



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Fakultät für Maschinenbau

Fachgebiet: Thermo- und Magnetofluidynamik

Entwicklung eines Thermomessfühlers mit hohen Anspruchzeit-Charakteristiken

Diplomarbeit

vorgelegt von:

Herrn cand. Ing. Mohamed Moustafa

Matrikel nummer: 39161

Studiengang: Maschinenbau

Fachrichtung: Kraftfahrzeugtechnik

im Sommersemester 2010

Verantwortlicher Hochschullehrer:

PD Dr.-Ing. habil. Christian Karcher

Betreuer:

Dr.-Ing. Vitaly Minchenya

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum Jan. 2010 – Mai. 2010 am Institut für Thermo- und Fluidodynamik an der Technischen Universität Ilmenau.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Dr. Christian Karcher, der die Forschungsaktivitäten im Bereich der Thermoelementeoptimierung initiierte. Dadurch konnte ich ebenfalls an der Untersuchung teilnehmen.

Herzlich Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Vitaly Minchenya, meinem Betreuer an der Technischen Universität Ilmenau für das mir gegebene Diplomarbeitsthema und seine umfangreiche Unterstützung während meiner gesamten Untersuchung und die fachlichen Hinweise zur Arbeit. Er hatte mir geduldig die wesentlichen Kenntnisse erläutert. Für die Fragen und Probleme stand er mir auch immer zur Verfügung. Ich hatte bei ihm nicht nur die theoretischen Kenntnisse der Wärmeübertragung vertieft, sondern auch die logische und praktische Erfahrung erlernt.

Ich bedanke mich bei Ihm für seine grenzenlose Hilfsbereitschaft und Geduld bei der Anwendung des Rechenprogramms FLUENT, damit meine Simulationsuntersuchung erfolgreich geschaffen werden konnte.

Schließlich danke ich meinen Eltern für ihre ständige unbegrenzte Unterstützung und Ermutigung zu meinem Studium.

Abstract

A thermocouple is a junction between two different metals that produces a voltage related to a temperature difference. Thermocouples are widely used temperature sensors with many applications like the systems of measuring and controlling. There applications span from chemical devices, machines, liquids to gases and solids etc.

For dynamically changing medium, the response time of a thermo sensor has to be optimized.

Thermo sensors will be analyzed with various defined geometries analytically as well as numerically in a turbulent air flow channel model. The target is to devise an arrangement for the best dynamic behavior of the thermocouple with respect to the given conditions. The numerical results will be compared in synonymous with the results of the analytical preliminary investigations. These analyzed methods will be employed for unsteady heat transfer using Finite elements software FLUENT V6.3 with self-developed models to simulate the response time of the thermocouples.

Kurzfassung

Ein Thermoelement wird durch Schweißverbindung zweier verschiedenen Metallen formiert. Solche Verbindungen ermöglichen es, eine Messspannung in Bezug auf eine Temperaturdifferenz zwischen verschiedenen Schweißstellen zu erzeugen. Thermoelemente sind eine weit verbreitete Art der Temperatursensoren, die in Mess- und Steuerungssysteme Anwendung finden. Sie werden beispielsweise in Maschinen sowie chemischen Anlagen, in Flüssigkeiten, Gasen und Festkörper eingesetzt.

Für dynamisch veränderte Medien die Ansprechzeit eines Thermoelementes muss definiert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden Thermosensoren mit verschiedenen definierten Geometrien in einer turbulenten Luftströmung analytisch und numerisch untersucht. Das Ziel ist es, eine Anordnung zu finden, die durch das beste dynamischen Verhalten des Thermoelementes charakterisiert wird. Die numerische Ergebnisse werden mit Resultaten analytischer Voruntersuchungen verglichen. Dabei werden modifizierte analytische Methoden für instationäre Wärmeübertragung sowie das Finitelementensoftware FLUENT V6.3 mit eigenentwickelten Modellen zum Simulieren der Ansprechverhalten der Thermoelementen benutzt.

Textformatierung

Fettschrift	Titel der Diplomarbeit / Vektoren
<i>Schrägschrift</i>	Titel der Literaturen
KAPITAL	Name der Software; Abkürzungen
, ‘	Optionen in der Software

Abkürzungsliste

CFD	Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungsmechanik)
FVM	Finite Volume Method
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stockes
RNG	Renormalization Group
SST	Shear Stress Transport

Symbolverzeichnis

a) Buchstabensymbole

A	m^2	Wärmeaustauschfläche
c°		Grad Celsius
c_p	J/kg. k	Wärme kapazität der Luft
c_{pm}	J/kg. k	Wärme kapazität des Körpers
d	m	Dicke des Mantels = $(D_A - D_i)/2$
D_A	m	äußerer Durchmesser des Mantels
D_i	m	innerer Durchmesser des Mantels
l	m	Seitenlänge des Kegel
α	<i>degree</i>	Winkel des Kegel
e		elektronische Charge
E		Energy von einem Elektron
E_F	<i>me Volt</i>	Fermi energy
E_{F0}	<i>me Volt</i>	Fermi energy at 0 K
$g(E)$		Dichte von Zustand
h	$w/(m^2 \cdot k)$	Wärmeübertragung Koeffizient
T	c°	Temperatur
ΔT	c°	Temperaturdifferenz
T_∞	c°	Strömungstemperatur
$T_{(t=t_A)}$	c°	Körpertemperatur bei Ansprechzeit
$T_{(t=t_0)}$	c°	Körpertemperatur
T_f	c°	Filmtemperatur
t_A	s	Ansprechzeit
t_c	s	Kalorimetrische Zeitkonstant
t	s	Zeit

L	m	charakteristische Länge
L_c	m	charakteristische Länge des Körpers für Biot Zahl
E_{av}		Energydurchschnitt eines Elektrons
p	N/m^2	Druck
s	$\mu V \cdot K^{-1}$	Seebeck Koeffizient (Thermokraft)
Δt	s	Zeitschritte zur Simulation des FLUENT Programm
u	m / s	Geschwindigkeit
V	$Volt$	Spannung
ΔV	$Volt$	Spannungsdifferenz
V	m^3	Wärmeaustaschvolume
$U_{seebeckm}$	$Volt$	Spannung der Seebeck Effekt
x,y,z	m	kartesische Koordinate
λ_m	$w/(m \cdot k)$	Wärmeleitfähigkeit eines Metalls
λ_f	$w/(m \cdot k)$	Wärmeleitfähigkeit der Luft
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ρ_m	kg/m^3	Dichte des Metalls
ρ_f	kg/m^3	Dichte der Luft
σ	$1/(\Omega \cdot m)$	elektrische Leitfähigkeit
η	$kg/m \cdot s$	Kinematische Viskositait
δ		Kleine Änderung
δ_s	mm	Seitenschichtdicke

b) Dimensionslose Kenngrößen

Nu	Nusselt-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
Re_{krit}	kritische Reynolds-Zahl
B_i	Biot Zahl
Pr	Prandtl Zahl

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Abstract und Kurzfassung.....	II
Textformatierung und Abkürzungsliste	III
Symbolverzeichnis	IV
Inhaltsverzeichnis.....	VI
1. Einführung	1
1.1. Thermomessfühler und Temperaturmessung mit thermoelektrischen Effektenundlagen.....	1
1.1.1. Thermoelektrizität	1
1.1.1.1. Seebeck-Effekt.....	1
1.1.1.2. Peltier-Effek.....	6
1.1.1.3. Thomson-Effekt.....	6
1.1.2. Thermomessfühler	7
1.1.3. Typen von Thermopaar	8
1.2. Ziel der Arbeit.....	11
2. Analytische Berechnung.....	13
2.1. Grundlagen der Lumped Wärmekapazität Methode (LCM).....	13
2.2. Dimensionslose Gleichungen	14
2.2.1. Reynolds-Zahl.....	14
2.2.2. Nusselt-zahl.....	15
2.3. Durchführung der analytische Berechnung	16
2.3.1. Ermittlung der Lufteigenschaften	17
2.3.2. Aspektverhältnisse der Konstruktionen des Thermomessfühlers	17
2.3.2.1. Zylindrische Form	17
2.3.2.2. Halbkugelartige Form.....	18
2.3.2.3. Kegelartige Form.....	19
2.3.3. Ermittlung der Nusselt Zahlen für die Geometrien des Mantels	20
2.3.4. Berechnungsbeispiele der Ansprechzeit anhand (LCM) Methode	21
2.3.4.1. Zylindrische Form des Mantels	21
2.3.4.2. Halbkugelartige Form des Mantels	22
2.3.4.3. Kegelartige Form des Mantels.....	23

2.3.4.4.	Einfluss der Dicke des Mantels auf der Ansprechzeit.....	24
2.4.	Analytische Ergebnisse der für Mantel verwendeten Metallen.....	26
2.4.1.	Edelstahl als Mantel-Metall.....	26
2.4.2.	Kopfer als Mantel-Metall.....	30
2.4.3.	Vergleich Edelstahl mit Kupfer als Mantel-Metall.....	35
2.4.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	36
3	Numerische Simulation der unterschiedlichen Konstruktionen des Thermomessfühlers mit ANSYS/FLUENT.....	38
3.1	Einführung des FLUENT-Programms.....	38
3.2	Ziel der numerischen Simulation.....	39
3.2.1	Berechnung von Ansprechzeit t_A	39
3.2.2	Ermittlung von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient h	39
3.3	3D Modellerstellung eines Thermomessfühlers-und Windkanalmodells.....	40
3.4	Vergitterung der Fluid-und Solidgeometrie mit Gambit.....	41
3.5	Turbulenzmodell.....	43
3.5.1	RANS-Modelle.....	43
3.5.1.1	Standard k - ϵ Modell.....	45
3.5.1.2	Modelle von Standard k - ϵ Modell.....	45
3.5.1.1	Nahe -Wand Behandlung.....	45
3.5.2	Large Eddy Simulation.....	45
3.5.3	Rechenaufwand: CPU-Zeit und Lösungsverhalten ANS-Modelle....	46
3.6	Implementierung der Randbedingungen.....	47
3.7	Durchführung des Processings.....	48
3.8	Analyse und Vergleich der simulierten Resultaten.....	50
3.8.1	Ergebnisse und Vergleich der Ansprechzeit.....	50
3.8.2	Ergebnisse und Vergleich der Nusselt Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient.....	58
3.8.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	60
4.	Vergleich der analytischen- mit der numerischen Ergebnissen.....	61
4.1.	Ansprechzeit.....	61
4.2.	Wärmeübertragungskoeffizient.....	63
4.3.	Nu Zahl.....	66
4.4.	Zusammenfassung.....	69
4.5.	Sonstige Einflussfaktoren.....	70

5. Schlussfolgerungen	71
5.1. Zusammenfassung der Arbeit	71
5.1.1. Folgerungen der analytischen Berechnung	71
5.1.2. Folgerungen der numerische Simulation mit K-ε Modell	72
5.1.3. Folgerungen des Vergleichs der analytischen Berechnung mit der numerischen Simulation	72
5.2. Ausblick	73
Abbildungsverzeichnis	74
diagrammenverzeichnis	75
tabellenverzeichnis	77
Literaturverzeichnis	79
Anhang A: Bedienungsanleitung zur K-ε-Modell	80
A1 Auswahl (2D oder 3D)	80
A2 Überprüfung der Gitter-Dateien	81
A3 Längen- und Temperatureinheit	81
A4 Festlegung der Zonentypen	82
A5 Definition des Modells, Materials und der Randbedingungen	82
A6 Initializing des gesamten Strömungsfelds	88
A7 Patching Werte in den ausgewählten Zellen	88
A8 Referenzwerte	89
A9 Plot der Ergebnisse von Nu, h	89
A10 Iteration und Solution	90
Anhang B: Bildver der numerischen Simulation (Edelstahl-Mantel) u=10m/s	92
B1 zylindrische Form des Mantels des Thermoelements	92
B2 halbkugelartige Form des Mantels des Thermoelements	102
B3 kegelartige Form des Mantels des Thermoelements	112
Erklärung	122
Thesen zur Diplomarbeit	124

1 Einführung

1.1 Thermomessfühler und Temperaturmessung mit thermoelektrischen Effekten

Weil unsere Entwicklung (Thermomessfühler) sich auf die Wechselwirkung zwischen Temperatur und Elektrizität nämlich Seebecksche Effekt basiert, werden die Grundlagen der entsprechenden thermoelektrischen Erscheinung ausführlich betrachtet.

1.1.1 Thermoelektrizität

Unter Thermoelektrizität versteht man die gegenseitige (wechselwirkende) Beeinflussung von Temperatur und elektrische Spannung und ihre Umsetzung in einander. Seebeck-Effekt (auch thermoelektrischer Effekt), Peltier-Effekt und Thomson-Effekt beschreiben jeweils eine umkehrbare Wechselwirkung zwischen den beiden physikalischen Größen.

1.1.1.1 Seebeck-Effekt

Seebecksche Effekt wurde 1821 von Thomas Seebeck (Abbildung 1.1) entdeckt. Die Auslenkung einer Kompassnadel wurde, wenn sie sich in der Nähe zweier verbundener metallischer Leiter befand, deren Verbindungsstellen verschiedene Temperaturen hatten beobachtet (Abbildung 1.2). Es war folgende Schlussfolgerung formuliert: durch Temperaturgradient entsteht ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld erzeugt.



Abbildung : 1.1 Thomas Johann Seebeck (1770-1831)

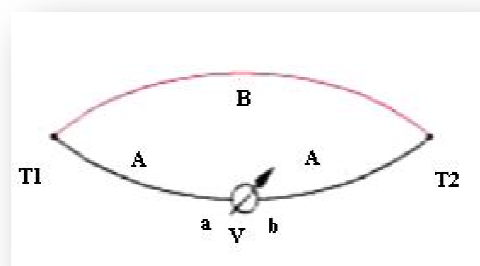


Abbildung: 1.2 Auslenkung einer Kompassnadel Abbildung: 1.3 Entstehung einer elektrische Spannung

Beim Seebeck-Effekt entsteht zwischen zwei Punkten eines elektrischen Leiters, die unterschiedliche Temperaturen aufweisen, eine elektrische Spannung (Abbildung 1.3). Dieser Effekt wird bei Thermoelementen und thermoelektrischen Generatoren genutzt.

Die durch den Seebeck-Effekt erzeugte Spannung wird auch zur Stromerzeugung genutzt. So zum Beispiel in der Raumfahrt. Ein sogenannter Thermogenerator wird in Kontakt mit einer radioaktiven Quelle gebracht, welche durch den Zerfall Wärmeenergie liefert. Auf der anderen Seite ist das Weltall mit einer Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt. Dieser Generator wird hauptsächlich in Satelliten eingesetzt, welche sich weit von der Sonne entfernen und so der Einsatz von Solarzellen schwierig macht.

Dieser Generator wird hauptsächlich in Satelliten eingesetzt (Abbildung 1.4), welche sich weit von der Sonne entfernen und so der Einsatz von Solarzellen schwierig macht.

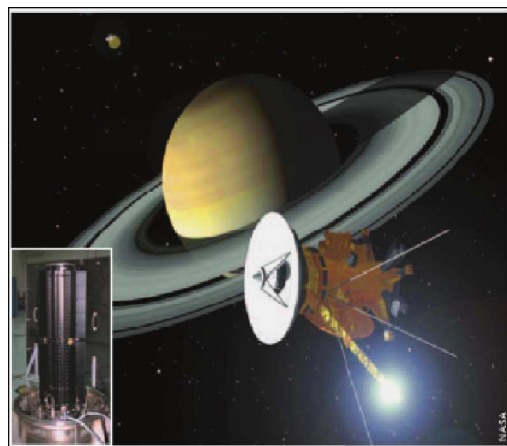


Abbildung: 1.4 Ausnutzung von Seebeck-Effekt in Satelliten

Die Spannung entsteht durch Thermodiffusionsströme:

Ein elektrischer Leiter besteht aus freien Elektronen und positiv geladenen Atomrümpfen. Eine bestimmte Temperatur bedeutet, dass sich die im Material gespeicherte thermische Energie auf die Bewegungsenergie der Elektronen (elektronische Wärmekapazität, elektronische Wärmeleitung) und die Schwingungsenergie der Atomrümpfe (phononische Wärmekapazität, phononische Wärmeleitung) aufteilt. Das Verhältnis ist hierbei eine für das jeweilige Material typische Konstante.

Folglich besitzen die Elektronen am heißen Ende eine höhere Bewegungsenergie als die Elektronen am kalten Ende des Leiters. Die größere Bewegungsenergie bewirkt nun, dass sich die „heißen“ Elektronen im Leiter stärker verteilen als die „kalten“, was zu einem Ungleichgewicht führt, da die Elektronendichte am kalten Ende zunimmt.

Dies geschieht genau so lange, bis die durch dieses Ungleichgewicht aufgebaute elektrische Spannung dafür sorgt, dass ein gleich großer Strom „kalter“ Elektronen auf die heiße Seite fließt.

Die entstehende Spannung ist bestimmt durch:

$$U_{\text{Seebeck}} = s \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

- ΔT Temperaturdifferenz zwischen den Leiterenden
- s Seebeck-Koeffizient oder so genannte (Thermokraft)

Der Seebeck-Koeffizient hat die Dimension einer elektrischen Spannung pro Temperaturdifferenz (V/K).

Die Temperaturabhängigkeit dieser Konstante ist relativ gering.

Technisch lässt sich dieser Effekt so zunächst nicht anwenden, da die Angriffspunkte für die Spannung i.A. auf gleicher Temperatur sind und somit zwei Temperaturgradienten existieren, die sich in Ihrer Wirkung gegenseitig aufheben.

Zur technischen Anwendung sind zwei verschiedene elektrische Leiter nötig, die sich in ihrer elektronischen Wärmekapazität bzw. ihrem Seebeck-Koeffizienten unterscheiden, d.h. bei gleicher Temperatur haben die Elektronen in beiden Leitern unterschiedliche Bewegungsenergien.

Differenz ΔV durch ein Stück Metall entsprechend zur Temperaturdifferenz ΔT heißt Seebeck Effekt, um das Ausmaß dieses Effekts zu messen, stellen wir einen speziellen Koeffizient vor, die als eine potentielle Differenz pro Temperaturdifferenz entwickelt definiert ist, d.h.

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (1.2)$$

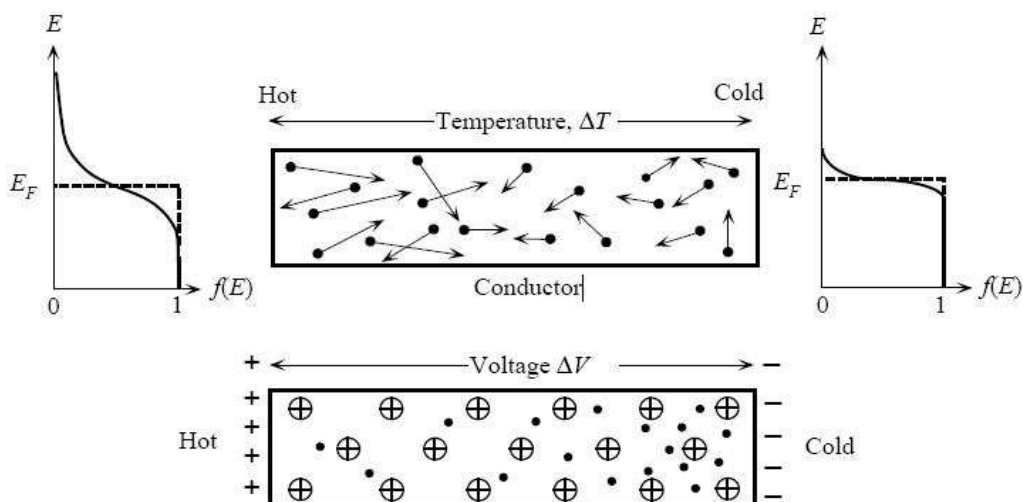


Abbildung: 1.5 Temperatur gradient entlang einer Leitung führt zu Anstieg von potentielle Differenz

Der Koeffizient S bezeichnet sich auf thermoelektrische Energie also der bezeichnet sich auf Spannungsdifferenz.

S ist die Materialeigenschaft, die von der Temperatur abhängig $S=S(T)$.
gegeben Seebeck Koeffizient $S(T)$ für ein Material.

die Spannungsdifferenz zwischen zwei punkten wo die Temperatur T_0 und T Sind, von Gleichung (1.2) ist:

$$\Delta V = \int_{T_0}^T S \cdot dT \quad (2.3)$$

Die Energiedurchschnitt E_{av} per Elektron in einem Metall, in dem die Dichte von Zustände $g(E) \propto E^{\frac{1}{2}}$ ist:

$$E_{av}(T) = \frac{3}{5} E_{F0} \left[1 + \frac{5 \cdot \pi^2}{12} \left(\frac{KT}{E_{F0}} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Wobei E_{F0} ist die Fermi-Energie bei 0 Kalven, Es ist aus der Gleichung (2.4) klar, dass die Fermi- Dirac Distribution erstreckt sich tatsächlich sehr viel höhere Energien, wenn die Temperatur erhöht, wie in (Abbildung 1.5) dargestellt wird.

Der Energiedurchschnitt pro Elektron ist eigentlich mehr in das heiße Ende, folglich die mehr energiereicher Elektronen in das heiße Ende, verbreiten sich in Richtung der kalten Region, bis eine Potentialdifferenz ΔV aufgebaut wird, die die weitere Verbreitung verhindert.

Stellen Sie sich vor eine kleine Länge δX , die Temperaturdifferenz ist δT und die Spannungsdifferenz ist δV . Nehmen Sie an, dass ein Elektron diffundiert von heiß auf kalt Region über dieses Potenzialdifferenz.

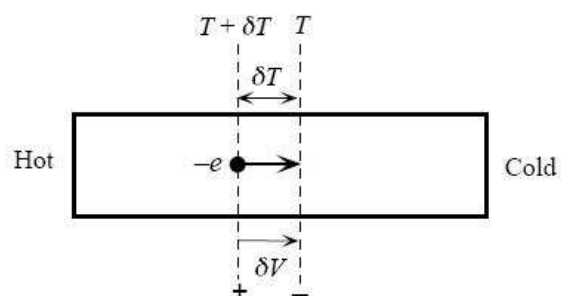


Abbildung: 1.6 Kleine Temperaturdifferenz von T

Nehmen Sie an, dass eine kleine Temperaturdifferenz von T ergibt sich eine Spannung zwischen der kumulierten Elektronen und positiver Ionen. (Abbildung 1.6)

Es muss eine Arbeit $-\delta V$ gegen die potentielle Differenz δV schaffen.

Diese Arbeit gegen δV getan sinkt die durchschnittliche Energie der Elektronen bei δE_{av} von E_{av} (heiß) bis E_{av} (kalt):

$$-e \cdot \delta V = E_{av}(T + \delta T) - E_{av}(T) \quad (2.5)$$

Ersetzen $E_{av}(T)$ aus Gleichung (2.4) wir bekommen:

$$-e \cdot \delta V = \frac{\pi^2 \cdot k^2 \cdot T \cdot \delta T}{2 \cdot E_{F0}} \quad (2.6)$$

Aus der Gleichung (1.2), ergibt sich:

$$\text{Seebeck Koeffizient Metall} \quad S = \frac{\pi^2 \cdot k^2 \cdot T}{2 \cdot e \cdot E_{F0}} \quad (2.7)$$

Metall	S bei 0 c° ($\mu V \cdot K^{-1}$)	S bei 27 c° ($\mu V \cdot K^{-1}$)	E_F (meV)
Na	-	-5	3.1
K	-	-12.5	2
Al	-1.6	-1.8	11.6
Mg	-1.3	-	7.1
Pb	-1.15	-1.3	-
Pd	-9.00	-9.99	-
Pt	-4.45	-5.28	-
Mo	+4.71	+5.57	-
Li	+14	-	4.7
Cu	+1.7	+1.84	7.0
Ag	+1.38	+1.51	5.5
Au	+1.79	+1.94	5.5
Zn	-	-	9.4

Tabelle 1.1: die typische experimentelle Werte von Seebeck Koeffizient für unterschiedliche Metalle

1.1.1.2 Peltier-Effekt

Beim Peltier-Effekt liegen gegenüber dem Seebeck-Effekt umgekehrte Verhältnisse vor – ein äußerer Stromfluss bewirkt eine Änderung des Wärmetransportes. Die Entdeckung machte Jean Peltier 1834 daher erst dreizehn Jahre nach der Entdeckung des Seebeck-Effektes.

Der Peltier-Effekt tritt auf, wenn zwei Leiter mit unterschiedlichen elektronischen Wärmekapazitäten in Kontakt gebracht werden und durch einen von außen angelegten elektrischen Strom Elektronen aus dem einen Leiter in den anderen fließen.

1.1.1.3 Thomson-Effekt

Der Thomson-Effekt, benannt nach William Thomson, 1. Baron Kelvin 1856, beschreibt den geänderten Wärmetransport entlang eines stromdurchflossenen Leiters, in welchem ein Temperaturgradient vorliegt.

Jeder stromdurchflossene Leiter mit einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Punkten wird, abhängig vom Metall, entweder mehr oder weniger Wärme transportieren, als dies ohne Stromfluss aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der Fall wäre. Dieser Effekt überlagert sich jedoch mit der Erwärmung des elektrischen Leiters durch den Strom auf Grund seines Widerstandes und ist daher schlecht nachweisbar.

1.1.2 Thermomessfühler

Thermomessfühler dienen dem Zweck, die in gegebenen Messzonen auftretenden Temperaturen durch eine Thermoelektrische Umwandlung aufzunehmen.

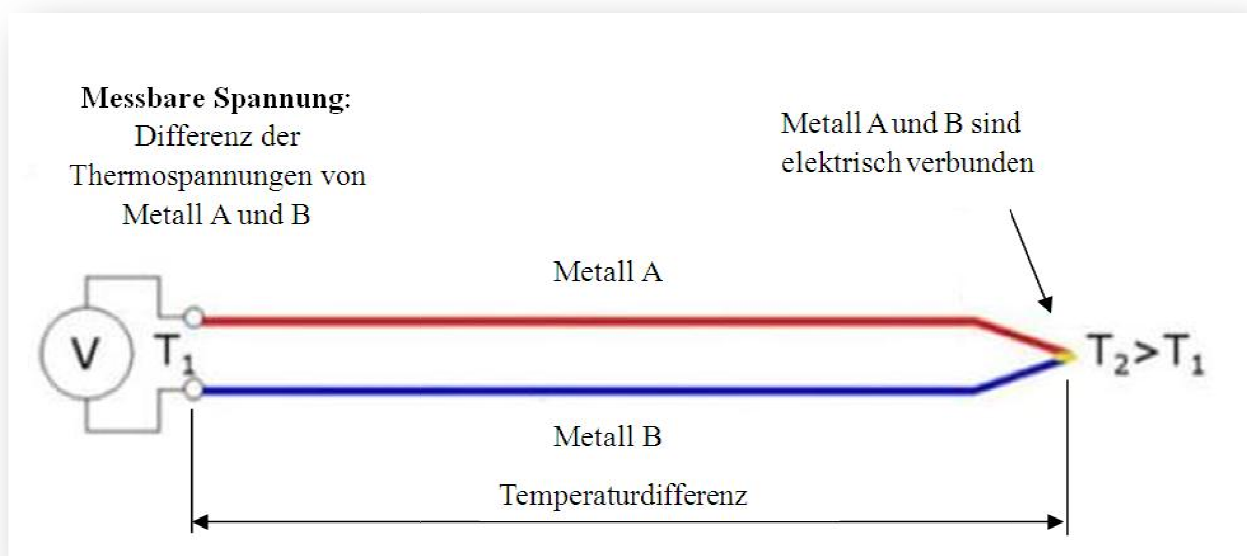


Abbildung 1.7: Thermoelement (schematische Darstellung)

Ein Thermoelement besteht aus

- dem Thermopaar (Messfühler) und
- den jeweils erforderlichen Einbau- und Anschlussteilen (z. B. Schutzrohr).

Ein Thermopaar setzt sich aus zwei Drähten unterschiedlicher Metalle oder Metalllegierungen zusammen, die an einem Ende, der Messstelle, miteinander punktförmig verlötet oder verschweißt sind.

Thermoelemente sind in der Regel mechanisch stabiler als Widerstandsthermometer und haben eine kürzere Ansprechzeit.

An den freien Enden der beiden miteinander verbundenen Leiter wird bei einer Temperaturdifferenz entlang der Leiter aufgrund des Seebeck-Effekts eine elektrische Spannung erzeugt.

Die Verbindungsstelle und die freien Enden müssen somit hierzu unterschiedliche Temperaturen aufweisen. (Abbildung 1.7)

Als Seebeck-Effekt wird das Auftreten einer Spannung zwischen zwei Stellen unterschiedlicher Temperatur eines Leiters bezeichnet. Die Potentialdifferenz ist annähernd proportional zur Temperaturdifferenz und abhängig vom Leitermaterial. Temperaturdifferenzen innerhalb eines Leiters heben sich stets auf, da die Enden zum Messen auf gleicher Temperatur liegen müssen (sonst misst man zusätzlich die in der Messeitung entstehende Thermospannung).

Wenn man zwei unterschiedliche Leitermaterialien verbindet, hat man ein Thermoelement. An den Enden kann allerdings noch keine Spannung gemessen werden. Es muss noch ein Draht mit einem anderen k -Wert in Reihe geschaltet werden. In kompakten Messsystemen ist meist einfach ein zweites Thermoelement in Reihe geschaltet.

Dies stellt die Vergleichsstellenmessung dar. Diese Vergleichsstellenmessung befindet sich normalerweise im Messgerät.

An den äußeren Anschlüssen kann jetzt eine Spannung gemessen werden.

Das Verhältnis zwischen Ausgangsspannung und zu messender Temperatur ist nichtlinear.

Bei metallischen Leitern treten Spannungen im Bereich einiger Mikrovolt bis Millivolt auf. Diese Spannung ist allerdings eine Spannungsdifferenz zwischen dem Thermoelement, welches die eigentliche Temperatur messen soll, und dem Thermoelement der Vergleichsstellenmessung.

Bei der Auswahl einer Materialpaarung zu Messzwecken strebt man eine hohe Thermospannung, hohe Linearität und hohe Korrosionsfestigkeit beziehungsweise geringe Oxidation bei hohen Temperaturen an.

Diese Ziele sind nicht mit einer einzigen Kombination erreichbar. Daher werden je nach Einsatzzweck unterschiedliche Materialpaarungen verwendet.

1.1.3 Typen von Thermopaar

Bestimmte Kombinationen von Legierungen haben sich als Industriestandard beliebt. Auswahl der Kombination ist abhängig von Kosten, Verfügbarkeit, Convenience vertrieben, Schmelzpunkt, chemische Eigenschaften, Stabilität und Leistung.

Verschiedene Arten sind für die unterschiedlichen Anwendungen geeignet. Sie sind in der Regel auf der Grundlage der Temperaturbereich und Sensitivität ausgewählt.

Thermoelemente mit niedrigen Empfindlichkeiten (B, R und S-Typen) haben entsprechend niedrigeren Auflösungen. Weitere Auswahlkriterien sind die Trägheit des Thermoelement-Material und ob es sich um magnetische oder nicht. Standard-Thermoelement-Typen sind unten mit der positiven Elektrode ersten, durch die negative Elektrode gefolgt aufgeführt.

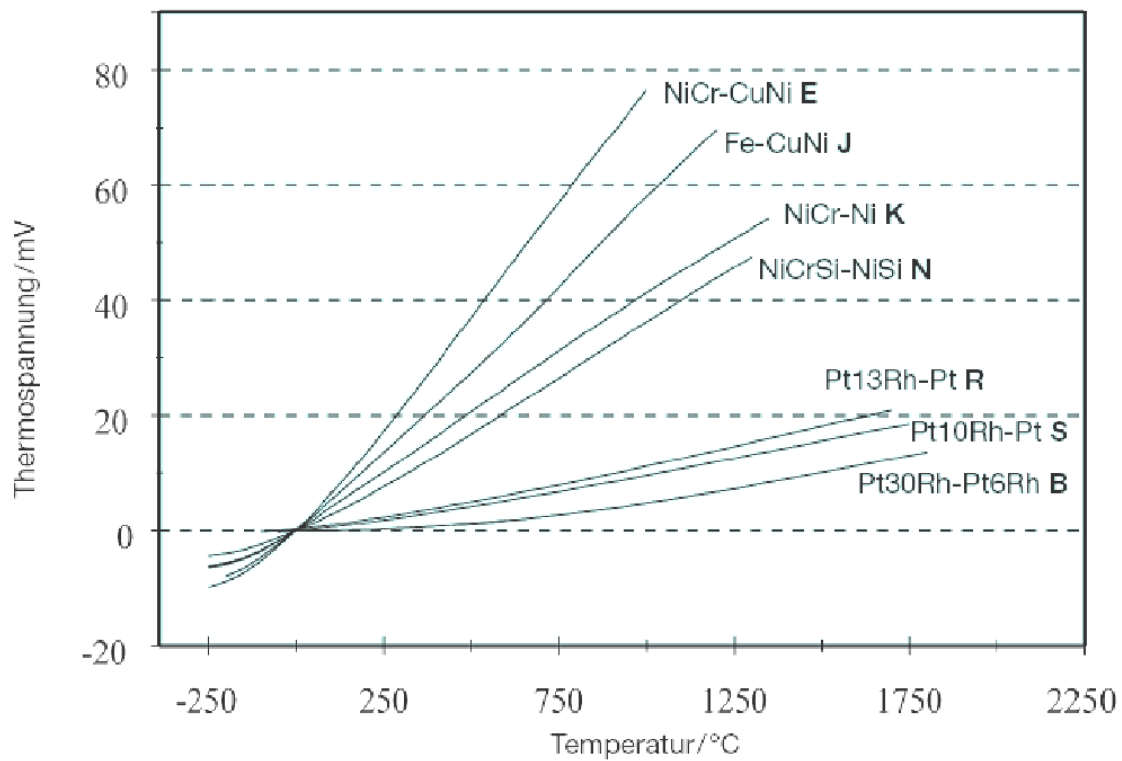
Die folgende Tabelle (Tabelle 1.2) zeigt verschiedenen Typen von Thermopaaren und ihre Eigenschaften.

Type	Temperaturbereich C° (kontinuierlich)	Temperaturbereich C° (kurz Term)	Toleranz	Anmerkungen	
K (NiCr-Ni)	0 bis +1100	-180 bis +1300	± 1.5 zwischen -40 c° und 375 c° $\pm 0.004 \times T$ zwischen 375 c° und 1000 c°	Sensibilität $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, Nicht teuer	41
J (FeCuNi)	0 bis +700	-180 bis +800	± 1.5 zwischen -40 c° und 375 c° $\pm 0.004 \times T$ zwischen 375 c° und 750 c°	Sensibilität $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,	55
N (NiCrSi-NiSi)	0 bis +1100	-270 bis +1300	± 1.5 zwischen -40 c° und 375 c° $\pm 0.004 \times T$ zwischen 375 c° und 1000 c°	Sensibilität $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, passt zu HochTemperatur	39 zu
R (Pt13Rh-Pt)	0 bis +1600	-50 bis +1700	± 1.0 zwischen 0 c° und 1100 c° $\pm (1+0.003 \times (T-1100))$ zwischen 1100 c° und 1600 c°	-	
S (Pt10Rh-Pt)	0 bis +1600	-50 bis +1750	± 1.0 zwischen 0 c° und 1100 c° $\pm (1+0.003 \times (T-1100))$ zwischen 1100 c° und 1600 c°	-	
B (Pt30Rh-Pt6Rh)	+200 bis +1700	0 bis +1820	Nicht verfügbar	-	
T (Cu-CuNi)	-185 bis +300	-250 bis +400	± 0.5 zwischen -40 c° und 125 c° $\pm 0.004 \times T$ zwischen 125 c° und 350 c°	Sensibilität $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, Non Magnetisch	39
E (NiCr-CuNi)	0 bis +800	-40 bis +900	± 1.5 zwischen -40 c° und 375 c° $\pm 0.004 \times T$ zwischen 375 c° und 800 c°	Passt zu cryogenic, Non Magnetisch	
Chromel/ Au-Fe	-272 bis +300	n/a	Reproduktionsfähigkeit 0.2% von Spannung, jeder Sensor braucht individuelle kalibrierung	Sensibilität $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, passt zu niedriger Temperatur	39

Tabelle 1.2: verschiedene Typen von Thermopaaren und ihre Eigenschaften

Ebenfalls zeigt das Diagramm (Diagramm1.1) schnelle Ansicht von verschiedenen Typen der Thermopaaren und die Relation zwischen Temperaturen und Thermospannung.

Die Type E hat die höchste Thermospannung im Temperaturbereich (0 bis +800 c°) im Vergleich zu anderen Typen, und damit besitzt die die schnellste Ansprechzeit[2].



eraturen

1.2 Ziel der Arbeit

Wir wollen in dieser Arbeit eine neue Untersuchung um die Verbesserung der Ansprechzeit von Thermomessfühler durchführen.

Normalerweise werden die beide Elemente von Thermopaar innerhalb des Thermomessfühlers eingesetzt und mit einem Metall bedeckt und geschützt.

Die neue Idee ist, das erste Metall von Thermopaar wird als Mantel für den Thermomessfühler verwendet, und das zweite Metall wird innerhalb des Mantels und mit dem verschweißt.

Hiermit sind die Vorteile dieser Idee:

die Wärme von der Umgebung, die wir ihre Temperatur messen wollen, beeinflusst direkt auf die Thermopaar, und damit es ganz wenige Wärmeverluste gegeben werden sollten, und zwar die Ansprechzeit von Thermomessfühler sollte klar schneller. Sowie die Konstruktion, Montage, sind auf jeden Fall einfacher.

Die Nachteile dieser Idee ist, dass die Lebensdauer des Thermomessfühlers wegen Rost- und Korrosionsgefahr kürzer ist.

Die verwendete Metalle und Dimensionen von Thermomessfühler wie Dicke, Durchmesser, Länge.etc haben große Beeinflussung auf die Ansprechzeit.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Untersuchungen behandelt:

1. Analytische Berechnung:

um die bessere Ansprechzeit des Thermomessfühlers zu erreichen, schaffen wir eine analytische Berechnung mit Hilfe von Gleichungen der Wärmeübertragung, Dimensionslose Gleichungen, und Lumped Wärmekapazität Methode (LCM), für drei unterschiedliche Konstruktionen von Thermoelement.

Mit jeder Konstruktion verwenden wir unterschiedliche Typen von Thermopaaren, und vergleichen wir die Ergebnisse von Ansprechzeit, damit wir die bessere Kombination von Metall und Konstruktion für den Thermomessfühler herausfinden. Diese drei Konstruktionen des Mantels von Thermoelement, die untersucht wird, sind zylindrische- Halbkugelartige- und Kegelartige Form.

2. Numerische Simulation:

zur Realisierung der Simulation wird ein kommerzielles Rechenprogramm FLUENT, das auf der Theorie der Finite-Volumen-Methode (FVM) und der Computational Fluid Dynamics (CFD) basiert, eingesetzt.

Numerische Simulation eines Thermomessfühlersmodells in einem Windkanalmodell unter dem Einfluss von Luftströmung ist durchzuführen, drei unterschiedliche

Konstruktionen des Mantels von Thermoelement und Windkanal sind zum ersten mit CAD zu erstellen. Dann können für das Pre- und Post-Processing durch einen Gittergenerator „Gambit“ die Gitter-Dateien in den Strömungslöser „FLUENT“ importiert werden. Mittels dieser Werkzeuge soll die Ansprechzeit des Thermomessfühlers berechnet werden. Für die Simulationen soll das Turbulenzmodell des K- ϵ -Modell benutzt werden. Die numerisch gewonnenen Ergebnisse sind mit den analytischen Ergebnissen zu vergleichen. Die beste Kombination von Metall und Konstruktion soll natürlich die schnellste Ansprechzeit besitzt.

2 Analytische Berechnung

2.1 Grundlagen der Lumped Wärmekapazität Methode (LCM)

Hochleistungs-Thermoelemente müssen reagiert so schnell wie möglich zur Änderung von Temperatur um wirksame Engineering-Prozesse zu steuern, und auch um ihre Effizienz zu erhöhen.

Lumped Wärmekapazität Methode (LCM) wird verwendet, wenn die Wärmeleitung innerhalb eines Objekts wesentlich schneller als die Wärmeleitung über die Grenze des Objekts ist sein mag, und Temperaturgradienten im Inneren des Objekts ist unerheblich.

In dieser Methode wird angenommen, dass die Temperatur innerhalb des Objekts völlig einheitlich ist, obwohl ihr Wert Veränderung in der Zeit kann.

Die (LCM) ist nur dann sinnvoll, wenn die Biot-Zahl (2.1) weniger als 0.1 ist. [1][3][6].

Biot-Zahl gibt einen einfachen Index des Verhältnisses der Wärmeübertragungs widerständen innerhalb- und an der Oberfläche eines Körpers. [1][4].

$$B_i = \frac{h \cdot L_c}{\lambda_m} \quad (2.1)$$

- h Wärmeübertragung Koeffizient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
- L_c Charakteristische Länge des Thermomessfühlers (m)

$$L_c = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

- V, A sind die Wärmeaustausch- Volume und fläche von Messfühler.
- λ_m Wärmeleitfähigkeit eines Metalls ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

Für niedrige Zahlen Biot (<0.1) der Widerstand gegen die Wärmeleitung in die solide ist viel geringer als der Widerstand gegen die Konvektion durch die Flüssigkeit. Daher ist die Lumped Wärmekapazität Methode (LCM) einsetzbar.

Die Temperatur von einem Körper $T(t)$ ist geregelt durch das exponentielle Verhalten

$$\frac{T(t=t_A) - T_\infty}{T(t=t_0) - T_\infty} = e^{-\frac{t_A}{t_c}} \quad (2.3)$$

- T_∞ Strömungstemperatur
- $T(t=t_A)$ Körpertemperatur bei Ansprechzeit
- $T(t=t_0)$ Körpertemperatur
- t_A Ansprechzeit
- t_c Kalorimetrische Zeitkonstant

$$t_c = \frac{\rho_m \cdot c_{pm} \cdot L_c}{h} \quad (2.4)$$

- ρ_m Dichte des Materials des Körpers (kg/m³)
- c_{pm} Wärmekapazität des Körpers (J/kg.k)
- L_c Charakteristische Länge (m)
- h Wärmeübertragung Koeffizient (w/ m².k)

Im Fall von Erhitzung des Körpers [1][4]

$$T_\infty > T_{(t=t_0)} \rightarrow T_{(t=t_A)} = 0.632 \cdot T_\infty$$

Im Fall von Abkühlung des Körpers

$$T_\infty < T_{(t=t_0)} \rightarrow T_{(t=t_A)} = T_{(t=t_0)} - [0.632 \cdot (T_{(t=t_0)} - T_\infty)]$$

2.2 Dimensionslose Gleichungen

2.2.1 Reynolds-Zahl

ist ein Maß für das Verhältnis zwischen den Trägheitskräften und viskoser Kraft. Sie beschreibt zwei Strömungsformen, laminare und turbulente Strömung.

Wenn $Re < Re_{krit}$, ist die Strömung laminar. In diesem Fall handelt es sich bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit meistens um eine stationäre Strömung. Wenn $Re > Re_{krit}$, ist die Strömung turbulent. Diese Strömungsform ist gekennzeichnet durch meist scheinbar zufällige und instationäre Bewegungen des Fluides.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\eta} = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (2.5)$$

$$\eta = \rho \cdot \nu \quad (2.6)$$

Die einzelnen Formelzeichen stehen für folgende Größen:

- ρ Charakteristische Dichte des Fluides (kg/m³)
- u Charakteristische Strömungsgeschwindigkeit des Fluides gegenüber dem Körper (m/ s)
- L Charakteristische Strömungsdurchmesser des Gegenstandes (m)

Bei Strömungskörpern ist die Bezugslänge die Länge des Körpers in Strömungsrichtung.

Bei Widerstandskörpern die Breite oder Höhe quer zur Strömungsrichtung.

- η Charakteristische dynamische Viskosität des Fluides ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)
- ν Charakteristische kinematische Viskosität des Fluides (m^2/s)

2.2.2 Nusselt-Zahl

Die Nusselt-Zahl (Formelzeichen: Nu , nach Wilhelm Nusselt) ist eine dimensionslose Kennzahl aus der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung, die die Verbesserung der Wärmeübertragung von einer Oberfläche misst, wenn man die tatsächlichen Verhältnisse mit denen vergleicht, wenn nur Wärmeleitung durch eine ruhende Schicht auftreten würde.

Normalerweise verwendet man die Nusselt-Zahl, um die Wärmeübertragung an strömende Fluide zu beschreiben. Die Nusselt-Zahl kann aber auch als dimensionsloser Gradient der Temperatur an einer Oberfläche aufgefasst werden.

Sie wird formal gleich der Biot-Zahl gebildet. Wärmeleitfähigkeit und charakteristische Länge beziehen sich hier nicht auf den festen Körper sondern auf das Fluid.

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda_f} \quad (2.7)$$

- h Wärmeübertragung Koeffizient ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
- L Charakteristische Länge des Thermomessfühlers (Bspw. die Länge einer überströmten Fläche in Strömungsrichtung oder der Durchmesser eines durchströmten Rohres.) (m)
- λ_f Wärmeleitfähigkeit des Fluids ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

Die Einheiten der Koeffizienten des rechten Terms müssen so eingesetzt werden, dass Nu einheitenlos wird (bspw. nur SI-Einheiten).

Die Ähnlichkeitstheorie besagt, dass die Wärmeübertragungen zweier geometrisch ähnlicher Aufbauten gleich sind, wenn ihre Nusselt-Zahlen gleich sind, unabhängig davon, welche wirkliche Ausdehnung die Aufbauten haben. Dies gilt sowohl für freie als auch erzwungene Konvektion.

Die Gleichung der Nusselt-Zahl wird zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten h bestimmter Fluide in bestimmten Geometrien verwendet.

2.3 Durchführung der analytische Berechnung

Um die höhere Ansprechzeit von Thermomessfühler zu erreichen, müssen wir die physikalische und thermische Eigenschaften von unterschiedlichen Metallen der Thermopaar beachten, die auf den Wärmeübertragungsprozess im Thermomessfühler beeinflussen.

Die physikalische und thermische Eigenschaften der Metalle beeinflussen auf die elektrische Differenz, und damit die berechnete Ansprechzeit.

Wir werden drei unterschiedliche Konstruktionen des Mantels von Thermoelement vergleichen, mit jeder Konstruktion verwenden wir ein verschiedenes Metall, dann vergleichen wir alle berechnete Ansprechzeiten und definieren welche Kombination, besitzt die schnellste Ansprechzeit.

Die gewählte Metalle erstellen die äußere Elektrode des Thermomessfühlers d.h. den Mantel von Thermomessfühler, wobei wir zwei Elektrode haben, eine innere Elektrode und eine äußere Elektrode.

Die unterschiedliche Metalle, die den Mantel von Thermomessfühler bildet, und die analytisch untersucht wird, sind mit ihren thermischen und physikalischen Eigenschaften in Tabelle 2.1 gezeigt [9].

Metall des Mantels	Verwendet in Type	Wärmeleitfähigkeit des Metalls λ_m W/m.k	Wärmekapazität des Metalls C_{pm} J/kg.k	Dichte des Metalls ρ_m kg/m ³	Volumetrische Wärmekapazität vhc J/k · m ³
Cu Ni	E, J, K	22	390	8900	3471000
Ni Cr	K	11.3	450	8400	3780000
Ni Si	N	23	500	8550	4275000
Chromel Ni Cr (90-10)	E	19.25	448	8730	3908421
Nickel	K	91	444	8908	3955152
Cu		398	385	8930	3438050
Edelstahl V2A (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.:1.4301		15	500	8000	4000000

Tabelle 2.1: thermische und physikalische Eigenschaften verschiedener Metall-Mänteln

2.3.1 Ermittlung von Lufteigenschaften

Für unsere analytische Berechnung nehmen wir an, dass die Umgebungstemperatur $T_\infty = 20 \text{ C}^\circ$, und die Temperatur von Mantel des Thermoelements $T_{(t=t_0)} = 30 \text{ C}^\circ$.

Luft strömt gegen das Mantel, um die Lufteigenschaften zu wissen, sollen wir die Filmtemperatur T_f berechnen, die die durchschnittliche wert von $T_{(t=t_0)}$ und T_∞ hat.

$$T_f = \frac{T_{(t=t_0)} + T_\infty}{2} = 25 \text{ C}^\circ \quad (2.8)$$

Unter der Temperatur 25 C° [7] sind, ν charakteristische kinematische Viskosität des Fluides, λ_f Wärmeleitfähigkeit des Fluides und Prandtl-Zahl in Tabelle 2.2 gezeigt.

kinematische Viskosität $\nu \text{ (m}^2/\text{s)}$	Wärmeleitfähigkeit des Fluides $\lambda_f \text{ (W/m.k)}$	Prandtl-Zahl Pr
$1.57 \cdot 10^{-5}$	$2.59 \cdot 10^{-2}$	0.715

Tabelle 2.2: Lufteigenschaften unter der Temperatur 25 C°

2.3.2 Aspektverhältnisse der Konstruktionen des Thermomessfühlers

2.3.2.1 Zylindrische Form

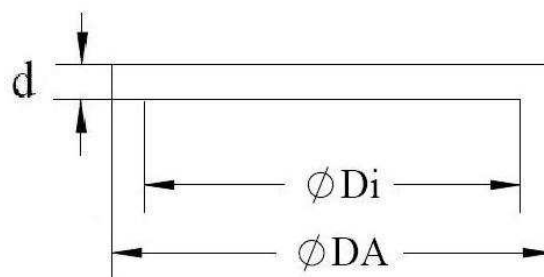


Abbildung 2.1: Zylindrische Form des Mantels von Thermomessfühler

- DA : äußerer Durchmesser des Mantels
- Di : innerer Durchmesser des Mantels
- d : dicke des Mantels = $(DA - Di)/2$
- V : Volume des Kopfs des Thermomessfühlers (Wärmeaustauschvolumen)
- A : Fläche des Kopfs des Thermomessfühlers (Wärmeaustauschfläche)

$$V = \left(\pi \cdot \frac{DA^2}{4}\right) \cdot d \quad (2.9)$$

$$A = \pi \cdot \frac{DA^2}{4} \quad (2.10)$$

2.3.2.2 Halbkugelartige Form

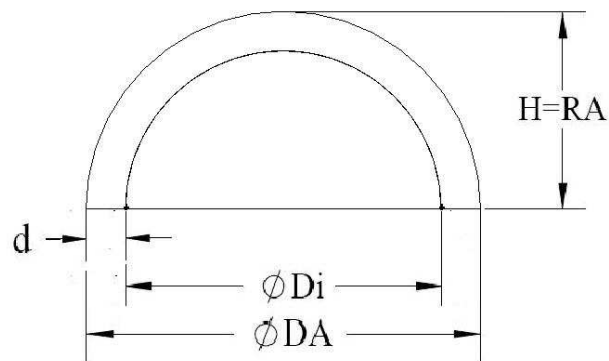


Abbildung 2.2: halbkugelartige Form des Mantels von Thermomessfühler

- DA : äußerer Durchmesser des Mantels
- Di : innerer Durchmesser des Mantels
- d : dicke des Mantels
- H : Höhe des Kugels
- V : Volume des Kopfs des Thermomessfühlers (Wärmeaustauschvolume)
- A : Fläche des Kopfs des Thermomessfühlers (Wärmeaustauschfläche)

$$V = \left(\frac{4}{6} \right) \cdot \pi \cdot (RA^3 - Ri^3) \quad (2.11)$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot RA^2 \quad (2.12)$$

2.3.2.3 Kegelartige Form

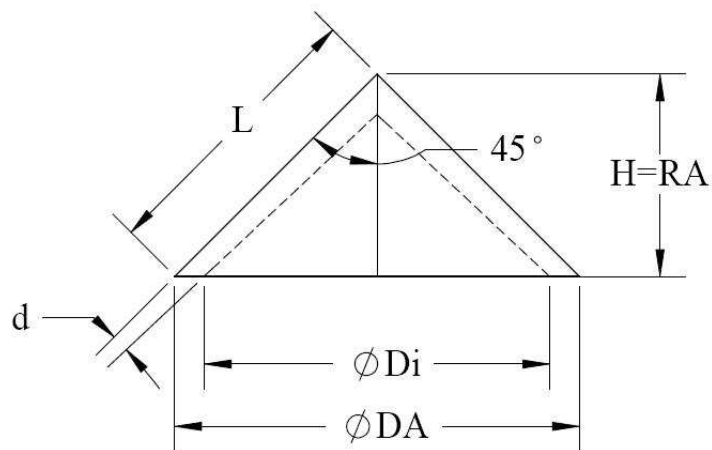


Abbildung 2.3: kegelförmige Form des Mantels von Thermomeßfühler

- DA : äußerer Durchmesser des Mantels
- Di : innerer Durchmesser des Mantels
- d : dicke des Mantels
- H : Höhe des Kegels
- L : Seitenlänge des Kegels
- α : Winkel des Kegels = 45°
- V : Volume des Kopfs des Thermomeßfühlers (Wärmeaustauschvolumen)
- A : Fläche des Kopfs des Thermomeßfühlers (Wärmeaustauschfläche)

$$V = 0.33 \cdot \pi \cdot (RA^3 - Ri^3) \quad (2.13)$$

$$A = \pi \cdot RA^2 + \pi \cdot RA \cdot L \quad (2.14)$$

2.3.3 Ermittlung der Nusselt Zahlen für die Geometrien des Mantels der Thermoelementen

Ein von wichtigsten Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sind die für verschiedene Geometrien des Mantels des Thermomessfühlers zusammengestellte Korrelationen für Nusselt Zahl. Die Formel basieren sich auf einer Korrelation, die für subkritische Umströmung eines flachen Körpers bei $Re < Re_{kritik} = 5 \cdot 10^5$ und $0.6 < Pr < 2000$ gilt (vgl. [8]).

- Nusselt Formel für **zylindrische Form**

$$Nu = 0.664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (2.15)$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers der Zylinder DA .

- Nusselt Formel für **halbkugelartige Form**

$$Nu = 0.31 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (2.16)$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers der Halbkugel durch drei $DA/3$.

- Nusselt Formel für **kegelartige Form**

$$Nu = 0.325 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (2.17)$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers des kegels durch drei $DA/3$

Nach der Ermittlung von der Werte von Nu Zahl für halbkugelartige- und kegelartige Form durch numerische Simulation, haben wir die analytische Werte von Nu Zahl mit der numerischen Werten verglichen, und wir könnten die beide Formel (2.16), (2.17) feststellen.

2.3.4 Berechnungsbeispiele der Ansprechzeit der Konstruktionen des Mantels

Als Beispiel für das Berechnungsverfahren der Ansprechzeit, wir werden ein Metall (CuNi) in den drei Konstruktionen des Mantels einsetzen.

Wir nehmen an, dass die Umgebungstemperatur (Temperatur der Luftströmung)

$T_{\infty} = 20 \text{ C}^{\circ}$, und die Temperatur von Mantel des Thermoelement $T_{(t=t_0)} = 30 \text{ C}^{\circ}$, und die Geschwindigkeit der Luftströmung $u = 10 \text{ m/s}$.

Körpertemperatur bei Ansprechzeit $T_{(t=t_A)} = 23.68 \text{ c}^{\circ}$ (Abkühlung des Körpers)

Die Tabelle 2.2 zeigt die Lufteigenschaften bei der Filmtemperatur 25c° .

2.3.4.1 zylindrische Form des Mantels

wir führen unsere analytische Berechnung mit der folgenden Aspektverhältnisse der zylindrische Form des Mantels des Thermomessfühlers durch.

- $DA = 5 \text{ mm}$ äußerer Durchmesser des Mantels
- $Di = 0.8 DA = 4 \text{ mm}$ innerer Durchmesser des Mantels
- $d = 0.5 \text{ mm}$ dicke des Mantels
- charakteristische Länge $L=DA$

in der Gleichungen (2.9), (2.10) setzen wir die Obere Aspektverhältnisse ein, ergibt sich:

- $V = 9.81 \cdot 10^{-9} \quad \text{m}^3$
- $A = 1.96 \cdot 10^{-5} \quad \text{m}^2$
- $L_c = \frac{V}{A} = 5 \cdot 10^{-4} \quad \text{m}$

aus der Gleichung (2.5) ergibt sich:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{10 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1.57 \cdot 10^{-5}} \quad \Longrightarrow \quad Re = 3.185 \cdot 10^3 < Re_{kritik} = 5 \cdot 10^5$$

Die Werte von Re Zahl und Pr Zahl werden in Nu Formel (2.15) eingegeben:

$$Nu = 0.664 \cdot \sqrt{3.185 \cdot 10^3} \cdot \sqrt[3]{0.715} \quad \Longrightarrow \quad Nu = 33.51$$

Aus der Gleichung (2.7) ergibt sich:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} = \frac{33.51 \cdot 2.59 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} \quad \Longrightarrow \quad h = 173.59 \text{ (w/ m}^2\text{.k)}$$

aus der Gleichung (2.1), und die Tabelle 2.1 für das Metall (CuNi) als Mantel des Thermomessfühlers berechnen wir Biot-Zahl:

$$B_i = \frac{h \cdot L_c}{\lambda_m} = \frac{173.59 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{22} \quad \Longrightarrow \quad B_i = 0.0039 < 0.1$$

Weil Biot-Zahl kleiner als 0.1, dann können wir LCM verwenden.

aus der Gleichung (2.4) berechnen wir die Kalometrische Zeitkonstant:

$$t_c = \frac{8900 \cdot 390 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{173.59} \quad \Longrightarrow \quad t_c = 9.998 \text{ s}$$

Anschließend aus der Gleichung (2.3) berechnen wir die Ansprechzeit:

$$\frac{23.68 - 20}{30 - 20} = e^{\frac{-t_A}{9.998}} \quad \Longrightarrow \quad t_A = 9.995 \text{ s}$$

2.3.4.2 halbkugelartige Form des Mantels

wir führen unsere analytische Berechnung mit der folgenden Aspektverhältnisse der halbkugelartige Form des Mantels des Thermomessfühlers durch.

- $DA = 5 \text{ mm}$ äußerer Durchmesser des Mantels
- $Di = 0.8 DA = 4 \text{ mm}$ innerer Durchmesser des Mantels
- $d = 0.5 \text{ mm}$ Dicke des Mantels
- charakteristische Länge $L = DA/3$
- $H = 2.5 \text{ mm}$ Höhe des Kugels

Wir folgen die vorherige Schritte wie in zylindrische Form des Thermomessfühlers mit Berücksichtigung dass, die charakteristische Länge bei der Berechnung von Re-Zahl $L = DA/3$ ist, und die Verwendung von Nu-Zahl Formel (2.16)

$$\Longrightarrow \quad t_A = 10.05 \text{ s}$$

2.3.4.3 kegelartige Form des Mantels

wir führen unsere analytische Berechnung mit der folgenden Aspektverhältnisse der kegelartige Form des Mantels des Thermomessfühlers durch.

- $DA = 5 \text{ mm}$ äußerer Durchmesser des Mantels
- $Di = 0.8 DA = 4 \text{ mm}$ innerer Durchmesser des Mantels
- $d = 0.5 \text{ mm}$ Dicke des Mantels
- charakteristische Länge $L=DA/3$
- $H = 2.5 \text{ mm}$ Höhe des Kegels
- $\alpha = 45^\circ$ Winkel des Kegels

Wir folgen die vorherige Schritte wie in zylindrische Form des Thermomessfühlers mit Berücksichtigung dass, die charakteristische Länge bei der Berechnung von Re-Zahl $L=DA/3$ ist, und die Verwendung von Nu-Zahl Formel (2.17)

$$\Rightarrow t_A = 4.36 \text{ s}$$

Das Diagramm 2.1 zeigt die Ansprechzeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler in Abhängig von Geschwindigkeit der Luftströmung. Wir finden: je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit. Die kegelartige Form besitzt die schnellste Ansprechzeit im Vergleich zur halbkugelartige Form und zylindrische Form, und die zylindrische Form besitzt schnellere Ansprechzeit als die halbkugelartige Form, obwohl die beiden ungefähr gleich sind.

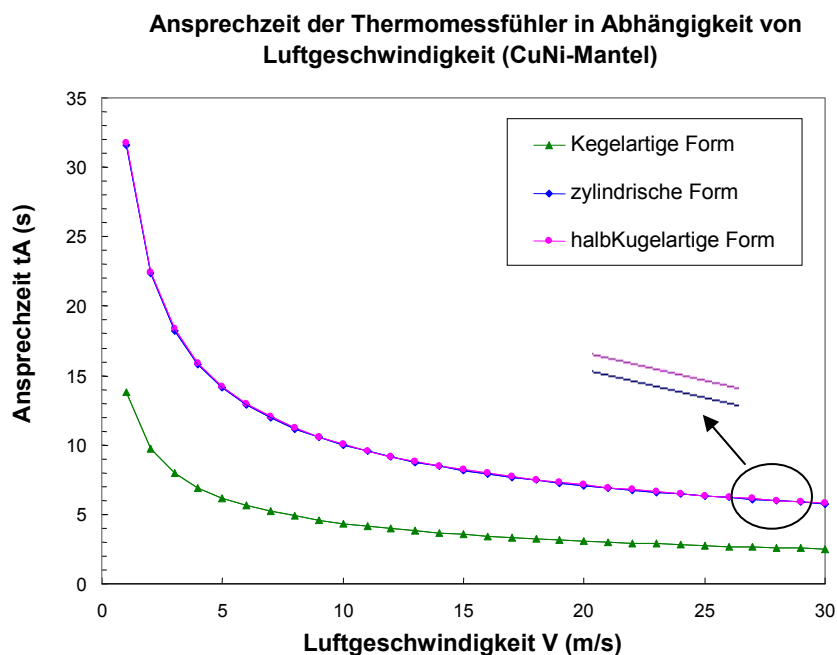


Diagramm 2.1: Ansprechzeit der Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

Wir haben gefunden, dass die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit hat, deshalb werden wir die Ansprechzeit von verschiedenen Metallen des Mantels von Thermomessfühler die in der Tabelle 2.1, und die Kegelartige Form besitzt, mit der Geschwindigkeit der Luftströmung vergleichen. Diagramm 2.2.

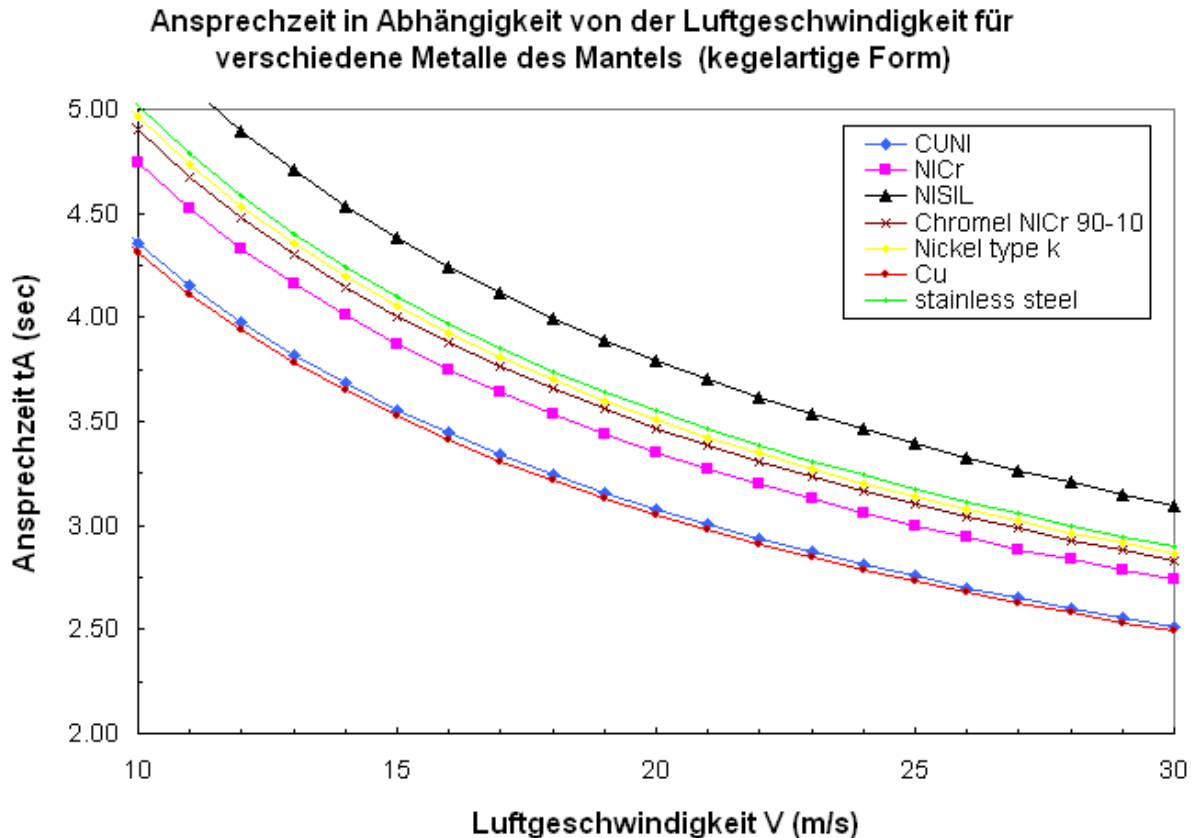


Diagramm 2.2: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für verschiedene Metalle des Mantels (kegelartige Form)

Das Diagramm 2.2 zeigt dass, die Cu-Mantel besitzt die schnellste Ansprechzeit, dann kommt CuNi-Mantel im Platz zwei, dann Nicr-Mantel, Chromel-Mantel, Nickel-Mantel, Edelstahl, NiSi-Mantel.

2.3.4.4 Einfluss der Dicke des Mantels von Thermoelement auf der Ansprechzeit

Wir werden den Einfluss von der Dicke des Mantels auf die Ansprechzeit analysieren. Die Berechnung wird unter die Voraussetzungen von Luft- und Manteltemperatur, und die gleiche bestimmte Aspektverhältnisse der drei Konstruktionen des Mantel von Thermoelement, die im (Abschnitt 2.3.4) definiert wurde, durchgeführt. aber wir werden hier verschiedene Dicke für das Mantel einsetzen, und unter der Luftgeschwindigkeit $u=10$ m/s die Ansprechzeit vergleichen.

Dicke des Mantels mm	zylindrische Form tA s	halbkugelartige Form tA s	kegelartige Form tA s
0.25	5.0	5.6	2.4
0.5	10.0	10.1	4.4
0.75	15.0	13.5	5.9
1	20.0	16.2	7.0
1.25	25.0	18.0	7.8

Tabelle 2.3: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Dicke des Mantels des Thermoelements für verschiedene Konstruktionen.

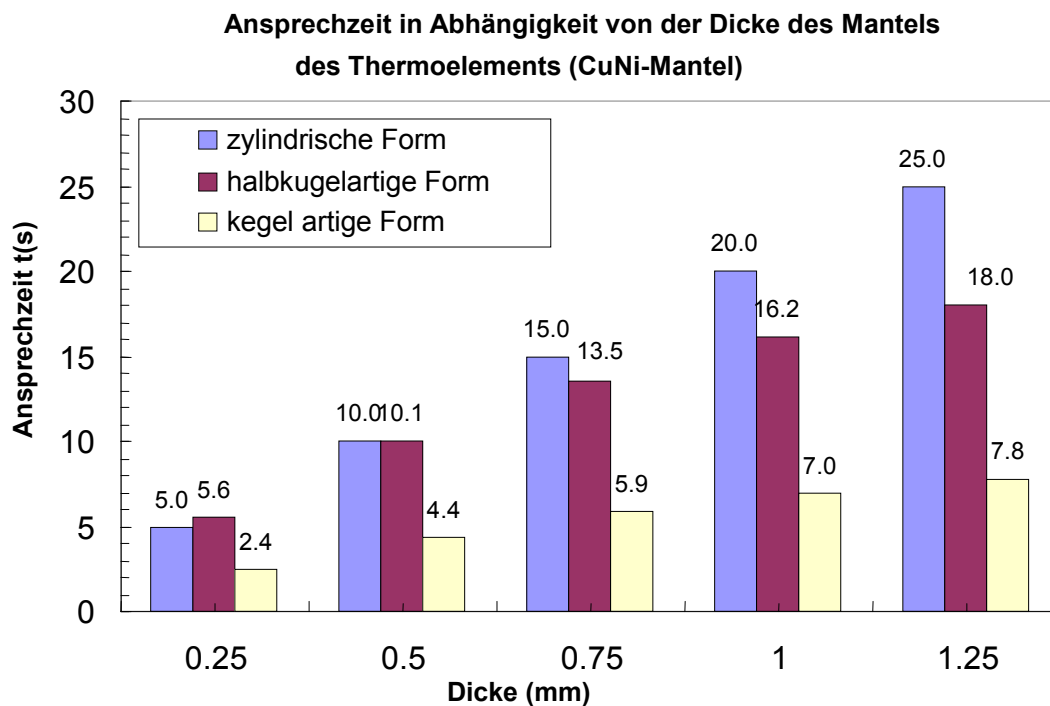


Diagramm 2.3: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Dicke des Mantels des Thermoelements für verschiedene Konstruktionen.

Wenn die Dicke des Mantels des Thermoelements klein ist, besitzt die zylindrische Form des Mantels schnellere Ansprechzeit als die kugelartige Form.

Je größer die Dicke des Mantels ist, desto schneller die Ansprechzeit von kugelartige Form im Vergleich mit der zylindrischen Form wird.

Auf jeden Fall besitzt die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit für verschiedene Dicke des Mantels. Diagramm 2.3.

2.4 Analytische Ergebnisse der für Mantel verwendeten Metallen

Im diesem Schritt werden wir uns in der analytischen Untersuchung und Berechnung auf die beiden Metalle Cu, Edelstahl V2A (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301 als Mantel für das Thermoelement konzentrieren, weil wie wir aus analytische Berechnung herausgefunden haben, besitzt das Cu die schnellste Ansprechzeit und es ist verfügbar. Im Bezug auf den Edelstahl besitzt er viele Vorteile, er ist verfügbar, fest, und rostfrei.

Verfügbarkeit ist insofern wichtig, weil die experimentelle Untersuchungen werden zukünftig als Weiterentwicklung der in dieser Arbeit erreichten Ergebnissen vorgesehen.

Die Analytische Berechnung für Kupfer und Edelstahl wird unter die Voraussetzungen von Luft- und Manteltemperatur, und die gleiche bestimmte Aspektverhältnisse der drei Konstruktionen des Mantel von Thermoelement, die im (Abschnitt 2.3.4) definiert wurde, durchgeführt.

2.4.1 Edelstahl als Mantel-Material

Die folgende Tabelle 2.4, 2.5, 2.6 zeigen die Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für zylindrische Form, halbkugelartige Form, und kegelartige Form des Mantels von Thermomessfühler (Edelstahl-Mantel) in verschiedenen Geschwindigkeiten der Lüftströmung, man kann deutlich sehen dass, die Ansprechzeit in höhere Geschwindigkeiten kürzer ist.

u m/s	Re	Nu	h $W/m^2 \cdot K$	t_c s	t_A s
1	3.42E+02	10.971	53.100	37.665	37.653
2	6.85E+02	15.515	75.095	26.633	26.624
3	1.03E+03	19.002	91.972	21.746	21.739
4	1.37E+03	21.942	106.200	18.832	18.826
5	1.71E+03	24.532	118.735	16.844	16.839
6	2.05E+03	26.873	130.068	15.377	15.372
7	2.40E+03	29.027	140.489	14.236	14.231
8	2.74E+03	31.031	150.189	13.317	13.312
9	3.08E+03	32.913	159.300	12.555	12.551
10	3.42E+03	34.694	167.917	11.911	11.907
11	3.77E+03	36.387	176.112	11.356	11.353
12	4.11E+03	38.005	183.943	10.873	10.869
13	4.45E+03	39.557	191.454	10.446	10.443
14	4.79E+03	41.050	198.682	10.066	10.063
15	5.13E+03	42.491	205.655	9.725	9.722
16	5.48E+03	43.884	212.400	9.416	9.413
17	5.82E+03	45.235	218.937	9.135	9.132
18	6.16E+03	46.546	225.284	8.878	8.875
19	6.50E+03	47.822	231.457	8.641	8.638
20	6.85E+03	49.064	237.470	8.422	8.419

21	7.19E+03	50.276	243.334	8.219	8.216
22	7.53E+03	51.459	249.061	8.030	8.028
23	7.87E+03	52.615	254.658	7.854	7.851
24	8.22E+03	53.747	260.135	7.688	7.686
25	8.56E+03	54.855	265.500	7.533	7.531
26	8.90E+03	55.942	270.757	7.387	7.384
27	9.24E+03	57.007	275.915	7.249	7.246
28	9.58E+03	58.053	280.978	7.118	7.116
29	9.93E+03	59.081	285.952	6.994	6.992
30	1.03E+04	60.091	290.840	6.877	6.874

Tabelle:2.4 Werte von Re , Nu , h , tc , t_A für zylindrische Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)

u m/s	Re	Nu	h $w/m^2 \cdot k$	tc s	t_A s
1	1.14E+02	3.0	42.94	37.884	37.87
2	2.28E+02	4.2	60.72	26.788	26.78
3	3.42E+02	5.1	74.37	21.872	21.86
4	4.56E+02	5.9	85.88	18.942	18.94
5	5.71E+02	6.6	96.01	16.942	16.94
6	6.85E+02	7.2	105.18	15.466	15.46
7	7.99E+02	7.8	113.60	14.319	14.31
8	9.13E+02	8.4	121.45	13.394	13.39
9	1.03E+03	8.9	128.82	12.628	12.62
10	1.14E+03	9.4	135.78	11.980	11.98
11	1.26E+03	9.8	142.41	11.422	11.42
12	1.37E+03	10.2	148.74	10.936	10.93
13	1.48E+03	10.7	154.82	10.507	10.50
14	1.60E+03	11.1	160.66	10.125	10.12
15	1.71E+03	11.5	166.30	9.781	9.78
16	1.83E+03	11.8	171.75	9.471	9.47
17	1.94E+03	12.2	177.04	9.188	9.19
18	2.05E+03	12.5	182.17	8.929	8.93
19	2.17E+03	12.9	187.17	8.691	8.69
20	2.28E+03	13.2	192.03	8.471	8.47
21	2.40E+03	13.6	196.77	8.267	8.26
22	2.51E+03	13.9	201.40	8.077	8.07
23	2.62E+03	14.2	205.93	7.899	7.90
24	2.74E+03	14.5	210.36	7.733	7.73
25	2.85E+03	14.8	214.69	7.577	7.57
26	2.97E+03	15.1	218.94	7.430	7.43
27	3.08E+03	15.4	223.12	7.291	7.29
28	3.19E+03	15.6	227.21	7.159	7.16
29	3.31E+03	15.9	231.23	7.035	7.03
30	3.42E+03	16.2	235.18	6.917	6.91

Tabelle:2.5 Werte von Re , Nu , h , tc , t_A für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)

<i>u</i> <i>m/s</i>	<i>Re</i>	<i>Nu</i>	<i>h</i> <i>w/m² · k</i>	<i>tc</i> <i>s</i>	<i>t_A</i> <i>s</i>
1	1.14E+02	3.1	45.11	16.413	16.41
2	2.27E+02	4.4	63.79	11.606	11.60
3	3.41E+02	5.4	78.13	9.476	9.47
4	4.55E+02	6.2	90.21	8.207	8.20
5	5.68E+02	6.9	100.86	7.340	7.34
6	6.82E+02	7.6	110.49	6.701	6.70
7	7.96E+02	8.2	119.34	6.204	6.20
8	9.09E+02	8.8	127.58	5.803	5.80
9	1.02E+03	9.3	135.32	5.471	5.47
10	1.14E+03	9.8	142.64	5.190	5.19
11	1.25E+03	10.3	149.60	4.949	4.95
12	1.36E+03	10.7	156.25	4.738	4.74
13	1.48E+03	11.2	162.63	4.552	4.55
14	1.59E+03	11.6	168.77	4.387	4.39
15	1.70E+03	12.0	174.70	4.238	4.24
16	1.82E+03	12.4	180.43	4.103	4.10
17	1.93E+03	12.8	185.98	3.981	3.98
18	2.05E+03	13.1	191.37	3.869	3.87
19	2.16E+03	13.5	196.62	3.765	3.76
20	2.27E+03	13.8	201.72	3.670	3.67
21	2.39E+03	14.2	206.70	3.582	3.58
22	2.50E+03	14.5	211.57	3.499	3.50
23	2.61E+03	14.8	216.32	3.422	3.42
24	2.73E+03	15.2	220.98	3.350	3.35
25	2.84E+03	15.5	225.53	3.283	3.28
26	2.95E+03	15.8	230.00	3.219	3.22
27	3.07E+03	16.1	234.38	3.159	3.16
28	3.18E+03	16.4	238.68	3.102	3.10
29	3.30E+03	16.7	242.91	3.048	3.05
30	3.41E+03	16.9	247.06	2.997	3.00

Tabelle:2.6 Werte von Re , Nu , h , tc , t_A für kegelartige Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)

Die folgende Diagramme 2.4, 2.5, 2.6 zeigen die Ansprechzeit, die Wärmeübertragungskoeffizient h , Nu-Zahl von drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Edelstahl-Mantel) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Luftströmung.

Wir sehen dass, die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit besitzt, und die zylindrische Form besitzt schnellere Ansprechzeit als die halbkugelartige Form, obwohl die beiden ungefähr gleich sind.

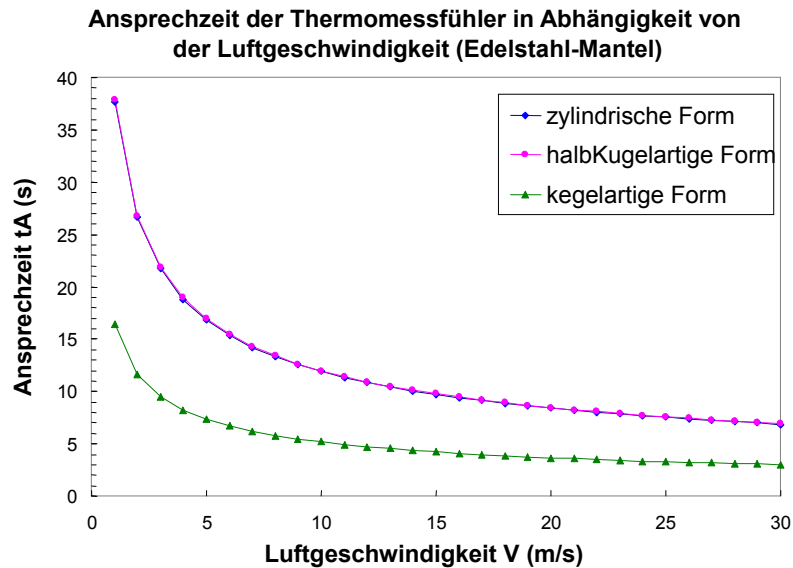


Diagramm 2.4: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Edelstahl-Mantel)

Die Wärmeübertragungskoeffizient von der drei Konstruktionen nichtlinear zunehmen, und besitzt die zylindrische Form des Mantels die höchste Werte von h .

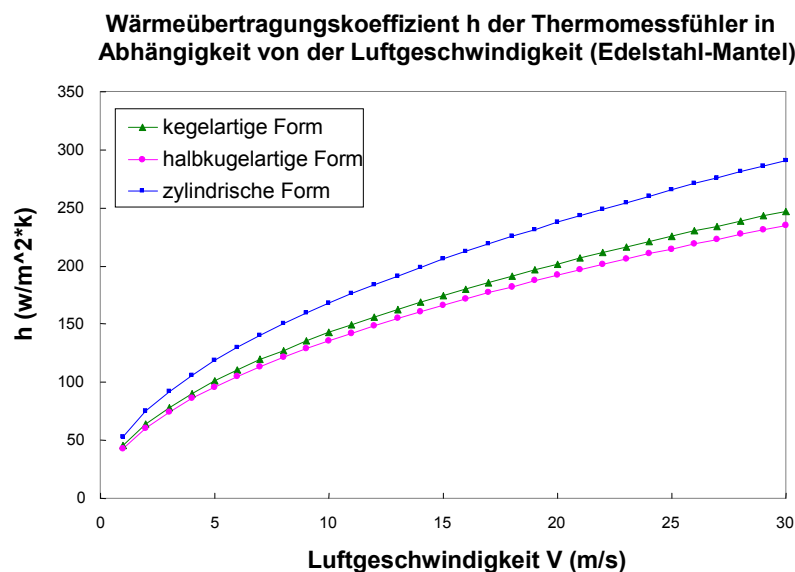


Diagramm 2.5: Wärmeübertragungskoeffizient h in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Edelstahl-Mantel)

Die zylindrische Form des Mantels besitzt die größte Wert von Nu Zahl.

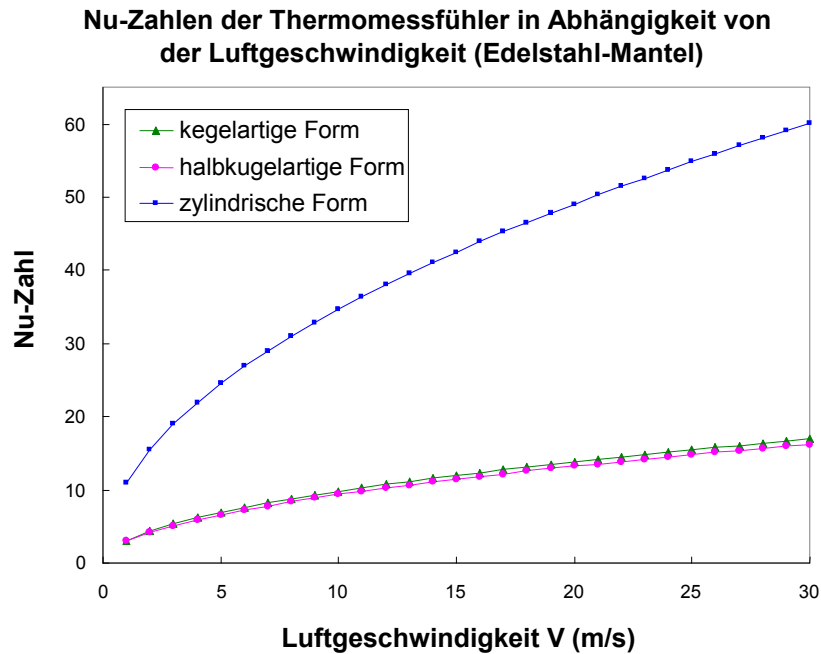


Diagramm 2.6: Nu-Zahl der Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Edelstahl-Mantel)

2.4.2 Kupfer als Mantel-Material

Die folgende Tabelle 2.7, 2.8, 2.9 zeigen die Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für zylindrische Form, halbkugelartige Form, und kegelartige Form des Mantels von Thermomessfühler (Kupfer-Mantel) in verschiedenen Geschwindigkeiten der Lüftströmung, man kann deutlich sehen dass, die Ansprechzeit in höhere Geschwindigkeiten kürzer ist.

u m/s	Re	Nu	h $W/m^2 \cdot K$	t_c s	t_A s
1	3.42E+02	10.971	53.100	32.373	32.363
2	6.85E+02	15.515	75.095	22.891	22.884
3	1.03E+03	19.002	91.972	18.691	18.685
4	1.37E+03	21.942	106.200	16.187	16.181
5	1.71E+03	24.532	118.735	14.478	14.473
6	2.05E+03	26.873	130.068	13.216	13.212
7	2.40E+03	29.027	140.489	12.236	12.232
8	2.74E+03	31.031	150.189	11.446	11.442
9	3.08E+03	32.913	159.300	10.791	10.788
10	3.42E+03	34.694	167.917	10.237	10.234
11	3.77E+03	36.387	176.112	9.761	9.758
12	4.11E+03	38.005	183.943	9.345	9.342
13	4.45E+03	39.557	191.454	8.979	8.976
14	4.79E+03	41.050	198.682	8.652	8.649
15	5.13E+03	42.491	205.655	8.359	8.356
16	5.48E+03	43.884	212.400	8.093	8.091
17	5.82E+03	45.235	218.937	7.852	7.849

18	6.16E+03	46.546	225.284	7.630	7.628
19	6.50E+03	47.822	231.457	7.427	7.425
20	6.85E+03	49.064	237.470	7.239	7.237
21	7.19E+03	50.276	243.334	7.064	7.062
22	7.53E+03	51.459	249.061	6.902	6.900
23	7.87E+03	52.615	254.658	6.750	6.748
24	8.22E+03	53.747	260.135	6.608	6.606
25	8.56E+03	54.855	265.500	6.475	6.473
26	8.90E+03	55.942	270.757	6.349	6.347
27	9.24E+03	57.007	275.915	6.230	6.228
28	9.58E+03	58.053	280.978	6.118	6.116
29	9.93E+03	59.081	285.952	6.012	6.010
30	1.03E+04	60.091	290.840	5.911	5.909

Tabelle:2.7 Werte von Re , Nu , h , tc , t_A für zylindrische Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel)

u m/s	Re	Nu	h $w/m^2 \cdot k$	tc s	t_A s
1	1.14E+02	3.0	42.94	32.561	32.55
2	2.28E+02	4.2	60.72	23.024	23.02
3	3.42E+02	5.1	74.37	18.799	18.79
4	4.56E+02	5.9	85.88	16.281	16.28
5	5.71E+02	6.6	96.01	14.562	14.56
6	6.85E+02	7.2	105.18	13.293	13.29
7	7.99E+02	7.8	113.60	12.307	12.30
8	9.13E+02	8.4	121.45	11.512	11.51
9	1.03E+03	8.9	128.82	10.854	10.85
10	1.14E+03	9.4	135.78	10.297	10.29
11	1.26E+03	9.8	142.41	9.818	9.81
12	1.37E+03	10.2	148.74	9.400	9.40
13	1.48E+03	10.7	154.82	9.031	9.03
14	1.60E+03	11.1	160.66	8.702	8.70
15	1.71E+03	11.5	166.30	8.407	8.40
16	1.83E+03	11.8	171.75	8.140	8.14
17	1.94E+03	12.2	177.04	7.897	7.89
18	2.05E+03	12.5	182.17	7.675	7.67
19	2.17E+03	12.9	187.17	7.470	7.47
20	2.28E+03	13.2	192.03	7.281	7.28
21	2.40E+03	13.6	196.77	7.105	7.10
22	2.51E+03	13.9	201.40	6.942	6.94
23	2.62E+03	14.2	205.93	6.790	6.79
24	2.74E+03	14.5	210.36	6.647	6.64
25	2.85E+03	14.8	214.69	6.512	6.51
26	2.97E+03	15.1	218.94	6.386	6.38
27	3.08E+03	15.4	223.12	6.266	6.26
28	3.19E+03	15.6	227.21	6.154	6.15
29	3.31E+03	15.9	231.23	6.046	6.04
30	3.42E+03	16.2	235.18	5.945	5.94

Tabelle:2.8 Werte von Re , Nu , h , tc , t_A für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel)

u m/s	Re	Nu	h $W/m^2 \cdot K$	t_c s	t_A s
1	1.14E+02	3.1	45.11	14.107	14.10
2	2.27E+02	4.4	63.79	9.975	9.97
3	3.41E+02	5.4	78.13	8.145	8.14
4	4.55E+02	6.2	90.21	7.054	7.05
5	5.68E+02	6.9	100.86	6.309	6.31
6	6.82E+02	7.6	110.49	5.759	5.76
7	7.96E+02	8.2	119.34	5.332	5.33
8	9.09E+02	8.8	127.58	4.988	4.99
9	1.02E+03	9.3	135.32	4.702	4.70
10	1.14E+03	9.8	142.64	4.461	4.46
11	1.25E+03	10.3	149.60	4.253	4.25
12	1.36E+03	10.7	156.25	4.072	4.07
13	1.48E+03	11.2	162.63	3.913	3.91
14	1.59E+03	11.6	168.77	3.770	3.77
15	1.70E+03	12.0	174.70	3.642	3.64
16	1.82E+03	12.4	180.43	3.527	3.53
17	1.93E+03	12.8	185.98	3.422	3.42
18	2.05E+03	13.1	191.37	3.325	3.32
19	2.16E+03	13.5	196.62	3.236	3.24
20	2.27E+03	13.8	201.72	3.154	3.15
21	2.39E+03	14.2	206.70	3.078	3.08
22	2.50E+03	14.5	211.57	3.008	3.01
23	2.61E+03	14.8	216.32	2.942	2.94
24	2.73E+03	15.2	220.98	2.880	2.88
25	2.84E+03	15.5	225.53	2.821	2.82
26	2.95E+03	15.8	230.00	2.767	2.77
27	3.07E+03	16.1	234.38	2.715	2.71
28	3.18E+03	16.4	238.68	2.666	2.67
29	3.30E+03	16.7	242.91	2.620	2.62
30	3.41E+03	16.9	247.06	2.576	2.57

Tabelle:2.9 Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für kegelartige Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel)

Die folgende Diagramme 2.7, 2.8, 2.9 zeigen die Ansprechzeit, die Wärmeübertragungskoeffizient h , Nu-Zahl von drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Kopfer-Mantel) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Lufströmung.

Wir sehen dass, die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit besitzt, und die zylindrische Form besitzt schnellere Ansprechzeit als die halbkugelartige Form, obwohl die beiden ungefähr gleich sind.

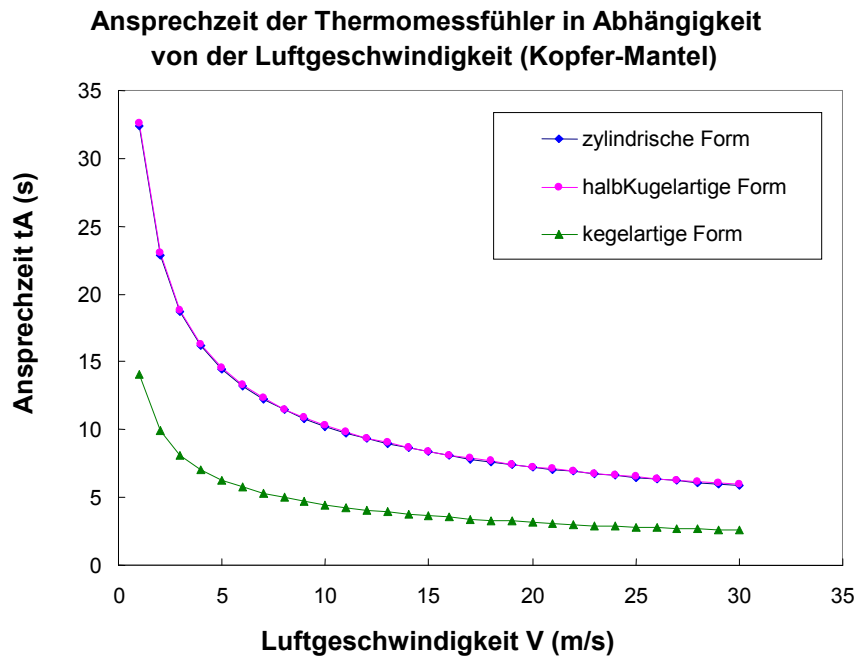


Diagramm 2.7: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Kopfer-Mantel)

Die Wärmeübertragungskoeffizient von der drei Konstruktionen nichtlinear zunehmen, und besitzt die zylindrische Form des Mantels die höchste Werte von h.

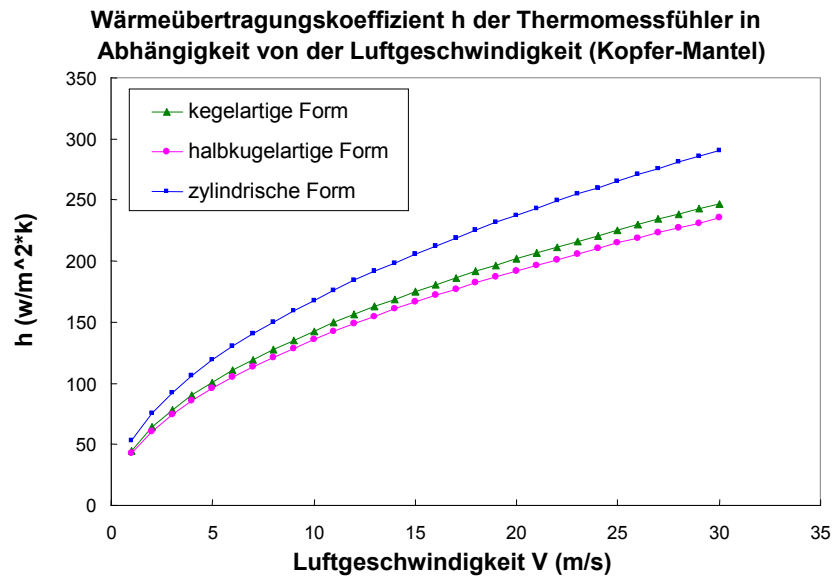


Diagramm 2.8: Wärmeübertragungskoeffizient h in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Kopfer-Mantel)

Die zylindrische Form des Mantels besitzt die größte Nu Zahl –Wert.

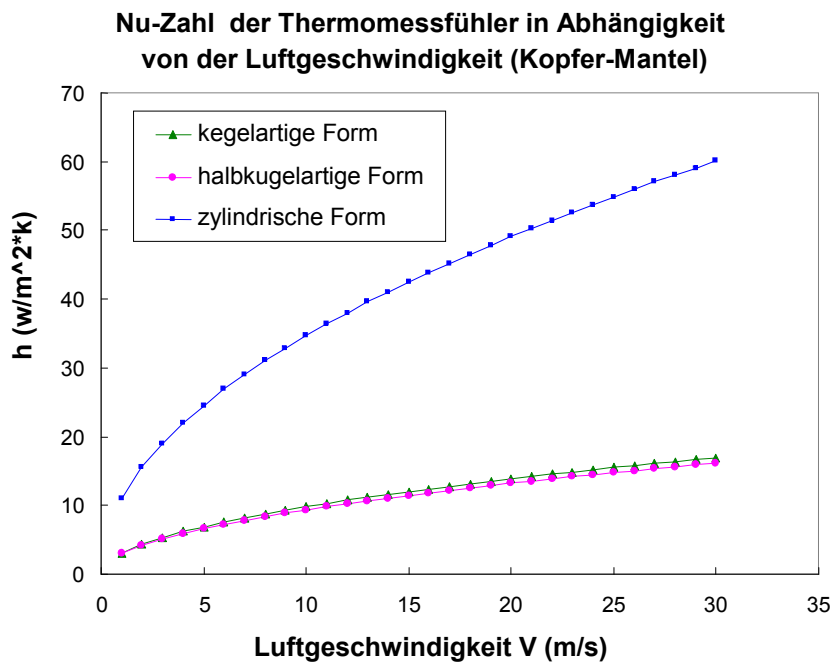


Diagramm 2.9: Nu-Zahl in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Kopfer-Mantel)

2.4.3 Vergleich Edelstahl mit Kupfer als Mantel-Metall

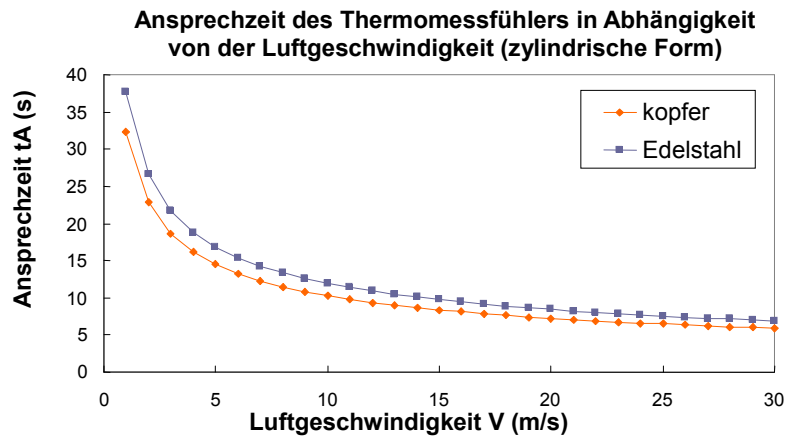


Diagramm 2.10: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (zylindrische Form)

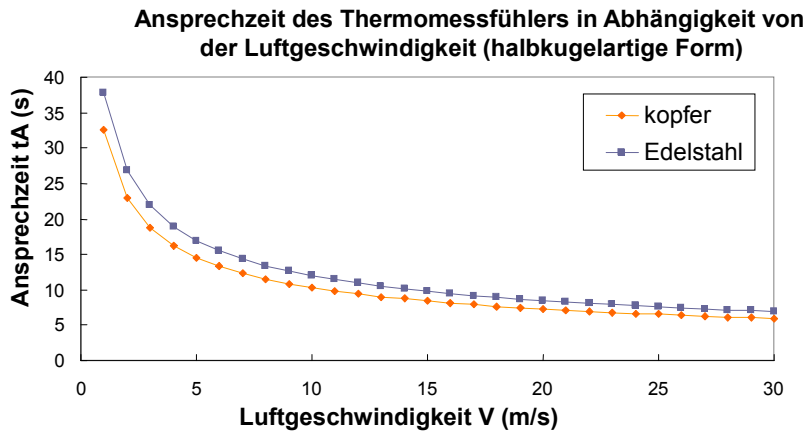


Diagramm 2.11: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (halbkugelartige Form)

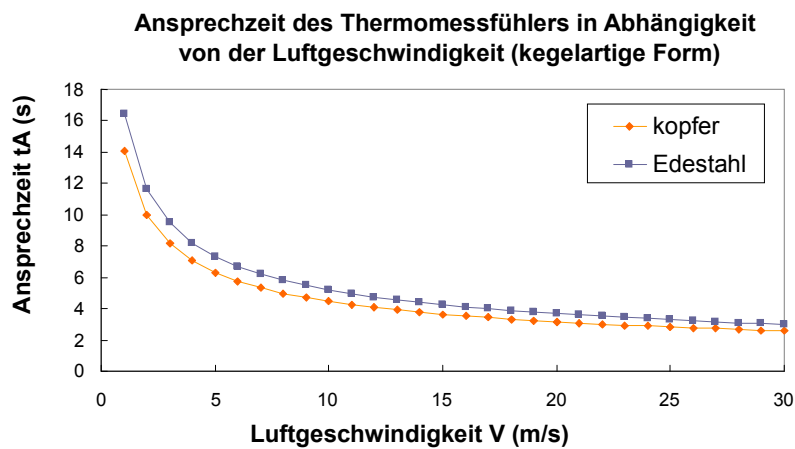


Diagramm 2.12: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (kegelartige Form)

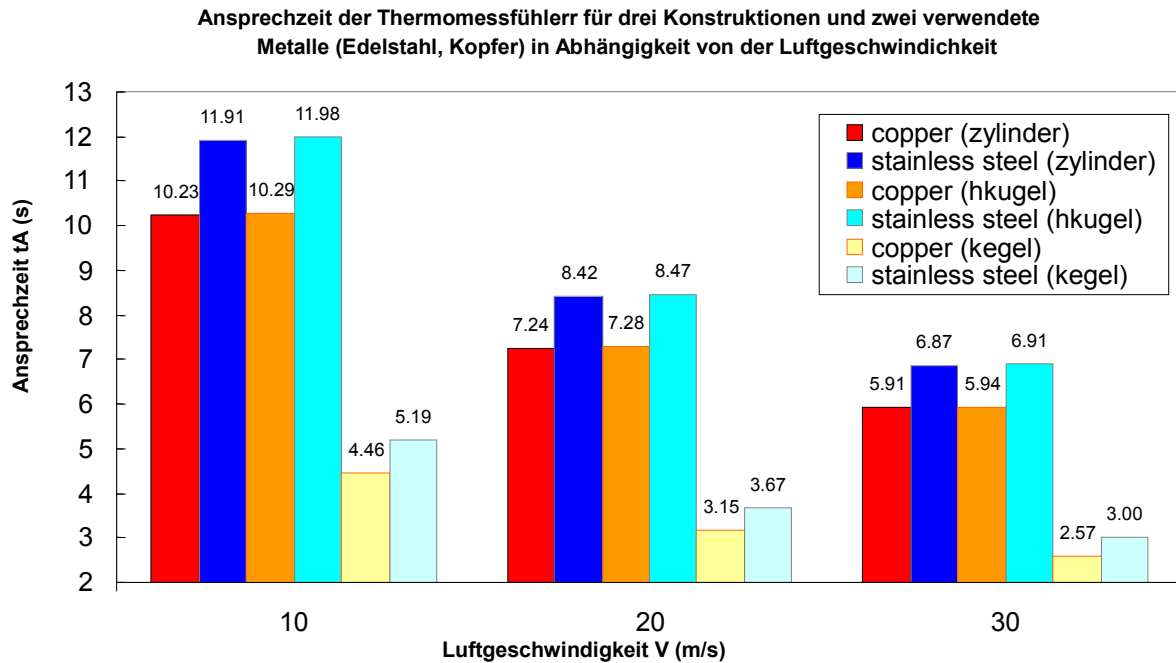


Diagramm 2.13: Ansprechzeit der Thermomessfühler für drei Konstruktionen und zwei verwendete Metall-Mänteln (Edelstahl, Kupfer) in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

2.4.4 Zusammenfassung

Für die analytische Berechnung von Ansprechzeit für drei unterschiedliche Konstruktionen des Mantels des Thermoelements hat die Wärmeleitfähigkeit λ_m des Metalls nur einen Einfluss auf die Ermittlung von Biot Zahl, und damit die Möglichkeit der LCM einzusetzen, aber spielt hier in der Ansprechzeit keine Rolle.

Einen großen Einfluss auf die Ansprechzeit hat die volumetrische Wärmekapazität

$$vhc = \rho_m \cdot c_{pm} \frac{J}{m^3 \cdot k} \quad \text{Tabelle 2.1}$$

Je kleiner die vhc ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.

Die Charakteristische Strömungsdurchmesser des Gegenstandes beeinflusst auf Re Zahl.

Die Korrelationen von Nu Zahl, 2.15, 2.16, und 2.17 beeinflussen auf die Werte von Wärmeübertragungskoeffizient und anschließend die Ansprechzeiten.

Durch Betrachtung die Diagramme 2.10, 2.11, 2.12, und 2.13 sind die folgenden Folgerungen zusammengefasst:

- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Kupfer besitzt in alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement die schnellste Ansprechzeit als Edelstahl, und je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Metallen.
- Die Ansprechzeit der kegelartigen Form (Kupfer-Mantel) besitzt die schnellste Ansprechzeit.
- Auf dem zweiten Platz der Thermoelemente ist Kegelartige Form (Edelstahl-Mantel).

- Wenn die Dicke des Mantels des Thermoelements klein ist, besitzt die zylindrische Form des Mantels schnellere Ansprechzeit als die kugelartige Form.
- Je größer die Dicke des Mantels ist, desto schneller wird die Ansprechzeit einer kugelartige Form im Vergleich mit der zylindrischen Form.
- Auf jeden Fall besitzt die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit für verschiedene Dicken des Mantels.

3 Numerische Simulation der unterschiedlichen Konstruktionen des Thermomessfühlers mit ANSYS/FLUENT

Numerische Simulation ist bei vielen Problemen der Maschinenbauingenieure eine wesentliche Aufgabe. Beispielweise ist eine Strömung im Windkanal.

Die Computational Fluid Dynamics (CFD) ist eine etablierte Methode,

Mittels der Hilfe kann das Strömungsverhalten von Fluiden an virtuellen mehrdimensionalen Modellen unter realen Bedingungen untersucht werden. Die benutzten Modellgleichungen sind meist Navier-Stokes-Gleichungen, Euler-Gleichungen oder Potentialgleichungen. Die Berechnungen der nichtlinearen Probleme sind dabei in Spezialfällen exakt lösbar.

3.1 Einführung des FLUENT-Programms

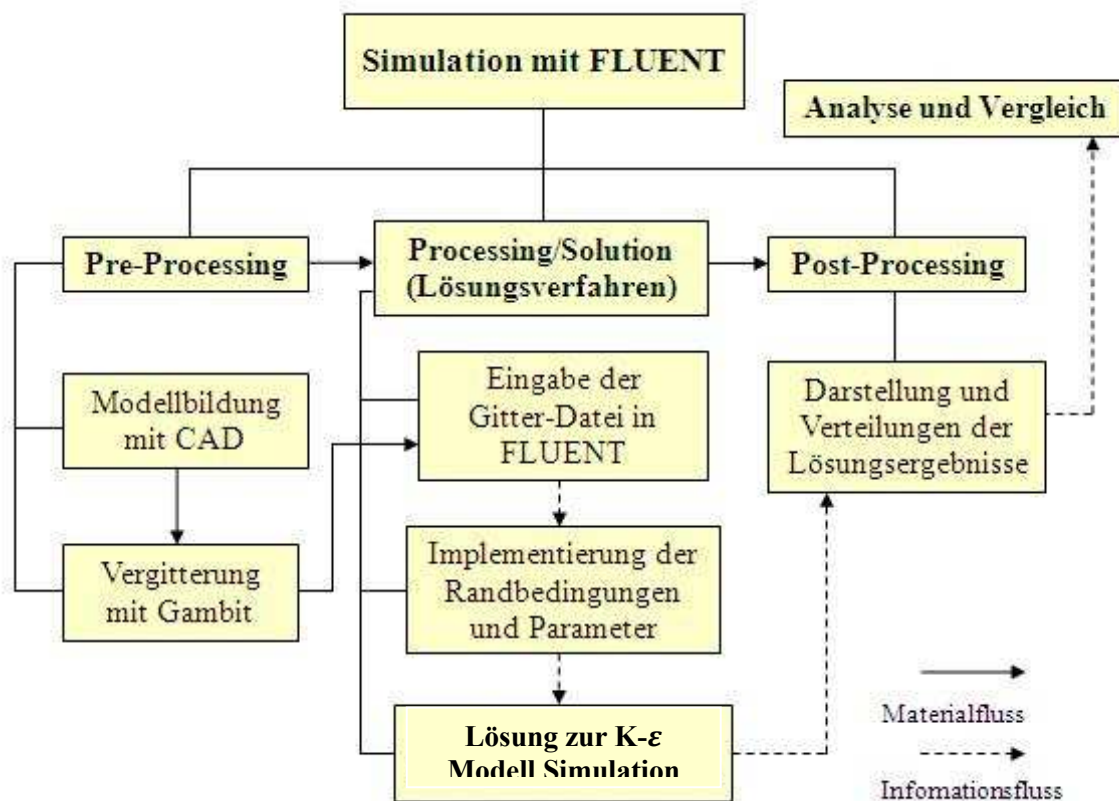


Abbildung 3.1: Flussbilddiagramm der Simulation mit FLUENT

FLUENT ist ein Finite-Volumen-Programmsystem zur Lösung von strömungsmechanischen Problemen aus dem CFD-Anwendungsbereich. Das Programm ermöglicht, Energie- und Stofftransport sowie physikalische Wandlung in direkt aus den Modellgleichungen zu bestimmen.

Die typische Strömungssimulation mit FLUENT besteht aus den drei Einzelschritten: (Abbildung 3.1)

1. Modellerstellung und Vergitterung (Pre-Processing)
2. Lösung des Gleichungssystems im Modellgitter (Processing/Solution)
3. Darstellung der Lösungsergebnisse (Post-Processing)

Das Pre-Processing ist die Voraussetzung zur Berechnung und Untersuchung des strömenden Thermomessfühlers mit FLUENT. Hierbei werden die Geometrie eines Kanalsystems mit CAD und Vergitterung der Fluidgeometrie mit Gambit realisiert.

3.2 Ziel der numerischen Simulation

wir haben in unsere Untersuchung drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler, die in einem Windkanal untersucht werden, die drei Konstruktion sind: kegelartige Form, halbkugelartige Form, und zylindrische Form. (Abbildung 3.3)

3.2.1 Berechnung von Ansprechzeit t_A

Wir werden In dieser numerischen Simulation zwei Metalle, Edelstahl (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301, und Kupfer als Material für das Mantel des Thermomessfühlers simulieren, und die Ansprechzeit für drei unterschiedlich Konstruktionen des Thermomessfühlers berechnen.

Wir werden diese, die durch FLUENT Program für jede Konstruktion berechnete Ansprechzeit vergleichen, um die beste eingesetzte Kombination von Metall und Konstruktion zu definieren, dann werden wir diese Ergebnisse mit analytischen Berechnungen vergleichen.

Die beste Kombination von Metall und Konstruktion soll natürlich die schnellste Ansprechzeit hat.

3.2.2 Ermittlung von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient h

Wir werden auch in dieser Untersuchung anhand der beschriebenen Konstruktionen des die Werte von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient ermitteln, und die mit der analytischen Werten vergleichen. (Anhang A9).

Die Tabelle 2.1 zeigt die physikalischen Eigenschaften den verwendeten Metallen, die numerisch simuliert werden.

3.3 3D Modellerstellung eines Thermomessfühlers-und Windkanalmodells

Zur Simulation des Thermomessfühlers- und Windkanalmodell ist ein entsprechendes 3D-geometrisches Modell mit CAD zu erstellen. Zuzufolge eines realen Thermomessfühlers und Kanal können die Form und Größe der Geometrie festgelegt werden.

Mit der 3D CAD-Software wird ein System, das aus einem Kanal, und einem Thermomessfühler besteht, dargestellt. Daneben werden die Position der xyz-Koordinaten sowie Bemaßung der Geometrie auch gezeigt. hier wird als Beispiel die Geometrie der kugelartigen Form von Thermomessfühler in der Windkanal gezeigt.

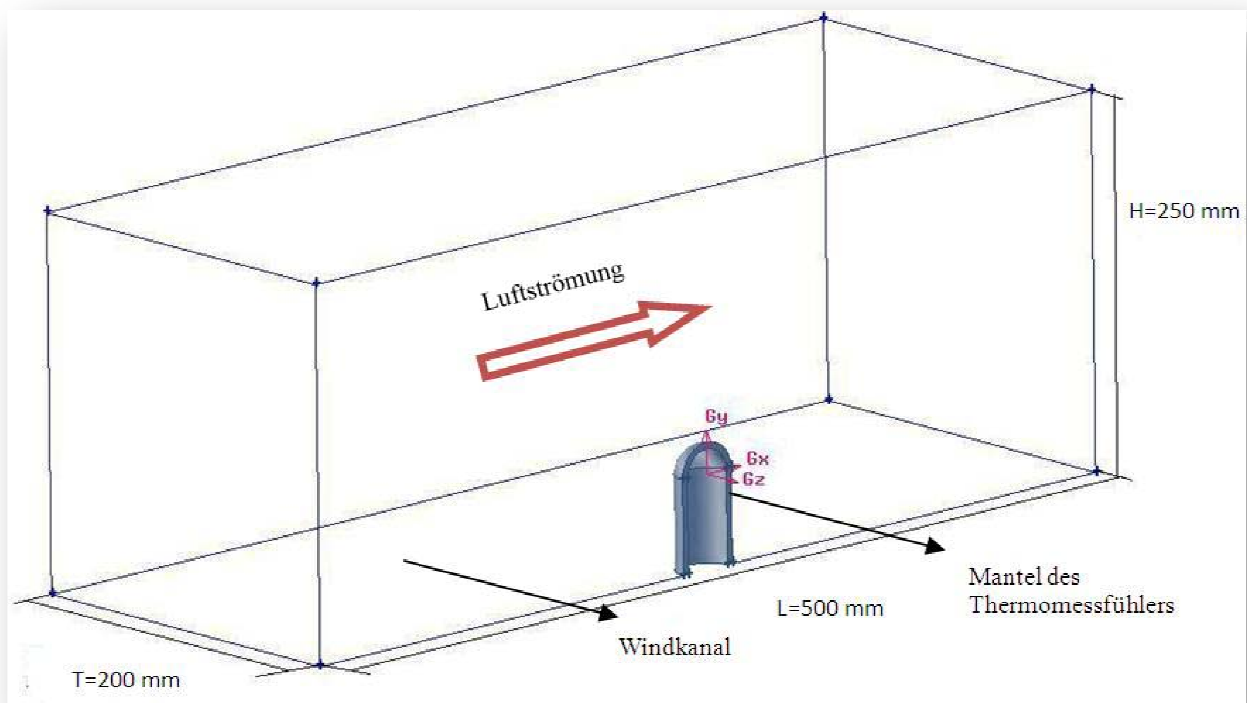


Abbildung 3.2: Geometrie der kugelartigen Form von Thermomessfühler in Windkanal

Hier sind die drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler, die Aspektverhältnisse der drei Konstruktionen werden vorher im Abschnitt 2.3.2 in der analytischen Berechnung definiert.

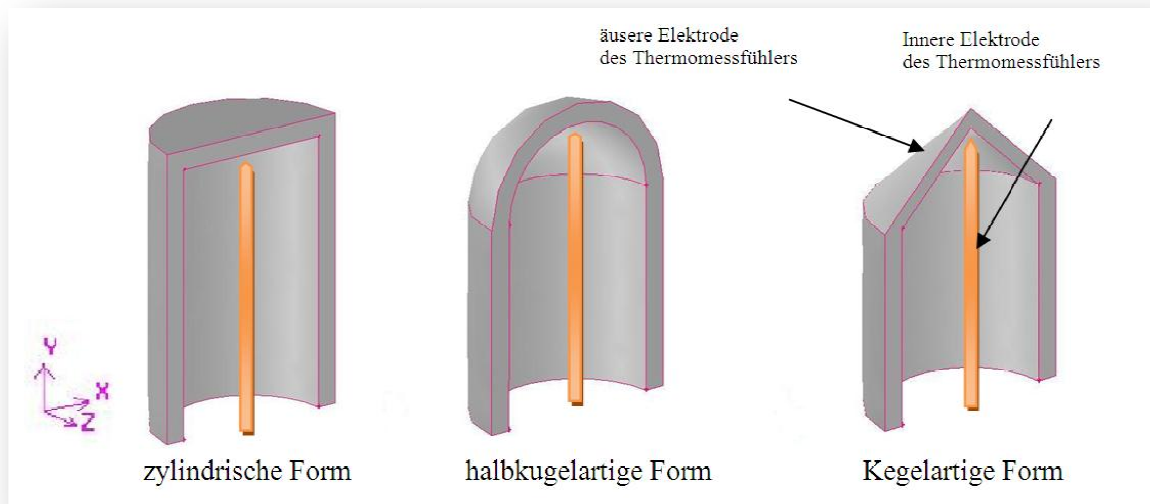


Abbildung 3.3: drei konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers

Die gesamte Geometrie des Kanal- und Thermomessfühlersystems ist symmetrisch zur xy -Ebene. Im Koordinatensystem ist die Strömungsrichtung die Richtung der positiven x -Achse. (Abbildung 3.2)

3.4 Vergitterung der Fluid- und Solidgeometrie mit Gambit

Die Vergitterung wird vom Gittergenerator Gambit durchgeführt. Gambit ist eine Hauptkomponente des FLUENT-Programms und bietet Werkzeuge zur Gittererzeugung. Das CAD-Modell wird in die Software Gambit mit der Methode „down-up“ (von Punkten bis Linien, von Linien bis Flächen, von Flächen und bis Volumen) importiert. Es ist in der Abbildung 3.4 gesehen, dass die Solidgeometrie von Thermomessfühlervolumen einen blauen Bereich der gesamten Fluidgeometrie bewirkt. (Abbildung 3.4)

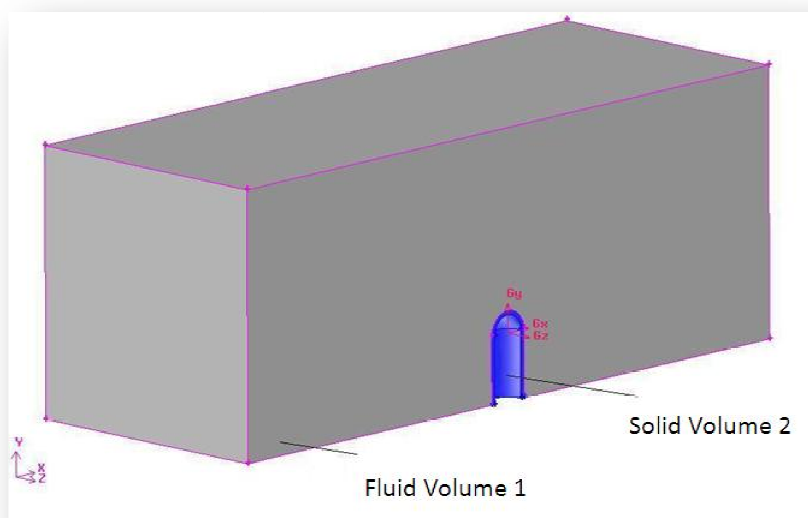


Abbildung 3.4: Fluid- und Solidgeometrie im Gambit

Für die Arbeit kann die gesamte Geometrie in zwei Teilvolumina unterteilt werden. (Abbildung 3.4)

die Angabe von Zonentypen werden in (Anhang A) (Tabelle A1) erklärt, und werden in Gambit definiert.

Die Qualität der Vergitterung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Die strukturierte Vergitterung bedeutet, dass innerhalb des Gitterbereichs alle inneren Gitterpunkte der benachbarten Einheiten gleich sind. Die Methode und Ablauf der Gittererzeugung wurden in [14] ausführlich beschrieben.

Dabei wurden zwei wichtige Schritte durchgeführt: Vernetzung der Solid_Volume, eine Grenzschicht einstellen, dann kommt die Vernetzung der Fluid_Volume, bei der Vernetzung von Fluid_Volume wird ein Grenzschicht rund um den Mantel des Thermomessfühlers gestellt, weil was uns sehr wichtig ist, ist die exakte Ergebnisse der numerischen Simulation von Thermomessfühler, und später werden wir die drei gestellte Modelle in FLUENT simulieren, und Enhanced Wall Treatment als Methode der k - ε verwenden (Abschnitt 3.5.1.1.2).

Hiermit ist die Vernetzungseigenschaft der Grenzschicht:

First Row=0.5, Growth Factor=1.2, Total Depth=4.965, Number of Rows =5.

Bei der Vernetzung der Fluid_Volume wird Scheme: default, und interval size=1 eingesetzt. (Abbildung 3.5)

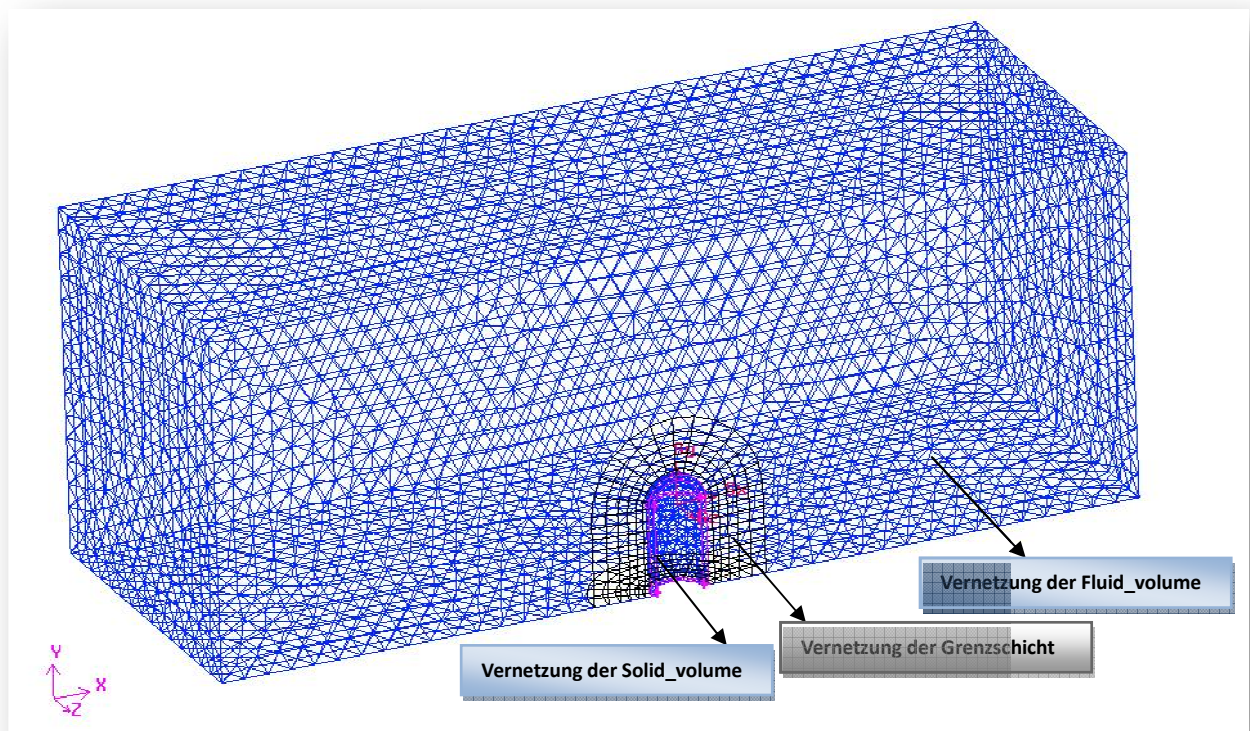


Abbildung 3.5: Vergitterung der Fluid-und Solidvolume

Nach der Einrichtung der Zonentypen im Gambit wurde die Gitter-Datei mit der Dateiendung „.msh“ exportiert. Die Datei enthält die Koordinaten aller Knoten, Informationen über die Kontinuität, die Zonentypen und Anzahl der Flächen. Aber sie enthält keine Informationen über die Randbedingungen, die Strömungsparameter oder die Parameter des Processings.

3.5 Turbulenzmodell

Turbulente Strömungen sind durch die schwankende Felder von Geschwindigkeit charakterisiert. Diese Schwankungen mischen transportierte Menge wie Momentum, Energie, und sortieren Konzentration, sowie bringen die transportierte Mengen zu schwanken. Da diese Schwankungen von kleiner und hoher Frequenz werden können, sind sie direkt in den praktischen technischen Berechnungen zur Simulation auch rechenaufwändig. Allerdings enthalten die modifizierten Gleichungen weitere unbekannte Variablen, und Turbulenzmodelle sind nötig, um diese Variablen in Bezug auf bekannte Größen zu bestimmen.

Turbulente Simulation enthält normalerweise direkte Numerische Simulation (DNS), Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) und die Large Eddy Simulation (LES). Das Turbulenzmodell dient in der numerischen Strömungssimulation zur Schließung des zugrundeliegenden Gleichungssystems. Da für turbulente Strömungen mit technisch relevanten Reynolds-Zahlen die Navier-Stokes-Gleichungen nicht numerisch berechnet werden können (DNS), werden die Größen in einen Mittelwert und einen Schwankungswert aufgeteilt. Zur Lösung wird dann ein Turbulenzmodell benötigt [16].

FLUENT bietet die folgenden Optionen der Turbulenzmodelle:

- Spalart-Allmaras model
- **k- ϵ** - models
 - Standard **k- ϵ** -model
 - Renormalization-group (RNG) **k- ϵ** - model
 - Realizable **k- ϵ** - model
- **k- ω** - models
 - Standard **k- ω** - model
 - Shear-stress transport (SST) **k- ω** - model
- **$\nu^2 - f$** model (add-on)
- Reynolds stress model (RSM)
 - Linear pressure-strain RSM model
 - Quadratic pressure-strain RSM model
 - Low-Re stress-omega RSM model
- Detached eddy simulation (DES) model
 - Spalart-Allmaras RANS model
 - Realizable **k- ϵ** -RANS model
 - SST **k- ω** -RANS model
- Large eddy simulation (LES) model
 - Smagorinsky-Lilly subgrid-scale model
 - WALE subgrid-scale model
 - Kinetic-energy transport subgrid-scale model

Die Wahl des Turbulenzmodell wird auf Überlegungen, wie die Physik in der Strömung umfasste abhängen, die gängige Praxis für eine bestimmte Klasse von Problemen, die erforderlichen Maß an Genauigkeit, die verfügbare Rechenleistung Ressourcen, und die Menge des zur Verfügung stehenden Zeit für die Simulation.

3.5.1 RANS

Die Reynolds- averaged Navier-Stokes (RANS) Gleichungen regeln den Transport der gemittelten flow Mengen, mit der ganzen Bandbreite der Skalen der Turbulenz, die modelliert. Die RANS-Modellierung Ansatz daher reduziert die erforderliche Rechenaufwand und Ressourcen und wird häufig für praktische Anwendungen Engineering angenommen. Eine ganze Hierarchie von Schließung Modelle sind erhältlich in FLUENT einschließlich Spalart-Allmaras, k- ϵ - und ihre Varianten, k- ω - und ihre Varianten und die RSM.

Die RANS Gleichungen werden häufig verwendet, um zeitabhängige Strömungen zu berechnen, deren Unsicherheit kann von außen auferlegt werden (zB zeitabhängige Randbedingungen oder Quellen) oder selbst erhaltende (zB Vortex-Shedding, Strömungsinstabilitäten).

3.5.1.1 Standard k- ϵ - Modell

Die einfachsten vollständigen Modelle der Turbulenz sind zwei Gleichungsmodelle, in denen ermöglicht die Löser aus zwei separaten Transportgleichungen, die turbulente Geschwindigkeits- und Längenskalen zu berechnen. Das Standard k- ϵ -Modell in FLUENT ist in dieser Klasse von Turbulenzmodellen und ist das Arbeitspferd der praktischen Engineering Flow Berechnungen in der Zeit geworden. Wegen seiner Robustheit, Wirtschaftlichkeit und ausreichenden Genauigkeit für verbreitete Range von turbulenten Strömungen, ist in der Industrie und der Wärmetransportsimulationen geeignet. Es ist ein semi-empirisches Modell.

3.5.1.1.1 Modelle von Standard k- ϵ Modell

Dieser Abschnitt stellt das Standard, RNG, und realisierbaren k- ϵ -Modell dar. Alle drei Modelle haben ähnliche Formen, mit guter Verknüpfung Gleichungen für k und ϵ . Die wichtigsten Unterschiede in den Modellen sind wie folgt:

- Die Methode zur Berechnung der turbulenten Viskosität.
- Die turbulente Prandtl-Nummern für die turbulente Diffusion von k und ϵ .
- Die Erzeugung und Zerstörung Begriffe in der ϵ -Gleichung.

3.5.1.1.2 Nahe-Wand Behandlung

Enhanced wall treatment ist eine nahe-Wand Modellierungsmethode, die eine Zwei-Schicht-Modell mit verbesserten Wandsfunktionen verbindet. Wenn das Mesh von nahe-Wand genug fein ist, um die laminare Unterschicht zu lösen, dann wird diese Methode identisch mit dem traditionellen zwei-Schicht Zonenmodell. Auf jeden Fall ist die Einschränkung dass, das nahe-Wand Mesh fein muss.

3.5.2 Large Eddy Simulation

Die Large Eddy Simulation (LES) ist auch ein Verfahren zur numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen, also solcher mit großen Reynolds-Zahlen. Anstelle der zeitlichen Mittelung tritt bei der Large Eddy Simulation eine zeitliche und räumliche Tiefpassfilterung. So lassen sich die großskaligen Grobstrukturen direkt berechnen (DNS) und die kleinskaligen Feinstrukturen werden über ein Turbulenzmodell abgebildet. Somit liegt die Aussagekraft und Rechenzeit zwischen der DNS und RANS. Die LES verspricht bei höherem Rechenaufwand eine bessere Beschreibung der Turbulenz als die statistischen Methoden, weil zumindest ein Teil der turbulenten Schwankungen wiedergegeben wird.

3.5.3 Rechenaufwand: CPU-Zeit und Lösungsverhalten

Im Hinblick auf die Berechnung ist die Spalart Allmaras-Modell am wenigsten teuer Turbulenzmodell der Optionen in FLUENT vorgesehen, da nur eine turbulente Transport Gleichung gelöst wird.

Das Standard k - ϵ - Modell erfordert deutlich mehr Rechenaufwand als die Spalart Allmaras-Modell, da ein zusätzlicher Transport-Gleichung gelöst wird.

Die realisierbaren k - ϵ -Modell erfordert nur wenig mehr Rechenaufwand als die Standard k - ϵ -Modell.

Jedoch aufgrund der zusätzlichen Begriffe und Funktionen in der regulierende Gleichungen und einen höheren Grad der Nichtlinearität, neigen die Berechnungen mit dem RNG- k - ϵ - Modell, es nimmt 10-15% mehr CPU-Zeit als Standard k - ϵ - Modell.

Wie die k - ϵ - Modelle sind die k - ω - Modelle zwei Gleichung-Modelle, und damit etwa die gleiche Rechenaufwand erfordern.

wegen der erhöhten Anzahl von Gleichungen für den Transport Reynoldsspannungen erfordert die RSM im Vergleich zur k - ϵ -, k - ω Modelle, zusätzliche Speicher-und CPU-Zeit.

Allerdings hat die effiziente Programmierung in FLUENT die CPU-Zeit pro Iteration signifikant verkürzt.

Im Durchschnitt benötigt der RSM in FLUENT 50-60% mehr CPU-Zeit pro Iteration im Vergleich zur k - ϵ -, k - ω Modelle.

Darüber hinaus wird 15-20% mehr Speicher benötigt.

Abgesehen von der Zeit pro Iteration, kann die Wahl der Turbulenzmodell beeinträchtigen die Fähigkeit von FLUENT um eine konvergierte Lösung zu erhalten.

[16].

3.6 Implementierung der Randbedingungen

Das sogenannte Processing präsentiert die Implementierung der Randbedingungen und Parameter, der Lösungsablauf zur Simulation und Realisierung der Berechnung. Die im Anhang A zusammengefassten Randbedingungen werden ins Programm eingegeben. Hier wird die Randbedingungen für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement im Windkanal als Beispiel gezeigt. (Abbildung 3.6, 3.7).

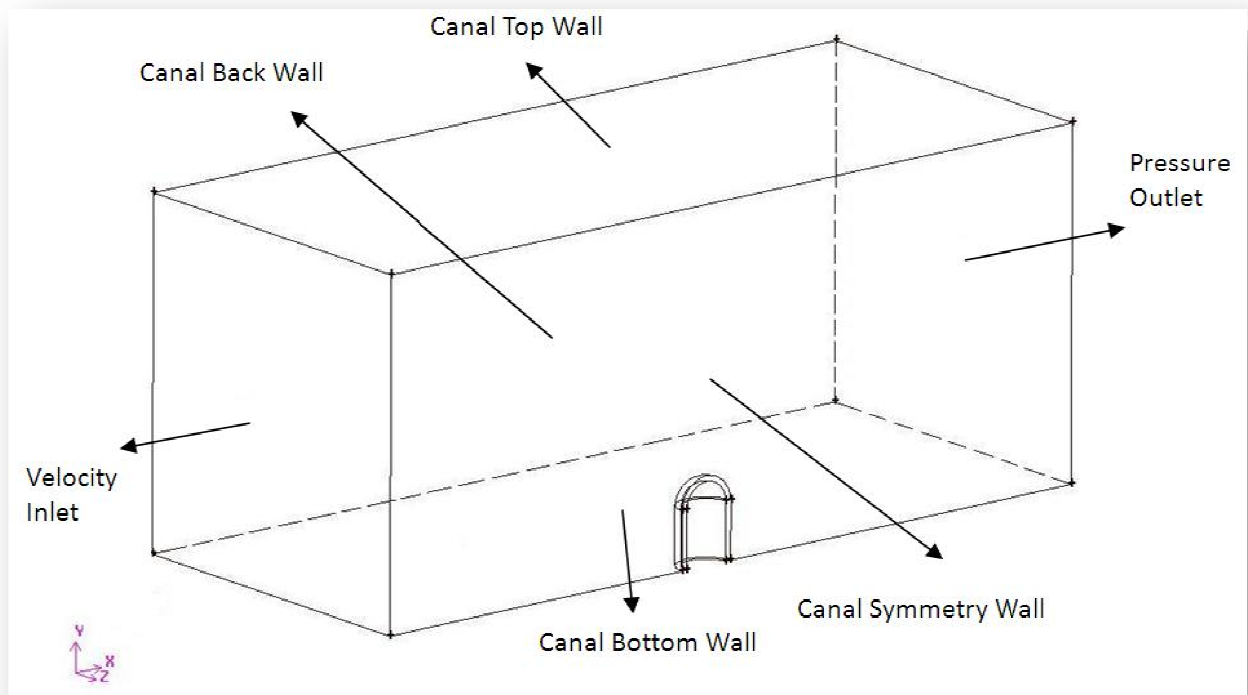
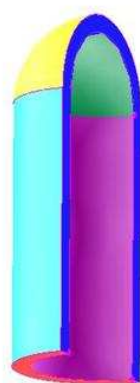


Abbildung 3.6 (a) : Randbedingungen der Fluid- und Solidgeometrie



- Fühler Top Wall
- Fühler cavity Top Wall
- Fühler Back Wall
- Fühler cavity Back Wall
- Fühler Bottom Wall
- Fühler Symmetry Wall

Abbildung 3.6 (b) : Randbedingungen der Fluid- und Solidgeometrie

3.7 Durchführung des Processings

Nachdem die Gitter-Dateien von Gambit ins FLUENT-Programm eingegeben wurden, kann das Processing der Simulation durchgeführt werden. numerischen Simulationen des Standard-k- ϵ -Modells wird in unserer numerischen Simulation durchgeführt (Anhang A5).

Die Luft Temperatur im Windkanal ist 20 c°, und die Temperatur von Thermomessfühler an der Anfangsbedingung ist 30 c°.

Die numerische Simulation wird für zwei Prozesse durchgeführt, wie im Ziel der numerische Simulation erklärt wird, und zwar

Erstens:

für die Berechnung von Ansprechzeit werden wir unsteady state in FIUENT verwenden, und einen bestimmten Punkt (Schweißstelle der inneren Elektrode von Thermopaar mit der äußeren Elektrode von Thermopaar) im Zentrum und in innerer Seite von jeder Konstruktion des Mantel des Thermoelement definieren.

Wie in analytische Untersuchung erklärt wurde, erhalten wir die Ansprechzeit, wenn die Temperatur von dieser Punkt (Anhang B1, B2, B13 Nr.4) erreicht die Temperatur von 63.2. % von der Lufttemperatur.

Der Thermomessfühler wird mit Laufe der Zeit wegen der Strömung von Luft abgekühlt, diese Abkühlungszeit t_A des Mantels von 30 c° bis 23.68 C° müssen wir bestimmen, das wird in Folgenden erklärt:

Wir starten die Simulation mit der Geschwindigkeit der Luftströmung 10 m/s, und finden die Ansprechzeit, dann setzen wir die Luftgeschwindigkeit 20 m/s und dann 30 m/s ein. (Abbildung A10).

Zuerst werden die Zeitschritte (,Time Step Size‘) 0.5s eingegeben. Wenn die Temperatur des untersuchten Punkts (Abbildung B 1, 2,3) in der Nähe von Ansprechzeit t_A ist, kann man die Wert 0.1s eingeben. Die Zeitschrittzahl (,Number of Time Steps‘) muss größer als 0 sein. Die max. Iterationen werden auf 300 Schritte erhöht, damit der Prozess der iterativen Berechnung länger dauern kann, und die Resultate der Simulation mehr genauer sein

Je größer die Anfangsgeschwindigkeit ist, desto leichter ist die Solution zu erreicht.

Zweitens:

für die Ermittlung der Werte von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient h, werden wir steady state in FLUENT verwenden, und nach der Iteration von case werden wir die

Werte von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient h ausdrucken.

Wir starten die Simulation mit der Geschwindigkeit der Luftströmung 5 m/s, und drucken wir die Werte von Nu, h , dann setzen wir die Luftgeschwindigkeit 10 m/s, dann 20 m/s, dann 30m/s ein, und jedesmal drucken wir die Werte von Nu, h . (Abbildung A9).

Hier müssen wir beachten, dass es unterschiedliche ungleiche Werte von Nu, h jenach der Region des Mantel von Thermoelement gibt.

Das FLUENT Programm wird alle diese Werte von Nu, h plotieren, dann nehmen wir die durchschnittliche Wert.

Die Bedienungsanleitung des FLUENT-Programms und der Ablauf des Processings für die beide Prozesse werden ausführlich im Anhang A realisiert.

3.8 Analyse und Vergleich der simulierten Resultaten

3.8.1 Ergebnisse und Vergleich der Ansprechzeit t_A

Nach dem Post-Processing werden im folgenden Abschnitt die Ergebnisse des Processings mit FLUENT analysiert.

Die Tabellen 3.1, 3.2, 3.3 und die Diagrammen 3.1, 3.2, 3.3 zeigen die Temperaturen des Thermomessfühlers im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A , von drei simulierten Konstruktionen des Thermomessfühlers, der sein Mantel aus Edelstahl V2A (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301 ist, jeweils drei Geschwindigkeiten des Luftstroms.

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.72	1	28.39	1	28.16
2	27.57	2	26.99	2	26.60
3	26.59	3	25.84	3	25.36
4	25.74	4	24.88	4	24.35
5	25.01	5	24.09	4.7	23.68
6	24.37	5.6	23.68		
7	23.81				
7.2	23.68				

Tabelle 3.1: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit zylindrische Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel)

Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für zylindrische Form (Edelstahl)

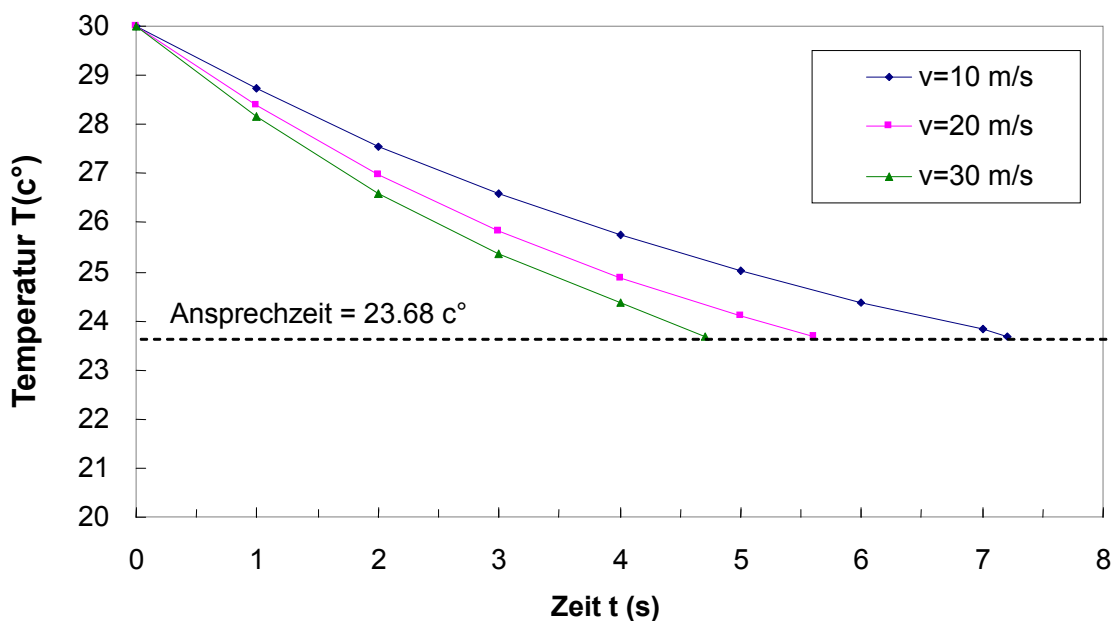


Diagramm 3.1 Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für

zylindrische Form (Edelstahl-Mantel)

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.68	1	28.26	1	27.97
2	27.59	2	26.91	2	26.43
3	26.66	3	25.80	3	25.22
4	25.85	4	24.89	4	24.26
5	25.14	5	24.12	4.7	23.68
6	24.52	5.7	23.68		
7	23.98				
7.5	23.68				

Tabelle 3.2: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit halbkugelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel)

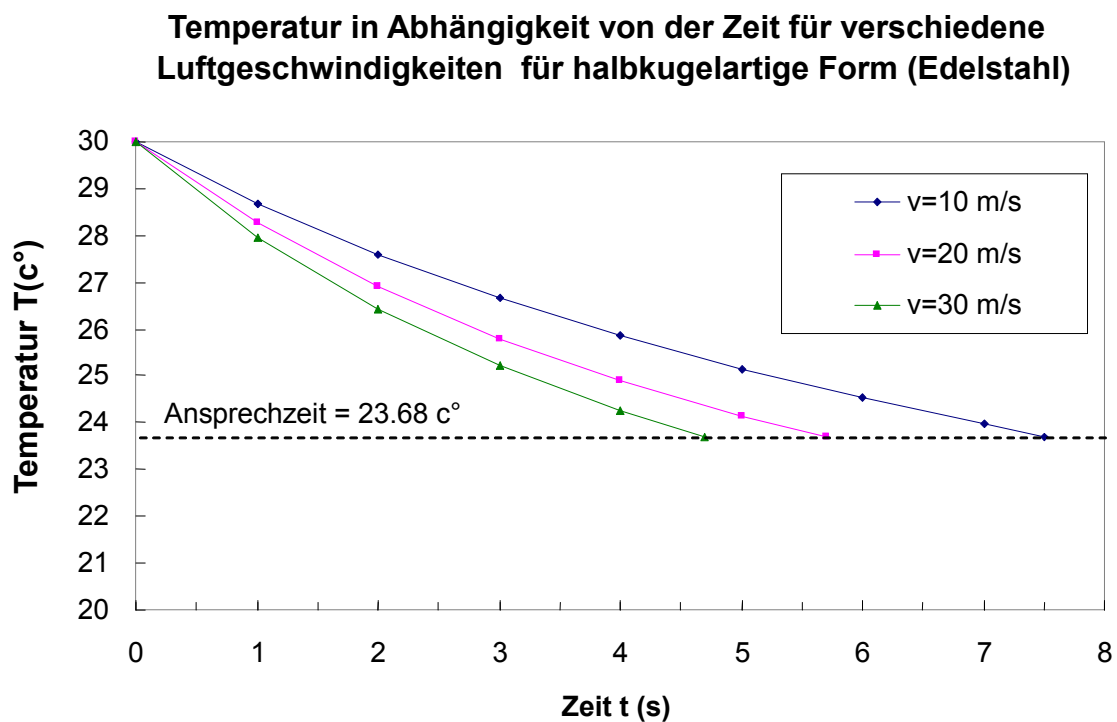


Diagramm 3.2: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für halbkugelartige Form (Edelstahl-Mantel)

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.35	1	27.96	1	27.65
2	27.17	2	26.55	2	26.10
3	26.22	3	25.46	3	24.92
4	25.41	4	24.57	4	23.99
5	24.71	5	23.83	4.3	23.68
6	24.10	5.2	23.68		
6.7	23.68				

Tabelle 3.3: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit kegelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel)

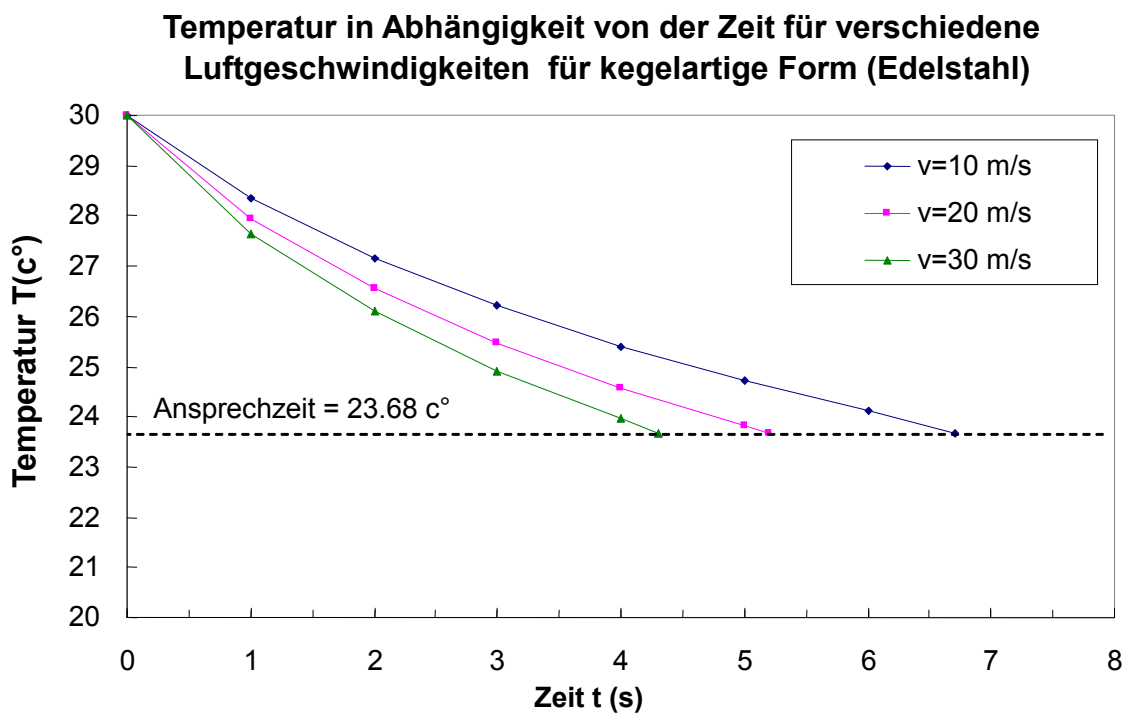


Diagramm 3.3: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für kegelartige Form (Edelstahl-Mantel)

Die Tabellen 3.4, 3.5, 3.6 und die Diagrammen 3.4, 3.5, 3.6 zeigen die Temperaturen des Thermomessfühlers im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A , von drei simulierte Konstruktionen des Thermomessfühlers, der sein Mantel aus Kupfer ist, jeweils drei Geschwindigkeiten des Luftstroms.

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.56	1	28.19	1	27.92
2	27.44	2	26.82	2	26.39
3	26.47	3	25.68	3	25.16
4	25.63	4	24.74	4	24.17
5	24.90	5	23.95	4.5	23.68
6	24.26	5.3	23.68		
7	23.68				

Tabelle 3.4: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit zylindrische Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kupfer-Mantel)

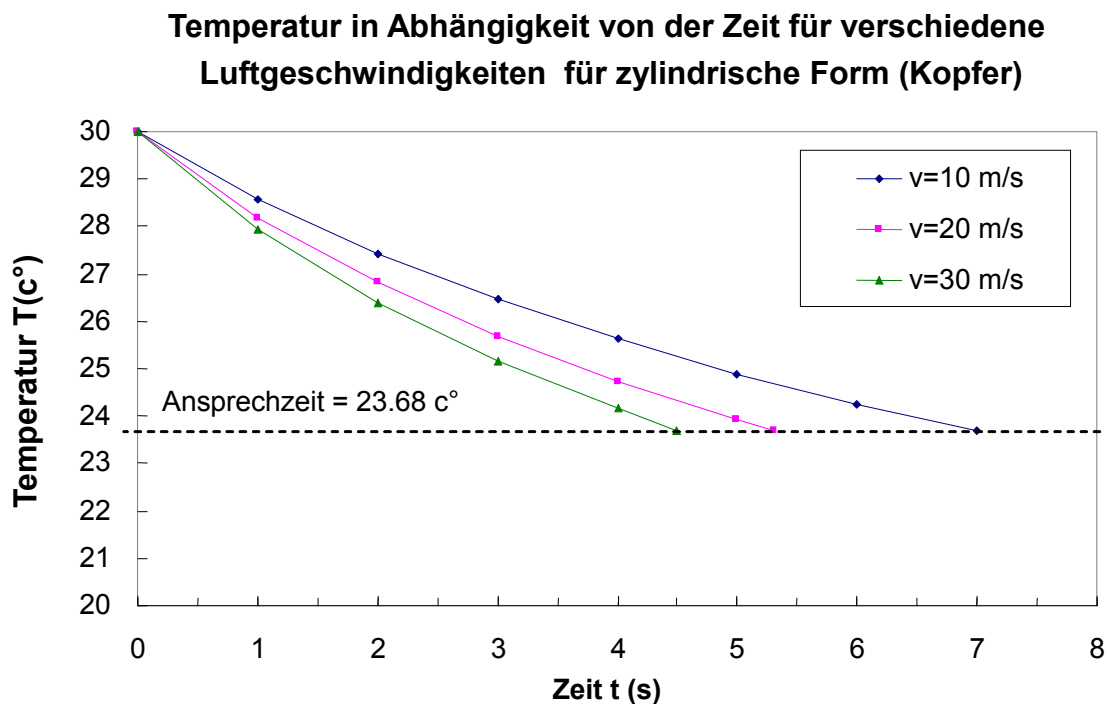


Diagramm 3.4: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für zylindrische Form (Kupfer-Mantel)

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.63	1	28.29	1	28.01
2	27.58	2	27.01	2	26.57
3	26.66	3	25.93	3	25.39
4	25.85	4	25.02	4	24.42
5	25.14	5	24.22	4.8	23.68
6	24.52	5.7	23.68		
7	23.97				
7.5	23.68				

Tabelle 3.5: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit halbkugelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kopfer-Mantel)

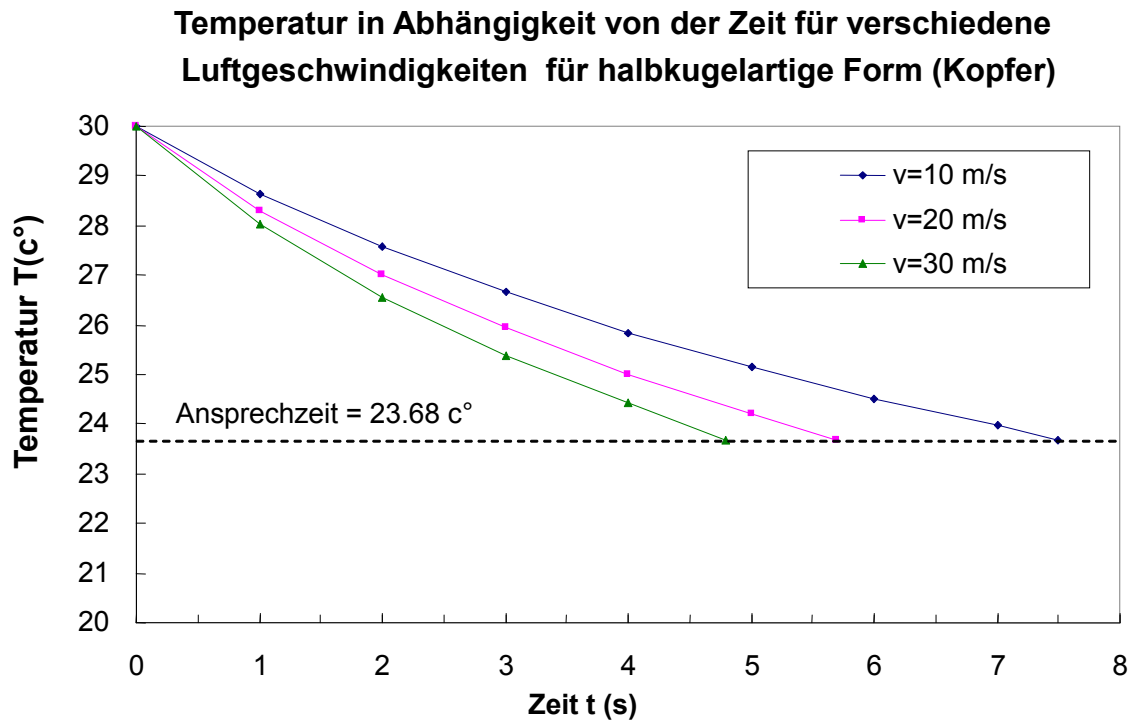


Diagramm 3.5: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für halbkugelartige Form (kopfer-Mantel)

v=10 m/s		v=20 m/s		v=30 m/s	
Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°	Zeit s	Temperatur c°
0	30.00	0	30.00	0	30.00
1	28.54	1	28.18	1	27.90
2	27.35	2	26.92	2	26.49
3	26.46	3	25.86	3	25.33
4	25.68	4	24.96	4	24.37
5	24.99	5	24.19	4.7	23.68
6	24.39	5.6	23.68		
6.7	23.68				

Tabelle 3.6: die Temperaturen des Thermomessfühlers mit kegelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kopfer-Mantel)

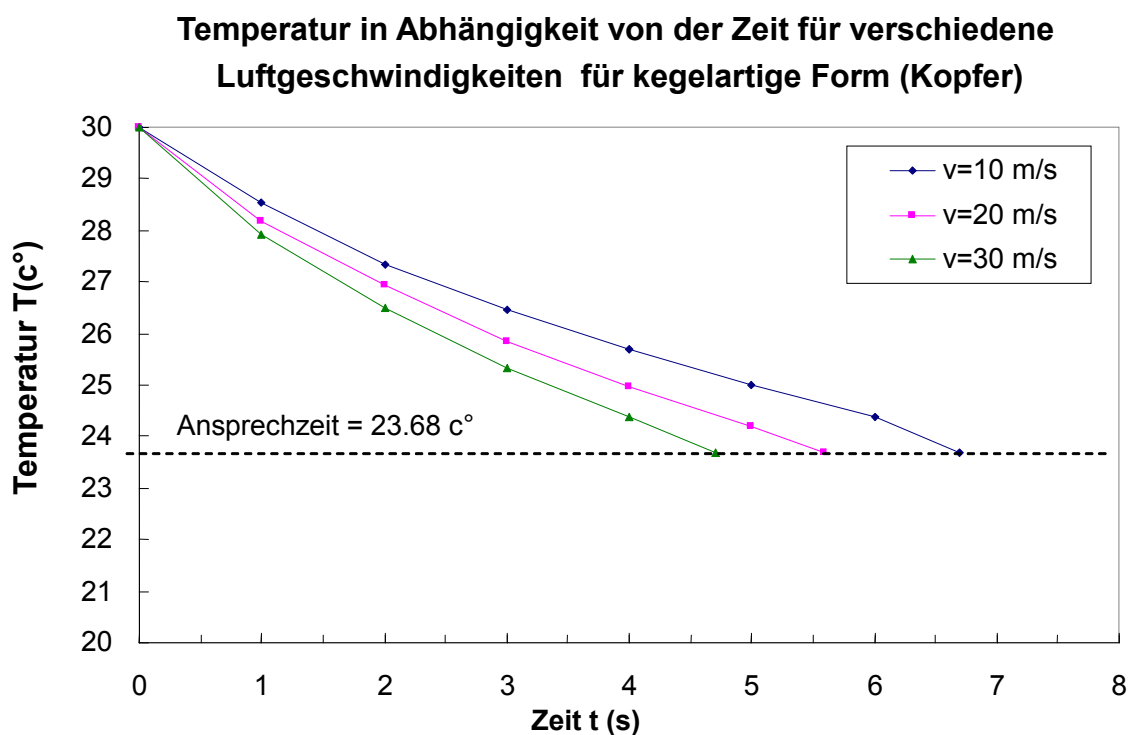


Diagramm 3.6: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für kegelartige Form (kopfer-Mantel)

Die folgende Tabelle 3.7 und das Diagramm 3.7 zeigen die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermoelement, Mantel aus Edelstahl.

Luftgeschwindigkeit	Ansprechzeit der kegelartige Form	Ansprechzeit der halbkugelartige Form	Ansprechzeit der zylindrische Form
V m/s	t s	t s	t s
10	6.7	7.5	7.2
20	5.2	5.7	5.6
30	4.3	4.7	4.7

Tabelle 3.7: die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Edelstahl-Mantel)

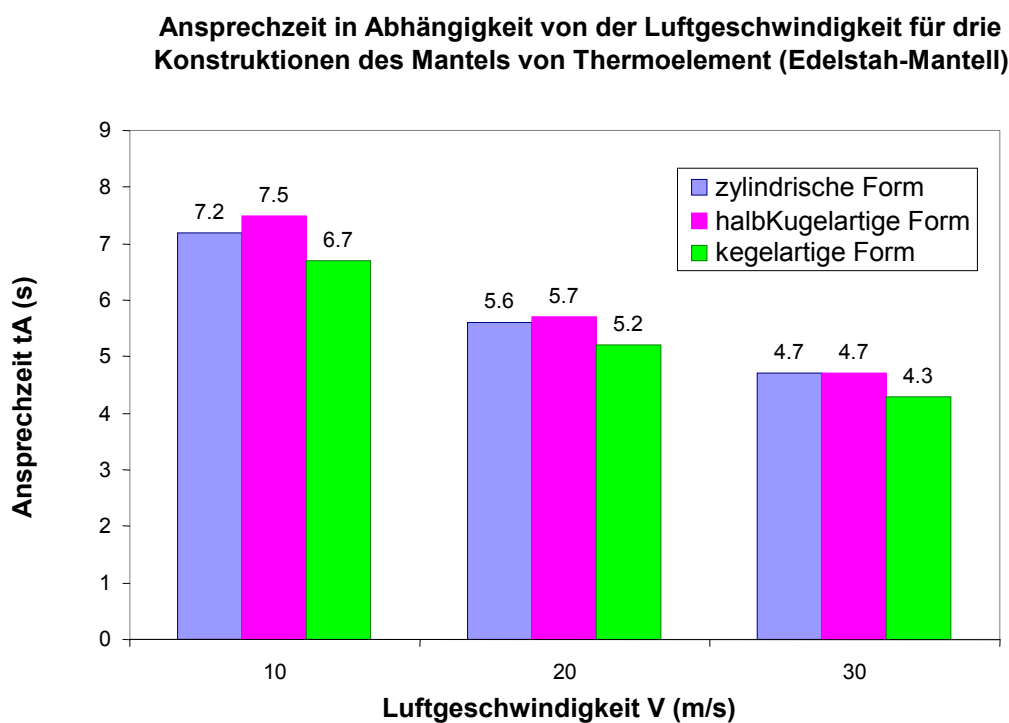


Diagramm 3.7: die Ansprechzeit im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Edelstahl-Mantel)

Die folgende Tabelle 3.8 und das Diagramm 3.8 zeigen die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermoelement, Mantel aus Kupfer.

Luftgeschwindigkeit	Ansprechzeit der kegelartige Form	Ansprechzeit der halbkugelartige Form	Ansprechzeit der zylindrische Form
v m/s	t s	t s	t s
10	6.7	7.5	7.0
20	5.6	5.7	5.3
30	4.7	4.8	4.5

Tabelle 3.8: die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (kupfer-Mantel)

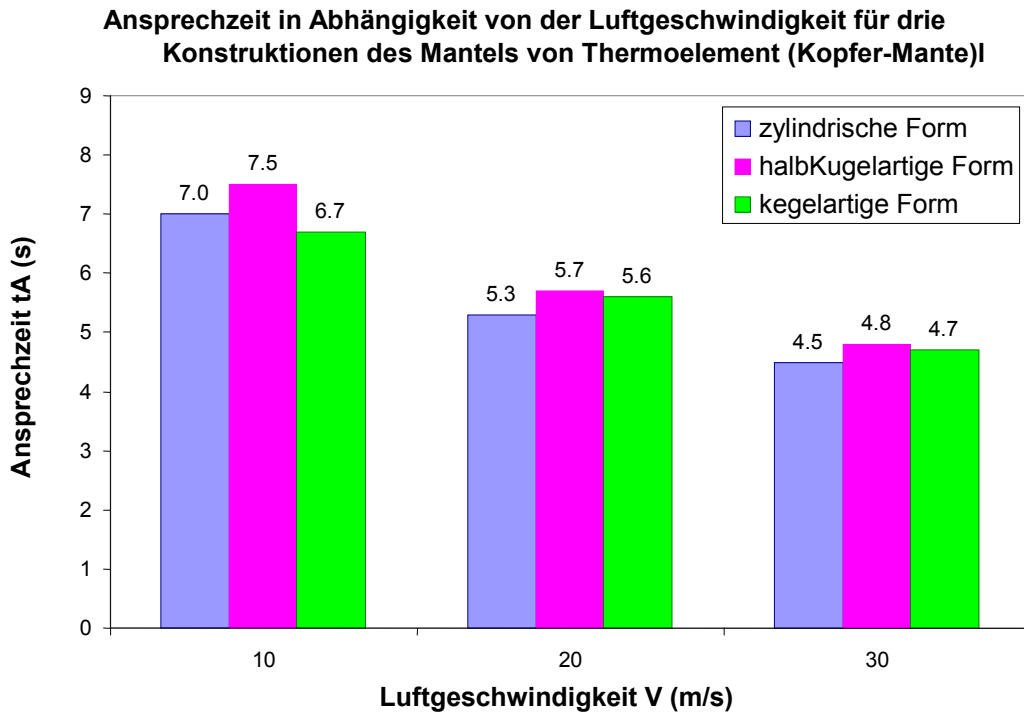


Diagramm 3.8: die Ansprechzeit im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (kopfer-Mantel)

Das folgende Diagramm 3.9 zeigt die Ansprechzeit des Thermomessfühlers für drei Konstruktionen und zwei verwendete Metalle als Mantel des Thermomessfühlers (Edelstahl, Kupfer) in Abhängigkeit von der folgenden Luftgeschwindigkeiten 10 m/s, 20m/s, 30 m/s.

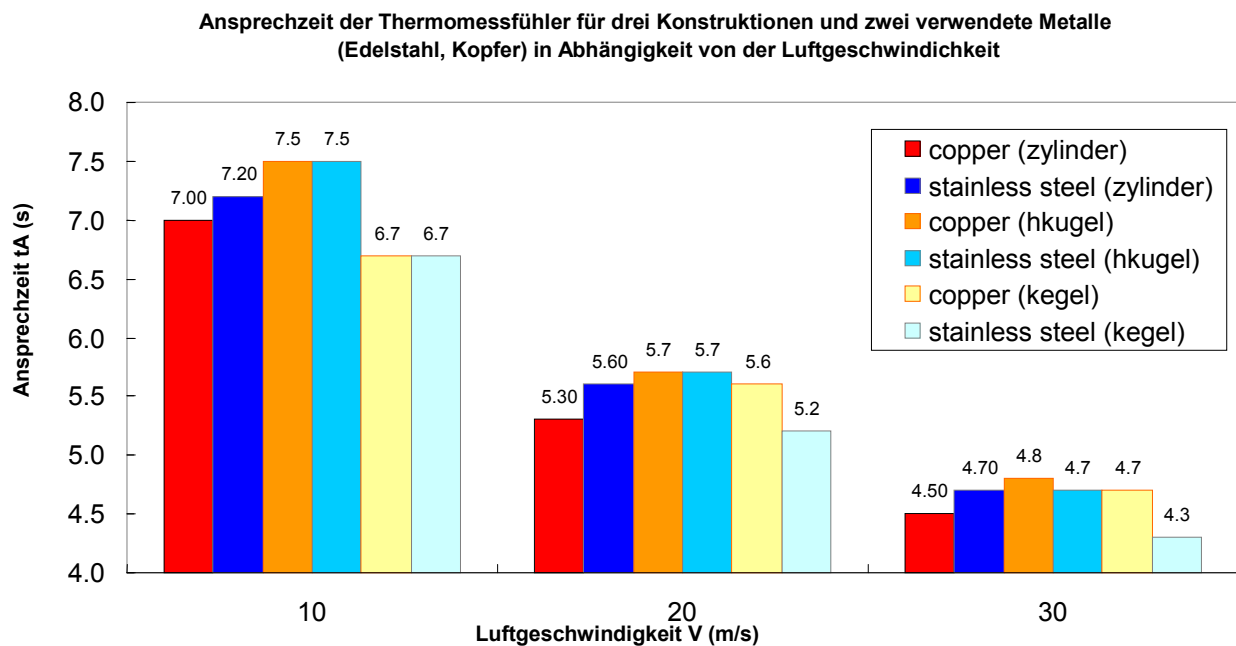


Diagramm 3.9: Ansprechzeit des Thermomessfühlers für drei Konstruktionen und zwei verwendete Metalle (Edelstahl, Kupfer) im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit

3.8.2 Ergebnisse und Vergleich der Nuseelt Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient

die Tabelle 3.9 und das Diagramm 3.10 zeigen die numerische Werte von Nu Zahl für drei Konstruktionen des Mantels von Thermoelement für verschiedene Luftgeschwindigkeiten

Nu Zahl für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen, für halbkugelartige- und kegelartige Form sind die Werte von Nu Zahl ungefähr gleich.

Luftgeschwindigkeit v m/s	Nu zylindrische Form	Nu halbkugelartige Form	Nu kegelartige Form
5	24.7	6.0	6.5
10	32.6	9.3	9.0
20	50.7	13.3	13.7
30	65.9	17.0	17.8

Tabelle 3.9: die numerische Werte von Nu Zahl für drei Konstruktionen der Thermomessfühler für verschiedene Luftgeschwindigkeiten

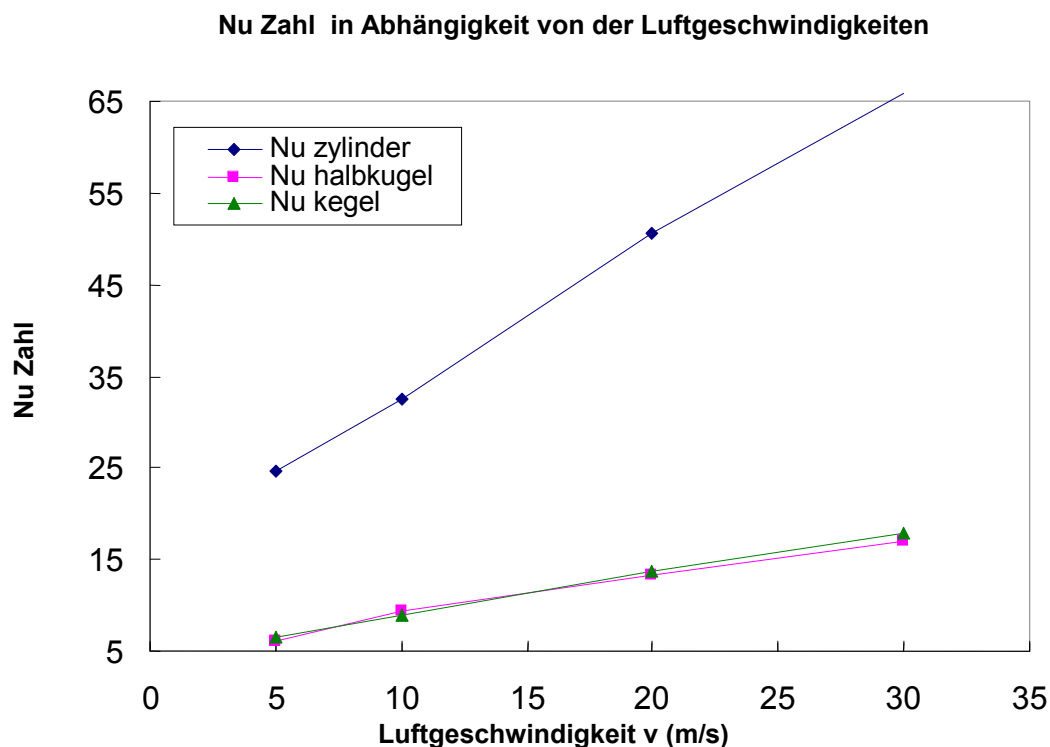


Diagramm 3.10: Nu Zahl für drei Konstruktionen der Thermomessfühler für verschiedenen Luftgeschwindigkeiten

die Tabelle 3.10 und das Diagramm 3.11 zeigen die numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient h für drei Konstruktionen des Mantels von Thermoelement für verschiedene Luftgeschwindigkeiten.

Wärmeübertragungskoeffizient h für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen,

für halbkugelartige- und kegelartige Form sind die Werte von der ungefähr gleich.

Luftgeschwindigkeit v m/s	h zylindrische Form $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	h halbkugelartige Form $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	h kegelartige Form $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
5	119.8	88.3	95.00
10	158.0	135.0	132.00
20	245.5	194.0	200.00
30	319.0	247.0	259.40

Tabelle 3.10: die numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient h für drei Konstruktionen des Thermomessfühlers für verschiedene Luftgeschwindigkeiten

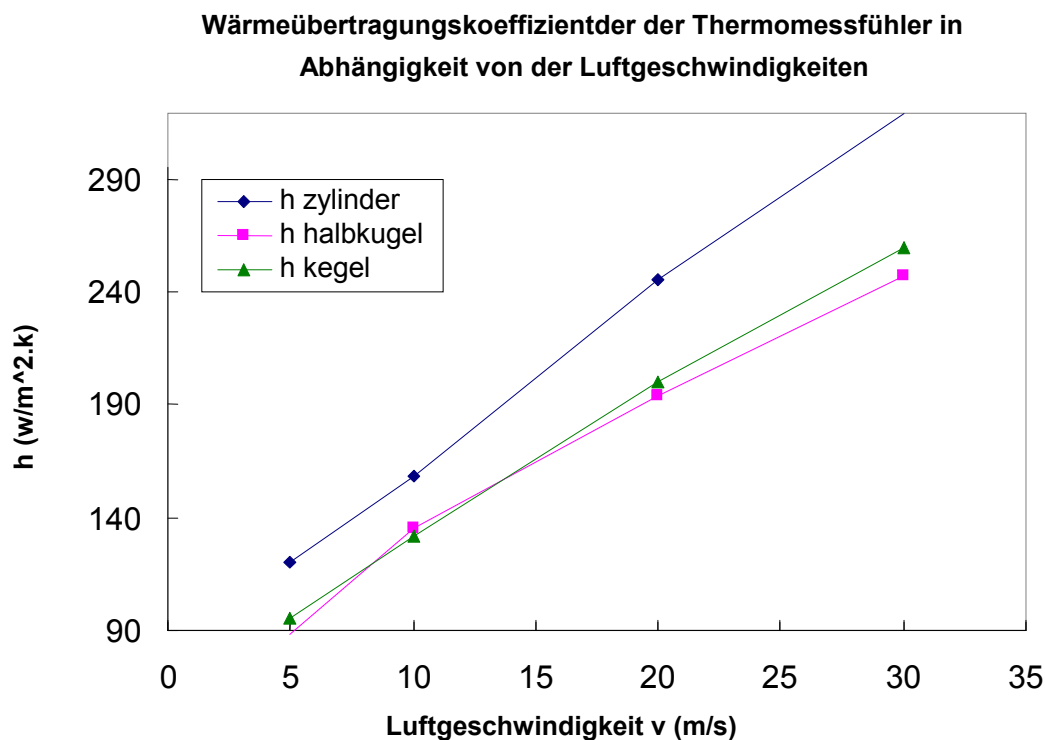


Diagramm 3.11: Wärmeübertragungskoeffizient h für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

3.8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die numerische Resultaten werden durch viele Faktoren beeinflusst, nämlich durch die Feinheit der Gitterung von Fluid und Solid Domäne in FLUENT, und die richtige Eingabe von Randbedingungen der Aufgabe.

Während des Ausdrucks (plott) (Anhang A, Abbildung: A18) von der Werten der Nu Zahl, und Wärmeübertragungskoeffizient h , ist es sehr wichtig die charakteristische Strömungsdurchmesser des Gegenstandes L in „Reference value“ in FLUENT Programm richtig einzugeben, da Werte Einfluss auf die richtige Re , Nu Zahlen haben.

Durch Betrachtung die Diagramme 2.9, 2.10, und 2.11 sind die folgenden Folgerungen zusammengefasst:

- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Edelstahl besitzt in alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement die schnellste Ansprechzeit als Kupfer, und je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Metallen.
- Die kegelartigen Form (Edelstahl-Mantel) besitzt die schnellste Ansprechzeit.
- Die zylindrische Form (Kupfer-Mantel) von Thermoelement kommt auf dem zweitem Platz.
- Die Nu Zahl für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen, für halbkugelartige- und kegelartige Formen sind die Werte von Nu Zahl ungefähr gleich.
- Der Wärmeübertragungskoeffizient h für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen, die Werte für halbkugelartige- und kegelartige Form sind ungefähr gleich.

4 vergleich der analytischen- mit der numerischen Ergebnissen

4.1 Ansprechzeit t_A

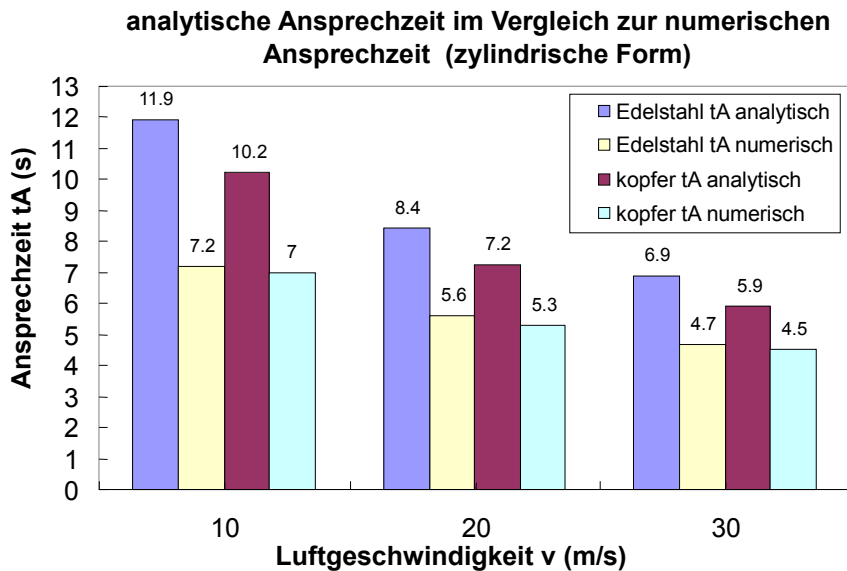


Diagramm 4.1: analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)

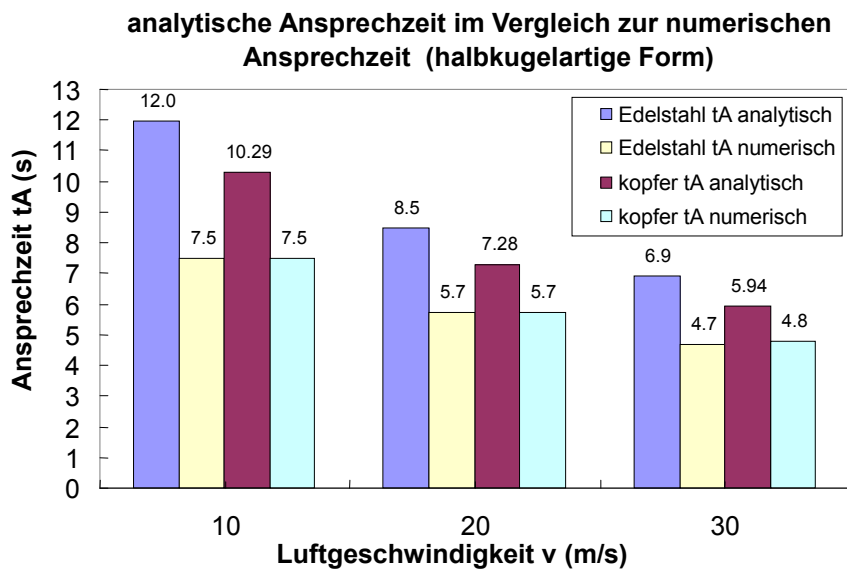


Diagramm 4.2: analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)

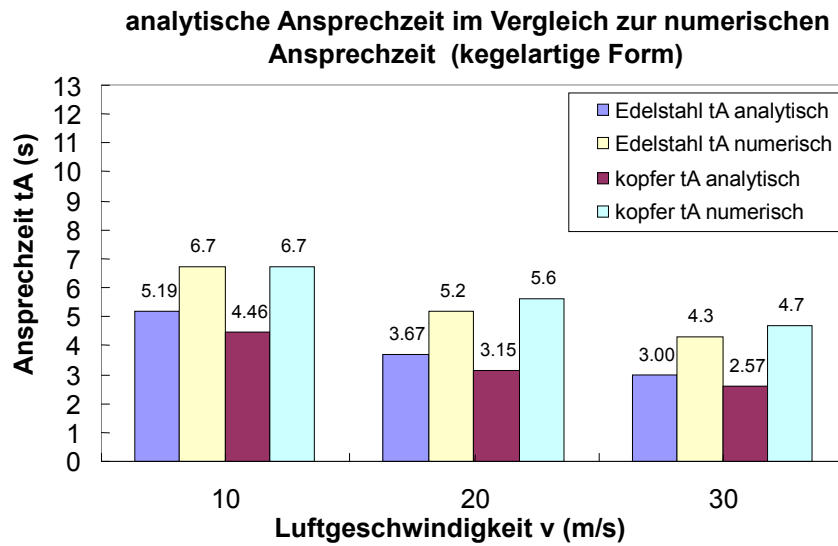


Diagramm 4.3: analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)

4.2 Wärmeübertragungskoeffizient

u m/s	h $w/(m^2 \cdot k)$ analytisch	h $w/(m^2 \cdot k)$ numerisch
5	119	119.8
10	168	158.0
20	237	245.5
30	291	319.0

Tabelle 4.1: Die analytische und numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient (zylindrische Form des Mantels)

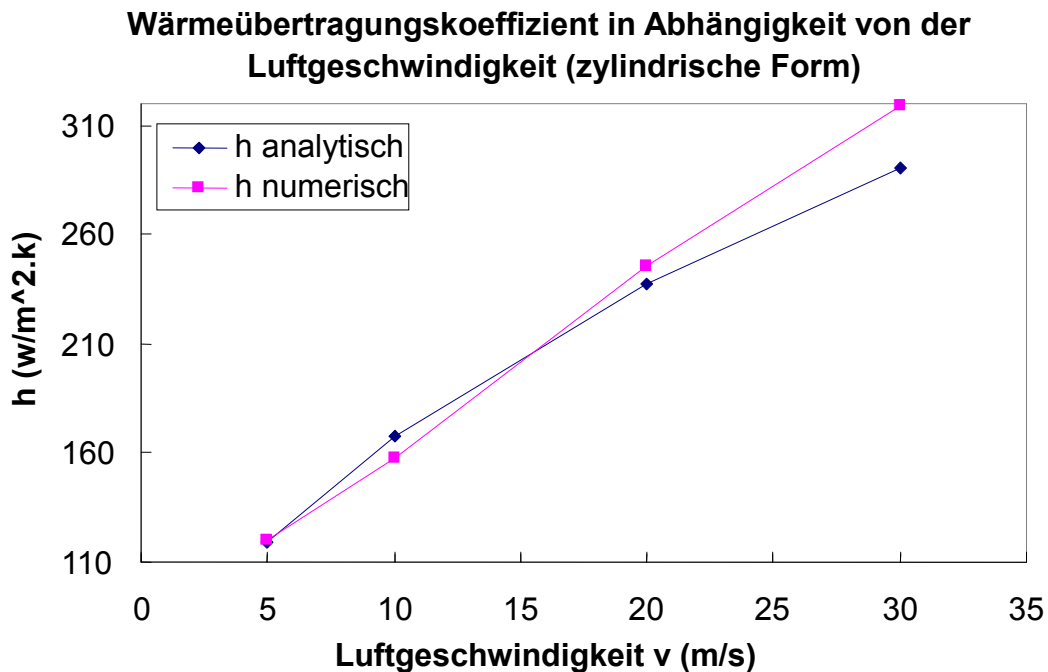


Diagramm 4.4: analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)

v m/s	h analytisch	h numerisch
5	96	88.3
10	136	135
20	192	194
30	235	247

Tabelle 4.2: Die analytische und numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient (halbkugelartige Form des Mantels)

Wärmeübertragungskoeffizient in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (halbkugelartige Form)

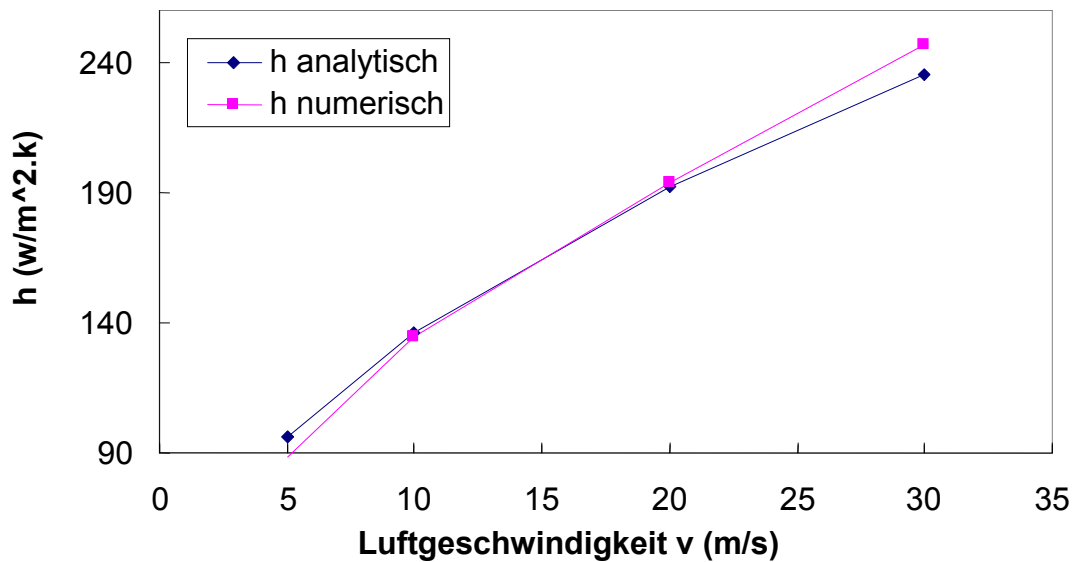


Diagramm 4.5: analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)

v m/s	Nu analytisch	Nu numerisch	h analytisch	h numerisch
5	6.9	6.5	101	95
10	9.8	9	143	132
20	13.8	13.7	202	200
30	16.9	17.8	247	259.4

Tabelle 4.3: Die analytische und numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient (kegelartige Form des Mantels)

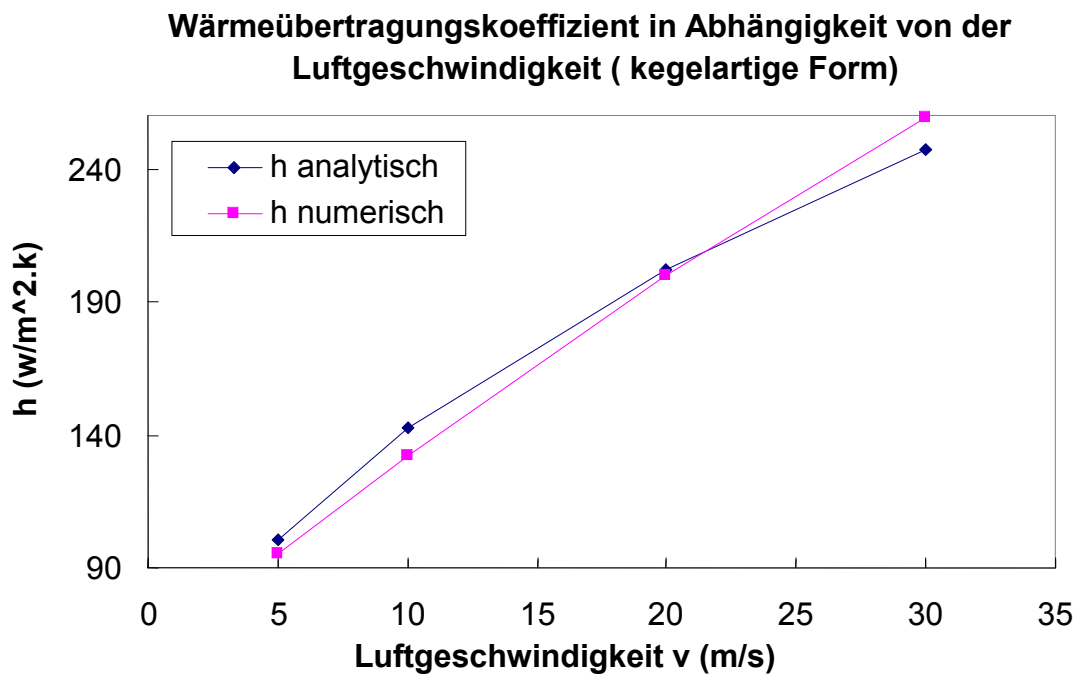


Diagramm 4.6: analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)

4.3 Nu Zahl

v m/s	Nu analytisch	Nu numerisch
5	24.5	24.7
10	34.7	32.6
20	49.1	50.7
30	60.1	65.9

Tabelle 4.4: Die analytische und numerische Werte von Nu Zahl (zylindrische Form des Mantels)

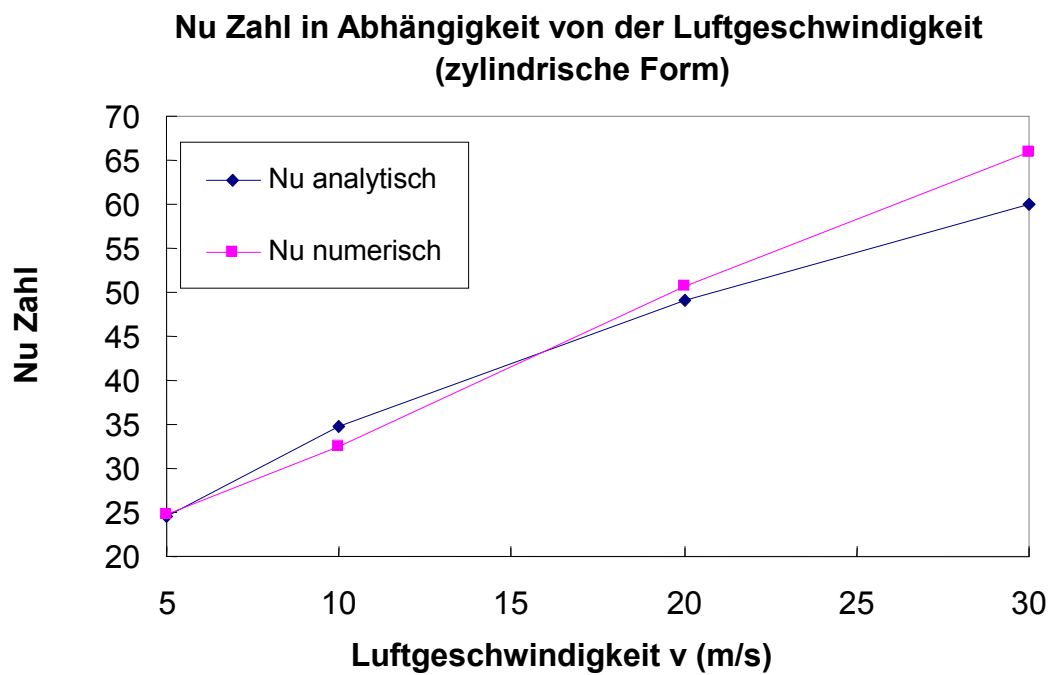


Diagramm 4.7: analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)

v m/s	Nu analytisch	Nu numerisch
5	6.6	6
10	9.4	9.3
20	13.2	13.3
30	16.2	17

Tabelle 4.5: Die analytische und numerische Werte von Nu Zahl (halbkugelartige Form des Mantels)

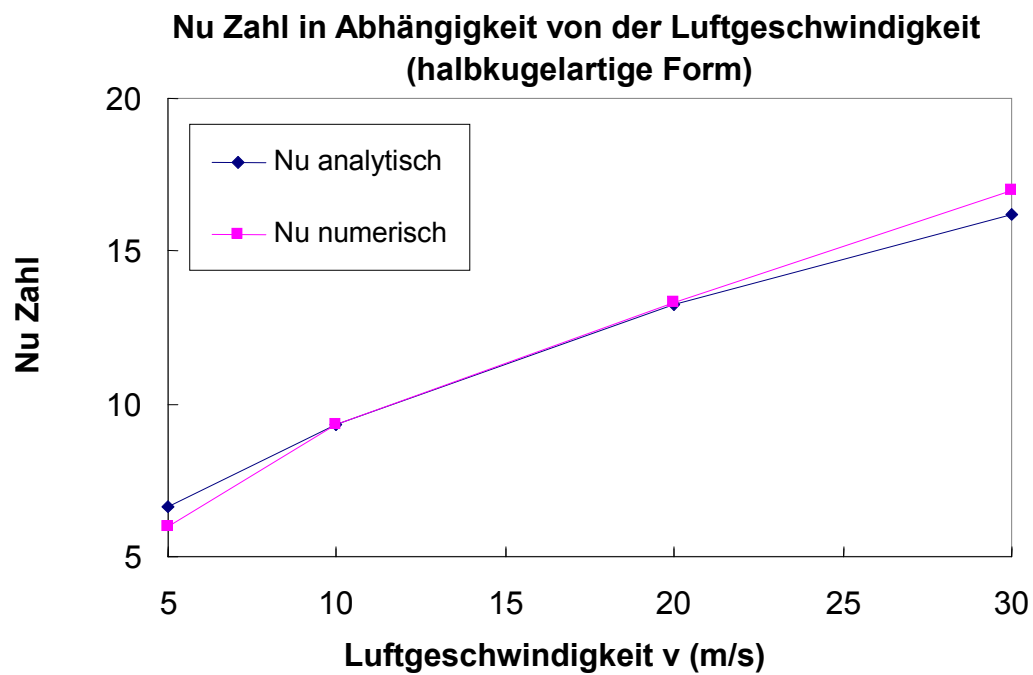


Diagramm 4.8: analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)

v m/s	Nu analytisch	Nu numerisch
5	6.9	6.5
10	9.8	9
20	13.8	13.7
30	16.9	17.8

Tabelle 4.6: Die analytische und numerische Werte von Nu Zahl (kegelartige Form des Mantels)

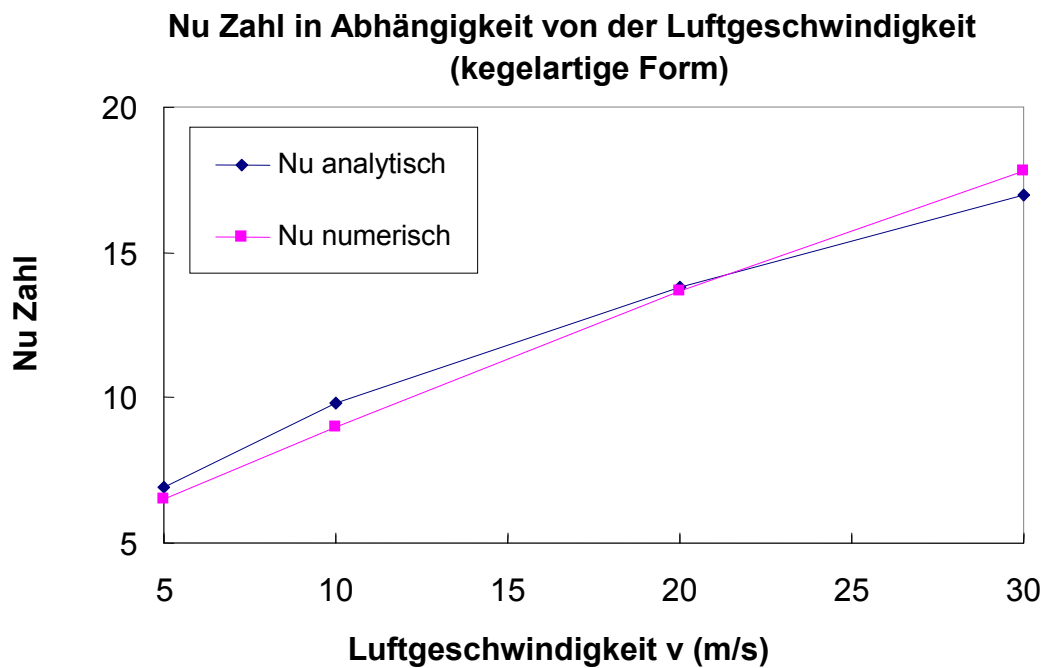


Diagramm 4.9: analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)

4.4 Zusammenfassung

Der Unterschied zwischen der analytischen und numerischen Ergebnisse wird wie folgt begründet:

Nu Zahl Korrelation 2.15, 2.16, 2.17 (Abschnitt 2.3.3), die in der analytischen Berechnung verwendet werden, und die im FLUENT Programm einsetzen unterscheiden sich.

Die Feinheit der Gitterung, die durch Gambit 3d Programm realisiert wird, das verwendete Modell des Solver im Simulationsverfahren, und die richtige Randbedingungen für die verschiedenen Zonentypen spielen hier eine große Rolle in unterschiedlichen Resultaten.

In den gezeigten Diagrammen 4.1, 4.2, 4.3 können wir die folgenden Folgerungen zusammenfassen:

- Für alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement: Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Für zylindrische Form (Kopfer-Mantel) von Thermoelement ist die Ansprechzeit von numerischen Simulation schneller als analytische Berechnung.
- Für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement ist die Ansprechzeit von numerischen Simulation und analytische Berechnung gleich.
- Für kegelartige Form (Kopfer-Mantel) von Thermoelement ist die Ansprechzeit von analytischen Berechnung schneller als die der numerischen Simulation.
- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Methoden (analytische-und numerische Methode).

In den gezeigten Diagrammen 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 können wir die folgenden Folgerungen zusammenfassen:

- Die analytische- und numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient h und Nu Zahl haben einen kleinen Unterschied. Für halbkugelartige Form sind diese Werte fast identisch im Bereich der Luftgeschwindigkeit (20-30 m/s).
- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto größer sind die Werte von h und Nu.

4.5 Sonstige Einflussfaktoren

Außer den oben beschriebenen Gründen müssen die folgenden wichtigen Einflussfaktoren auch berücksichtigt werden:

- Reale Viskosität der Luft
- Reale Dichte der Luft und der verwendeten Metalle
- Reale Wärmekapazität der Luft der verwendeten Metalle
- Reale Wärmeleitfähigkeit der Luft
- Übertragungsfehler der Datenkette des Programms

5 Schlussfolgerungen

Die Simulationsergebnisse der Ansprechzeit des Thermomessfühlers mit FLUENT-Programm und die Schlussfolgerungen des Vergleichs mit analytischen Berechnungen werden in Folgenden zusammengefasst.

5.1 Zusammenfassung der Arbeit

Wir konzentrieren uns in dieser Arbeit vor allem auf drei Teile. Das erste Teil beschreibt die analytische Berechnung der Ansprechzeit des Thermomessfühlers für verschiedene Kombinationen (Metallen und Konstruktionen). Das zweite Teil ist die numerische Simulation des Thermomessfühlers mit FLUENT. Anschließend ist das dritte Teil der Vergleich der analytischen Ergebnisse von Ansprechzeit, Nu Zahl, und Wärmeübertragungskoeffizient h mit der numerischen Resultaten.

5.1.1 Folgerungen der analytischen Berechnung

In dieser analytische Berechnung wurden verschiedene Kombinationen (Konstruktion und Metall) des Mantels von Thermoelement unter bestimmten Bedingungen um die schnellste Ansprechzeit zu realisieren berechnet. Die drei Konstruktion sind: kegelartige Form, halbkugelartige Form, und zylindrische Form. (Abbildung 3.3)

Dafür haben wir zwei Metalle Edelstahl (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301, und Kupfer als Metall für das Mantel benutzt.

Diese für jede Kombinationen berechnete Ansprechzeit, Nu Zahl, Wärmeübertragungskoeffizient h wurden mit numerischen Resultaten verglichen.

Die Schwerpunkte werden in Folgenden zusammengefasst:

- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Kupfer besitzt in alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement die schnellste Ansprechzeit als Edelstahl, und je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Metallen.
- Die Ansprechzeit der kegelartigen Form (Kupfer-Mantel) besitzt die schnellste Ansprechzeit.
- Auf dem zweiten Platz der Thermoelemente ist Kegelartige Form (Edelstahl-Mantel).
- Wenn die Dicke des Mantels des Thermoelements klein ist, besitzt die zylindrische Form des Mantels schnellere Ansprechzeit als die kugelartige Form.
- Je größer die Dicke des Mantels ist, desto schneller wird die Ansprechzeit einer kugelartige Form im Vergleich mit der zylindrischen Form.

- Auf jeden Fall besitzt die kegelartige Form die schnellste Ansprechzeit für verschiedene Dicken des Mantels.

5.1.2 Folgerungen der numerischen Simulation mit K- ϵ Modell

Die numerische Simulation mit FLUENT-Programm wurde im K- ϵ -Modell durchgeführt.

In dieser Simulation wurden verschiedene Kombinationen (Konstruktion und Metall) des Mantels von Thermoelement in einem Windkanal um die schnellste Ansprechzeit zu realisieren simuliert. Die drei Konstruktionen sind: kegelartige Form, halbkugelartige Form, und zylindrische Form.

Dafür haben wir zwei Metalle Edelstahl (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301, und Kupfer als Metall für das Mantel benutzt.

Diese, die mit Hilfe von FLUENT Programm für jede Kombinationen berechnete Ansprechzeit, Nu Zahl, Wärmeübertragungskoeffizient wurden mit analytischen Resultaten verglichen.

Die Schwerpunkte werden in Folgenden zusammengefasst:

- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Edelstahl besitzt in alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement die schnellste Ansprechzeit als Kupfer, und je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Metallen.
- Die kegelartige Form (Edelstahl-Mantel) besitzt die schnellste Ansprechzeit.
- Die zylindrische Form (Kupfer-Mantel) von Thermoelement kommt auf dem zweiten Platz.
- Die Nu Zahl für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen, für halbkugelartige- und kegelartige Formen sind die Werte von Nu Zahl ungefähr gleich.
- Der Wärmeübertragungskoeffizient h für zylindrische Form hat die größte Werte im Vergleich zu anderen Formen, die Werte für halbkugelartige- und kegelartige Form sind ungefähr gleich.

5.1.3 Folgerungen des Vergleiches der analytischen Berechnung mit der numerischen Simulation

auch präsentiert. Die Schwerpunkte werden in Folgenden zusammengefasst:

- Für alle Konstruktionen des Mantels von Thermoelement: Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto schneller ist die Ansprechzeit.
- Für zylindrische Form (Kupfer-Mantel) von Thermoelement ist die Ansprechzeit von der numerischen Simulation schneller als analytische Berechnung.
- Für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement ist die Ansprechzeit

von der numerischen Simulation und analytische Berechnung gleich.

- Für kegelartige Form (Kopfer-Mantel) von Thermoelement ist die Ansprechzeit von analytischen Berechnung schneller als die der numerischen Simulation.
- Je größer die Luftgeschwindigkeit ist, desto näher wird die Ansprechzeit der beiden Methoden (analytische- und numerische Methode).
- Die analytische- und numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient h und Nu Zahl haben einen kleinen Unterschied. Für halbkugelartige Form sind diese Werte fast identisch im Bereich der Luftgeschwindigkeit (20-30 m/s).
- Ein von wichtigsten Ergebnissen der vorliegenden Arbeit sind die für verschiedene Geometrien des Mantels des Thermomessfühlers zusammengestellte Korrelationen für Nusselt Zahl. Die Formel basieren sich auf einer Korrelation, die für subkritische Umströmung eines flachen Körpers bei $Re < Re_{kritik} = 5 \cdot 10^5$ und $0.6 < Pr < 2000$ gilt (vgl. [8]).

Nusselt Formel für **halbkugelartige Form**

$$Nu = 0.31 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers der Halbkugel durch drei $DA/3$.

Nusselt Formel für **kegelartige Form**

$$Nu = 0.325 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers des kegels durch drei $DA/3$

5.2 Ausblick

Diese Arbeit präsentiert eine analytische Berechnung und eine numerische Simulation von einem Thermomessfühler, um die Ansprechzeit des Thermomessfühlers schneller zu bringen. Deshalb sind für die Aspekte die folgenden Vorschläge anzugeben:

- $K-\varepsilon$ Modell können mit feineren Gittern und unter größerem Grafikspeicher versucht werden, damit die weiteren entsprechenden Vergleiche durchgeführt werden können. Die Anwendung von ‚Enhanced Wall Treatment‘ kann auch effizienter und genauer sein. Für die Diskretisierung in Gleichungen der Solution kann ‚QUICK‘, die die gute Hochgenauigkeit hat, benutzt werden.
- Mit der Nano Technologie könnten neu Metalle entwickelt werden, diese entwickelte Metalle sollten bessere thermische Eigenschaften, besonders die volumetrische Wärmekapazität $v_h c$ besitzen, die zu schnellere Ansprechzeit führt.
- Der Mantel des Thermoelements könnte mikrostrukturiert werden, somit wird die Ansprechzeit schneller.

- Der Mantel des Thermoelements könnte vakuumiert werden, somit vermeiden wir die Wärmeverluste wegen dem Wärmeaustausch in der inneren Seite des Thermomessfühlers.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 : Thomas Johann Seebeck (1770-1831).....	1
Abbildung 1.2 : Auslenkung einer Kompassnadel.....	1
Abbildung 1.3 : Entstehung einer elektrische Spannung.....	1
Abbildung 1.4 : Ausnutzung von Seebeck-Effekt in Satelliten.....	2
Abbildung 1.5 : Temperatur gradient entlang einer Leitung führt zu Anstieg von potentiale Differenz	3
Abbildung 1.6 : Kleine Temperaturdifferenz	4
Abbildung 1.7 : Thermoelement (schematische Darstellung)	7
Abbildung 2.1 : Zylindrische Form des Mantels von Thermomessfühler	17
Abbildung 2.2 : Halbkugelartige Form des Mantels von Thermomessfühler.....	18
Abbildung 2.3 : Kegelartige Form des Mantels von Thermomessfühler.....	19
Abbildung 3.1 : Flussbilddiagramm der Simulation mit FLUENT	38
Abbildung 3.2 : Geometrie der kugelartigen Form von Thermomessfühler in Winkadkanal ...	40
Abbildung 3.3 : Drei konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers	41
Abbildung 3.4 : Fluid-und Solidgeometrie im Gambit	41
Abbildung 3.5 : Vergitterung der Fluid-und Solidvolume	42
Abbildung 3.6(a): Randbedingungen der Fluid- und Solidgeometrie	47
Abbildung 3.6(b): Randbedingungen der Fluid- und Solidgeometrie	47
Abbildung A1 : Ablauf zur Simulation mit FLUENT.....	80
Abbildung A2 : Auswahl (2D oder 3D)	80
Abbildung A3 : Längeneinheit der Gitter	81
Abbildung A4 : Temperatureinheit.....	81
Abbildung A5 : Solver der Gitter.....	83
Abbildung A6 : Viskoser Modul	83
Abbildung A7 : Das Material ‚air‘	84
Abbildung A8 : Das Material ‚Edelstahl‘	84
Abbildung A9 : Bestimmung der Geschwindigkeitseingang.....	85
Abbildung A10 : Einrichtung der Kanal Kanalwände, Momentum.....	85
Abbildung A11: Einrichtung der Kanal Kanalwände, Termal	86
Abbildung A12: Einrichtung der wände des Thermomessfühlers, Termal (a).....	86
Abbildung A13: Einrichtung der wände des Thermomessfühlers, Termal (b)	87
Abbildung A14: Einrichtung das solid volume des Thermomessfühlers.....	87

Abbildung A15: Initializing das gesamte Strömungsfeld	88
Abbildung A16: Patch von Solid-Feld (Körper von Thermomessfühler)	88
Abbildung A17: Referenzwerte	89
Abbildung A18: Solution xy Ploten	90
Abbildung A19: Zeitschritte der Iteration	91
Abbildung A20: Anzahl der Iterationen	91

Diagrammenverzeichnis

Diagramm 1.1: Verschiedene Typen der Thermopaaren und die Relation zwischen Temperaturen und Thermospannung nach DIN EN 60 584	10
Diagramm 2.1: Ansprechzeit der Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit . 23	
Diagramm 2.2: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für verschiedene Metalle des Mantels (kegelartige Form)	24
Diagramm 2.3: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Dicke des Mantels des Thermomesselements für verschiedene Konstruktionen	25
Diagramm 2.4: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Edelstahl-Mantel)	29
Diagramm 2.5: Wärmeübertragungskoeffizient h in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Edelstahl-Mantel)	29
Diagramm 2.6: Nu-Zahl der Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit drei (Edelstahl-Mantel)	30
Diagramm 2.7: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Kopfer-Mantel)	33
Diagramm 2.8: Wärmeübertragungskoeffizient h in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Kopfer-Mantel)	34
Diagramm 2.9: Nu-Zahl in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels des Thermomessfühlers (Kopfer-Mantel)	34
Diagramm 2.10: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (zylindrische Form)	35
Diagramm 2.11: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (halbkugelartige Form)	35
Diagramm 2.12: Ansprechzeit des Thermomessfühlers in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (kegelartige Form)	35
Diagramm 2.13: Ansprechzeit der Thermomessfühler für drei Konstruktionen und zwei verwendete Metall-Mäntel (Edelstahl, Kupfer) in Abhängigkeit von Luftgeschwindigkeit. 36	
Diagramm 3.1: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für zylindrische Form (Edelstahl-Mantel)	50
Diagramm 3.2: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für halbkugelartige Form (Edelstahl-Mantel)	51

Diagramm 3.3: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für kegelartige Form (Edelstahl-Mantel)	52
Diagramm 3.4: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für zylindrische Form (Kopfer-Mantel)	53
Diagramm 3.5: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für halbkugelartige Form (Kopfer-Mantel)	54
Diagramm 3.6: Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Luftgeschwindigkeiten für kegelartige Form (Kopfer-Mantel)	55
Diagramm 3.7: Ansprechzeit im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Edelstahl-Mantel)	56
Diagramm 3.8: Ansprechzeit im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Kopfer-Mantel)	57
Diagramm 3.9: Ansprechzeit des Thermomessfühlers für drei Konstruktionen und zwei verwendete Metalle (Edelstahl, Kupfer) im Vergleich zur Luftgeschwindigkeit	57
Diagramm 3.10: Nu Zahl für drei Konstruktionen der Thermomessfühler für verschiedenen Luftgeschwindigkeiten	58
Diagramm 3.11: Wärmeübertragungskoeffizient h für drei Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit	59
Diagramm 4.1: Analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)	61
Diagramm 4.2: Analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)	61
Diagramm 4.3: Analytische Ansprechzeit im Vergleich zur numerischen Ansprechzeit für zwei Metall-Mäntel in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)	62
Diagramm 4.4: Analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)	63
Diagramm 4.5: Analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)	64
Diagramm 4.6: Analytische Wärmeübertragungskoeffizient im Vergleich zur numerischen Wärmeübertragungskoeffizient in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)	65
Diagramm 4.7: Analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (zylindrische Form)	66
Diagramm 4.8: Analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (halbkugelartige Form)	67
Diagramm 4.9: Analytische Nu Zahl im Vergleich zur numerischen Nu Zahl in verschiedenen Geschwindigkeiten (kegelartige Form)	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 : Die typische experimentelle Werte von Seebeck K_0 für unterschiedliche Metalle	5
Tabelle 1.2 : Verschiedene Typen von Thermopaaren und ihre Eigenschaften	9
Tabelle 2.1 : Thermische und physikalische Eigenschaften verschiedener Metall-Mänteln ...	16
Tabelle 2.2 : Lufteigenschaften unter der Temperatur 25°C	17
Tabelle 2.3 : Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Dicke des Mantels des Thermoelemente für verschiedene Konstruktionen	25
Tabelle 2.4 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für zylindrische Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)	26
Tabelle 2.5 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)	27
Tabelle 2.6 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für kegelartige Form des Mantels von Thermoelement (Edelstahl-Mantel)	28
Tabelle 2.7 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für zylindrische Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel).....	30
Tabelle 2.8 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für halbkugelartige Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel).....	31
Tabelle 2.9 : Werte von Re , Nu , h , t_c , t_A für kegelartige Form des Mantels von Thermoelement (Kopfer-Mantel)	32
Tabelle 3.1 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit zylindrische Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel)	50
Tabelle 3.2 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit halbkugelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel).....	51
Tabelle 3.3 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit kegelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Edelstahl-Mantel)	52
Tabelle 3.4 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit zylindrische Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kopfer-Mantel).....	53
Tabelle 3.5 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit halbkugelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kopfer-Mantel)	54
Tabelle 3.6 : Die Temperaturen des Thermomessfühlers mit kegelartige Form im Laufe der Zeit bis zur Ansprechzeit t_A (Kopfer-Mantel).....	55
Tabelle 3.7 : Die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drie Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Edelstahl-Mantel)	56
Tabelle 3.8 : Die Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für drie Konstruktionen des Mantels von Thermomessfühler (Kopfer-Mantel).....	56
Tabelle 3.9 : Die numerische Werte von Nu Zahl für drei Konstruktionen der Thermomessfühler für verschiedene Luftgeschwindigkeiten.....	58

Tabelle 3.10 : Die numerische Werte von Wärmeübertragungskoeffizient h für drei Konstruktionen der Thermomessfühler für verschiedene Luftgeschwindigkeiten ...	59
Tabelle 4.1 : Die analytische und numerische Wert von Wärmeübertragungskoeffizient (zylindrische Form des Mantels).....	63
Tabelle 4.2 : Die analytische und numerische Wert von Wärmeübertragungskoeffizient (halbkugelartige Form des Mantels)	64
Tabelle 4.3: Die analytische und numerische Wert von Wärmeübertragungskoeffizient (kegelartige Form des Mantels)	65
Tabelle 4.4: Die analytische und numerische Wert von Nu Zahl (zylindrische Form des Mantels).....	64
Tabelle 4.5: Die analytische und numerische Wert von Nu Zahl (halbkugelartige Form des Mantels)	67
Tabelle 4.6: Die analytische und numerische Wert von Nu Zahl (kegelartige Form des Mantels)	68
Tabelle A1: Zonentypen in der Fluid- und Solidgeometrie.....	82

Literaturverzeichnis

- [1] PF. P. Incropera, D. P. Dewitt: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, J. Wiley and sons, New York, 2006.
- [2] M.Nau: *Electrical Temperature Measurement with Thermocouples and resistance Thermometers*. Fulda 2002.
- [3] Incropera/DeWitt/Bergman/Lavine. *Introduction to Heat Transfer* (5th edition). Wiley (2007).
- [4] C. Karcher: Vorlesung Wärmeübertragung (2008)
- [5] VDI-Wärmeatlas, VDI-Vrlag, Düsseldorf, 2006
- [6] Mills, A. F., *Heat Transfer (2nd edition)*, Prentice Hall (1999).
- [7] Microelectronics Heat Transfer Laboratory Department of Mechanical Engineering University of Waterloo 200 University Avenue West
<http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>
- [8] Skript-server der FH-Köln: <http://skript.vt.fh-koeln.de>
- [9] MatWeb, Material Property Data <http://www.matweb.com/>
- [10] F. M. White: *Fluid Mechanics*, Chap. 4. 6th (int'l.) ed., McGraw-Hill, Boston, 2008.
- [11] J. D. Anderson: *Computational Fluid Dynamics: the basics with applications*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [12] C. A. J. Fletcher: *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Vol. I-II. 2nd ed., 3rd print, Springer, Berlin, 1997.
- [13] H. K. Versteeg, W. Malalasekera: *An Introduction to computational Fluid Dynamics*, Pearson/Prentice Hall, Harlow, 2008.
- [14] J. O. Hinze: *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- [15] Gambitprogramm *User's Guide 2006*
- [16] Fluent Inc.: *FLUENT 6.3 User's Guide*. Fluent Inc., September 2006.
- [17] M. Oswald: *ANSYS Best Practice Guidelines*. ANSYS, Inc., 2009.
- [18] S. V. Patankar: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, Bristol PA, 1980.
- [19] J. C. Tannehill, D. A. Anderson, R. H. Pletcher: *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 2nd ed., Taylor & Francis, Washington D.C., 1997.
- [20] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, Springer, Berlin, 2003

Anhang A:

Bedienungsanleitung zum K- ϵ -Modell

Diese Anleitung beschreibt im Detail den Bedienungsablauf des FLUENT-Programms, um numerische Berechnungen des K- ϵ -Modell durchzuführen. Eine Gitter-Datei, die durch den Gittererzeuger Gambit gemacht wird, enthält die Gitter einer 3D-Geometrie, die hydrodynamische Randbedingungen für ein CFD-Problem. Das folgende zusammengefasste Ablaufdiagramm wird dargestellt. (Abbildung A1)

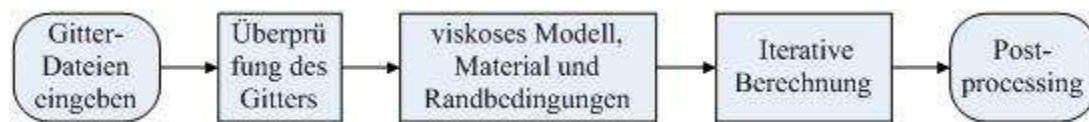


Abbildung A1: Ablauf zur Simulation mit FLUENT

A1 Auswahl (2D oder 3D)

Sie lässt sich zunächst in den 3D-(double Precision dp) Solver des FLUENT-Programms mit ‚Full Simulation‘ einlesen. (Abbildung A2)

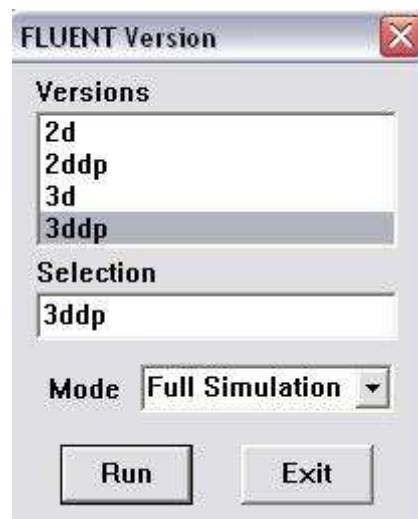


Abbildung A2: Auswahl (2D oder 3D)

A2 Überprüfung der Gitter-Dateien

Es ist allgemein erforderlich, nach Einlesen die Gitter-Dateien in FLUENT richtig zu überprüfen, damit vor möglichen Problemen die Gitterfehler gefunden werden können. Deshalb ist das mindeste Volumen einer Gitterzelle aufmerksam zu beobachten.

Wenn das mindeste Volumen einen negativen Wert zeigt, haben eine oder mehrere Gitterzellen falsche Verbindung. Außerdem müssen Maßstäbe und Grenzflächen des Gitters auch überprüft werden. „Grid/Check“.

A3 Längen- und Temperatureinheit

Innerhalb des FLUENT-Programms wird das Gitter mit der Einheit *m* gespeichert. Wenn die Informationen in den Gitterlöser eingelesen wird, muss auf *m* skaliert werden, weil das im Gambit erstellte Gitter bereits mit der Einheit *mm* benutzt wurde. Um die Umwandlung der Gitterlängen zu realisieren, kann man in der Liste die Längeneinheit *mm* auswählen. Gleichzeitig muss man jede Knotenkoordinate mit einem entsprechenden Skalierungsfaktor multiplizieren. „Grid/Scale“. (Abbildung A3)

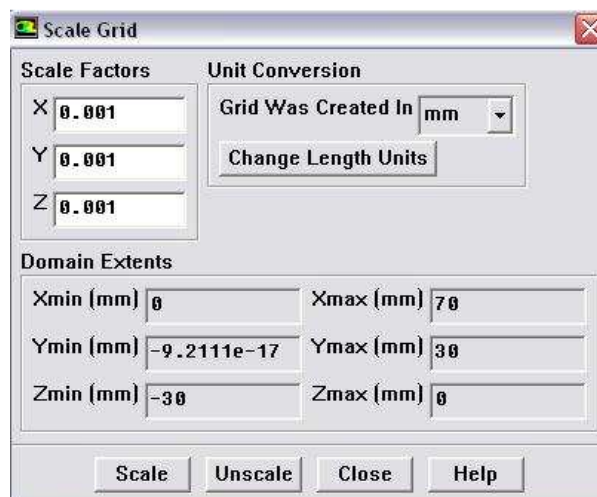


Abbildung A3: Längeneinheit der Gitter

FLUENT bietet vier eingebaute Einheit- Systeme: Britisch, SI, CGS, und default.

Wir können alle Einheiten von einem System in ein anderes konvertieren.

In dieser Simulation wählen wir Celsius als Temperatureinheit, „Define/Units...“.

(Abbildung A4)

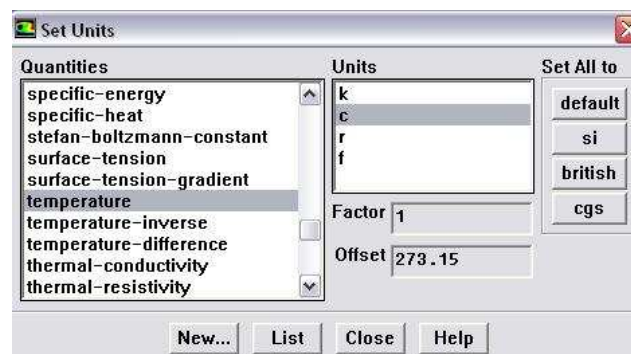


Abbildung A4: Temperatureinheit

Um die Temperaturprozesse benutzen zu können, müssen wir die Energy-Modul einschalten, „Define/Models/Energy“.

A4 Festlegung der Zonentypen

Die Zonentypen sind abhängig von unterschiedlichen Aufträgen. In folgender Tabelle werden die Einzelheiten für die Angabe der Zonentypen angezeigt (Tabelle A1). In geometrischen Modellen werden die Flächen für die Zonentypen, welche als „WALL“ im FLUENT automatisch betrachtet werden. Für die Aufträge von Fluid, Solid (Körper des Thermomessfühlers), Velocity und pressure werden auch automatisch im FLUENT betrachtet werden.

	Zone	Type
boundary	default-interior:001	‘Interior’
	default-interior	‘Interior’
	v_inlet	‘VELOCITY-INLET’
	p_out	‘PRESSURE-OUTLET’
	fl_symm	‘SYMMETRY’
	ch_symm	‘SYMMETRY’
	ch_bottom	‘WALL’
	ch_back	‘WALL’
	ch_top	‘WALL’
	fl_bottom	‘WALL’
	fl_top	‘WALL’
	fl_back	‘WALL’
	fl_cavity_back	‘WALL’
	fl_cavity_top	‘WALL’
	fl_back-shadow	‘WALL’
fl_top-shadow	‘WALL’	
continuum	fluid_volume	‘FLUID’
	solid_volume	‘SOLID’

Tabelle A1: Zonentypen in der Fluidgeometrie [15][16]

A5 Definition des Modells, Materials und der Randbedingungen

Für die Wahl des Solvers bietet FLUENT zwei Möglichkeiten: ‚Pressure Based‘ und ‚Density based‘. ‚Pressure Based‘ ist für die inkompressible oder leicht kompressible Flüssigkeit geeignet. ‚Density based‘ ist für die kompressible Strömung mit Hochgeschwindigkeit effizienter. In dieser Arbeit können die Optionen ‚Pressure Based‘, ‚3D‘ und ‚unsteady‘ bestimmt werden, weil K-ε-Modell der 3D-Niedergeschwindigkeit und der inkompressibel instationären Strömung entspricht. „Define/Models/Solver“.

(Abbildung A5)

Für die Ermittlung von Nu Zahl und Wärmeübertragungskoeffizient wird ‚steady‘ bestimmt werden.

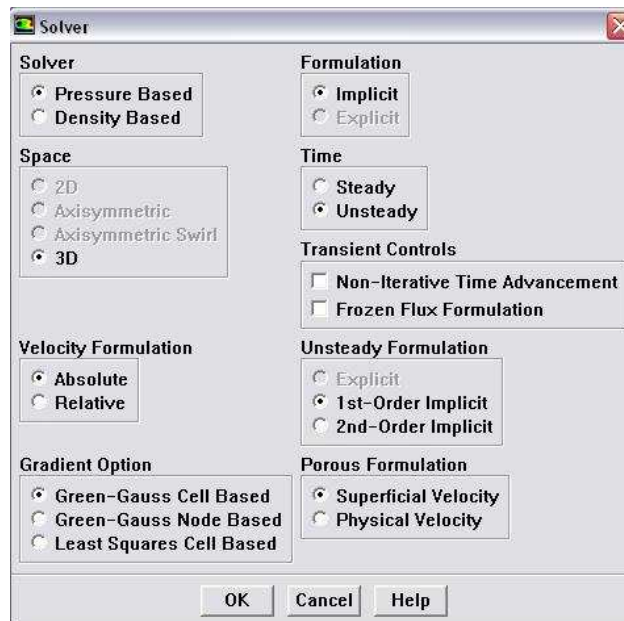


Abbildung A5: Solver der Gitter

Für die Auswahl des viskosen Moduls (Abbildung A6) ist hierbei K-epsilon (2 eqn), Standard als K-epsilon Modell und Enhanced Wall Treatment bestimmt. Diese Auswahl ist für unsere Simulation geeignet. (Abschnitt)

Im viskosen Modul können normalerweise die Konstante $C_{\mu}=0.09$, C_1 -Epsilon=1.44, C_2 -Epsilon=1.92, TKE Prandtl Number=1 ausgewählt werden. „Define/Models/Viscous“.

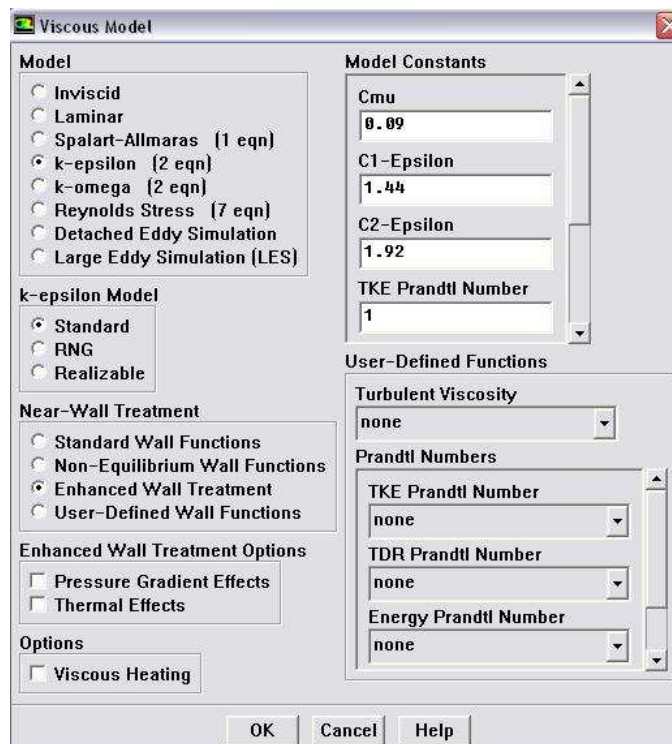


Abbildung A6: Viskoser Modul

Das Material „air“ dass in ‚Fluent Databank‘ sich befindet, ist als ‚Fluent Fluid Material‘ eingerichtet. (Abbildung A7). Hier können wir die Eigenschaften von Luft einsetzen. Tabelle 2.2 (Eigenschaften der Luft). „Define/Material“.

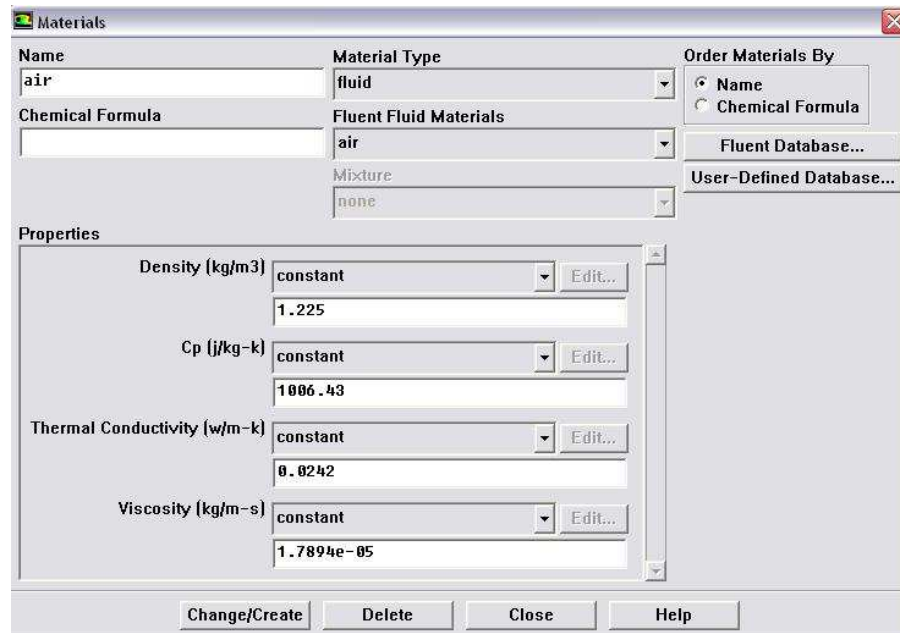


Abbildung A7: Das Material „air“

In dieser Untersuchung vergleichen wir zwei Materialien: Edelstahl und Kupfer und hier müssen wir entsprechend der Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 die bezuglichen physikalische Parameter von der beiden in FLUENT einrichten.

Zusätzlich dazu, verwenden wir das Glas-Fenster Material als Wände des Kanals und hier müssen wir auch entsprechend der Tabelle 4.7 die bezuglichen physikalische Parameter in FLUENT einrichten (Abbildung A8)

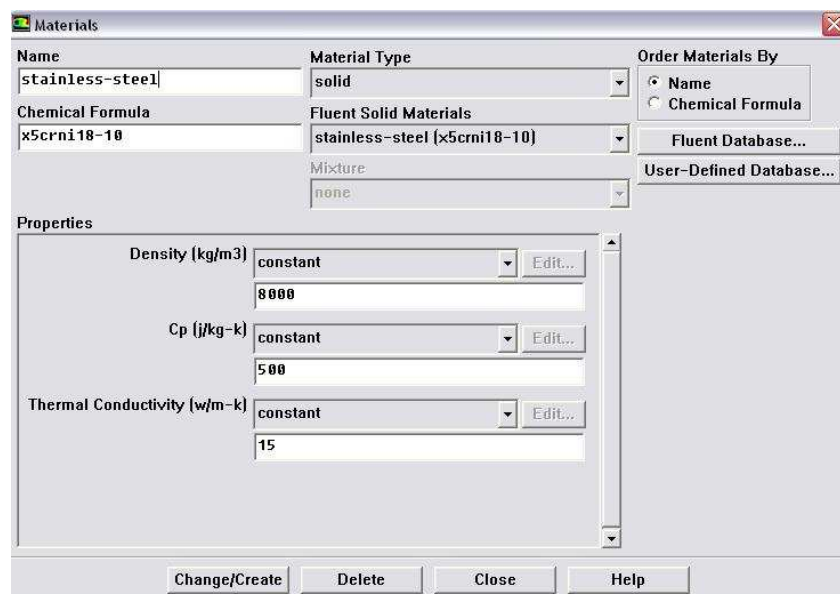


Abbildung A8: Das Material „Edelstahl“

Die Randbedingungen, die die physikalischen Strömungsgrößen auf der Randfläche angeben, sind eine entscheidende Komponente der FLUENT-Simulationen. Der folgende Abschnitt beschreibt die Einrichtung der Zonennamen von „v-inlet“, „p-outlet“, „ch_back“, „ch_bottom“, „ch_top“, „fl_back“, „fl_top“, „fl_cavity_back“, „fl_cavity_top“, „fl_bottom“, „solid_volume“.

„Define/Boundary conditions“.

Die Einrichtung den Zonenname von „inlet“, wobei wir die Velocity Magnitude eingeben, und unter „Thermal“ geben wir die Temperature, die in unserem Fall immer 20 °C ist. (Abbildung A9)

Ebenfalls wird die Temperature in der Zonenname von „p-outlet“ als 20°C eingegeben.

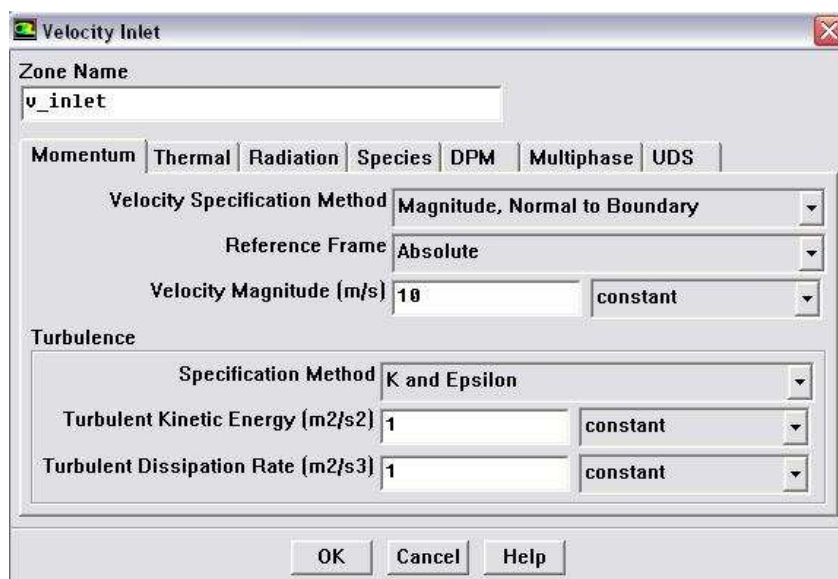


Abbildung A9: Bestimmung der Geschwindigkeitseingang

Die Einrichtung den Zonenname von „ch_back“, „ch_bottom“, „ch_top“. Für den Kanal wird unter Momentum „stationary wall“ ausgewählt, weil die Kanalwände befestigt sind, und wird „no slip“ an Randbedingungen eingerichtet. (Abbildung A10)

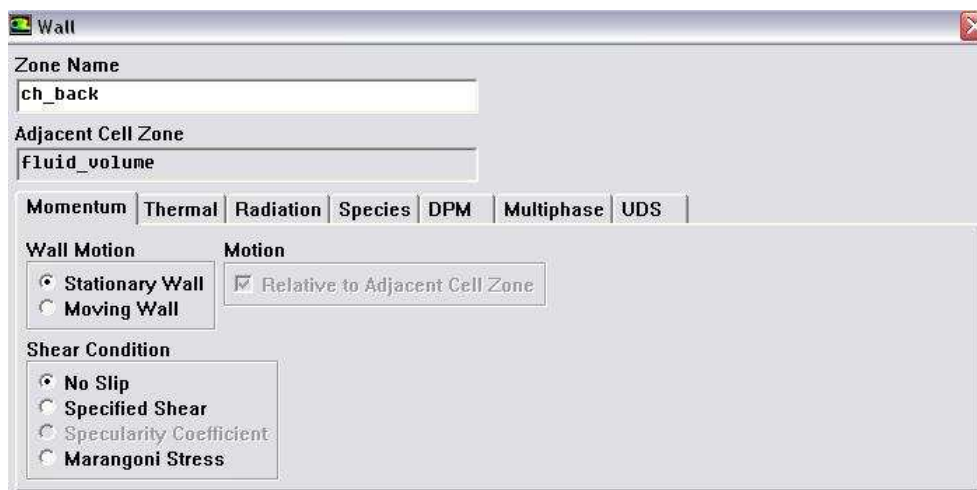


Abbildung A10: Einrichtung der Kanalwände, Momentum

Für weite Einrichtung von den Kanalwände wählen wir unter „Thermal“ die Temperatur aus, und geben wir im Feld Temperatur die 20c° ein.

Unter Material Name wählen wir das Material von Kanalwände aus, dass das Glass-Fenster hier ist. (Abbildung A11)

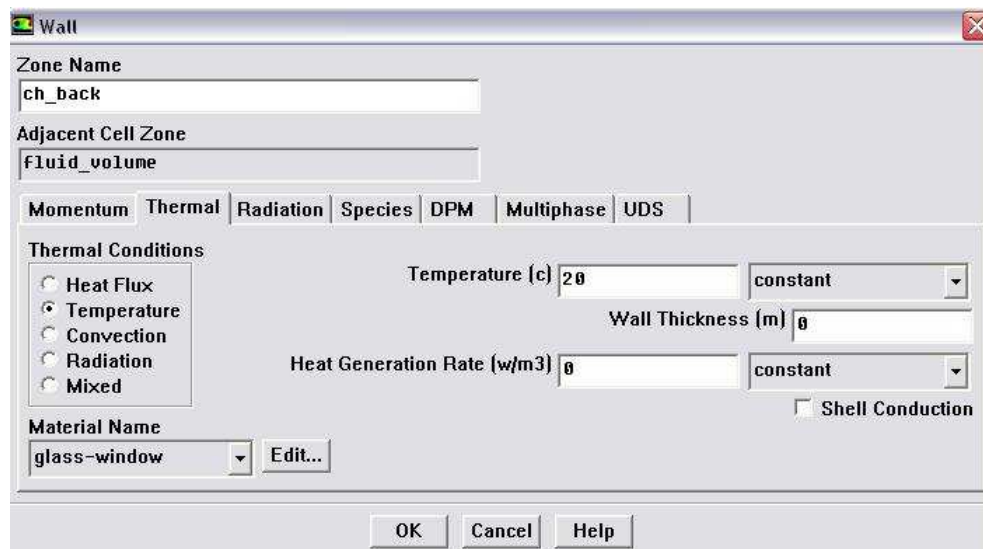


Abbildung A11: Einrichtung der Kanalwände, Termal

Die Einrichtung den Zonenname von „fl_back“, „fl_top“.

Für die Wände des Thermomessfühlers „fl_top“, „fl_back“, wird unter Momentum „stationary wall“ ausgewählt, weil die wände des Thermomessfühlers befestigt sind, und wird „no slip“ an Randbedingungen eingerichtet. (Abbildung A10)

Für weiter Einrichtung von wände des Thermomessfühlers wählen wir unter „Thermal“ „coupled“, aus, und unter Material Name wählen wir das Material stainless steel aus. (Abbildung A12)

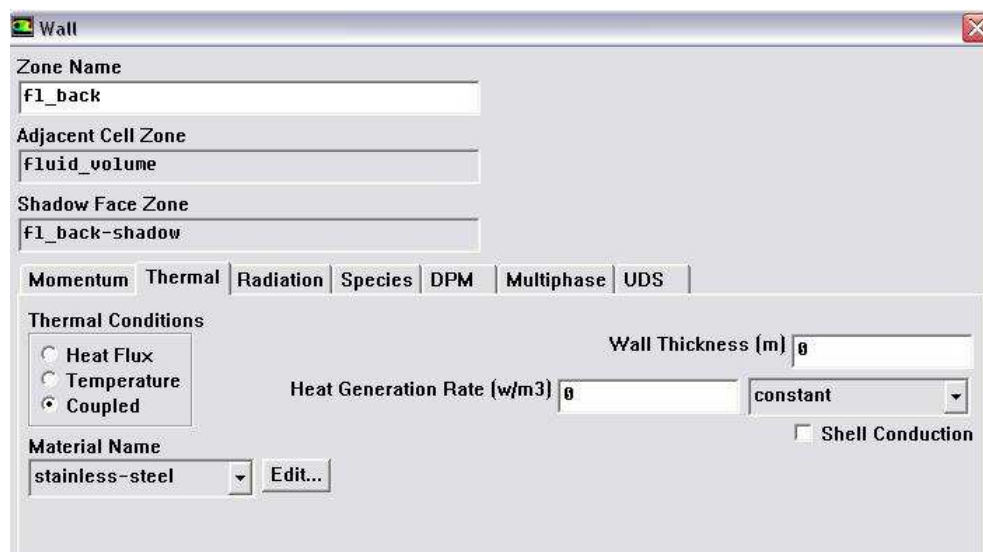


Abbildung A12: Einrichtung der wände des Thermomessfühlers, Termal (a)

Die Einrichtung den Zonenname von „fl_cavity_back“, „fl_cavity_top“, „fl_bottom“.

Für die Wände des Thermomessfühlers „fl_cavity_back“, „fl_cavity_top“, „fl_bottom“,

wählen wir unter „Thermal“ die Heat Flux aus, und geben wir im Feld Temperatur die 0c° ein, weil es keine Wärmeaustausch mit der inneren Wände des Thermomessfühlers gibt.

Und unter Material Name wählen wir das Material stainless steel aus. (Abbildung A13)

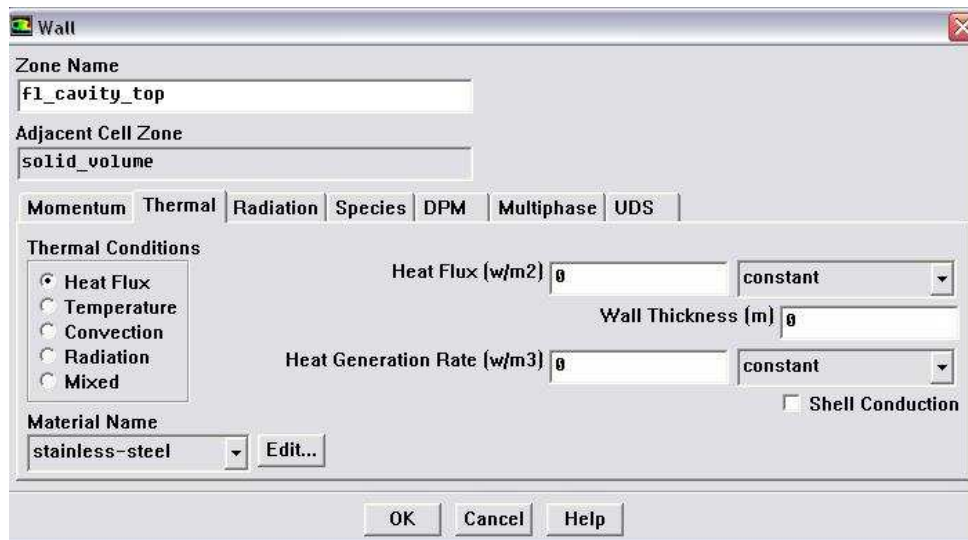


Abbildung A13: Einrichtung der wände des Thermomessfühlers, Termal (b)

Die Einrichtung den Zonennamen von „solid_volume“

Unter Material Name wählen wir das Material stainless steel aus. (Abbildung A14)

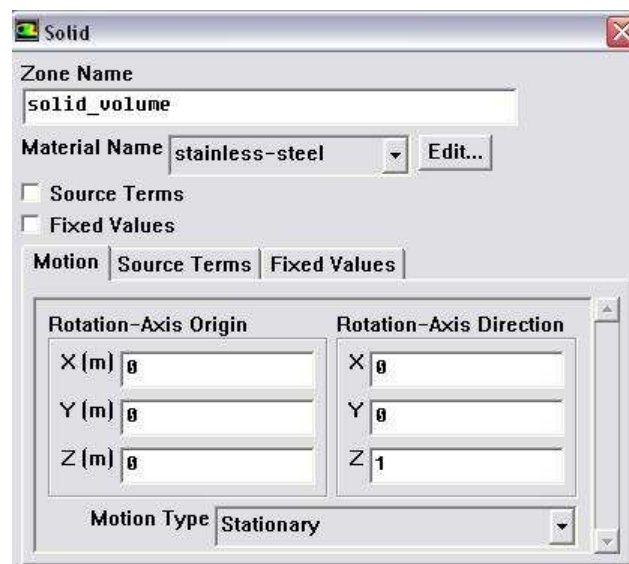


Abbildung A14: Einrichtung das solid volume des Thermomessfühlers

Weiter Zonennamen wie „fl_symm“, „ch_symm“, werden automatisch von FLUENT als symmetry anerkannt, weil die beide in Gambit Program als Symmetry definiert wurden. „fl_back_shadow“, „fl_top_shadow“ werden automatisch in FLUENT erstellt und als „wall“ betrachtet.

A6 Initializing des gesamten Strömungsfelds

Bevor wir unsere Berechnungen oder Patch Startwerte für ausgewählte Variablen in ausgewählten Zellen beginnen, müssen wir das Strömungsfeld in der gesamten Domäne initialisieren. Die Lösung Initialisierung Panel (Abbildung 14.1) ermöglicht es uns, Startwerte für die flow-Variablen zu setzen und Sie die Lösung mit diesen Werten zu initialisieren.

„Solve/initialize/initialize..“.

Wir initialisieren das Strömungsfeld anhand der Werte von Velocity Zone, deshalb wählen wir hier von Compute From drop-down Liste, „v_inlet“ aus. (Abbildung A15)

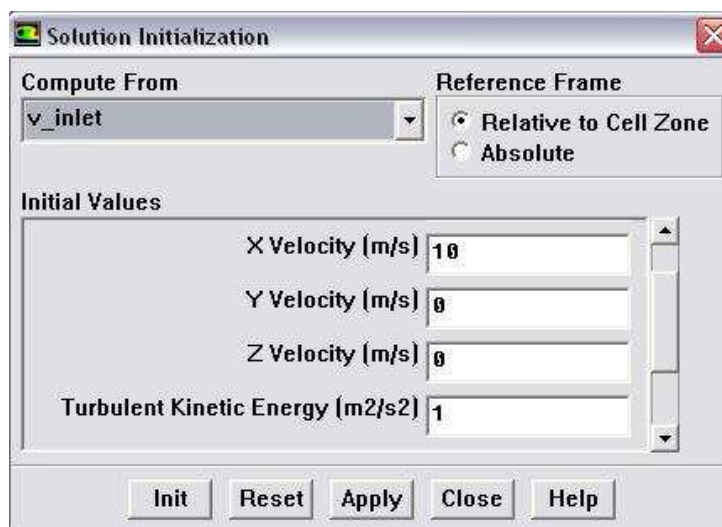


Abbildung A15: Initializing das gesamte Strömungsfeld

A7 Patching Werte in den ausgewählten Zellen

Sobald wir den gesamten Strömungsfeld initialisiert haben, können wir jetzt verschiedene Werte für besondere Variablen in verschiedenen Zellen patchieren (flicken).

In unserer Simulation patchieren wir das Solid-Feld (Körper von Thermomessfühler) mit 30 c°, „Solve/initialize/patch“. (Abbildung A16)

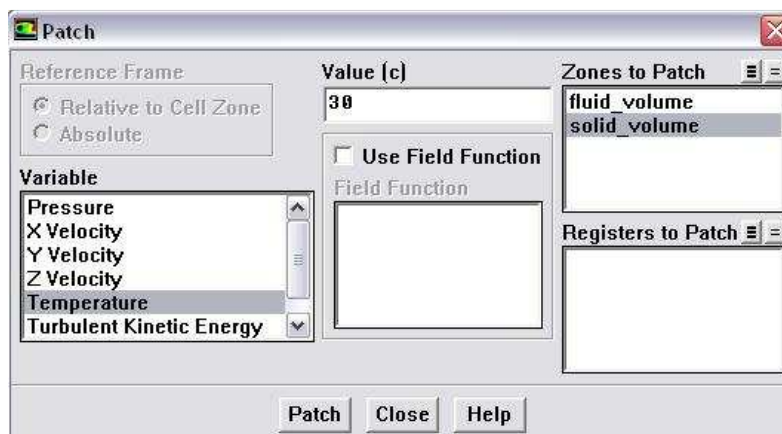


Abbildung A16: Patch von Solid-Feld (Körper von Thermomessfühler)

A8 Referenzwerte

Im Fall von ‚steady‘ state um die Ermittlung von Nu, h, müssen wir nach der initialize und Patching der ausgewählten Zellen, die Werte von Referenz in ‚Reference Values‘ eingeben, um die richtige Werte von Nu, h zu bekommen.

Die Referenzwert der Länge von zylindrische Form des Thermomessfühlers ist gleich $D_A=5$ mm (äußerer Durchmesser der Zylinder), im Bezug auf die Referenzwert der Länge von halbkugelartige Form und kegelartige Form des Thermomessfühlers ist die Länge gleich $D_A/3=1.667$ mm.

Weitere Einstellungen sind, compute form ‚inlet‘, und die Referenzzone ist ‚fluid_volume‘. ‚Report/Reference Values‘. (Abbildung A17)

Property	Value
Area (m ²)	1
Density (kg/m ³)	1.225
Enthalpy (j/kg)	0
Length (mm)	1.666
Pressure (pascal)	0
Temperature (c)	20
Velocity (m/s)	10
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Abbildung A17: Referenzwerte

A9 Plot der Ergebnisse von Nu, h

Nach der Iteration, und wenn die Lösung konvergent ist, können wir die Werte von Nu, h des Thermomessfühlerkopfs (‚fl_top‘) plotieren.

Hier müssen wir beachten, dass es unterschiedliche ungleiche Werte von Nu, h jenach

der simulierten Position von dem Kopf des Thermomessfühlers gibt.

Das FLUENT Programm wird alle diese Werte von Nu, h plotieren, dann nehmen wir die durchschnittliche Wert. (Abbildung A18)

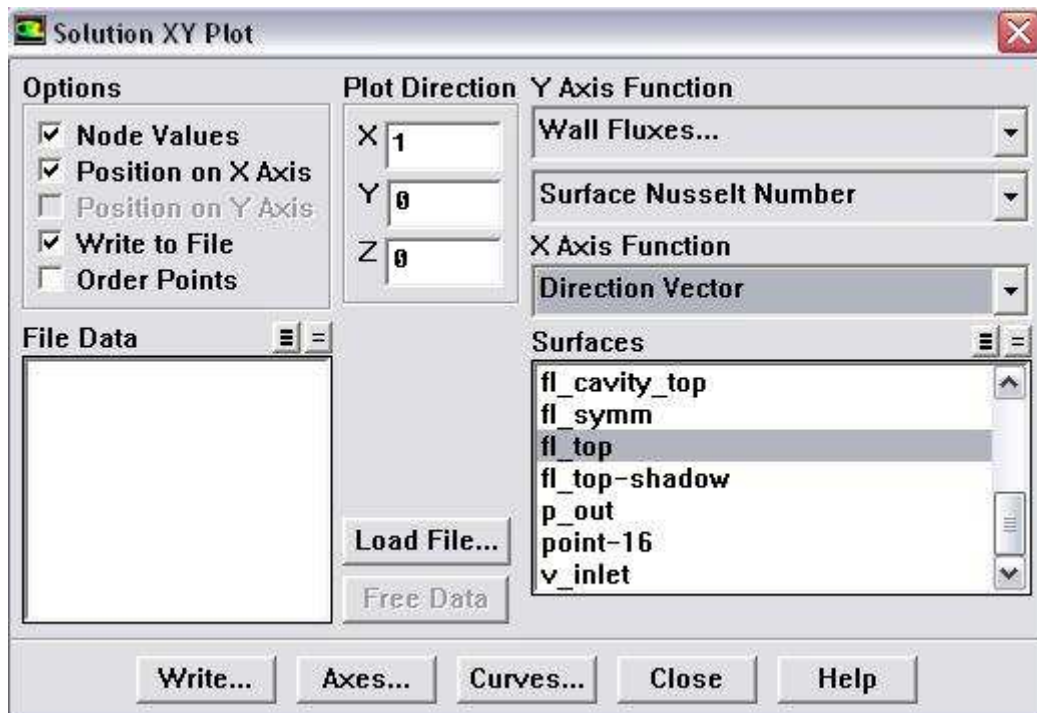


Abbildung A18: Solution xy Plot

A10 Iteration und Solution

Iteration von ‚steady‘ state: Zuerst werden die Zeitschritte („Time Step Size“) 0.5s eingegeben. Wenn die Temperatur des gesuchten Punkts (Anhang B1, B2, B3 Nr.4) in der Nähe von Ansprechzeit T_A ist, kann man die Wert 0.1s eingeben. Die Zeitschrittzahl („Number of Time Steps“) muss größer als 0 sein, um Konvergenz zu ermöglichen. Die max. Iterationen werden auf 300 Schritte erhöht, damit der Prozess der iterativen Berechnung länger dauern kann, und Resultat der Simulation mehr exakt sein. Je größer die Anfangsgeschwindigkeit ist, desto leichter sind die Solution zu errechnen. (Abbildung A19)

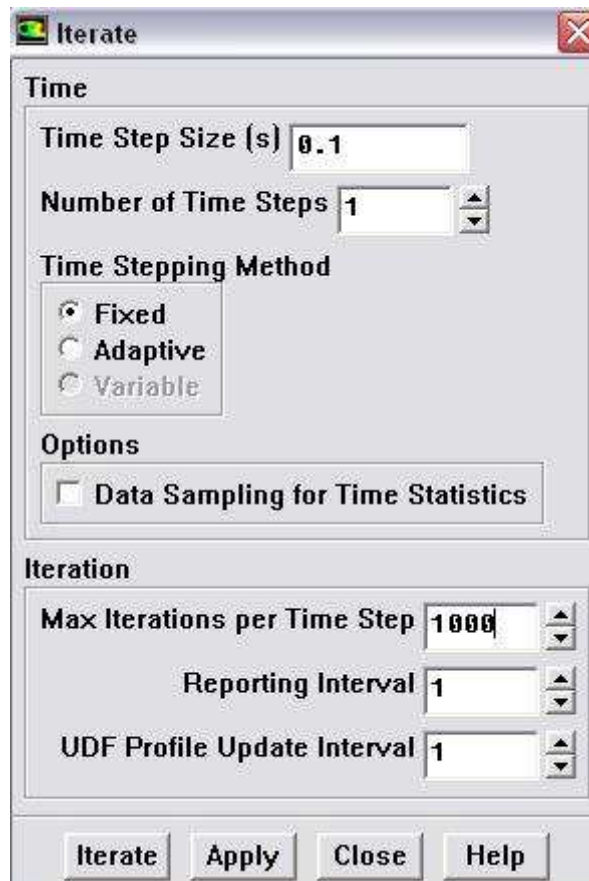


Abbildung A19: Zeitschritte der Iteration

Für die Iteration von ‚steady‘ state, um die Ermittlung von Nu , h , wir geben die Wert 1000 als ‚Number of Iteration‘ ein, und schauen wir ob die Lösung konvergent ist oder nicht, wenn nicht dann geben wir nochmal eine Wert. (Abbildung A20)

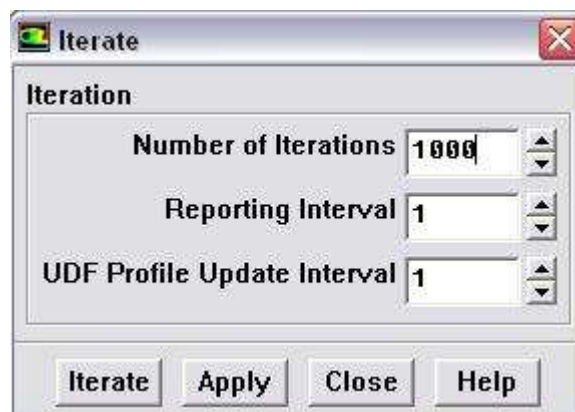
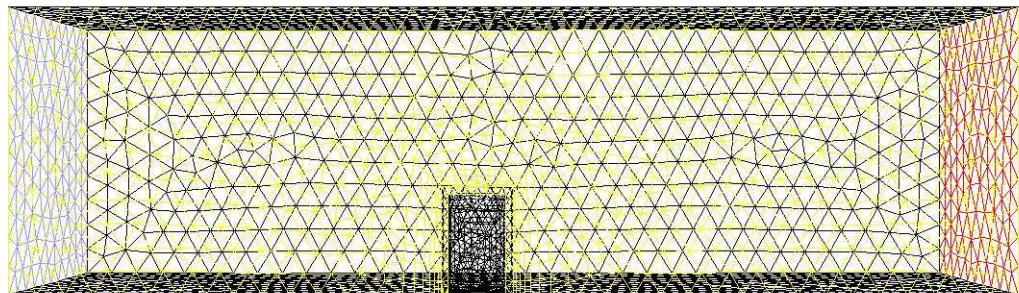


Abbildung A20: Anzahl der Iterationen

Anhang B: Bilder der numerischen Simulation (Edelstahl-Mantel) $u=10$ m/s

B1 zylindrische Form des Mantels des Thermoelements

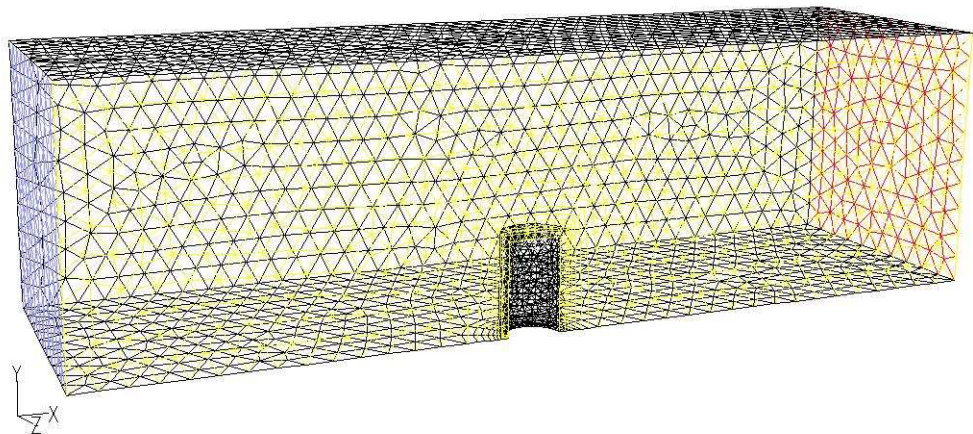
Nr.01: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y)



Grid (Time=2.3000e+01)

Apr 16, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

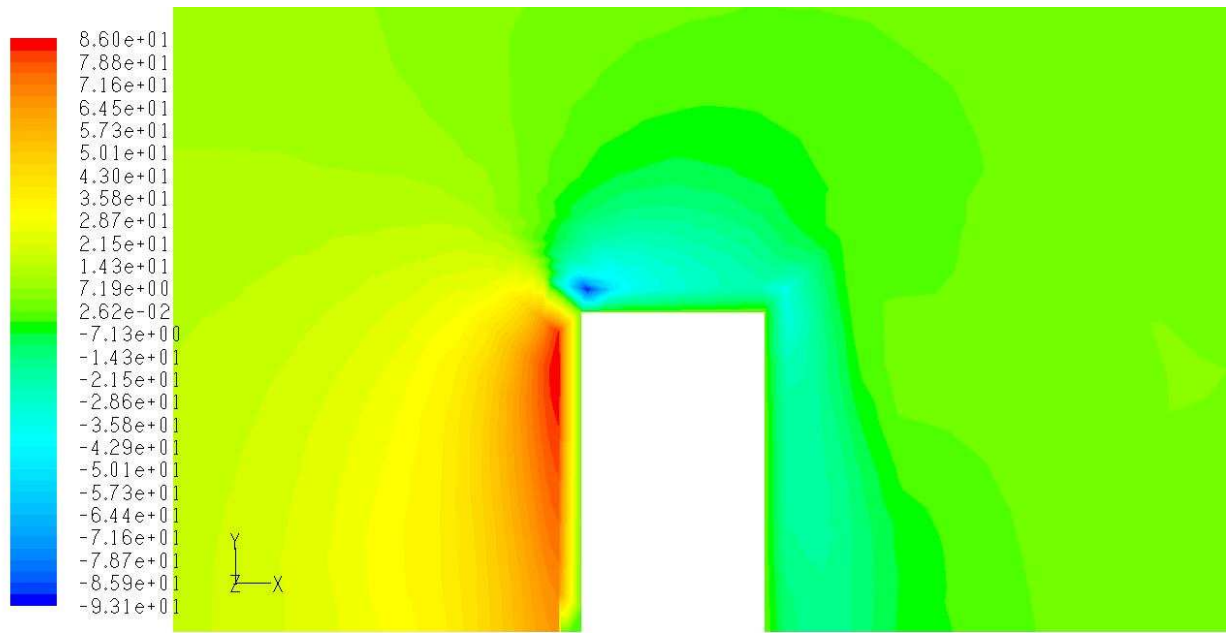
Nr.02: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y,z)



Grid (Time=2.3000e+01)

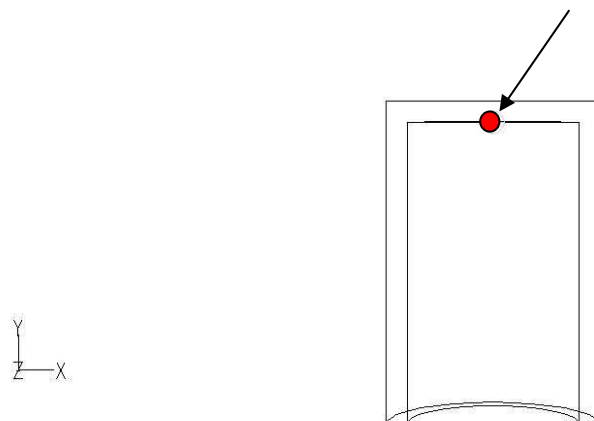
Apr 16, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

Nr.03: Druck (Farbtabellemaß = 25)



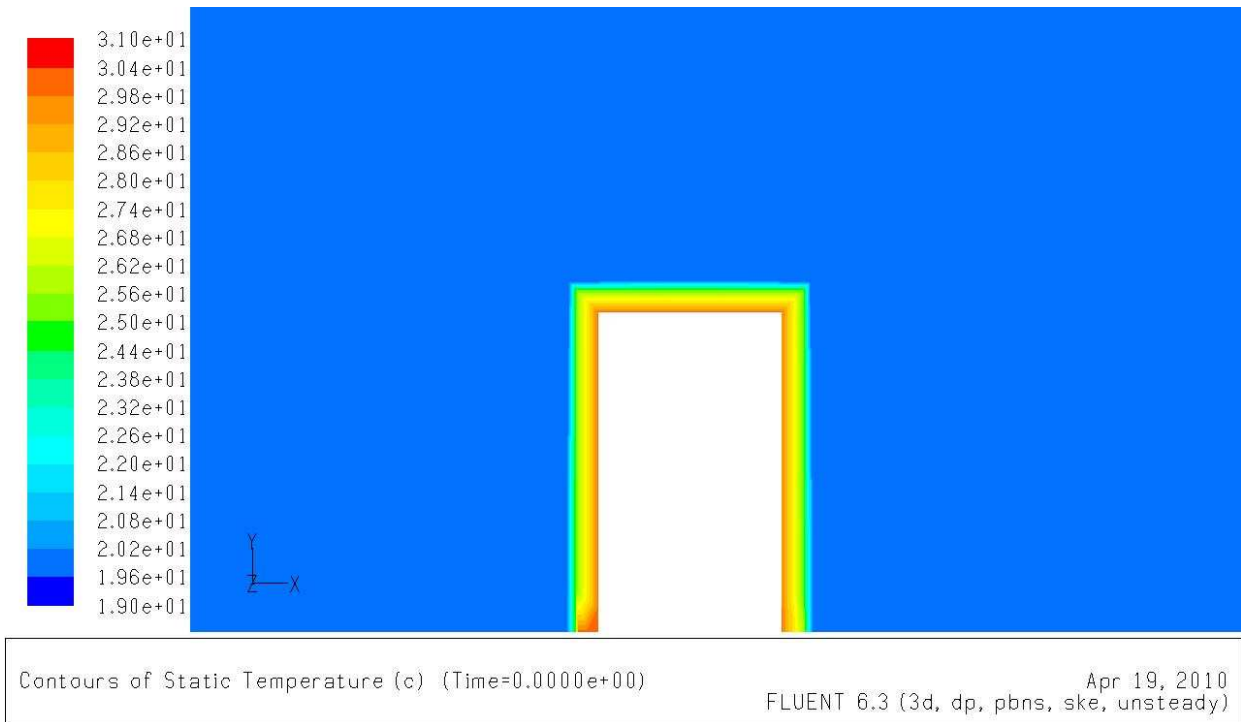
Contours of Static Pressure (pascal) (Time=7.2000e+00) Apr 19, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

Nr.04: der untersuchte Punkt

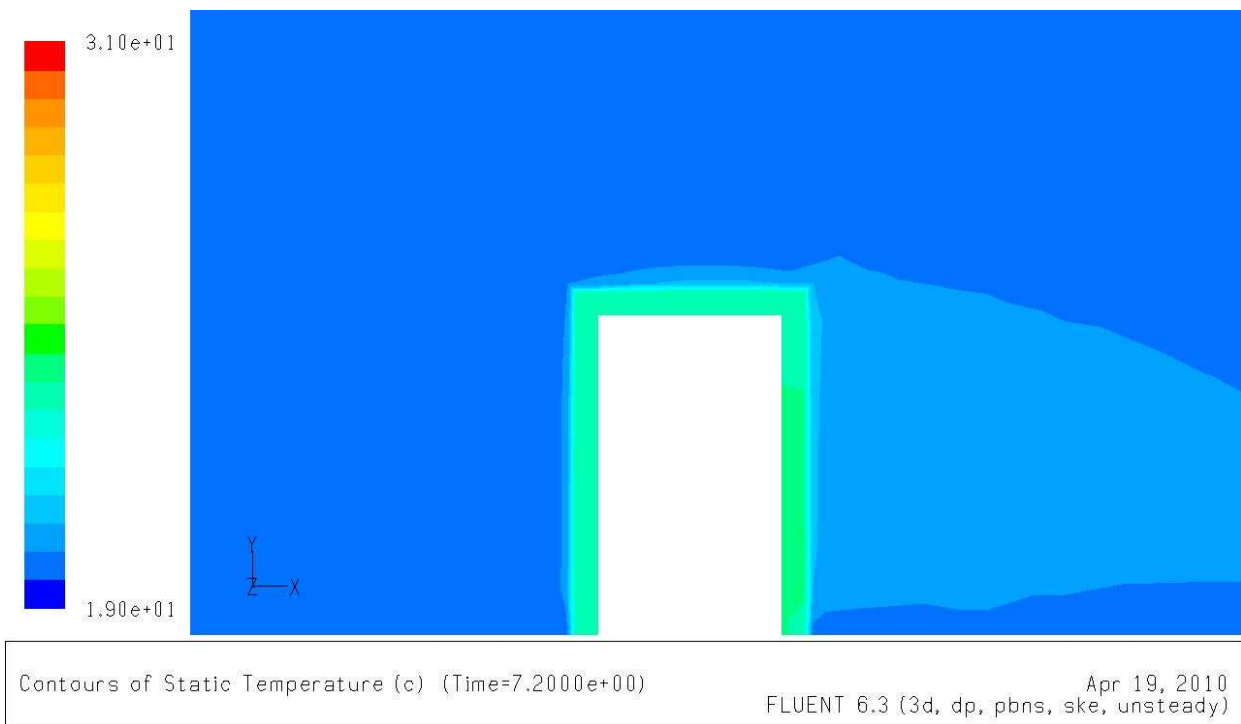


Grid (Time=0.0000e+00) Apr 19, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

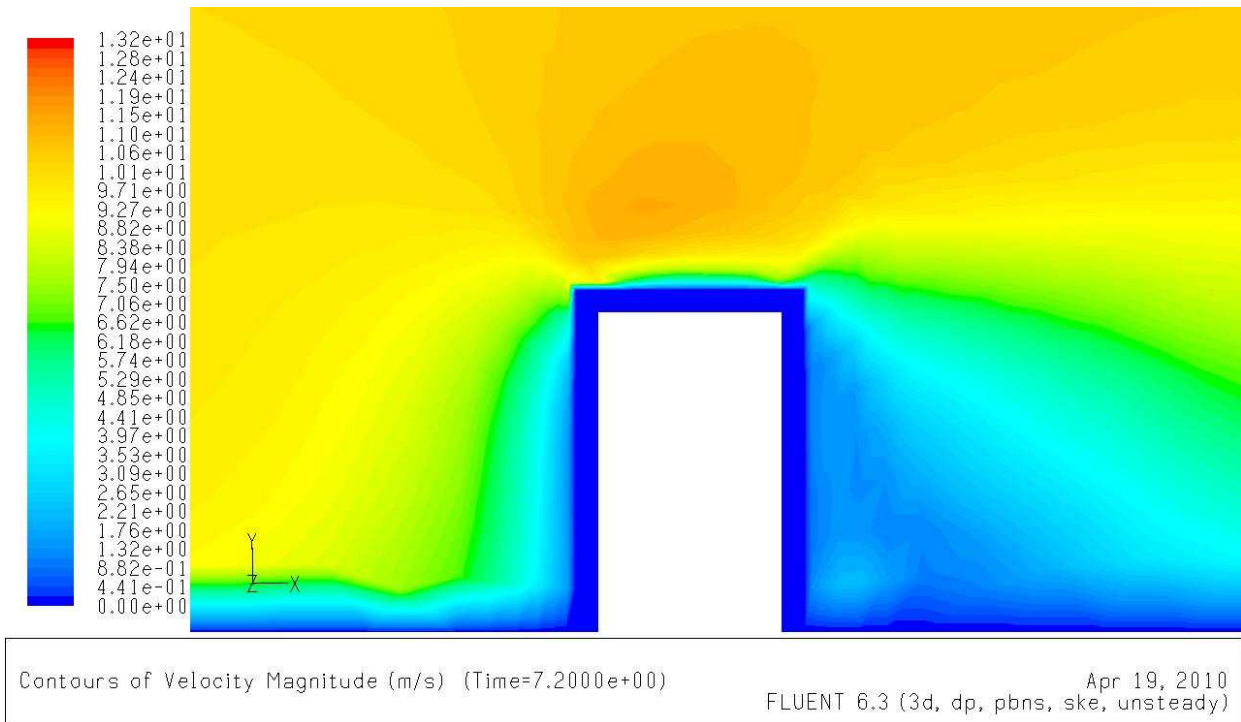
Nr.05: Temperatur vor der Iteration $t=0$ s (Farbtabellemaß = 20)



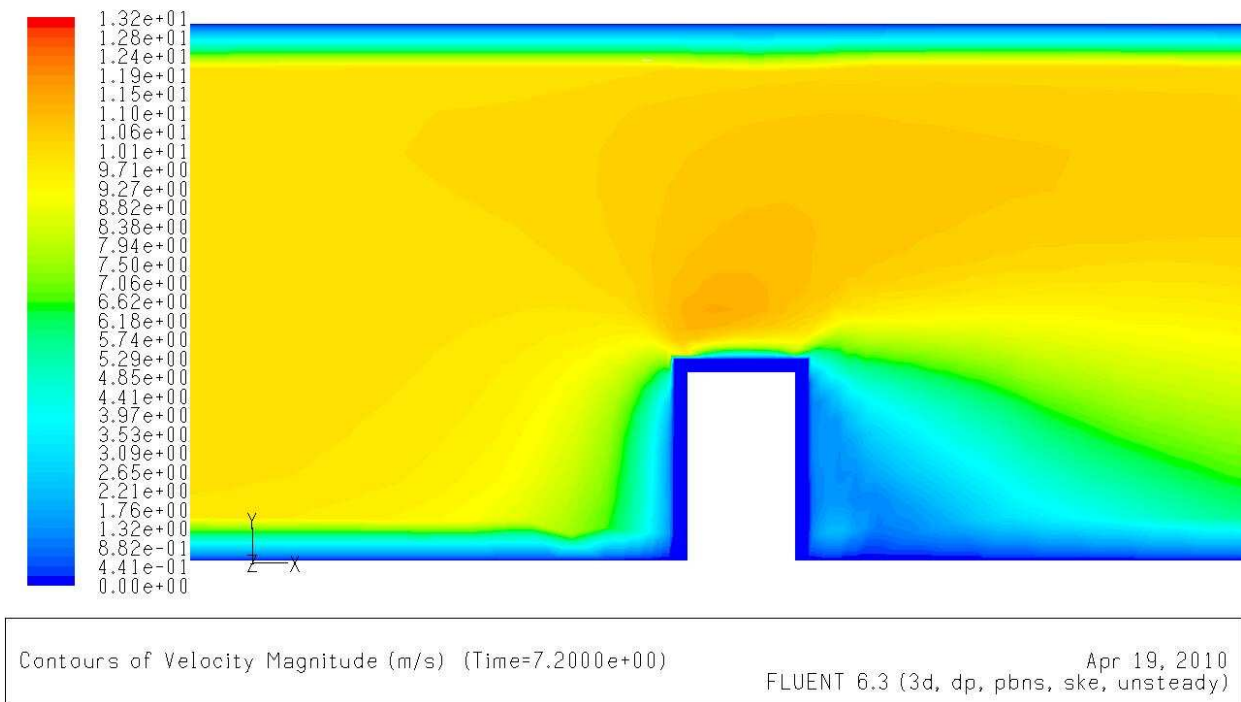
Nr.06: Temperatur bei der Ansprechzeit $T_{(t=t_0)} = T_A$ (Farbtabellemaß = 20)



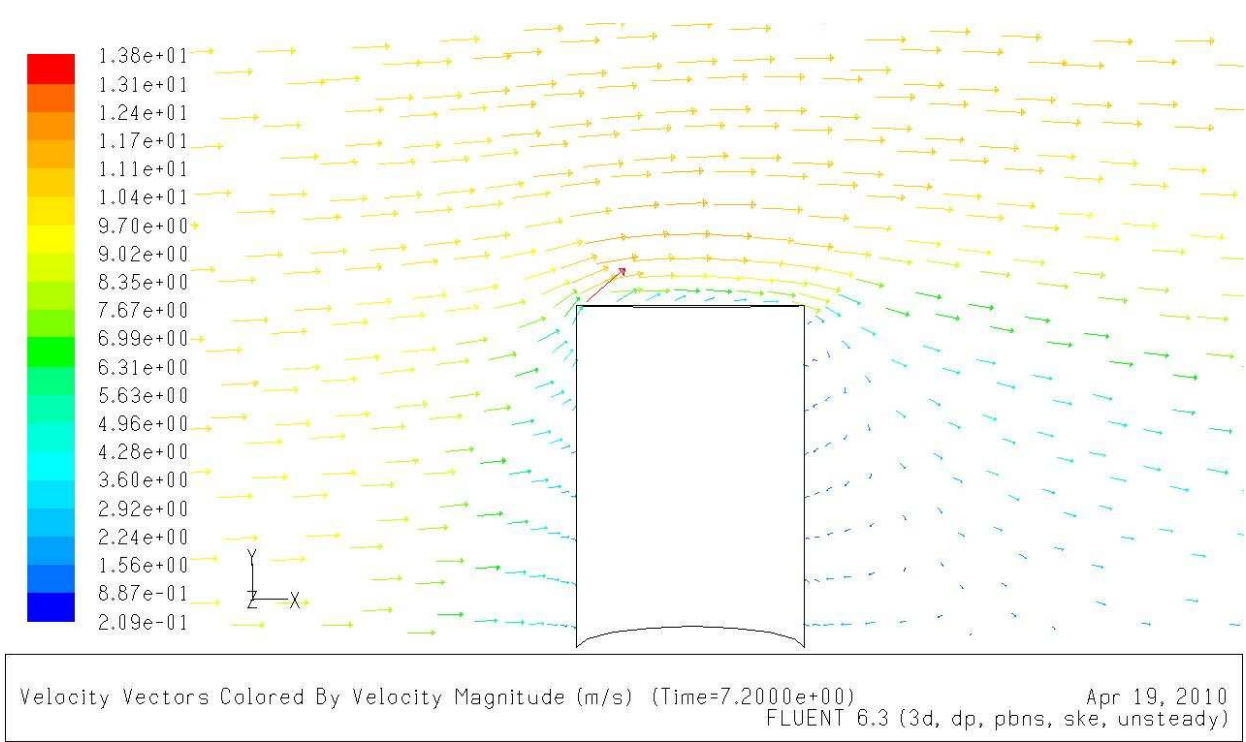
Nr.07: Geschwindigkeit, kleiner Bereich (Farbtabellemaß = 30)



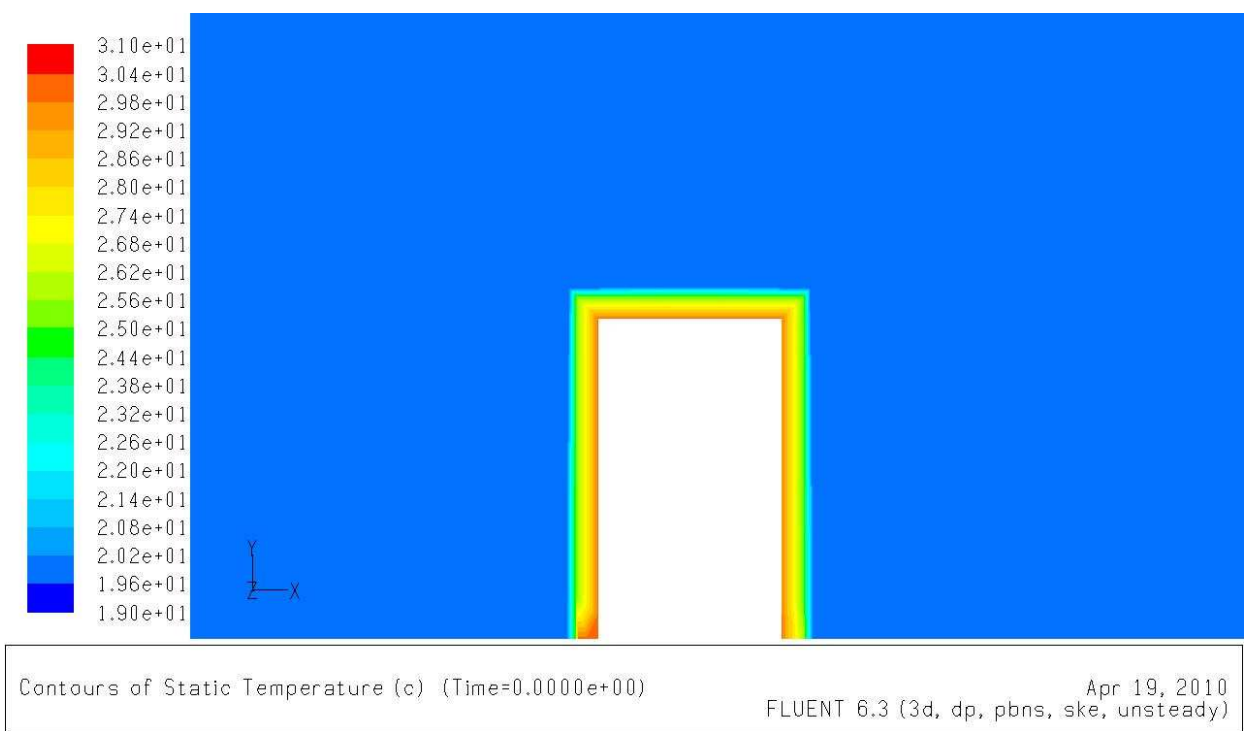
Nr.08: Geschwindigkeit, großer Bereich (Farbtabellemaß = 30)



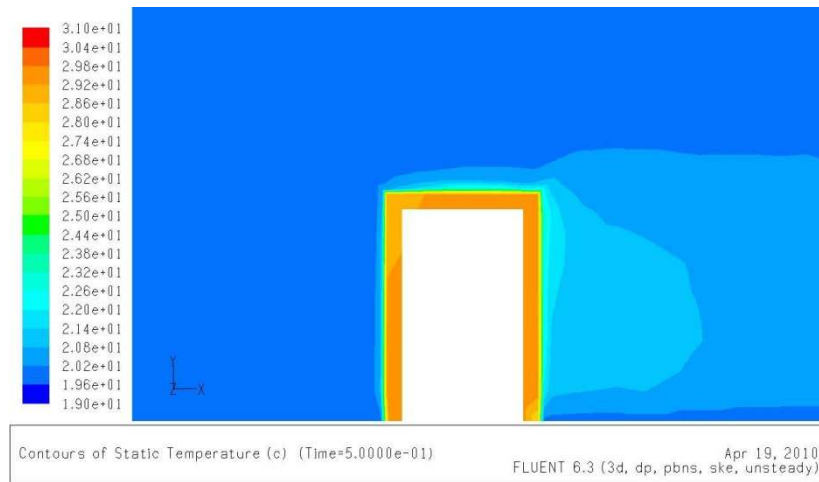
Nr.09: Geschwindigkeit (Farbtabellemaß = 20)



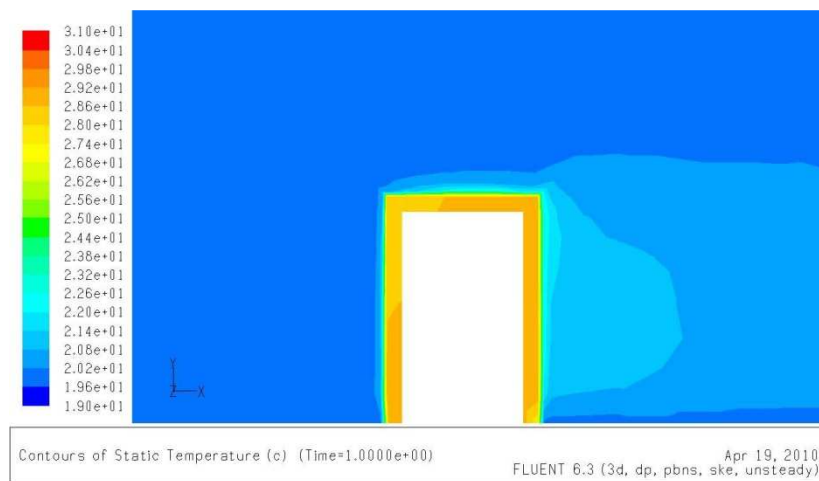
Nr.10: Temperatur vor der Iteration t=0 (Farbtabellemaß = 20)



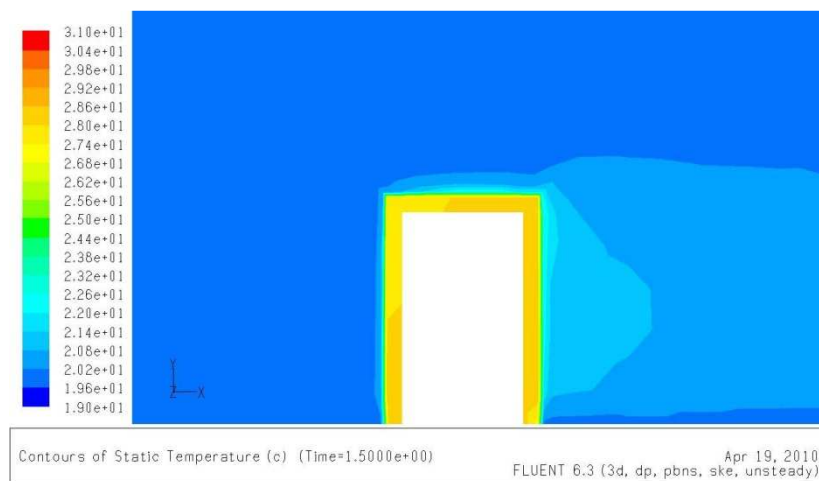
Nr.11: Temperatur $t=0.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



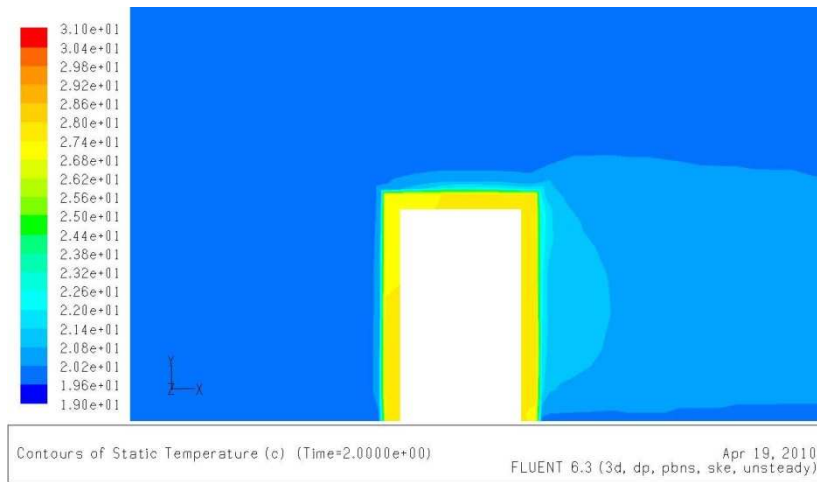
Nr.12: Temperatur $t=1$ s (Farbtabellenmaß = 20)



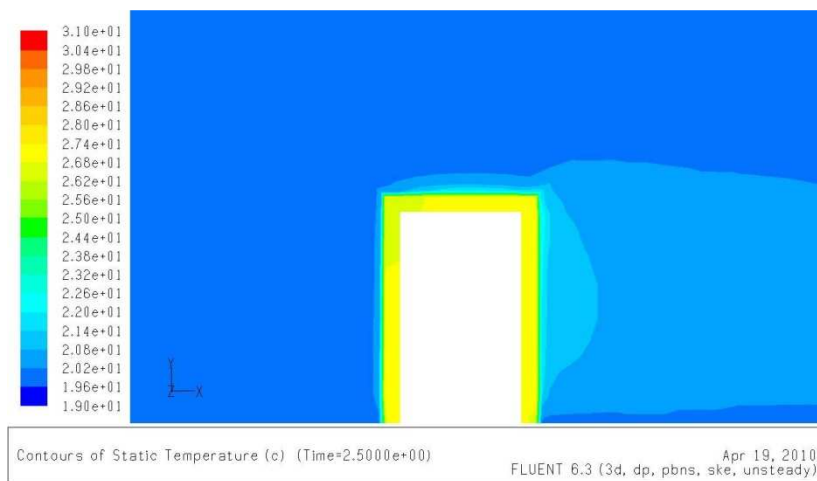
Nr.13: Temperatur $t=1.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



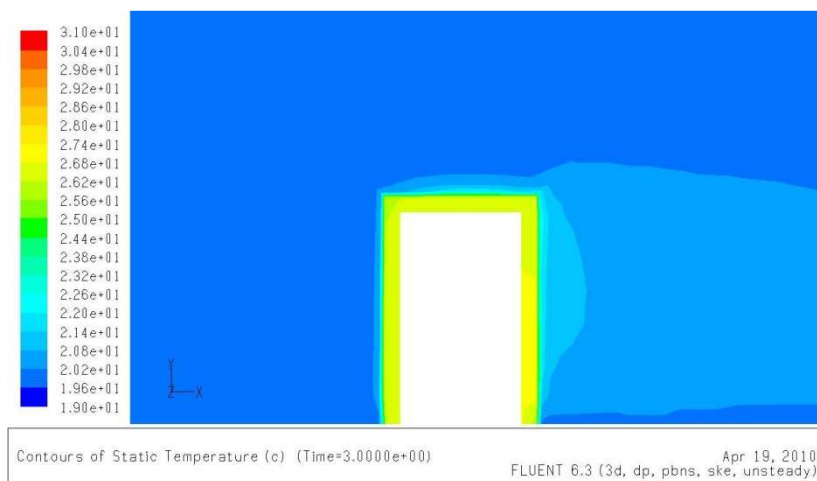
Nr.14: Temperatur t=2 s (Farbtabellemaß = 20)



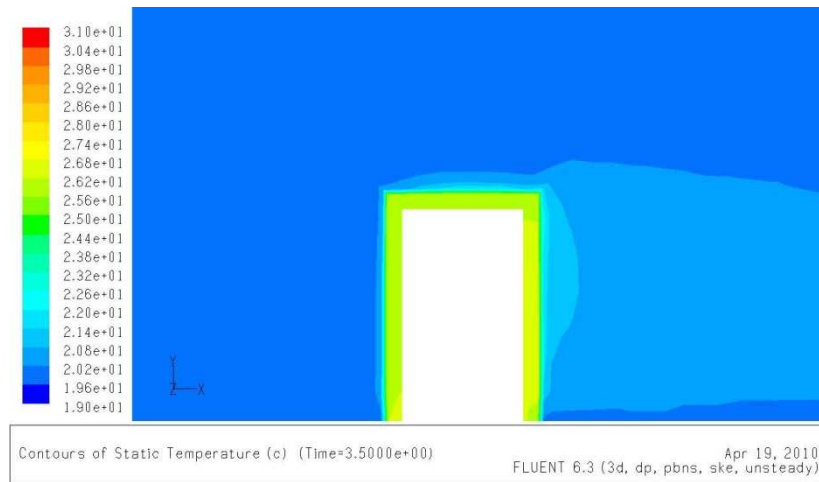
Nr.15: Temperatur t=2.5 s (Farbtabellemaß = 20)



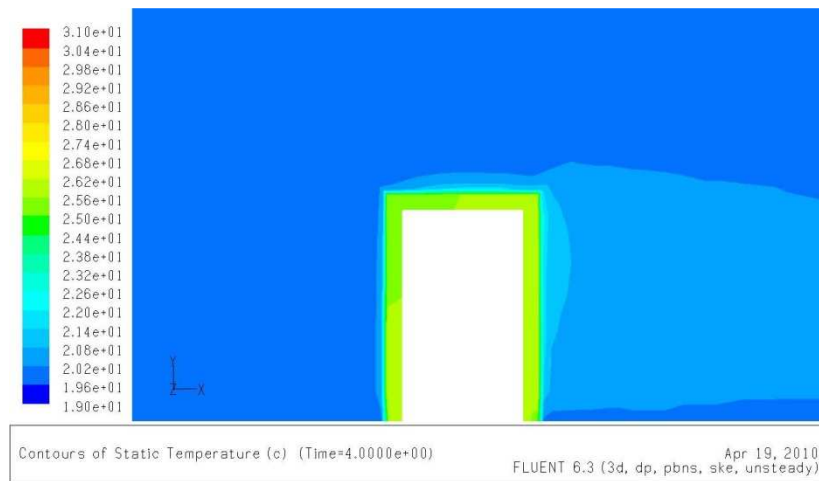
Nr.16: Temperatur t=3 s (Farbtabellemaß = 20)



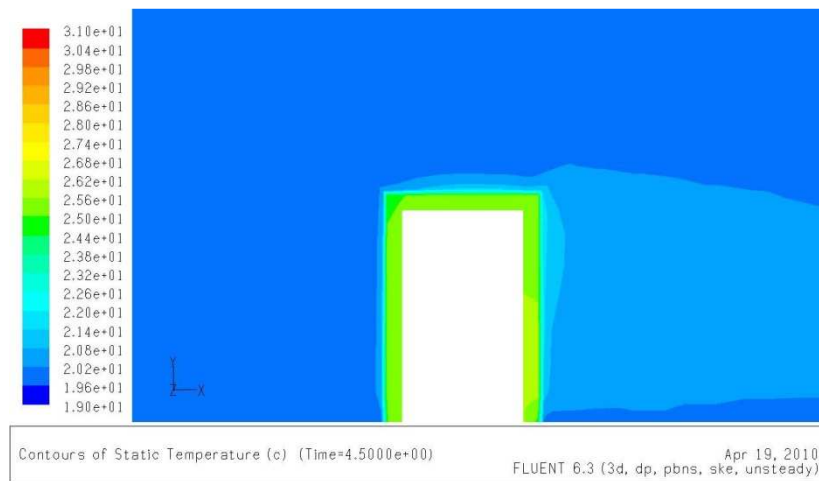
Nr.17: Temperatur $t=3.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



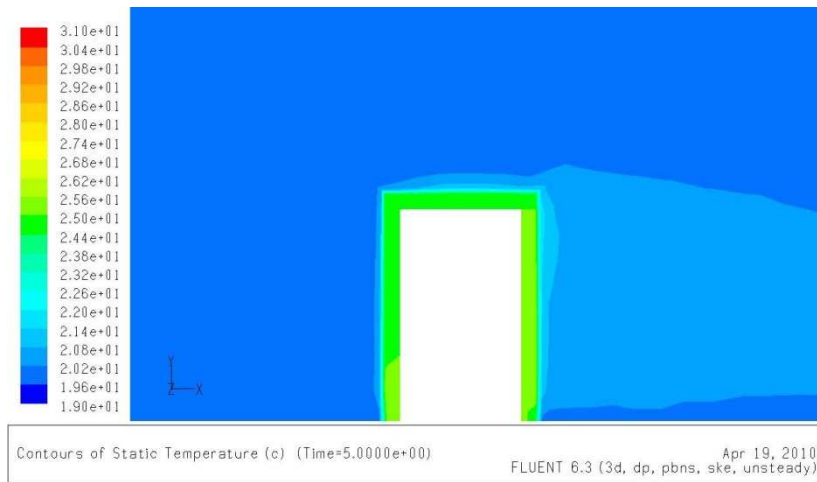
Nr.18: Temperatur $t=4$ s (Farbtabellenmaß = 20)



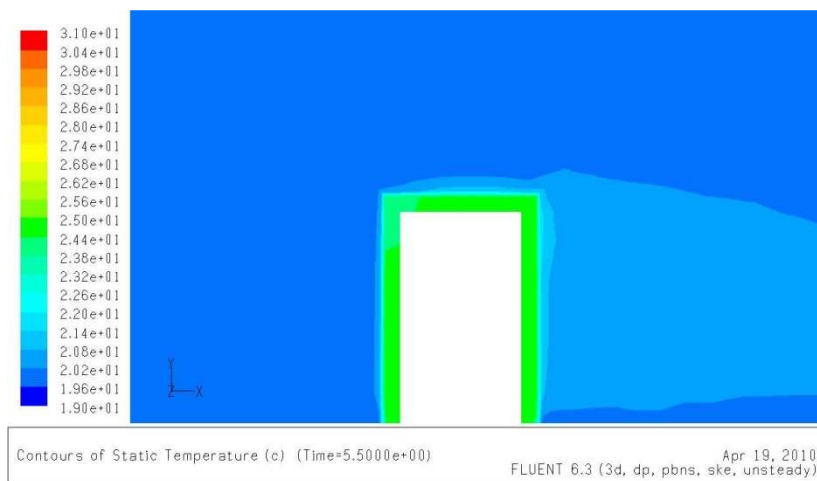
Nr.19: Temperatur $t=4.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



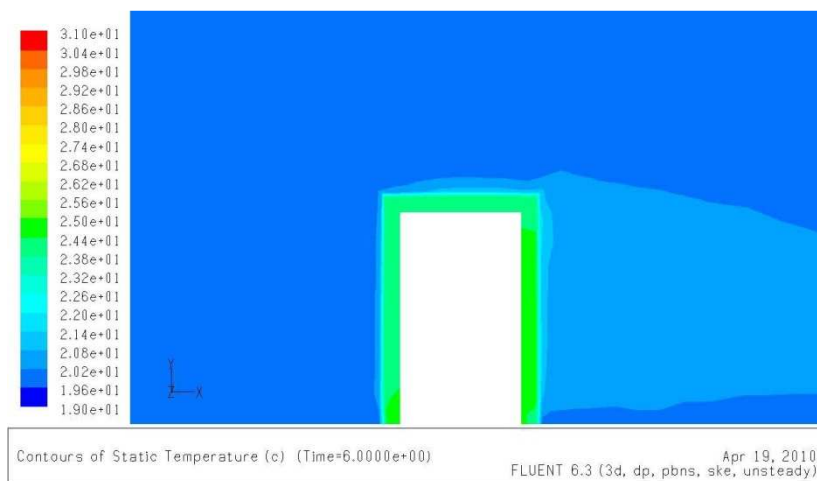
Nr.20: Temperatur t=5 s (Farbtabellenmaß = 20)



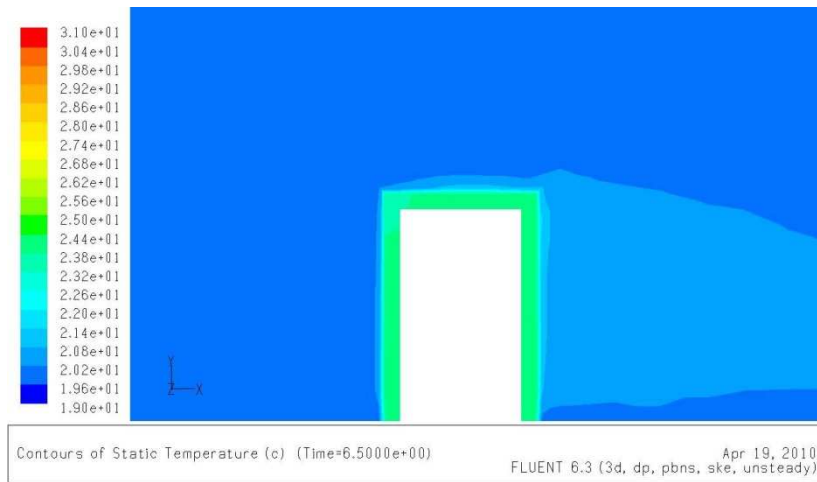
Nr.21: Temperatur t=5.5 s (Farbtabellenmaß = 20)



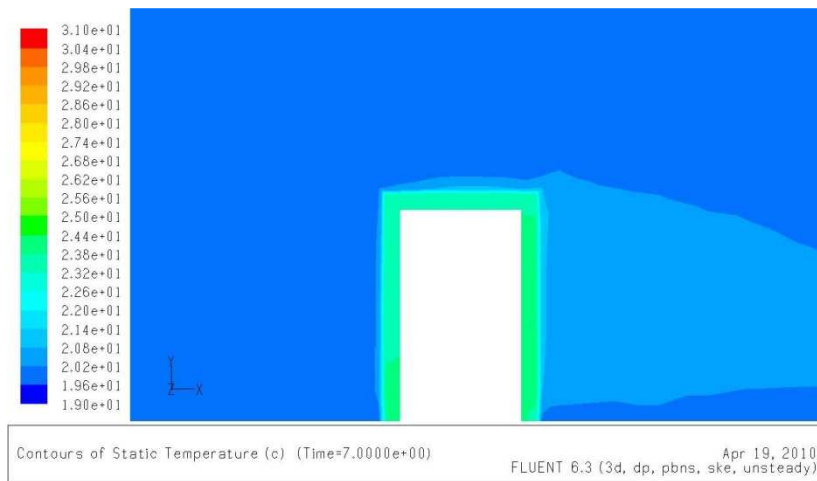
Nr.22: Temperatur t=6 s (Farbtabellenmaß = 20)



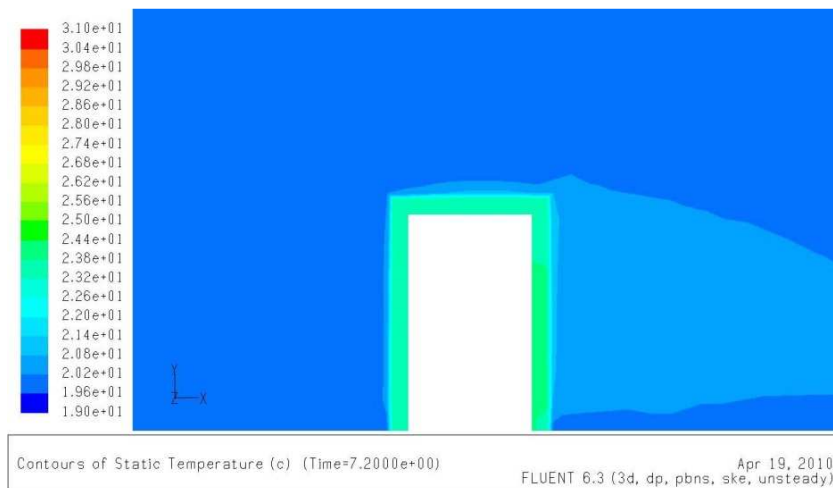
Nr.23: Temperatur t=6.5 s (Farbtabellenmaß = 20)



Nr.24: Temperatur t=7 s (Farbtabellenmaß = 20)

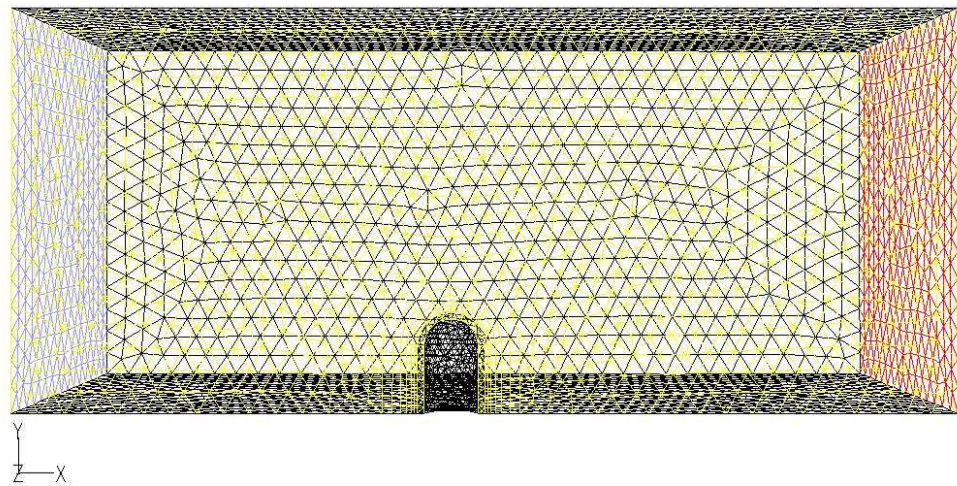


Nr.25: Temperatur t=7.2 s (Farbtabellenmaß = 20)



B2 halbkugelartige Form des Mantels des Thermoelements

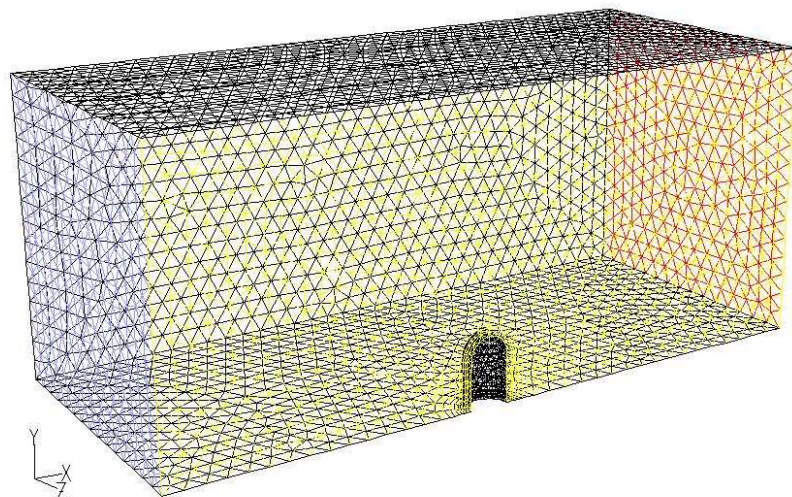
Nr.01: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y)



Grid (Time=0.0000e+00)

FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady) Apr 16, 2010

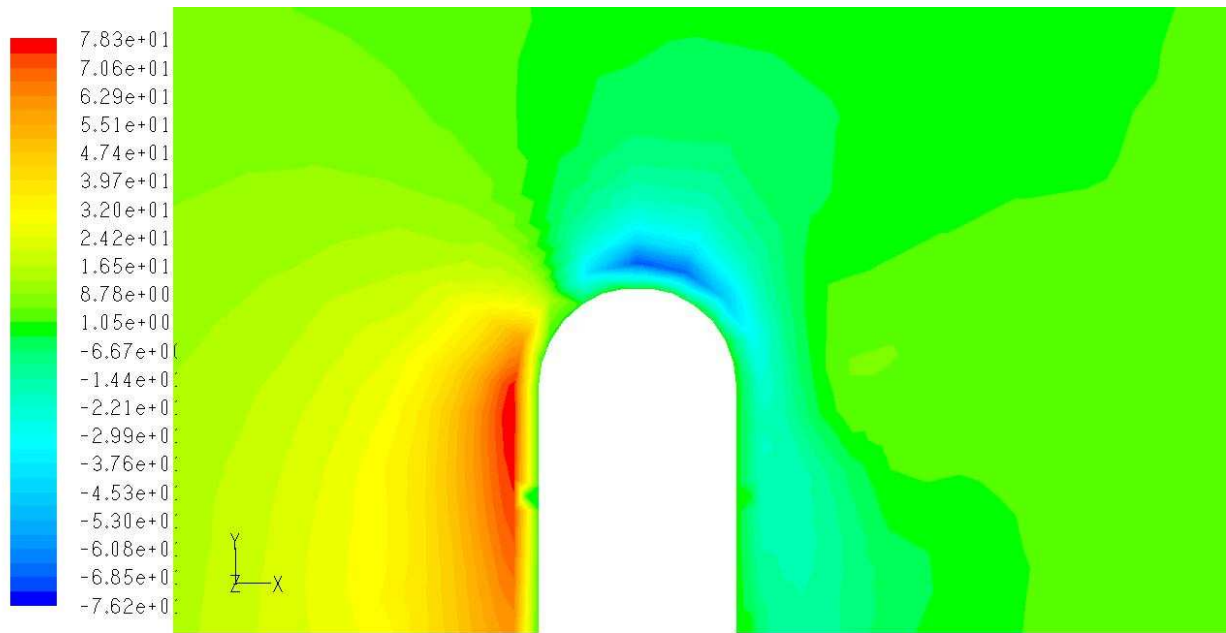
Nr.02: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y,z)



Grid (Time=0.0000e+00)

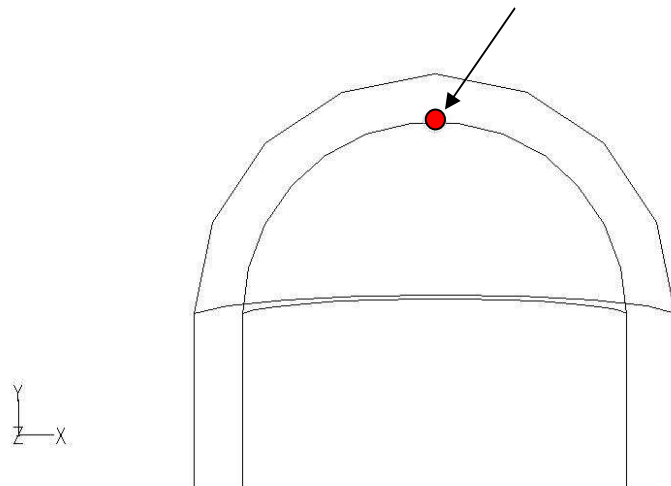
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady) Apr 16, 2010

Nr.03: Druck (Farbtabellemaß = 20)



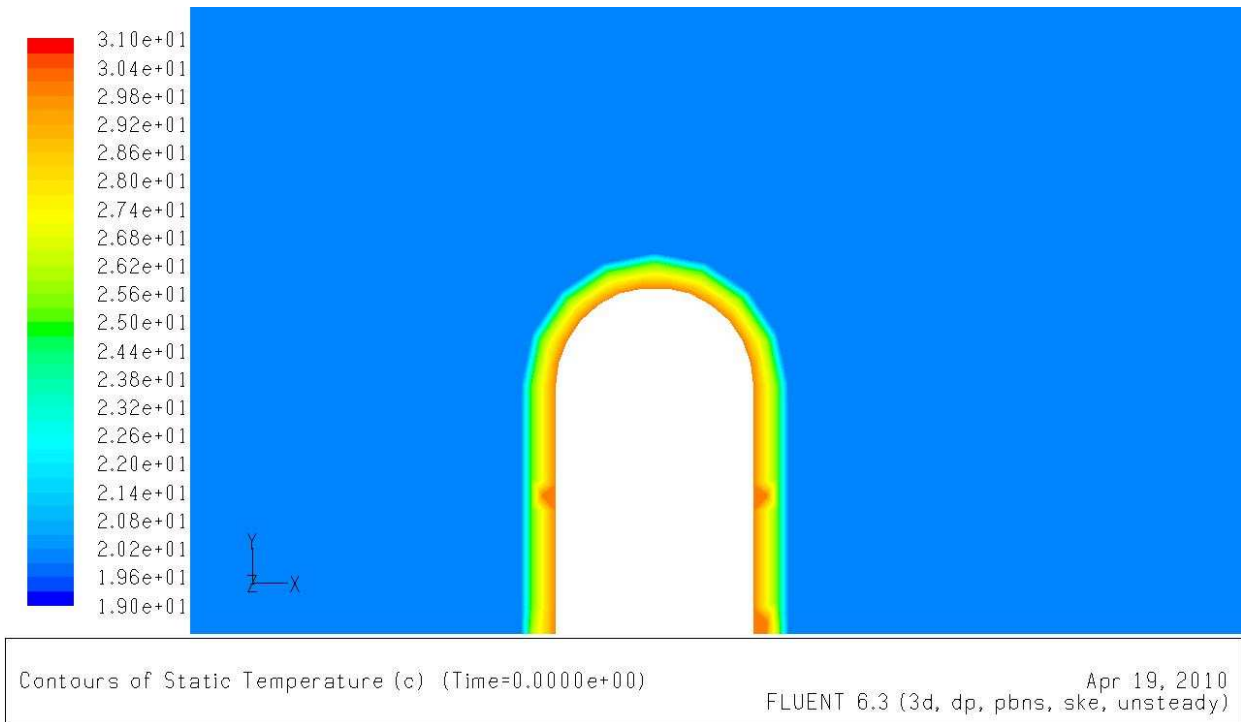
Contours of Static Pressure (pascal) (Time= 7.5000×10^0) Apr 19, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

Nr.04: der untersuchte Punkt

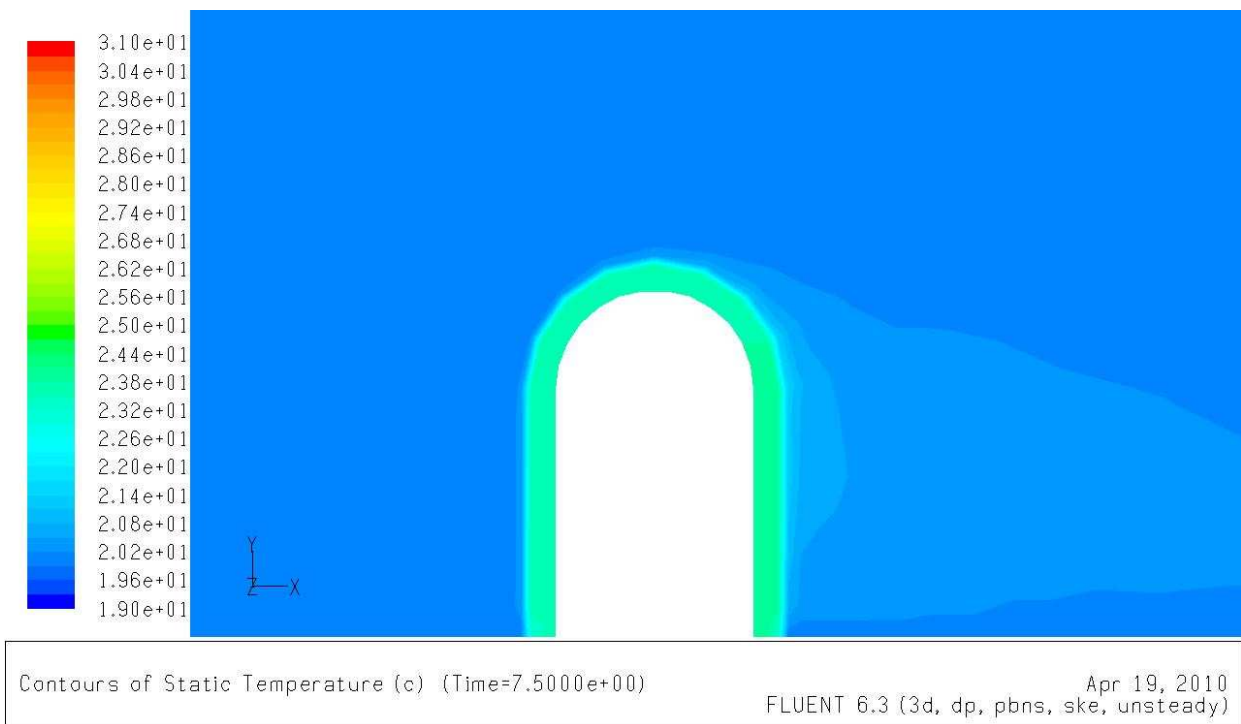


Grid (Time= 1.0000×10^0) Apr 18, 2010
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady)

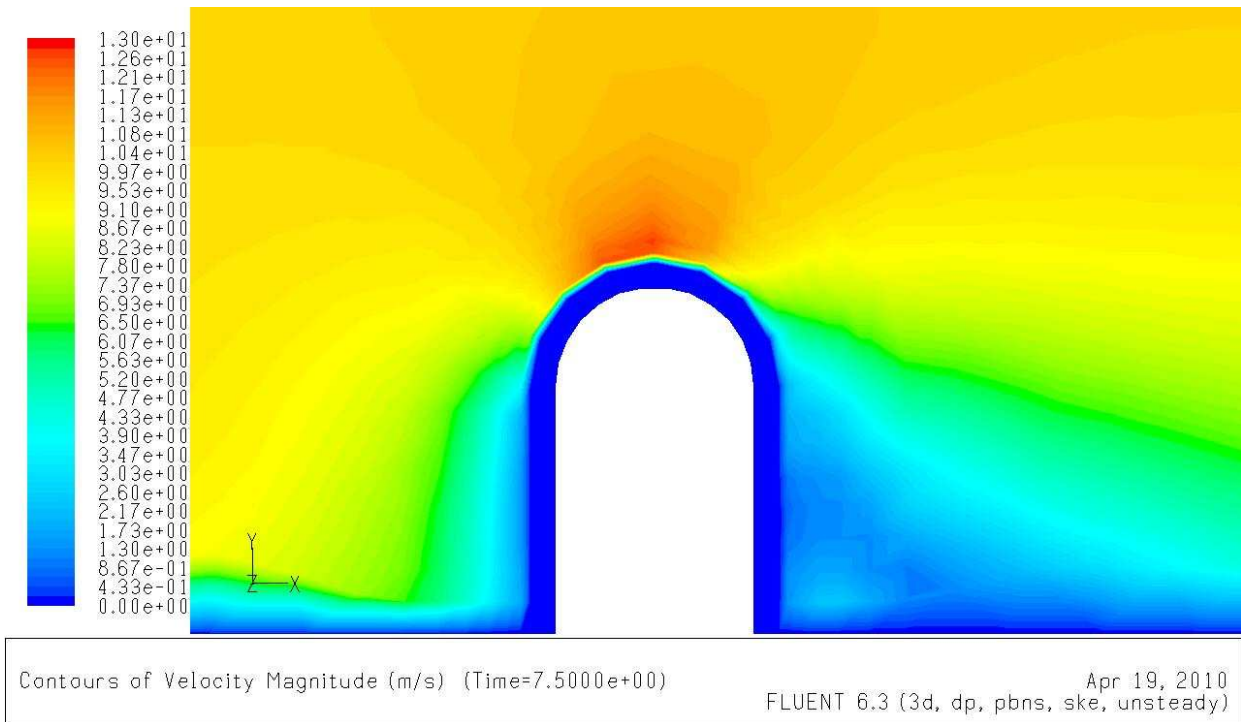
Nr.05: Temperatur vor der Iteration $t=0$ s (Farbtabellemaß = 20)



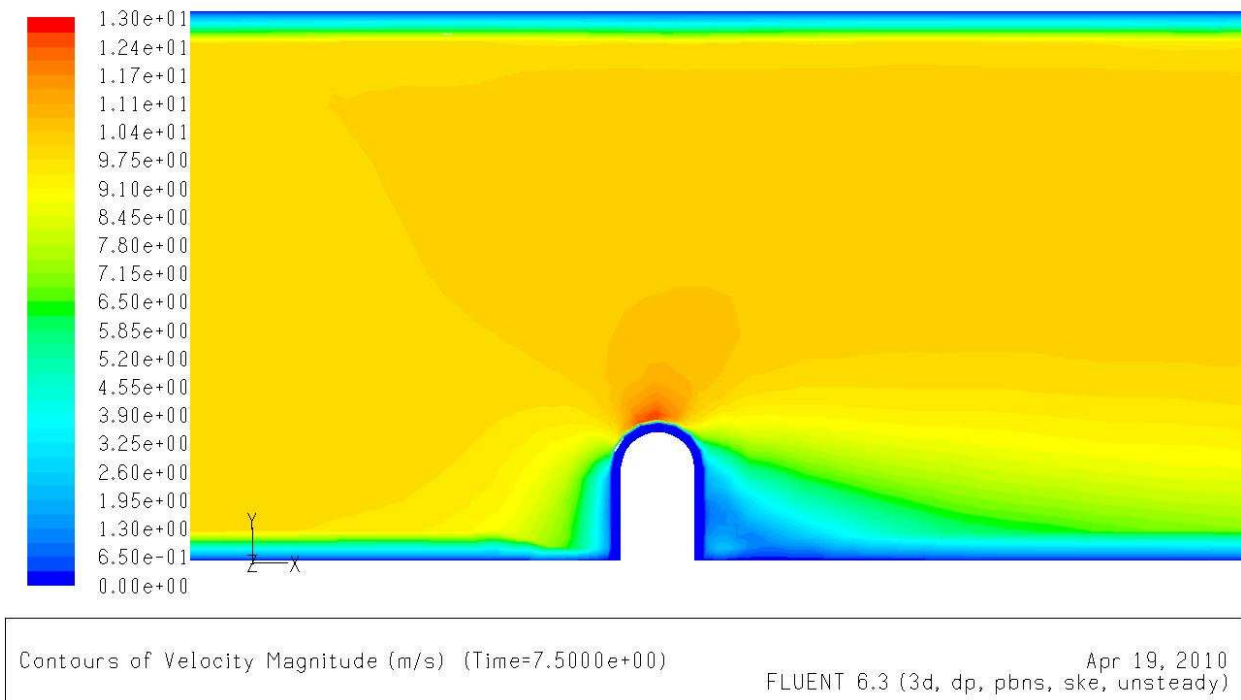
Nr.06: Temperatur bei der Ansprechzeit $T_{(t=t_0)} = T_A$ (Farbtabellemaß = 20)



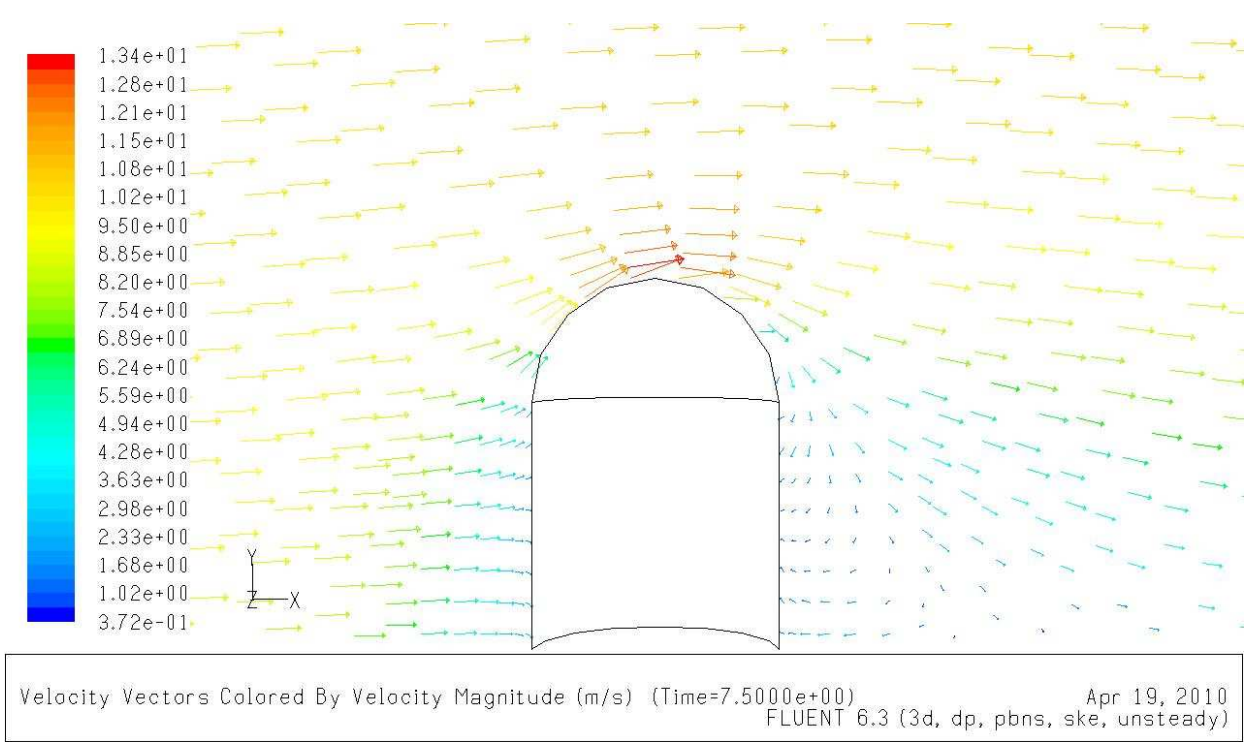
Nr.07: Geschwindigkeit, kleiner Bereich (Farbtabellemaß = 30)



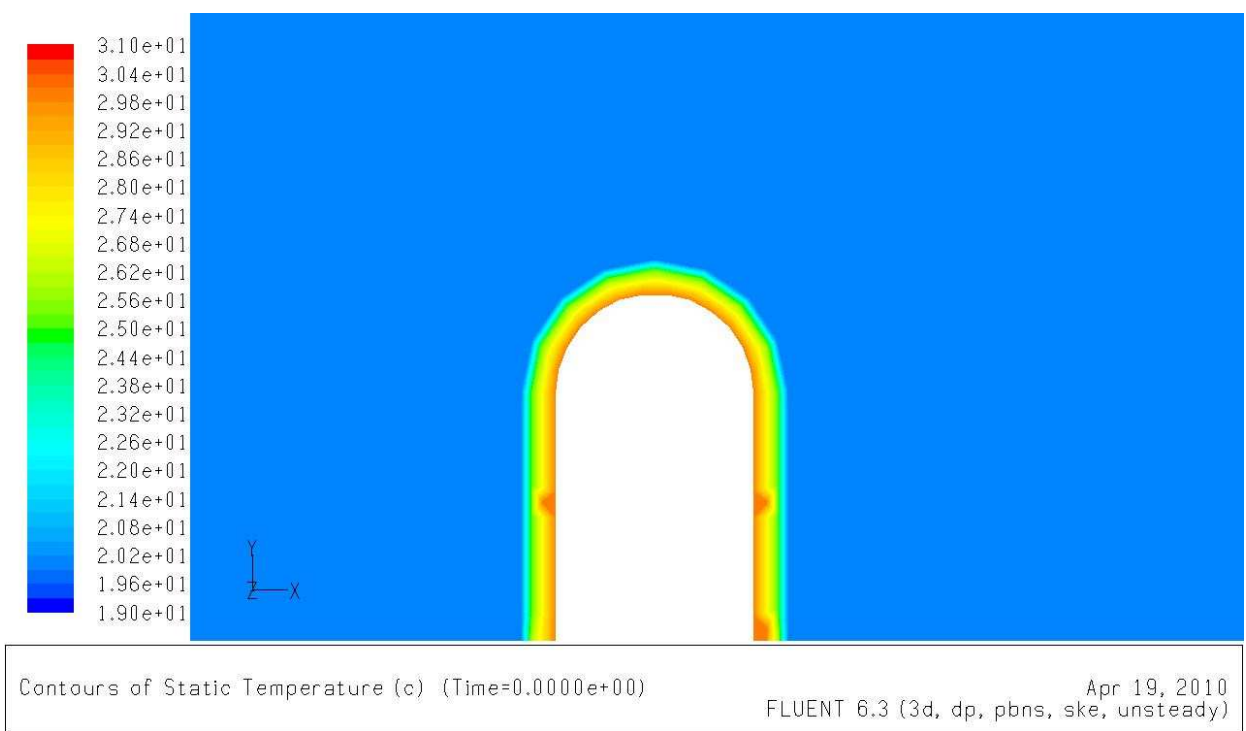
Nr.08: Geschwindigkeit, großer Bereich (Farbtabellemaß = 20)



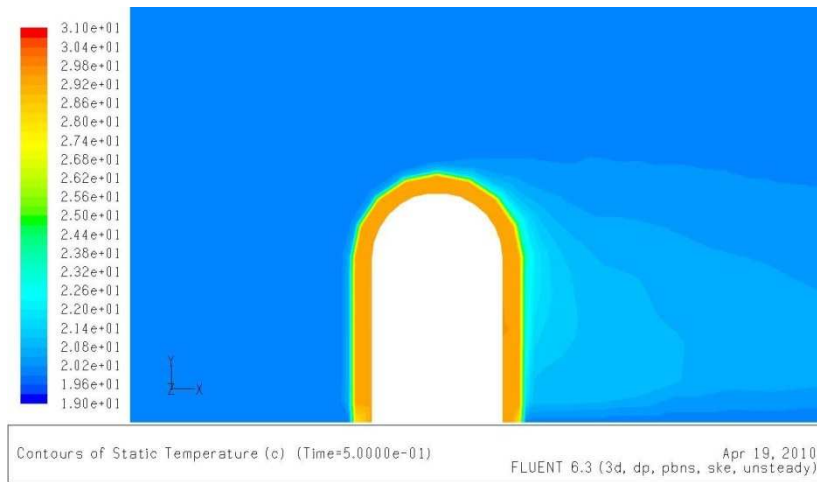
Nr.09: Geschwindigkeit (Farbtabellemaß = 20)



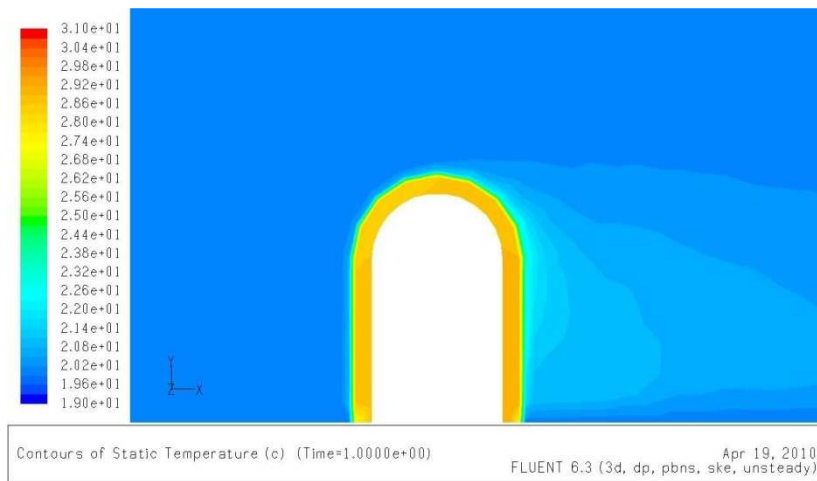
Nr.10: Temperatur vor der Iteration t=0 (Farbtabellemaß = 20)



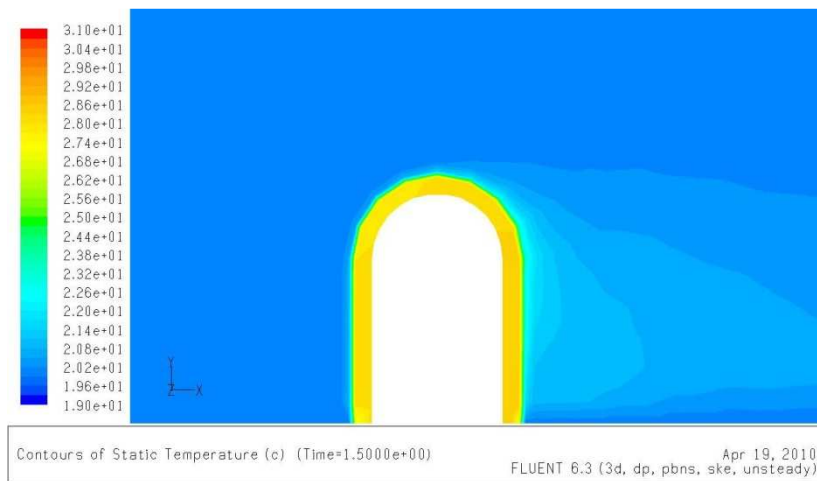
Nr.11: Temperatur $t=0.5$ s (Farbtabellemaß = 20)



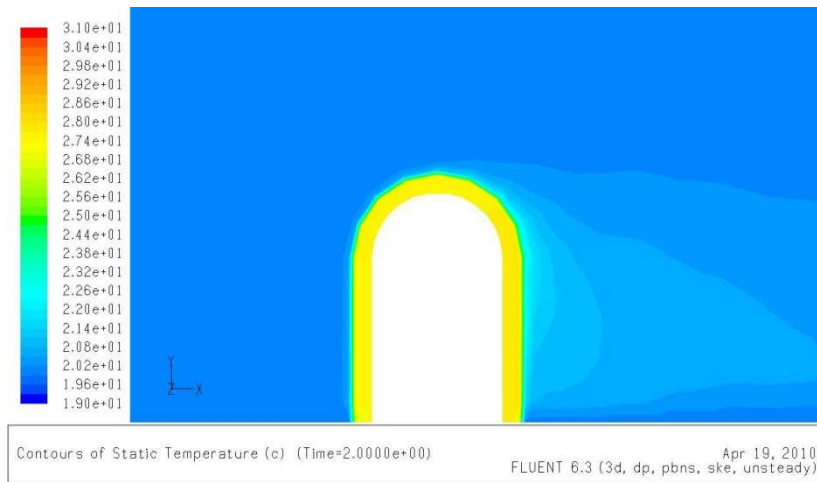
Nr.12: Temperatur $t=1$ s (Farbtabellemaß = 20)



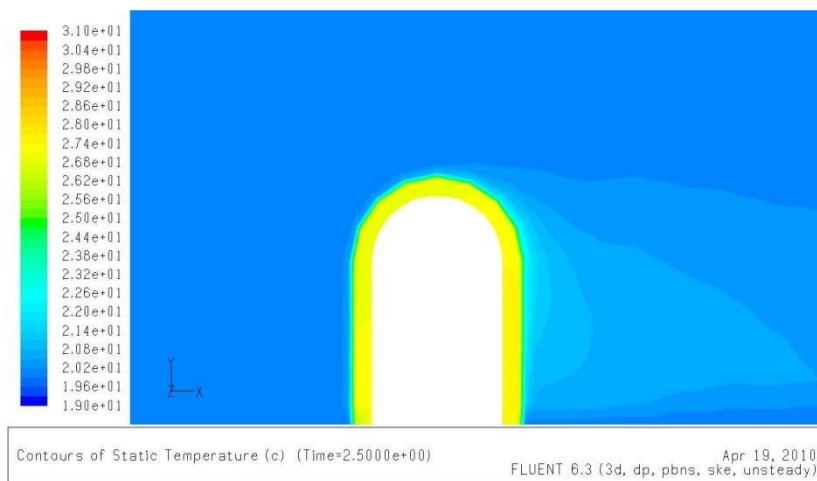
Nr.13: Temperatur $t=1.5$ s (Farbtabellemaß = 20)



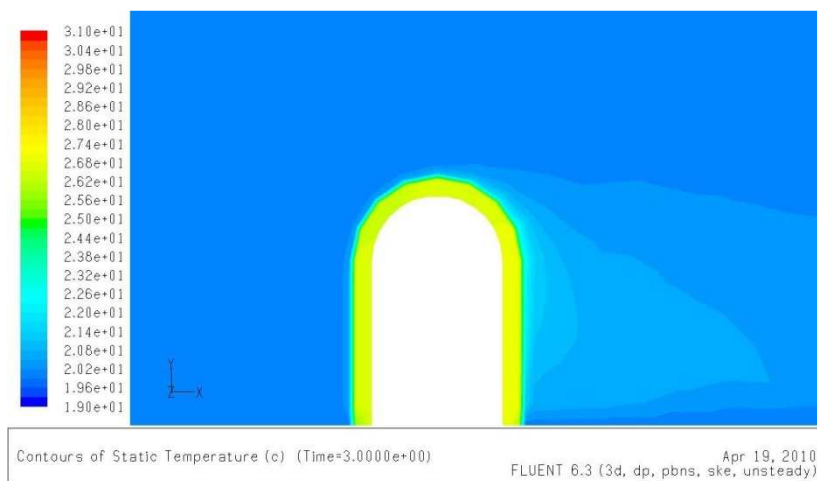
Nr.14: Temperatur t=2 s (Farbtabellenmaß = 20)



Nr.15: Temperatur t=2.5 s (Farbtabellenmaß = 20)



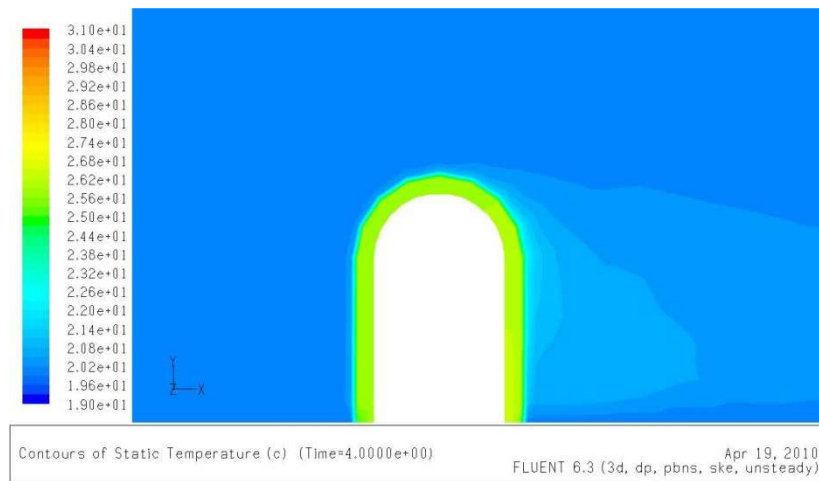
Nr.16: Temperatur t=3 s (Farbtabellenmaß = 20)



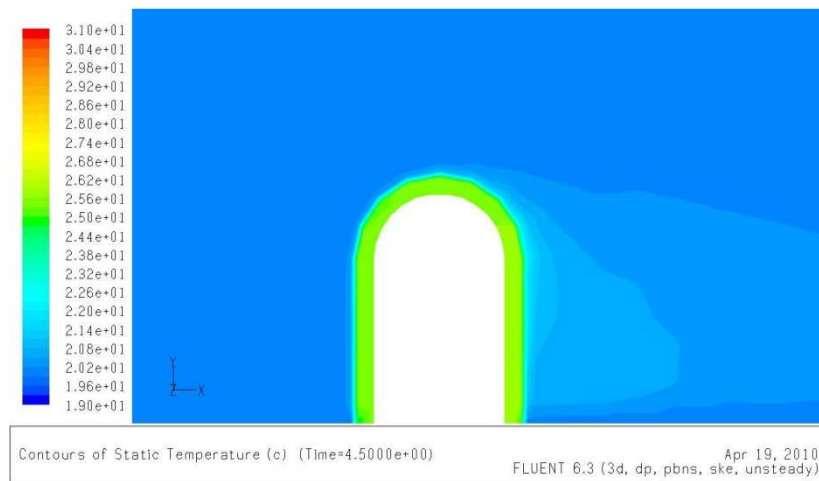
Nr.17: Temperatur $t=3.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



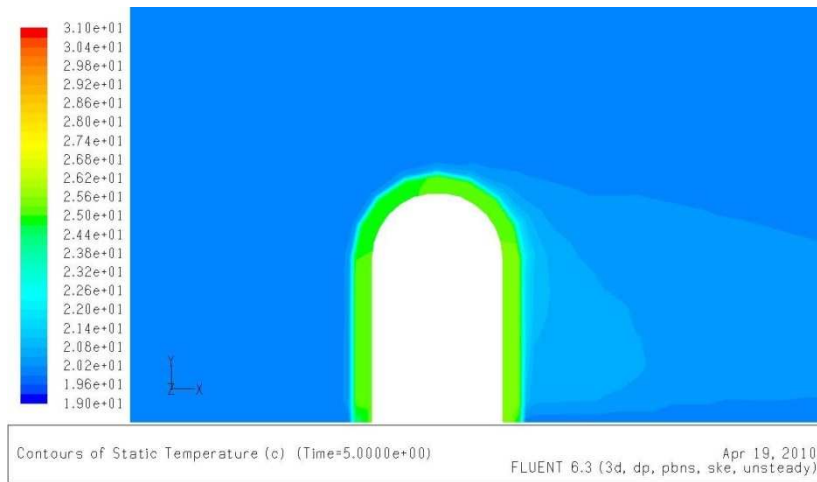
Nr.18: Temperatur $t=4$ s (Farbtabellenmaß = 20)



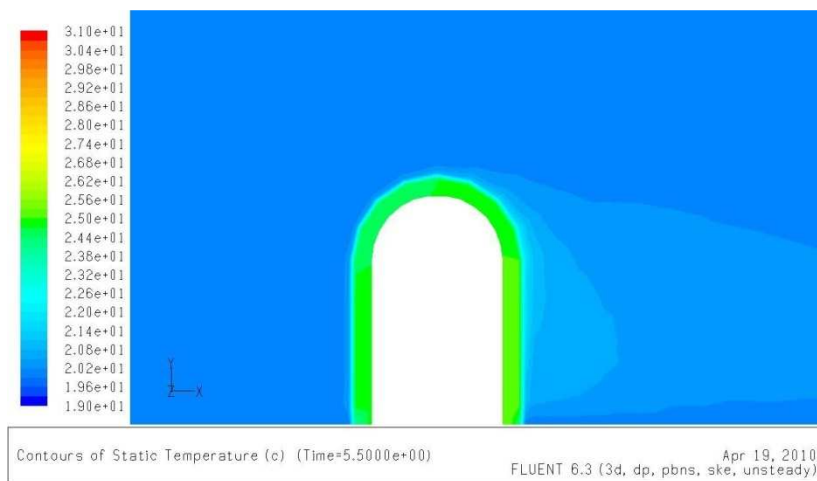
Nr.19: Temperatur $t=4.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



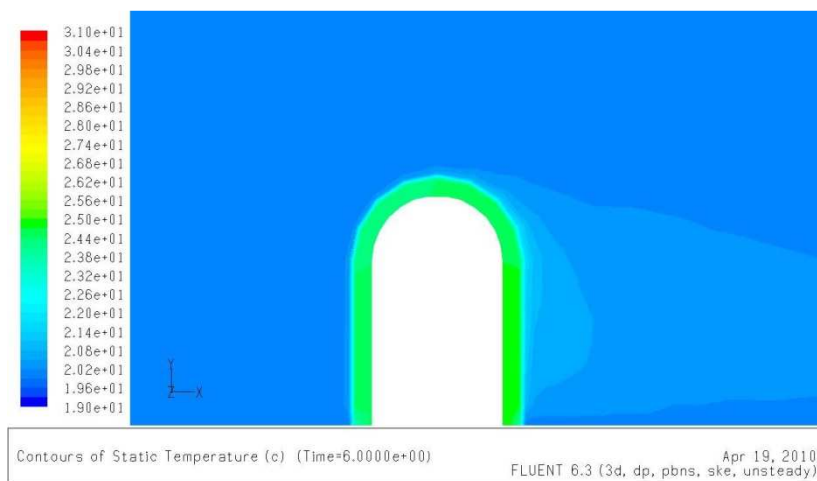
Nr.20: Temperatur t=5 s (Farbtabellenmaß = 20)



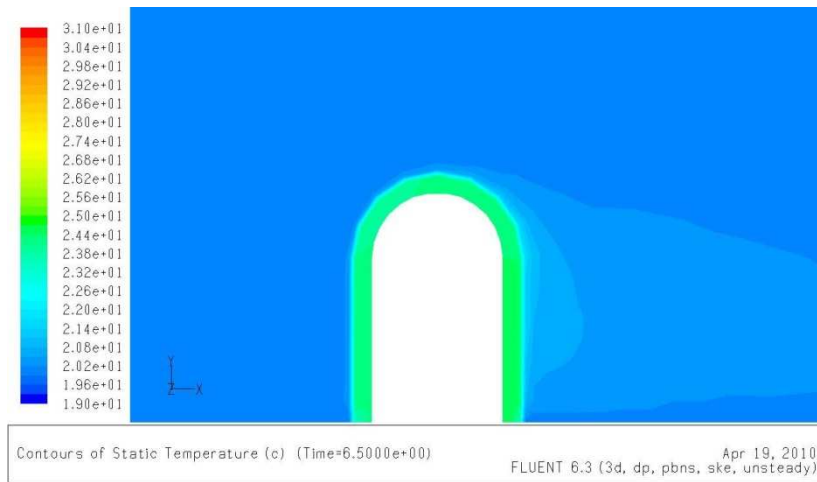
Nr.21: Temperatur t=5.5 s (Farbtabellenmaß = 20)



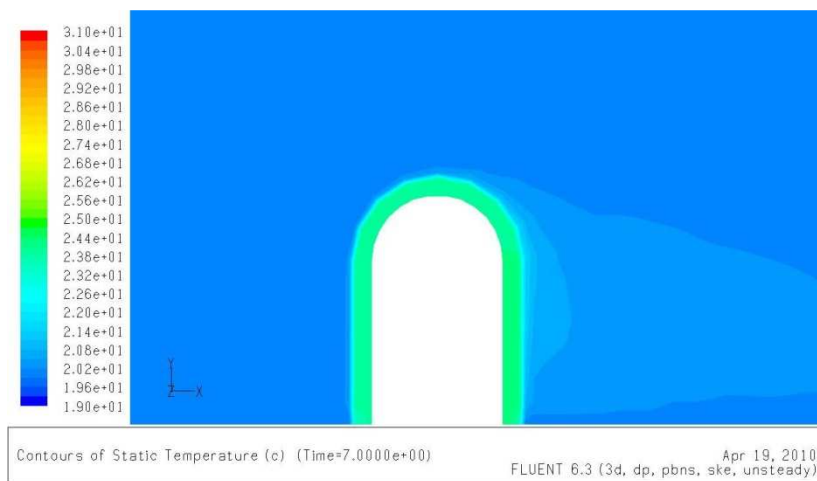
Nr.22: Temperatur t=6 s (Farbtabellenmaß = 20)



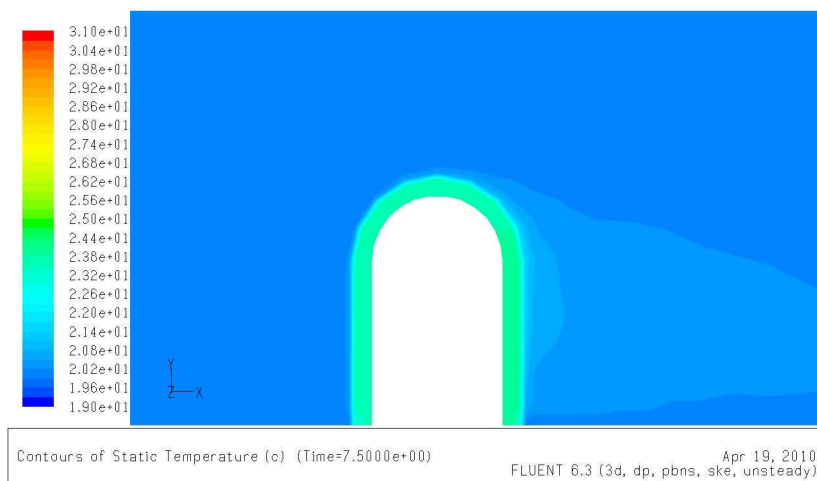
Nr.23: Temperatur $t=6.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



Nr.24: Temperatur $t=7$ s (Farbtabellenmaß = 20)

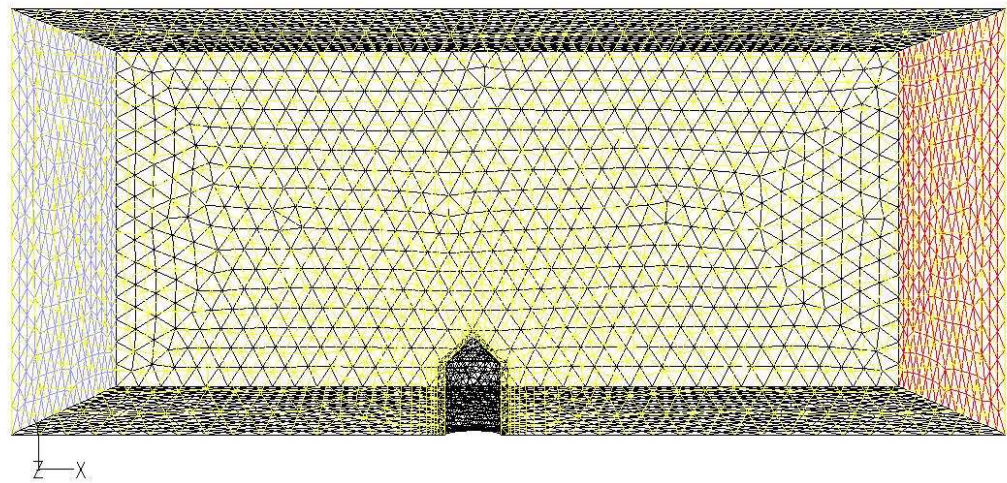


Nr.25: Temperatur $t=7.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



B3 kegelartige Form des Mantels des Thermoelements

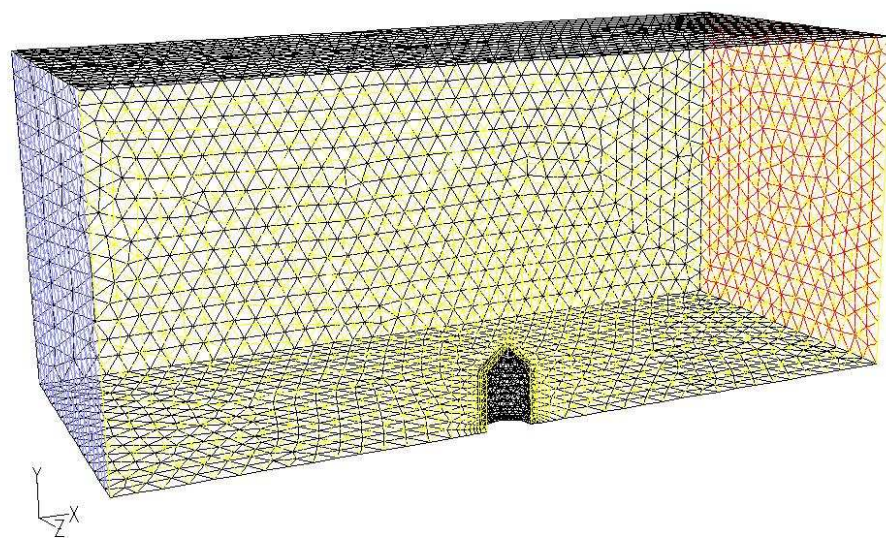
Nr.01: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y)



Grid (Time=3.0000e+01)

FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady) Apr 16, 2010

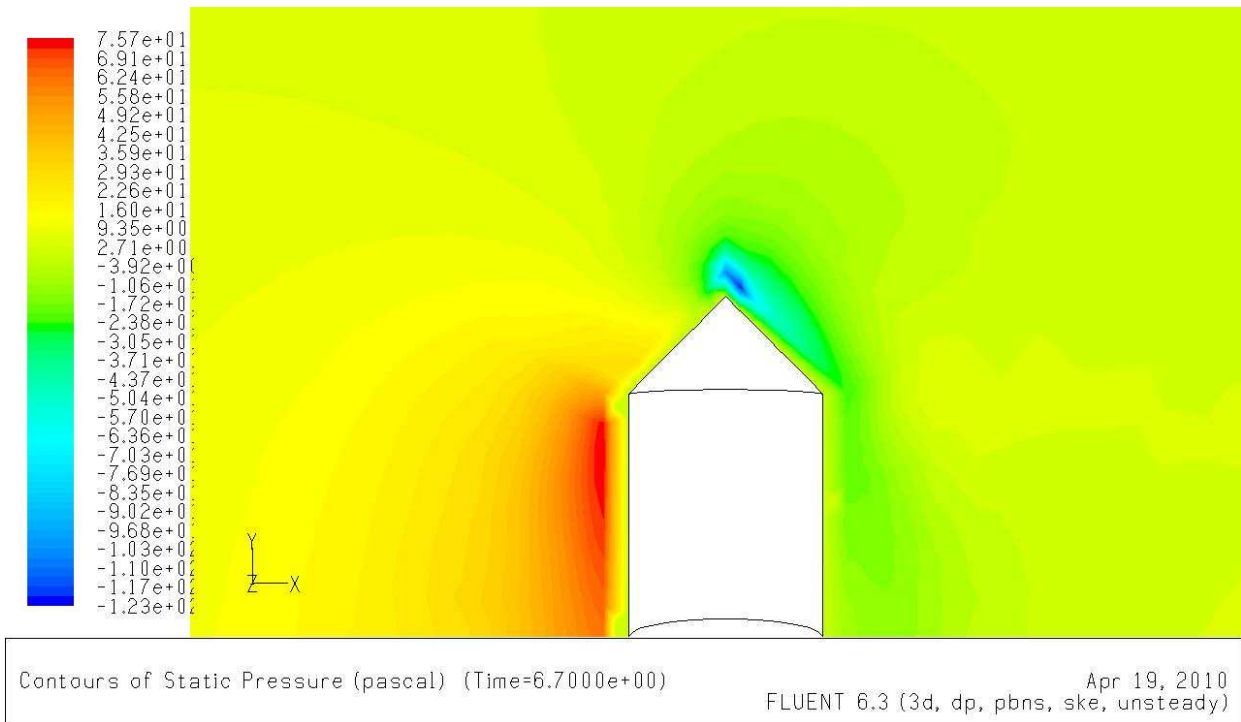
Nr.02: Mesh von Fluid- und Solid Domain (x,y,z)



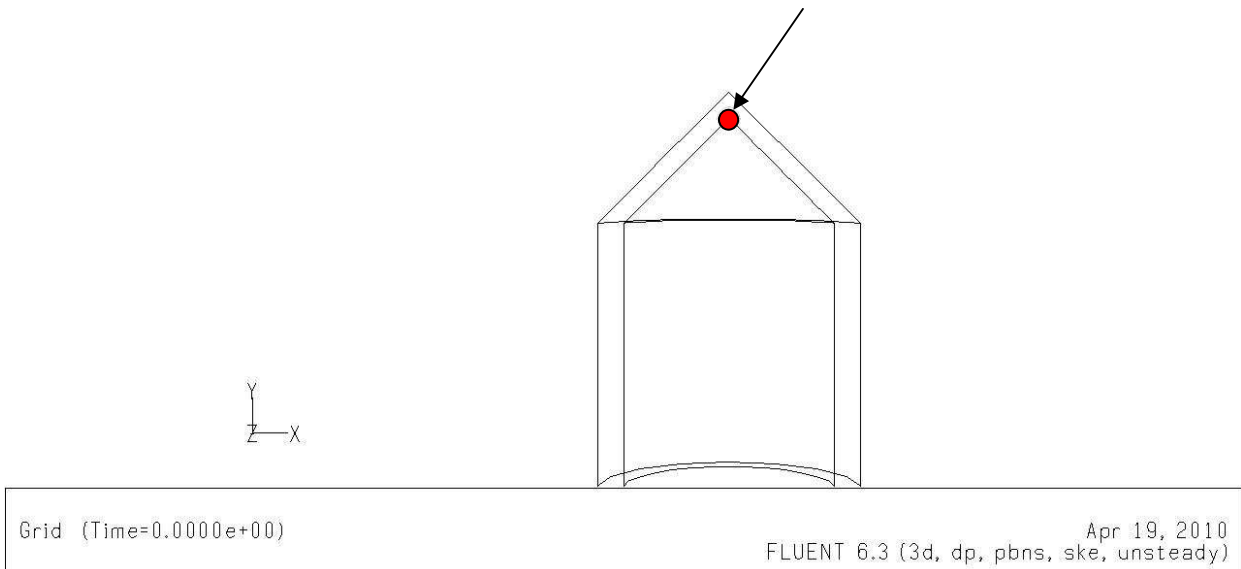
Grid (Time=3.0000e+01)

FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, ske, unsteady) Apr 16, 2010

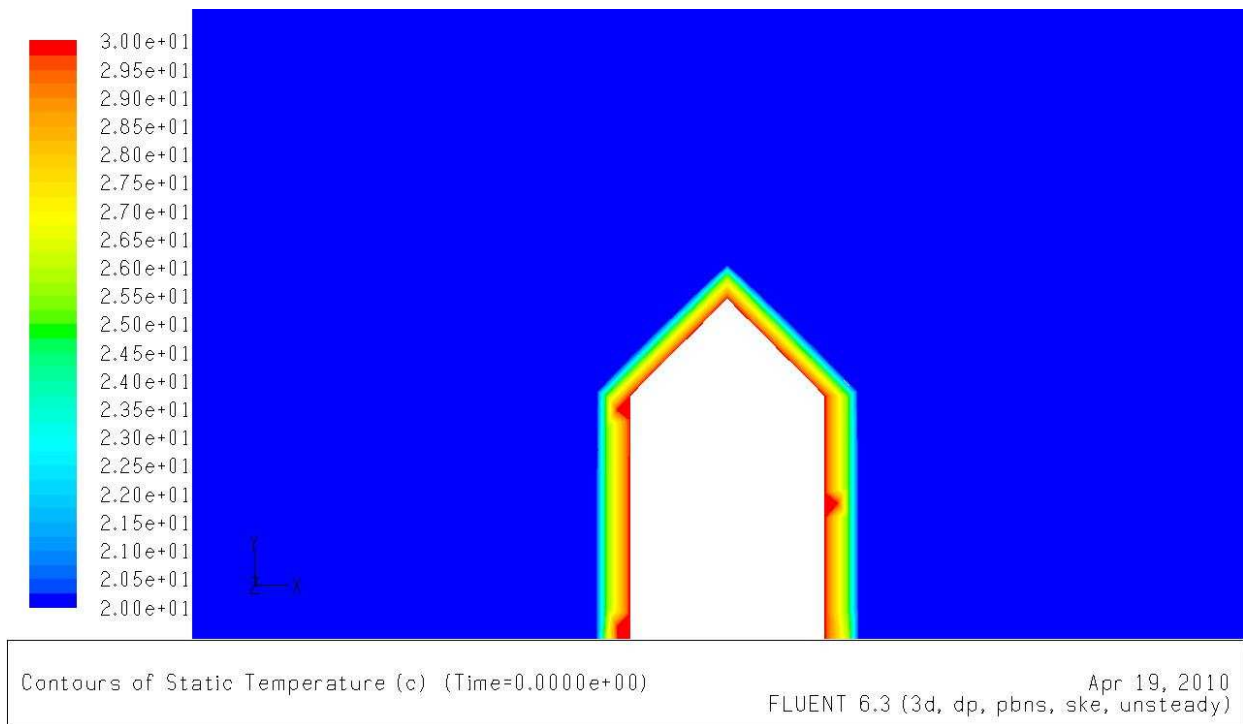
Nr.03: Druck (Farbtabellemaß = 30)



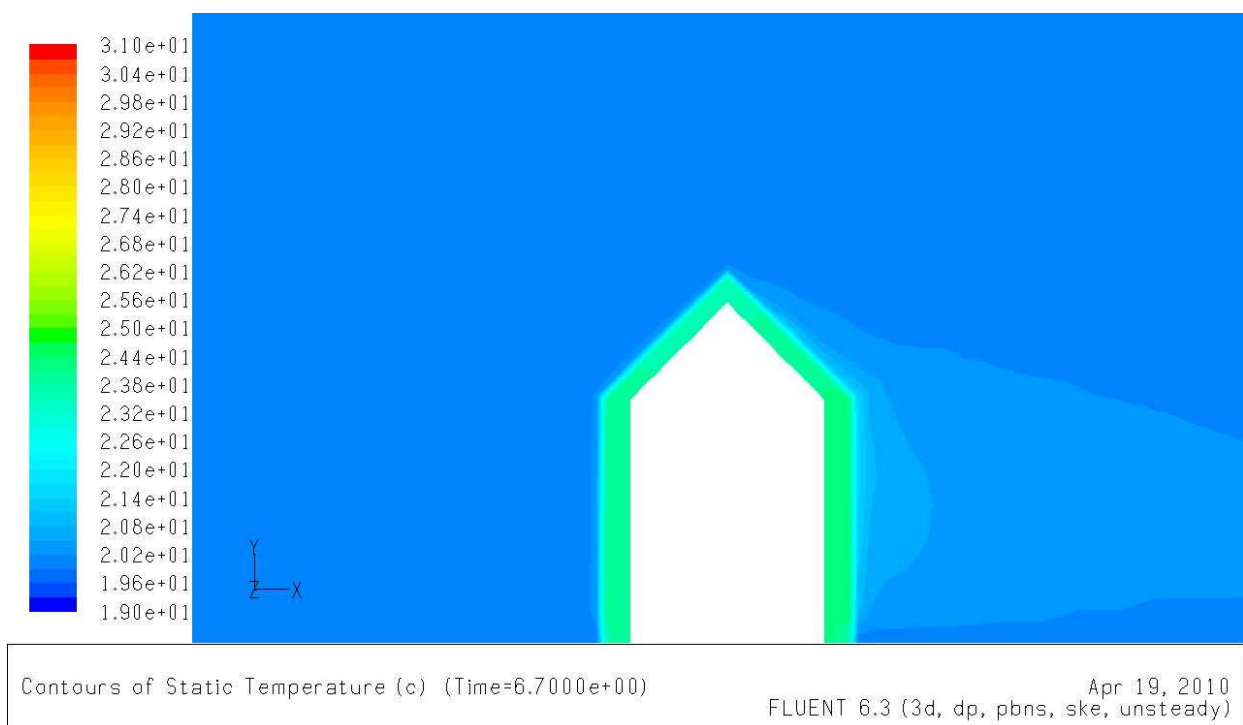
Nr.04: der untersuchte Punkt



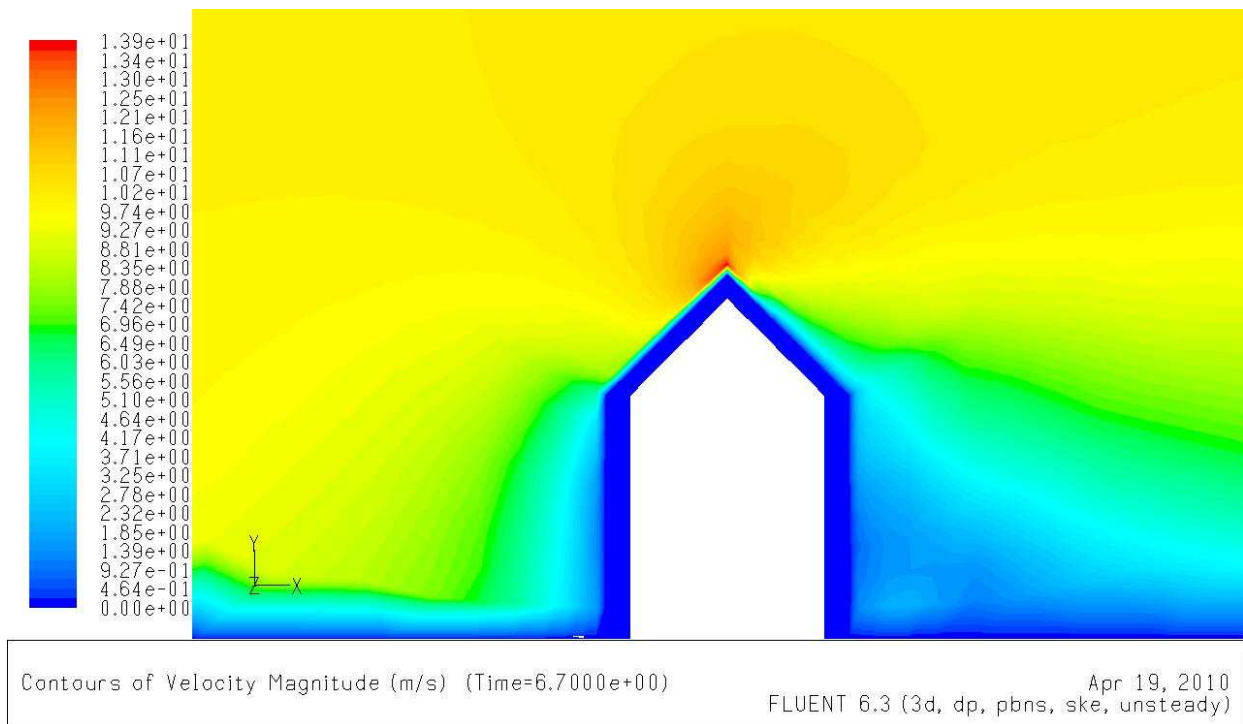
Nr.05: Temperatur vor der Iteration $t=0$ s (Farbtabellemaß = 20)



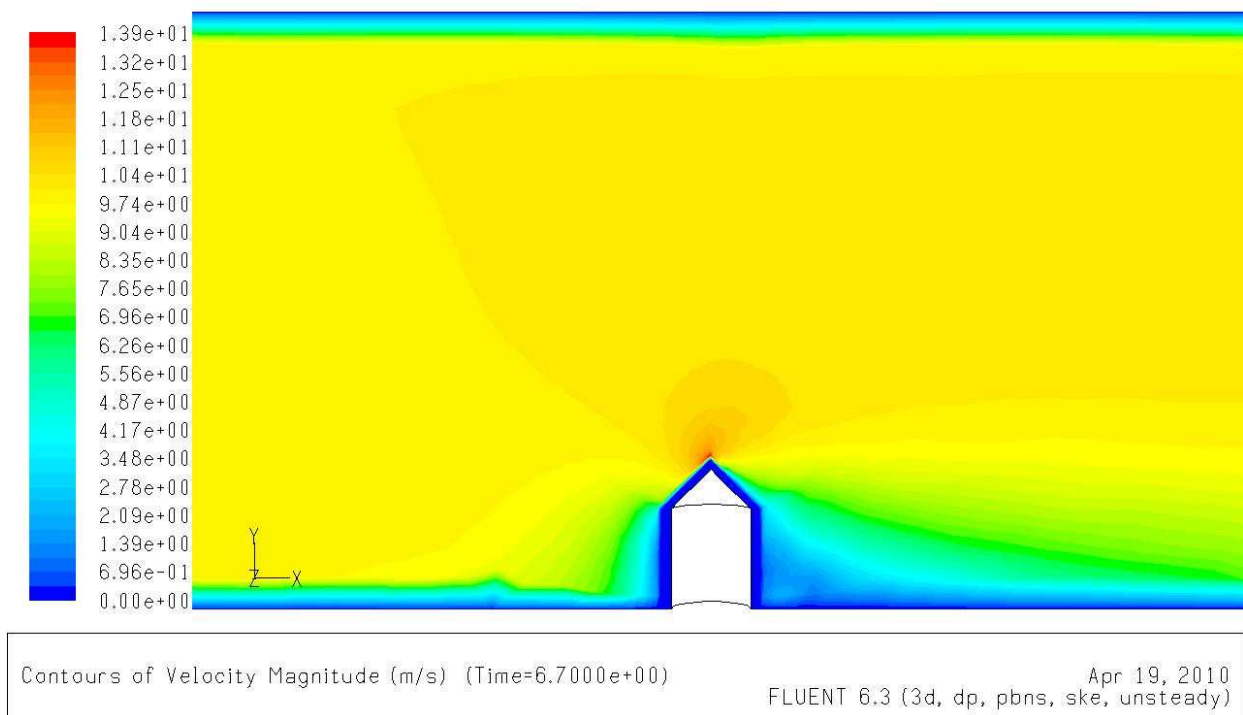
Nr.06: Temperatur bei der Ansprechzeit $T_{(t=t_0)} = T_A$ (Farbtabellemaß = 20)



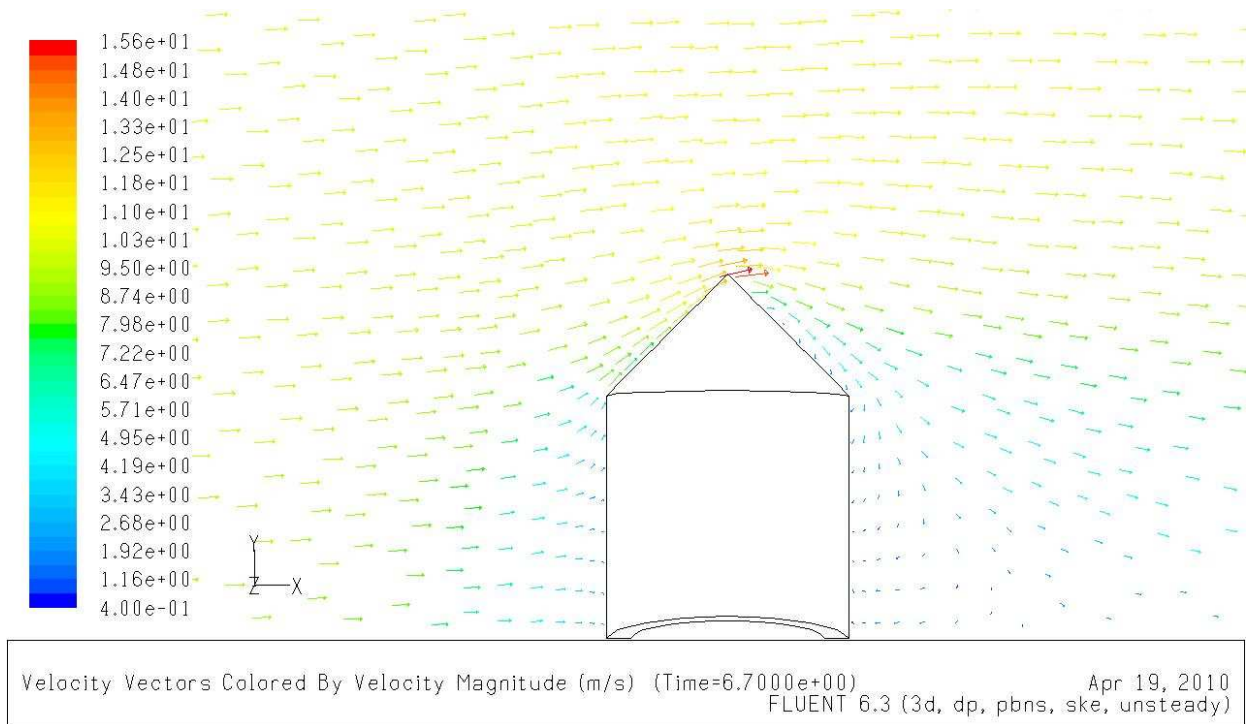
Nr.07: Geschwindigkeit, kleiner Bereich (Farbtabellemaß = 35)



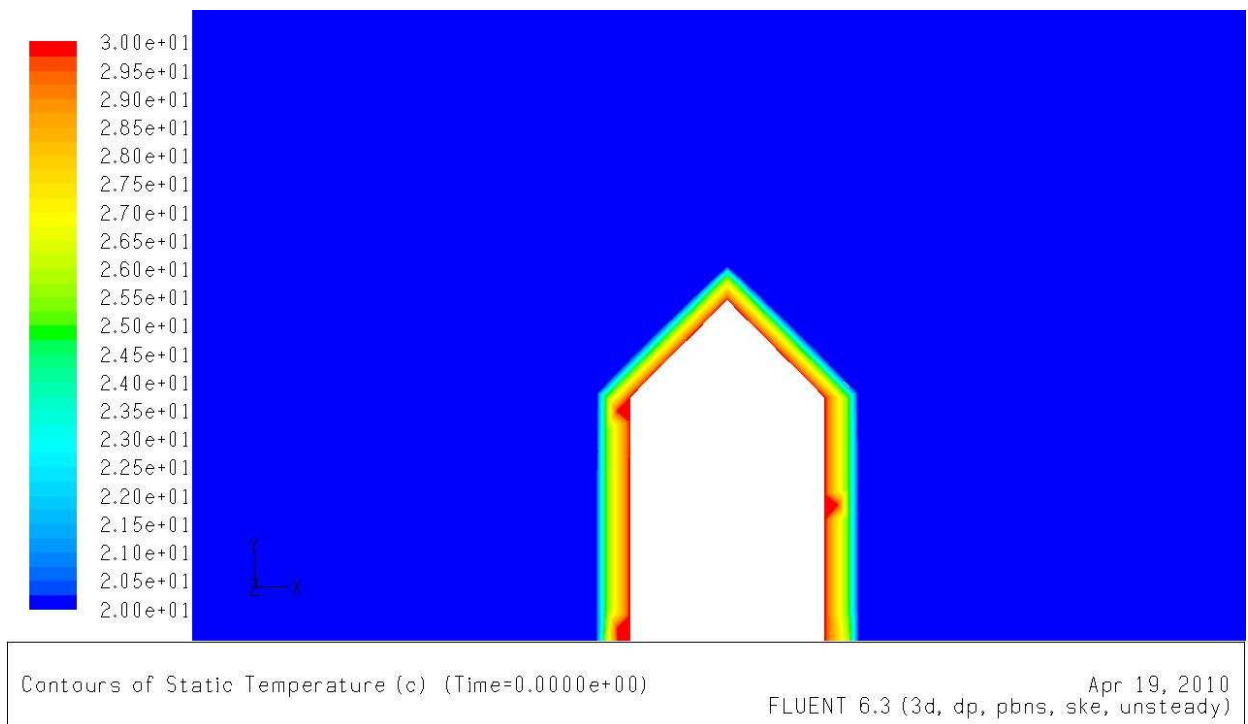
Nr.08: Geschwindigkeit, großer Bereich (Farbtabellemaß = 20)



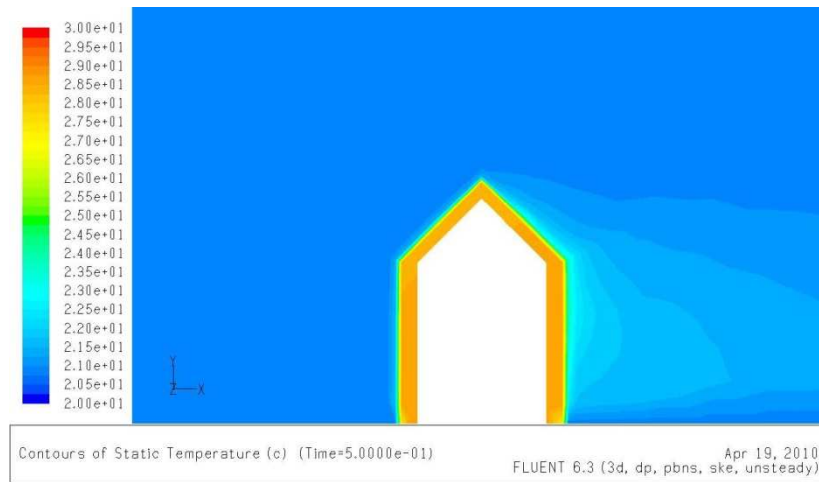
Nr.09: Geschwindigkeit (Farbtabellemaß = 20)



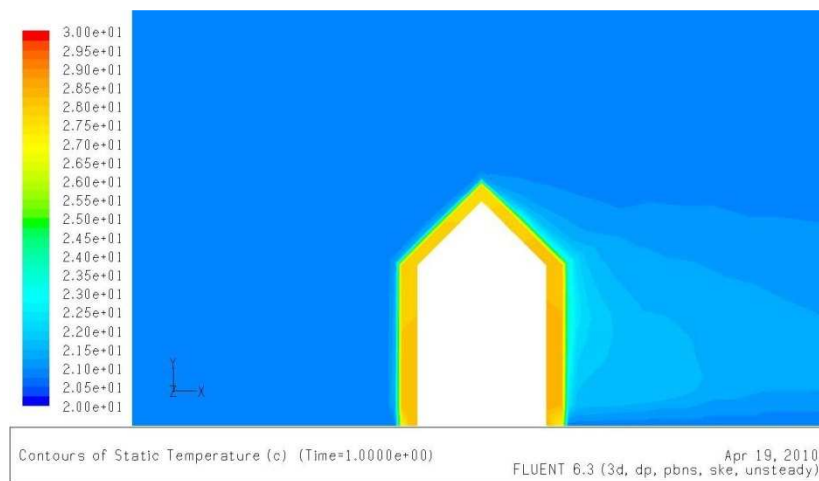
Nr.10: Temperatur vor der Iteration t=0 (Farbtabellemaß = 20)



Nr.11: Temperatur $t=0.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



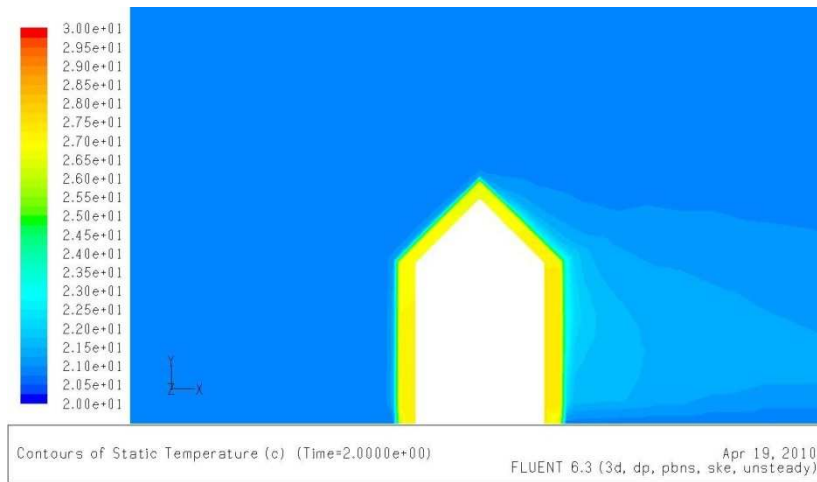
Nr.12: Temperatur $t=1$ s (Farbtabellenmaß = 20)



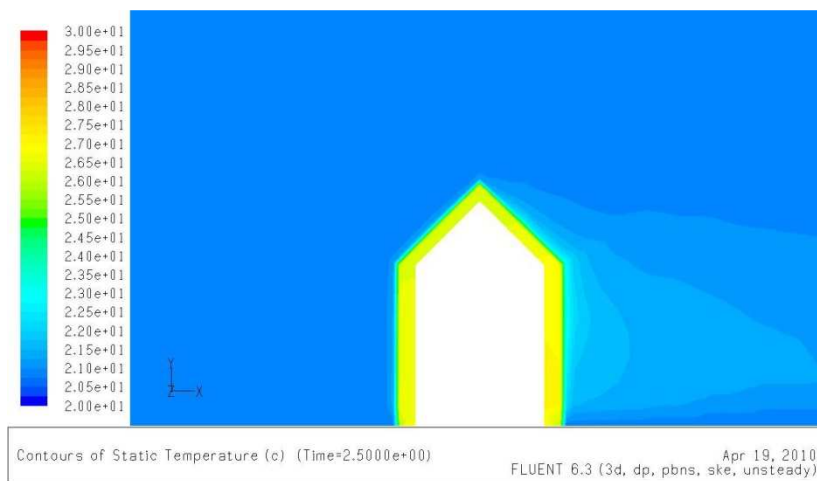
Nr.13: Temperatur $t=1.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



Nr.14: Temperatur t=2 s (Farbtabellenmaß = 20)



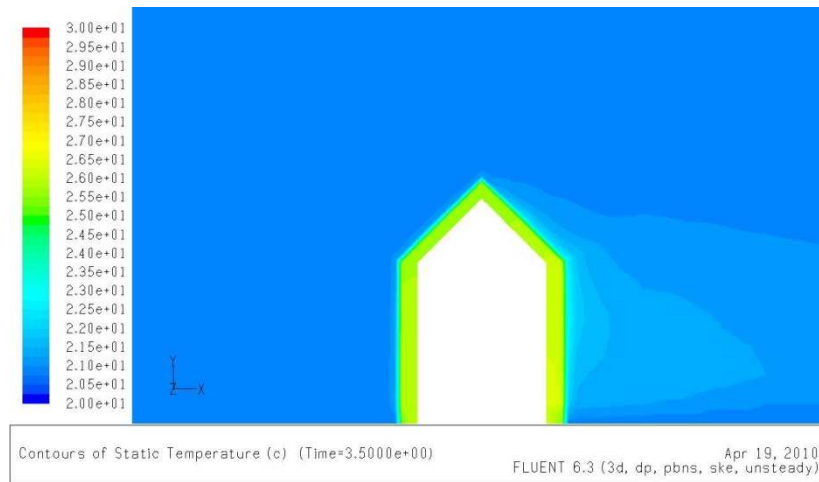
Nr.15: Temperatur t=2.5 s (Farbtabellenmaß = 20)



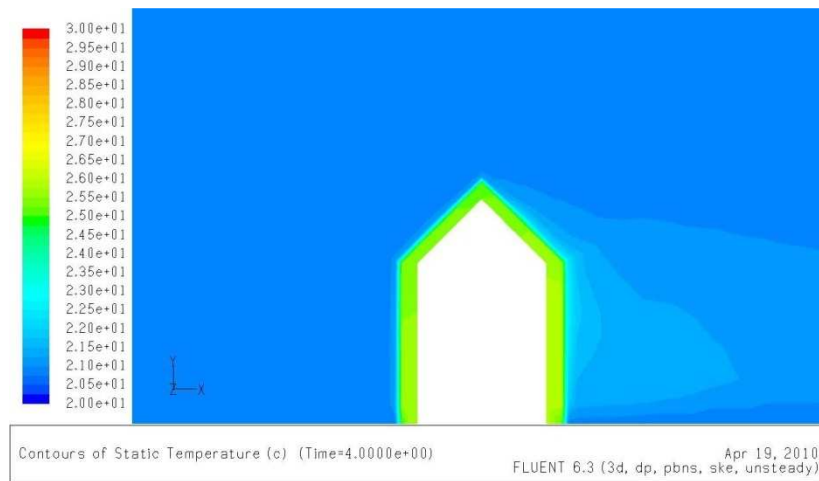
Nr.16: Temperatur t=3 s (Farbtabellenmaß = 20)



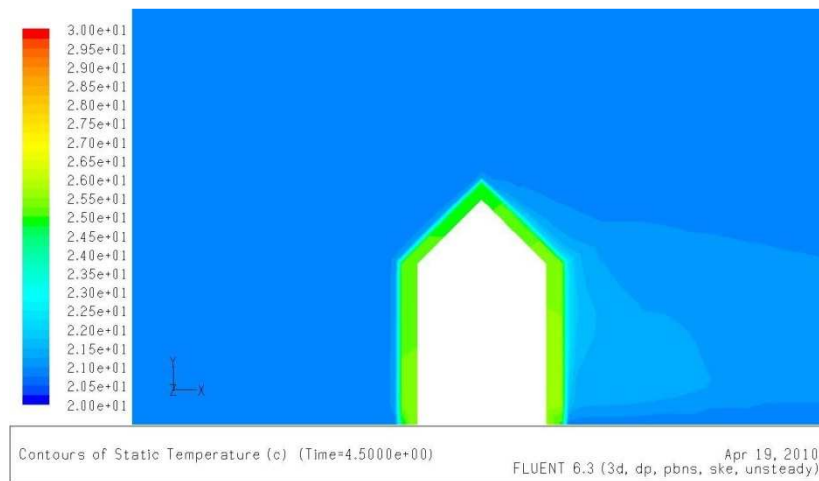
Nr.17: Temperatur $t=3.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



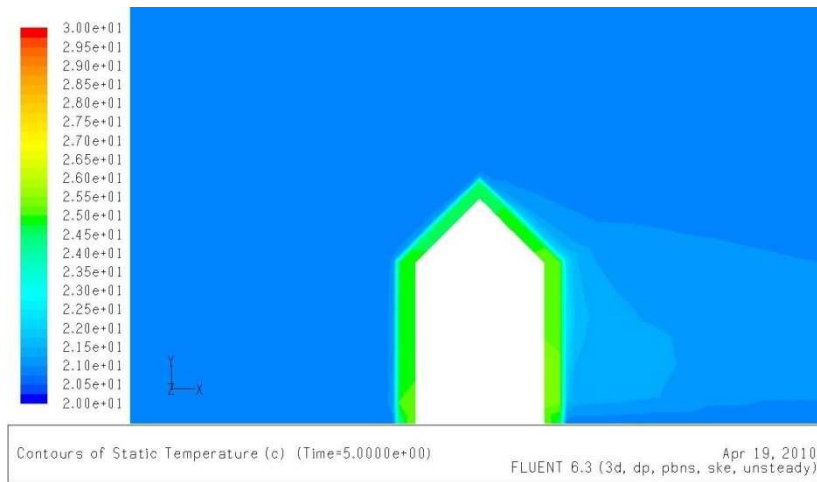
Nr.18: Temperatur $t=4$ s (Farbtabellenmaß = 20)



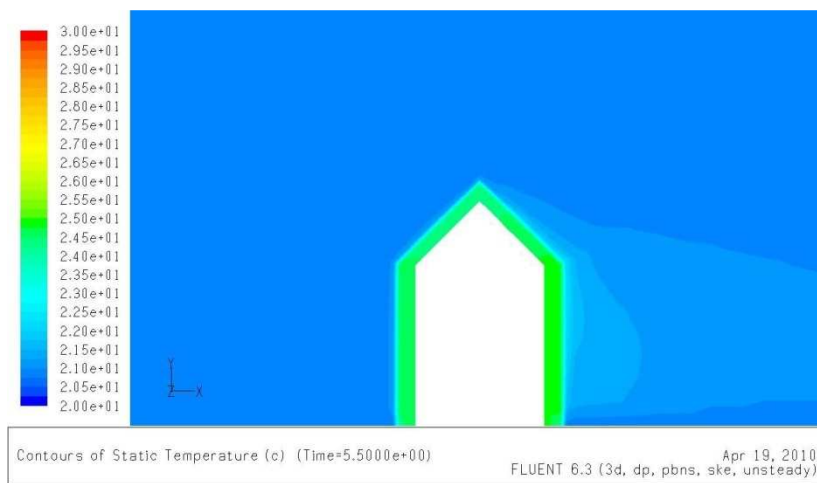
Nr.19: Temperatur $t=4.5$ s (Farbtabellenmaß = 20)



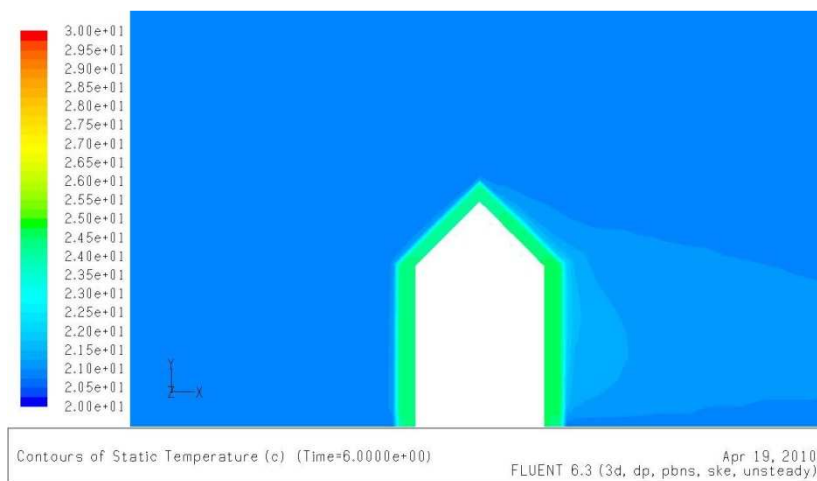
Nr.20: Temperatur t=5 s (Farbtabellemaß = 20)



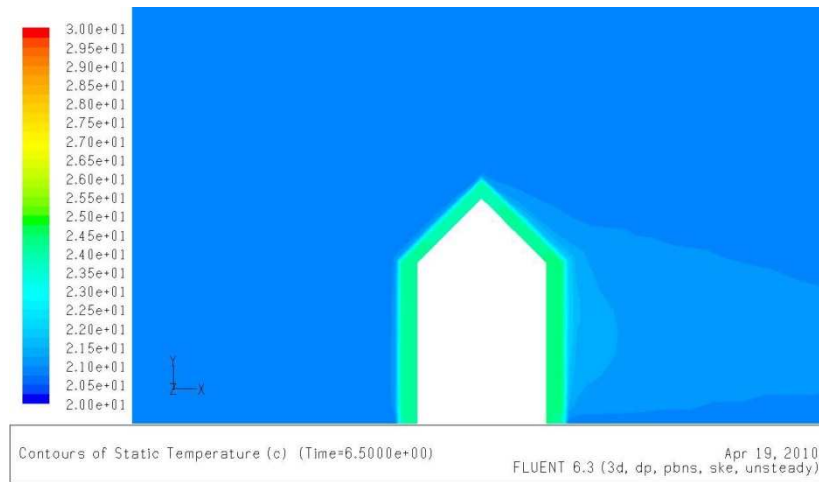
Nr.21: Temperatur t=5.5 s (Farbtabellemaß = 20)



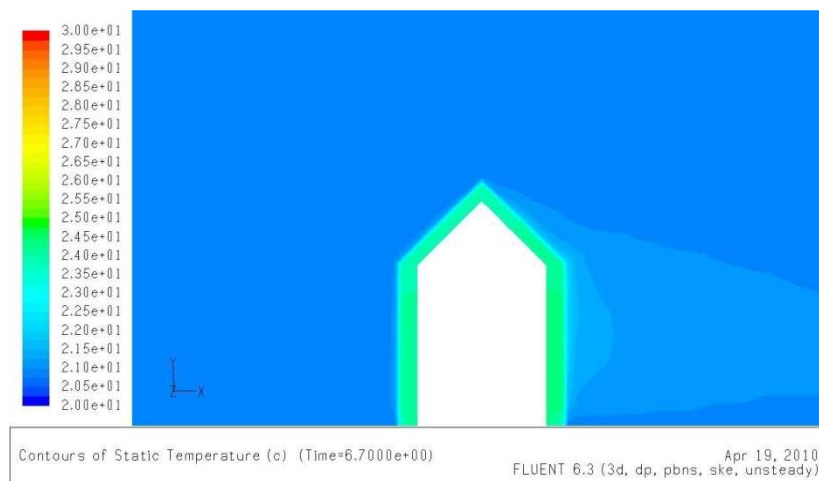
Nr.22: Temperatur t=6 s (Farbtabellemaß = 20)



Nr.23: Temperatur t=6.5 s (Farbtabellemaß = 20)



Nr.24: Temperatur t=6.7 s (Farbtabellemaß = 20)



Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema:

**„Entwicklung eines Thermomessfühlers mit hohen Ansprechzeit-
Charakteristiken“**

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Aus fremden Quellen direkt oder indirekt Übernommenes ist als solches gekennzeichnet. Die verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis dokumentiert.

Ilmenau, 30. Mai. 2010

Ort, Datum

Mohamed Moustafa

Entwicklung eines Thermomessfühlers mit hohen Ansprechzeit-Charakteristiken

von der Fakultät für Maschinenbau
der Technische Universität Ilmenau
genehmigte

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur
(Dipl.-Ing.)

vorgelegt

von: Mohamed Moustafa
geboren am: 08. März. 1979, in Aleppo, Syrien
eingereicht am: 30. Mai. 2010

Gutachter: PD Dr.-Ing. habil. Christian Karcher
Dr. Vitaly Minchenya

Thesen zur Diplomarbeit

1. Gegenüber dem unter Schwierigkeiten durchzuführenden Experiment in der Industrie ist die numerische Simulation günstiger zu realisieren. Die vorliegende Arbeit präsentiert zuerst die Durchführung der numerischen Simulation der verschiedenen Konstruktionen eines Mantels des Thermoelements in einem Windkanal unter dem Einfluss von stationärer Luftströmung. Für diese Simulation wird das Turbulenzmodell K- ϵ im FLUENT-Programm eingesetzt.
2. Für die analytische Berechnung wird verschiedene Metalle als Mantel für das Thermoelement untersucht, dann wird in der numerischen Simulation nur zwei von der in FLUENT-Programm eingesetzt:
 - Kupfer Cu, weil in der analytischen Berechnung die schnellste Ansprechzeit besitzt hat, und er ist verfügbar.
 - Edelstahl V2A (X5CrNi18-10) Werkstoffnr.: 1.4301: weil er fest, rostfrei und verfügbar ist.Verfügbarkeit ist insofern wichtig, weil die experimentelle Untersuchungen werden zukünftig als Weiterentwicklung der in dieser Arbeit erreichten Ergebnissen vorgesehen.
3. Die CFD-Analyse (numerische Simulation) besteht aus Pre-Processing, Processing und Post-Processing. Die Modellbildung und Vergitterung können vom Gittergenerator Gambit realisiert werden. Das K- ϵ Standard Modell ist ein Verfahren zur numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen. Das K- ϵ Standard Modell ist eines der einfachsten vollständigen Modellen der Turbulenz. In diesem Modell ermöglicht den Löser die turbulente große Skalen zu berechnen. Wegen seiner Robustheit, Wirtschaftlichkeit und ausreichenden Genauigkeit für verbreitete Range von turbulenten Strömungen, ist es das Arbeitspferd der praktischen Engineering Flow Berechnungen zurzeit in der Industrie.
4. Die folgenden physikalischen Parameter sind mit FLUENT-Programm zu berechnen und zu analysieren: Ansprechzeit des Thermomessfühlers t_A , Wärmeübertragungskoeffizient h, Nusselt Zahl Nu.
5. Die Simulationen werden jeweils unter drei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten und drei unterschiedlichen Konstruktionen des Mantels des Thermoelements in einem Windkanal durchgeführt. Zwei Metalle werden als Material für das Mantel benutzt (Kupfer, Edelstahl) und im FLUENT eingerichtet. Die mit K- ϵ -Modell simulierten Ergebnisse sind mit der analytischen Resultaten zu vergleichen, damit die beste Kombination von Metall und Konstruktion zu definieren.

Die Beste Kombination besitzt die schnellste Ansprechzeit.

6. Nach der Ermittlung der Werte von Nu Zahl für halbkugelartige- und kegelartige Form durch numerische Simulation, haben wir die analytische Werte von Nu Zahl mit der numerischen Werten verglichen, und wir könnten die folgende Formel feststellen und in der analytischen Berechnung verwenden.

- Nusselt Formel für halbkugelartige Form

$$Nu = 0.31 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers der Halbkugel durch drei DA/3.

- Nusselt Formel für kegelartige Form

$$Nu = 0.325 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

Die charakteristische Länge L entspricht des äußeren Durchmessers des kegels durch drei DA/3