessen die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Temperaturmessvorrichtung sein wird.

Zwei Konzepte die es ermöglichen die Aufenthaltsdauer der Partikel in der Solarstrahlung zu verlängern sind zum einen der Fließfilmreceiver und zum anderen der Drehrohrreceiver. Im Fließfilmreceiver werden die Partikel durch die Solarstrahlung erwärmt, während sie eine schiefe Ebene herabgleiten. Durch die Variation des zugeführten Partikelmassenstroms und des Neigungswinkels der Ebene, kann der Receiver an sich ändernde Betriebsbedingungen angepasst werden.

Im Drehrohrreceiver befinden sich Partikel in einem rotierenden Rohr. Durch das Anbringen von Schaufeln auf der Innenseite des Rohres wird hier ein Vorhang produziert, der sich durch die Solarstrahlung erwärmt. Die Aufenthaltsdauer der Partikel in der Strahlung wird bei diesem Konzept durch die Rotationsgeschwindigkeit und die Neigung des Drehrohres beeinflusst. Bisherige Versuche zum Drehrohrkonzept behandelten lediglich die Bereitstellung von Wärme zum Schmelzen und anderen industriellen Prozessen. So wurden am DLR in Köln im Jahr 1999 Untersuchungen zur Entgiftung und Recycling von umweltgefährlichem Müll mit Hilfe von konzentrierender Solarstrahlung durchgeführt. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Drehrohrreceivers ist die Produktion von Branntkalk.

## 4 Temperaturmessung

Die Temperatur  $T$  ist neben Länge, Zeit, Masse, Stromstärke, Stoffmenge und Lichtstärke eine der sieben physikalischen Basisgrößen im „Internationalen Einheiten System“ (SI). Sie wird in der Einheit Kelvin K gemessen  $T = K$ . Die Temperatur ist für uns in Form der Wärme  $Q = J$  erfahrbar. Berühren wir einen Gegenstand mit einer von unserer Körpertemperatur verschiedenen Temperatur, oder halten uns in dessen Nähe auf, nehmen wir einen Wärmefluss zwischen uns und dem Gegenstand wahr und können so seine Temperatur einschätzen. Wir nehmen also eine Vergleichsmessung vor. Temperatur und Wärme sind miteinander über die Masse  $m$  und die Wärmekapazität  $c$  miteinander verknüpft:  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ . Im Gegensatz zur Inneren Energie  $U$ , deren Einheit ebenfalls das Joule ist, ist die Wärme eine Prozessgröße. Sie gibt an, welcher Energiebetrag über eine Systemgrenze transportiert wird ( $Q = \Delta U$ ). Die Zustandsgröße Innere Energie hingegen gibt an, welcher Energiebetrag in einem System in Form von Molekülbewegung gespeichert ist. Die Änderung dieser Molekülbewegung mit der Temperatur führt zu Änderungen verschiedener physikalischer Eigenschaften eines Körpers. So sind z.B. das Volumen, der Aggregatzustand, der spezifische Widerstand und die von einem Körper ausgehende Strahlung Funktionen der Temperatur. Die Änderungen dieser physikalischen Größen bilden die Grundlage verschiedener Temperaturmessmethoden.

Die Verfahren zur Temperaturmessung lassen sich in zwei Bereiche teilen.

1. Die berührenden Verfahren und
2. Die nicht berührenden Verfahren.

### 4.1 Berührende Verfahren

Bei den *berührenden Verfahren* bringt man ein Thermometer in Kontakt mit dem Messobjekt. Nach hinreichend langer Zeit wird das Thermometer die gleiche Temperatur wie das Messobjekt angenommen haben, also in thermischem Gleichgewicht mit ihm stehen. Je nach Masse, Wärmekapazität und Leitfähigkeit des Thermometers vergeht bis zu diesem Punkt unterschiedlich viel Zeit und dem Messobjekt wird unterschiedlich viel Wärme entzogen. Um bei diskontinuierlichen Prozessen das Ergebnis möglichst nicht zu verfälschen, ist deshalb darauf zu achten, die Wärmekapazität ( $cm$ ) des Thermometers möglichst klein gegenüber der des Messobjektes, und  $\Delta T$  so gering wie möglich zu halten, also die Temperatur des Thermometers vor der Messung möglichst der erwarteten Temperatur des Messobjektes anzugleichen. Bei kontinuierlichen Messungen ist es hingegen vor allem wichtig die thermische Trägheit des Thermometers möglichst gering zu halten, so dass das

Thermometer möglichst schnell eventuellen Temperaturänderungen des Messobjektes folgen kann.

Die gängigsten Berührungsthermometer sind das *Ausdehnungsthermometer*, das *Widerstandsthermometer* und das *Thermoelement*.

#### 4.1.1 Das Ausdehnungsthermometer

Das Ausdehnungsthermometer beruht auf der Eigenschaft, dass alle Körper ihr Volumen in einem bestimmten Verhältnis zur Temperatur ändern:

$$\Delta V \sim \Delta T \quad [4.1]$$

Der Proportionalitätsfaktor ist der Ausdehnungskoeffizient  $\gamma$ . Er berechnet sich aus

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_1 \Delta T} \quad [4.2]$$

Somit wird  $V = V_0(1 + \gamma\Delta T)$ . Gibt man ein Fluid mit bekanntem Ausdehnungskoeffizienten in ein Gefäß mit ebenfalls bekanntem Ausdehnungsverhalten und bringt beides ins thermische Gleichgewicht mit dem Messobjekt lässt sich an der relativen Ausdehnung des Fluides zum Gefäß die Temperaturänderung ablesen und bestimmen. Typische Anwendung sind das Fieberthermometer und das Gasthermometer was aufgrund seiner Genauigkeit oft zur Kalibrierung anderer Thermometer eingesetzt wird.

#### 4.1.2 Das Widerstandsthermometer

Jeder elektrische Leiter ändert seinen ohmschen Widerstand mit der Temperatur:

$$\Delta R \sim \Delta T \quad [4.3]$$

Mit dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  ergibt sich der Widerstand des mit dem Messobjekt ins thermische Gleichgewicht gebrachten Leiters zu  $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$ . Übliche Materialien sind hier entweder Nickel oder Platin. Die jeweiligen Leiter werden so ausgeführt, dass ihr Widerstand bei 0°C 100Ω beträgt (Ni100/Pt100). Die Leiter werden an eine Messbrücke angeschlossen wo ihr Widerstand mittels Spannungsmesser ermittelt wird. Ist die Kennlinie des Leiters bekannt, kann man aus ihr die Temperatur berechnen. Da der Fehler eines Klasse A Pt-Thermometers gerade  $\pm(0,15 + 0,002|t|)$ °C also bei 200°C gerade 0,55°C beträgt werden diese ebenfalls häufig zur Kalibrierung anderer Messsysteme genutzt. Je nach Messbereich werden die Widerstandsthermometer in verschiedene Klassen unterteilt. Je kleiner der Messbereich,

desto geringer ist der zulässige Fehler. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Klassen und die jeweiligen zulässigen Fehler.

Klasse	Messbereich (°C)	zulässiger Fehler
AA	-50...200	$0,1 \text{ °C} + 0,0017 \cdot  t $
A	-100...450	$0,15 \text{ °C} + 0,002 \cdot  t $
B	-200...600	$0,3 \text{ °C} + 0,005 \cdot  t $
C	-200...600	$0,6 \text{ °C} + 0,01 \cdot  t $

**Tabelle 1:** Klassen der Widerstandsthermometer der jeweils zulässigen Fehler

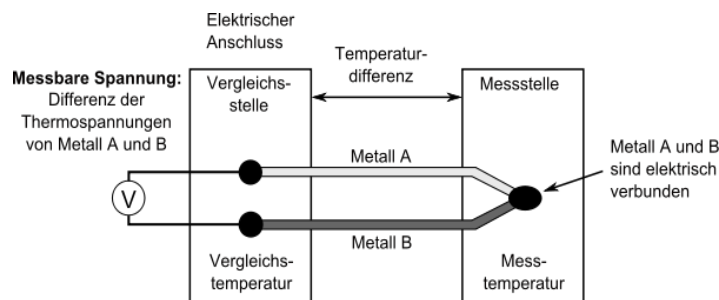
Die Ni-Thermometer sind zwar preisgünstiger in der Herstellung, lassen sich jedoch nur in einem Messbereich von (-60...250) °C einsetzen und haben zusätzlich einen höheren Messfehler (bei 200 °C etwa bis  $\pm 1,8 \text{ °C}$ ).

Auch die Halbleiter ändern ihren elektrischen Widerstand aufgrund sich ändernder Eigenleitung mit der Temperatur und eignen sich daher auch zur Nutzung als Temperaturmesser.. Hauptunterschiede zu den Metallwiderständen sind die größeren, negativen und stärker temperaturabhängigen Koeffizienten. Aufgrund ihres negativen Temperaturkoeffizienten werden diese auch als Heißleiter bezeichnet. Der Messbereich der Heißleiter liegt bei (-50...150)°C.

### 4.1.3 Das Thermoelement

Der am weitesten verbreitete Temperaturmessfühler ist das Thermoelement. Sie lassen sich relativ preiswert herstellen und decken einen sehr großen Messbereich ab.

Befinden sich die beiden Enden eines Leiters auf unterschiedlichem Temperaturniveau, bewegen sich einige freie Elektronen aufgrund der temperaturabhängigen Leitfähigkeit in Richtung des kälteren Endes und es bildet sich eine Thermospannung zwischen den beiden Enden. Bringt man nun das eine Ende eines zweiten Leiters unterschiedlichen Materials in Kontakt und ins thermische Gleichgewicht mit einem der beiden Enden des ersten Leiters (Messstelle), wird sich aufgrund der unterschiedlichen Thermospannungen eine Spannungsdifferenz bilden (Vergleichsstelle). Aus dieser Spannungsdifferenz lässt sich nun die Temperaturdifferenz zwischen der Mess- und der Vergleichsstelle berechnen. Dieser thermoelektrische Effekt wird auch als Seebeck-Effekt bezeichnet.



**Abbildung 4.1:** Funktionsweise des Thermoelementes

Je nach verwendeter Materialpaarung ergeben sich bei gleicher Temperaturdifferenz an der Vergleichsstelle unterschiedliche Spannungsdifferenzen. So ergibt sich z.B. bei dem Thermoelement Typ K (NiCr-Ni) eine Spannungsdifferenz von 4,1 mV, wenn an der Messstelle eine Temperatur von 100°C und an der Vergleichsstelle eine Temperatur von 0°C herrscht und beim Thermoelement Typ E (NiCr-CuNi) bei gleichen Temperaturen eine Spannungsdifferenz von 6,21 mV. In Tabelle 2 sind die unterschiedlichen Thermoelementtypen und -klassen aufgeführt.

Da das Thermoelement immer eine Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle misst, war es früher üblich, die Temperatur an der Vergleichsstelle konstant bei einem bekannten Wert zu halten. Heute ist es hingegen üblich, die vom TE erzeugte Thermospannung direkt mit einer Konstantspannungsquelle zu vergleichen.

Typ- Thermopaar	Klasse1	Klasse 2	Klasse 3
<b>K</b> <b>NiCr/Ni</b>	1,5°C oder 0,4% $\vartheta$ -40°C .... 1000°C	2,5°C oder 0,75% $\vartheta$ -40°C .... 1200°C	2,5°C oder 1,5% $\vartheta$ -200°C .... +40°C
<b>J</b> <b>Fe/CuNi</b>	1,5°C oder 0,4% $\vartheta$ -40°C .... 750°C	2,5°C oder 0,75% $\vartheta$ -40°C .... 750°C	-
<b>N</b> <b>Nicrosil/Nisil</b>	1,5°C oder 0,4% $\vartheta$ -40°C .... +1000°C	2,5°C oder 0,75% $\vartheta$ -40°C .... 1200°C	2,5°C oder 1,5% $\vartheta$ -200°C .... +40°C
<b>S</b> <b>Pt10%Rh/Pt</b>	1°C oder 1 + ( $\vartheta - 1100$ ) · 0,003°C -40°C .... 1000°C	1,5°C oder 0,25% $\vartheta$ -40°C .... +1000°C	-
<b>R</b> <b>Pt13%Rh/Pt</b>	1°C oder 1 + ( $\vartheta - 1100$ ) · 0,003°C -40°C .... 1000°C	1,5°C oder 0,25% $\vartheta$ -40°C .... +1000°C	-
<b>B</b> <b>Pt30%Rh/Pt16%Rh</b>	-	0,25% $\vartheta$ 600°C ....+1700°C	4°C oder 0,5% $\vartheta$ 600°C .... 1700°C
<b>T</b> <b>Cu/CuNi</b>	0,5°C oder 0,4% $\vartheta$ -40°C .... 350°C	1,0°C oder 0,75% $\vartheta$ -40°C .... 350°C	1,0°C oder 1,5% $\vartheta$ -200°C .... 40°C
<b>E</b> <b>NiCr/CuNi</b>	1,5°C oder 0,4% $\vartheta$ -40°C .... 800°C	2,5°C oder 0,75% $\vartheta$ -40°C .... 900°C	2,5°C oder 1,5% $\vartheta$ -200°C .... 40°C

**Tabelle 2:** Thermoelementtypen/-klassen und zulässige Fehler

Neben einer Vielzahl an Bauformen von Thermoelementen für spezielle Anwendungen, findet vor allem das preiswert herstell- und vielseitig einsetzbare Mantel-Thermoelement Verwendung. Hier liegen die Thermodrähte gegeneinander und gegen den Mantel isoliert in pulverförmigem, hochverdichteten  $MgO$  oder  $Al_2O_3$  eingebettet und sind von einem Metallmantel umgeben. Das  $MgO$  hat dabei eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit wie das Mantelmaterial.

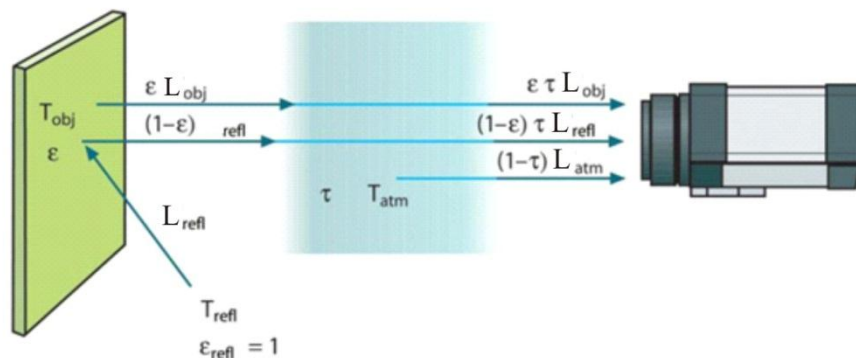
#### 4.2 Nicht berührenden Verfahren

Ist es nicht möglich den Messfühler über einen ausreichend langen Zeitraum in Kontakt mit dem Messobjekt zu bringen, oder würde eine berührende Messung das Ergebnis zu sehr verfälschen, besteht die Möglichkeit mit einem *nicht berührenden Verfahren* zu messen. Bei diesen Verfahren wird Wärme mittels Strahlung auf das Messinstrument übertragen. Auch hier können alle zuvor beschriebenen Verfahren genutzt werden. Der Hauptunterschied bei den Messverfahren ist, dass das Messobjekt und das Messinstrument (der Strahlungsdetektor) nicht ins thermische Gleichgewicht gebracht werden, sondern vielmehr die vom Detektor absorbierte Energie pro Zeit gemessen und daraus auf die vom Messobjekt abgestrahlte Leistung rückgeschlossen wird. Über [2.1] kann hieraus, sofern es sich um einen schwarzen oder grauen Strahler handelt, die Temperatur des Messobjektes recht einfach bestimmt werden. Soll hingegen die

Temperatur eines selektiven Strahlers bestimmt werden ist dafür die genaue Kenntnis seines Emissionsverhalten notwendig.

Besteht ein Messsystem aus einer Vielzahl solcher Detektoren, kann jedem von diesen Detektoren ausgegebenem Wert, eine bestimmte Farbe zugeordnet werden und hieraus ein Bild erstellt werden. Dies ist eines der Funktionsprinzipien einer IR-Kamera.

Wie eingangs erwähnt und in Abbildung 4.2 dargestellt, emittiert jeder Körper mit einer von 0 K verschiedenen Temperatur Wärmestrahlung ( $\varepsilon L_{Obj}$ )



**Abbildung 4.2:** Schematische Darstellung der berührungslosen Temperaturmessung

Ein Teil dieser Strahlung wird jedoch von der Atmosphäre auf dem Weg zur Kamera absorbiert bzw. reflektiert, so dass nur ein Teil dieser Strahlung zur Kamera gelangt. Neben der vom Körper emittierten Wärmestrahlung reflektiert er aber auch die Strahlung aus seiner Umgebung ( $(1 - \varepsilon)L_{refl}$ ) von der auch wiederum nur ein Teil die Kamera erreicht ( $(1 - \varepsilon)\tau L_{refl}$ ). Ein weiterer von der Kamera „gesehener“ Strahlungsanteil ist die Wärmestrahlung aus der Atmosphäre selbst ( $(1 - \tau)L_{Atm}$ ).

Möchte man also die Temperatur eines Messobjektes exakt bestimmen, müssen die oben beschriebenen Einflüsse bei der Ermittlung der Temperatur berücksichtigt werden. Hieraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$L_{ges} = \varepsilon\tau L_{Obj} + (1 - \varepsilon)\tau L_{Refl} + (1 - \tau)L_{Atm} \quad [4.4]$$

Allerdings ist es oft kaum möglich die beschriebenen Einflüsse mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Selbst wenn sich das Messobjekt in stationärer Umgebung befindet ist es oft nur mit großem messtechnischem Aufwand möglich die beschriebenen verfälschenden Einflüsse zu bestimmen. Befindet sich das Messobjekt in einer instationären Umgebung, ändert sich also beispielsweise die Temperatur der das Messobjekt umgebenden Körper oder die Transmission der es umgebenden Luft, ist es



kaum noch möglich von der auf den Detektor auftreffenden Strahlung auf die Temperatur des Messobjektes zu schließen. Eine weitere Schwierigkeit bei der Temperaturmessung mittels IR-Detektor kann der sich mit Temperatur und Wellenlänge ändernde Emissionsgrad des Messobjektes sein.

Man unterscheidet in thermische Detektoren und Quantendetektoren.

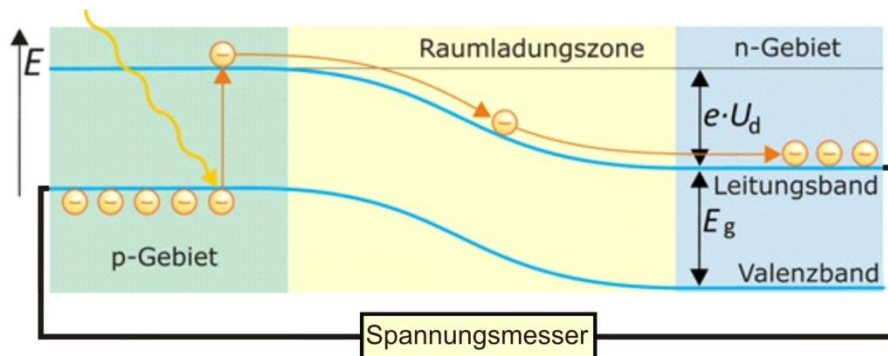
#### 4.2.1 Thermische Detektoren

Bei thermischen Detektoren ändert sich die Temperatur des Detektorelements durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung. Die Veränderung der Temperatur bewirkt die Änderung einer temperaturabhängigen Eigenschaft dieses Detektors, die elektrisch ausgewertet wird und ein Maß für die absorbierte Energie ist.

Die am weitesten verbreiteten thermischen Detektoren sind das Strahlungsthermoelement und das Bolometer. Ersteres nutzt den zuvor beschriebenen thermoelektrischen Effekt und Letzteres die Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Widerstands. Da die über die Strahlung übertragene Energiemenge relativ gering ist, müssen die genutzten Sensoren wesentlich empfindlicher sein als die bei den berührenden Verfahren genutzten.

#### 4.2.2 Quantendetektoren

Der entscheidende Unterschied zwischen Quantendetektoren und thermischen Detektoren besteht in ihrer schnelleren Reaktion auf die absorbierte Strahlung. Die Wirkungsweise der Quantendetektoren beruht auf dem Fotoeffekt. Dabei werden durch die auffallenden Photonen der Wärmestrahlung Elektronen im Halbleitermaterial vom Valenzband ins Leitungsband gehoben. Liegen nun gezielt mit unterschiedlichen Fremdatomen verunreinigte Gebiete (p-Gebiet/ n-Gebiet) im Halbleitermaterial nebeneinander, entsteht ein p-n Übergang. Durch den p-n Übergang werden, wie in Abbildung 2.9 gezeigt, die vom Valenz- ins Leitungsband gehobenen Elektronen vom



**Abbildung 4.3:** Darstellung des p-n Übergangs nach (Quaschnig, 2009)

p-Gebiet ins n-Gebiet befördert. So entsteht ein Potentialunterschied der proportional zur auftreffenden Strahlung ist. Da zur Überwindung der Lücke zwischen Valenz- und

Leitungsband eine gewisse Energiemenge benötigt wird und die Energie eines Photons antiproportional zur Wellenlänge ist, ist bei Detektoren zur Strahlungsmessung möglichst ein Halbleitermaterial mit geringem Bandabstand zu wählen, so dass auch Photonen längerer Wellenlänge in der Lage sind Elektronen ins Leitungsband zu heben. Die Temperaturänderung des empfindlichen Elements eines thermischen Detektors ist ein relativ langsamer Prozess, so dass die Zeitkonstanten thermischer Detektoren in der Regel um einige Größenordnungen größer sind als die Zeitkonstanten von Quantendetektoren. Üblicherweise haben thermische Detektoren Zeitkonstanten im Millisekundenbereich, während die Zeitkonstanten von Quantendetektoren im Nano- und Mikrosekundenbereich liegen.

Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle die Zweifarbenpyrometrie. Bei diesem Verfahren wird die Intensität zweier diskreter Wellenlängenbänder gemessen und die Messsignale der beiden Wellenlängenbereiche ins Verhältnis gesetzt. Der erste große Vorteil hierbei ist, dass die ermittelte Temperatur unabhängig von nicht durch die Temperatur hervorgerufenen Intensitätsschwankungen der Messsignale, wie die sich ändernde Transmission in der Umgebung des Messobjektes, ermittelt wird. Der zweite große Vorteil besteht darin, dass durch die Bildung des Verhältnisses der beiden Signale die ermittelte Temperatur unabhängig vom Emissionsgrad ist, wenn dieser, wie beim schwarzen und grauen Strahler, bei den beiden Wellenlängen gleich ist. Wählt man zur Messung zwei dicht benachbarte Wellenlängenbereiche, wird diese Bedingung sehr gut angenähert (Viacheslav; 2007). Das Problem der Reflektion von Wärmestrahlung aus der Umgebung des Messobjektes bleibt auch bei der Zweifarbenpyrometrie bestehen. Da jeder Detektor nur in einem gewissen Messbereich arbeitet, müssen bei Messungen unterschiedlicher Temperaturen und von oder durch unterschiedliche Materialien verschiedene Filter eingesetzt werden. Für die Messung der Temperatur von Polyethylen (PE) sei dies beispielhaft an der folgenden Grafik erläutert:

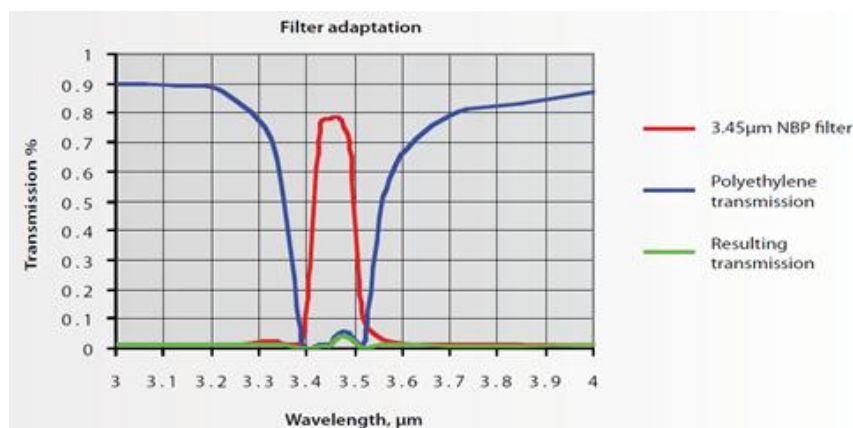
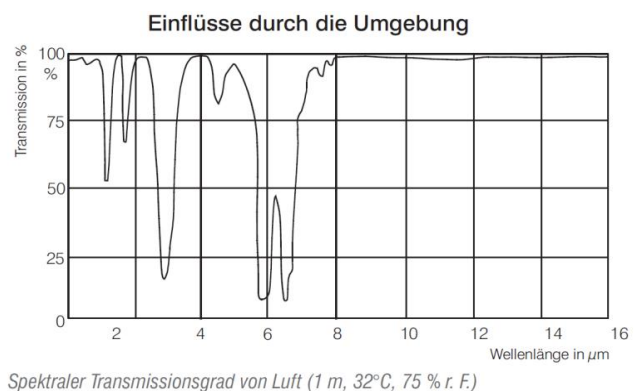


Abbildung 4.4: Transmission PET

Es ist zu erkennen, dass PE in einem Wellenlängenbereich von ca. (3400...3590)nm eine Transmission nahe null hat. Es reflektiert oder absorbiert nahezu alle Strahlung aus diesem Wellenlängenbereich. In allen anderen Bereichen jedoch wird nur ein sehr geringer Anteil der Strahlung absorbiert bzw. reflektiert. Da nun laut Kirchhoff die Emission bei einer bestimmten Wellenlänge gleich ihrer Absorption ist, bedeutet dies, dass PE fast ausschließlich Strahlung in einem Bereich von ca. (3400...3590)nm emittiert. Möchte man nun die von PE emittierte Strahlung messen, ist dies am besten möglich, verwendet man hierzu eine Linsen-Filterkombination, die in genau diesem Wellenlängenbereich eine möglichst hohe Transmission hat, so dass ein möglichst hoher Anteil der vom PE emittierten Strahlung vom Detektor der Kamera absorbiert werden kann.

Möchte man hingegen durch einen Körper messen, ist darauf zu achten, dass die Linsen-Filterkombination der Kamera in den gleichen Bereichen einen hohen Transmissionsgrad aufweist, wie der durch den zu messenden Körper. Da in den meisten Fällen die IR-Messung durch die uns umgebende Atmosphäre erfolgt und diese möglichst keinen Einfluss auf das Messergebnis haben soll misst man, vor allem auf weitere Entfernung möglichst in den so genannten „atmosphärischen Fenstern“. Aus der nebenstehenden Abbildung ist ersichtlich, dass die Transmission der Luft sehr stark wellenlängenabhängig ist. Bereiche mit hoher Dämpfung wechseln sich mit Bereichen hoher Durchlässigkeit, den „atmosphärischen Fenstern“ ab. Im langwelligen atmosphärischen Fenster (8...14)  $\mu\text{m}$  ist die Durchlässigkeit gleichmäßig hoch, dagegen treten im kurzwelligen Bereich messbare Abschwächungen durch die Atmosphäre auf, welche zu verfälschten Messergebnissen führen können. Typische Messfenster dort sind (1,1...1,7)  $\mu\text{m}$ , (2...2,5)  $\mu\text{m}$  und (3...5)  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 4.5:** Spektraler Transmissionsgrad von Luft

## 5 Entwicklung der Messvorrichtung

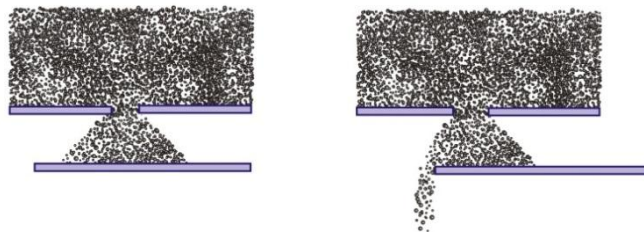
Unter 1.2 wurde schon erwähnt, dass im Rahmen dieser Arbeit eine Messvorrichtung entwickelt werden soll, die es ermöglicht die Absoluttemperatur von Partikeln in einem Fallvorhang zu bestimmen. In den folgenden Abschnitten wird daher der Versuchsaufbau beschrieben, Teil dessen die zu entwickelnde Messvorrichtung sein wird. Im Anschluss hieran wird die Entwicklung der Messvorrichtung beschrieben.

### 5.1 Versuchsaufbau

Im Versuchsstand soll ein Partikelvorhang untersucht werden, wie er in künftigen Turmkraftwerken Verwendung finden könnte. Ziele der Versuche sind die experimentelle Überprüfung der zuvor durchgeführten Berechnungen bezüglich des aerodynamischen und thermischen Verhaltens von frei fallenden Partikeln, sowie die Überprüfung der Funktionalität der Vorrichtung zur Partikelrezirkulation.

Der Versuchsstand besteht aus einem Fallschacht, der den Partikelvorhang gegen die Umgebung isoliert. Die Innenmaße dieses Fallschachtes sind 1824x162x98mm. In dem Fallschacht befinden sich vier Öffnungen. Zwei zur Beobachtung des Vorhangs mit einer IR-Kamera und zwei zur Bestrahlung der Partikel mittels Heizstrahler<sup>7</sup>. Der Fallschacht wurde so konstruiert, dass die Partikel wahlweise im oberen oder unteren Bereich des Vorhangs der Strahlung ausgesetzt werden können. Hierzu muss der Fallschacht lediglich gedreht werden. Abbildung 5.2 zeigt den Fallschacht in der zuletzt genannten Variante.

Die Partikelzuführung besteht aus einem Trichter mit einer Auslassöffnung mit den Dimensionen 148 x 30 mm. Der Partikelmassenstrom wird durch einen unter der Auslassöffnung angebrachten Schieber reguliert.



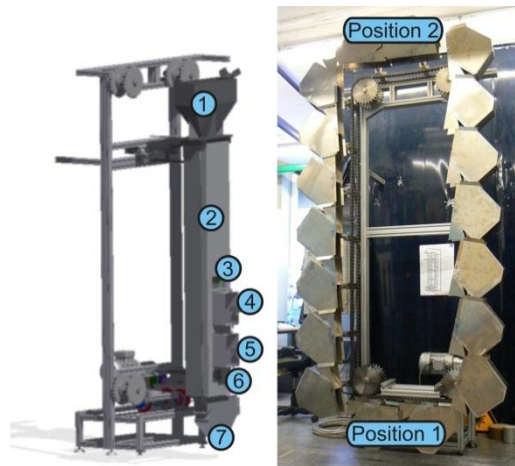
**Abbildung 5.1:** Schematische Darstellung der Partikelzuführung

Um ein Einklemmen der Partikel zwischen Auslassöffnung und Schieber vermeiden und somit den Verschluss der Öffnung ermöglichen zu können, befindet sich der

<sup>7</sup> Datenblatt im Anhang

Schieber in einem Abstand von 10 mm von der Auslassöffnung. Durch diesen Abstand wird sich auf dem Schieber immer eine Partikelschüttung mit einem bestimmten Schüttwinkel ausbilden. Der Partikelmassenstrom lässt sich nun, wie in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt, über die Stellung des Schiebers, regulieren.

Die Partikelrezirkulation erfolgt wie in Abbildung 5.2 dargestellt über ein System aus achtzehn zirkulierenden Bechern. Diese sind an einer Kette befestigt und bewegen sich, mit einer dem Massenstrom angepassten, konstanten Geschwindigkeit.



**Abbildung 5.2:** Grafik des Fallschachtes und Foto der Vorrichtung zur Partikelrezirkulation: [1] Zuführtrichter; [2] Fallsschacht; [3,6] Öffnungen für IR Messung; [4,5] Heizstrahler; [7] Becher

Fahren die Becher unter dem Fallschacht entlang, werden sie mit den erwärmten Partikeln gefüllt (Abbildung 5.2 Position 1). Fahren die Becher an Position 2 über den Zuführtrichter, werden die Partikel in diesen entleert. Während des Herabfallens werden die Partikel von zwei Heizstrahlern mit einer Strahlungsleistung von jeweils ca. 9 kW erwärmt.

Von Interesse ist hier vor allem die von den Partikeln aufgenommene Wärmemenge in Abhängigkeit des Partikelmassenstroms bei gegebener Vorhanggeometrie. Mit zunehmender Entfernung vom Partikelaustritt weitet sich der Partikelvorhang auf und es verringert sich seine optische Dichte. Hierdurch verändert sich der Anteil der von den Partikeln absorbierten Strahlung. Je weniger Strahlung von den Partikeln absorbiert wird, desto größer wird der Anteil der auf die Fallschachtwand treffenden Strahlung. Je größer dieser Anteil ist, desto mehr wird sich diese Wand erwärmen. Mit dem Massenstrom ändert sich neben der Extinktion auch das Strömungsverhalten der den Vorhang umgebenden Luft. Aus dem Zusammenwirken des Strömungsverhaltens der den Vorhang umgebenden Luft und der freien Konvektion an den unterschiedlich erwärmten Fallschachtwänden ergibt sich eine resultierende Strömung der Luft im Fallschacht. Diese Strömung wird, neben der auf die Partikel treffenden Strahlung,

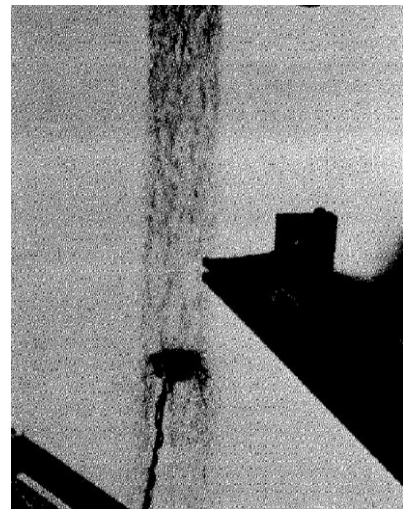
einen Einfluss auf die von den Partikeln aufgenommene Wärmemenge haben. Die Versuche sollen erste Erkenntnisse über den Einfluss des Massenstroms bei gegebener Bestrahlung auf den Wirkungsgrad des Systems und die Anzahl der notwendigen Rezirkulationszyklen bis zur Erreichung der gewünschten Partikeltemperatur liefern. Um diese Erkenntnisse gewinnen zu können ist eine möglichst exakte Bestimmung der Partikeltemperatur unerlässlich.

## 5.2 Modellrechnung

Aufgrund der unter 4.2 erläuterten Schwierigkeiten bei der Temperaturmessung mittels IR-Kamera scheidet eine alleinige Messung der Partikeltemperatur auf diesem Wege aus.

Die Versuche sollen bei einem Temperaturniveau von bis zu 800°C durchgeführt werden. Dabei sollen die Messdaten zur späteren Auswertung von einem Rechner ausgelesen werden. Für die ergänzende Messung können daher Thermoelementen vom Typ K verwendet werden. Diese sind relativ preiswert zu beziehen und die von ihnen gemessenen Temperaturen lassen sich über den Anschluss an einen Datenlogger ohne großen technischen Aufwand von einem Rechner auslesen.

Die mit dem geringsten technischen Aufwand zu realisierende Möglichkeit zur Temperaturmessung mittels Thermoelement (TE), wäre es ein TE so im Fallschacht zu befestigen, dass sich seine Messspitze in der Mitte des Partikelvorhangs befindet. In diesem Fall befände sich das TE über Strahlung im Wärmeaustausch mit den es umgebenden Partikeln sowie der Fallschachtwand, über Konvektion mit der es umgebenden Luft und über Wärmeleitung durch den Draht des TE mit der Umgebung. Das TE würde also eine Mischtemperatur aus den Temperaturen der Fallschachtwand, der Luft im Fallschacht und den Partikeln messen. Mit gewissem technischem Aufwand ist es jedoch möglich eine Messvorrichtung zu realisieren die es ermöglicht die verfälschenden Einflüsse auf die Messung durch die Umgebung zu eliminieren. Eine Möglichkeit hierzu beschreiben J. Hruby et al. in einer im Juni 1988 veröffentlichten Arbeit (J.Hruby, et al., 1988). Es wurde ein Sammelbecher aus dünnem Edelstahlblech konstruiert, in dessen Mitte sich ein mantelloses Typ K TE befand. **Abbildung 5.3** zeigt diesen Sammelbecher im Versuch. Auf dem Grund des Bechers befand sich ein Loch, welches einen gleichmäßigen Durchfluss der Partikel erlaubte.



**Abbildung 5.3:** Temperaturmessbecher während der Datenerfassung (J.Hruby, et al., 1988)

Die Modellrechnung soll den Einfluss der Strahlung der Zylinderwand und den konvektiven Wärmetausch mit der die Partikel umgebenden Luft einer quantitativen Abschätzung zugänglich machen und Aufschluss über die Notwendigkeit einer Vorrichtung nach Vorbild der in (J.Hruby, et al., 1988) beschriebenen Vorrichtung geben.

Die Berechnungen werden zwischen den beiden folgenden Extremfällen durchgeführt:

1. das Thermoelement „sieht“ keine Partikel, das heißt, es steht lediglich im Strahlungsaustausch mit der umgebenden Fallschachtwand (Sichtfaktor Wand  $\Psi_w = 1$ ) und
2. das Thermoelement „sieht“ ausschließlich Partikel ( $\Psi_p = 1$ ) und steht daher auch nur im Strahlungsaustausch mit diesen.

Der Fall, in dem das TE ausschließlich Partikel sieht beschreibt die Situation, wie sie sich bei der Verwendung eines Messbechers, wie ihn J. Hruby et al. bei ihren Versuchen verwendet haben, ergibt. Für den anderen Extremfall wird angenommen, dass die Vorhangdichte so gering ist, dass der Sichtfaktor zwischen TE und Wand gegen 1 geht. Da für den Vorhang ein Extinktionskoeffizient von in etwa 70% für sinnvoll erachtet wird und sich die Messspitze des TE bei der einfachen Messvariante ohne Messbecher in der Mitte des Vorhangs befände, ist für diesen Fall ein Strahlungsanteil der Wand von etwa 0,65 anzusetzen.

Das Modell und die gemachten Vereinfachungen werden im Folgenden beschrieben

Die Berechnung der Thermoelement-Temperatur erfolgt über das Aufstellen einer Energiebilanz:

$$Q_{zu} - Q_{ab} = 0 \quad [5.1]$$

Ist diese Gleichung erfüllt kann man aus ihr die voraussichtliche Temperatur des Thermoelementes berechnen. In dem gedachten Modell steht das Thermoelement im Wärmeaustausch mit folgenden vier Komponenten:

- über Wärmeleitung durch den Draht des Elements mit der Umgebung
- über Konvektion mit der umgebenden Luft
- über Strahlung mit den umgebenden Wänden
- über Strahlung mit den umgebenden Partikeln

Die Berechnung der Wärmeleitung erfolgt über:

$$Q_L = \lambda \frac{A_{quer}}{l} (T_{TE} - T_U) \quad [5.2]$$

In dem Modell wird eine unendlich große Umgebung mit einer konstanten Temperatur von 298 K angenommen, mit der das TE im Wärmeaustausch über Leitung steht. Die Wärmeleitfähigkeit des TE wurde hier über eine Parallelschaltung der einzelnen Komponenten des TE zu 52,5 W/mK berechnet:

$$\lambda_{ges} = \left( \sum_{k=m}^n \frac{1}{\frac{l_k}{\lambda_k A_k}} \right) \frac{l_{ges}}{A_{ges}} \quad [5.3]$$

Mit:	$\lambda_{Inconel}(20^\circ\text{C})$	25 W/mK
	$\lambda_{MgO}(20^\circ\text{C})$	58,5 W/mK
	$\lambda_{Ni}(20^\circ\text{C})$	91 W/mK
	$\lambda_{NiCr}(20^\circ\text{C})$	80 W/mK

Die Anteile, die Thermodrähte (Ni/NiCr), Isolierung (MgO) und Ummantelung (Inconel) am Querschnitt des TE haben, stammen aus Herstellerangaben, die Angaben zu den spezifischen Leitwerten aus der Literatur (VDI06).

Die Berechnung der Konvektion erfolgt über:

$$Q_K = \alpha A_{TE} (T_{TE} - T_{Lu}) \quad [5.4]$$

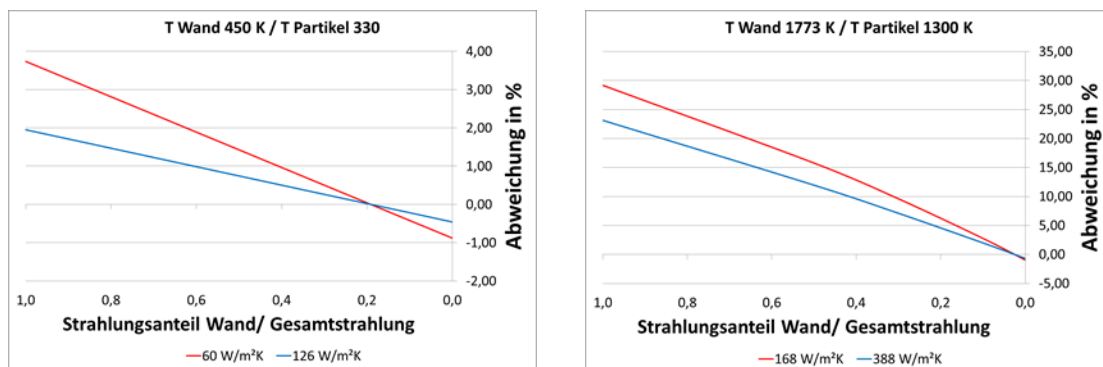
Wobei der Wärmeübergangskoeffizient mit den in (Bae06) angegebenen Korrelationen für freie, beziehungsweise erzwungene Konvektion berechnet wurde. Die den Berechnungen zu Grunde liegenden Werte von Wärmeleitfähigkeit, kinematischer Viskosität und Prandtl-Zahl bei der jeweiligen Mischtemperatur aus TE Temperatur und Lufttemperatur stammen aus dem VDI Wärmeatlas. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wurde mit 4 m/s angenommen, was der zu erwartenden Partikelgeschwindigkeit der Partikel im Fallschacht entspricht. Die der Konvektion ausgesetzte Messspitze des TE wurde als Kugel von 1mm Durchmesser angenommen.

Für die Berechnungen wurde die Annahme getroffen, dass die Temperatur der die Partikel umgebenden Luft gleich der Partikeltemperatur ist. Um die Differenzen der einzelnen Messverfahren über einen großen Anwendungsbereich abschätzen zu können, wurden die Berechnungen bei Partikeltemperaturen von 330 K bis 1300 K durchgeführt. Bei jeder Partikeltemperatur wurden zusätzlich drei unterschiedliche Wandtemperaturen zu Grunde gelegt. Die untere Wandtemperatur wurde mit 298 K angenommen, die



mittlere Wandtemperatur entsprach der Partikeltemperatur und für die obere Wandtemperatur wurde ein Verhältnis von 4,5 zu 3,3 von der Wand- zur Partikeltemperatur zu Grunde gelegt. Um die Abweichung der TE Temperatur von den tatsächlichen Partikeltemperaturen bei sich ändernden Strahlungsanteilen von Wand und Partikeln darstellen zu können, wurden die Berechnungen bei einem Strahlungsanteil der Wand von 1; 0,5; 0,3; 0,1 und 0,0 durchgeführt.

Für eine Lufttemperatur von 330 K ergab dies bei freier Konvektion einen Wärmeübergangskoeffizienten von  $60 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die erzwungene Konvektion einen Wärmeübergangskoeffizienten von  $126 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die entsprechenden Werte bei einer Lufttemperatur von 1300 K ergaben  $168 \text{ W/m}^2\text{K}$  und  $388 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten haben einen nur geringen Einfluss auf die berechneten Abweichungen der zu erwartenden TE Temperatur von der Partikeltemperatur. Wird in der Berechnung der voraussichtlichen TE Temperatur bei einer Partikeltemperatur von 1300 K und einer Wandtemperatur von 1773 K der Wärmeübergangskoeffizient von  $168 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $388 \text{ W/m}^2\text{K}$  erhöht, verringert sich die Abweichung der TE Temperatur von der Partikeltemperatur lediglich von  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . verringert man allerdings den Strahlungsanteil der Wand lediglich von 0,1 auf 0 so verringert sich die Abweichung von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Daher wurde darauf verzichtet den Wärmeübergangskoeffizienten für die einzelnen Sichtfaktoren gesondert abzuschätzen. Um ausschließen zu können, dass in der Modellrechnung die Abweichung der TE Temperatur von der Partikeltemperatur unterschätzt wird, wurden alle vereinfachenden Annahmen so getroffen, dass die Abweichung der TE Temperatur von der Partikeltemperatur eher über- als unterschätzt wurde. So wurde für die nachfolgenden Berechnungen auch der jeweilige Wert für die freie Konvektion zu Grunde gelegt. Der Einfluss der unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten ist in den Diagrammen in Abbildung 5.4 dargestellt.



**Abbildung 5.4:** Relative Abweichung der TE Temperatur von der Partikeltemperatur in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten

Die Berechnung der Strahlung erfolgt über:

$$Q_{St} = \frac{A_{TE} \sigma (T_{TE}^4 - T_{W/P}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{TE}} + \frac{1}{\varepsilon_{W/P}} - 1} \quad [5.5]$$

Die im Strahlungsaustausch mit dem Thermoelement stehenden Partikel des Fallvorhangs, sowie die umgebenden Wände des Fallschachtes werden als das Thermoelement komplett umschließende Flächen gedacht. Die jeweiligen Anteile, die die Partikel, beziehungsweise die Fallschachtwände am gesamten Strahlungsaustausch mit dem TE haben, werden in Gleichung [5.7] durch die jeweiligen Sichtfaktoren  $\Psi_W$  und  $\Psi_P$  berücksichtigt.

In der Energiebilanzierung ergibt dies:

$$Q_L + Q_K + Q_{St} = 0 \quad [5.6]$$

Oder:

$$\begin{aligned} T_{Te} \left( \lambda \frac{A_{quer}}{l} + \alpha A_{TE} \right) + T_{TE}^4 \left( \frac{A_{TE} \sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{TE}} + \frac{1}{\varepsilon_W} - 1} \right) + T_{TE}^4 \left( \frac{A_{TE} \sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{TE}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1} \right) - \\ \left( T_U \left( \lambda \frac{A_{quer}}{l} \right) + T_L (\alpha A_{TE}) + \Psi_W T_W^4 \left( \frac{A_{TE} \sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{TE}} + \frac{1}{\varepsilon_W} - 1} \right) + \Psi_P T_P^4 \left( \frac{A_{TE} \sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{TE}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad [5.7]$$

Durch Substitution erhält man:

$$T_{Te}(x+y) + T_{TE}^4(z) + T_{TE}^4(v) - (T_U(x) + T_L(y) + \Psi_W T_W^4(z) + \Psi_P T_P^4(v)) = 0 \quad [5.8]$$

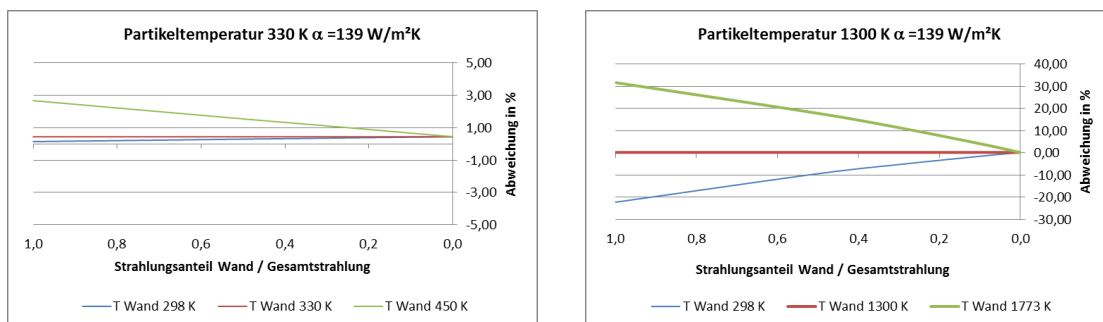
Oder:

$$T_{Te}(x+y) + T_{TE}^4(z+v) - a = 0 \quad [5.9]$$

Der Wärmeaustausch durch Wärmeleitung zwischen den Partikeln und dem Thermoelement wird bei diesem Modell ebenso vernachlässigt wie der sich mit der Vorhangdichte ändernde Wärmeübergangskoeffizient. Der Anteil der Wärmeleitung am gesamten Wärmetausch ist auf Grund der geringen Kontaktfläche zwischen Partikeln und TE sowie der, zumindest bei geringen Vorhangdichten kurzen Kontaktzeit und der schlechten Wärmeleitung in der Partikelschüttung von 0,3 W/mK gering. Um die

voraussichtliche Thermoelement-Temperatur zu berechnen, wird statt der realen Geometrie ein vereinfachtes Modell angenommen. Dieses ist zwar fehlerbehaftet, erlaubt aber dennoch eine quantitative Abschätzung der zu erwartenden Abweichungen für die den Berechnungen zu Grunde liegenden Extremfälle.

In den in Abbildung 5.5 gezeigten Diagrammen sind die berechneten prozentualen Abweichungen der gemessenen Temperaturen von den tatsächlichen Partikeltemperaturen dargestellt. Dem Anhang sind zwei Tabellen beigegefügt, in denen die gezeigten Abweichungen nach den einzelnen Anteilen von Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung aufgelöst sind. In den unten stehenden Diagrammen ist zu erkennen, dass mit steigender Partikeltemperatur und hohem Strahlungsanteil der Wand auch mit einer höheren relativen Abweichung zu rechnen ist. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Strahlungsleistung eines Körpers mit seiner Temperatur in der vierten Potenz ansteigt und die hierdurch dem TE durch die Fallschachtwand zugeführte Wärme weder durch Leitung an die Umwelt noch durch Konvektion an die Umgebungsluft abgeführt werden kann.



**Abbildung 5.5:** Prozentuale Abweichung der gemessenen von der Partikeltemperatur

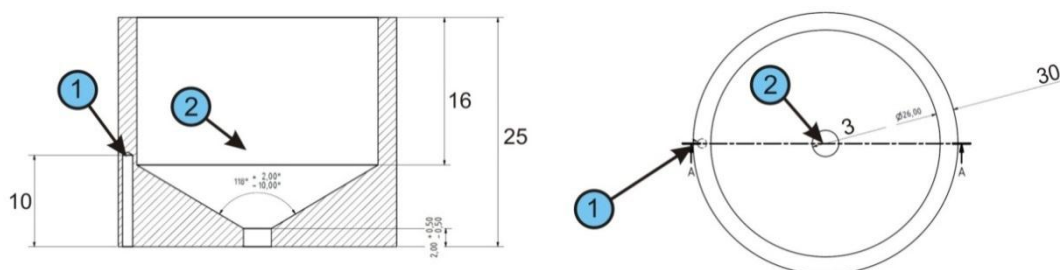
Die Graphen zeigen deutlich, dass sich der relative Fehler der Temperaturmessung mit zunehmender Vorhangdichte verringert. Während ein relativer Fehler bei einer Partikeltemperatur von 330 K und einer Wandtemperatur von 450 K bei einem Strahlungsanteil der Wand von 0,6 mit unter 3 % noch im zu tolerierenden Bereich liegt ist ein zu erwartender Fehler von über 20 % bei einer Partikeltemperatur von 1300 K und einer Wandtemperatur von 1773 K nicht mehr akzeptabel. Eine Wandtemperatur von 1773 K bei einer Partikeltemperatur von 1300 K ist zwar recht hoch angenommen, aber gerade bei geringen Vorhangdichten wird sich die Fallschachtrückwand stark aufheizen und gerade dann einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messergebnisse haben. Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, dass es notwendig ist die parasitären Einflüsse auf die Messergebnisse durch die Strahlung der Fallschachtwände zu vermeiden. Die Einflüsse durch Konvektion und Wärmeleitung sind für diesen Fall sehr gering.

### 5.3 Messvorrichtung

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert ist es Aufgabe der zu entwickelnden Messvorrichtung die Einflüsse der Strahlung der Fallschachtwände auf das Messergebnis zu vermeiden. Hierzu ist es notwendig den Partikelvorhang so stark zu verdichten, dass das TE nur noch im Wärmetausch mit den Partikeln steht. Wird die Temperatur einer Partikelschüttung mittels TE gemessen, misst das TE immer eine Mischtemperatur aus der Partikeltemperatur und der Temperatur der die Partikel umgebenden Luft. Für eine korrekte Messung ist es also erforderlich, dass sich ein thermisches Gleichgewicht im Partikel-Luft Gemisch einstellt. Hieraus ergeben sich die folgenden zwei Randbedingungen:

1. Maximale Verdichtung des Partikelvorhangs
2. Ausreichend lange Verweilzeit der Partikel in der Messvorrichtung

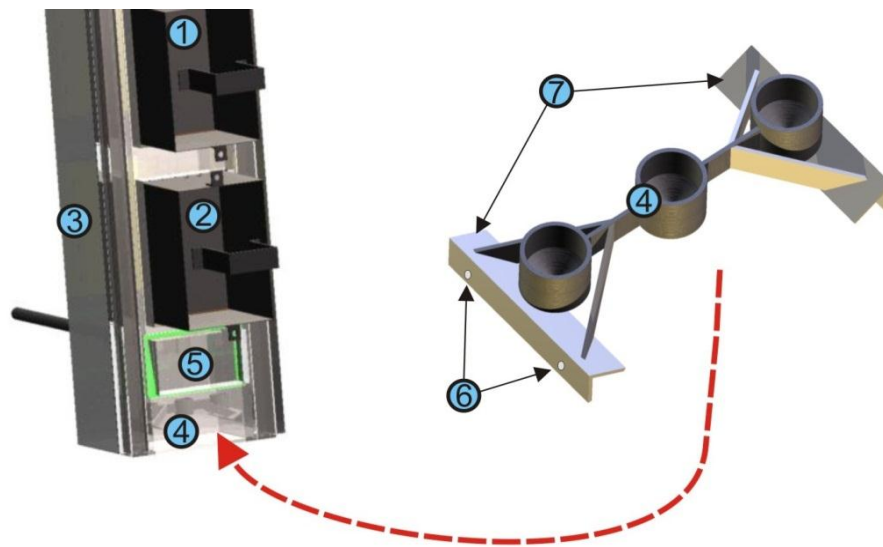
Eine Möglichkeit diese Randbedingungen zu erfüllen, ist die Verdichtung des Partikelvorhangs in einer Auffangvorrichtung. Um den Partikelvorhang verdichten zu können muss die Einlassöffnung größer sein als die Auslassöffnung der Vorrichtung. Es muss weiterhin gewährleistet sein, dass das sich in der Vorrichtung befindliche TE auch bei geringstmöglichem Partikelmassenstrom vollständig durch Partikel bedeckt ist. Um dies gewährleisten zu können muss das richtige Verhältnis von Einlass- zu Auslassöffnung gewählt werden. Da für eine kontinuierliche Messung ein konstanter Durchfluss durch die Vorrichtung unabdinglich ist, muss die Auslassöffnung so groß dimensioniert werden, dass sie nicht verstopfen kann. Bei der Verwendung von Partikeln mit einem mittleren Durchmesser von 0,458 mm<sup>9</sup> hat sich in ersten Vorversuchen eine Öffnung mit einem Durchmesser von 3,1 mm als sinnvoll ergeben. Hieraus, und aus den Fertigungsmöglichkeiten der institutseigenen Werkstatt, sowie den Dimensionen des verfügbaren hochtemperaturbeständigen Stahls (1.4841) ergab sich für die Einlassöffnung eine Durchmesser von 26 mm. Die Fertigungszeichnung dieses Messzylinders ist in Abbildung 5.6 dargestellt.



**Abbildung 5.6:** Schnittzeichnung und Draufsicht des Messzylinders: [1] Lage des TE in der Zylinderwand; [2] Lage des TE in der Partikelschüttung (Angaben in mm)

Um möglichst schnell auf eventuelle Temperaturschwankungen der Partikel reagieren zu können sollte das TE eine möglichst geringe Wärmekapazität gegenüber den sich in der Vorrichtung befindlichen Partikeln aufweisen. Das TE sollte aber außerdem ausreichend unempfindlich gegenüber dem abrasiven Verschleiß durch die Partikel sein. Daher fiel die Wahl auf ein Mantelthermoelement Typ K mit einem Durchmesser von 1mm. Zur Untersuchung eines eventuellen Einflusses der Zylinderwandtemperatur auf das Messergebnis, wurde wie in Abbildung 5.6 dargestellt ein Loch in die Zylinderwand gebohrt, in welches ein weiteres TE eingeführt wurde [1]. Die Lage der Messspitze des die Partikeltemperatur messenden TE ist in der Abbildung 5.6 mit [2] bezeichnet.

Aufgrund unterschiedlicher Bestrahlungsstärke und Aufweitung der Partikel über die Vorhangbreite, ist damit zu rechnen, dass die Partikel in den Randbereichen des Vorhangs während des Herabfallens eine andere Temperatur annehmen werden, als die Partikel in der Mitte des Vorhangs. Um diese eventuelle Temperaturdifferenz unter Verwendung des eben beschriebenen Messzylinders erfassen zu können, wurde die in Abbildung 5.7 (rechts) gezeigte Vorrichtung konstruiert<sup>10</sup>.



**Abbildung 5.7:** Die Messvorrichtung und ihre Lage im Fallschacht: [1, 2] Heizstrahler; [3] Fallschacht ; [4] Messvorrichtung; [5] Öffnungen für IR Messung; [6] Bohrungen für Befestigungsbolzen; [7] Abweiser (Vergleiche auch Abbildung 5.2)

<sup>9</sup> Datenblatt im Anhang

<sup>10</sup> Konstruktionszeichnung im Anhang

Die Konstruktion hatte neben der möglichst genauen Messung der Temperatur in der Mitte und den Randbereichen des Vorhangs noch folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Wie in 5.1 erwähnt, ist es möglich den Fallschacht zu drehen, um die Bestrahlung der Partikel sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Vorhangs zu ermöglichen. Da die Partikeltemperatur in beiden Fällen am Ende des Vorhangs gemessen werden soll, muss mit dem Drehen des Fallschachtes auch die Position der Messvorrichtung im Fallschacht geändert werden. Daher sollte eine einfache und werkzeuglose Montage, beziehungsweise Demontage ermöglicht werden. Dies geschieht über die Abbildung 5.7 [6] gezeigten Bohrungen, durch die insgesamt vier Befestigungsbolzen gesteckt werden
- Zur verlustfreien Befüllung der in Abbildung 5.3 gezeigten Becher, soll die Vorhangbreite nach passieren der Vorrichtung auf eine Breite von 142 mm reduziert werden. Dies wurde durch die in Abbildung 5.7 [7] gezeigten Abweisbleche erreicht.
- Um eine möglichst lange Fallstrecke zu ermöglichen sollte die Bauhöhe der Vorrichtung so gering wie möglich gehalten werden. Mit den zuvor beschriebenen Bedingungen ergab sich diese zu 45 mm.
- Wie die Messzylinder soll auch der Rest der Vorrichtung hochtemperaturbeständig sein. Es wurde hier das gleiche Material (1.4841) gewählt.

## 6 Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurde erläutert welche Überlegungen zu der nun bestehenden Konstruktion der Messvorrichtung geführt haben.

Es wurden verschiedene Versuche durchgeführt um die Funktionalität der Vorrichtung und der angeschlossenen Messtechnik nachzuweisen. Diese werden im nun folgenden Abschnitt beschrieben.

Zunächst sei aber erwähnt, dass die verwendeten TE mit Hilfe eines Kalibrierofens auf ihren Fehler hin überprüft wurden. Hierbei wichen die von den TE gezeigten Temperaturen, bei einer vom Vergleichsthermometer (PT 100) angezeigten Temperatur von 173 °C weniger als  $-1\text{ °C}$  von der Vergleichstemperatur ab. Ihr Fehler lag also im in der Tabelle 2 angegebenen Bereich.

In einigen Versuchen sollte die Temperatur der Partikel, beziehungsweise deren Temperaturverteilung, zum Vergleich mit den von der Messvorrichtung erzielten Ergebnissen, auch mit der IR-Kamera gemessen werden. In Abschnitt 4.2 wurde schon erläutert, dass hierfür die Kenntnis des Emissionsgrades des Messobjektes, also in diesem Fall der Partikel erforderlich ist. In einem Vorversuch konnte der Emissionsgrad der Partikel auf einen Wert nahe von 0,9 abgeschätzt werden, was sich auch mit den Literaturangaben deckt (K.A.Stahl, et al., 1986). Für diesen Vorversuch wurden die Partikel in einer Keramikschale mit einer Wandstärke von 20 mm im Ofen auf eine Temperatur von etwa 180°C erhitzt. Um ein Auskühlen der Partikel während der Herausnahme aus dem Ofen zu verhindern wurde die Schale mit einem Deckel verschlossen. Zur Überprüfung der Partikeltemperatur in der Schale wurden zwei Löcher in die Seiten der Versuchsschale gebohrt, durch die jeweils ein TE in die Schüttung eingeführt wurde. Das obere der beiden TE wurde so oberflächennah in der Schüttung positioniert, dass es gerade noch von den Partikeln bedeckt wurde. Aufgrund der oberflächennahen Positionierung des TE ist davon auszugehen, dass dieses TE eine Temperatur sehr nahe der Oberflächentemperatur der Schüttung maß. Nachdem die Schale aus dem Ofen geholt wurde, wurde ihr der Deckel entfernt. Dieser Vorgang wurde durch die IR-Kamera überwacht. Zum Zeitpunkt der Entfernung des Deckels maß das oberflächennahe TE eine Temperatur von 181,3 °C und die IR-Kamera zeigte mit einem eingestellten Emissionsgrad von 0,9 eine Temperatur von 181,0 °C.

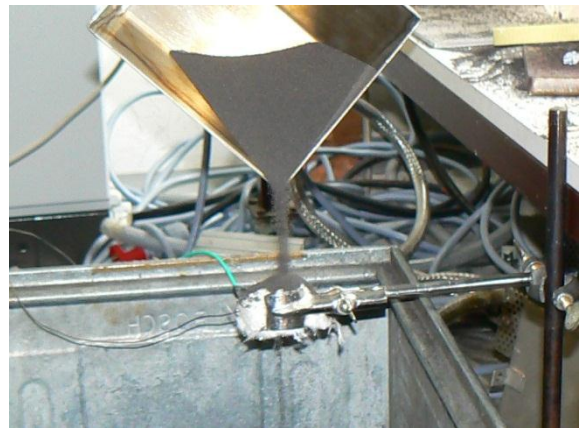
### 6.1 Erster Funktionstest

Nach Fertigung der drei Messzylinder sollte zunächst in einem Vorversuch deren grundsätzliche Funktionalität überprüft werden. Außerdem diene der im Folgenden beschriebene Versuch einem ersten Test der Messtechnik. Ergebnis dieses Versuches sollte außerdem eine erste Abschätzung der Dauer bis zum Erreichen des stationären

Zustandes sein. Diese war von Interesse da ein Einfluss der Temperatur der Zylinderwand auf das Messergebnis nicht ausgeschlossen werden konnte.

### 6.1.1 Versuchsaufbau

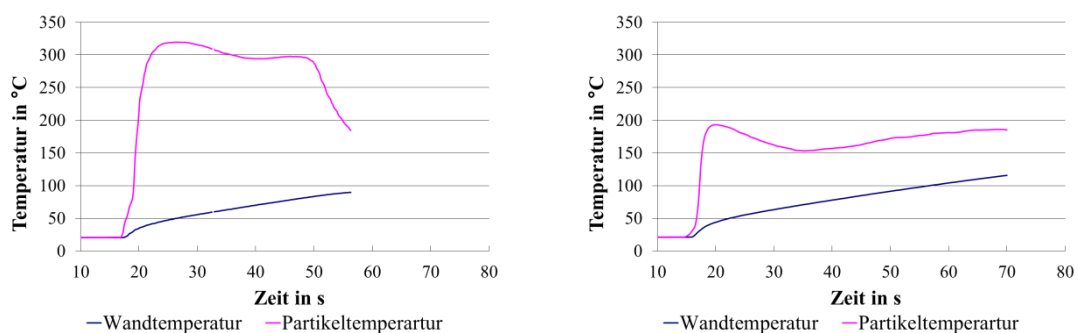
Da die drei Messzylinder baugleich sind und daher keine unterschiedlichen Ergebnisse zu erwarten waren, wurde der Versuch mit lediglich einem der drei Zylinder durchgeführt. Der Messzylinder wurde wie in Abbildung 6.1 gezeigt, mit einem Stativ und einer Klemme über einer zum Teil mit Partikeln gefüllten Blechkiste (ca 40x40x30 cm) befestigt. Die Partikel wurden in einer aus hochtemperaturbeständigem Stahl gefertigten Wanne im Ofen erhitzt. Da für die Versuche im Fallschacht davon ausgegangen werden kann, dass sich, sowohl die Temperatur der den Messzylinder umgebenden Luft, als auch die Temperatur der Fallschachtwand eher in der Größenordnung der Partikeltemperatur als in der, der Umgebungstemperatur des Messzylinders während der hier gemachten Vorversuche befinden werden, wurde der Zylinder



**Abbildung 6.1:** Erster Funktionstest

gegen die Klemme mit einer ca. 5 mm starken Schicht aus Keramikwolle isoliert um die Konvektions- und Strahlungsverluste zu minimieren. Fraglich ist zum jetzigen Zeitpunkt, ob die Messzylinder für den Einbau in den endgültigen Versuchsstand ebenfalls gegen die Umgebung isoliert werden sollten, um eventuelle parasitäre Einflüsse auf die Messung zu vermeiden.

Während der Messung wurde sowohl der Temperaturverlauf der Zylinderwand, als auch der Partikel im Inneren des Messzylinders mit Hilfe zweier TE Typ K gemessen. Die Lage der TE ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Abbildung 6.2 zeigt die Ergebnisse von zwei der durchgeführten Versuche.



**Abbildung 6.2:** Darstellung der Ergebnisse der ersten Funktionstest



Bei dem im linken Diagramm dargestellten Versuch wurde die Wanne mit den Partikeln für etwa 3,5 h bei 400 °C im Ofen erwärmt. Nach dem Versuch wurde die Wanne mit den restlichen Partikeln zeitnah wieder in den Ofen gegeben. Nach weiteren drei Stunden Verweilzeit der Partikel im Ofen, wurde der Versuch durchgeführt, dessen Ergebnisse im rechten Diagramm dargestellt sind. Es konnte also in beiden Fällen davon ausgegangen werden, dass sich in der Partikelschüttung eine annähernd homogene Temperatur eingestellt hatte. Die deutlich geringere Maximaltemperatur im rechten Diagramm ist darauf zurückzuführen, dass hier von der Herausnahme der Partikel aus dem Ofen bis zur Durchführung des Versuchs ca. zwei min. vergangen waren, während der erste Versuch wenige Sekunden nach Herausnahme der Partikel aus dem Ofen durchgeführt wurde. Neben den sich um mehr als 100°C unterscheidenden Maximaltemperaturen, ist auch der sehr unterschiedliche Verlauf der gemessenen Partikeltemperatur auffällig. Dieser ist auf eventuell doch vorhandene Temperaturdifferenzen in der Partikelschüttung oder den bei manueller Zuführung nicht konstanten Partikelmassenstrom zurückzuführen. Nicht auszuschließen ist außerdem ein schwankender Abstand der Wanne vom Messzylinder während des Versuchs. Durch diesen könnten die Partikel beim Herabfallen unterschiedlich stark abgekühlt sein. Wie lange es dauert, bis der stationäre Zustand erreicht ist, konnte mit diesem Versuchsaufbau ebenso wenig abgeschätzt werden, wie der Einfluss der Wandtemperatur auf das Messergebnis. Überraschend war der langsame Anstieg der Zylinderwandtemperatur, sowie der Umstand, dass diese, trotz des unterschiedlichen Temperaturniveaus der zugeführten Partikel, in beiden Fällen in etwa gleich schnell anstiegen.

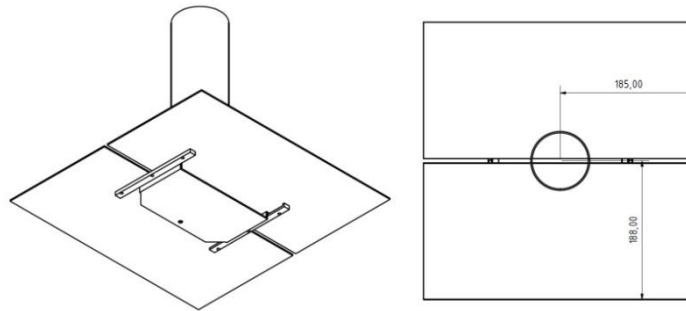
## 6.2 Randbedingungen

Um reproduzierbare Ergebnisse erzielen zu können, musste der Versuchsaufbau, beziehungsweise die Versuchsdurchführung abgeändert werden. Diese Abänderung sollte es ermöglichen in den nachfolgenden Versuchsreihen möglichst folgende Randbedingungen zu erfüllen:

1. Konstante (Auslass-)Temperatur des Vorhangs.
2. Generierung eines konstanten, veränderbaren Partikelmassenstroms.
3. Bestimmung der Temperatur am Auslass der Zuführvorrichtung.
4. Zuführung der Partikel bis der stationäre Zustand erreicht ist.
5. Möglichst geringer Temperaturverlust vom Auslass der Zuführvorrichtung bis zum Einlass der Messvorrichtung oder
6. Bestimmung des Temperaturverlustes vom Auslass der Zuführvorrichtung bis zum Einlass der Messvorrichtung.

### 6.3 Zuführvorrichtung

Die unter den gegebenen Umständen beste Möglichkeit die oben genannten Bedingungen weitestgehend zu erfüllen war eine Partikelzuführung, wie sie in Abbildung 6.3 gezeigt ist. Für diese wurde ein Rohr aus hochtemperaturbeständigem Stahl mit einem Durchmesser von 8,4 cm und einer Höhe von 33 cm auf zwei Platten gleichen Materials geschweißt. Zwischen den Platten wurde ein 5mm breiter Schlitz gelassen. Dieser Schlitz bildet in den Versuchen die Auslassöffnung für die Partikel.

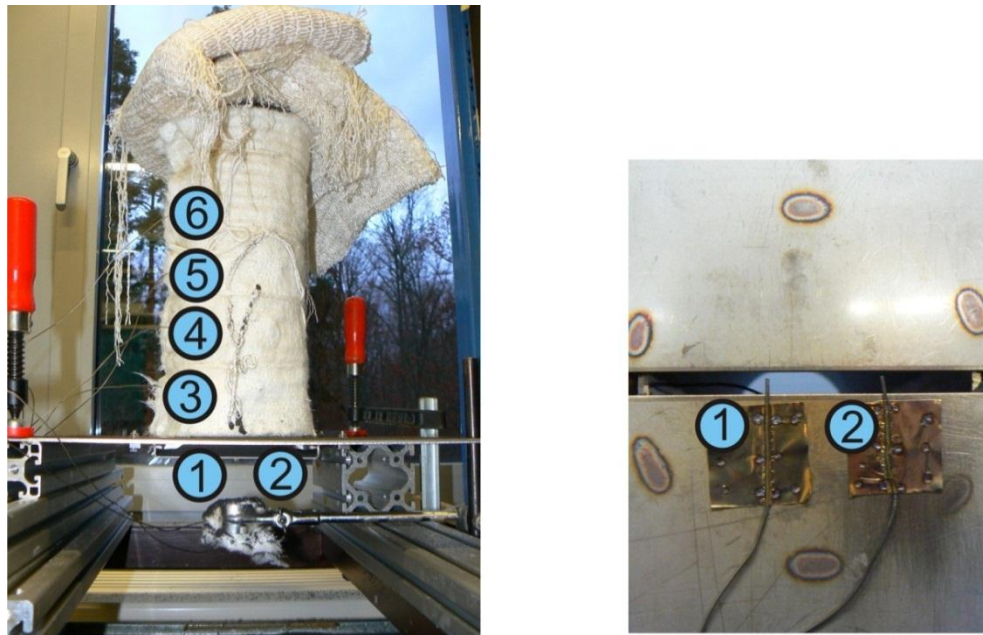


**Abbildung 6.3:** Isometrie und Draufsicht der Partikelzuführung

An die Platten wurde ein Schieber montiert, der zur Regulierung des Massenstroms dient. Mit dem geringsten Partikelmassenstrom, der es gerade noch ermöglichte, einen gleichmäßigen Partikelvorhang zu erzeugen, war eine Versuchsdauer von etwas über acht Minuten möglich. Der Partikelmassenstrom betrug hier 0,4 kg/min und die Vorhangbreite 15 cm. Die Partikel wurden vor den Versuchen, in der in Abbildung 6.1 gezeigten Wanne, jeweils für mehrere Stunden im Ofen erwärmt und anschließend in die Vorrichtung gefüllt. Um die Konvektions- und Strahlungsverluste nach dem Befüllen der Vorrichtung zu minimieren und so die Partikeltemperatur in der Vorrichtung für die Dauer des Versuchs möglichst konstant halten zu können, wurde das Rohr mit einer zwei cm starken Schicht aus Keramikwolle gegen die Umgebung isoliert. Zusätzlich hierzu wurde die Partikelzuführung vor den ersten Versuchen, vor dem Befüllen mit einem Heißluftgebläse vorgewärmt. Diese Maßnahme führte jedoch, wie der Vergleich mit später ohne Vorwärmung durchgeführten Versuchen gezeigt hat, nicht zu einer konstanteren Temperatur der Partikel am Auslass der Vorrichtung. In den weiteren Versuchen wurde daher auf eine Vorwärmung der Partikelzuführung verzichtet.

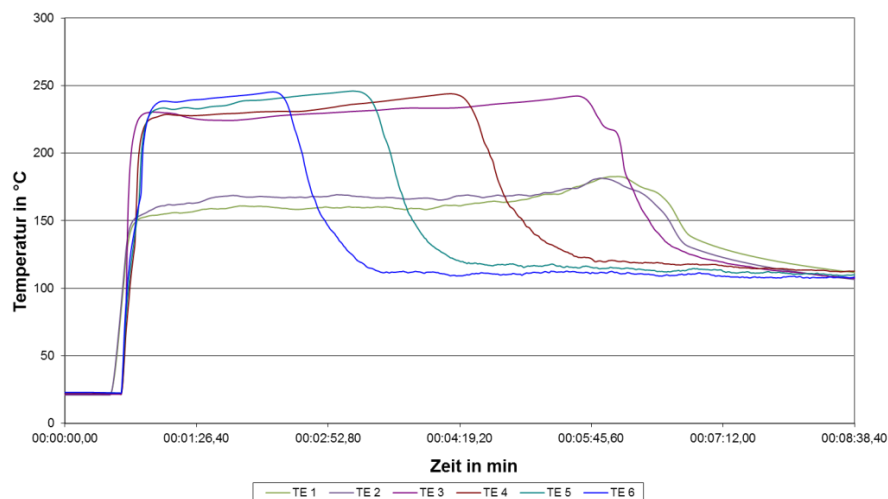
Zur Überwachung der Temperaturverteilung der Partikel in der Zuführung und der Partikeltemperatur am Auslass der Vorrichtung wurden sechs Thermoelemente (TE) wie in Abbildung 6.4 gezeigt an der Zuführvorrichtung angebracht. TE1 und TE2 wurden so an der Vorrichtung befestigt, dass sich ihre Messspitzen in etwa mittig des Auslassschlitzes befanden. TE3 bis TE6 wurden gleichmäßig über die Höhe des

Zylinders verteilt in selbigen eingeführt. Ihre Messspitzen befanden sich etwa mittig der Vorrichtung.



**Abbildung 6.4:** Lage der TE an der Partikelzuführung und Detailansicht der am Auslass angebrachten TE

Da die Temperaturkurven dieser sechs TE in allen Messungen in etwa den gleichen Verlauf zeigten, werden diese beispielhaft am in der Abbildung 6.5 dargestellten Diagramm erläutert. Hier sind die Ergebnisse eines der letzten Versuche gezeigt.



**Abbildung 6.5:** Beispielhafte Darstellung der Temperaturkurven (Partikelzuführung)

In den ersten 20 Sekunden der Messung zeigten alle sechs TE eine Temperatur von 20°C an. Dies entsprach der Raumtemperatur. Nach 20 Sekunden wurden die, in diesem Fall auf 250°C erhitzten Partikel in die Zuführung gefüllt, was sich in dem rapiden

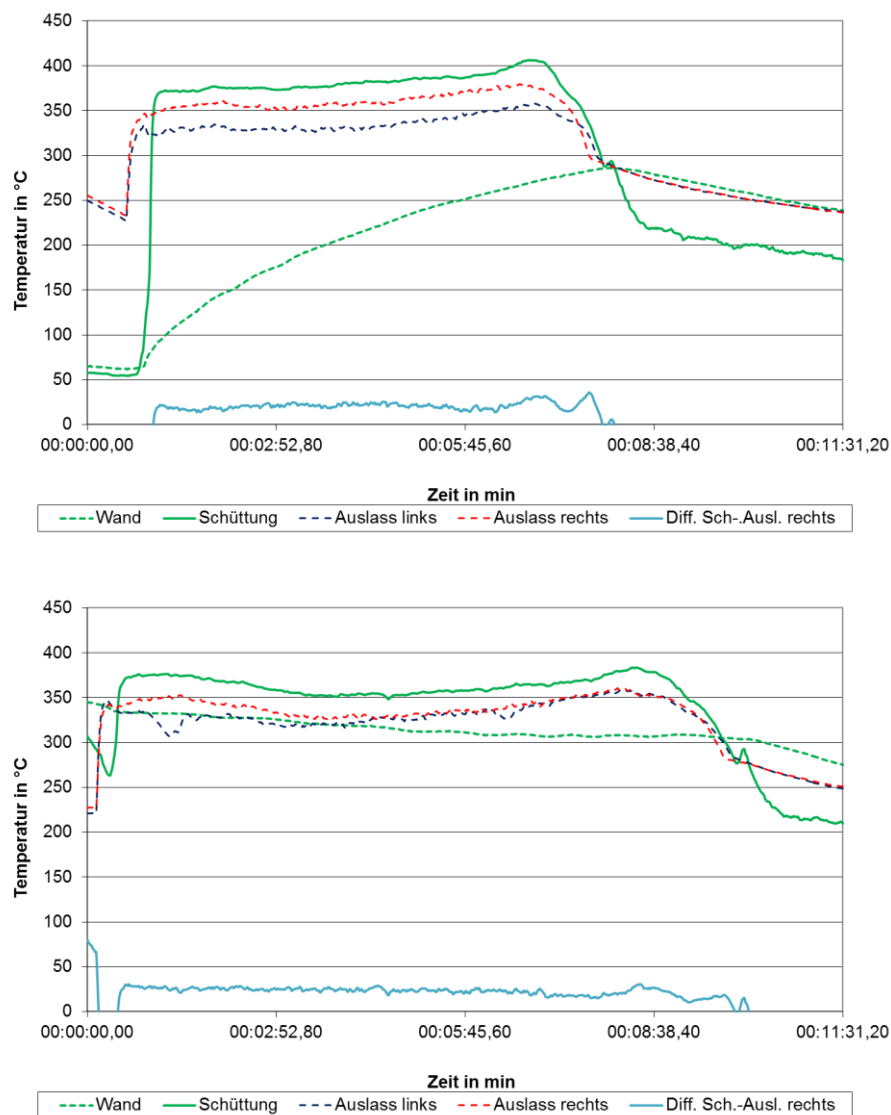
Anstieg der Kurven widerspiegelt. In allen durchgeführten Versuchen war die Tendenz erkennbar, dass die weiter unten messenden TE zu Anfangs eine geringere Temperatur anzeigten als die weiter oben messenden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zum einen die oberflächennahen Partikel in dem Zeitraum von der Herausnahme bis zum Einfüllen in die Zuführung stärker auskühlten als die weiter unten gelegenen und zum anderen die Temperaturverteilung in der Wanne nicht ganz homogen war. Außerdem kühlten die weiter unten zum Liegen kommenden Partikel über die weitere Fallstrecke stärker aus. Die Wärmeabgabe an die Bodenplatte führt ebenfalls zu einer niedrigeren Temperatur im unteren Bereich der Zuführung. Im hier gezeigten Beispiel betrug die Differenz der Anfangstemperaturen zwischen dem unten messenden TE 3 und dem oben messenden TE 6 19 °C. Der allmähliche Anstieg der von den TE 3 bis TE 6 gemessenen Temperaturen ist mit den höheren Temperaturen der von oben nachrutschenden Partikeln zu erklären. Der rapide Abfall der Temperaturen findet zu dem Zeitpunkt statt, an dem die jeweiligen TE nicht mehr von den heißen Partikeln bedeckt sind. Danach resultieren die TE Temperaturen aus der Temperatur der sie umgebenden Luft und den Strahlungsanteilen der Partikel und der Innenwand der Zuführung.

TE 1 und TE 2 zeigten in diesem Versuch eine deutlich niedrigere Temperatur als TE 3 bis TE 6. Die Temperaturdifferenz betrug in etwa 90 °C. Diese Diskrepanz zwischen der Temperatur der an den TE vorbeiströmenden Partikeln und der Temperatur der TE selbst, ist durch die Wärmeableitung durch die Stahlplatte, auf welcher diese TE, wie in Abbildung 6.4 (rechts) befestigt wurden, begründet. Durch das oben erwähnte Vorheizen mittels Heißluftföhn konnte diese Temperaturdifferenz verringert werden. Aufgabe dieser TE war es jedoch nicht die Absoluttemperatur der Partikel am Auslass zu messen. Mit ihnen sollte überprüft werden ob eine Veränderung der am Auslass gemessenen Temperaturen auch die gleiche Veränderung der in den Messzylindern gemessenen Temperaturen nach sich zog. Dieser Vergleich diente außerdem als Indikator für Fehlmessungen der Vorrichtung. Sank die in den Messzylindern gemessene Temperatur, während die Auslasstemperatur gleich blieb, war dies ein Hinweis darauf, dass der Ablauf der Messzylinder durch, größere Partikel, Fasern der zur Isolierung der Zylinder verwendeten Keramikmatten oder andere Verschmutzungen gestört wurde.

In den, in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Diagrammen werden lediglich die Temperaturkurven der in den Messzylindern messenden TE, die der die Temperatur der Zylinderwandung überwachenden TE, sowie die Temperaturen der am Auslass messenden TE, gezeigt.

## 6.4 Messungen mit einem Zylinder

Für den Versuch, dessen Ergebnisse hier erläutert werden, wurden die Partikel im Ofen auf eine Temperatur von 400 °C erwärmt. Der Versuch diente der Überprüfung des Einflusses der Wandtemperatur der Messzylinder auf das Messergebnis. Hierzu wurden die Ergebnisse eines ohne Vorwärmung des Messzylinders durchgeführten Versuches, mit denen, mit einem mittels des schon erwähnten Heißluftgebläses vorgewärmten Messzylinders, durchgeführten Versuches, verglichen. Die Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse der Messungen.



**Abbildung 6.6:** Vergleichende Darstellung der Ergebnisse eines ohne Vorwärmung (oben) und eines mit Vorwärmung des Messzylinders (unten) durchgeführten Versuches.

Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass auch nach einer Versuchsdauer von etwa sechs Minuten der stationäre Zustand noch nicht erreicht war. Zu diesem Zeitpunkt lag die Temperatur der Zylinderwand noch immer in etwa 130°C unter der in der

Partikelschüttung im Inneren des Messzylinders gemessenen Temperatur. Innerhalb des Messzeitraums stieg die Wandtemperatur des Messzylinders von 73 °C um 217°C auf 290°C an.

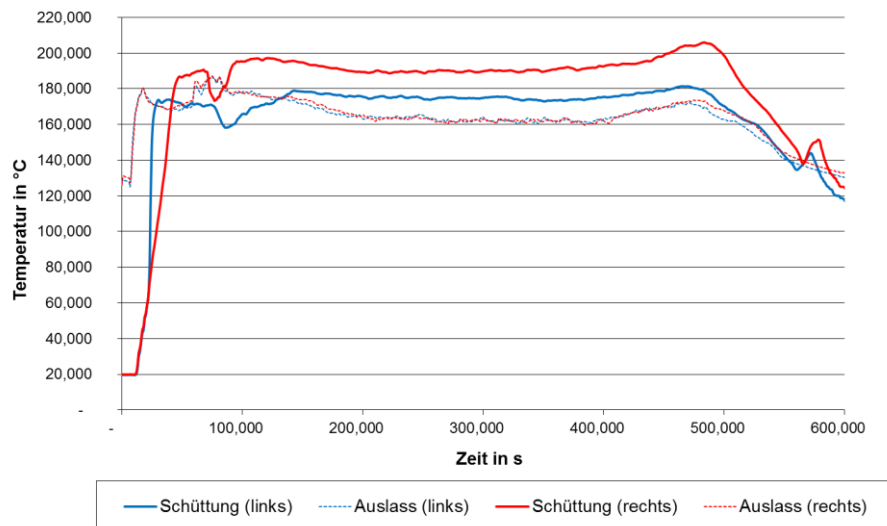
Für die im unteren Diagramm dargestellte Messung wurde der Messzylinder auf eine Anfangstemperatur von 338 °C vorgeheizt. Über die Versuchsdauer von etwa acht Minuten fiel diese um 32 °C auf 306 °C. Dieser Temperaturverlust, trotz einer gemessenen Partikeltemperatur zwischen 354 °C und 374 °C im Inneren des Messzylinders, lässt auf einen schlechteren Wärmübergang von den heißen Partikeln auf die Zylinderwand, als von der Zylinderwand auf die kältere Umgebungsluft schließen. Durch eine Verbesserung der Isolierung des Messzylinders gegen die Umgebung ließe sich ein Auskühlen der Zylinderwand verhindern.

Vergleicht man die beiden Differenzen zwischen den Schüttungstemperaturen und der jeweiligen rechten Auslasstemperatur, fällt auf, dass diese in beiden Fällen relativ gleichmäßig waren, die Änderung der Schüttungstemperatur also unabhängig von der Wandtemperatur des Messzylinders, der Änderung der Auslasstemperatur folgte. Die Temperatur der Wand des Messzylinders hat also keinen nennenswerten Einfluss auf die gemessene Schüttungstemperatur.

## 6.5 Messungen mit zwei Zylindern

Führt man die Messungen, wie oben beschrieben, mit nur einem Messzylinder durch ist es kaum möglich abzuschätzen, inwieweit die in der Schüttung im Inneren des Messzylinders gemessene Temperatur der Temperatur der Partikel im Vorhang entspricht. Misst man hingegen mit zwei Messzylindern unterschiedliche Temperaturen, ist dies ein Hinweis auf einen vorhandenen systematischen Fehler oder reale Temperaturdifferenzen.

Während der ersten mit zwei Zylindern durchgeführten Messungen, zeigten die beiden in den Zylindern messenden TE hohe Temperaturdifferenzen, während die am Auslass messenden TE annähernd die gleichen Temperaturen anzeigten. Beispielhaft hierfür sind die Ergebnisse einer dieser Messungen im in der Abbildung 6.7 dargestellten Diagramm gezeigt.



**Abbildung 6.7:** Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines mit zwei Messzylindern durchgeführten Versuchs

Die Temperaturdifferenz der beiden in den Schüttungen im Inneren der Messzylinder messenden TE betrug im hier gezeigten Beispiel im über den Versuchszeitraum gemessenen Mittel  $18^{\circ}\text{C}$ , und die Temperaturdifferenz am Auslass im Mittel  $1^{\circ}\text{C}$ .

Als mögliche Ursachen hierfür wurden vermutet:

1. Unterschiedliche Durchlaufgeschwindigkeiten.  
Diese könnten durch einen gestörten Ablauf der Partikel aus den Messzylindern verursacht sein und zu einer unterschiedlichen Ausbildung der Schüttung auf den Messzylindern führen. Es ist denkbar, dass hieraus eine unterschiedliche Dauer vom Auftreffen der Partikel auf der sich auf den Zylindern bildenden Schüttung bis zum Erreichen des TE resultiert und die Partikel in diesem Zeitraum unterschiedlich auskühlen. Außerdem wäre mit einem geringeren Massenstrom durch den Zylinder auch ein geringer Wärmeeintrag in den Zylinder verbunden, was ebenfalls zu einer geringeren TE Temperatur führen könnte.
2. Die Temperaturdifferenzen sind real,  
rühren also nicht von einem Messfehler. Da der Schieber ein geringes Spiel in den Führungsschienen aufwies, mit denen er an den Platten der Vorrichtung befestigt war (vergleiche Abbildung 6.3), konnte eine exakt parallele Ausrichtung der Vorderkante des Schiebers zu den Kanten der beiden Platten nicht garantiert werden. Die Folge könnte ein höherer Partikelmassenstrom auf der Seite des Vorhangs sein, an der die beiden Kanten den geringeren Abstand aufwiesen. Dieser wäre vermutlich mit einer höheren Partikeltemperatur auf dieser Seite des Vorhangs verbunden. Eine inhomogene Temperaturverteilung in der Zuführung selbst könnte ebenso ein Grund sein.

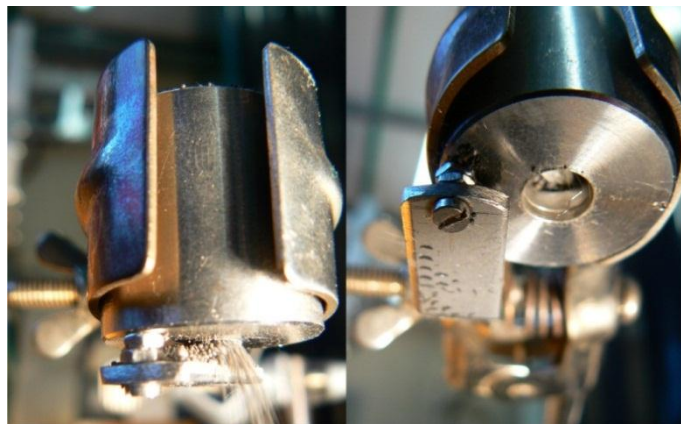
### 3. Ein systematischer Fehler

Die einzige Möglichkeit für einen systematischen Fehler wird eine unterschiedliche Position der Messspitzen der beiden TE gesehen. Da jedoch vermutet wurde, dass die Temperatur der Partikel im Messzylinder während der Versuche eine geringe Differenz aufwies wurde der hierdurch verursachte Fehler als gering eingeschätzt

### 4. Fehlerhafte Messung der TE

Um eine fehlerhafte Messung der TE ausschließen zu können, wurde vor den nun beschriebenen Versuchen zu den vermuteten Fehlerursachen die schon im einleitenden Abschnitt zu Kapitel 6 erwähnte Kalibrierung der TE durchgeführt. Durchlaufgeschwindigkeit

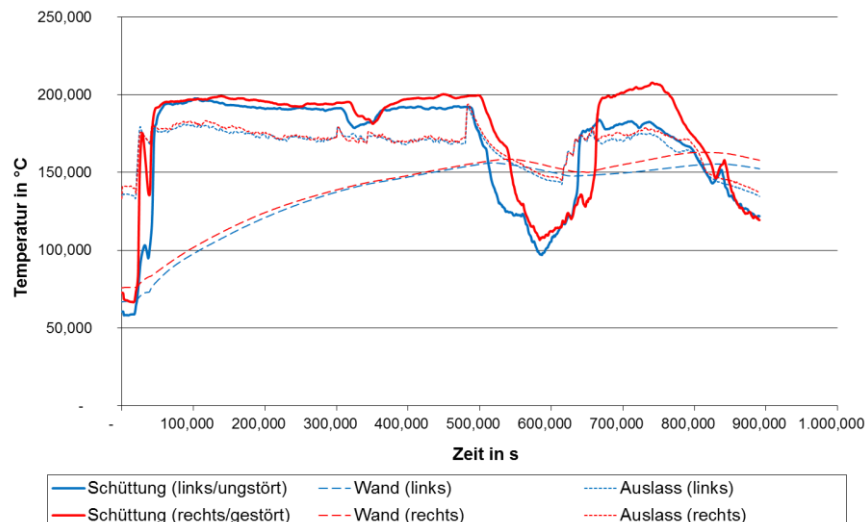
Zur Überprüfung, ob die gemessenen Temperaturdifferenzen von den unterschiedlichen Durchlaufgeschwindigkeiten rühren, wurde der Ablauf eines der beiden verwendeten Messzylinder gestört. Hierzu wurde ein schwenkbares Störblech, wie in der Abbildung 6.8 gezeigt, so unter dem Auslass eines der beiden Zylinder montiert, dass zwischen einem komplett ungehinderten Ablauf und einem komplett unterbundenen Ablauf frei reguliert werden konnte.



**Abbildung 6.8:** Messzylinder mit Ablaufstörung

Der Ablauf dieses Zylinders wurde wie in Abbildung 6.8 (links) gezeigt, so eingestellt, dass die Verweildauer der Partikel in diesem Zylinder etwa das Doppelte der Verweildauer des Zylinders ohne Störung betrug. Die Ergebnisse dieser Messung sind im in der Abbildung 6.9 dargestellten Diagramm gezeigt.





**Abbildung 6.9:** Darstellung der Ergebnisse des Versuchs mit Ablaufstörung

Es ist zu erkennen, dass die Differenzen der beiden Schüttungstemperaturen hier geringer ausfallen als im in der Abbildung 6.7 gezeigten Diagramm. Außerdem wäre zu erwarten gewesen, dass bei sonst gleichen Bedingungen, im linken, ungestörten Messzylinder die höhere Temperatur gemessen worden wäre. Somit können die unterschiedlichen Temperaturen nicht auf die unterschiedlichen Durchlaufgeschwindigkeiten zurückgeführt werden.

Der in Abbildung 6.9 zu erkennende Temperatureinbruch nach etwa 500 Sekunden rührt von einer Unterbrechung des Partikelstromes. Dieser wurde genutzt um die, durch das am linken Zylinder befestigte Blech hervorgerufene Störung des Ablaufs zu beseitigen. Hierzu wurde das Blech in die in Abbildung 6.8 (rechts) gezeigte Position gedreht. Hätte die Durchlaufgeschwindigkeit einen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis, hätten sich die Schüttungstemperaturen mitiedereinsetzendem Partikelstrom angleichen müssen. Da das genaue Gegenteil der Fall war, ist die Ursache für die unterschiedlichen gemessenen Schüttungstemperaturen zu suchen. Es ist möglich, dass im zweiten Teil der Messung die Position des den Partikelmassenstrom regulierenden Schiebers eine andere war als im ersten Teil der Messung, was ein unterschiedliches Strömungsverhalten der Partikel hervorgerufen haben könnte und mögliche Ursache für eine inhomogene Temperaturverteilung über die Breite des Vorhangs sein könnte. Ebenso ist es möglich, dass während der Veränderung der Stellung des Störbleches versehentlich auch die Lage des in der Schüttung messenden Thermoelements verändert wurde.

### 6.5.1 Reale Temperaturdifferenzen

Zur Überprüfung ob die unterschiedlichen gemessenen Temperaturen auf tatsächlich vorhandene Temperaturunterschiede im Partikelvorhang zurückzuführen sind oder ob sie von einem systematischen Fehler der Messvorrichtung rühren, wurden die zwei im Folgenden erläuterten Versuche durchgeführt. Im ersten Versuch wurde die Temperatur des Partikelvorhangs zusätzlich zur Messung mittels TE mit einer IR-Kamera gemessen. In diesem Versuch sollte außerdem überprüft werden, inwieweit die von der IR-Kamera gemessenen Temperaturen mit den von den TE gemessenen Temperaturen übereinstimmen. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 6.10 dargestellt.

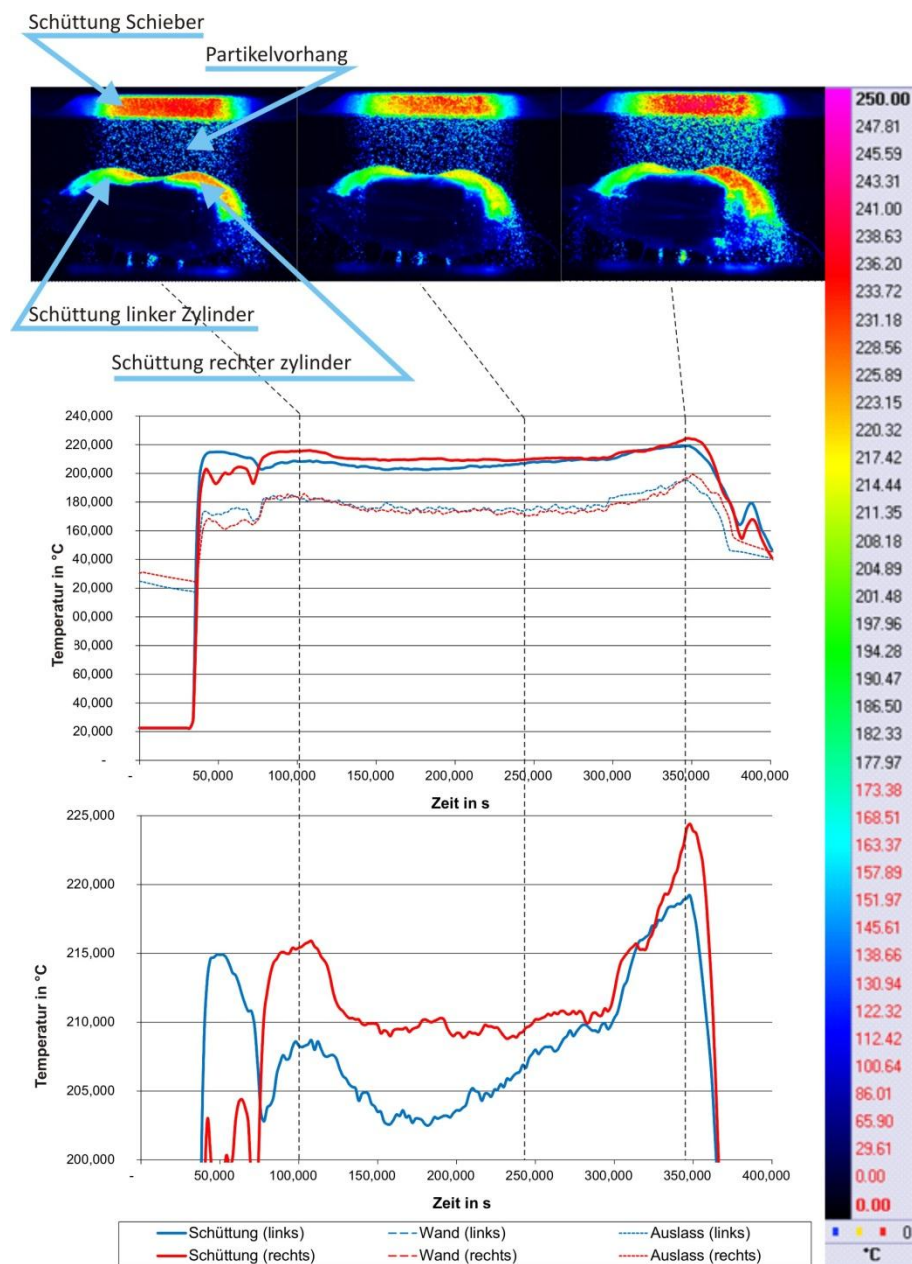


Abbildung 6.10: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse von IR und TE Messung

Die in dieser Abbildung oben gezeigten Bilder sind Aufnahmen der IR-Kamera. Für diese Aufnahmen wurde ein Emissionsgrad von 0,9 zu Grunde gelegt. Über die in der Abbildung auf der rechten Seite gezeigten Farbskala lassen sich den einzelnen Farben in diesen Bildern die unterschiedlichen Temperaturen zuordnen.

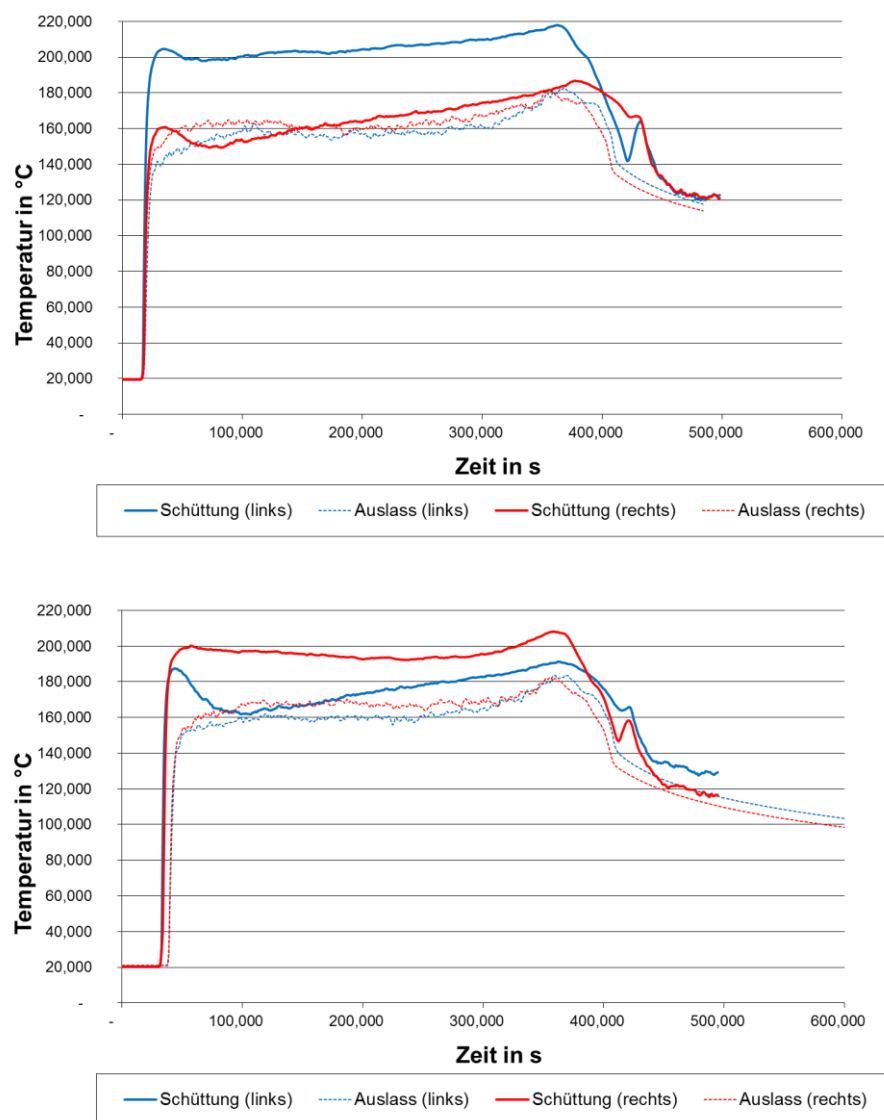
Im oberen der beiden Diagramme sind die Temperaturverläufe der Schüttung, des Auslasses und der Messzylinderwand dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Kurven der die Schüttungstemperatur messenden TE zusätzlich in einer höheren Auflösung dargestellt um ein genaueres Ablesen der Temperatur zu ermöglichen. Über die gestrichelten Linien sind die IR-Aufnahmen zeitlich den Diagrammen zugeordnet. Die IR-Aufnahmen wurden nach einer Versuchsdauer von 100, 240 und 345 Sekunden gemacht. Zum Zeitpunkt der ersten Aufnahme zeigte das rechte TE eine höhere Temperatur als das linke. Zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme stieg die vom linken TE gemessene Temperatur bei geringerer gemessener Absoluttemperatur schneller an als die vom rechten TE gemessene Temperatur. Nach kurzzeitig gleichen gemessenen Temperaturen lag die vom rechten TE gemessene Temperatur zum Zeitpunkt der dritten Aufnahme wieder über der vom linken TE gemessenen Temperatur. Vergleicht man nun die Ergebnisse der TE Messung zu den beschriebenen Zeitpunkten mit denen der IR-Messungen, ist eine relative Übereinstimmung der Ergebnisse zu erkennen. Zeigt das im rechten Zylinder messende TE eine höhere Temperatur misst auch die IR-Kamera eine höhere Oberflächentemperatur der sich auf dem rechten Messzylinder befindlichen Partikel (Aufnahmen 1 und 3). Streben die von den TE gemessenen Temperaturen wieder dem gleichen Niveau zu, misst auch die IR-Kamera auf beiden Zylindern die annähernd gleiche Temperatur (Aufnahme 2).

Dieser Versuch hat gezeigt dass die Temperaturverteilung im Partikelvorhang inhomogen war. Da die beiden in den Messzylindern messenden TE den Temperaturgradienten über die Vorhangbreite genauso anzeigten wie die IR-Kamera, lässt sich hieraus schließen, dass die Differenz in den von ihnen gemessenen Temperaturen auch auf die realen Temperaturunterschiede im Partikelvorhang zurückzuführen sind.

Auch die mit den unterschiedlichen Verfahren gemessenen Absoluttemperaturen zeigen eine gute Übereinstimmung. So misst die IR-Kamera zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme, auf dem linken Messzylinder eine mittlere Oberflächentemperatur der Partikel von 209 °C. Zum gleichen Zeitpunkt hat das TE im linken Zylinder eine Temperatur von 206,9 °C gemessen. Der entsprechende Vergleich auf der rechten Seite ergab ebenfalls eine Differenz von etwa 2°C. Die maximale Differenz zwischen der geschätzten mittleren Oberflächentemperaturen, der sich auf den Zylindern ausbildenden Schüttung und der in den Zylindern gemessenen Temperatur lag bei allen Versuchen, während derer eine Vergleichsmessung mit der IR-Kamera durchgeführt wurde, in diesem Bereich. Da diese Versuche alle bei einem Temperaturniveau von

knapp über 200 °C durchgeführt wurden, ergab sich hieraus eine Abweichung der von der IR-Kamera Temperatur, zu der von den TE gemessenen Temperaturen von etwa einem Prozent.

Für den zweiten Versuch dieser Messreihe wurde der den Partikelmassenstrom regulierende Schieber vor Beginn der Messung auf eine „offene“ Position gestellt. Dadurch wurde schon während dem Einfüllen der Partikel ein Vorhang erzeugt. Dieser Versuch wurde mit der gleichen Schieberstellung zunächst zweimal durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Messungen sind in den in der Abbildung 6.11 gezeigten Diagrammen dargestellt



**Abbildung 6.11:** Darstellung der Ergebnisse der Versuche mit Seitentausch der Messzylinder

Die gleichbleibende Schieberstellung sollte dazu führen, dass die Partikel auf der, sich auf dem Schieber ausbildenden Schüttung während der beiden Messungen das gleiche Strömungsverhalten zeigten. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass die höhere Partikeltemperatur in beiden Messungen auf der gleichen Vorhangseite vorlag. Für die zweite Messung (Abbildung 6.12, unteres Diagramm) wurden die Seiten der Messzylinder getauscht.

Der Messzylinder der während der ersten Messung die Temperatur auf der rechten Vorhangseite gemessen hat, maß im zweiten Versuch die Temperatur auf der linken Vorhangseite. Wäre die höhere Temperatur nach dem Seitentausch immer noch auf der gleichen Seite gemessen worden, bedeutete dies, dass der Fehler durch eine eventuelle Falschmessung der Messvorrichtung kleiner wäre als der tatsächliche Temperaturunterschied im Partikelvorhang. Die höhere Temperatur wurde jedoch während beider Messungen vom selben TE gemessen. Dies ließ auf einen größeren Messfehler schließen, als er zunächst erwartet wurde. Bei einer im Anschluss an die beiden Messungen durchgeführten Untersuchung der Messvorrichtung wurde festgestellt, dass die Messspitze des TE, welches in beiden Messungen die niedrigere Temperatur anzeigte, wie in Abbildung 6.12 (rechts) gezeigt etwa drei mm außermittig positioniert war. Die TE sind also während des Umrüstens des Versuchstandes verrutscht. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich die TE während beider Messungen an den selben Stellen befanden.



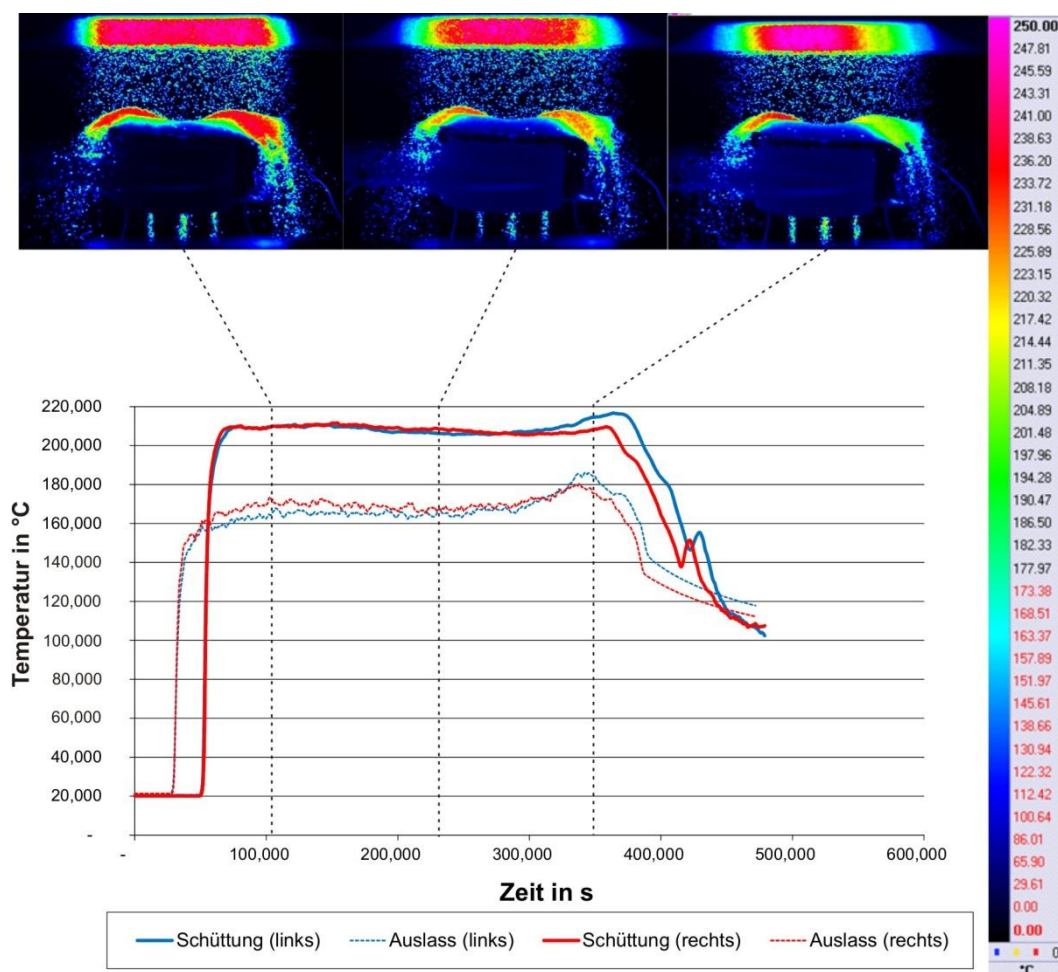
**Abbildung 6.12:** Lage der TE während der Messungen

Dass die Temperaturen des außermittig messenden TE in beiden Messungen, wie in den Diagrammen zu erkennen ist, um mehr als 30 °C unter der des mittig messenden TE lagen, lässt auf einen hohen Temperaturgradienten innerhalb der sich im Messzylinder befindlichen Partikelschüttung schließen. Dieser ist vermutlich auf die Ausbildung einer Randzone zurückzuführen, in der die Partikel nicht ablaufen. Die Partikel in dieser Randzone übertragen zu Anfangs der Messung einen Teil ihrer Wärme über Leitung und Strahlung an die Zylinderwand und kühlen daher stärker aus, als die durch den Zylinder strömenden Partikel. Im Laufe des Versuchs wird diese Randzone dann wieder

langsam von den an ihnen vorbeiströmenden Partikeln erwärmt. Dies lässt sich auch an den Temperaturkurven der außermittig messenden TE ablesen. Betrachtet man die blaue Kurve im unteren Diagramm der Abbildung 6.11 (Schüttung links), fällt auf, dass sie zu Beginn der Messung recht schnell um etwa 25 °C abfällt und im Anschluss daran, über den gesamten Versuchsverlauf wieder stetig steigt. Das gleiche Verhalten, wenn auch nicht ganz so ausgeprägt zeigen auch die beiden Kurven der Schüttungstemperatur im oberen Diagramm. In am DLR durchgeführten Versuchen wurde die Wärmeleitfähigkeit einer Schüttung aus den hier verwendeten Partikeln bei 200 °C auf einen Wert von etwa 0,3 W/mK bestimmt. Dieser geringe Wärmeleitwert der sich ausbildenden Randzone ist vermutlich auch der Grund dafür, dass die Wandtemperatur des Messzylinders einen in diesen Versuchen nicht feststellbaren Einfluss auf die Partikeltemperatur der durch den Messzylinder strömenden Partikel hat. Sie bildet eine Art Dämmschicht, die den Messzylinder von den strömenden Partikeln isoliert. Diese Randzone ist vermutlich auch der Grund dafür, dass sich während der durchgeführten Versuche die Temperaturen der Wand und die der Partikel nie angeglichen haben. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden die zuvor gemachten Messungen mit exakt positionierten Thermoelementen wiederholt.

Hierzu wurde an den Messzylindern eine Klemmvorrichtung angebracht die ein Verrutschen der TE in den Zylindern verhinderte und die TE wurden neu ausgerichtet. Es wurde sowohl die gleiche Schieberstellung beibehalten, als auch der Seitenwechsel der Messzylinder durchgeführt.

Zur Überwachung eines eventuellen Temperaturunterschiedes der Partikel auf den einzelnen Messzylindern, wurde die Partikeltemperatur zusätzlich zur Messung mittels TE auch mit der IR-Kamera gemessen. Da beide Messungen weitestgehend die gleichen Ergebnisse zeigten, sind in Abbildung 6.13 nur die Ergebnisse der zweiten und letzten Messung der Versuche gezeigt.



**Abbildung 6.13:** Messung mit exakt positionierten TE

An den dargestellten Versuchsergebnissen ist eine gute Übereinstimmung der von den TE und den von der IR-Kamera gemessenen Temperaturen zu erkennen. Beide Messverfahren zeigen eine Übereinstimmung der Temperaturen auf der linken und rechten Vorhangseite. Lediglich in der Schlussphase der Messung weisen die auf den unterschiedlichen Seiten gemessenen Temperaturen eine geringe Differenz auf, die sich jedoch in den Ergebnissen beider Verfahren widerspiegelt. Die Abweichung der beiden in den Zylindern gemessenen Temperaturen lag im Mittel bei  $0,7\text{ °C}$ .

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen miteinander, ist zu erkennen dass sich durch die Fixierung der Messspitze der TE in der Mitte der Zylinder die Differenz der in den beiden Zylindern messenden TE von anfänglich zwischen  $20\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$  (siehe Abbildung 6.12) auf unter  $1\text{ °C}$  reduzieren ließ. Der durch ein Verrutschen der TE verursachte Fehler lässt sich also durch die Fixierung der TE vermeiden.

## 7 Fehlerbetrachtung

Die Versuche haben gezeigt, dass der größte Messfehler der Vorrichtung von einem Verrutschen der TE im Messzylinder rührt. Dieser Fehler lässt sich durch ein exakt mittiges Ausrichten der TE Messspitzen in den Messzylindern und der Fixierung mittels Klemmvorrichtung vermeiden. Die Größe dieses Messfehlers hängt davon ab, wie weit das jeweilige TE verrutscht. Durch das Verrutschen des TE in dem zuvor beschriebenen Versuch, wurde die Partikeltemperatur zu Anfang der Messung, bei einer Temperatur von annähernd 220°C um über 60 °C unterschätzt (siehe Abbildung 6.12. oberes Diagramm). Dies entspricht einem Fehler von etwa 27%.

Da wie gezeigt die Temperatur der Zylinderwand keinen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis hat, ist die einzige Ursache für ein abweichendes Ergebnis der Messungen, von der tatsächlichen Temperatur der Partikel im Vorhang der Wärmeaustausch der Partikel mit ihrer Umgebung. Dieser findet über die kurze Dauer statt, die es braucht, bis die auf der sich auf dem Zylinder ausbildenden Schüttung auftreffenden Partikel das TE erreicht haben. Einen geringen Einfluss auf das Messergebnis hat auch der über Wärmeleitung über den Draht des TE stattfindende Wärmeaustausch mit der Umgebung. Dieser wurde wie in 6.5.1 erläutert auf etwa ein Prozent abgeschätzt.

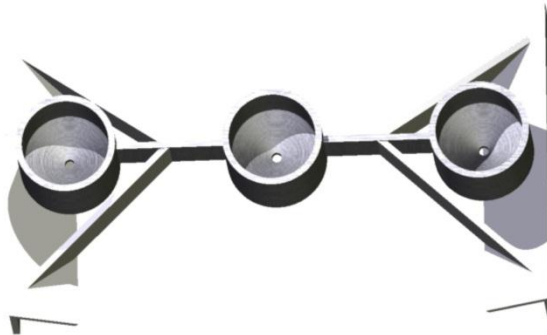
Während der hier beschriebenen Versuche wird dieser Messfehler größer gewesen sein als während der Versuche im Fallschacht, da während der Fallschachtversuche sowohl die Temperatur der Umgebungsluft als auch die Temperatur der die Partikel umgebenden Gegenstände dort eher der Partikeltemperatur entsprechen wird.

Für die Versuche im Fallschacht wird daher ein Messfehler der Messvorrichtung erwartet, der nicht größer sein wird, als der des zulässigen Fehlers des Thermoelements. Dieser beträgt 1,5 °C oder 0,4 % der in °C gemessenen Temperatur.



## 8 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Temperaturmessvorrichtung besteht, wie in Abbildung 8.1 gezeigt, aus drei miteinander verbundenen, hochtemperaturbeständigen Messzylindern mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 25 mm.



**Abbildung 8.1:** Darstellung der Messvorrichtung

In ihrer Mitte misst jeweils ein TE Typ K mit einem Durchmesser von 1 mm die Temperatur der durch die Zylinder strömenden Partikel. Die Zylinder verdichten den Partikelvorhang und schützen Partikel und TE vor der Umgebungsstrahlung.

Die Messvorrichtung wird am unteren Ende des Partikelvorhangs im Fallschacht befestigt. Die Einlassöffnung und die Auslassbohrung sind so dimensioniert, dass die Zylinder auch bei geringen Partikelmassenströmen vollständig mit Partikeln gefüllt sind.

Aus den durchgeführten Versuchen lässt sich schlussfolgern, dass die hier vorgestellte Messvorrichtung die Temperatur eines Partikelvorhangs mit einem Fehler von nicht mehr als  $\pm 1\%$  der  $^{\circ}\text{C}$  Temperatur misst.

Für ein genaues Messergebnis ist es von größter Wichtigkeit die Messspitze der TE exakt mittig auszurichten. Eventuelle Verunreinigungen der Partikel könnten zu einem Verstopfen der Messvorrichtung führen, weshalb beim Umgang mit den Partikeln darauf zu achten ist, dass keine Fremdkörper in die Partikelschüttung gelangen. Auf eine Isolierung der Messzylinder während der Messungen im Fallschacht kann aufgrund des kaum vorhandenen Einflusses der Zylinderwandtemperaturen auf das Messergebnis verzichtet werden.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b> Strahlungsintensität der Sonne und eines schwarzen Körpers bei 5777 K .....	3
<b>Abbildung 3.1:</b> Weltkarte des zehnjährigen Mittelwertes der Direkt-Strahlung (Edir).....	8
<b>Abbildung 3.2:</b> Parabolrinnenkraftwerk .....	10
<b>Abbildung 3.3:</b> Fresnel-Kraftwerk .....	11
<b>Abbildung 3.4:</b> Solarturm-Kraftwerk PS 10 in der Nähe von Sevilla (Bildquelle: ecofuture.net).....	13
<b>Abbildung 3.5:</b> Poröse Materialien für volumetrische Solarreceiver (Thomas Fend et al.; 1997) .....	15
<b>Abbildung 3.6:</b> Prototyp eines Partikelreceivers nach (Clifford K. Ho, 2009) .....	17
<b>Abbildung 4.1:</b> Funktionsweise des Thermoelementes .....	22
<b>Abbildung 4.2:</b> Schematische Darstellung der berührungslosen Temperaturmessung ..	24
<b>Abbildung 4.3:</b> Darstellung des p-n Übergangs nach (Quaschnig, 2009) .....	25
<b>Abbildung 4.4:</b> Transmission PET .....	26
<b>Abbildung 4.5:</b> Spektraler Transmissionsgrad von Luft.....	27
<b>Abbildung 5.1:</b> Schematische Darstellung der Partikelzuführung .....	28
<b>Abbildung 5.2:</b> Grafik des Fallschachtes und Foto der Vorrichtung zur Partikelrezirkulation: [1] Zuführtrichter; [2] Fallsschacht; [3,6] Öffnungen für IR Messung; [4,5] Heizstrahler; [7] Becher .....	29
<b>Abbildung 5.3:</b> Temperaturmessbecher während der Datenerfassung (J.Hruby, et al., 1988).....	30
<b>Abbildung 5.4:</b> Relative Abweichung der TE Temperatur von der Partikeltemperatur in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten .....	33
<b>Abbildung 5.5:</b> Prozentuale Abweichung der gemessenen von der Partikeltemperatur .....	35
<b>Abbildung 5.6:</b> Schnittzeichnung und Draufsicht des Messzylinders: [1] Lage des TE in der Zylinderwand; [2] Lage des TE in der Partikelschüttung (Angaben in mm) .....	36
<b>Abbildung 5.7:</b> Die Messvorrichtung und ihre Lage im Fallschacht: [1, 2] Heizstrahler; [3] Fallschacht ; [4] Messvorrichtung; [5] Öffnungen für IR Messung; [6] Bohrungen für Befestigungsbolzen; [7] weiser (Vergleiche auch Abbildung 5.2).....	37
<b>Abbildung 6.1:</b> Erster Funktionstest.....	40
<b>Abbildung 6.2:</b> Darstellung der Ergebnisse der ersten Funktionstest .....	40
<b>Abbildung 6.3:</b> Isometrie und Draufsicht der Partikelzuführung.....	42
<b>Abbildung 6.4:</b> Lage der TE an der Partikelzuführung und Detailansicht der am Auslass angebrachten TE.....	43

---

<b>Abbildung 6.5:</b> Beispielhafte Darstellung der Temperaturkurven (Partikelzuführung) .....	43
<b>Abbildung 6.6:</b> Vergleichende Darstellung der Ergebnisse eines ohne Vorwärmung (oben) und eines mit Vorwärmung des Messzylinders (unten) durchgeführten Versuchs. ....	45
<b>Abbildung 6.7:</b> Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines mit zwei Messzylindern durchgeführten Versuchs .....	47
<b>Abbildung 6.8:</b> Messzylinder mit Ablaufstörung.....	48
<b>Abbildung 6.9:</b> Darstellung der Ergebnisse des Versuchs mit Ablaufstörung .....	49
<b>Abbildung 6.10:</b> Vergleichende Darstellung der Ergebnisse von IR und TE Messung.....	50
<b>Abbildung 6.11:</b> Darstellung der Ergebnisse der Versuche mit Seitentausch der Messzylinder .....	52
<b>Abbildung 6.13:</b> Messung mit exakt positionierten TE.....	55
<b>Abbildung 9.1:</b> Tabelle der Anteil der einzelnen Wärmeübertragungsmechanismen bei ausgewählten Wärmeübergangskoeffizienten.....	61
<b>Abbildung 9.2:</b> Auszug aus dem Datenblatt der verwendeten Partikel ( <a href="http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/Proppants16pg_0206.pdf">http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/Proppants16pg_0206.pdf</a> ).....	62
<b>Abbildung 9.3:</b> Datenblatt der Heizstrahler .....	64
<b>Abbildung 9.4:</b> Auszug aus der Fertigungszeichnung der Temperaturmessvorrichtung .....	65

## 9 Anhang

		$\alpha$	316,5				133,6			
		Strahlungsanteil ( $\psi$ )	1,0	0,5	0,3	0,1	0,0			
TPartikel [K]	TWand [K]		Wärmeaustausch [mW]							
		Temperatur TE (°C)	328,9	329,1	329,2	329,3	329,4	328,6		
		298	Konvektion	1,09	0,86	0,77	0,68	0,64	0,61	
			Leitung	-0,64	-0,64	-0,65	-0,65	-0,65	-0,63	
			StrahlungWand	-0,45	-0,23	-0,14	-0,05	0,00	0,00	
			StrahlungPartikel	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	
		330,00	Temperatur TE (°C)	329,4	329,4	329,4	329,4	329,4	328,6	
			Konvektion	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,61	
			Leitung	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,63	
			StrahlungWand	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
		450	StrahlungPartikel	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	
			Temperatur TE (°C)	332,7	331,0	330,4	329,7	329,4	328,6	
			Konvektion	-2,70	-1,03	-0,36	0,30	0,64	0,61	
			Leitung	-0,72	-0,68	-0,67	-0,66	-0,65	-0,63	
		TPartikel [K]	TWand [K]		Wärmeaustausch [mW]					
				Temperatur TE (°C)	1105,7	1205,0	1240,7	1274,3	1290,4	1286,8
298	Konvektion			193,24	94,51	59,02	25,58	9,58	5,53	
	Leitung			-16,71	-18,77	-19,51	-20,20	-20,53	-20,46	
	StrahlungWand			-176,53	-124,70	-84,12	-31,22	0,00	0,00	
	StrahlungPartikel			0,00	48,95	44,61	25,84	10,96	14,93	
1300,000	Temperatur TE (°C)			1290,0	1290,1	1290,2	1290,3	1290,4	1286,8	
	Konvektion			10,07	9,82	9,72	9,63	9,58	5,53	
	Leitung			-20,52	-20,53	-20,53	-20,53	-20,53	-20,46	
	StrahlungWand			10,45	5,09	3,03	1,00	0,00	0,00	
1773	StrahlungPartikel			0,00	5,61	7,78	9,91	10,96	14,93	
	Temperatur TE (°C)			1623,3	1469,1	1401,1	1328,6	1290,4	1286,8	
	Konvektion			-321,47	-168,10	-100,53	-28,43	9,58	5,53	
	Leitung			-27,42	-24,23	-22,83	-21,33	-20,53	-20,46	
1773	StrahlungWand			348,89	310,20	214,76	80,35	0,00	0,00	
	StrahlungPartikel			0,00	-117,88	-91,40	-30,59	10,96	14,93	

		$\alpha$	316,5				133,6	
		Strahlungsanteil ( $\psi$ )	1,0	0,5	0,3	0,1	0,0	
TPartikel [K]	TWand [K]		Anteil am ges. Wärmeaustausch [%]					
330,000	298	Temperatur TE (°C)	328,9	329,1	329,2	329,3	329,4	328,6
		Konvektion	50,00	49,53	49,35	49,17	49,07	47,87
		Leitung	-29,26	-36,91	-41,22	-46,68	-50,00	-50,00
		StrahlungWand	-20,74	-13,09	-8,78	-3,32	0,00	0,00
		StrahlungPartikel	0,00	0,47	0,65	0,83	0,93	2,13
	330	Temperatur TE (°C)	329,4	329,4	329,4	329,4	329,4	328,6
		Konvektion	49,16	49,12	49,10	49,08	49,07	47,87
		Leitung	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00
		StrahlungWand	0,84	0,42	0,25	0,08	0,00	0,00
		StrahlungPartikel	0,00	0,46	0,65	0,83	0,93	2,13
	450	Temperatur TE (°C)	332,7	331,0	330,4	329,7	329,4	328,6
		Konvektion	-39,48	-29,87	-17,46	23,18	49,07	47,87
Leitung		-10,52	-19,85	-32,30	-50,00	-50,00	-50,00	
StrahlungWand		50,00	50,00	50,00	26,43	0,00	0,00	
StrahlungPartikel		0,00	-0,28	-0,23	0,39	0,93	2,13	
1300,000	298	Temperatur TE (°C)	1105,7	1205,0	1240,7	1274,3	1290,4	1286,8
		Konvektion	50,00	32,94	28,48	24,87	23,32	13,52
		Leitung	-4,32	-6,54	-9,41	-19,64	-50,00	-50,00
		StrahlungWand	-45,68	-43,46	-40,59	-30,36	0,00	0,00
		StrahlungPartikel	0,00	17,06	21,52	25,13	26,68	36,48
	1300	Temperatur TE (°C)	1290,0	1290,1	1290,2	1290,3	1290,4	1286,8
		Konvektion	24,54	23,92	23,67	23,44	23,32	13,52
		Leitung	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00	-50,00
		StrahlungWand	25,46	12,41	7,37	2,43	0,00	0,00
		StrahlungPartikel	0,00	13,68	18,95	24,13	26,68	36,48
	1773	Temperatur TE (°C)	1623,3	1469,1	1401,1	1328,6	1290,4	1286,8
		Konvektion	-46,07	-27,09	-23,41	-17,69	23,32	13,52
Leitung		-3,93	-3,91	-5,31	-13,27	-50,00	-50,00	
StrahlungWand		50,00	50,00	50,00	50,00	0,00	0,00	
StrahlungPartikel		0,00	-19,00	-21,28	-19,04	26,68	36,48	

**Abbildung 9.1:** Tabelle der Anteil der einzelnen Wärmeübertragungsmechanismen bei ausgewählten Wärmeübergangskoeffizienten

### 30/50 Sintered Bauxite

- Our highest strength, best performing product.
- For the deepest wells, where pressure and closure stresses are greatest.
- Maintains excellent conductivity in the most demanding environments
- NEW BULLET(S) SPECIFIC TO 30/50

#### Typical Properties

+30m	4.0%
+40m	74.0%
+50m	22.0%
<50m	TR

TR = Trace

Median Particle Diameter = 0.458 mm (0.018 inch)

Shape/Sphericity: 0.9 (Krumbeln & Sloss)

#### Physical Properties

Bulk Density	2.04 g/cc	127 lbs/ft <sup>3</sup>
Specific Gravity	3.50 g/cc	
Absolute Volume	0.0374 gal/lb	
Acid Solubility	1.90%	
Crush Resistance (%)	7500 psi	0.2%
	10000 psi	0.6%
	12500 psi	1.0%
	15000 psi	1.5%

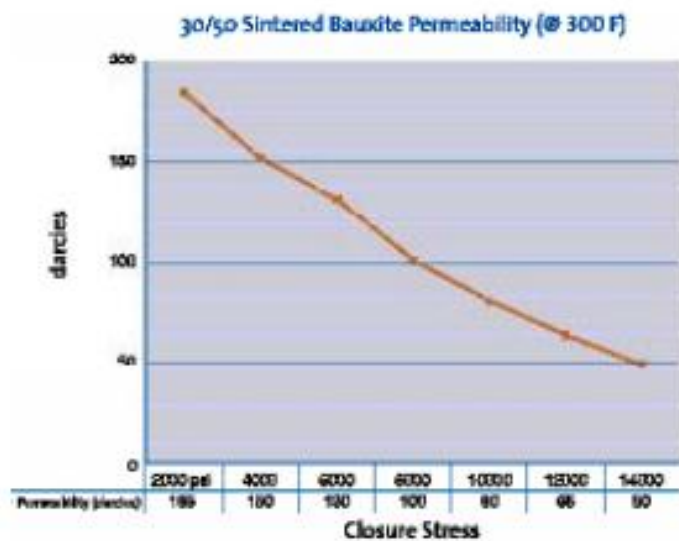
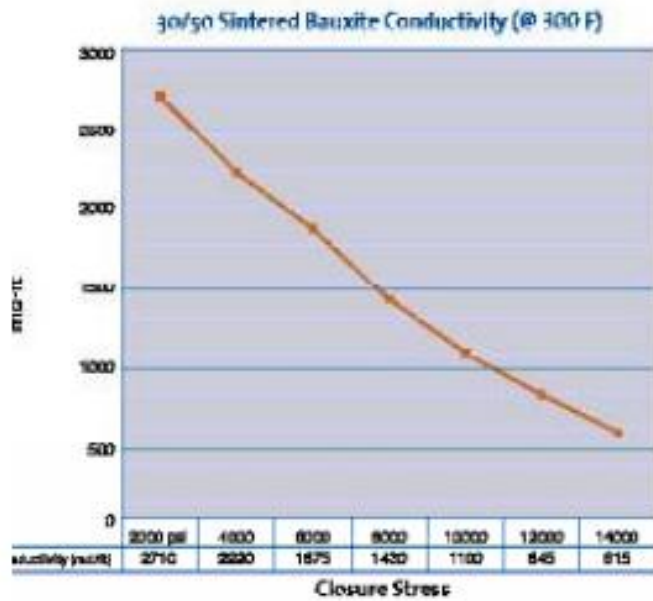


Abbildung 9.2: Auszug aus dem Datenblatt der verwendeten Partikel ([http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/Proppants16pg\\_0206.pdf](http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/Proppants16pg_0206.pdf))

**KANTHAL**

## **SUPERTHAL<sup>®</sup>** IR Radiator

### **Electric Short Wave Infrared Radiator with Higher Power Yield**

Kanthal infrared heater is a new generation of IR radiators, producing short wave infrared radiation with an element temperature of 1400 – 1450°C (2550 – 2640°F). The element is made of MoSi<sub>2</sub> wire known from many high temperature heating processes in different industries like electronics, ceramics, glass, R&D.

The new IR radiators are ready-to-install small compact panels, in standard unit sizes, with high power densities of 300 kW/m<sup>2</sup> (28 kW/ft<sup>2</sup>). The peak energy wavelength is 1.2 μm with a secondary peak energy from the fiber reflector of 2.2 μm.

The main advantage with Kanthal infrared heaters is that the terminals do not have to be cooled. This results in

20 – 30% higher power yield compared with halogen lamps and gas heated radiators.

SUPERTHAL IR heaters emit shorter wavelength than gas radiators which means more efficient drying operations.

The wavelength is longer than halogen radiators which means better matching with the water absorption spectra.

Power densities 2 – 3 times higher than gas radiators could be obtained.

### **Applications**

- Preheating, soldering or enamelling of thin materials or selective surface heating
- Drying of painted steel sheets or pipes
- High temperature sintering



## Technical Data

### Specifications

The dimension of the panel is 150x230 mm (5.9x9 in), which could be multiplied to fit different customer designs.

The panels can be mounted horizontally or vertically.

They could either be equipped with metallic net or quartz glass to protect the radiator from dirt or mechanical damage.

### Product Name

SUPERHAL IR Radiator

Width	150 mm (5.9 in)
Height	230 mm (9 in)
Depth	90 mm (3.5 in)
Power	7–10 kW (7 kW 300 MW/m <sup>2</sup> )
Voltage	90 V
Current	80–90 A
Power density	300 kW/m <sup>2</sup> (28 kW/ft <sup>2</sup> )
Element temp.	1400–1450°C (2550–2640°F)
Life	>12 000 cycles

**Disclaimer:** The information contained in this document is for illustrative purposes only. The data and examples are only general recommendations, and not a warranty or a guarantee that such data will function in individual/specific cases. The purchaser of a Kanthal product has the responsibility to control the applicability of Kanthal's products in a specific application before using them.

© KANTHAL and SUPERHAL are registered trademarks of Kanthal Group companies in Sweden and other countries.

### Kanthal – a Member of the Sandvik Group

The Sandvik Group is a global high technology enterprise with 41,700 employees and annual sales of approximately SEK 72 billion. Sandvik spends about 4 percent of its turnover on research and development. As a member of the Sandvik Group, Kanthal has full access to world-class competence within materials and process technology, as well as Sandvik's R&D center in Sweden, which is one of the most distinguished in the world. Through Sandvik's global sales organization Kanthal is represented in 130 countries.

# KANTHAL

Kanthal – a Sandvik brand

Kanthal AB, Box 502, 734 27 Halstahammar, Sweden Phone +46 220 21000 Fax +46 220 21166 [www.kanthal.com](http://www.kanthal.com)

3-D-4-3 04-07-1000 Kanthal AB, Malmö Kommunikation, IT/Marketing, Halstahammar

**Abbildung 9.3:** Datenblatt der Heizstrahler



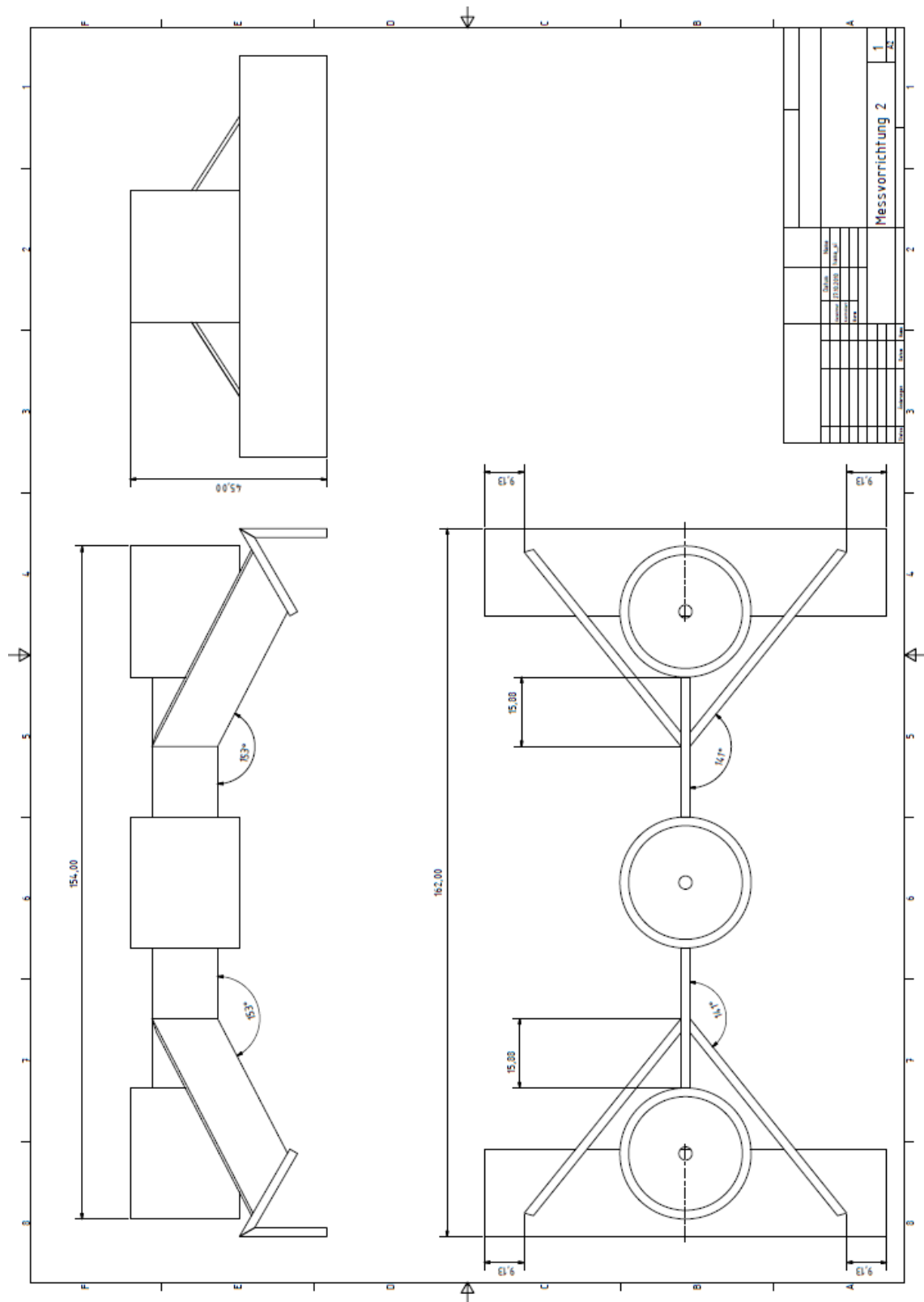


Abbildung 9.4: Auszug aus der Fertigungszeichnung der Temperaturmessvorrichtung

## Literaturverzeichnis

**L. Amsbeck et al.** *Development of a tube receiver for a solar-hybrid microturbine system*. Stuttgart, DLR, 2008.

Verfügbar über:

[http://elib.dlr.de/54223/1/Lars\\_Amsbeck\\_Development\\_of\\_a\\_tube\\_receiver\\_for\\_a\\_solar-hybrid\\_microturbine\\_system\\_Solarpaces2008\\_proceedings.doc.pdf](http://elib.dlr.de/54223/1/Lars_Amsbeck_Development_of_a_tube_receiver_for_a_solar-hybrid_microturbine_system_Solarpaces2008_proceedings.doc.pdf)

**H. D. Baehr, K. Stephan**, *Wärme und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2006.

**Clifford K. Ho, Siri S. Khalsa and Nathan P. Siegel**, *Modelling on-sun tests of a prototype solid particle receiver for concentrating solar power processes and storage*. Albuquerque, USA, Solar Technologies Department, Sandia National Laboratories, 2009.

Verfügbar über:

[http://www.sandia.gov/solar/CSP\\_papers/Advanced/ES2009-90035\\_SPR\\_Ho\\_v4.pdf](http://www.sandia.gov/solar/CSP_papers/Advanced/ES2009-90035_SPR_Ho_v4.pdf)

**Czisch Gregor**, *Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung*. s.l., Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften/ Universität Kassel, 2005.

Verfügbar über:

[http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=980961599&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=980961599.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=980961599&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=980961599.pdf)

**Kibum Kim et al.**, *A study of solid particle flow characterization in solar particle receiver*; Solar Energy 83 1784-1793; 2009

**EZMW**, Autor n. b.: *ECMWF Re-Analysis generated for 15 Years (ERA-15) from December 1978 to February 1994*. Datensammlung, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (EZMW bzw. ECMWF), London/Reading, England. – Verfügbar über:

<http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/er/>

**J. Hruby et al.**, *An experimental and numerical study of flow and convective heat transfer in a freely falling curtain of particles*. Livermore, Californien, Sandia National Laboratories, 1988.

Verfügbar über:

[http://www.sandia.gov/solar/CSP\\_papers/Advanced/ES2008-54090-Fin.pdf](http://www.sandia.gov/solar/CSP_papers/Advanced/ES2008-54090-Fin.pdf)

**K. A. Stahl, J. W. Griffin**, *Optical properties of solid particle receiver materials*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1986.

Verfügbar über:

[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=5829925](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5829925)

**D. Laing, W. Schiel, P. Heller**, *Dish Stirling Systeme, Eine Technologie zur dezentralen solaren Stromverworgung*. 2002.

Verfügbar über:

[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2002/th2002\\_02\\_03.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2002/th2002_02_03.pdf)

**M. SC. (PHYS.) Viacheslav Lel**, *Fire-3 (faseroptisches Zweifarben Pyrometer)*  
RWTH Aachen, 2007.

Verfügbar über:

[http://www.wsa.rwth-aachen.de/uploads/media/FIRE-3\\_01.pdf](http://www.wsa.rwth-aachen.de/uploads/media/FIRE-3_01.pdf)

**H. Lerchenmüller, G. Morin, V. Quaschnig**, *Parabolrinnen- und Fresnel Technologie im Vergleich*. 2004.

Verfügbar über:

[http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/AP2\\_2\\_Technologievergleich.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/AP2_2_Technologievergleich.pdf)

**V. Quaschnig** *Regenerative Energiesysteme*. München, Hanser Verlag, 2009.

**R. Buck, S. Guiliano**, *Solare kraftwerksprozesse für Wüstengebiete; Beitrag zum 13. Kölner Sonnenkolloquim*. 2010.

Verfügbar über:

[http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/soko2010/PDF-Format/8\\_Buck\\_Solare\\_Kraftwerksprozesse\\_Wuestenregionen.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/soko2010/PDF-Format/8_Buck_Solare_Kraftwerksprozesse_Wuestenregionen.pdf)

**R. Pitz-Paal et al.**, *Solarturmkraftwerke*. 1997.

**Richard Zahoransky, Hans-Josef Allelein, Elmar Bollin, Helmut Oehler, Udo Schelling** *Energietechnik*. s.l., Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden, 2010.

**Thomas Fend, Bernhard Hoffschmidt, Robert Pitz-Paal, Oliver Reutter** *Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat*. *Energy* 29(5–6), 2004, pp. 823–833

*VDI Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2006.

**Werner Vogel, Henry Kalb**, *Large-Scale Solar Thermal Power*. s.l., WILEY-VCH, Weinheim, 2010.

**Bernhard Weigand, Jürgen Köhler, Jens von Wolfersdorf**, *Thermodynamik kompakt* s.l., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

**Viktor Wesselack, Thomas Schabbach**, *Regenerative Energietechnik*. Berlin; Heidelberg, Springer Verlag, 2009.