

Diplomarbeit 2000/2001

Wärmeabfuhr an zylindrischen Körpern durch Konvektion

Die Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt für Maschinenbau und Automatisierungstechnik Bregenz in Kooperation mit Liebherr Aerospace Lindenberg.

Projektteam:

Steurer Wolfram

Berechnung, Dokumentation, Organisation

Fink Johannes

Dokumentation, Prüfkörpervorbereitung, Berechnung

Gerber Sebastian

Versuchsabnahme, Prüfkörperkonstruktion, Fertigung

Prof. Köb Willhelm

Betreuer seitens der Schule

DI. Kegel Phillip

Projektleiter bzw. -betreuer seitens des Betriebs

Sulzberg, Freitag 27.6.2001

Kurzbeschreibung

Wärmeabfuhr an zylindrischen Körpern durch Konvektion

Die selbstversorgenden zylindrischen Aktuatoren, die im Airbus A380 die Landeklappen und Ruder bewegen, müssen auf weniger als 140°C gekühlt werden. Wir versuchen dies mit Hilfe von im Windkanal optimierten Kühlrippen zu erreichen. Unser Hauptziel ist es, sowohl die Wärmeabfuhr, als auch die Effizienz der Kühlrippen, zu maximieren. Zusätzlich soll ein exaktes Berechnungsprogramm erarbeitet werden. Die praktischen Versuche im Windkanal lieferten uns die nötigen Informationen und Variablen um die Berechnung anzupassen, denn die zur Verfügung stehenden theoretischen Grundlagen bezüglich Konvektion sind unzureichend.

Nachdem wir die Grundlagen studiert und ein entsprechendes Berechnungsprogramm erarbeitet haben, verbesserten wir den Prüfstand, werteten die Versuchsergebnisse aus, passten die Berechnung an und beendeten die Diplomarbeit mit dem vorliegenden Abschlussbericht.

brief project-description

Heat-Dissipation at cylindrical bodies by Convection

The self-supporting cylindrical actuators used in the Airbus A380 to move flaps and slats have to be cooled down to less than 140°C. We are trying to achieve this by means of cooling fins optimised in the wind tunnel. Our main aim is to maximise the heat-dissipation as well as the efficiency of the cooling fins. Additionally, an exact calculation program has to be worked out. The practical experiments in the wind tunnel will provide us with the necessary information and variables needed to correct the calculation because the available theoretical basics about convection are insufficient.

After having studied the fundamentals and figured out a corresponding calculation program, we improved the test bench, evaluated the test results corrected the calculation and finished this diploma project with this final report.

Dankesworte

Das Gelingen dieses Projekts war keineswegs unser alleiniger Verdienst. Vielmehr haben uns eine Reihe von Personen hervorragend unterstützt und gefördert.

Zu aller erst möchten wir allen freiwillig oder unfreiwillig Beteiligten seitens der Schule danken, dass sie uns tatkräftig unterstützt haben und ein erfolgreicher Abschluss möglich war.

Im Besonderen gilt unser Dank unserem Projektbetreuer seitens der Schule **DI Willhelm Köb**. Er hat sich zu dieser Funktion gerne und spontan bereiterklärt und damit dieses Projekt erst ermöglicht. Wir danken unserm Willi für eine hervorragende Zusammenarbeit.

Des weiteren gilt ein besonderer Dank unserem Deutschlehrer und Bibliothekar **Mag. Erich Troy**, der extra für uns zwei spezielle Fachbücher im Rahmen der Bestellungen für die Bibliothek in Windeseile besorgt hat.

Wir möchten auch trotz aller Ungereimtheiten unserer **Schulleitung** danken, dass sie uns schlussendlich doch einen großzügigen Projektraum für den Windkanal zur Verfügung gestellt hat. Dass dies nur nach zigfachem Nachstochern, Einschalten des Elternvereins und diesbezüglichen Drohungen geschah, wollen wir hier nicht unerwähnt lassen. Auch die zur Verfügung Stellung eines Schlüssels für die Schule war nicht möglich.

Äußerst wertvolle Dienste hat uns Fachlehrer **Kostal** geliefert. Er hat die Elektroinstallation für den Projektraum fertiggestellt. Des weiteren stand er uns jederzeit für die verschiedensten elektrotechnischen Probleme zur Verfügung und besorgte uns die verschiedensten Stecker und Teile für unseren Prüfstand.

Ein weiterer Gönner unserer Projektarbeit war **DI Breitegger** der uns bei unserer messtechnischen Unerfahrenheit weitergeholfen hat. Besonders im Bereich der Leistungsmessung hat er uns tatkräftig unterstützt und dafür gesorgt, dass die bis zu 900W ansteigenden Leistungen spurlos an uns vorübergingen. Wir konnten die Messgeräte aus seinem Laboratorium verwenden.

Werkstattleiter **Hubert Sturm** stellte uns das 10 Kanalmessgerät der Schule trotz laufenden Prüfvorgängen der Versuchsanstalt zur Verfügung und schulte uns auch entsprechend ein. Des weiteren erklärte er uns den Gebrauch des

Zweikomponentenklebers und half uns insgesamt sehr bei der grundsätzlich sehr heiklen Temperaturmessung.

Auch eine Reihe anderer **Werkstättenlehrer**, allen voran Fachlehrer **Feuerle**, haben es uns ermöglicht besonders in der Anfangsfase des Prüfstandes schnelle Lösungen zu finden und sie in ihren Werkstätten zu fertigen, wie zum Beispiel die verschiedenen Befestigungsvarianten des Körpers.

Ein besonderer Dank gilt unserem Magazineur **Alois Stanger**, der uns auch ohne Werkzeugmarken immer wieder die nötigen Werkzeuge und Maschinen zur Verfügung stellte.

Anschließend möchten wir uns ganz besonders bei unserer Partnerfirma **Liebherr Aerospace** für die Möglichkeit der Durchführung einer äußerst interessanten Projektarbeit danken.

Die **Lehrwerkstatt** hat immer wieder für uns die verschiedensten Fertigungsarbeiten übernommen, wie etwa die Fertigung der Körper und die PTFE-Flansche zur Befestigung.

Die **Kalibrier- und Versuchsabteilung** hat uns, nachdem das Messgerät der HTL nicht mehr zur Verfügung stand, mit einem ihrer Geräte aus der Patsche geholfen. Die Drucker und Plotter der Firma standen uns jederzeit, wenn wir sie brauchten, zur Verfügung.

Im speziellen danken wir natürlich unserem Projektbetreuer bzw. Projektleiter **DI Phillip Kegel**, der uns trotz Termindruck an der laufenden Angebotserstellung des A380 nicht vergessen hat und uns immer zur Verfügung stand. Es war eine intensive und kameradschaftliche Zusammenarbeit. So stand in der Anfangsfase alle zwei Wochen ein Treffen auf dem Programm. Wir haben bei dieser Zusammenarbeit viel interessantes und neues gelernt.

DI Kegel war wirklich ein hervorragender Betreuer, der dafür gesorgt hat, dass dieses Projekt nie ins Stocken kam und einen erfolgreichen Ausgang genommen hat.

Danke Leute!

Das Projektteam

Inhalt

A Einführung

1. Beteiligte	Seite 2
1.1 Wir über uns	
1.2 Firma Liebherr	
1.3 Zustandekommen des Projekts	
2. Hintergrund des Projekts	Seite 4
2.1 Der A380	
2.2 Aktuatorsysteme	
3. Pflichtenheft	Seite 5

B Theoretische Grundlagen

Formelzeichen
Indizes

1. Stoffwerte und Konstanten	Seite 4
1.1. Viskosität der Luft	
1.2. Wärmeleitfähigkeit der Luft	
1.3. Prandtl-Zahl	
2. Wärmeübertragung	Seite 6
2.1. Wärmeübergang durch Konvektion	
2.1.1. Wärmeübergang durch freie Konvektion	
2.1.2. Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion	
2.1.3. Überlagerung der freien und erzwungenen Konvektion	
2.2. Wärmeübergang durch Strahlung	
3. Rippenberechnung	Seite 15
3.1. Berechnung zylindrischer Rippenkörper	
3.2. Rippenwirkungsgrad	

C Berechnungsprogramm

1. Berechnungsprogramm des unberippten Körpers	Seite 2
1.1 Variablendefinition	
1.1.1. Strömungsgeschwindigkeit	
1.1.2. Körperabmessungen	
1.1.3. abzuführender Wärmestrom	
1.1.4. Außentemperatur	
1.1.5. Emissionskoeffizient	
1.1.6. Fluid-, Stoffwerte	

- 1.2 Berechnung
 - 1.2.1 Oberfläche
 - 1.2.2 Überströmlänge
 - 1.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient
 - 1.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl
 - 1.2.5 Strahlungsfaktor
 - 1.2.6 Temperaturberechnung
 - 1.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen
 - 1.2.6.2 Gleichungssystem
 - 1.2.6.3 Ergebnis
- 1.3 Kontrolle

2. Berechnung der berippten Körper

Seite 8

- 2.1. Variablendefinition
 - 2.1.1. Strömungsgeschwindigkeit
 - 2.1.2. Körperabmessungen
 - 2.1.3. abzuführender Wärmestrom
 - 2.1.4. Außentemperatur
 - 2.1.5. Emissionskoeffizient
 - 2.1.6. Fluid-, Stoffwerte
- 2.2. Berechnung
 - 2.2.1 Oberfläche
 - 2.2.2 Überströmlänge
 - 2.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient
 - 2.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl
 - 2.2.5 Strahlungsfaktor
 - 2.2.6 Temperaturberechnung
 - 2.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen
 - 2.2.6.2 Gleichungssystem
 - 2.2.6.3 Ergebnis
- 2.3. Kontrolle

D Dokumentation

1. Projektablauf

Seite 2

- 1.1 Zustandekommen
- 1.2 Literatursuche
- 1.3 Windkanalsuche
- 1.4 Erstellung einer Berechnung
- 1.5 Versuchsaufbau
- 1.6 Versuchsdurchführung
- 1.7 Simulation mit Flotherm
- 1.8 Vergleich und Interpretation der ersten Ergebnisse
- 1.9 Aufbau des Prüfstandes und optimale Einrichtung
- 1.10 Erste Versuche
- 1.11 Verschiedene Befestigungsvarianten
- 1.12 Weitere Versuche
- 1.13 Anpassung des Berechnungsmodells und Abschlussbericht

2. Versuchsaufbau	Seite 17
2.1 Windkanal	
2.2 Prüfling	
2.3 Temperaturmesseinrichtung	
2.4 Leistungssteuerung	
3. Berechnungsergebnisse	Seite 21
3.1 Bemerkungen	
3.2 Wertetabelle	
3.3 Diagramme	
4. Messergebnisse	Seite 25
3.1 Prüfkörperbezeichnung	
3.2 Prüfprotokoll	
3.2 Datenblätter der geprüften Körper	

E Interpretation und Schlussfolgerungen

1. Unberippter Körper	Seite 2
2. Berippte Körper	Seite 5
2.1. Rippenabstand	
2.2. Rippenstärke	
2.3. Querfräslungen	
2.4. Schwarzer Körper	
3. Konstruktionshinweise	Seite 10

Abschnitt A - Einführung

1. Beteiligte

Seite 2

1.1 Wir über uns

1.2 Firma Liebherr

1.3 Zustandekommen des Projekts

2. Hintergrund des Projekts

Seite 4

2.1 Der A380

2.2 Aktuatorsysteme

3. Pflichtenheft

Seite 5

1. Beteiligte

1.1 Wir über uns

An diesem Projekt waren Sebastian Gerber, Wolfram Steurer und Johannes Fink beteiligt.



Wir sind allesamt Schüler der fünften Klasse für Maschinenbau und Automatisierungstechnik an der HTL Bregenz. Prof. Köb Willhelm war seitens der Schule unser Betreuer. DI. Kegel Phillip hat uns von Seiten des Unternehmens Liebherr Aerospace hervorragend unterstützt und begleitet.

1.2 Firma Liebherr

Wir erarbeiteten dieses Projekt für die Fa. Liebherr Aerospace in Lindenbergs keine 20km entfernt von der Schule.



Sie ist Teil der Liebherr Holding GmbH genauso wie das Werk in Nenzing. Das Produktspektrum ist jedoch ein komplett anders:

Das in Lindenberg ansässige Unternehmen entwickelt und fertigt eine breite Palette von Produkten und elektronischen Systemen für die Ausrüstung von Großraumflugzeugen, Business Jets und Hubschraubern.

Sie fertigen und betreuen Betätigungsysteme, die bei der Flugsteuerung eingesetzt werden. Außerdem werden Klimatisierungssysteme und Fahrwerksanlagen entwickelt und gefertigt.

1.3 Zustandekommen des Projekts

Als wir uns Ende November 2000 bei einigen hier ansässigen Firmen bezüglich Ingenieurprojekten erkundigten, fuhren wir auch zu Liebherr Aeorspace nach Lindenberg. Dieses Unternehmen war uns bekannt, da Wolfram zweimal im Sommer, insgesamt 12 Wochen, dort als Ferialarbeiter beschäftigt war. Liebherr weckte schon sehr bald unsere Aufmerksamkeit, primär aufgrund der höchst interessanten und spannenden Produktpalette. Tatsächlich machten sich die Ansprechpartner aufgrund unserer Anfrage Gedanken bezüglich eines zu vergebenden Projektes. Uns wurden dann bei einer ersten Sitzung zwei Projektaufgaben präsentiert. Da sich die erste Aufgabenstellung zum Großteil mit Elektrotechnik beschäftigt hätte, haben wir uns schnell für das nun Vorliegende entschieden.

2. Hintergrund des Projektes

2.1 Der A380

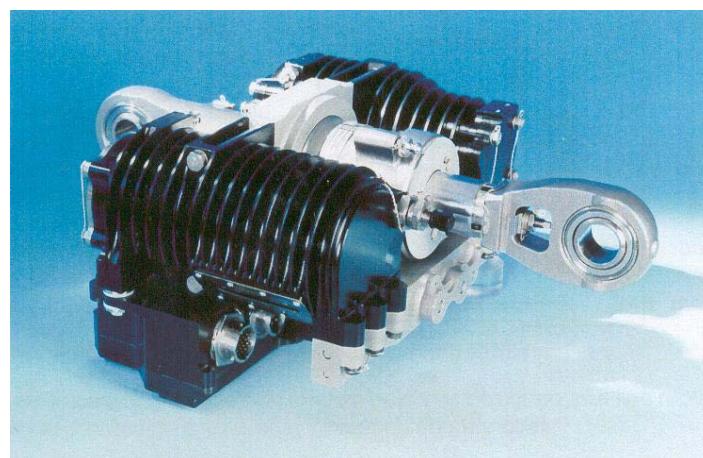
Im Moment arbeitet die Fa. Liebherr unter anderem an der Steuerung des neuen Großraumflugzeuges von Airbus, dem A380.

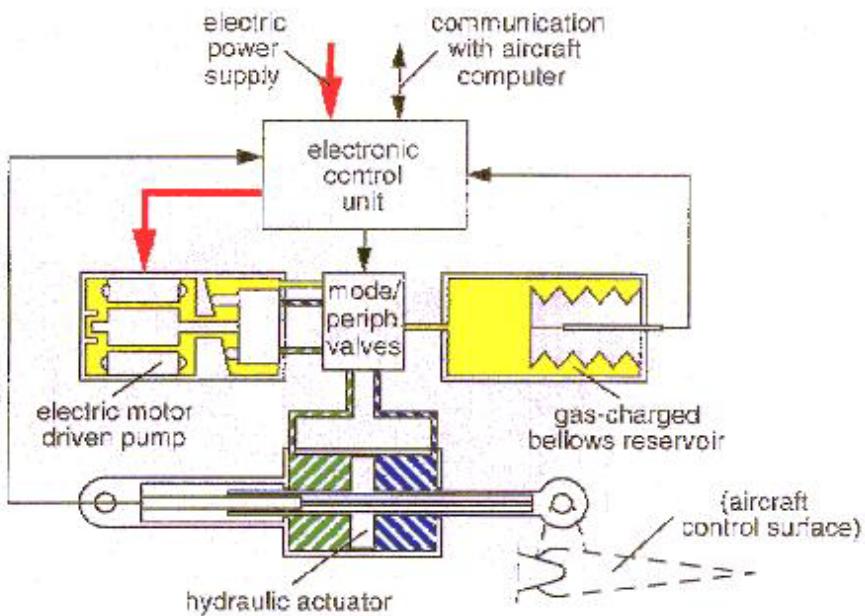


Dieses Flugzeug soll je nach Modell etwa 800 Personen Platz bieten und wird etwa 200Mil.\$ kosten. Voraussichtlich soll er 2005 erstmals in Betrieb gehen.

2.2 Aktuatorsysteme

In der Ansteuerung der verschiedenen Ruder und Klappen in Flugzeugen versuchen die Entwickler ein neues System zu etablieren. Es sollen nicht mehr Hydraulikschläuche in 3facher Ausführung das gesamte Flugzeug durchziehen, die von einer dreifach vorhandenen zentralen Ölpumpe gespeist werden, sondern es wird mit sogenannten Aktuatoren gearbeitet.





Hierbei handelt es sich um autarke also unabhängige Einheiten, die im Wesentlichen aus einem Ölbehälter, der als Ausgleichsgefäß fungiert, und aus einer integrierten Motorpumpeneinheit bestehen.

Diese Aktuatoren, die an den verschiedensten Stellen des Flugzeuges untergebracht sind, produzieren sowohl im Pumpen-, als auch im Motorbereich je nach Betriebspunkt Wärme, die abgeführt werden muss.

Dies wird mit Hilfe von Konvektion erreicht. Um diese zu optimieren werden Kühlrippen verwendet.

3. Pflichtenheft

Auf den nächsten 5 Seiten befindet sich das Pflichtenheft, wie es zu Anfang von der Firma definiert wurde. Im Laufe der Projektarbeit haben sich gewisse Punkte erübriggt. Dazu gehört zum Beispiel die Ermittlung des Rippenwirkungsgrades. Andere Punkte, wie etwa die Befüllung der Prüflinge mit Öl, mussten verworfen werden. Diese Änderungen wurden immer in Übereinstimmung mit unserem Projektbetreuer Herr Kegel getroffen.

AKTENNOTIZ

MEMO

Titel / TITLE : Diplomarbeitsarbeit:
Wärmeabfuhr durch Konvektion an zylindrischen Körpern

Ersteller / ORIGINATOR : Kegel

Datum / DATE : 28.9.2000

Verteiler / DISTRIBUTION : EEA,EEH,EET,CET

1. Wärmeabfuhr an zylindrischen Körpern

Beim Elektro-Hydrostatischen Aktuator (EHA) entsteht im Motorbereich sowie im Pumpenbereich je nach Betriebspunkt Wärme die durch Konvektion abgeführt werden muß.

Wärmeabfuhr kann an folgenden Stellen erfolgen:

Motorgehäuse:	Motorverluste
Speichergehäuse:	Pumpenverluste über Wärmetransport durch Öl; Wärmeabfuhr über Luft
Aktuatorgehäuse:	Pumpenverluste über Wärmetransport durch Öl; Wärmeabfuhr über Luft

Dabei handelt es sich ausschließlich um zylindrische Körper die auf engstem Raum angebracht sind und seitlich oder unter einem bestimmten Winkel zur Längsachse von Luft angeströmt werden.

1.1 Ziel der Aufgabe:

Maximierung der Wärmeabfuhr; Ermittlung der tatsächlichen Effizienz der Kühlrippen;

Vergleich von Theorie und Praxis:

Theorie: $P_{th} = \alpha_{th} \cdot A \cdot \Delta T_{th}$

Messung: $P_m = \alpha_m \cdot A \cdot \Delta T_m$

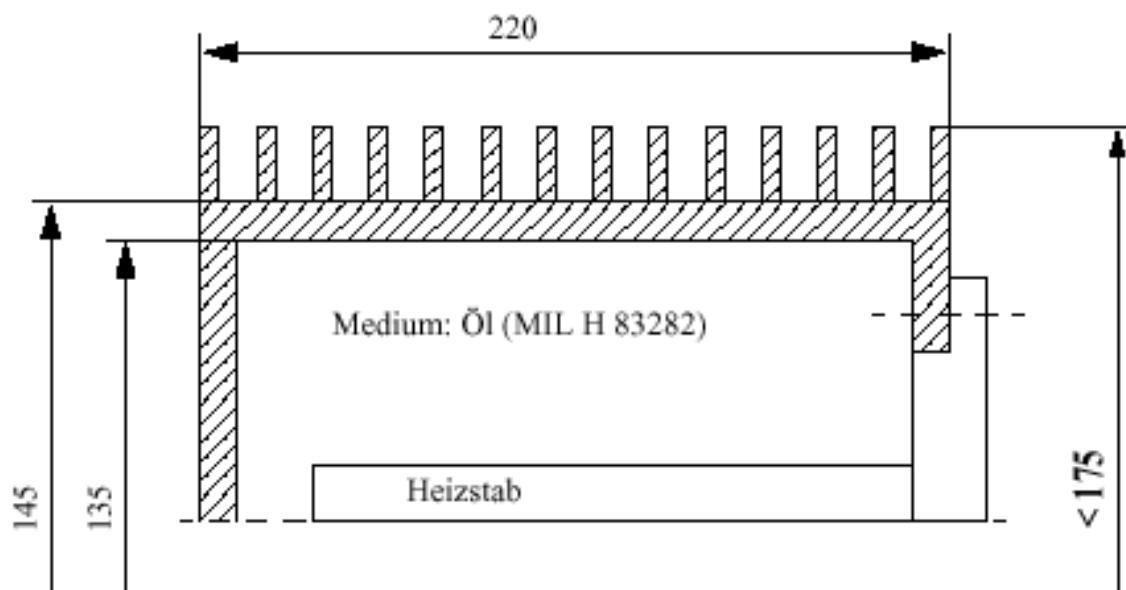
Ermittlung der wahren Effektivität der Kühlrippen:

Gesamtwirkungsgrad: ermittelbar aus obigem Vergleich

Lokaler Wirkungsgrad: ermittelbar aus dem Temperaturprofil über der Rippenhöhe

1.2 Randbedingungen / Definitionen**Strömungsgeschwindigkeit:**

Untersuchung freier und erzwungener Konvektion. Die Strömungsgeschwindigkeit soll zwischen 0,1m/s und minimum 3m/s variiert werden.

Abmessungen des Prüflings:**Material des Prüfkörpers:****Aluminium****Verlustleistung:**

Wärmemenge pro Zeit: 500 bis 1500 Watt

Messung: zugeführte Leistung U x I

2. Arbeitsschritte

2.1 Literaturstudium

Es soll die Theorie zur Wärmeabfuhr bezüglich

- freier Konvektion
- erzwungener Konvektion

jeweils mit und ohne Kühlrippen erarbeitet werden. Dabei ist der Einfluss der Kühlrippenabmessungen auf die Effektivität zu berücksichtigen.

Erstellung eines Programms zur Berechnung der Wärmeabfuhr bei vorgegebener Geometrie.

2.2 Bewertung der theoretischen Erkenntnisse

Eine Bewertung der theoretischen Grundlagen hinsichtlich

- optimaler Kühlung
- Kühlrippengeometrie
- Kühlrippenwirkungsgrad

hinsichtlich Kosten und Effektivität soll durchgeführt werden

2.3 Festlegung des Testprogramms zur Verifizierung der Theoretischen Grundlagen

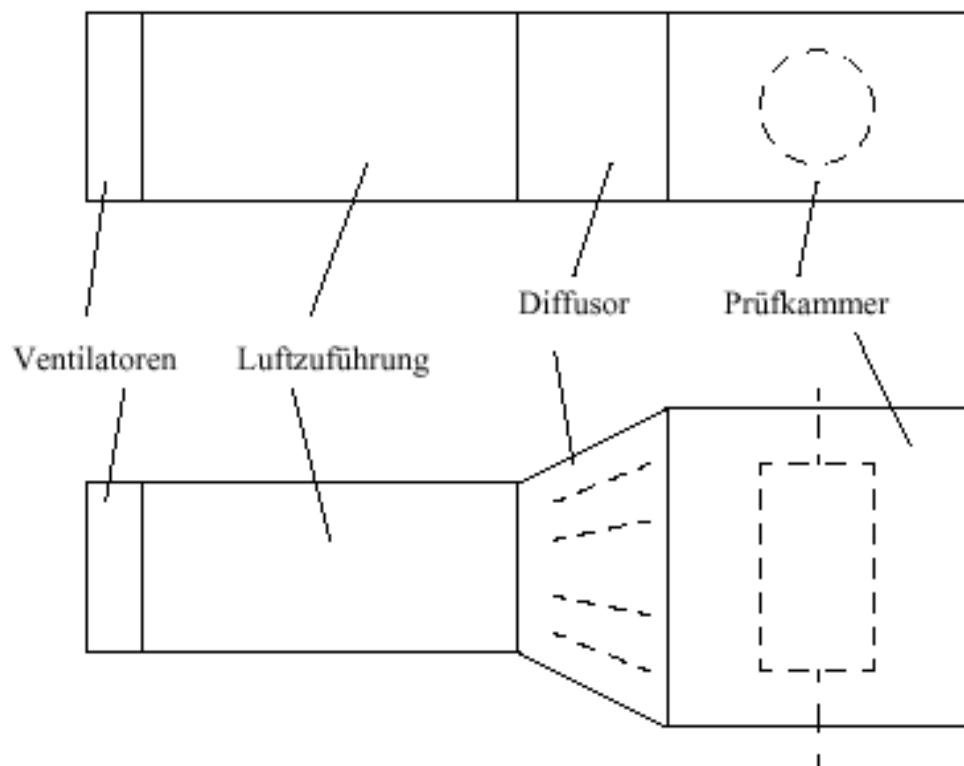
Das Testprogramm sollte so festgelegt werden, daß die Theorie nachgewiesen, beziehungsweise das tatsächliche Optimum ermittelbar ist.

z.B: Test ohne Rippen + Tests mit verschiedenen Rippengeometrien bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten

Definition geeigneter Meßstellen; Wärmequelle; Durchmischung der Flüssigkeit im Innern des Prüfkörpers; Temperaturmeßstellen; Luftstrommessung; Lufttemperaturmessung,...

2.4 Definition des erforderlichen Testaufbaus

Beispiel:



2.5 Prüflingsbeschaffung unterstützt durch LLI

2.6 Organisation / Koordination des Prüfaufbaus

2.7 Durchführung der Tests

2.8 Testauswertung und Abschlußbericht

Abschnitt B – Theoretische Grundlagen

Formelzeichen

Indizes

1. Stoffwerte und Konstanten Seite 4

- 1.1. Viskosität der Luft
- 1.2. Wärmeleitfähigkeit der Luft
- 1.3. Prandtl-Zahl

2. Wärmeübertragung Seite 6

- 2.1. Wärmeübergang durch Konvektion
 - 2.1.1. Wärmeübergang durch freie Konvektion
 - 2.1.2. Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion
 - 2.1.3. Überlagerung der freien und erzwungenen Konvektion
- 2.2. Wärmeübergang durch Strahlung

3. Rippenberechnung Seite 15

- 3.1. Berechnung zylindrischer Rippenkörper
- 3.2. Rippenwirkungsgrad

Formelzeichen:

w	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
d	Grunddurchmesser in m
b	Körperbreite in m
H	Rippenhöhe in mm
δ	Rippenabstand in mm
δR	Rippenstärke in mm
Q	Leistung in W
T _{außen}	Außentemperatur in K
ε	Emissionskoeffizient
Pr	Prandtl - Zahl
λ _R	Wärmeleitfähigkeit von Aluminium in $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
g	Erdbeschleunigung in $\frac{m}{s^2}$
A	Fläche in m^2
l	Überstromlänge in m
c _S	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers in $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
β	isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient in $10^{-3}K^{-1}$
c ₁₂	Strahlungsfaktor in $kg s^{-3} K^{-4}$
λ	Wärmeleitfähigkeit der Luft
v _u	Viskosität der Luft
Gr	Grashofzahl
Re	Reynoldszahl
Nu	Nußelt
α	Wärmeübergangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 K}$
m _R	Rippengröße

α_m	scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 K}$
α_q	mittlerer äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 K}$
α_s	scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung in $\frac{W}{m^2 K}$
Ko	Korrekturfunktion
ΔT	Rippentemperatur

Indizes:

z	zylindrisch
s	seitlich
e	erzwungen
f	frei
u	überlagert
lam	laminar
turb	turbulent
c	Kontrolle

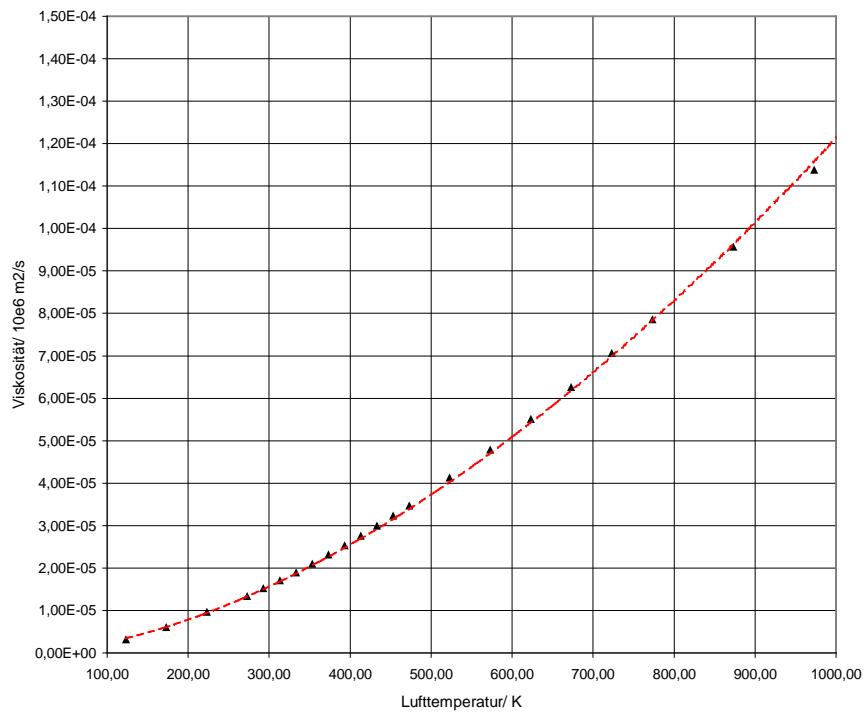
1. Stoffwerte und Konstanten

1.1. Viskosität der Luft

Viskositätswerte der Luft

Temperatur °C	K	Viskosität m ² /s
-150	123,00	3,11E-06
-100	173,00	5,96E-06
-50	223,00	9,55E-06
0	273,00	1,33E-05
20	293,00	1,51E-05
40	313,00	1,70E-05
60	333,00	1,89E-05
80	353,00	2,09E-05
100	373,00	2,31E-05
120	393,00	2,52E-05
140	413,00	2,76E-05
160	433,00	2,99E-05
180	453,00	3,23E-05
200	473,00	3,46E-05
250	523,00	4,12E-05
300	573,00	4,79E-05
350	623,00	5,51E-05
400	673,00	6,25E-05
450	723,00	7,05E-05
500	773,00	7,85E-05
600	873,00	9,56E-05
700	973,00	1,14E-04
800	1073,00	1,33E-04
900	1173,00	1,53E-04
1000	1273,00	1,73E-04

$$\nu = 9 \cdot 10^{-10} \Delta T^{1,7025}$$



Die Viskosität beschreibt die „Zähflüssigkeit“ des Fluids. Der Viskositätswert ist abhängig von der Temperatur.

$$\nu = f(T) \quad (\text{Gl. 1.01})$$

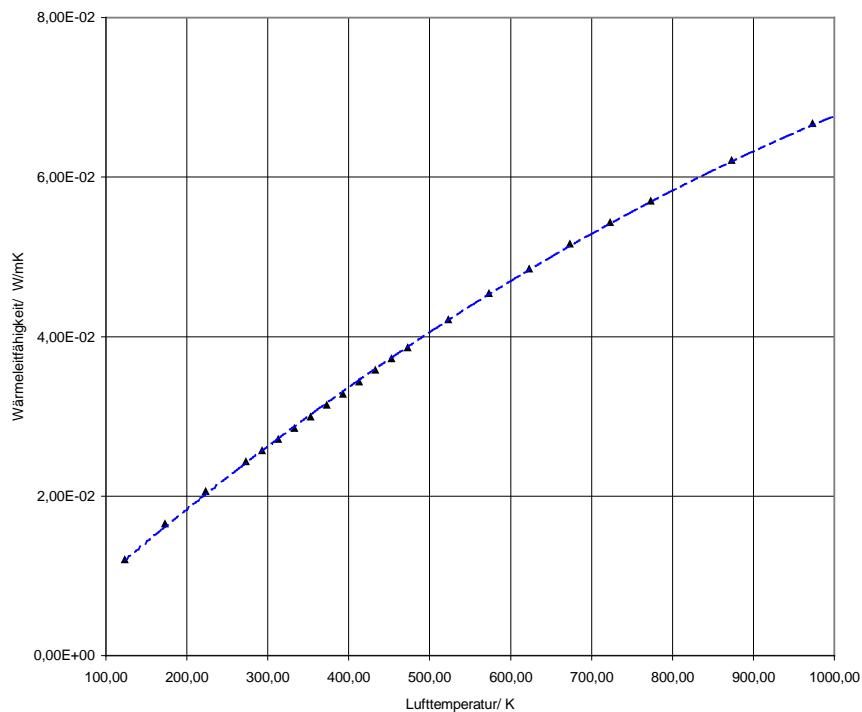
$$\nu = 9 \cdot 10^{-10} \cdot \Delta T^{1,7025}$$

Die Ermittlung der Funktion erfolgte aus einer Stoffwerttabelle mit Hilfe der Trendlinie des Excel-Programms.

1.2. Wärmeleitfähigkeit der Luft

Wärmeleitfähigkeitswerte
der Luft

Temperatur °C	K	Wärmeleitfähigkeit W/mK
-150	123,00	1,20E-02
-100	173,00	1,65E-02
-50	223,00	2,06E-02
0	273,00	2,43E-02
20	293,00	2,57E-02
40	313,00	2,71E-02
60	333,00	2,85E-02
80	353,00	2,99E-02
100	373,00	3,14E-02
120	393,00	3,28E-02
140	413,00	3,43E-02
160	433,00	3,58E-02
180	453,00	3,72E-02
200	473,00	3,86E-02
250	523,00	4,21E-02
300	573,00	4,54E-02
350	623,00	4,85E-02
400	673,00	5,16E-02
450	723,00	5,43E-02
500	773,00	5,70E-02
600	873,00	6,21E-02
700	973,00	6,67E-02
800	1073,00	7,06E-02
900	1173,00	7,41E-02
1000	1273,00	7,70E-02



$$\lambda = -2 \cdot 10^{-8} \Delta T^2 + 9 \cdot 10^{-5} \Delta T + 0,0011$$

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein molekularer Vorgang, der in einem Austausch kinetischer Energie von einem zum anderen Molekül besteht. In Gasen bewegen sich die Moleküle mit großer Geschwindigkeit frei im Raum und übertragen Wärme als Schwingungs-, Rotations- und Translationsenergie. Die Wärmeleitfähigkeit hängt daher mit der spezifischen Wärmekapazität und der Viskosität zusammen, welche wiederum von der Temperatur abhängt.

$$\lambda = f(T) \quad (\text{Gl. 1.02})$$

$$\lambda = -2 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta T^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T + 0,0011$$

Die Ermittlung der Funktion erfolgte aus einer Stoffwerttabelle mit Hilfe der Trendlinie des Excel-Programms.

1.3. Prandtl-Zahl

Die Prandtlzahl ist ein dimensionsloser Stoffwert der die Abhängigkeit der Temperaturgrenzschicht und der Strömungsgrenzschicht beschreibt. Für ein Fluid mit der Prandtlzahl $\text{Pr} = 1$ ist die Dicke der Strömungsgrenzschicht und der Temperaturgrenzschicht gleich. Für technische Probleme in Temperaturbereichen zwischen -150°C und 1000°C ist $\text{Pr}=0,7$ ausreichend genau.

2. Wärmeübertragung

Bei der Wärmeübertragung unterscheidet man in Wärmeübergang mittels Konvektion, in Wärmeleitung und in Wärmestrahlung. Da Wärmeleitung im Allgemeinen nur bei Flüssigkeiten und festen Körpern eine Rolle spielt, betrachten wir im Besonderen die Wärmeabfuhr mittels Konvektion und die Wärmestrahlung, die bei niederen Temperaturen jedoch nur begrenzt einen Einfluss auf die gesamte abgeföhrte Wärmemenge hat.

Die Grundgleichung der Wärmelehre lautet

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \quad (\text{Gl. 2.01})$$

und beschreibt den Zusammenhang von abgeföhrter Wärmemenge, Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsmedium und Körper und der wärmeabgebenden Oberfläche.

2.1. Wärmeübergang durch Konvektion

Unter konvektiver Wärmeübertragung versteht man einen Transport von Energie durch Fortführung mittels einem strömenden Fluid. Dieser Vorgang läuft immer parallel zum Energietransport durch Wärmeleitung ab und je nach den Eigenschaften des Fluids und der Art der Strömung kann der eine oder andere Transportmechanismus überwiegen.

2.1.1. Wärmeübergang durch freie Konvektion

Die Wärmeübertragung bei der freien Konvektion entsteht auf Grund von Dichteunterschieden meist als Folge von Temperaturunterschieden. Der mittlere dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient wird in der Form

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \quad (\text{Gl. 2.02})$$

mit der Nußelt-Zahl

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (\text{Gl. 2.03})$$

und der Grashof-Zahl

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 2.04})$$

beschrieben.

Das Produkt $Gr \cdot Pr$ wird auch als Rayleigh-Zahl Ra bezeichnet:

$$Gr \cdot Pr = Ra \quad (\text{Gl. 2.05})$$

Die Gleichungen gelten für den Fall konstanter Oberflächentemperaturen.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient β für ideale Gase für Volumenänderung bei konstantem Druck, bezogen auf 0°C,

$$\beta_0 = \frac{1}{273} \quad (\text{Gl. 2.06})$$

und damit für Volumenänderungen, bezogen auf die Temperatur T_∞ im Fluid außerhalb der Grenzschicht,

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (\text{Gl. 2.07})$$

Stoffwerte, λ , ν und Pr sind mit ihren Werten für die mittlere Fluidtemperatur T_m

$$T_m = \frac{\Delta T + T_\infty}{2} \quad (\text{Gl. 2.08})$$

einzusetzen. Sie sind temperaturabhängig.

Vertikale Flächen:

Der mittlere dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient für den laminaren und auch für den turbulenten Strömungsbereich von $10^{-1} < Ra < 10^{12}$ wird durch

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (\text{Gl. 2.09})$$

beschrieben. Die Funktion $f_1(Pr)$ berücksichtigt den Einfluss der Prandtl-Zahl im gesamten Bereich $0,001 < Pr < \infty$

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Als Anströmlänge ist die Höhe der Platte für Nu und Gr einzusetzen.

Da es sich bei den Seitenflächen des Zylinders nicht um rechteckige Flächen handelt sondern um eine Kreisfläche, wird eine quadratische Platte mit dem selben Flächeninhalt zur Berechnung herangezogen mit der Seitenlänge als Überströmlänge.

Zylinderfläche:

Für den mittleren dimensionslosen Wärmeübergangskoeffizienten gilt die Beziehung

$$Nu = \left\{ 0,60 + 0,387 [Ra \cdot f_3(\text{Pr})]^{1/6} \right\}^2 \quad (\text{Gl. 2.11})$$

für die freie Konvektion um horizontale Zylinder. In diesem Fall werden Nußelt und Rayleigh-Zahl mit der Anströmlänge

$$l = d \quad (\text{Gl. 2.12})$$

berechnet

Die Funktion $f_3(\text{Pr})$ berücksichtigt den Einfluß der Prandtl-Zahl im gesamten Bereich $0 < \text{Pr} < \infty$

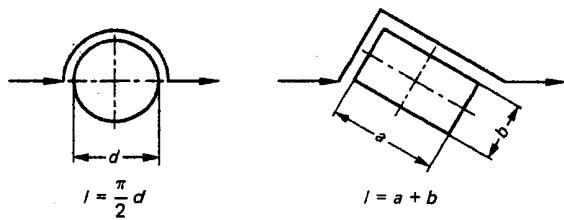
$$f_3(\text{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}} \right)^{16} \right]^{-1/9} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

2.1.2. Wärmeübergang durch erzwungene Konvektion

Man spricht von erzwungener Konvektion, wenn das Strömungsfeld vorgegeben ist, wie z. B. bei der Durchströmung von Kanälen oder bei der Umströmung von Körpern im Windkanal.

Nach *Krischer* und *Kast* gelten für die Berechnung der mittleren Nußelt-Zahlen querangeströmter Rohre, Drähte und Profilzylinder die gleichen Beziehungen wie für die umströmte ebene Platte, wenn man als kennzeichnende Länge bei der Berechnung der Nußelt- und Reynolds-Zahlen die sog. „Überströmlänge“ l einsetzt. Die Überströmlänge ist die Strecke, die ein strömendes Teilchen entlang der gesamten übertragenden Oberfläche zurücklegen kann, wie folgende Abbildung zeigt. Für ein überströmtes Rohr mit dem Durchmesser d gilt

$$l = d \cdot \frac{\pi}{2} \quad (\text{Gl. 2.14})$$



Es ist zu beachten, dass für die erzwungene Konvektion eine andere Überströmlänge zu verwenden ist. Für den Zylinder ist für die Überströmlänge im Fall der freien Konvektion d zu verwenden, für die erzwungene Konvektion $\pi/2 * d$. Diese Problematik wird bei der Überlagerung der freien und erzwungenen Konvektion noch genauer ausgeführt.

Für die mittlere Nußelt-Zahl querangeströmter Rohre, Drähte und Profilzylinder in technischen Anordnungen hat Gnielinski die Gleichung

$$Nu = 0,3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (\text{Gl. 2.15})$$

angegeben mit

$$Nu_{lam} = 0,664 \sqrt[3]{\text{Re}^3 \text{Pr}} \quad (\text{Gl. 2.16})$$

und

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}}{1 + 2,443 \text{ Re}^{-0,1} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (\text{Gl. 2.17})$$

Der Minimalwert für Nu röhrt daher, dass querangeströmte Zylinder stets eine endliche Länge besitzen, so dass sich auch bei ruhender Umgebung ein minimaler Wärmefluss einstellt. Die mittlere Nußelt-Zahl des querangeströmten Zylinders nähert sich daher asymptotisch einem Minimum, das mit $Nu_{min}=0,3$ angenommen ist.

Erläuterungen und Gültigkeitsbereiche

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (\text{Gl. 2.18})$$

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}; 10 < \text{Re} < 10^7 \quad (\text{Gl. 2.19})$$

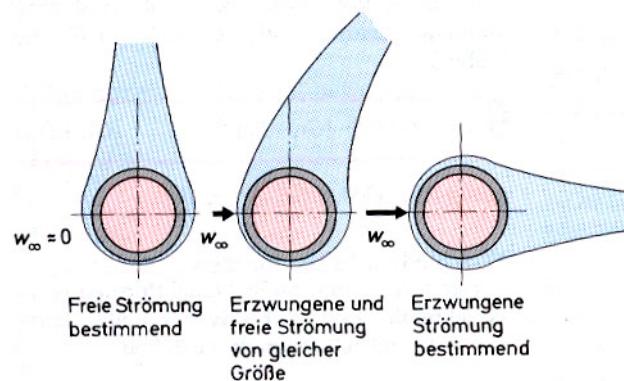
$$\text{Pr} = 0,6 \text{ bis } \text{Pr} = 1000$$

Stoffwerte, λ , ν und Pr sind mit ihren Werten für die mittlere Fluidtemperatur T_m einzusetzen. Sie sind temperaturabhängig.

2.1.3. Überlagerung der freien und erzwungenen Konvektion

Die Wirkung der Auftriebskraft auf eine gleichgerichtete erzwungene Konvektion besteht in der Steigerung der Geschwindigkeiten und ihrer Gradienten in den Grenzschichten. Nach VDI gilt der aus experimentellen Ergebnissen entwickelte Ansatz

$$Nu^3 = Nu_{erzw.}^3 + Nu_{frei}^3 \quad (\text{Gl. 2.20})$$



für den Fall der gleichen Richtung von Auftrieb und erzwungener Vertikalströmung.

Für den Fall einer dem Auftrieb entgegengesetzten Vertikalströmung gilt analog

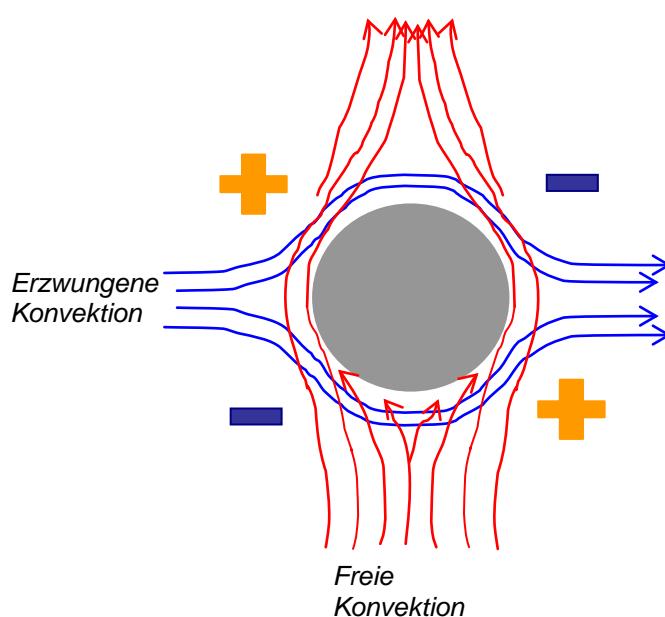
$$Nu^3 = |Nu_{erzw.}^3 - Nu_{frei}^3| \quad (\text{Gl. 2.21})$$

Für unseren Fall der nicht gleichgerichteten Strömung von freier und erzwungener Konvektion sind keine Berechnungsgrundlagen gegeben. Eine von uns getroffene Näherung soll folgendes Bild verdeutlichen:

Die Strömung am Zylinder wird in 4 Segmente aufgeteilt, bei je 2 Teilen addieren sich die Strömungen und bei den restlichen bremsen sich die Strömungen. Dies bedeutet

eine Verbesserung der Wärmeabfuhr im Falle einer positiven Überlagerung und eine Verminderung im umgekehrten Fall. Für die gleichströmenden Segmente verwenden wir den Mittelwert $Nu^3 = Nu_{erzw.}^3 + Nu_{frei}^3$ und für die entgegengesetzten die Gleichung

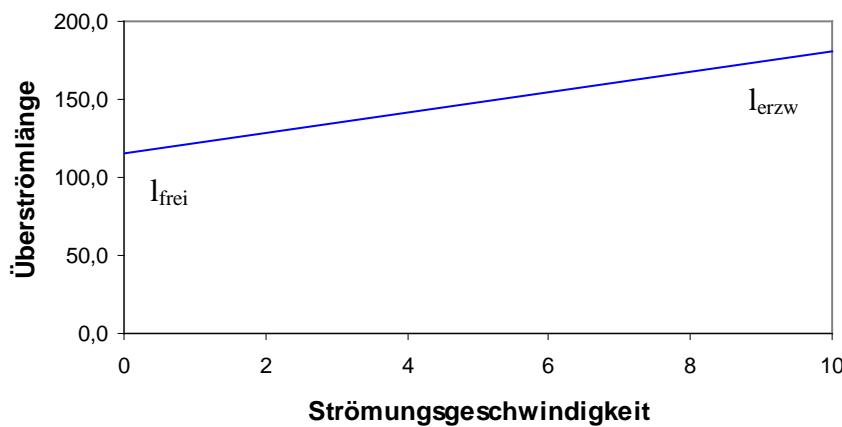
$$Nu^3 = |Nu_{erzw.}^3 - Nu_{frei}^3|$$



Speziell zu beachten sind die unterschiedlichen Überströmlängen für die freie und erzwungene Konvektion. Bei der Überlagerung ist dies mitzuberücksichtigen. Für die überlagerte Nußelt-Zahl und den daraus zu berechnenden überlagerten Wärmeübergangskoeffizienten, mit der Beziehung

$$Nu = \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{erzw.}^3 + Nu_{frei}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{erzw.}^3 - Nu_{frei}^3|} \quad (\text{Gl. 2.22})$$

ist die eingesetzte Überströmlänge von größter Wichtigkeit. Je nach Einfluss der freien gegenüber der erzwungenen Konvektion und umgekehrt muss auch die Überströmlänge im selben Verhältnis zur Geltung kommen. Kurz gesagt bedeutet dies, dass die Überströmlänge mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit der erzwungenen Strömung von $L=d$ nach $L=\pi/2 \cdot d$ zunimmt.



Dies wird in der Gleichung

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{Nu_{erzw.}^3 \lambda}{l_{erzw.}} + \frac{Nu_{frei}^3 \lambda}{l_{frei}}} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left| \frac{Nu_{erzw.}^3 \lambda}{l_{erzw.}} - \frac{Nu_{frei}^3 \lambda}{l_{frei}} \right|} \quad (\text{Gl. 2.23})$$

mit $l_{erzw.} = d \cdot \frac{\pi}{2}$

und $l_{frei} = d$

ausgedrückt.

2.2. Wärmeübergang durch Strahlung

Wärmestrahlung

Man versteht darunter einen Energietransport durch Photonen und Phononen zwischen Körpern als Ursache ihrer unterschiedlichen Temperaturen. Dieser Transport findet in der Regel nur zwischen den Oberflächen fester Körper statt und ist im Idealfall vollkommen unabhängig von der Temperatur des Mediums zwischen den Körpern. Für die von der Oberfläche eines Körpers durch Strahlung abgegebene Wärmestromdichte gilt das *Stefan-Boltzmannsche Gesetz*

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{Gl. 2.24})$$

mit der Strahlungskonstanten des schwarzen Körpers und dem Emissionskoeffizienten ε . Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz gilt streng nur für schwarze ($\varepsilon=1$) und graue ($\varepsilon<1$) Strahler.

Die Wärmestrahlung wird durch vollständig andere Grundgesetze als die Wärmeleitung und die konvektive Wärmeübertragung beschrieben. Der übertragene Wärmestrom ist nicht proportional zum Temperaturgradienten oder zur Temperaturdifferenz, sondern proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur einer Oberfläche. Die von einem Körper ausgestrahlte Energie ist zudem abhängig von der Wellenlänge der Temperaturstrahlung.

Der schwarze Körper: Ein schwarzer Körper ist dadurch definiert, dass er alle auftreffende Strahlung vollständig absorbiert. Damit emittiert ein schwarzer Körper mit der Temperatur T die maximal mögliche Strahlungsenergie. Ein schwarzer Körper ist zudem ein diffuser Strahler, seine spektrale Strahlungsintensität hängt nicht von der Richtung ab, sondern ist eine universelle Funktion der Wellenlänge und der absoluten Temperatur.

Das von Planck gefundene und nach ihm benannte Plancksche Strahlungsgesetz lautet:

$$I_s(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{Gl. 2.25})$$

Die beiden Strahlungskonstanten c_1 und c_2 setzen sich aus den fundamentalen Naturkonstanten, nämlich der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum, der Planckschen Konstante h und der Boltzmann-Konstante k zusammen.

Der Verlauf der Strahlungsintensität $I_s(\lambda, T)$ in Abhängigkeit der Wellenlänge ist in einfacher und in doppelt logarithmischer Auftragung dargestellt.

Das Emissionsvermögen eines schwarzen Strahlers erhält man durch Integration der Strahlungsintensität $I_s(\lambda, T)$ über alle Wellenlängen und führt zur erstaunlich einfachen Lösung:

$$E_s(T) = \sigma T^4 \quad (\text{Gl. 2.26})$$

mit

$$\sigma = \frac{c_1}{c_2} \frac{\pi^4}{15} T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (\text{Gl. 2.27})$$

Die letzte Beziehung ist das bekannte Gesetz von Stefan Boltzmann und σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante, deren Zusammenhang mit den fundamentalen Naturkonstanten nur mit Hilfe der Quantentheorie abgeleitet werden kann.

Wegen der durch T4 entstehenden großen Zahlen führt man zweckmäßigerweise die Strahlungskonstante C_s des schwarzen Körpers, entsprechend

$$E_s(T) = C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{Gl. 2.28})$$

$$C_s = 10^8 \sigma = 5,67 \frac{W}{m^2 K^4}$$

ein.

Wärmetransport durch Strahlung:

Für den Netto-Strahlungsstrom zwischen zwei diffus strahlenden Oberflächen gilt allgemein

$$Q_{12} = c_{12} A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{Gl. 2.29})$$

$$c_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{A_1}{A_2}}$$

Mit $A_2 \gg A_1$ folgt für den Fall der Strahlung eines Körpers mit der Oberfläche A_1 in die Umgebung oder in einen Raum mit $A_2 \rightarrow \infty$ die Beziehung

$$c_{12} = \varepsilon_1 C_s \quad (\text{Gl. 2.30})$$

Der Emissionskoeffizient ε_2 taucht hierbei nicht mehr auf, weil die Umgebung „schwarz“ wirkt, da die von A_1 emittierten Photonen nicht mehr zurückkommen.

Für technische Aufgabenstellungen ist es oft zweckmäßig, den Ausdruck mit den Temperaturen entsprechend

$$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \approx \frac{4}{100} \left(\frac{T_1 + T_2}{200}\right)^2 (T_1 - T_2) \quad (\text{Gl. 2.31})$$

zu linearisieren. Die Genauigkeit ist dabei ausreichend genau. Mit der Definition eines „Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung“

$$\alpha_{Str} = \frac{4}{100} \left(\frac{T_1 + T_2}{200}\right)^3 c_{12} \quad (\text{Gl. 2.32})$$

erhält man die Näherungsbeziehung

$$\dot{Q}_{12} = \alpha_{Str} A_l (T_1 - T_2) \quad (\text{Gl. 2.33})$$

Mit Hilfe dieser Beziehung kann der Einfluss der Strahlung auf den Wärmestrom zusätzlich zur Konvektion näherungsweise berücksichtigt werden, falls ihr Anteil am übertragenen Wärmestrom nicht zu groß ist.

3. Rippenberechnung

Eine Erhöhung der Wärmeabfuhr bei gleichbleibender Körpertemperatur ist laut Gl.

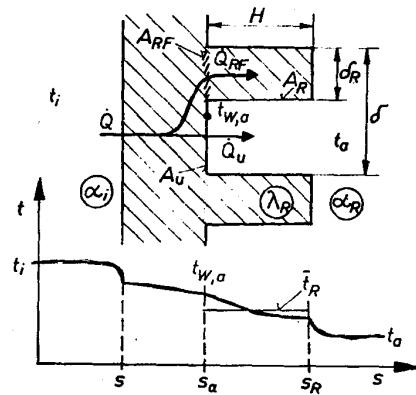
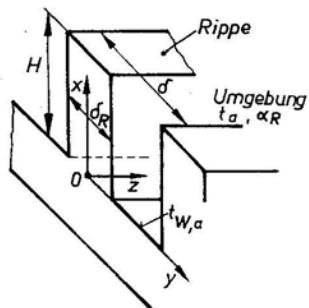
2.01

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_\infty)$$

nur über eine Vergrößerung der Oberfläche, einer Senkung der Umgebungstemperatur oder einer Erhöhung der Wärmeübergangszahl möglich. Auf die Wärmeübergangszahl kann nur über die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums - bei gegebenem Körper und Dimension - Einfluss genommen werden. Eine höhere Fluidgeschwindigkeit bedeutet jedoch einen enormen Aufwand. Ebenso ist das Absenken der Temperatur des wärmeabführenden Fluids meist unmöglich oder mit exorbitanten Kosten verbunden. So bedient man sich einer vergrößerten Oberfläche in Form von Rippen um eine Verbesserung der abgeführten Wärmemenge zu erreichen.

Die Rippenberechnung beschreibt die verbesserte Wärmeabfuhr aufgrund der vergrößerten Oberfläche zum einen, und der in der Rippe abnehmenden Temperatur, die einen abnehmenden Wärmeübergangskoeffizienten entlang der Rippe zur Folge hat, zum anderen.

3.1. Berechnung zylindrischer Rippenkörper



δ — Teilung der Rippe
 δ_R — Stärke der Rippe
 H — Höhe der Rippe
 A_{RF} — Fläche des Rippenfußes

A_u — unberippte Fläche
 A_R — Rippenfläche
 $A = A_{RF} + A_u$

Nach obigem Bild folgt für den Wärmestrom durch eine Teilung der Rippe die Bilanz

$$\dot{Q} = \dot{Q}_U + \dot{Q}_{RF} \quad (\text{Gl. 3.01})$$

Für den Wärmestrom des unberippten Teiles kann man schreiben

$$\dot{Q}_U = \alpha_R A_U (T_{W,a} - T_a) \quad (\text{Gl. 3.02})$$

und für den Wärmestrom durch den Rippenfuß

$$\dot{Q}_{RF} = -\lambda A_{RF} \left(\frac{dt}{ds} \right)_{s=s_a} \quad (\text{Gl. 3.03})$$

Definiert man diesen Wärmestrom über einen scheinbaren

Wärmeübergangskoeffizienten \square^* , so folgt aus

$$\dot{Q}_{RF} = \alpha^* A_{RF} (T_{W,a} - T_a) \quad (\text{Gl. 3.04})$$

für diesen scheinbaren Wärmeübergangskoeffizienten des Rippenfußes

$$\alpha^* = -\frac{\lambda_R}{T_{W,a} - T_a} \left(\frac{dt}{ds} \right)_{s=s_a} \quad (\text{Gl. 3.05})$$

Der auf der Teilung δ insgesamt übertragene Wärmestrom beträgt somit

$$\dot{Q} = (\alpha_R A_U + \alpha^* A_{RF}) (T_{W,a} - T_a) \quad (\text{Gl. 3.06})$$

Definiert man noch über die Beziehung

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha} A (T_{W,a} - T_a) \quad (\text{Gl. 3.07})$$

mit $A = A_U + A_{RF}$

den mittleren äquivalenten Wärmeübergangskoeffizienten an der unberippt gedachten Grundfläche, so erhält man die Vorschrift zur Berechnung dieses Koeffizienten zu

$$\bar{\alpha} = \alpha_R \frac{A_U}{A} + \alpha^* \frac{A_{RF}}{A} \quad (\text{Gl. 3.08})$$

bzw. für die Rechteckrippe zu

$$\bar{\alpha} = \alpha_R \left(1 - \frac{\delta_R}{\delta} \right) + \alpha^* \frac{\delta_R}{\delta} \quad (\text{Gl. 3.09})$$

Der scheinbare Wärmeübergangskoeffizient der Kreisrippe α^* berechnet sich über die Gleichung (Gl. 3.05) zu

$$\alpha^* = \frac{\lambda_R m \cdot \tanh \left[mH \left(1 + 0,35 \ln \frac{R}{r_a} \right) \right] \left(\frac{R}{r_a} + 1 \right)}{2 \left(1 + 0,35 \ln \frac{R}{r_a} \right)} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

Diese Gleichung berücksichtigt den Temperaturverlauf in der Kreisrippe. Die Herleitung der Formel wird hier nicht erläutert, sie folgt aus der Fourierschen Differentialgleichung und wird mittels Besselfunktionen gelöst. Die angegebene Formel ist eine Näherungsfunktion von *Schmidt*.

Eine Charakteristikum einer Rippe ist die Rippengröße

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_R U}{\lambda_R A}} \quad (\text{Gl. 3.11})$$

bzw. für die Rechteckrippe

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_R}{\delta_R \lambda_R}} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

3.2. Ruppenwirkungsgrad

Von der Definition her ist der Ruppenwirkungsgrad η ein Gütegrad, der dem Verhältnis von tatsächlich an der Rippe übertragenem Wärmestrom zu dem Wärmestrom, der bei einer konstanten Rippetemperatur t übertragen wird, entspricht.

$$\eta = \frac{\bar{T}_R - T_a}{T_{W,a} - T_a} \quad (\text{Gl. 3.13})$$

Abschnitt C - Berechnungsprogramm

1. Berechnung des unberippten Körpers

Seite 2

1.1 Variablendefinition

- 1.1.1. Strömungsgeschwindigkeit
- 1.1.2. Körperabmessungen
- 1.1.3. abzuführender Wärmestrom
- 1.1.4. Außentemperatur
- 1.1.5. Emissionskoeffizient
- 1.1.6. Fluid-, Stoffwerte

1.2 Berechnung

- 1.2.1 Oberfläche
- 1.2.2 Überströmlänge
- 1.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- 1.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl
- 1.2.5 Strahlungsfaktor
- 1.2.6 Temperaturberechnung
 - 1.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen
 - 1.2.6.2 Gleichungssystem
 - 1.2.6.3 Ergebnis

1.3 Kontrolle

2. Berechnung der berippten Körper

Seite 8

2.1. Variablendefinition

- 2.1.1. Strömungsgeschwindigkeit
- 2.1.2. Körperabmessungen
- 2.1.3. abzuführender Wärmestrom
- 2.1.4. Außentemperatur
- 2.1.5. Emissionskoeffizient
- 2.1.6. Fluid-, Stoffwerte

2.2. Berechnung

- 2.2.1 Oberfläche
- 2.2.2 Überströmlänge
- 2.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- 2.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl
- 2.2.5 Strahlungsfaktor
- 2.2.6 Temperaturberechnung
 - 2.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen
 - 2.2.6.2 Gleichungssystem
 - 2.2.6.3 Ergebnis

2.3. Kontrolle

1. Berechnung des unberippten Körpers

1.1. Variablendefinition

1.1.1. Strömungsgeschwindigkeit:

Geschwindigkeit des den Körper anströmenden Fluids; Strömungsgeschwindigkeit in m/s. Maßgebender Bereich der Optimierung der Wärmeabfuhr liegt zwischen 0 und 3m/s.

$$w := 3.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Strömungsgeschwindigkeit

1.1.2. Körperabmessungen:

Grunddurchmesser des Körpers, Körperlänge.

$$d := 0.115\text{m}$$

Grunddurchmesser

$$b := 0.22\text{m}$$

Körperbreite

1.1.3. abzuführender Wärmestrom:

Der abzuführende Wärmestrom entspricht der Verlustleistung.

$$Q := 250\text{W}$$

abzuführender Wärmestrom

1.1.4. Außentemperatur:

Temperatur des Fluid außerhalb der Grenzschicht; Angabe in K.

$$T_{\text{außen}} := 290\text{K}$$

Außentemperatur

1.1.5. Emissionskoeffizient:

Das Verhältnis der von einem beliebigen Körper emittierten Strahlungsenergie zu der des schwarzen Körpers wird als Emissionskoeffizient bezeichnet. Für blankes, bearbeitetes (poliertes) Aluminium beträgt $\epsilon=0.04$. Ein schwarz eloxierter Körper hat einen Emissionskoeffizienten von ca. 0.9.

$$\epsilon := 0.04$$

Emissionskoeffizient

1.1.6. Fluid-, Stoffwerte:

Die Prandtl-Zahl beträgt im Bereich von -150°C bis 1000°C Lufttemperatur ausreichend genau 0.7. Die Wärmeleitfähigkeit ist gemäß dem Werkstoff des Körpers aus Tabellen zu entnehmen und einzusetzen. Für Aluminium beträgt die Wärmeleitfähigkeit $\lambda=238\text{W/mK}$. Die Erdbeschleunigung g ist eine rechenbedingte Größe und kann unverändert bleiben, die Strahlungskonstante gilt ebenso universal.

$$Pr := 0.7$$

Prandtl - Zahl

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Erdbeschleunigung

$$C_S := 5.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Strahlungskonstante des schwarzen Körpers

1.2. Berechnung

1.2.1 Oberfläche:

Die Berechnung ist gegliedert in die Berechnung des zylindrischen Teils des Körpers und die Berechnung der Seitenflächen. Folglich wird die Oberfläche entsprechend aufgeteilt und berechnet.

$$A_Z := d \cdot \pi \cdot b \quad \text{zylindrische Fläche des Körpers} \quad A_Z = 0.079 \text{ m}^2$$

$$A_S := 2 \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \quad \text{seitliche Fläche des Körpers} \quad A_S = 0.021 \text{ m}^2$$

1.2.2 Überströmlänge:

Für die Überströmlänge gilt analog der Oberfläche, zusätzlich jedoch ist elementar, dass die Überströmlänge für den zylindrischen Teil sich von der freien zur erzwungenen Konvektion ändert, weshalb eine Überströmlänge für die freie und eine für die erzwungene Konvektion angegeben werden muss. Die Überströmlänge für die Seitenfläche kommt daher, dass eine quadratische Fläche mit dem Flächeninhalt des Kreises berechnet wird, mit der Seitenlänge als Überströmlänge.

$$l_{ze} := d \cdot \frac{\pi}{2} \quad \text{Überströmlänge für erzw. Konv.} \quad l_{ze} = 0.181 \text{ m}$$

$$l_{zf} := d \quad \text{Überströmlänge für freie Konv.} \quad l_{zf} = 0.115 \text{ m}$$

$$l_s := d \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad \text{Überströmlänge für Seitenfläche} \quad l_s = 0.102 \text{ m}$$

1.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient:

$$\beta := \frac{1}{T_{\text{außen}}} \quad \text{isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient} \quad \beta = 3.448 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

1.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl:

Geben den Einfluss der Prandtl-Zahl im gesamten Bereich von $0.001 < \text{Pr} < \text{unendl.}$ wider.

$$f_1(\text{Pr}) := \left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad f_1(\text{Pr}) = 0.345$$

$$f_3(\text{Pr}) := \left[1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad f_3(\text{Pr}) = 0.325$$

1.2.5 Strahlungsfaktor:

Strahlungsfaktor des Werkstoffs; folgt aus der Definition des Emissionskoeffizienten.

$$c_{12} := \varepsilon \cdot C_S \quad \text{Strahlungsfaktor} \quad c_{12} = 0.227 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$$

1.2.6 Temperaturberechnung:

Aufgrund der zirkulären Abhängigkeiten innerhalb der Temperaturberechnung wird die Temperaturberechnung als Lösungsblock ausgeführt. Zuerst erfolgt die Angabe von Schätzwerten für die einzelnen Variablen, im Falle von mehreren Lösungen wählt das Berechnungsprogramm jene Lösung die am nächsten am Schätzwert liegt. Für die Berechnung der Temperatur bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten kann es bei weit verfehlten Schätzwerten zu Berechnungsproblemen, d. h. es wird keine Lösung gefunden, kommen. Speziell bei der Berechnung der freien Konvektion kommt es oft zu solchen Konflikten. Die Behebung kann nur mittels anderen Schätzwerten erfolgen.

Danach erfolgt nach dem *Given* die Eingabe der Gleichungen. Die Gleichungen werden im Einzelnen nicht weiter erläutert, bei Unklarheiten ist der Theorierteil zu Hilfe zu ziehen.

Mit *Find* sucht das Berechnungsprogramm die Lösung für die einzelnen Werte.

1.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen:

Guess

$\lambda := 0.0268 \frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit der Luft
$v_u := 20 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$	Viskosität der Luft
$\beta := 0.002 K^{-1}$	isobarer therm. Ausdehnungskoeffizient
$Gr_z := 15 \cdot 10^6$	Grashofzahl
$Re_z := 20000$	Reynoldszahl
$Nu_{zelam} := 80$	Nußelt der lam. Strömung
$Nu_{zeturb} := 90$	Nußelt der turb. Strömung
$Nu_{ze} := 110$	Nußelt der erzwungenen Konvektion
$Nu_{zf} := 30$	Nußelt der freien Konvektion
$Nu_{zu} := 130$	Nußelt der überlagerten Konvektion
$\alpha_{zu} := 32 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmeübergangskoeffizient der überlagerten Konvektion
$\alpha_s := 1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	Rippentemperatur
$\Delta T := 40K$	

1.2.6.2 Gleichungssystem:

Given

$$\lambda = -2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{mK^3} \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} \right)^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{W}{mK^2} \cdot \frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} + 0.0011 \cdot \frac{W}{mK}$$

$$v_u = 9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{m^2}{s} \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2K} \right)^{1.7025}$$

$$Gr_z = \frac{g \cdot l_{zf}^3}{v_u^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_z = \frac{w \cdot l_{ze}}{v_u}$$

$$Nu_{zelam} = 0.664 \sqrt[3]{Re_z \cdot Pr}$$

$$Nu_{zeturb} = \frac{0.037 \cdot Re_z^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_z^{-0.1} \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{ze} = 0.3 + \sqrt{Nu_{zelam}^2 + Nu_{zeturb}^2}$$

$$Nu_{zf} = \left[0.6 + 0.387 \cdot \left(Gr_z \cdot Pr \cdot f_3(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Gr_s = \frac{g \cdot l_s^3}{v_u^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_s = \frac{w \cdot l_s}{v_u}$$

$$Nu_{selam} = 0.664 \sqrt[3]{Re_s \cdot Pr}$$

$$Nu_{seturb} = \frac{0.037 \cdot Re_s^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_s^{-0.1} \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{se} = 0.3 + \sqrt{Nu_{selam}^2 + Nu_{seturb}^2}$$

$$Nu_{sf} = \left[0.825 + 0.387 \cdot \left(Gr_s \cdot Pr \cdot f_1(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Nu_{zu} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{ze}^3 + Nu_{zf}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{ze}^3 - Nu_{zf}^3|} \quad Nu_{su} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{se}^3 + Nu_{sf}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{se}^3 - Nu_{sf}^3|}$$

$$\alpha_{zu} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{Nu_{ze} \cdot \lambda}{l_{ze}} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{zf} \cdot \lambda}{l_{zf}} \right)^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left| \left(\frac{Nu_{ze} \cdot \lambda}{l_{ze}} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{zf} \cdot \lambda}{l_{zf}} \right)^3 \right|}$$

$$\alpha_{su} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{Nu_{se} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{sf} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left| \left(\frac{Nu_{se} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{sf} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 \right|}$$

$$\alpha_s = \frac{4}{100} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{200} \right)^3 \cdot c_{12}$$

$$\Delta T = \frac{Q}{A_z \cdot (\alpha_{zu} + \alpha_s) + A_s \cdot (\alpha_{su} + \alpha_s)}$$

1.2.6.3 Ergebnis:

$R := \text{Find}(\lambda, v_u, Gr_z, Re_z, Nu_{zelam}, Nu_{zeturb}, Nu_{ze}, Nu_{zf}, Nu_{zu}, \alpha_{zu}, Gr_s, Re_s, Nu_{selam}, Nu_{seturb}, Nu_{se}, Nu_{sf}, Nu_{su}, \alpha_{su}, \alpha_s, \Delta T)$	
$\lambda := R_0$	$\lambda = 0.029 \text{ kg ms}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$v_u := R_1$	$v_u = 1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
$Gr_z := R_2$	$Gr_z = 8.464 \times 10^6$
$Re_z := R_3$	$Re_z = 3.011 \times 10^4$
$Nu_{zelam} := R_4$	$Nu_{zelam} = 102.309$
$Nu_{zeturb} := R_5$	$Nu_{zeturb} = 121.561$
$Nu_{ze} := R_6$	$Nu_{ze} = 159.184$
$Nu_{zf} := R_7$	$Nu_{zf} = 24.176$
$Nu_{zu} := R_8$	$Nu_{zu} = 159.184$
$\alpha_{zu} := R_9$	$\alpha_{zu} = 25.622 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$Gr_s := R_{10}$	$Gr_s = 5.891 \times 10^6$
$Re_s := R_{11}$	$Re_s = 1.699 \times 10^4$
$Nu_{selam} := R_{12}$	$Nu_{selam} = 76.847$
$Nu_{seturb} := R_{13}$	$Nu_{seturb} = 77.939$
$Nu_{se} := R_{14}$	$Nu_{se} = 109.753$
$Nu_{sf} := R_{15}$	$Nu_{sf} = 24.294$
$Nu_{su} := R_{16}$	$Nu_{su} = 109.751$
$\alpha_{su} := R_{17}$	$\alpha_{su} = 31.312 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$\alpha_s := R_{18}$	$\alpha_s = 0.344 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$\Delta T := R_{19}$	$\Delta T = 91.862 \text{ K}$

3. Kontrolle

$$\lambda_c := \left[-2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{mK^3} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} \right)^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{W}{mK^2} \cdot \frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} + 0.0011 \cdot \frac{W}{mK} \right]$$

$$v_{uc} := 9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{m^2}{s} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2K} \right)^{1.7025}$$

$$Gr_{zc} := \frac{g \cdot l_{zf}^3}{v_{uc}^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_{zc} := \frac{w \cdot l_{ze}}{v_{uc}}$$

$$Nu_{zelamc} := 0.664 \cdot \sqrt{Re_{zc}} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$Gr_{sc} := \frac{g \cdot l_s^3}{v_{uc}^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_{sc} := \frac{w \cdot l_s}{v_{uc}}$$

$$Nu_{selamc} := 0.664 \cdot \sqrt{Re_{sc}} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$Nu_{zeturbc} := \frac{0.037 \cdot Re_{zc}^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_{zc}^{-0.1} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{zec} := 0.3 + \sqrt{Nu_{zelamc}^2 + Nu_{zeturbc}^2}$$

$$Nu_{zfc} := \left[0.6 + 0.387 \cdot \left(Gr_{zc} \cdot Pr \cdot f_3(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Nu_{zuc} := \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{zec}^3 + Nu_{zfc}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{zec}^3 - Nu_{zfc}^3|}$$

$$\alpha_{zuc} := \frac{1}{2} \sqrt[3]{ \left(\frac{Nu_{zec} \cdot \lambda_c}{l_{ze}} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{zfc} \cdot \lambda_c}{l_{zf}} \right)^3 } + \frac{1}{2} \sqrt[3]{ \left| \left(\frac{Nu_{zec} \cdot \lambda_c}{l_{ze}} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{zfc} \cdot \lambda_c}{l_{zf}} \right)^3 \right| }$$

$$\alpha_{suc} := \frac{1}{2} \sqrt[3]{ \left(\frac{Nu_{sec} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{sfc} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 } + \frac{1}{2} \sqrt[3]{ \left| \left(\frac{Nu_{sec} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{sfc} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 \right| }$$

$$\alpha_{sc} := \frac{4}{100} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{200} \right)^3 \cdot c_{12}$$

$$Nu_{seturbc} := \frac{0.037 \cdot Re_{sc}^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_{sc}^{-0.1} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{sec} := 0.3 + \sqrt{Nu_{selamc}^2 + Nu_{seturbc}^2}$$

$$Nu_{sfc} := \left[0.825 + 0.387 \cdot \left(Gr_{sc} \cdot Pr \cdot f_1(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Nu_{suc} := \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{sec}^3 + Nu_{sfc}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{sec}^3 - Nu_{sfc}^3|}$$

$$Qc := \Delta T \cdot [A_z \cdot (\alpha_{zuc} + \alpha_{sc}) + A_s \cdot (\alpha_{suc} + \alpha_{sc})]$$

$$Qc = 250 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}$$

2. Berechnung der berippten Körper

2.1. Variablendefinition

2.1.1. Strömungsgeschwindigkeit:

Geschwindigkeit des den Körper anströmenden Fluids; Strömungsgeschwindigkeit in m/s. Maßgebender Bereich der Optimierung der Wärmeabfuhr liegt zwischen 0 und 3m/s.

$$w := 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Strömungsgeschwindigkeit

2.1.2. Körperabmessungen:

Grunddurchmesser des (Rippen)-Körpers, Körperlänge sowie Rippendimensionen (Rippenhöhe, Rippenabstand, Rippenstärke)

$$d := 0.115\text{m}$$

Grunddurchmesser

$$b := 0.22\text{m}$$

Körperbreite

$$H := 15\text{mm}$$

Rippenhöhe

$$\delta := 7.5\text{mm}$$

Rippenabstand

$$\delta_R := 1\text{mm}$$

Rippenstärke

2.1.3. abzuführender Wärmestrom:

Der abzuführende Wärmestrom entspricht der Verlustleistung.

$$Q := 500\text{W}$$

abzuführender Wärmestrom

2.1.4. Außentemperatur:

Temperatur des Fluid außerhalb der Grenzschicht; Angabe in K.

$$T_{\text{außen}} := 290\text{K}$$

Außentemperatur

2.1.5. Emissionskoeffizient:

Das Verhältnis der von einem beliebigen Körper emittierten Strahlungsenergie zu der des schwarzen Körpers wird als Emissionskoeffizient bezeichnet. Für blankes, bearbeitetes (poliertes) Aluminium beträgt $\varepsilon=0.04$. Ein schwarz eloxierter Körper hat einen Emissionskoeffizienten von ca. 0.9.

$$\varepsilon := 0.04$$

Emissionskoeffizient

2.1.6. Fluid-, Stoffwerte:

Die Prandtl-Zahl beträgt im Bereich von -150°C bis 1000°C Lufttemperatur ausreichend genau 0.7. Die Wärmeleitfähigkeit ist gemäß dem Werkstoff des Körpers aus Tabellen zu entnehmen und einzusetzen. Für Aluminium beträgt die Wärmeleitfähigkeit $\lambda=238\text{W/mK}$. Die Erdbeschleunigung g ist eine rechenbedingte Größe und kann unverändert bleiben, die Strahlungskonstante gilt ebenso universal.

$$Pr := 0.7$$

Prandtl - Zahl

$$\lambda_R := 238 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Wärmeleitfähigkeit von Aluminium

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Erdbeschleunigung

$$C_S := 5.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}^4}$$

Strahlungskonstante des schwarzen Körpers

2.2. Berechnung

2.2.1 Oberfläche:

Die Berechnung ist gegliedert in die Berechnung des zylindrischen Teils des Körpers und die Berechnung der Seitenflächen. Folglich wird die Oberfläche entsprechend aufgeteilt und berechnet.

$$A_Z := d \cdot \pi \cdot b$$

zylindrische Fläche des
unberippten Körpers

$$A_Z = 0.079 \text{ m}^2$$

$$A_S := 2 \cdot \frac{d^2 \pi}{4}$$

seitliche Fläche des
unberippten Körpers

$$A_S = 0.021 \text{ m}^2$$

2.2.2 Überströmlänge:

Für die Überströmlänge gilt analog der Oberfläche, zusätzlich jedoch ist elementar, dass die Überströmlänge für den zylindrischen Teil sich von der freien zur erzwungenen Konvektion ändert, weshalb eine Überströmlänge für die freie und eine für die erzwungene Konvektion angegeben werden muss. Die Überströmlänge für die Seitenfläche kommt daher, dass eine quadratische Fläche mit dem Flächeninhalt des Kreises berechnet wird, mit der Seitenlänge als Überströmlänge.

$$l_{ze} := d \cdot \frac{\pi}{2}$$

Überströmlänge für erzw. Konv.

$$l_{ze} = 0.181 \text{ m}$$

$$l_{zf} := d$$

Überströmlänge für freie Konv.

$$l_{zf} = 0.115 \text{ m}$$

$$l_s := d \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Überströmlänge für Seitenfläche

$$l_s = 0.102 \text{ m}$$

2.2.3 Isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient:

$$\beta := \frac{1}{T_{\text{außen}}}$$

isobarer thermischer Ausdehnungs-
koeffizient $\beta = 3.448 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

2.2.4 Funktionen der Prandtl-Zahl:

Geben den Einfluss der Prandtl-Zahl im gesamten Bereich von $0.001 < \text{Pr} < \text{unendl.}$ wider.

$$f_1(\text{Pr}) := \left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}}$$

$f_1(\text{Pr}) = 0.345$

$$f_3(\text{Pr}) := \left[1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}}$$

$f_3(\text{Pr}) = 0.325$

2.2.5 Strahlungsfaktor:

Strahlungsfaktor des Werkstoffs; folgt aus der Definition des Emissionskoeffizienten.

$$c_{12} := \epsilon \cdot C_S$$

Strahlungsfaktor

$$c_{12} = 0.227 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-4}$$

2.2.6 Temperaturberechnung:

Aufgrund der zirkulären Abhängigkeiten innerhalb der Temperaturberechnung wird die Temperaturberechnung als Lösungsblock ausgeführt. Zuerst erfolgt die Angabe von Schätzwerten für die einzelnen Variablen, im Falle von mehreren Lösungen wählt das Berechnungsprogramm jene Lösung die am nächsten am Schätzwert liegt. Für die Berechnung der Temperatur bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten kann es bei weit verfehlten Schätzwerten zu Berechnungsproblemen, d. h. es wird keine Lösung gefunden, kommen. Speziell bei der Berechnung der freien Konvektion kommt es oft zu solchen Konflikten. Die Behebung kann nur mittels anderen Schätzwerten erfolgen.

Danach erfolgt nach dem *Given* die Eingabe der Gleichungen. Die Gleichungen werden im Einzelnen nicht weiter erläutert, bei Unklarheiten ist der Theorieteil zu Hilfe zu ziehen.

Da in der Theorie keine Berechnungsgrundlagen und keine Berechnungsformeln für den Druckabfall bei der Strömung durch die Rippenzwischenräume gegeben waren, der abgeführte Wärmestrom aber wesentlich vom Rippenabstand und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, erfolgte eine Anpassung der Berechnung an die im Windkanal gemessenen Werte. Diese Korrektion wird vollzogen in Abhängigkeit der zuvor erwähnten Größen: Rippenabstand und Windgeschwindigkeit. Der bei der Berechnung gemachte Fehler beträgt maximal 10% des Messwertes.

Mit *Find* sucht das Berechnungsprogramm die Lösung für die einzelnen Werte.

2.2.6.1 Schätzwerte für die einzelnen Variablen:

Guess

$\lambda := 0.0268 \frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit der Luft
$v_u := 20 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$	Viskosität der Luft
$\beta := 0.002 K^{-1}$	isobarer therm. Ausdehnungskoeffizient
$Gr_z := 15 \cdot 10^6$	Grashofzahl
$Re_z := 20000$	Reynoldszahl
$Nu_{zelam} := 80$	Nußelt der lam. Strömung
$Nu_{zeturb} := 90$	Nußelt der turb. Strömung
$Nu_{ze} := 110$	Nußelt der erzwungenen Konvektion
$Nu_{zf} := 30$	Nußelt der freien Konvektion
$Nu_{zu} := 130$	Nußelt der überlagerten Konvektion
$\alpha_{zu} := 32 \frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient der überlagerten Konvektion
$m_R := 11.5 m^{-1}$	Rippengröße
$\alpha_m := 530 \frac{W}{m^2 K}$	scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_q := 145 \frac{W}{m^2 K}$	mittlerer äquivalenter Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_s := 5 \frac{W}{m^2 K}$	scheinbarer Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung
$Ko := 1$	Korrekturfunktion
$\Delta T := 40 K$	Rippentemperatur

2.2.6.2 Gleichungssystem:

Given

$$\lambda = -2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{mK^3} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} \right)^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{W}{mK^2} \cdot \frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} + 0.0011 \cdot \frac{W}{mK}$$

$$v_u = 9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{m^2}{s} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2K} \right)^{1.7025}$$

$$Gr_z = \frac{g \cdot l_{zf}^3}{v_u^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Gr_s = \frac{g \cdot l_s^3}{v_u^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_z = \frac{w \cdot l_{ze}}{v_u}$$

$$Re_s = \frac{w \cdot l_s}{v_u}$$

$$Nu_{zelam} = 0.664 \cdot \sqrt{Re_z} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$Nu_{zeturb} = \frac{0.037 \cdot Re_z^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_z^{-0.1} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{ze} = 0.3 + \sqrt{Nu_{zelam}^2 + Nu_{zeturb}^2}$$

$$Nu_{zf} = \left[0.6 + 0.387 \cdot \left(Gr_z \cdot Pr \cdot f_3(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Nu_{zu} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{Nu_{ze}^3 + Nu_{zf}^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{|Nu_{ze}^3 - Nu_{zf}^3|}$$

$$\alpha_{zu} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{Nu_{ze} \cdot \lambda}{l_{ze}} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{zf} \cdot \lambda}{l_{zf}} \right)^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left| \left(\frac{Nu_{ze} \cdot \lambda}{l_{ze}} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{zf} \cdot \lambda}{l_{zf}} \right)^3 \right|}$$

$$\alpha_{su} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{Nu_{se} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{sf} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3} + \frac{1}{2} \sqrt[3]{\left| \left(\frac{Nu_{se} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{sf} \cdot \lambda}{l_s} \right)^3 \right|}$$

$$m_R = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{zu}}{\lambda_R \cdot \delta_R}}$$

$$\alpha_m = \frac{\lambda_R \cdot m_R \cdot \tanh \left[m_R \cdot H \cdot \left(1 + 0.35 \cdot \ln \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} \right) \right) \right] \cdot \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} + 1 \right)}{2 \cdot \left(1 + 0.35 \cdot \ln \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} \right) \right)}$$

$$\alpha_q = \alpha_{zu} \cdot \left(1 - \frac{\delta_R}{\delta + \delta_R} \right) + \frac{\alpha_m \cdot \delta_R}{\delta + \delta_R}$$

$$\alpha_s = \frac{4}{100} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{200} \right)^3 \cdot c_{12}$$

$$Ko = \frac{800}{\left(\frac{\delta}{mm} \right)^{4.4} \left(\frac{w}{m} + 1.5 \right)} + 1$$

$$\Delta T = \frac{Q}{A_z \cdot (\alpha_q + \alpha_s) + A_s \cdot (\alpha_{su} + \alpha_s)} \cdot Ko$$

2.2.6.3 Ergebnis:

$R := \text{Find}(\lambda, v_u, Gr_z, Re_z, Nu_{zelam}, Nu_{zeturb}, Nu_{ze}, Nu_{zf}, Nu_{zu}, \alpha_{zu}, Gr_s, Re_s,$	
$Nu_{zelam}, Nu_{zeturb}, Nu_{ze}, Nu_{zf}, Nu_{zu}, \alpha_{zu}, Gr_s, Re_s, \Delta T)$	
$\lambda := R_0$	$\lambda = 0.032 \text{ kg m s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$v_u := R_1$	$v_u = 2.129 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
$Gr_z := R_2$	$Gr_z = 1.064 \times 10^7$
$Re_z := R_3$	$Re_z = 4.241 \times 10^3$
$Nu_{zelam} := R_4$	$Nu_{zelam} = 38.397$
$Nu_{zeturb} := R_5$	$Nu_{zeturb} = 26.644$
$Nu_{ze} := R_6$	$Nu_{ze} = 47.035$
$Nu_{zf} := R_7$	$Nu_{zf} = 25.854$
$Nu_{zu} := R_8$	$Nu_{zu} = 46.89$
$\alpha_{zu} := R_9$	$\alpha_{zu} = 7.802 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$Gr_s := R_{10}$	$Gr_s = 7.405 \times 10^6$
$Re_s := R_{11}$	$Re_s = 2.393 \times 10^3$
$Nu_{selam} := R_{12}$	$Nu_{selam} = 28.841$
$Nu_{seturb} := R_{13}$	$Nu_{seturb} = 17.147$
$Nu_{se} := R_{14}$	$Nu_{se} = 33.853$
$Nu_{sf} := R_{15}$	$Nu_{sf} = 25.891$
$Nu_{su} := R_{16}$	$Nu_{su} = 33.037$
$\alpha_{su} := R_{17}$	$\alpha_{su} = 10.284 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$m_R := R_{18}$	$m_R = 8.097 \text{ m}^{-1}$
$\alpha_m := R_{19}$	$\alpha_m = 263.094 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$\alpha_q := R_{20}$	$\alpha_q = 37.837 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$\alpha_s := R_{21}$	$\alpha_s = 0.463 \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
$Ko := R_{22}$	$Ko = 1.056$
$\Delta T := R_{23}$	$\Delta T = 161.67 \text{ K}$

3. Kontrolle

$$\lambda_c := \left[-2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{mK^3} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} \right)^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{W}{mK^2} \cdot \frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2} + 0.0011 \cdot \frac{W}{mK} \right]$$

$$v_{uc} := 9 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{m^2}{s} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{2K} \right)^{1.7025}$$

$$Gr_{zc} := \frac{g \cdot l_{zf}^3}{v_{uc}^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_{zc} := \frac{w \cdot l_{ze}}{v_{uc}}$$

$$Nu_{zelamc} := 0.664 \cdot \sqrt{Re_{zc}} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$Nu_{zeturbc} := \frac{0.037 \cdot Re_{zc}^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_{zc}^{-0.1} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{zec} := 0.3 + \sqrt{Nu_{zelamc}^2 + Nu_{zeturbc}^2}$$

$$Nu_{zfc} := \left[0.6 + 0.387 \cdot \left(Gr_{zc} \cdot Pr \cdot f_3(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

$$Nu_{zuc} := \left(\frac{1}{2} \sqrt{Nu_{zec}^3 + Nu_{zfc}^3} + \frac{1}{2} \sqrt{|Nu_{zec}^3 - Nu_{zfc}^3|} \right) \quad Nu_{suc} := \left(\frac{1}{2} \sqrt{Nu_{sec}^3 + Nu_{sfc}^3} + \frac{1}{2} \sqrt{|Nu_{sec}^3 - Nu_{sfc}^3|} \right)$$

$$\alpha_{zuc} := \left[\frac{1}{2} \sqrt{ \left(\frac{Nu_{zec} \cdot \lambda_c}{l_{ze}} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{zfc} \cdot \lambda_c}{l_{zf}} \right)^3 } + \frac{1}{2} \sqrt{ \left| \left(\frac{Nu_{zec} \cdot \lambda_c}{l_{ze}} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{zfc} \cdot \lambda_c}{l_{zf}} \right)^3 \right| } \right]$$

$$\alpha_{suc} := \left[\frac{1}{2} \sqrt{ \left(\frac{Nu_{sec} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 + \left(\frac{Nu_{sfc} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 } + \frac{1}{2} \sqrt{ \left| \left(\frac{Nu_{sec} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 - \left(\frac{Nu_{sfc} \cdot \lambda_c}{l_s} \right)^3 \right| } \right]$$

$$m_{Rc} := \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_{zuc}}{\lambda_R \cdot \delta_R}}$$

$$\alpha_{mc} := \frac{\lambda_R \cdot m_{Rc} \cdot \tanh \left[m_{Rc} \cdot H \cdot \left(1 + 0.35 \cdot \ln \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} \right) \right) \right] \cdot \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} + 1 \right)}{2 \cdot \left(1 + 0.35 \cdot \ln \left(\frac{d + 2 \cdot H}{d} \right) \right)}$$

$$\alpha_{qc} := \alpha_{zuc} \cdot \left(1 - \frac{\delta_R}{\delta + \delta_R} \right) + \frac{\alpha_{mc} \cdot \delta_R}{\delta + \delta_R}$$

$$\alpha_{sc} := \frac{4}{100} \cdot \left(\frac{\Delta T + 2 \cdot T_{\text{außen}}}{200} \right)^3 \cdot c_{12}$$

$$Ko := \left[\frac{800}{\left(\frac{\delta}{mm} \right)^{4.4} \left(\frac{w}{m} + 1.5 \right)} + 1 \right]$$

$$Qc := \frac{\Delta T}{Ko} \cdot [A_z \cdot (\alpha_{qc} + \alpha_{sc}) + A_s \cdot (\alpha_{suc} + \alpha_{sc})]$$

$$Qc = 500 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}$$

$$Gr_{sc} := \frac{g \cdot l_s^3}{v_{uc}^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$$

$$Re_{sc} := \frac{w \cdot l_s}{v_{uc}}$$

$$Nu_{selamc} := 0.664 \cdot \sqrt{Re_{sc}} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$Nu_{seturbc} := \frac{0.037 \cdot Re_{sc}^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_{sc}^{-0.1} \cdot \left(\frac{2}{Pr^3} - 1 \right)}$$

$$Nu_{sec} := 0.3 + \sqrt{Nu_{selamc}^2 + Nu_{seturbc}^2}$$

$$Nu_{sfc} := \left[0.825 + 0.387 \cdot \left(Gr_{sc} \cdot Pr \cdot f_1(Pr) \right)^{\frac{1}{6}} \right]^2$$

Abschnitt D - Dokumentation

1. Projektablauf

Seite 2

- 1.1 Zustandekommen
- 1.2 Literatursuche
- 1.3 Windkanalsuche
- 1.4 Erstellung einer Berechnung
- 1.5 Versuchsaufbau
- 1.6 Versuchsdurchführung
- 1.7 Simulation mit Flotherm
- 1.8 Vergleich und Interpretation der ersten Ergebnisse
- 1.9 Aufbau des Prüfstandes und optimale Einrichtung
- 1.10 Erste Versuche
- 1.11 Verschiedene Befestigungsvarianten
- 1.12 Weitere Versuche
- 1.13 Anpassung des Berechnungsmodells und Abschlussbericht

2. Versuchsaufbau

Seite 17

- 2.1 Windkanal
- 2.2 Prüfling
- 2.3 Temperaturmesseinrichtung
- 2.4 Leistungssteuerung

3. Berechnungsergebnisse

Seite 21

- 3.1 Bemerkungen
- 3.2 Wertetabelle
- 3.3 Diagramme

4. Messergebnisse

Seite 25

- 3.1 Prüfprotokoll
- 3.2 Datenblätter der geprüften Körper

1 Projektlauf

Der Projektlauf sollte grundsätzlich in den folgenden Schritten erfolgen:

- Theoretische Grundlagen
- Bewertung der theoretischen Erkenntnisse
- Testprogramm zur Überprüfung der ermittelten Werte
- Durchführung der Tests
- Auswertung der Versuchsergebnisse
- Abschlussbericht

1.1 Zustandekommen

Nachdem Wolfram aus unserem Team sich bei der Fa. Liebherr nach einer möglichen Diplomarbeit erkundigt hatte, wurden wir zu einer ersten Sitzung eingeladen. Neben dem vorliegenden Projekt hat man uns auch noch eine andere Projektarbeit vorgeschlagen. Da sich diese jedoch hauptsächlich mit Elektrotechnik beschäftigt hätte, haben wir uns schnell für diese entschieden.

1.2 Literatursuche

Nachdem wir beim nächsten Treffen das Pflichtenheft definiert hatten, haben wir mit der Literatursuche begonnen. Wir haben in der HTL - Bibliothek und in der Landesbibliothek die besten Unterlagen gefunden. Sebastian hat sogar in der UNI – Bibliothek in Innsbruck nach spezifischeren Unterlagen gesucht, aber diese Versuche waren genauso erfolglos, wie auch unsere Erkundigungen an der ETH. Schließlich hat sich unser Bibliothekar bereit erklärt zwei neue Bücher, die wir im Internet gefunden haben zu kaufen. Jetzt stand dem „einlesen“ in das Fachgebiet der Konvektion nichts mehr im Weg. Wir benötigten diese Unterlagen im Verlauf der Projektarbeit auch zum Erstellen eines Berechnungsprogramms.

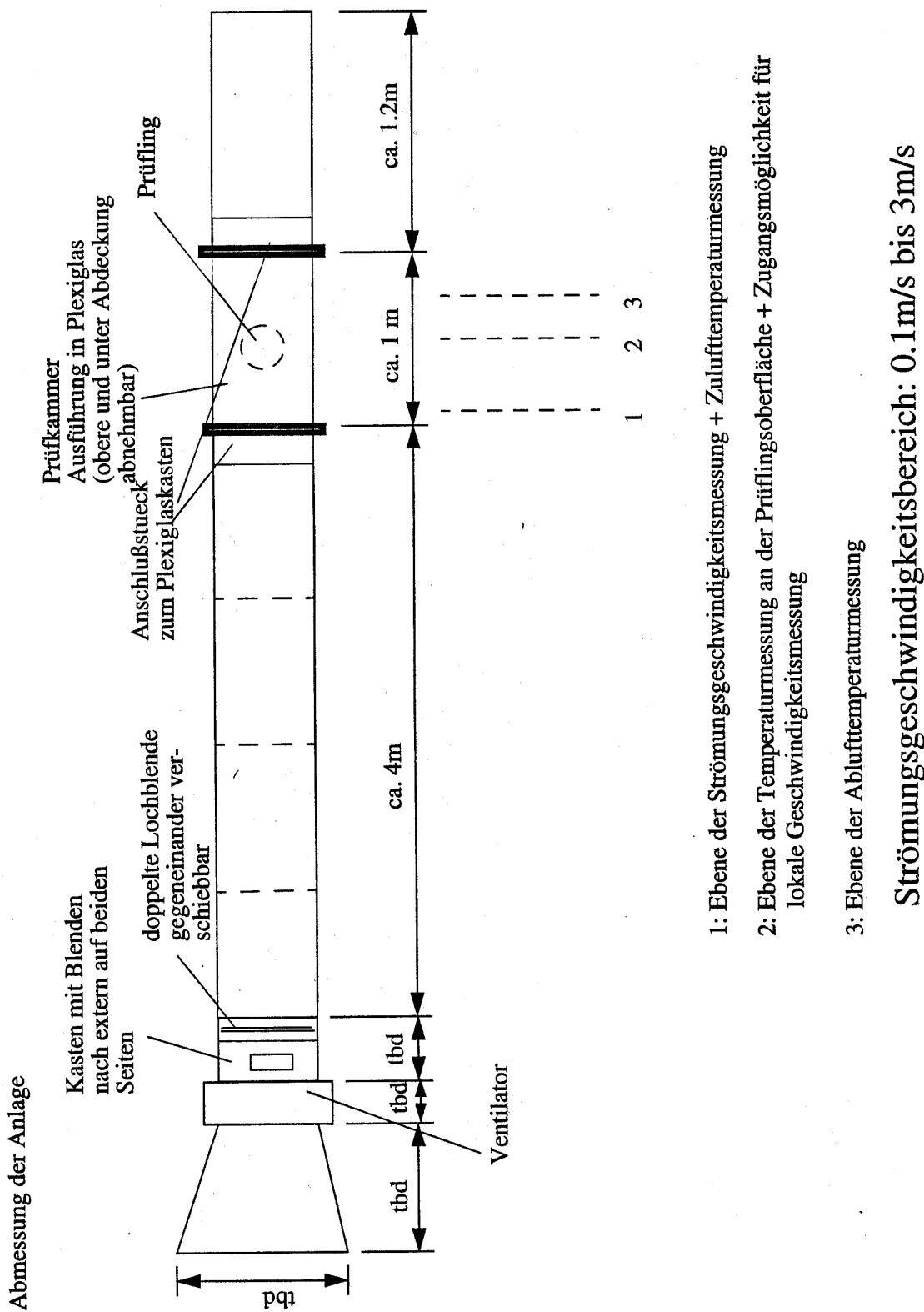
1.3 Windkanalsuche

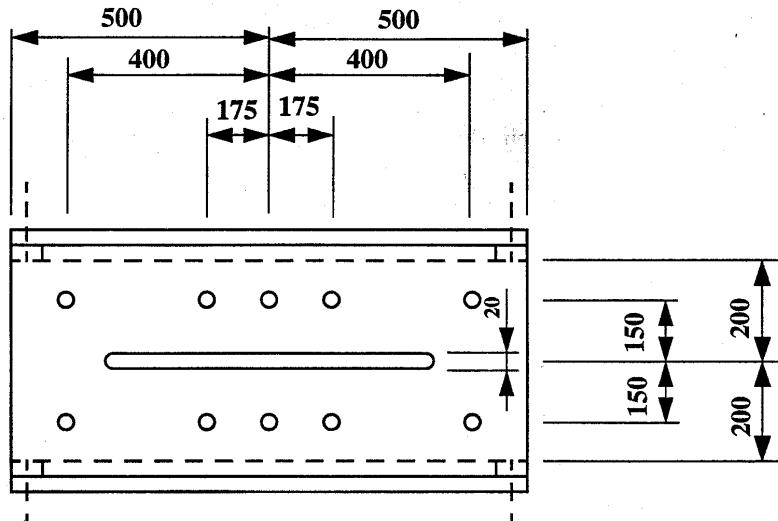
Von Anfang an war es klar, dass wir für genaue Ergebnisse auf eine Simulation im Windkanal nicht verzichten können.

Es war also die nächste Aufgabe einen geeigneten Windkanal zu finden. Als erstes kam uns der Kanal im Strömungslaboratorium der HTL in den Sinn. Da dieser aber für erheblich höhere Windgeschwindigkeiten ausgelegt ist als in unserem Fall nötig, wären erhebliche Abänderungsarbeiten nötig gewesen. Außerdem benötigt Prof. Dekitsch den vorhandenen Kanal für seinen

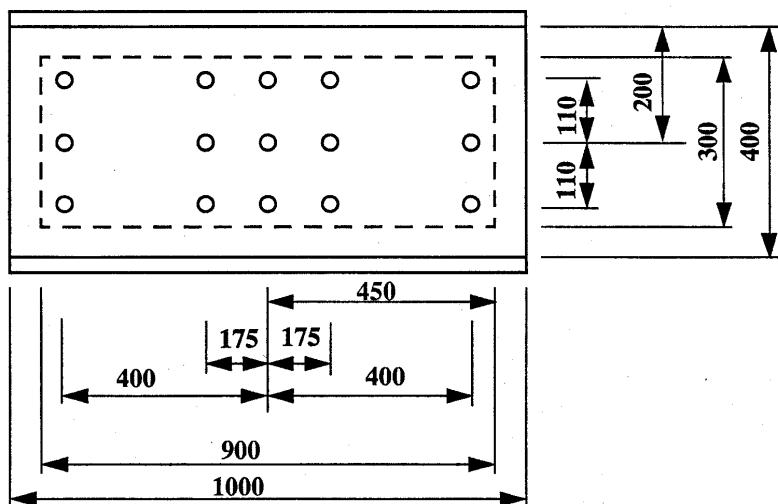
Unterricht, daher wäre ein ungestörtes Arbeiten für uns nicht möglich gewesen.
Es musste also eine andere Lösung gefunden werden.

Die Fa. Liebherr hat schlussendlich einen neuen Windkanal in Auftrag gegeben,
der bei uns in der Schule aufgestellt werden sollte.



Prüfkammer (nicht maßstäblich)**Seitenansicht**

alle Bohrungen mit Durchmesser 20mm

Draufsicht

Laengen fuer Flansche / Anschluesse zum Kanal sind nicht beruecksichtigt

Unsere Aufgabe war es einen geeigneten Standort zu finden. Der Standort Schule bot sich vor allem aus Zeiteinsparungsgründen an. Wir waren eigentlich sehr überrascht wie schwierig es war, für den bereits bestellten Windkanal in unserer neuen, riesigen Schule einen Platz zu finden, den uns der Direktor genehmigt. Aber nach öfterem Nachhaken und Einschalten des Elternvereins, sowie diversen Drohungen des Direktors stellte er uns schließlich, nach einem klärenden Gespräch mit dem Abteilungsvorstand, doch einen Projektraum zur Verfügung.

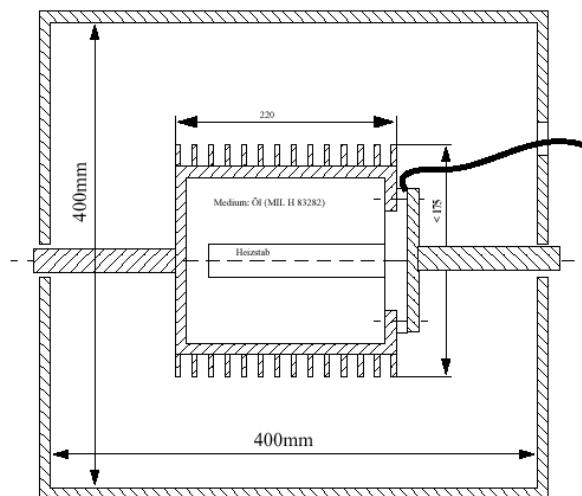
1.4 Erstellung einer Berechnung

Neben diesen organisatorischen Aufgaben versuchten wir mit der gegebenen Geometrie und der gefundenen Literatur eine möglichst genaue Berechnung zu erstellen. Das stellte sich als nicht gerade leicht heraus, da es sich um ein weitgehend unerforschtes Gebiet handelt. Die Unterlagen beziehen sich meistens auf Wärmetauscher und Rohrleitungen, aber nicht auf berippte zylindrischen Einzelkörper. Die 2 größten „Löcher“ in der Literatur stellen allerdings die Überlagerung zwischen erzwungener und freier Konvektion, sowie die Anströmung unter einem beliebigen Winkel dar. Für diese zwei Probleme, die in unserem Fall voll zum tragen kamen, da die Strömung im Flügel völlig undefiniert ist und die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Überlagerung liegt, gibt es wenn überhaupt nur angenäherte, vereinfachte und vor allem ungenaue Formeln zur Berechnung. Nichts desto trotz stellten wir eine Berechnung fertig mit Hilfe der wir nun die resultierenden Temperaturen von verschiedenen Rippengeometrien bei einer bestimmten Leistung ermittelten.

1.5 Versuchsaufbau

Parallel dazu musste der Versuchsaufbau genauer definiert werden. Zuerst schlug unser Projektbetreuer einen mit Öl gefüllten, berippten Aluminiumkörper vor.

Abmessungen des Prüflings und Kanalquerschnitt:



Die Beheizung des Körpers sollte über einen in das Öl getauchten Heizstab erfolgen. Da jedoch von Johannes durchgeführte Erkundigungen ergaben, dass solche Heizstäbe mit der erforderlichen Leistungsdichte extra angefertigt

werden müssen und sowohl der Preis als auch die Lieferzeit inakzeptabel waren, musste eine andere Lösung gefunden werden. Dazu kam noch, dass eine Berechnung des vergrößerten Volumens des Öls durch die Erhitzung einem inakzeptabel hohen Druck ergab (siehe dazu die Berechnug unseres Projektbetreuers auf der nächsten Seite). Wir dachten daher schon an eine eigene Druckausgleichsvorrichtung, die das überschüssige Öl durch Schläuche abgeführt hätte.

(nach dem Prinzip der nebenstehenden Skizze)

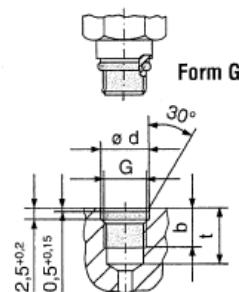
Schließlich wurden die Prüfkörper aus einem Aluminiumvollkörper gefertigt und mit einem konventionellen Heizstab, wie er auch in der Verpackungsindustrie verwendet wird beheizt.

Die Befestigung der Körper sollte über zwei Flansche aus PTFE erfolgen.

Dieses äußerst hitzebeständige Material sollte die Seitenflächen wärmeisolieren.

Der in Auftrag gegebene Windkanal hat im Bereich der Prüfammer genug Löcher und Schlitze um die Körper zu befestigen.

Screw holes and sealing details



Ölausdehnungs – Berechnung:

Directory: kegel/mcad/konvektion File: oel_ausdehnung.mcd

Ölwerke MIL H 83282: $N := \text{newton}$

Dichte bei 20 Grad $\rho_{20} := 845 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Dichte bei 100 Grad $\rho_{100} := 785 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Kompressionsmodul $b := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Befülldruck (absolut) $p_1 := 0.1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Normierte Volumenaenderung: $dV_n := \left(\frac{\rho_{20}}{\rho_{100}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{80 \cdot K}$ $dV_n = 9.554 \times 10^{-4} \frac{1}{K} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$

Volumen: $V := \frac{\pi}{4} \cdot (135 \cdot \text{mm})^2 \cdot 210 \cdot \text{mm}$ $V = 3.006 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Temperaturdifferenz: $dT := 130 \cdot K$

Volumenaenderung des Oels $dV_o := dV_n \cdot V \cdot dT$ $dV_o = 3.733 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Volumenaenderung durch Materialdehnung $dV_{al} := \left[\frac{\pi}{4} \cdot (135 \cdot \text{mm})^2 \cdot 210 \cdot \text{mm} \cdot \left(1 + 22 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{K} \cdot dT \right)^3 \right] \dots$
+ $\left[\frac{\pi}{4} \cdot (135 \cdot \text{mm})^2 \cdot 210 \cdot \text{mm} \right] \cdot (-1)$

$dV_{al} = 2.586 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

Effektive Volumenvergrößerung:

$dV_e := dV_o - dV_{al}$ $dV_e = 3.475 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

Druckerhöhung $p_2 := \frac{dV_e}{V} \cdot b + p_1$ $p_2 = 115.699 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

1.6 Versuchsdurchführung:

Die Ermittlung der Temperatur wollten wir mit Thermoelementen durchführen.

Wir haben uns lange den Kopf darüber zerbrochen, wie wir die Temperaturen über die Rippe zuverlässig messen können ohne die Strömung zu stören.

Wir haben uns eine Vorrichtung überlegt, die wir für kurze Zeit in die ca. 6mm breite Ausnehmung zwischen 2 Rippen einführen, um so die Temperaturen über die Rippenhöhe zu messen. Dieser Temperaturverlauf ist charakteristisch für den Rippenwirkungsgrad, den es zu optimieren galt.

Die ersten Berechnungen zeigten allerdings bei den in unseren Grenzen möglichen Rippengeometrien einen Wirkungsgrad von beinahe 1, was unsere Versuche um einiges erleichterte, da wir von einer über den ganzen Körper konstanten Temperatur ausgehen konnten.

Die Ansteuerung der Heizstäbe sollte über ein von uns ausgesuchtes Leistungsansteuergerät erfolgen das uns die Fa. Liebherr zusammenbaute.

Die nötigen Messgerät sollten von der Schule zur Verfügung gestellt werden.

1.7 Simulation mit Flotherm

In der Zwischenzeit hat unser Projektbetreuer Herr Kegel eine Simulation der Problemstellung mit Hilfe des „Finite Elemente Programms“ Flotherm durchgeführt. Dieses Programm stand mehr oder weniger per Zufall für kurze Zeit zur Verfügung und lieferte zum Beispiel den Richtwert von 6mm Rippenabstand.

Auf der nächsten Seite sind exemplarisch die Ergebnisse für die freie Konvektion angeführt. Allerdings handelt es sich dabei um 10mm hohe Rippen die wir nicht getestet haben.

Simulation mit Flotherm

Freie Konvektion

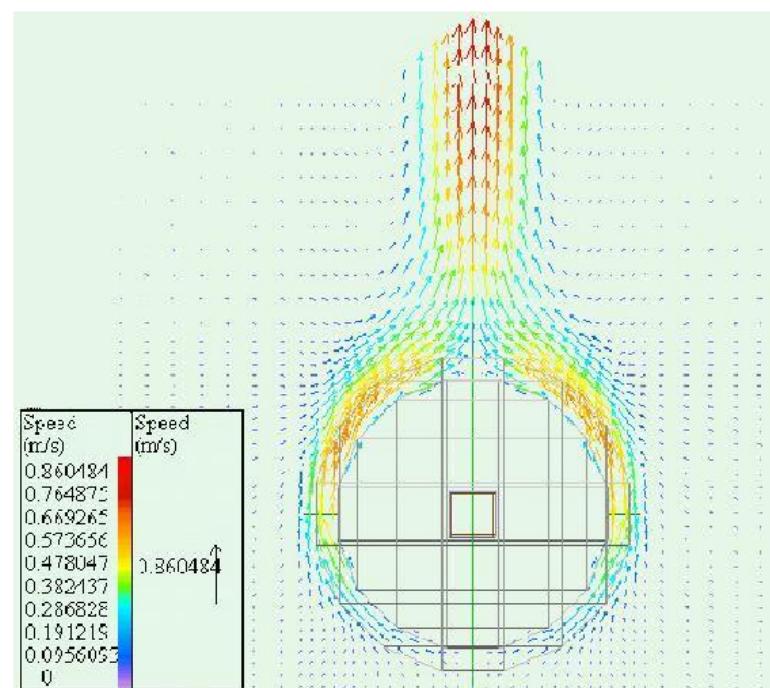
Strömungsprofil

Körper mit Rippen

Stärke: 2mm

Abstand: 6mm

Höhe: 10mm



Im Strömungsprofil sieht man, dass bereits bei freier Konvektion, also ohne jede erzwungene Strömung, eine Geschwindigkeit von 0.5 m/s erreicht wird.

Simulation mit Flotherm

Freie Konvektion

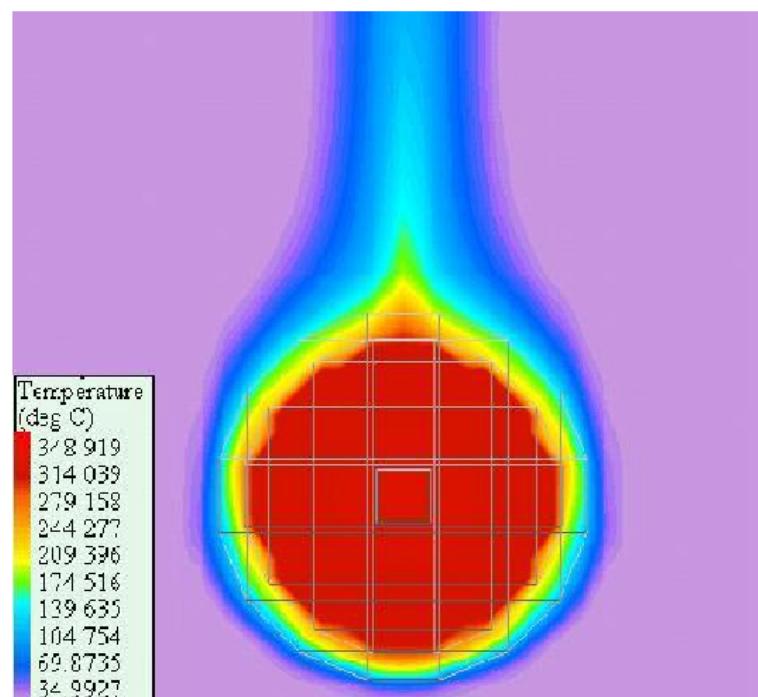
Temperaturprofil

Körper mit Rippen

Stärke: 2mm

Abstand: 6mm

Höhe: 10mm



Wir liegen hier bei etwa 300°C.

1.8 Vergleich und Interpretation der ersten Ergebnisse

Jetzt wurden sowohl unsere Berechnungen als auch die Ergebnisse der Simulation verglichen und interpretiert. Aus diesen Erkenntnissen erstellten wir ein Prüfprogramm und definierten die ersten Prüfkörper.

Die Prüfkörper sowie die Befestigungsflansche wurden von der Lehrwerkstatt gefertigt.

Ursprüngliches Prüfprogramm:

Prüfkörper	Ziel
<ul style="list-style-type: none"> • Glatte Oberfläche • Rippenhöhe 15mm Rippenstärke 2mm Rippenabstand 4,5/ 6/ 7,5mm • Rippenhöhe 10mm Rippenstärke 2mm optimaler Rippenabstand • Rippenhöhe 10mm Rippenstärke 1mm optimaler Rippenabstand • Trapezrippen • Optimalkörper mit Längsfräslinien • Optimalkörper schwarz eloxiert 	<ul style="list-style-type: none"> • Basis • Optimierung des Rippenabstandes • Beurteilung der rel. Änderung der Temperatur im Vergleich zur Massenänderung durch kleine Rippen • Kompensation der Temperaturerhöhung infolge der geringeren Rippenhöhe durch mehr Oberfläche und Masseneinsparung • Verbesserung der Strömungsverhältnisse Oberflächenvergrößerung • Verbesserung der Queranströmung • Temperatursenkung durch Strahlung

Da sich im Laufe der Versuche herausstellte, dass die Temperatur ohne erzwungene Konvektion schwer auf die höchstens zulässigen 140°C senken lassen würde, haben wir die Rippenhöhe nicht auf 10mm reduziert. Der Einbauraum für 15mm ist vorhanden und die Masseneinspaarung ist nicht so groß. Die Versuche mit Trapezrippen sind ebenso weggefallen, da sich schnell herausgestellt hat, dass 1mm dicke Rippen sehr gute Werte liefern. Eine weitere Reduktion der Dicke im oberen Bereich haben wir aus fertigungstechnischen Gründen und aufgrund der Verletzungsgefahr vermieden. Es hat sich gezeigt, dass der schwarz eloxierte Körper deutlich bessere Werte liefert, weshalb wir die Versuche mit schwarzen Körpern ausgeweitet haben.

1.9 Aufbau des Prüfstandes und optimale Einrichtung

Am 20.2.2001 wurde der Windkanal geliefert und es war nun unsere Aufgabe den vorher definierten Versuchsaufbau zum Laufen zu bringen.



Als wir kurze Zeit später den ersten glatten Prüfkörper, den wir für Referenzzwecke testen wollten bekamen, konnten wir noch nicht gleich loslegen. Das von uns ausgesuchte Impulsansteuergerät taktete zu langsam bzw. das uns zur Verfügung stehende Wattmeter war zu wenig träge. Wir bekamen jedenfalls keine brauchbaren Ergebnisse für die im Heizstab verbrauchte effektive Leistung. Der Zeiger des Wattmeters bewegte sich ca. im Sekundentakt hin und her.

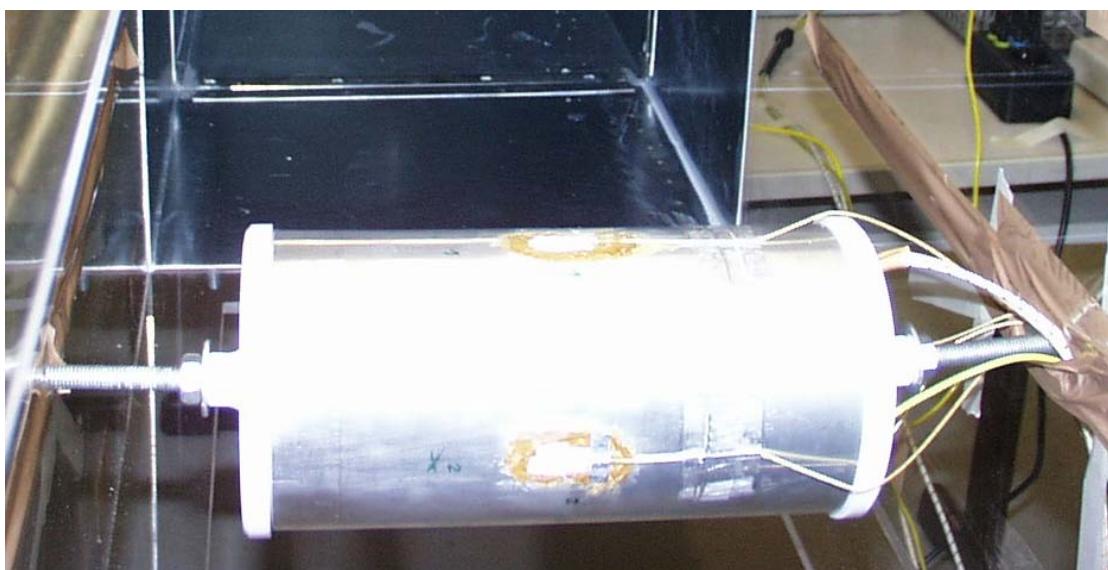


Also haben wir mit Hilfe Prof. Breiteggers eine Trafoschaltung aufgebaut die tadellos funktionierte. Später haben wir diesen Wechselstromtrafo mit

galvanischer Trennung durch einen für höhere Leistungen ausgelegten Drehstromtrenntrafo ersetzt. Der kleine Wechselstromtrafo hat sich bei einer konstanten Leistung von 500W zu sehr erwärmt und der Leistungsabfall bei längeren Messungen war zu groß.

Die Thermoelemente waren bereits von der Firma auf den ersten Körper ohne Kühlrippen aufgeklebt worden.

Von FL Sturm haben wir im Anschluss das 10-Kanal-Messgerät bekommen um die Thermoelemente richtig auszuwerten. Das Gerät gibt die Messwerte über einen kleinen im Gerät integrierten Plotter aus und lässt sich programmieren.



Die Befestigung erfolgte über die von uns konstruierten PTFE-Flansche und 2 Gewindestangen. Alle nicht benötigten Löcher der Prüfkammer wurden mit Klebeband abgeklebt.

Jetzt stand den ersten Versuchen nichts mehr im Wege.

1.10 Erste Versuche

Es zeigte sich bald, dass sich der Beharrungszustand nach etwa einer bis zwei Stunden einstellte. Obwohl die ermittelten Temperaturen durchaus im Bereich des möglichen lagen, waren sie im Vergleich zur Simulation und auch zur Rechnung zu gut. Darum galt es jetzt einen möglichen Fehler zu finden und auszumerzen. Die möglichen Fehlerquellen stellten Leistungsmessung, Temperaturmessung und zu guter letzt unsere Flanschkonstruktion dar. Es zeigte sich nämlich bei hohen Temperaturen eine starke Wölbung der PTFE Flansche. Wir führten daher Referenzmessungen mit Präzisionsmessgeräten der Fa. Liebherr durch, die jedoch sowohl unsere Leistungsmessung als auch

unsere Temperaturermittlung bestätigten. Wir mussten also eine bessere Befestigungsmöglichkeit finden. Eine weitere Fehlerquelle wurde ebenfalls schnell entlarvt. So stellten wir aufgrund der ständigen Abweichung der Messstelle 2 einen kleinen Offset des Messgeräts an der Messstelle 2 fest. In der Folge haben wir diese Messstelle ausgelassen.

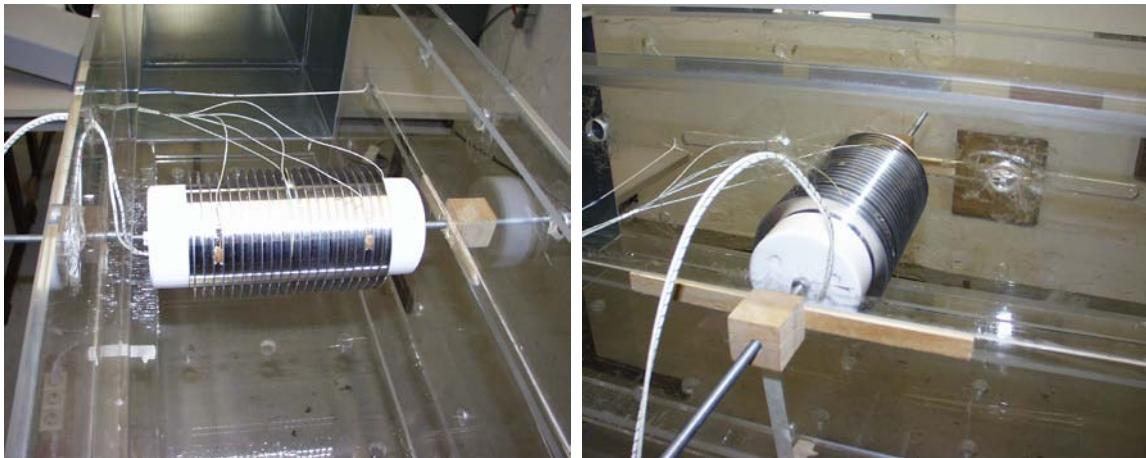
1.11 Verschiedene Befestigungsvarianten

Da durch die Wölbung der beiden Flansche eine Wärmeabfuhr über die Seitenflächen stattfand, mussten wir genau diese Aufwölbung bekämpfen. Außerdem waren die Flansche mit zunehmender Temperatur nicht besonders stabil und die beiden Zäpfen mit den Gewindestangen bogen sich merklich nach oben. (siehe Oben)

Der erste Versuch bestand in der Konstruktion und Fertigung eines Stahlflansches der direkt auf den PTFE – Flansch geschraubt wird. Er sorgte zwar für Stabilität und verhinderte das Aufwölben des Teflons, aber über die Schrauben wurde zu viel Wärme an die Flansche übertragen. Sie erwärmen sich auf bis zu 70°C und der Fehler war noch größer als zuvor.

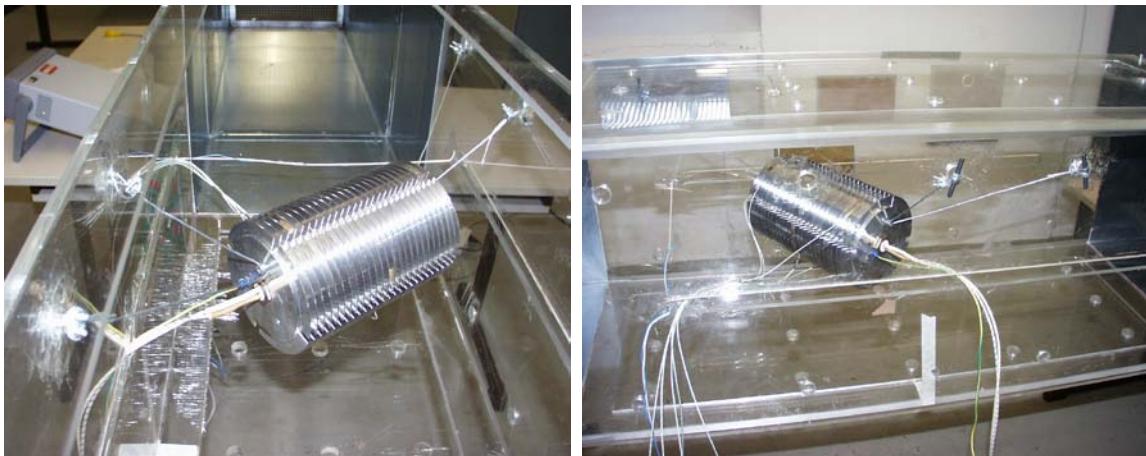


In der Folge versuchten wir auch die Schrauben mit Teflon zu isolieren und auch die Verwendung von 2 neuen sehr dickwandigen PTFE-Flanschen, aber es stellte sich heraus, dass man die Seitenflächen praktisch nicht isolieren kann.



Es stellt sich immer ein Wärmeübergang an den Seitenflächen ein. Die Isolierung mittels Teflon bewirkt lediglich eine Zeitverzögerung. So waren die ersten Ergebnisse mit 3m/s Strömungsgeschwindigkeit weniger verfälscht als die langwierigeren Versuche bei freier Konvektion.

Angesichts dieser Tatsachen verabschiedeten wir uns von noch abenteuerlicheren Konstruktionen und entschieden uns für die Miteinbeziehung der Seitenflächen.

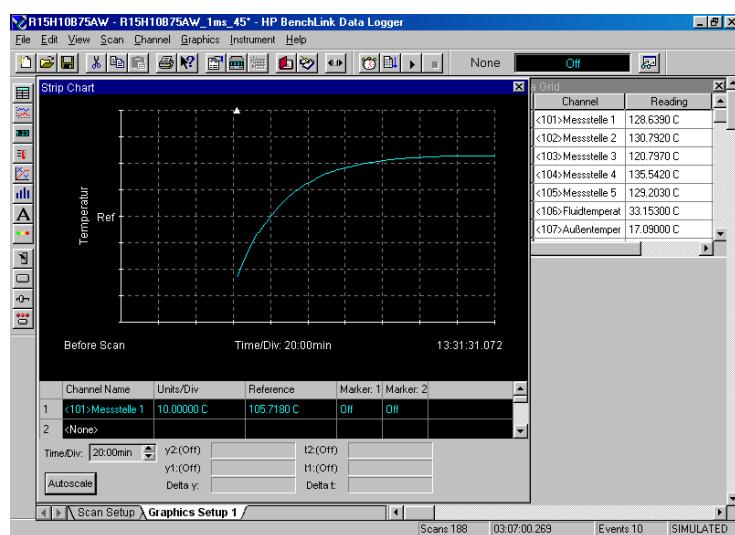


Der Körper wurde jetzt aufgehängt und zwar mit minimaler Beeinflussung der Strömung. Zuerst verwendeten wir einen 2mm PE Faden. Als dieser jedoch bei einem Versuch durchschmolte und es zu einem kleineren Unfall mit Stromausfall kam stiegen wir doch auf Stahldraht um, den wir anfangs aufgrund der besseren Wärmeübertragung nicht verwenden wollten.
Wir stellten aber fest, dass aufgrund des sehr kleinen Auflagequerschnitts des Stahldrahtes praktisch keine Wärmeübergang in den Draht und damit keine Verfälschung stattfindet.

1.12 Weitere Versuche

In der Folge haben wir versucht möglichst ohne Unterbrechung also rund um die Uhr so viele Versuche als möglich durchzuführen.

Mitten in unseren Versuchsreihen erfuhren wir, dass uns das 10-Knall-Messgerät in Kürze nicht mehr zur Verfügung stehen würde. Von diesem Zeitpunkt an haben wir ein von der Fa. Liebherr zur Verfügung gestelltes digitales Gerät verwendet, bei dem auch die Anbindung an unseren Laptop kein großes Problem darstellte.

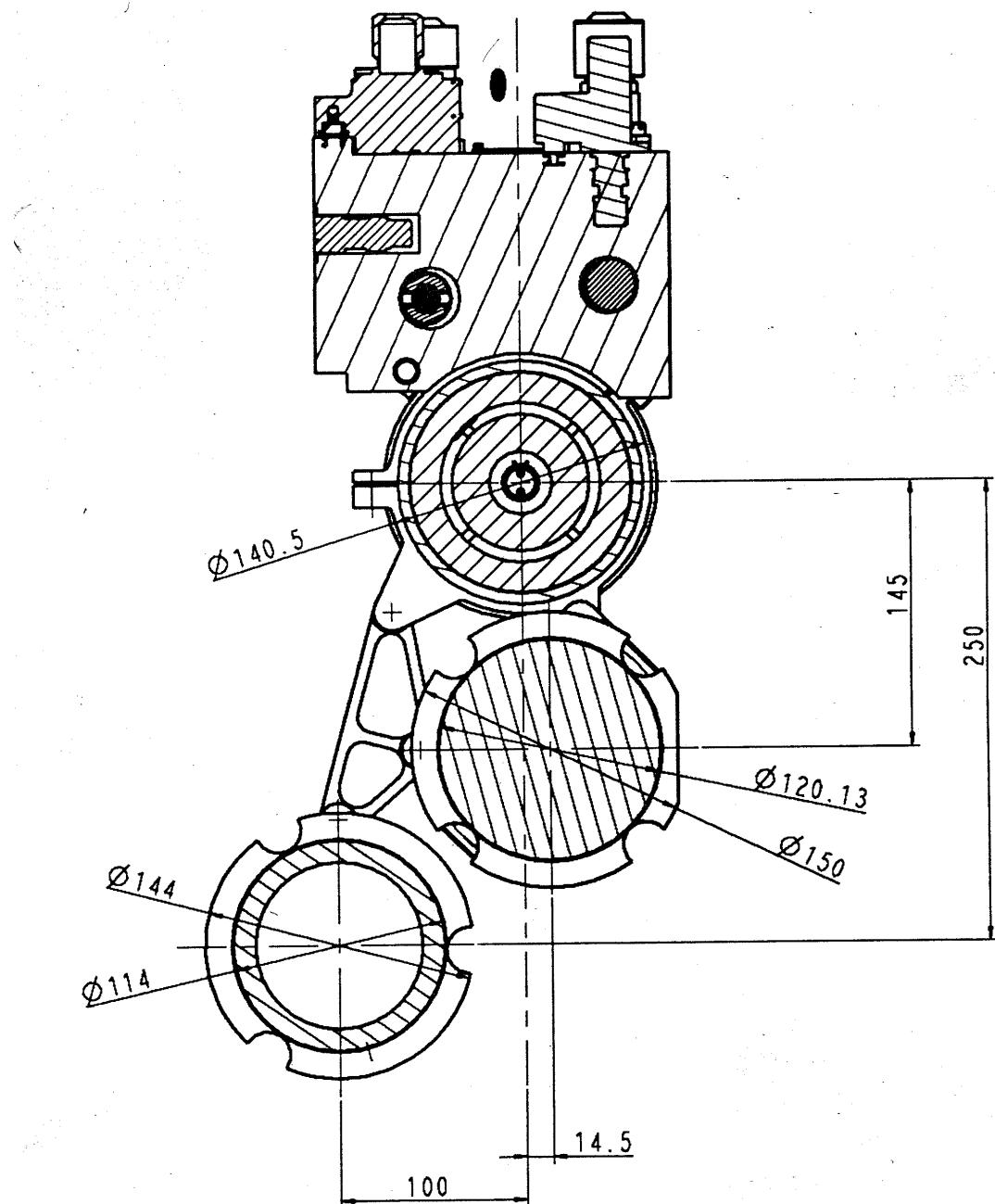


Das erhöhte die Genauigkeit unserer Messungen noch zusätzlich, da jetzt ein etwaiger Leistungsabfall, der bei längeren Messungen immer wieder durch die Erwärmung des Transformators auftrat, aus der am PC aufgezeichneten Kurve noch besser zu erkennen war. Auch die Auswertung der Daten im Excel wurden durch die Aufzeichnung am PC erleichtert, da die Daten nicht mehr von Hand eingegeben werden mussten.

1.13 Anpassung des Berechnungsmodells und Abschlussbericht

Nach dem vollständigen Vorliegen der Versuchsergebnisse haben wir versucht unsere Berechnung, die wir im MathCAD erstellt haben, auf die ermittelten Werte abzustimmen.

Ein weiterer Schritt wird es sein im Windkanal die genauen Verhältnisse im Flügel mit 3 übereinander angeordneten Körpern, davon 2 beheizt, und einem darüber montierten Elektronikschaltkasten zu simulieren.



Diese Versuche werden wir der Vollständigkeit halber machen obwohl sie nicht im Pflichtenheft angeführt sind.

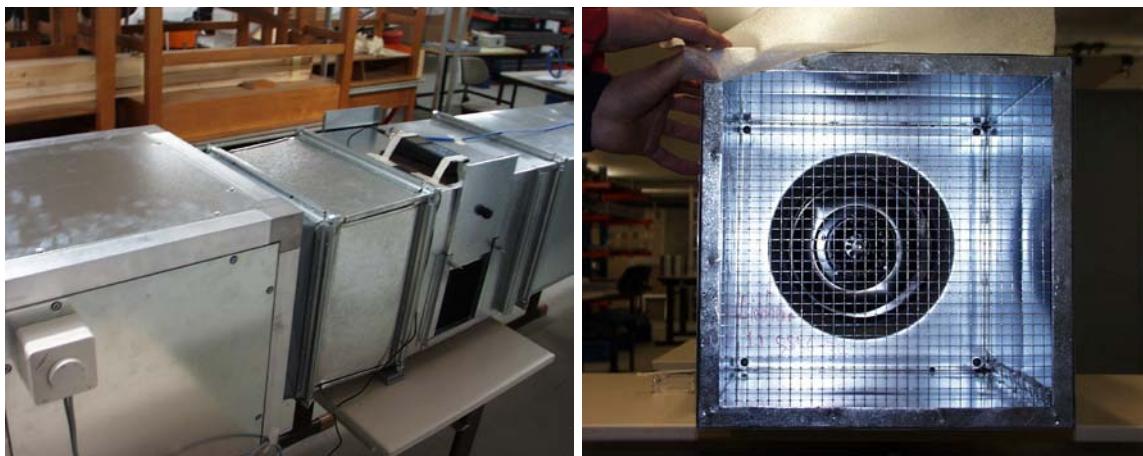
2 Versuchsaufbau

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus:

- Windkanal
- Prüfling
- Temperaturregelleitung
- Leistungssteuerung

2.1 Windkanal

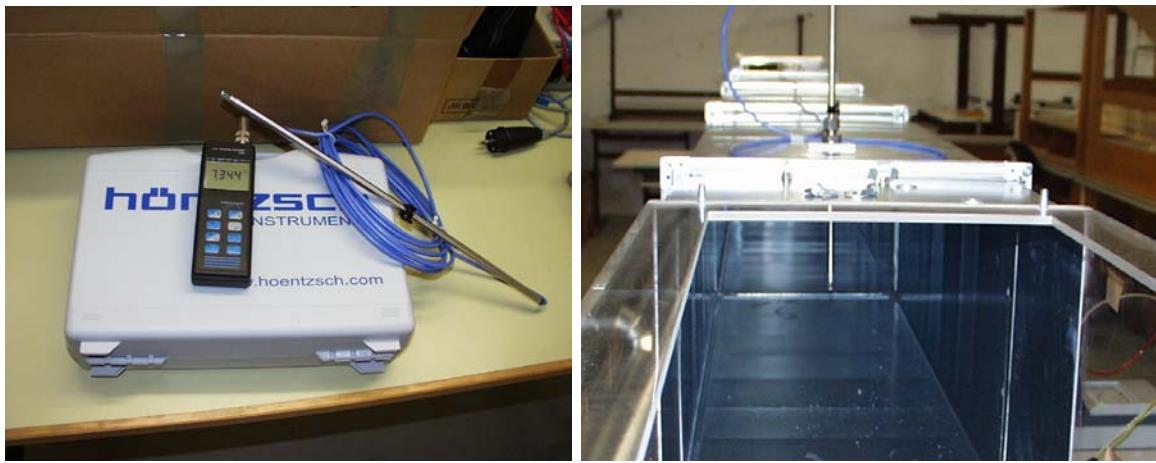
Der Windkanal wurde von unserer Partnerfirma in Auftrag gegeben. Er wurde speziell auf unsere Anforderungen abgestimmt. Mit einer Fasenanschnittsteuerung kann die Strömungsgeschwindigkeit über einen Lüftungsventilator von 0 bis 3,5 m/s gesteuert werden.



Die extrem niedrigen Geschwindigkeiten erreichen wir durch Verschiebung von 2 Lochplatten gegeneinander und zwei Schieber, um die gestaute Luft vor den Lochplatten abzuleiten.



Die Länge des Kanals von etwa 10 m garantiert uns eine homogene, parallele Strömung im Bereich der Prüfkammer.



Zirka 1 m vor der Prüfkammer wird die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Flügelmanometers gemessen. Dieses Gerät misst bereits ab 0.3 m/s mit hoher Genauigkeit.

Der Bereich der Prüfkammer ist aus Plexiglas gefertigt und gegenüber dem restlichen Kanal abgedichtet. Im Plexiglas sind eine Reihe von Löchern und Schlitzen angebracht um eine Multifunktionalität zu garantieren. Für die Befestigung nicht benötigte Löcher wurden von uns mit Klebeband abgeklebt. Deckel und Boden der Prüfkammer sind abnehmbar um auch die freie Konvektion optimal simulieren zu können.

2.2 Prüfling

Der Prüfling ist ein Zylinder aus Aluminium mit den Hauptabmessungen $l=220\text{mm}$ $d=150\text{mm}$.



In diesen Rohling sind die verschiedenen Rippengeometrien eingedreht. Auf den nächsten Seiten sind die Fertigungszeichnungen der Körper zu finden. In der Mitte des Prüflings ist eine 20mm H7 Bohrung in die der Heizstab eingeführt und verschraubt wird. In eines der drei M8 Löcher die ursprünglich für die Flanschbefestigung vorgesehen waren wird eine Senkkopfschraube geschraubt an der unser Prüfling mittels eines Stahlseiles aufgehängt wird.

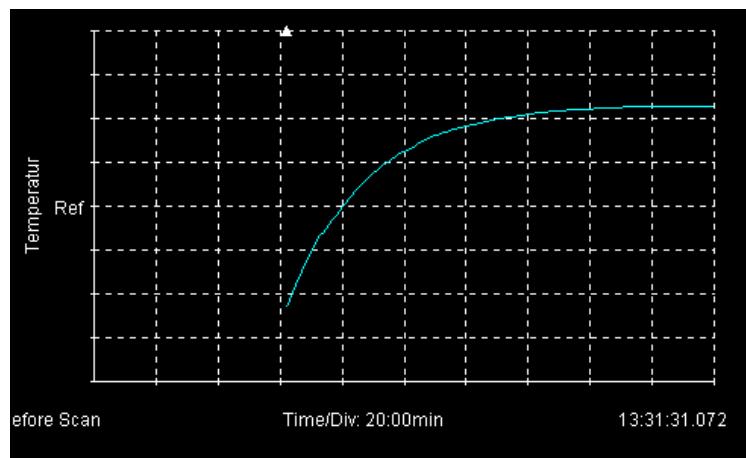
2.3 Temperaturmesseinrichtung

Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe von NiCrNi Thermoelementen vom Typ K, die wir mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers angebracht haben. Dabei ist es sehr wichtig, dass die erste Verbindungsstelle der zwei Metalle auf dem Prüfling aufliegt. Obwohl eine kleine Kleberschicht dazwischen nur zu einer Zeitverzögerung führt haben wir darauf sehr großen Wert gelegt. Die Klebestelle haben wir vor dem Bekleben mit Trichlorethan behandelt, um die Stelle zu entfetten. Dieses Mittel wird auch beim Bekleben von Dehnmessstreifen verwendet.



Die Auswertung erfolgte über ein 10-Kanal-Messgerät. Die Thermoelemente werden allerdings in einem speziellen Abgleichgerät (rechts im obigen Bild) angebracht, wo sowohl der Nullabgleich als auch der Vergleich zu einer Referenztemperatur vorgenommen wird, und von dort werden die Daten zum eigentlichen Messgerät weitergeleitet. Der Zyklus für die Messungen ist frei programmierbar. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt über den im Gerät integrierten Plotter. Dadurch erhalten wir nach jedem Zyklus einen aktuellen Wert. In der Dokumentation ist allerdings immer nur der letzte Wert an der jeweiligen Messstelle angeführt. Die Messstelle 2 haben wir aufgrund einer fehlerhaften Abweichung, die wohl auf das Gerät zurückzuführen ist, nicht verwendet.

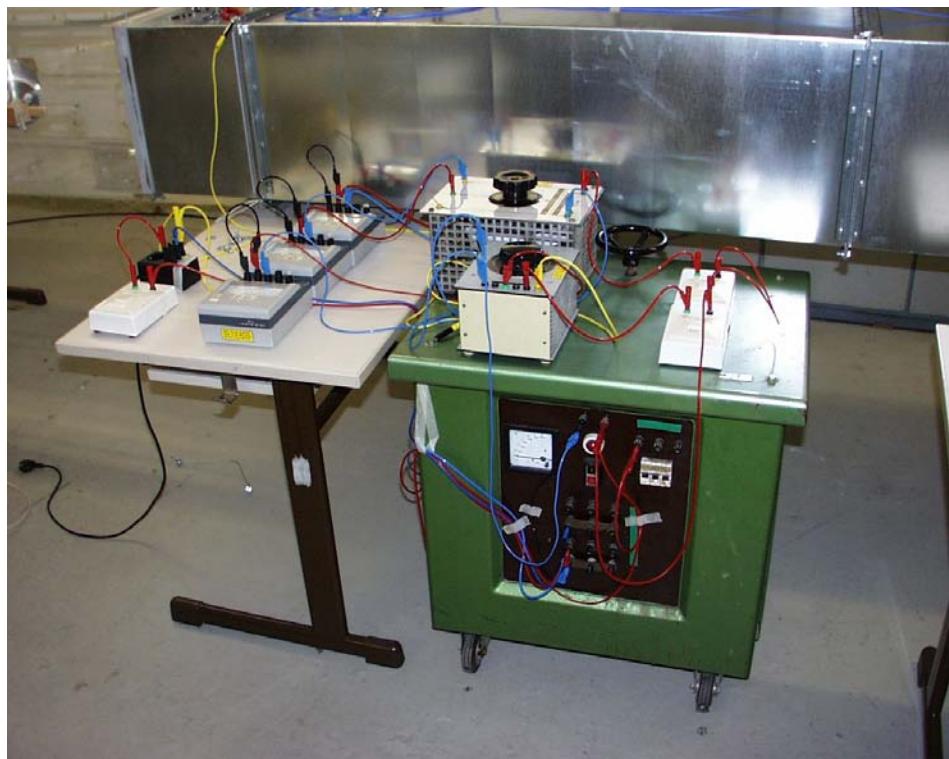
Nachdem das Gerät nicht mehr zur Verfügung stand haben wir von unserer Partnerfirma das digitale Mehrkanalmessgerät vom Typ HP-34970A bekommen. Dieses Gerät lässt sich über die RS-232 Schnittstelle mit dem PC verbinden.



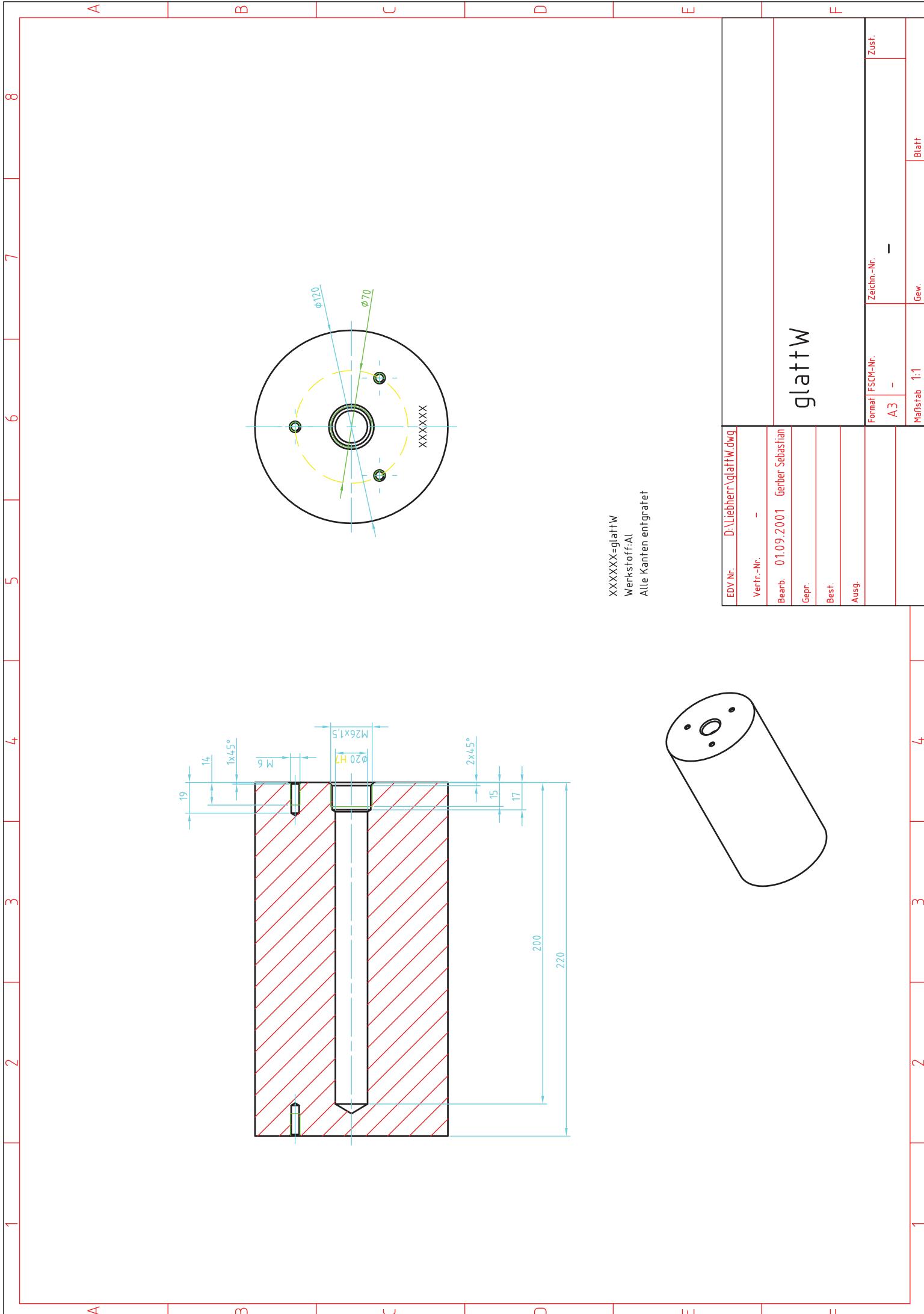
Die aktuellen Werte werden jede Minute aufgezeichnet. Das Gerät sorgte daher für eine noch genauere Messung.

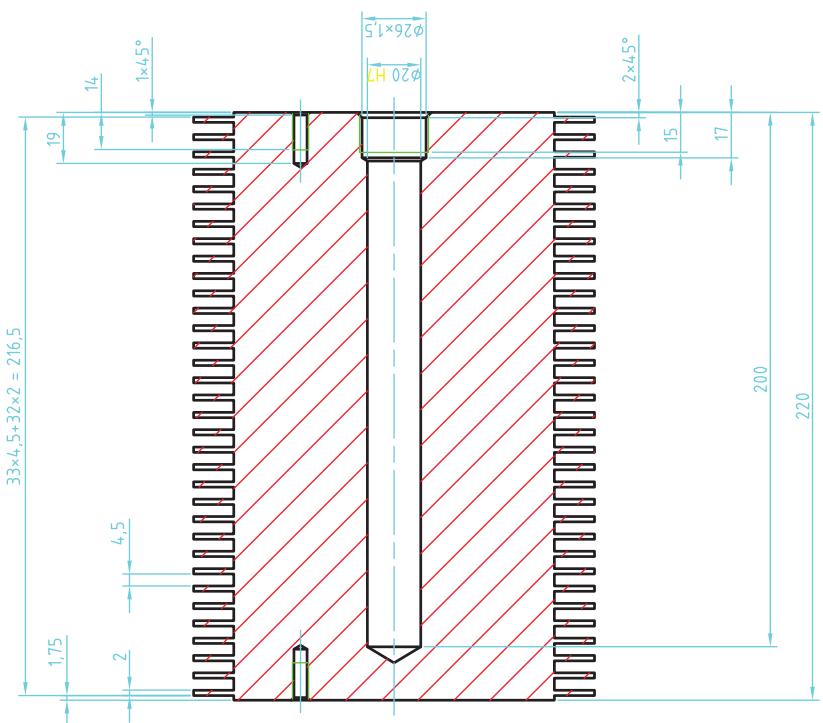
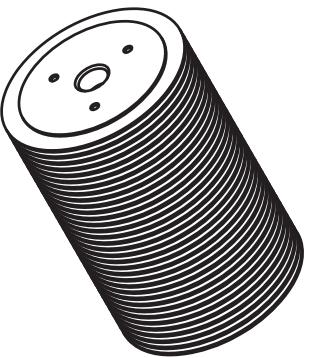
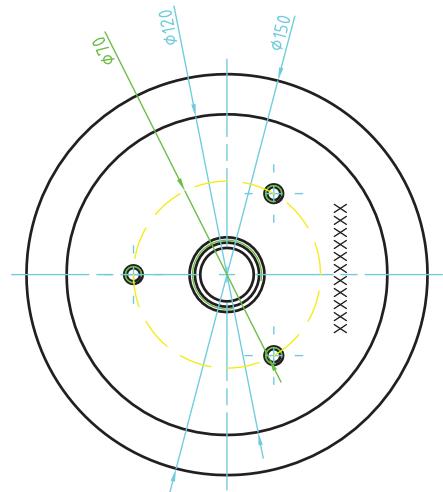
2.4 Leistungssteuereinrichtung

Die Leistung wird über einen Drehstromtrafo mit galvanischer Trennung realisiert.



Wobei wir nur eine Fase zur Steuerung nutzen. Die Leistungsmessung erfolgt über ein konventionelles Drehspulmessgerät mit analoger Anzeige. Es zeigt durch die auftretende Trägheit des Zeigers nur die effektiv verbrauchte Leistung an.
Aus Sicherheitsgründen haben wir einen Schalter zwischen Netz und Laborschaltung eingebaut.

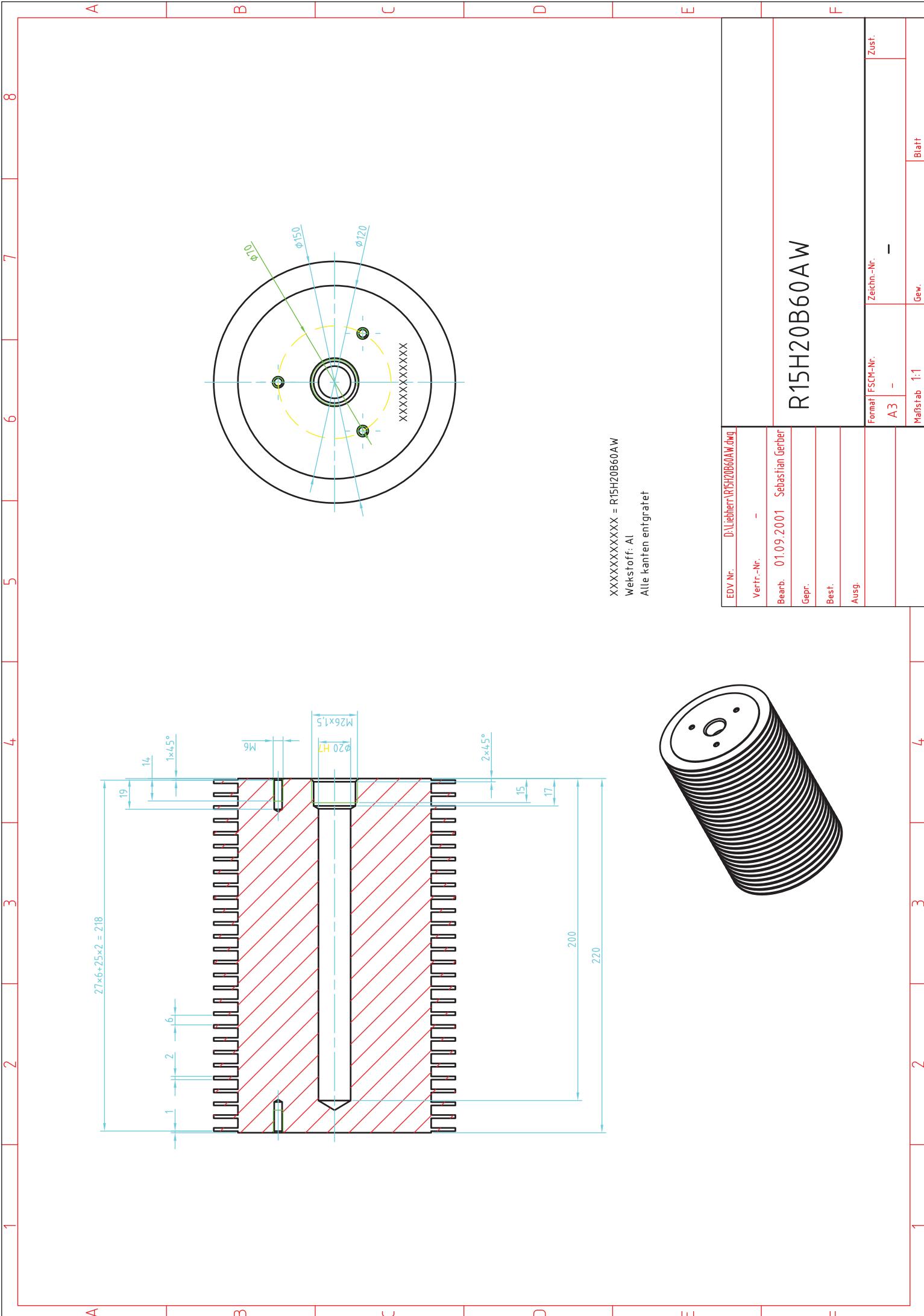


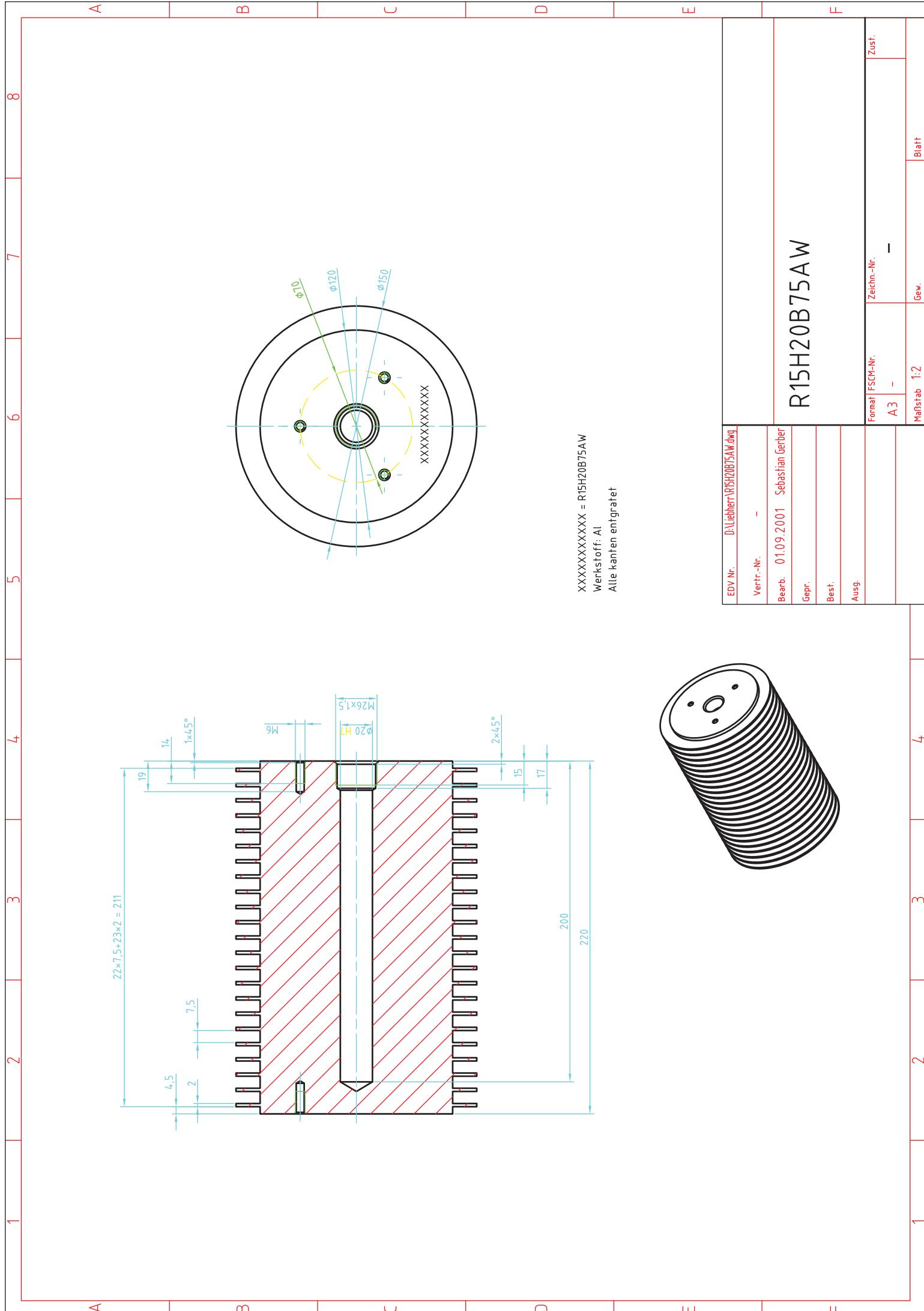


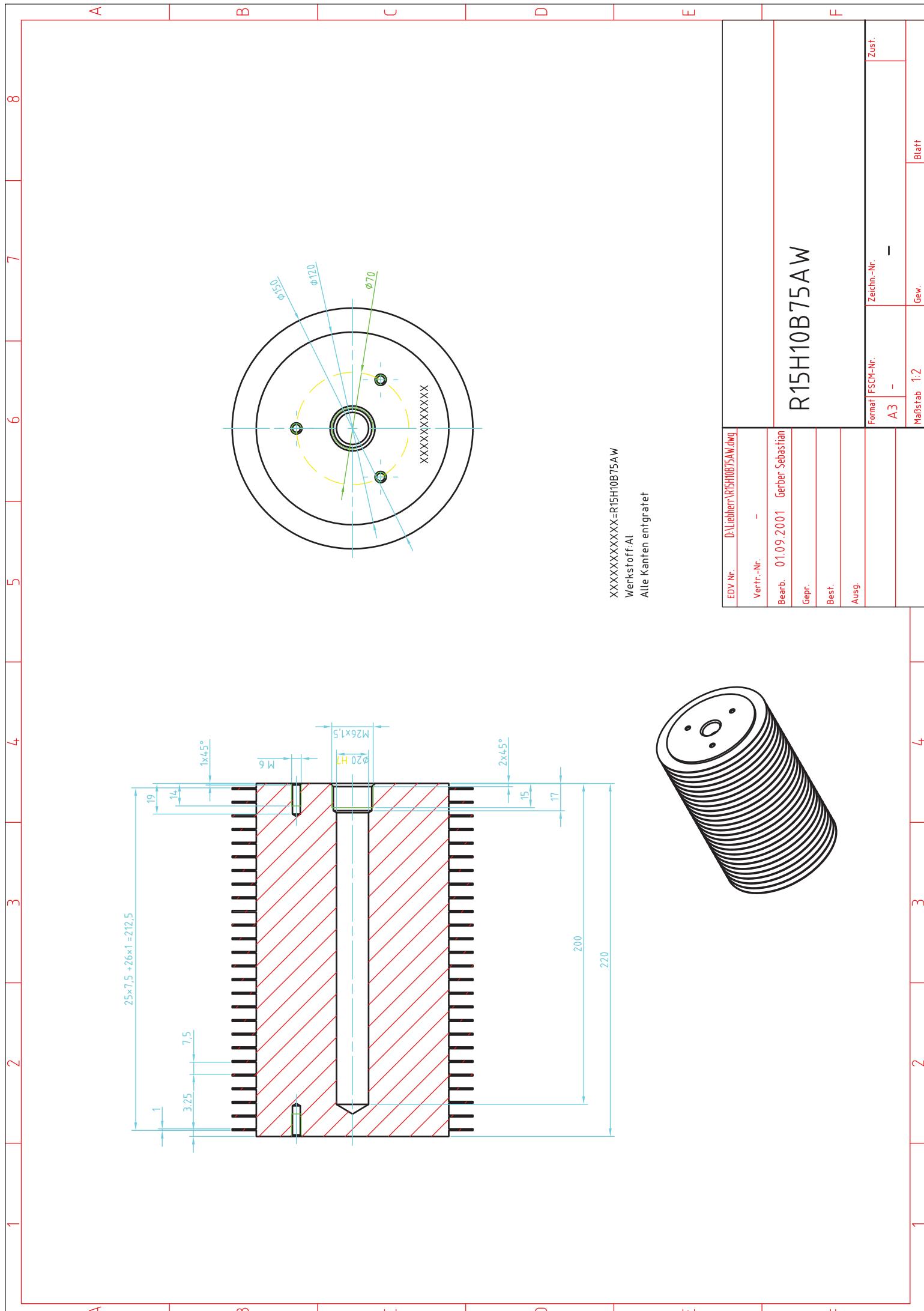
XXXXXXXXXX = R15H20B45AW
Alle Kanten entgittert
Werkstoff: Al

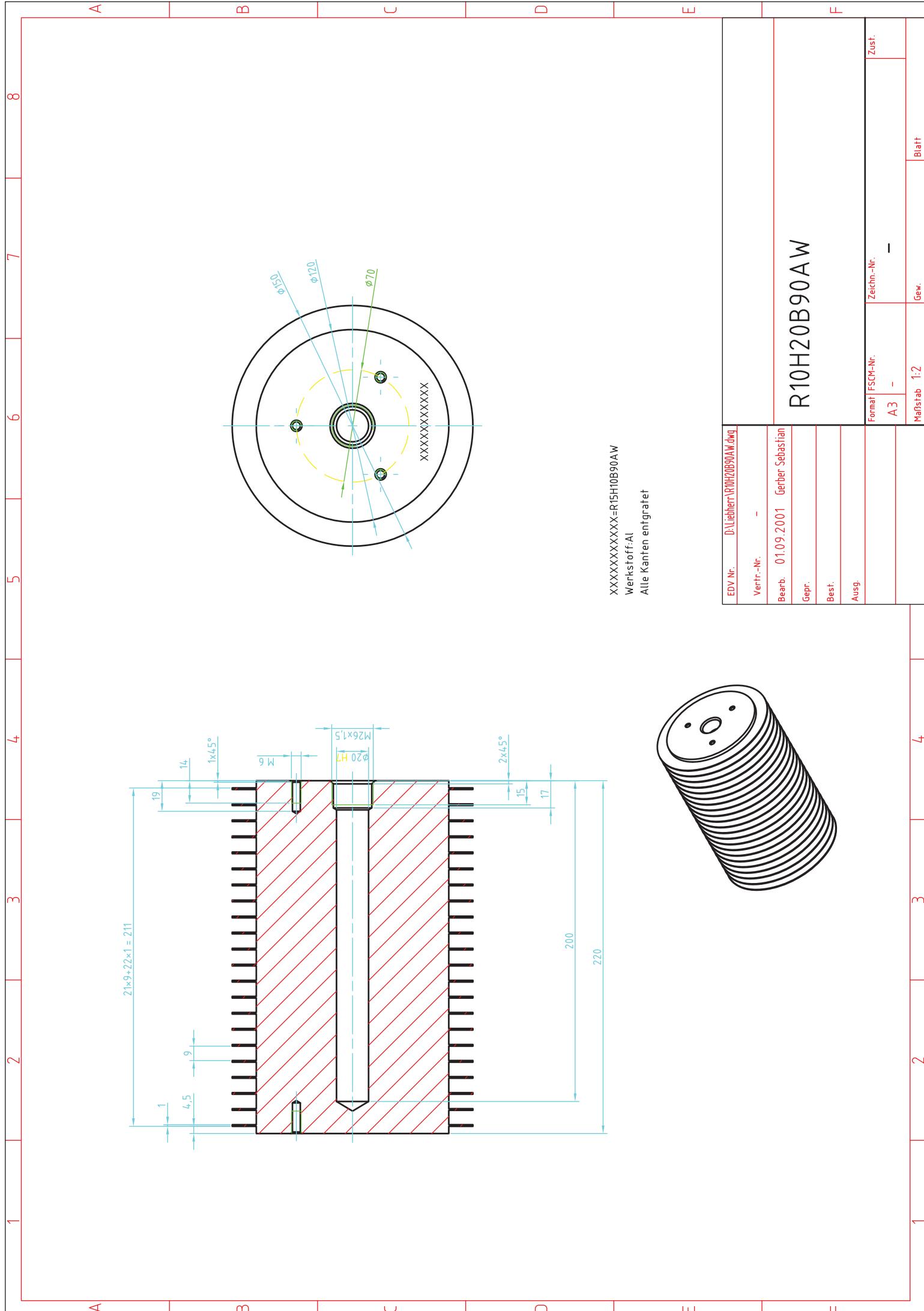
EDV-Nr.	D:\Liebherr\RS\1020\B05\TW\dwg
Verfr.-Nr.	-
Bearb.	01.09.2001
Gepr.	Sebastian Gerber
Best.	
Ausg.	

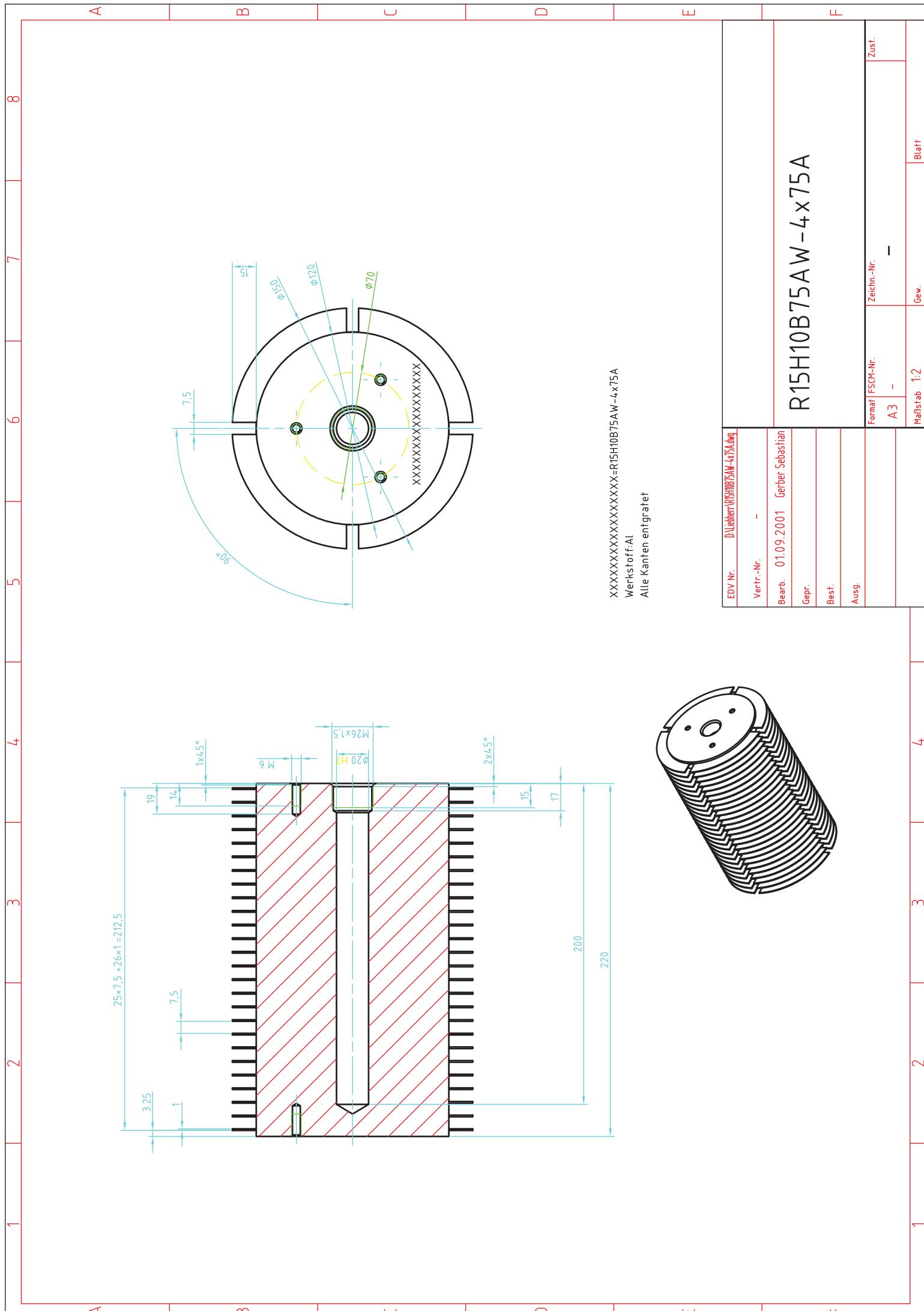
R15H20B45AW











3 Berechnungsergebnisse

3.1 Bemerkungen

Die ersten Berechnungen bezogen sich auf den glatten Körper, d. h. den unberippten Körper, in der Folge auf die verschiedenen Rippenkörper mit unterschiedlicher Geometrie, wobei die Hauptabmessungen immer beibehalten wurden. Die Berechnung erfolgte für die Strömungsgeschwindigkeiten 0, 0.5, 1, 2 und 3m/s im Berechnungsprogramm MathCAD 2000.

Die Ergebnisse hängen, insbesondere bei hohen Temperaturen, stark vom Emissionskoeffizienten des Aluminiums ab, welchen wir nicht genau bestimmen konnten. Wir haben den Koeffizienten daher nach Tabelle mit $\varepsilon=0,04$ für den weißen, polierten Aluminiumkörper bestimmt und in den Berechnungen verwendet. Wir vermuten allerdings, dass der Emissionskoeffizient bei unseren Versuchen höher war, was besonders bei den niederen Strömungsgeschwindigkeiten, geringere Temperaturen zur Folge hatte.

Den glatten Körper beheizten wir im Gegensatz zu den Rippenkörpern mit einer Leistung von 250W. Dies erfolgte aufgrund zuvor angestellten überschlägigen Berechnungen denenzufolge die erreichten Körpertemperaturen bei 500W die zulässigen Temperaturen des Heizstabes überstiegen hätten. Zudem wäre die Belastung für die Thermoelemente ebenso im Grenzbereich gelegen.

Die Rippenkörper haben wir mit 500W beaufschlagt, was auch der Verlustleistung im Anwendungsfall im Flugzeug entspricht. Der Zusammenhang zwischen Leistung und Temperatur ist für die Wärmeabfuhr durch Konvektion linear. Bei höheren Temperaturen spielt die Wärmestrahlung eine zunehmende Rolle, da sie zur vierten Potenz mit der Temperatur zunimmt.

Die Berechnungen erfolgten nur für Queranströmung, das ist in unserem Fall der 0° Winkel. Für Anströmungen unter anderen Winkeln lagen uns keine Berechnungsgrundlagen vor.

3.2 Wertetabelle

250W

Strömungs- geschw.	glattW
m/s	°C
0	273,9
0,5	299,0
1	184,0
2	119,7
3	91,9

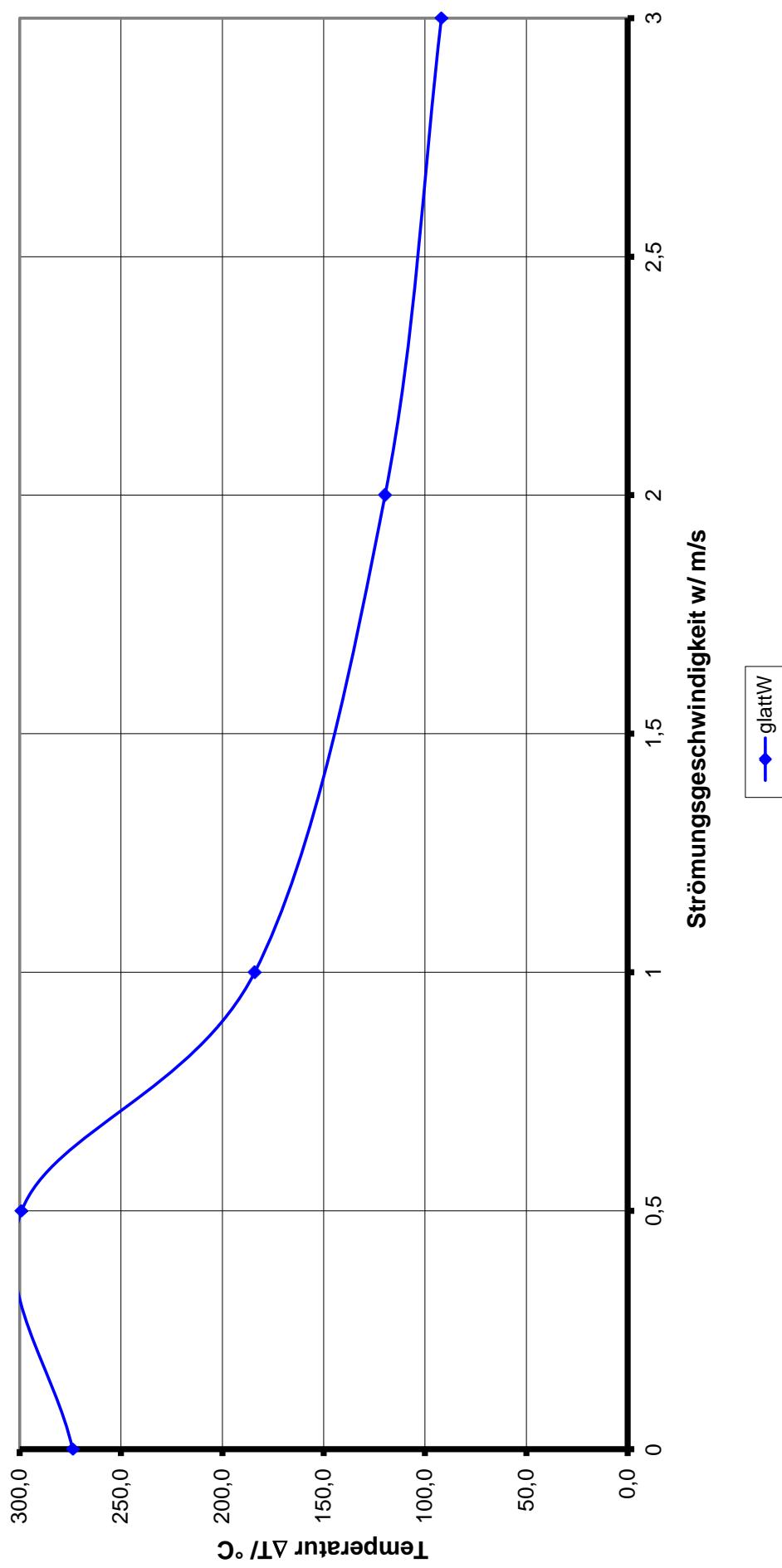
500W

Strömungs- geschw.	R15H20B45AW	R15H20B60AW	R15H20B75AW	R15H10B75AW	R15H10B90AW
m/s	°C	°C	°C	°C	°C
0	248,8	197,9	195,9	180,6	190,5
0,5	190,6	170,0	179,7	160,3	177,8
1	113,1	104,3	110,6	99,8	109,9
2	66,3	64,8	70,1	63,4	70,3
3	48,1	48,8	53,2	48,3	53,7

3.3 Diagramme

(auf den nächsten beiden Seiten)

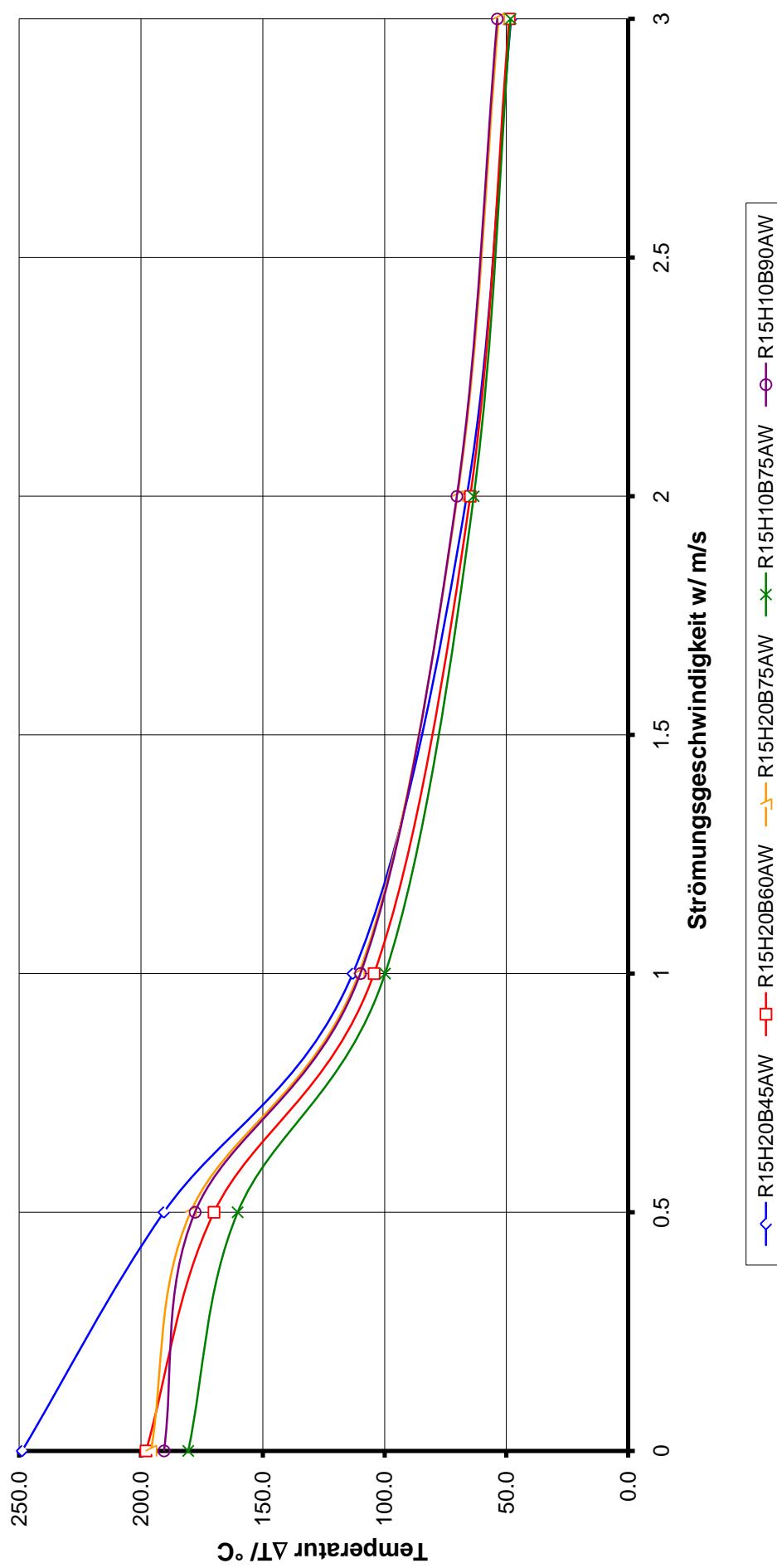
Rechenergebnisse für GlattW Anströmung 0°



Abschnitt D

RechenergebnisseGlattW-Diagramm

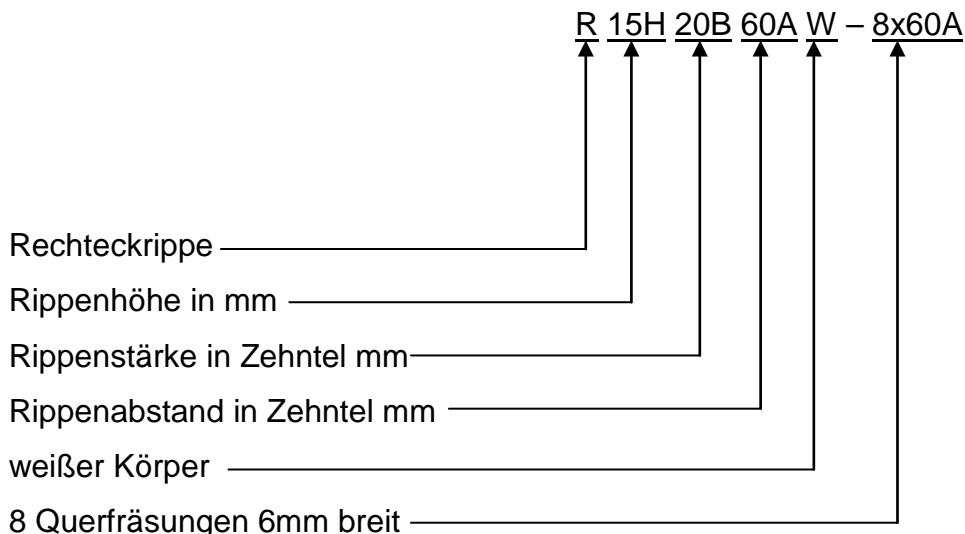
Rechenergebnisse mit Korrekturfunktion für R15H20B45AW, R15H20B60AW, R15H20B75AW, R15H10B75AW, R15H10B90AW Ansströmung 0°



4 Messergebnisse

4.1 Prüfkörperbezeichnung

Bezeichnungsbeispiel:

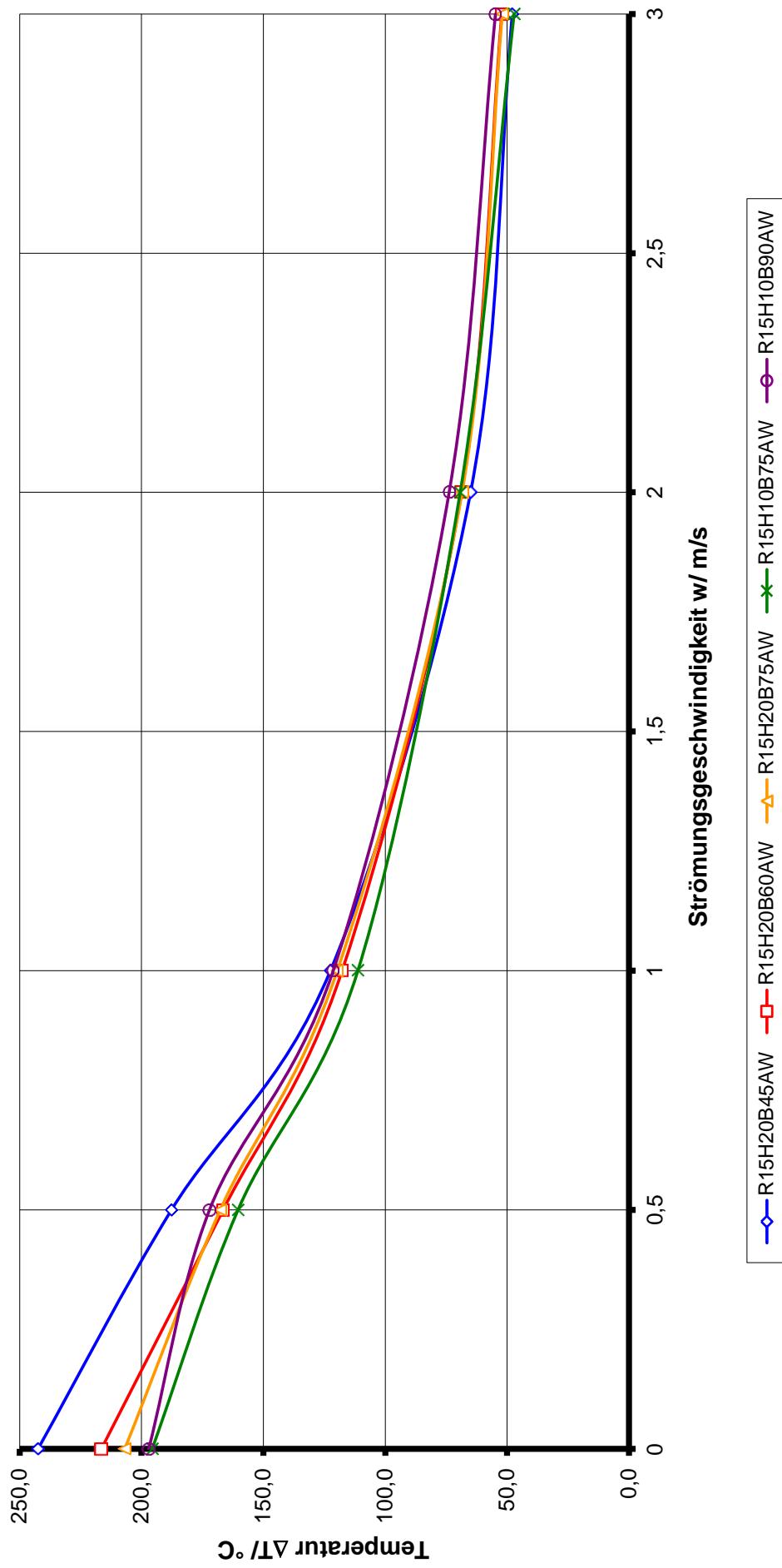


4.2 Prüfprotokoll

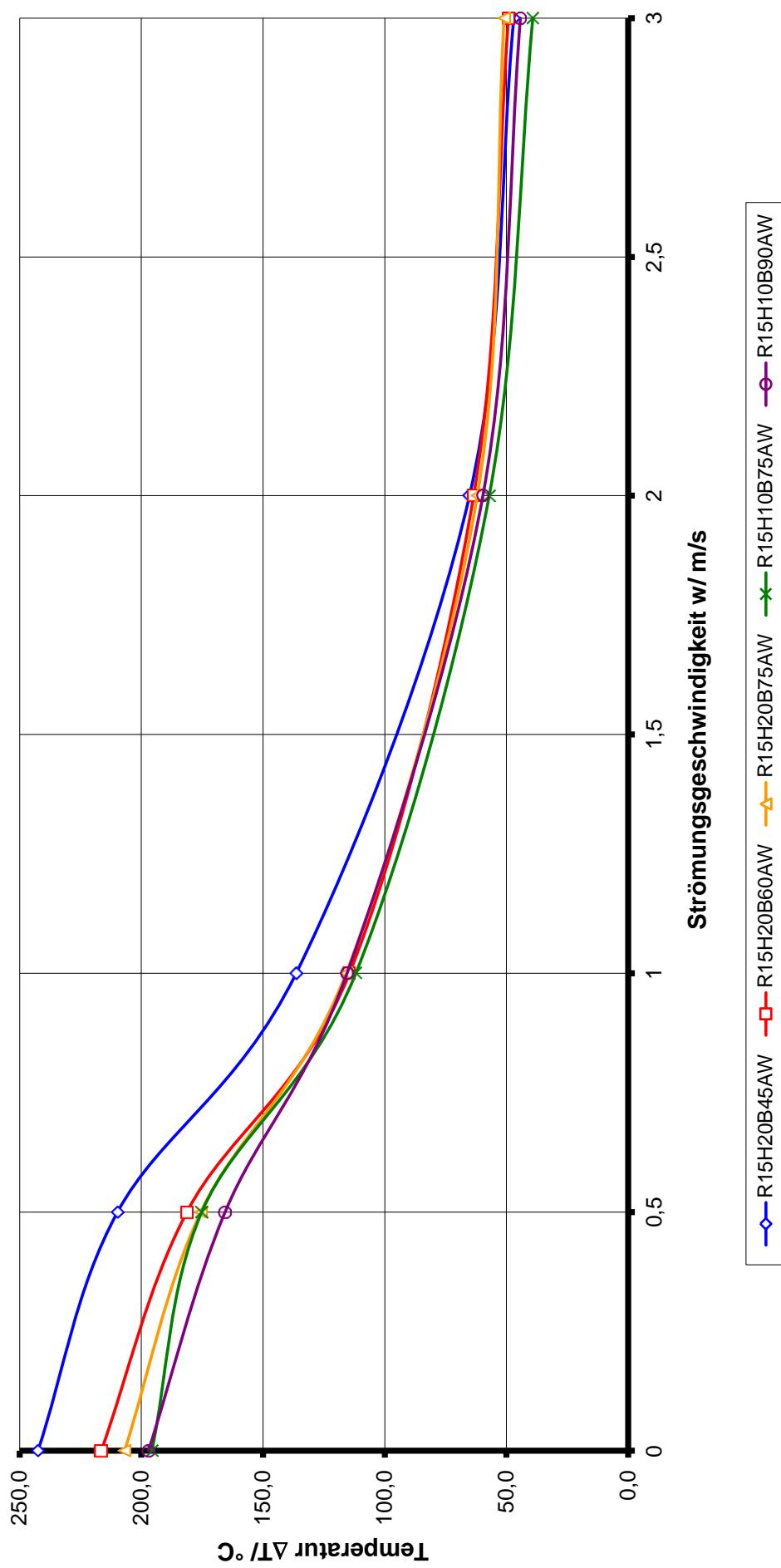
(siehe Blatt 1 bis 7)

Zusammenfassung der Messergebnisse

Messergebnisse für R15H20B45AW, R15H20B60AW, R15H20B75AW, R15H10B75AW, R15H10B90AW Anströmung 0°



Messergebnisse für R15H20B45AW, R15H20B60AW, R15H20B75AW, R15H10B75AW, R15H10B90AW Anströmung 45°



4.3 Datenblätter der geprüften Körper

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse unserer Messungen zu finden. Die ersten 4 Körper haben wir mit dem 10 Kanalmessgerät mit integriertem Plotter durchgeführt. Aus diesem Grund sind zuerst immer die Datenblätter mit den aufgeklebten Ausdrucken zu finden und im Anschluss die Auswertung als Diagramm. Die Messstelle 2 haben wir aufgrund einer vom Gerät verursachten Abweichung möglichst vermieden. In einem Fall ist auch die Messstelle 4 ausgefallen.

Alle darauf folgenden Messungen wurden mit dem digitalen Mehrkanalmessgerät erfasst. Die Daten wurden direkt ins Excel übernommen weshalb auch die Blätter mit den Ausdrucken des Messgerätes entfallen. Am Ende dieses Abschnitts ist eine Zusammenfassung aller Rippenkörper zu finden.

Grundsätzlich haben wir festgestellt, dass eine Analyse der Werte abhängig von den jeweiligen Messstellen und der Anströmung keinen Sinn macht. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die Heizpatrone im vorderen Bereich weniger stark heizt als im Anschlussbereich. Im vorderen Bereich ist ja auch eine Wandstärke von etwa 20mm inklusive Freiraum vorhanden.

Aus diesem Grund weicht die Messstelle 5, die an der dem Anschluss gegenüberliegenden Seitenfläche angebrachten wurde, auch etwas von den übrigen ab. Sie liefert in der Regel geringere Werte.

Mit den 5 Messstellen am Körper können wir jedenfalls einen guten Mittelwert der Außentemperatur des Körpers ermitteln.

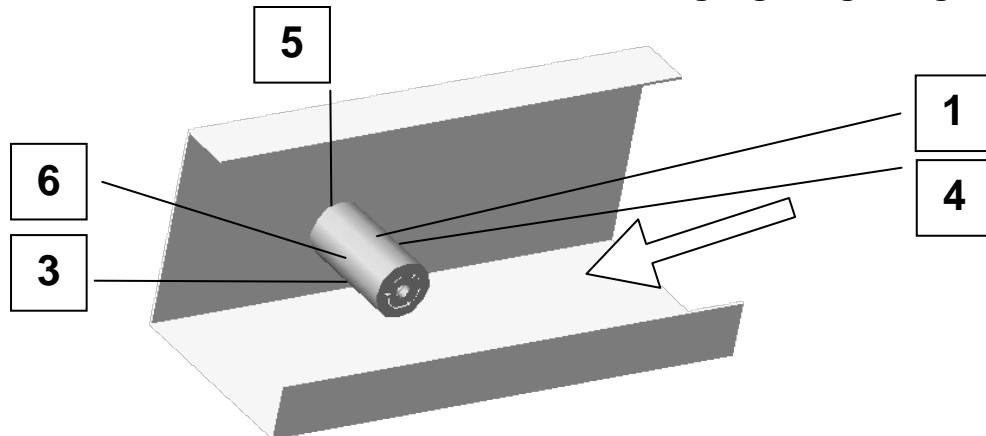
Mit einer Sonde auf Thermoelementbasis haben wir sporadisch auch Messungen an der Rippenspitze vorgenommen. Diese bestätigten unsere Berechnungsergebnisse wonach der Temperaturverlauf über die Rippenhöhe zu vernachlässigen ist.

GlattW

Leistung = 250W

Anströmwinkel = 0°

Befestigung: aufgehängt



0 m/s

41	255,0	GRDC
42	17,3	GRDC
43	256,0	GRDC
44	256,3	GRDC
45	251,4	GRDC
46	247,3	GRDC

17 °C

20.03.2001 13.00

0.5 m/s

41	218,5	GRDC
42	17,2	GRDC
43	211,0	GRDC
44	228,7	GRDC
45	218,2	GRDC
46	218,0	GRDC

18 °C

20.03.2001 10.00

1 m/s

41	+	169,5	GRDC
42	+	17,3	GRDC
43	+	169,9	GRDC
44	+	172,8	GRDC
45	+	164,3	GRDC
46	+	165,8	GRDC

18 °C

17.3.2001 20.00

2 m/s

41	+	128,8	GRDC
42	+	17,3	GRDC
43	+	128,7	GRDC
44	+	131,7	GRDC
45	+	124,7	GRDC
46	-	125,7	GRDC

18 °C

17.3.2001 18.00

3 m/s

41	+	99,1	GRDC
42	+	17,6	GRDC
43	+	98,4	GRDC
44	+	101,9	GRDC
45	+	94,5	GRDC
46	+	95,3	GRDC

18 °C

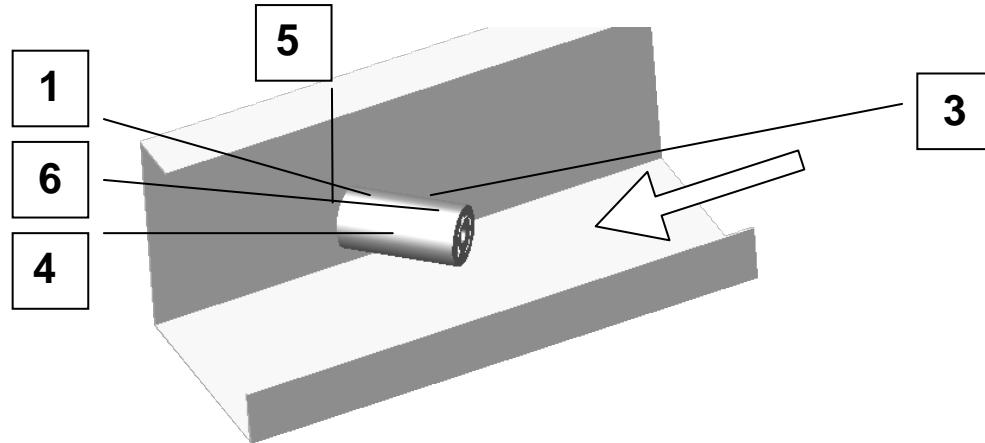
17.3.2001 16.00

GlattW

Leistung = 250W

Anströmwinkel = 45°

Befestigung: aufgehängt



0.5 m/s

19 °C

27.3.2001 12.30

41	+	233.3	GRD	C
42	+	17.4	GRD	C
43	+	223.7	GRD	C
44	+	232.2	GRD	C
45	+	233.4	GRD	C
46	+	225.0	GRD	C

1 m/s

19 °C

27.3.2001 8.00

41	+	191.2	GRD	C
42	+	17.3	GRD	C
43	+	181.3	GRD	C
44	+	189.2	GRD	C
45	+	189.9	GRD	C
46	+	183.4	GRD	C

2 m/s

18 °C

26.3.2001 18.00

41	+	125.7	GRD	C
42	+	17.5	GRD	C
43	+	121.6	GRD	C
44	+	123.0	GRD	C
45	+	126.2	GRD	C
46	+	118.6	GRD	C

3 m/s

18 °C

26.3.2001 16.00

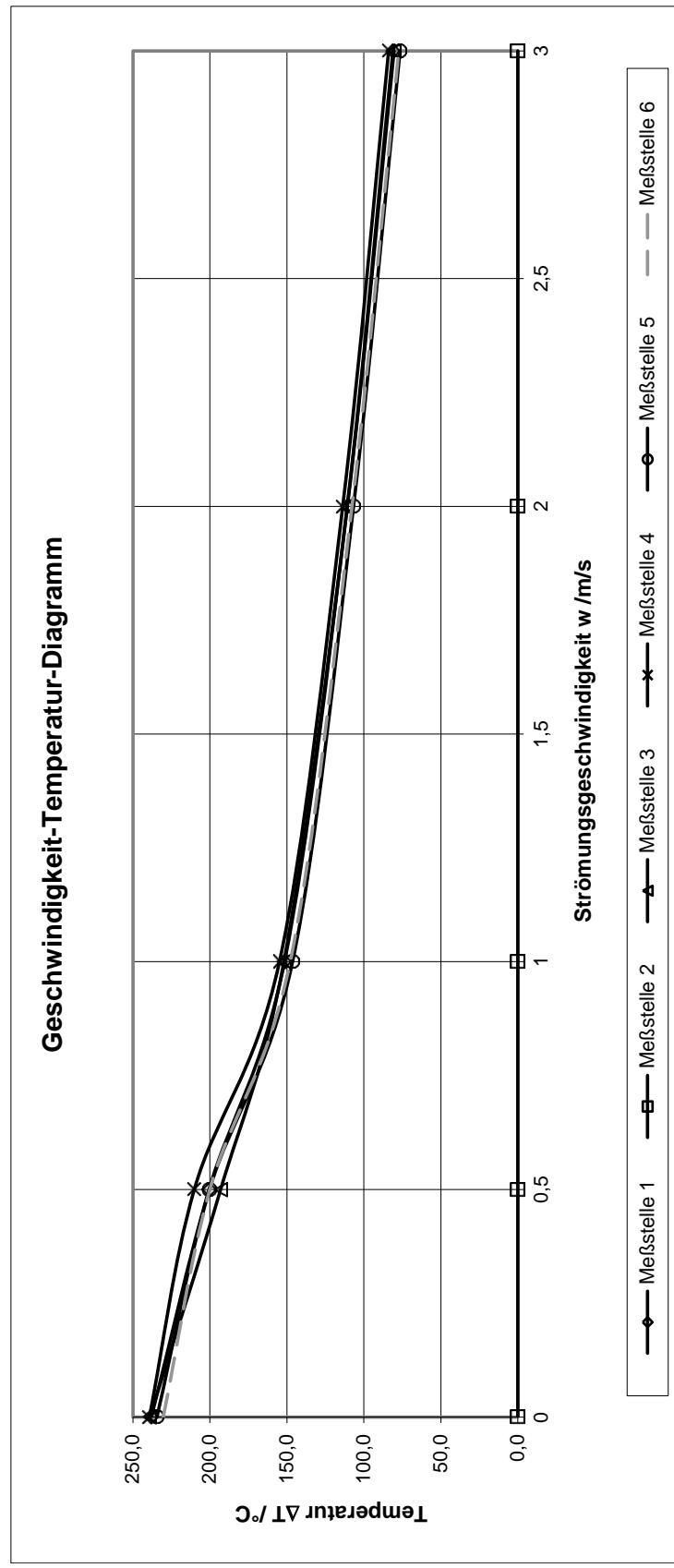
41	+	110.9	GRD	C
42	+	17.6	GRD	C
43	+	106.3	GRD	C
44	+	107.0	GRD	C
45	+	110.5	GRD	C
46	+	107.2	GRD	C

Prüfkörper GlattW

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT_{mittel} °C	W
0	17,0	255,0	238,0	17,0	0,0	256,0	239,0	256,3	239,3	251,4	234,4	247,3	230,3	236,2	250
0,5	18,0	218,5	200,5	18,0	0,0	211,0	193,0	228,1	210,1	218,2	200,2	218,0	200,0	200,8	250
1	18,0	169,5	151,5	18,0	0,0	169,9	151,9	172,8	154,8	164,3	146,3	165,8	147,8	150,5	250
2	18,0	128,8	110,8	18,0	0,0	128,7	110,7	131,7	113,7	124,7	106,7	125,7	107,7	109,9	250
3	18,0	99,1	81,1	18,0	0,0	98,4	80,4	101,9	83,9	94,5	76,5	95,3	77,3	79,8	250

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm

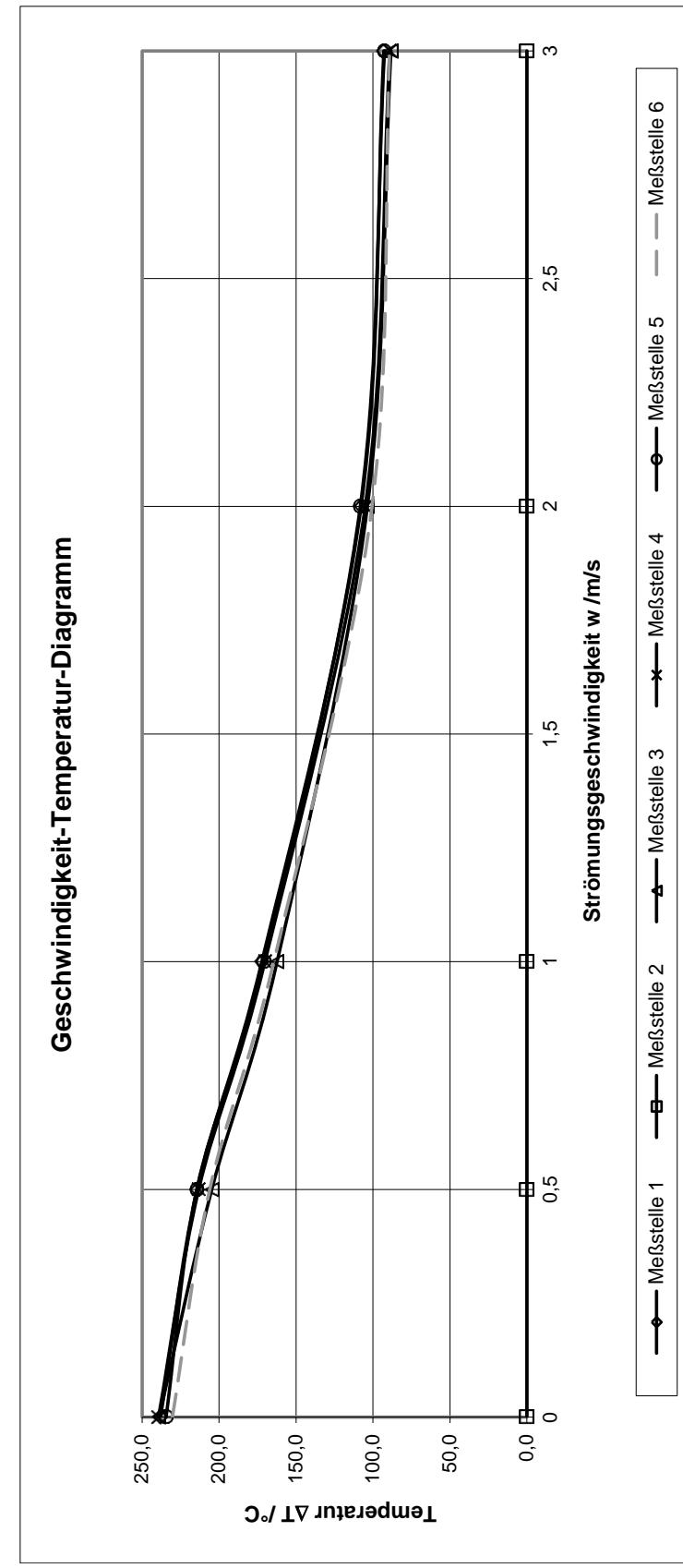


Abschnitt D

Prüfkörper GlattW

45° Anströmung

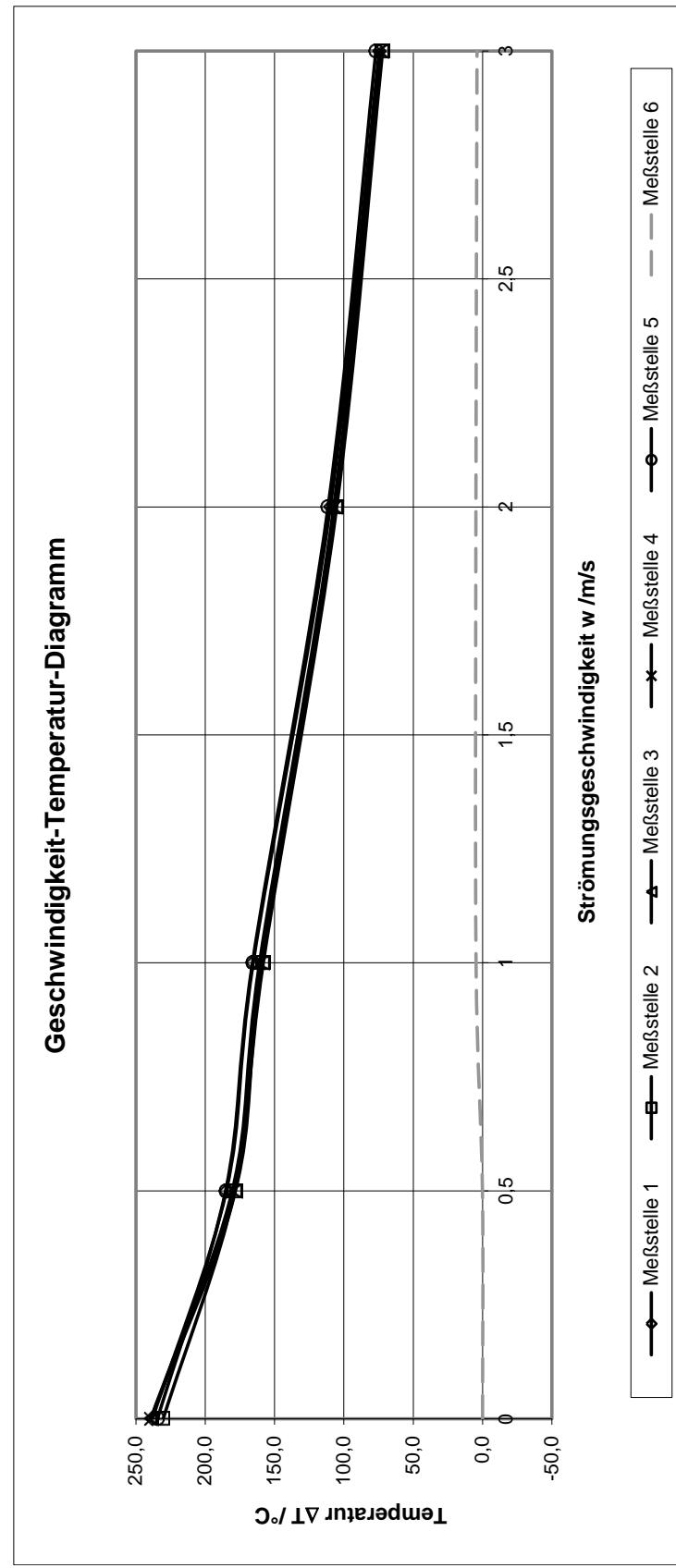
Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT_{mittel} °C	W
0	17,0	255,0	238,0	17,0	0,0	256,0	239,0	256,3	239,3	251,4	234,4	247,3	230,3	236,2	250
0,5	19,0	233,3	214,3	19,0	0,0	223,7	204,7	232,2	213,2	233,4	214,4	225,0	206,0	210,5	250
1	19,0	191,2	172,2	19,0	0,0	181,3	162,3	189,2	170,2	189,9	170,9	183,4	164,4	168,0	250
2	18,0	125,7	107,7	18,0	0,0	121,6	103,6	123,0	105,0	126,2	108,2	118,6	100,6	105,0	250
3	18,0	110,9	92,9	18,0	0,0	106,3	88,3	107,0	89,0	110,5	92,5	107,2	89,2	90,4	250



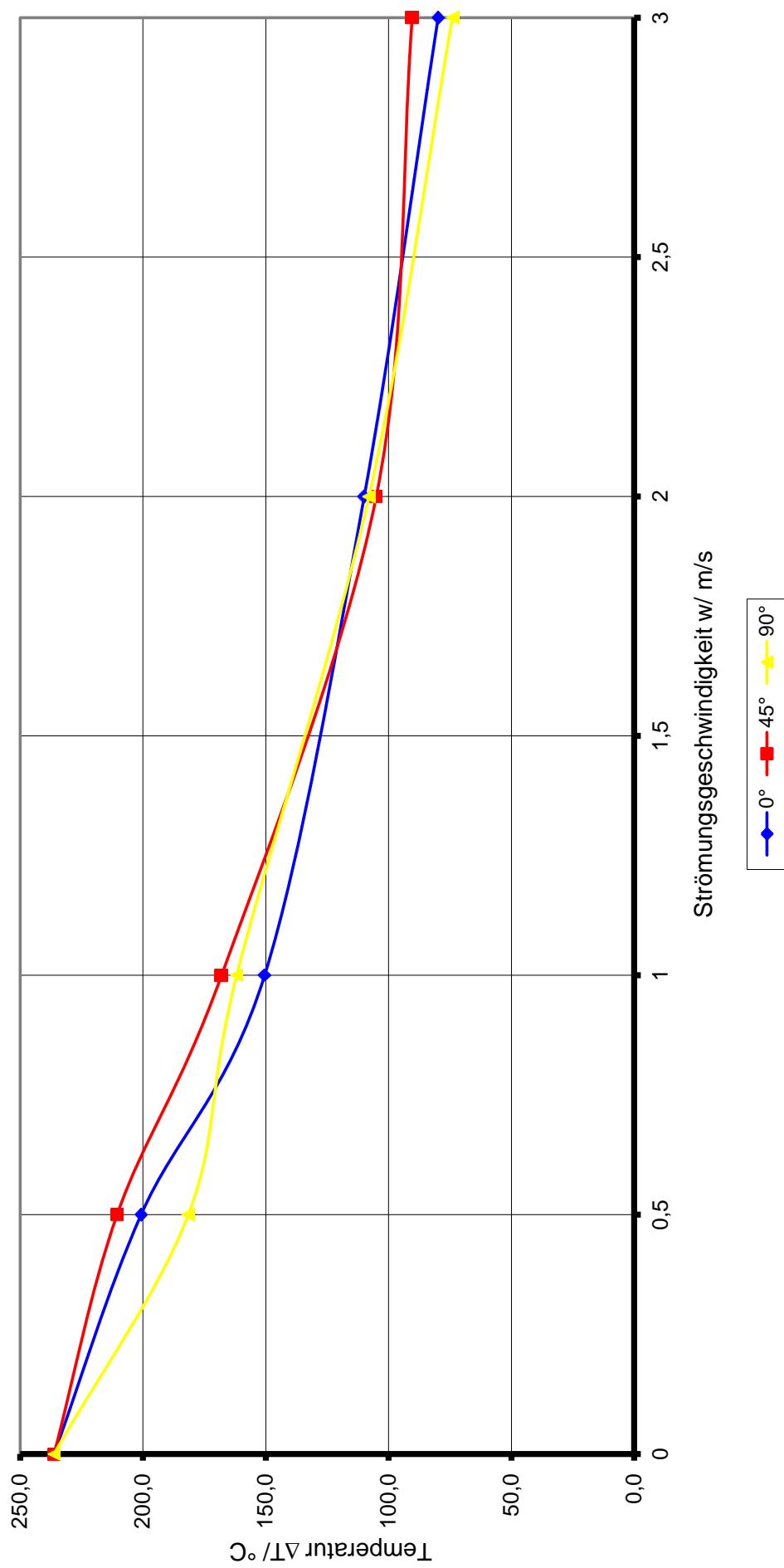
Prüfkörper GlattW

90° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT_{mittel} °C	W
0	17,0	255,0	238,0	247,3	230,3	256,0	239,0	256,3	239,3	251,4	234,4	17,0	0,0	236,2	250
0,5	19,9	204,7	184,8	198,6	178,7	198,1	178,2	200,4	180,5	205,2	185,3	20,0	0,1	181,5	250
1	19,9	185,3	165,4	178,0	158,1	178,9	159,0	180,7	160,8	185,8	165,9	24,6	4,7	161,8	250
2	19,7	129,5	109,8	124,9	105,2	126,0	106,3	127,0	107,3	131,1	111,4	24,5	4,8	108,0	250
3	19,8	94,3	74,5	91,9	72,1	92,5	72,7	93,7	73,9	96,7	76,9	23,8	4,0	74,0	250



Gegenüberstellung des GlattW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

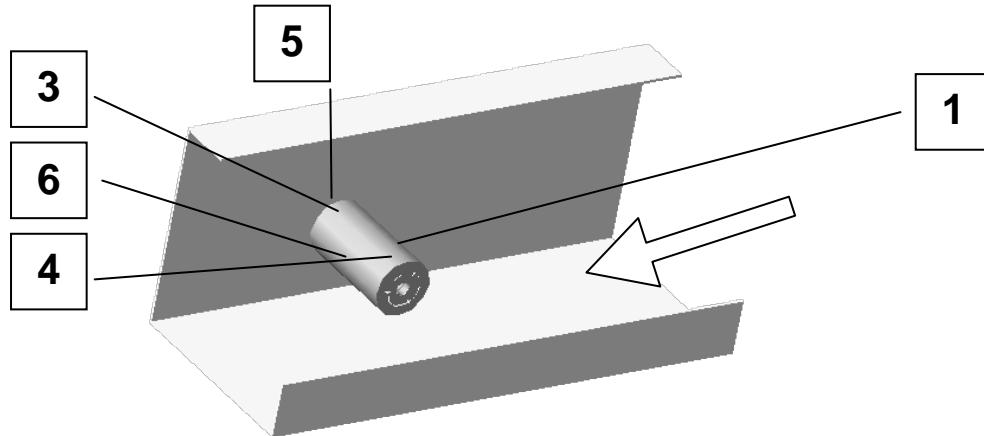


R15H20B45AW

Leistung = 500W

Anströmwinkel = 0°

Befestigung: aufgehängt



0 m/s

20 °C

26.03.2001 14.30

41	+	264.5	GRD	C
42	+	17.9	GRD	C
43	+	266.3	GRD	C
44	+	267.3	GRD	C
45	+	250.6	GRD	C
46	+	263.9	GRD	C

0.5 m/s

19 °C

29.03.2001 13.00

41	+	210.8	GRD	C
42	+	18.2	GRD	C
43	+	208.7	GRD	C
44	+	211.6	GRD	C
45	+	193.9	GRD	C
46	+	208.5	GRD	C

1 m/s

19 °C

29.3.2001 8.00

41	+	145.0	GRD	C
42	+	17.9	GRD	C
43	+	142.8	GRD	C
44	+	145.8	GRD	C
45	+	131.1	GRD	C
46	+	142.6	GRD	C

2 m/s

18 °C

28.3.2001 18.00

41	+	86.3	GRD	C
42	+	18.0	GRD	C
43	+	83.0	GRD	C
44	+	86.6	GRD	C
45	+	75.4	GRD	C
46	+	83.7	GRD	C

3 m/s

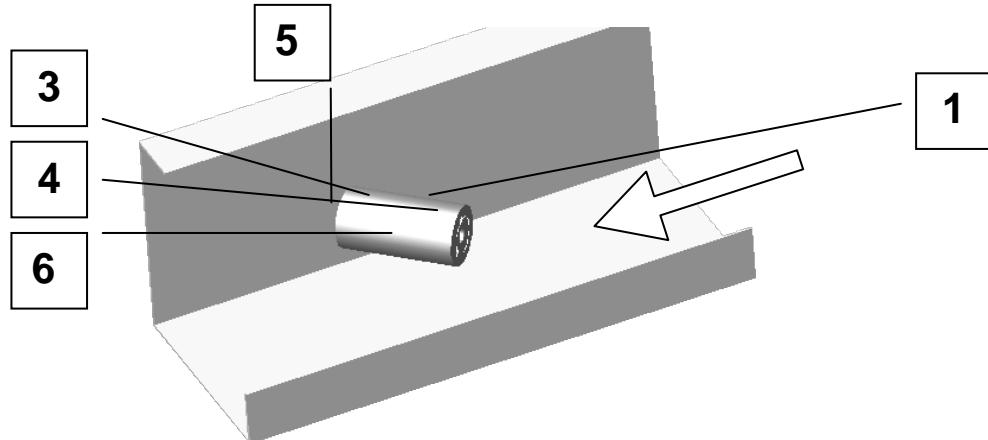
20 °C

28.3.2001 16.00

41	+	71.1	GRD	C
42	+	18.0	GRD	C
43	+	67.7	GRD	C
44	+	71.1	GRD	C
45	+	61.1	GRD	C
46	+	68.6	GRD	C

R15H20B45AW

Leistung = 500W Anströmwinkel = 45° Befestigung: aufgehängt



0.5 m/s

19 °C

26.3.2001 10.30

41	+	232.6	GRD	C
42	+	17.8	GRD	C
43	+	232.0	GRD	C
44	+	234.6	GRD	C
45	+	214.2	GRD	C
46	+	230.7	GRD	C

1 m/s

19 °C

24.3.2001 12.00

41	+	157.7	GRD	C
42	+	17.7	GRD	C
43	+	155.4	GRD	C
44	+	159.6	GRD	C
45	+	148.3	GRD	C
46	+	155.9	GRD	C

2 m/s

18 °C

24.3.2001 8.00

41	+	84.5	GRD	C
42	+	17.8	GRD	C
43	+	82.4	GRD	C
44	+	86.3	GRD	C
45	+	79.8	GRD	C
46	+	82.8	GRD	C

3 m/s

18 °C

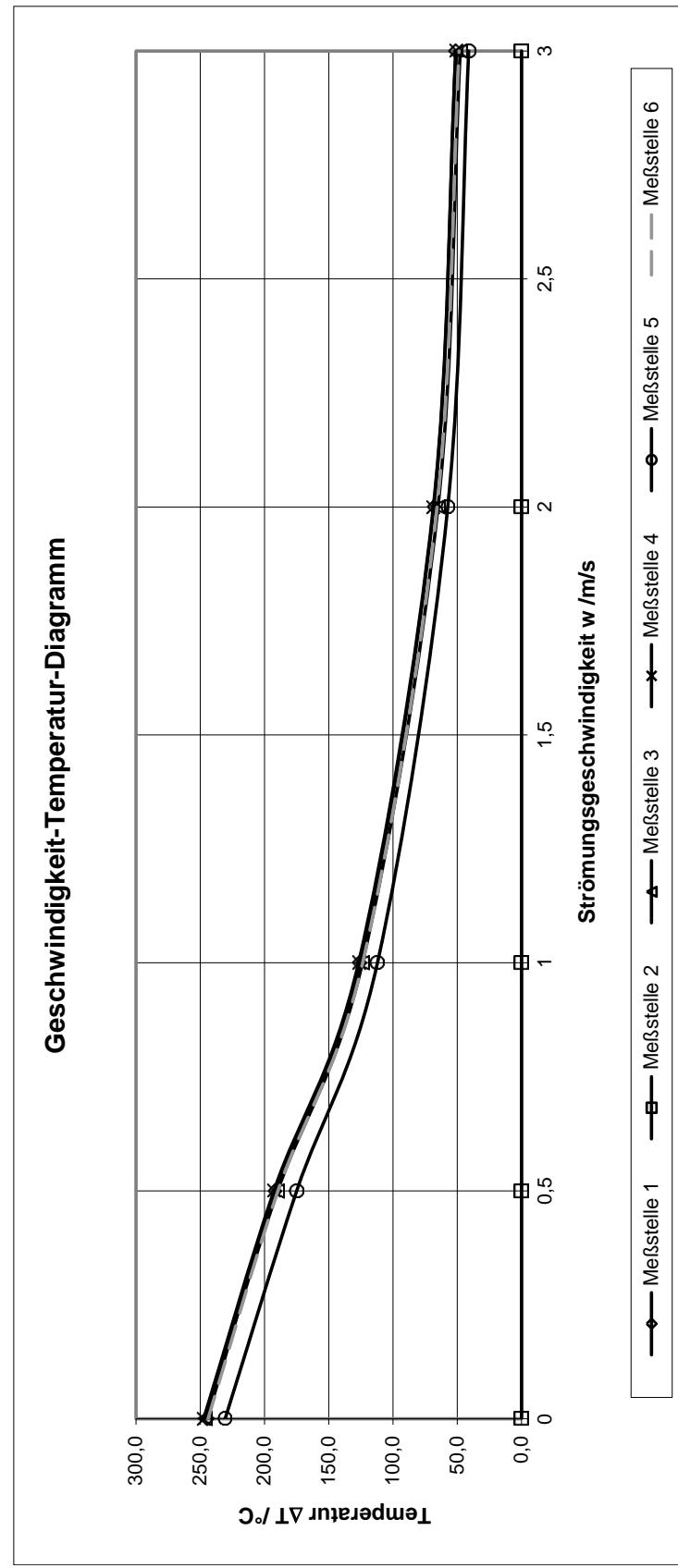
23.3.2001 18.00

41	+	66.6	GRD	C
42	+	17.7	GRD	C
43	+	64.2	GRD	C
44	+	67.7	GRD	C
45	+	62.0	GRD	C
46	+	64.6	GRD	C

Prüfkörper R15H20B45AW

0° Anströmung

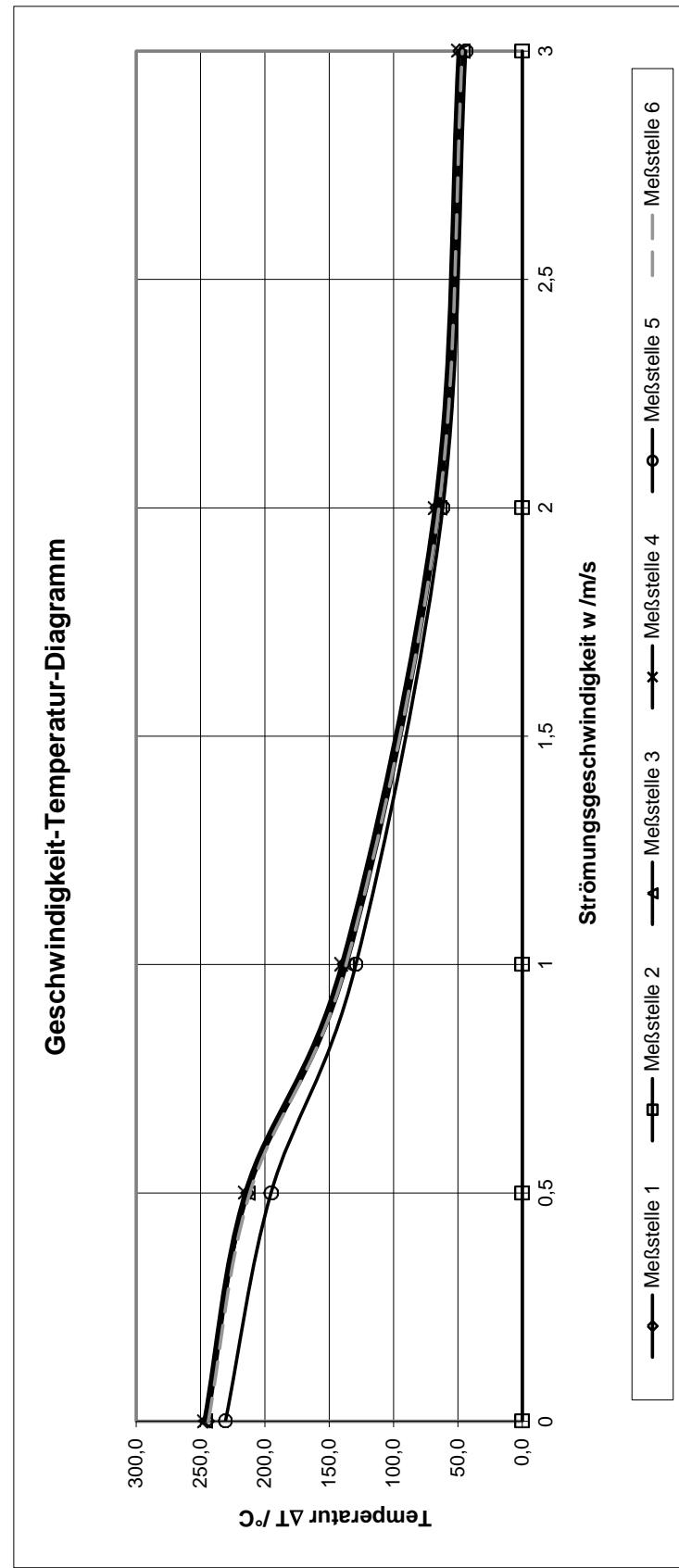
Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	20,0	264,5	244,5	20,0	0,0	266,3	246,3	267,3	247,3	250,6	230,6	263,9	243,9	242,5	500
0,5	19,0	210,8	191,8	19,0	0,0	208,7	189,7	211,6	192,6	193,9	174,9	208,5	189,5	187,7	500
1	19,0	145,0	126,0	19,0	0,0	142,8	123,8	145,8	126,8	131,1	112,1	142,6	123,6	122,5	500
2	18,0	86,3	68,3	18,0	0,0	83,0	65,0	86,6	75,4	57,4	41,1	68,6	48,6	65,0	500
3	20,0	71,1	51,1	20,0	0,0	67,7	47,7	71,1	51,1	61,1	41,1	68,6	48,6	47,9	500



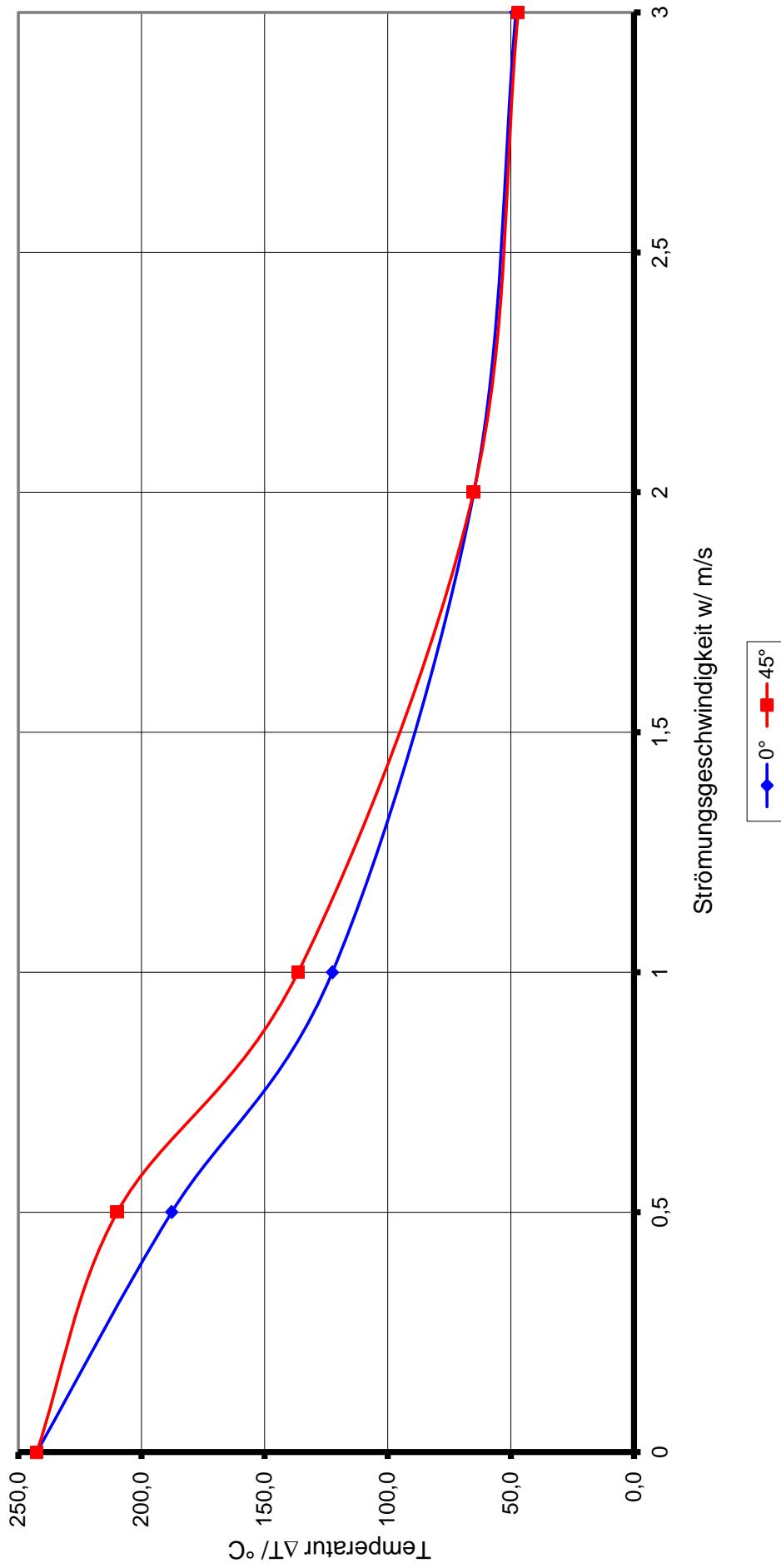
Prüfkörper R15H20B45AW

45° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	20,0	264,5	244,5	20,0	0,0	266,3	246,3	267,3	247,3	250,6	230,6	263,9	243,9	242,5	500
0,5	19,0	232,6	213,6	19,0	0,0	232,0	213,0	234,6	215,6	214,2	195,2	230,7	211,7	209,8	500
1	19,0	157,7	138,7	19,0	0,0	155,4	136,4	159,6	140,6	148,3	129,3	155,9	136,9	136,4	500
2	18,0	84,5	66,5	18,0	0,0	82,4	64,4	86,3	68,3	79,8	61,8	82,8	64,8	65,2	500
3	18,0	66,6	48,6	18,0	0,0	64,2	46,2	67,7	49,7	62,0	44,0	64,6	46,6	47,0	500



Gegenüberstellung des R15H20B45AW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

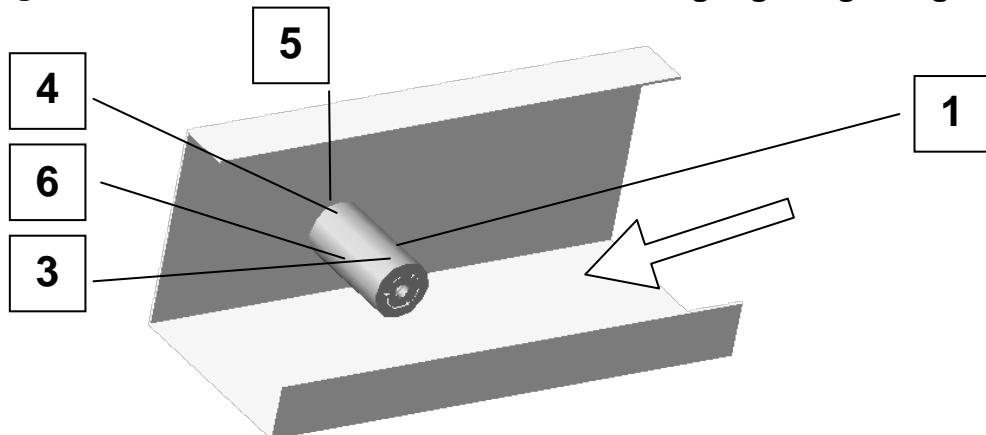


R15H20B60AW

Leistung = 500W

Anströmwinkel = 0°

Befestigung: aufgehängt



0 m/s

18 °C

17.03.2001 14.00

41	+	238.1	GRD	C
42	+	17.4	GRD	C
43	+	234.9	GRD	C
44	+	236.2	GRD	C
45	+	230.1	GRD	C
46	+	233.4	GRD	C

0.5 m/s

18 °C

17.03.2001 11.40

41	+	187.8	GRD	C
42	+	17.3	GRD	C
43	+	187.3	GRD	C
44	+	184.6	GRD	C
45	+	179.1	GRD	C
46	+	183.7	GRD	C

1 m/s

17 °C

17.3.2001 8.00

41	+	137.8	GRD	C
42	+	132.9	GRD	C
43	+	137.9	GRD	C
44	+	134.1	GRD	C
45	+	131.0	GRD	C

2 m/s

17 °C

16.3.2001 18.00

41	+	88.4	GRD	C
42	+	83.8	GRD	C
43	+	88.4	GRD	C
44	+	84.8	GRD	C
45	+	83.2	GRD	C

3 m/s

18 °C

16.3.2001 20.00

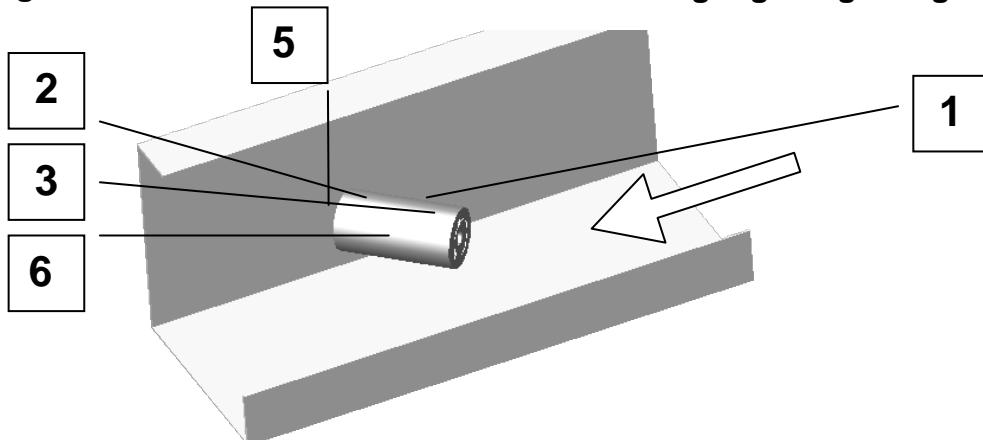
41	+	73.1	GRD	C
42	+	67.8	GRD	C
43	+	73.0	GRD	C
44	+	69.5	GRD	C
45	+	67.5	GRD	C

R15H20B60AW

Leistung = 500W

Anströmwinkel = 45°

Befestigung: aufgehängt



0.5 m/s

18 °C

21.3.2001 18.00

41	+	202.2	GRD	C
42	+	199.8	GRD	C
43	+	202.9	GRD	C
44	+	17.9	GRD	C
45	+	192.3	GRD	C
46	+	199.2	GRD	C

1 m/s

18 °C

21.3.2001 14.30

41	+	134.5	GRD	C
42	+	130.7	GRD	C
43	+	135.6	GRD	C
44	+	18.0	GRD	C
45	+	129.7	GRD	C
46	+	132.1	GRD	C

2 m/s

18 °C

21.3.2001 11.30

41	+	84.3	GRD	C
42	+	79.2	GRD	C
43	+	83.0	GRD	C
44	+	18.0	GRD	C
45	+	79.9	GRD	C
46	+	80.0	GRD	C

3 m/s

17 °C

21.3.2001 8.30

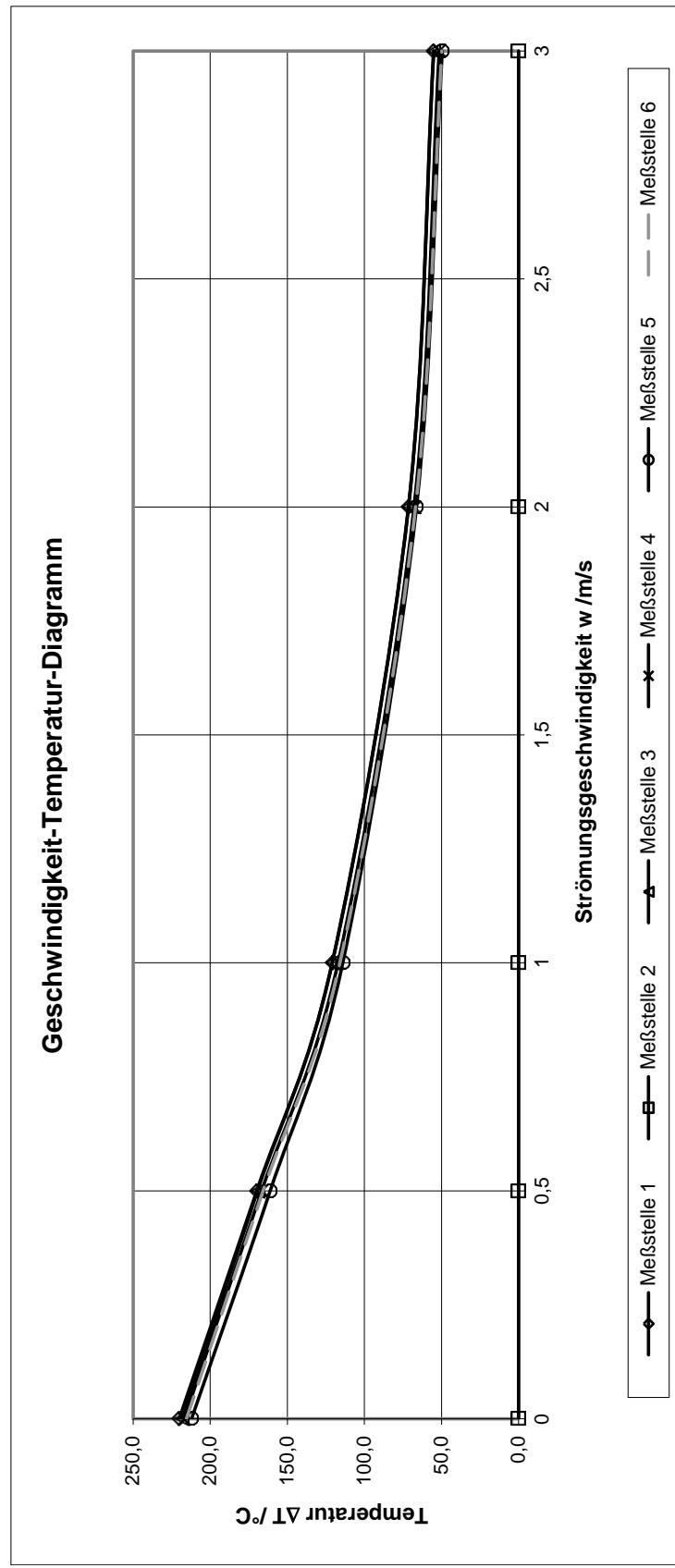
41	+	68.8	GRD	C
42	+	17.2	GRD	C
43	+	67.8	GRD	C
44	+	16.7	GRD	C
45	+	64.3	GRD	C
46	+	63.8	GRD	C

Prüfkörper R15H20B60AW

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	18,0	238,1	220,1	18,0	0,0	236,2	218,2	234,9	216,9	230,1	212,1	233,4	215,4	216,5	500
0,5	18,0	187,8	169,8	18,0	0,0	187,3	169,3	184,6	166,6	179,1	161,1	183,7	165,7	166,5	500
1	17,0	137,8	120,8	17,0	0,0	137,9	120,9	134,1	117,1	131,0	114,0	132,9	115,9	117,7	500
2	17,0	88,4	71,4	17,0	0,0	88,4	71,4	84,8	67,8	83,2	66,2	83,8	66,8	68,7	500
3	18,0	73,1	55,1	18,0	0,0	73,0	55,0	69,5	51,5	67,5	49,5	67,8	49,8	52,2	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



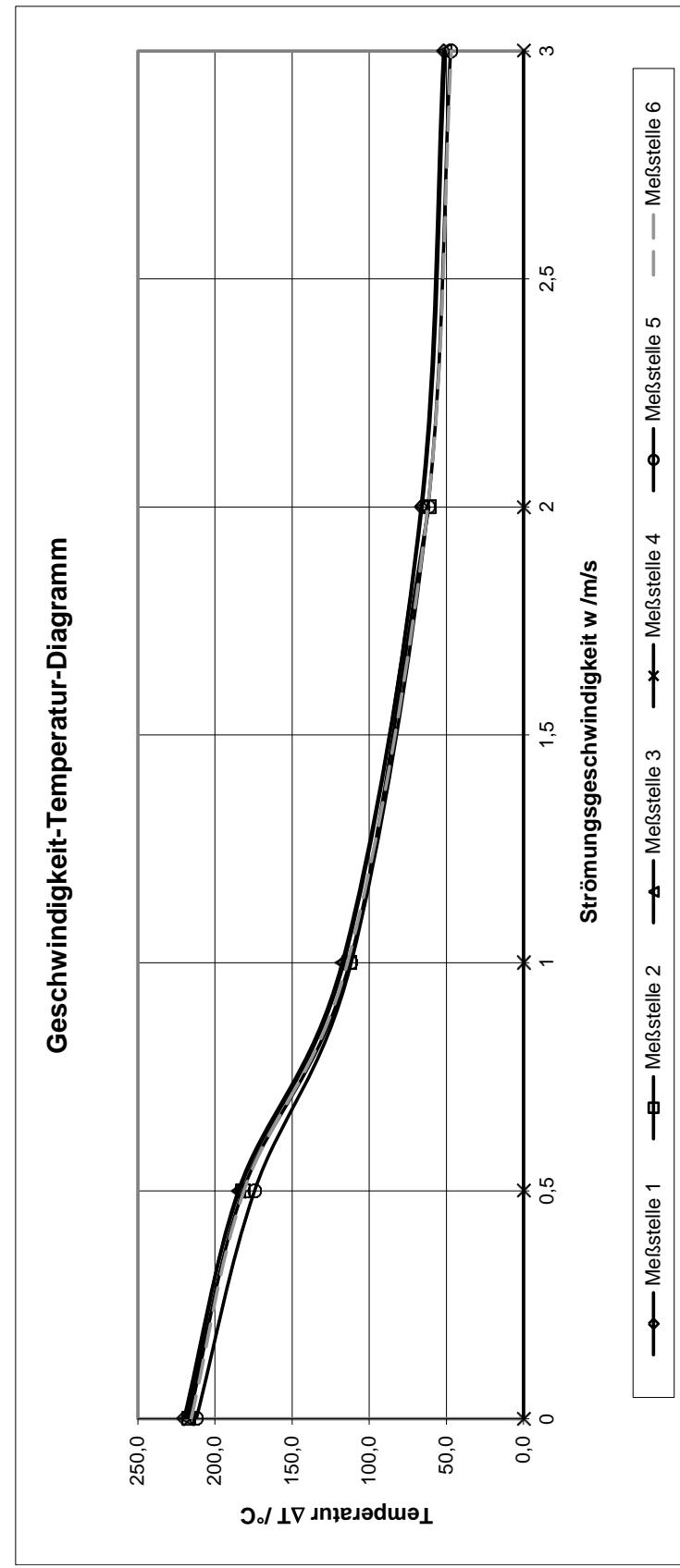
Abschnitt D

R15H20B60AW0°

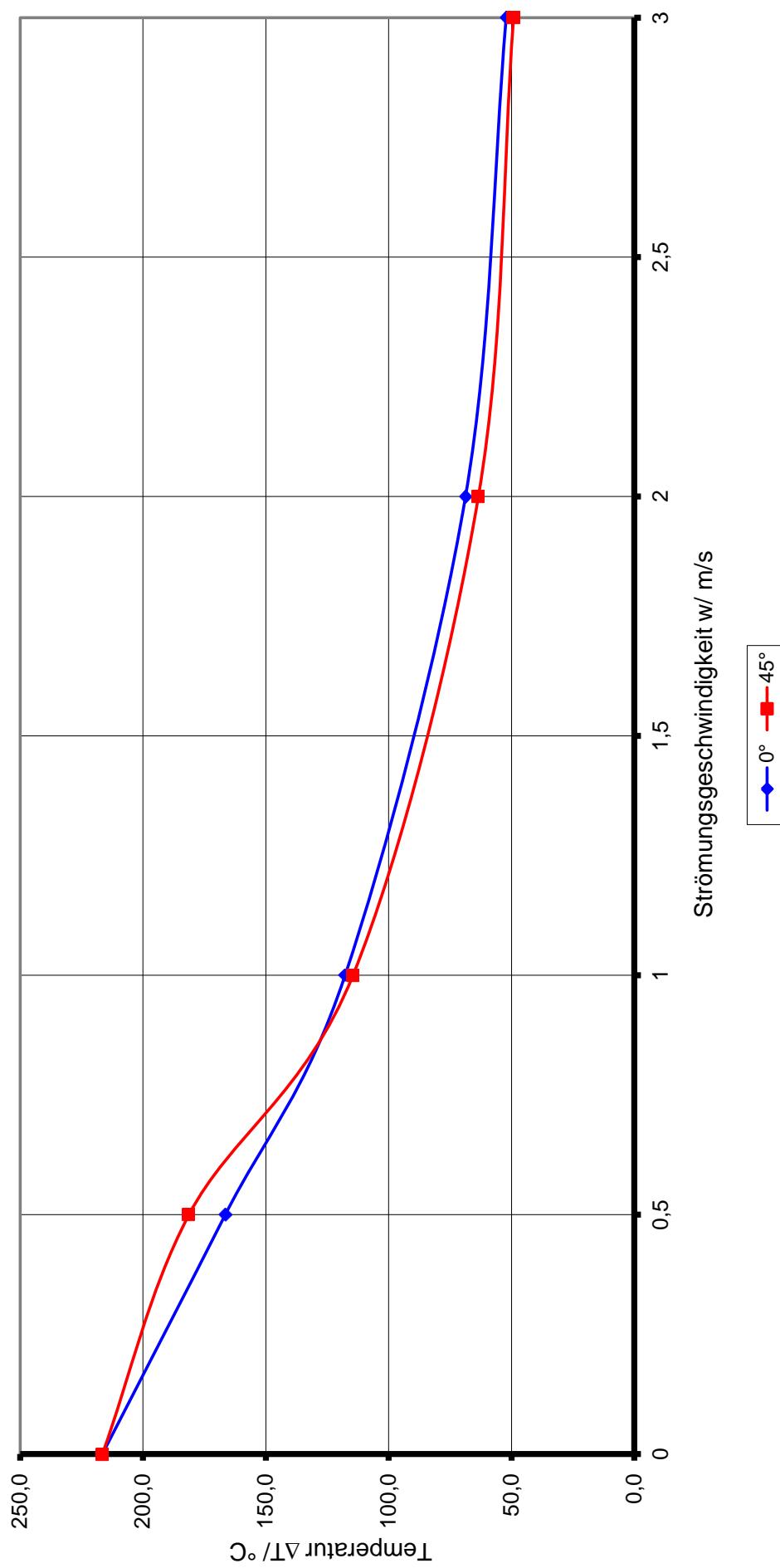
Prüfkörper R15H20B60AW

45° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	18,0	238,1	220,1	234,9	216,9	236,2	218,2	18,0	0,0	230,1	212,1	233,4	215,4	216,5	500
0,5	18,0	202,2	184,2	199,8	181,8	202,9	184,9	18,0	0,0	192,3	174,3	199,2	181,2	181,3	500
1	18,0	134,5	116,5	130,7	112,7	135,6	117,6	18,0	0,0	129,7	111,7	132,1	114,1	114,5	500
2	18,0	84,4	66,4	79,3	61,3	83,8	65,8	18,0	0,0	79,9	61,9	80,0	62,0	63,5	500
3	17,0	68,8	51,8	17,0	0,0	67,8	50,8	17,0	0,0	64,3	47,3	63,8	46,8	49,2	500



Gegenüberstellung des R15H20B60AW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

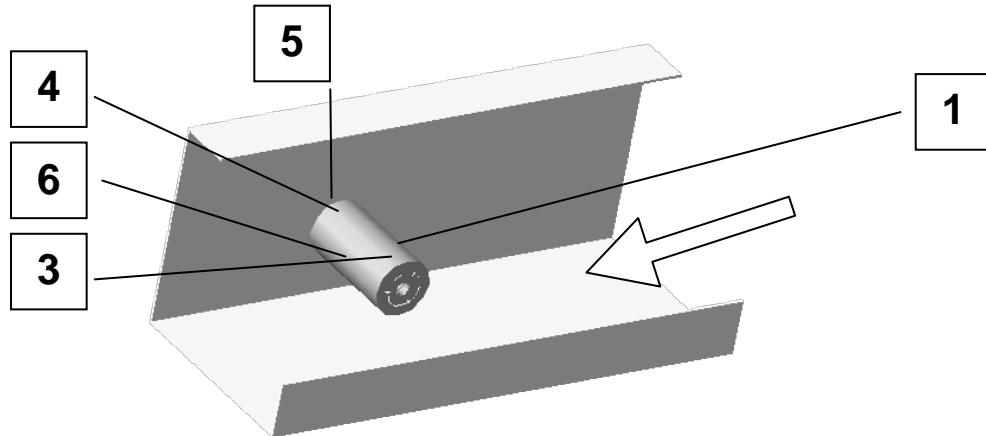


R15H20B75AW

Leistung = 500W

Anströmwinkel = 0°

Befestigung: aufgehängt



0 m/s

18 °C

24.03.2001 17.30

41	+	226.7	GRD	C
42	+	17.7	GRD	C
43	+	223.5	GRD	C
44	+	228.7	GRD	C
45	+	220.0	GRD	C
46	+	225.7	GRD	C

0.5 m/s

20 °C

20.03.2001 7.40

43	+	189.8	GRD	C
44	+	187.5	GRD	C
45	+	184.2	GRD	C
46	+	189.0	GRD	C

1 m/s

19 °C

29.3.2001 20.00

43	+	140.8	GRD	C
44	+	136.7	GRD	C
45	+	136.8	GRD	C
46	+	140.5	GRD	C

2 m/s

18 °C

29.3.2001 18.00

43	+	89.3	GRD	C
44	+	85.2	GRD	C
45	+	84.1	GRD	C
46	+	87.5	GRD	C

3 m/s

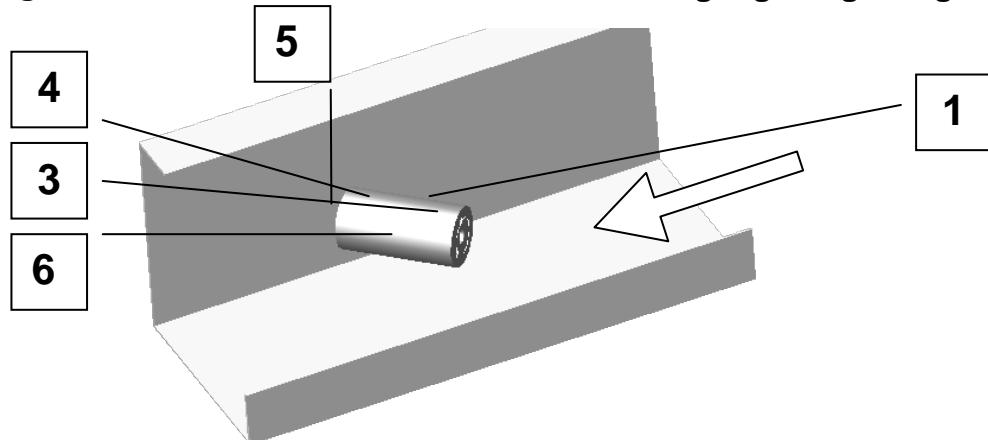
19 °C

29.3.2001 16.00

43	+	73.4	GRD	C
44	+	69.7	GRD	C
45	+	68.9	GRD	C
46	+	71.8	GRD	C

R15H20B75AW

Leistung = 500W Anströmwinkel = 45° Befestigung: aufgehängt



0.5 m/s

19 °C

23.3.2001 16.00

41	+	196.7	GRD	C
42	+	17.4	GRD	C
43	+	196.0	GRD	C
44	+	195.9	GRD	C
45	+	190.0	GRD	C
46	+	195.3	GRD	C

1 m/s

18 °C

22.3.2001 12.30

41	+	135.4	GRD	C
42	+	17.3	GRD	C
43	+	136.0	GRD	C
44	+	132.4	GRD	C
45	+	131.4	GRD	C
46	+	133.5	GRD	C

2 m/s

18 °C

22.3.2001 10.00

41	+	81.6	GRD	C
42	+	17.3	GRD	C
43	+	81.9	GRD	C
44	+	78.5	GRD	C
45	+	78.5	GRD	C
46	+	79.4	GRD	C

3 m/s

17 °C

22.3.2001 8.00

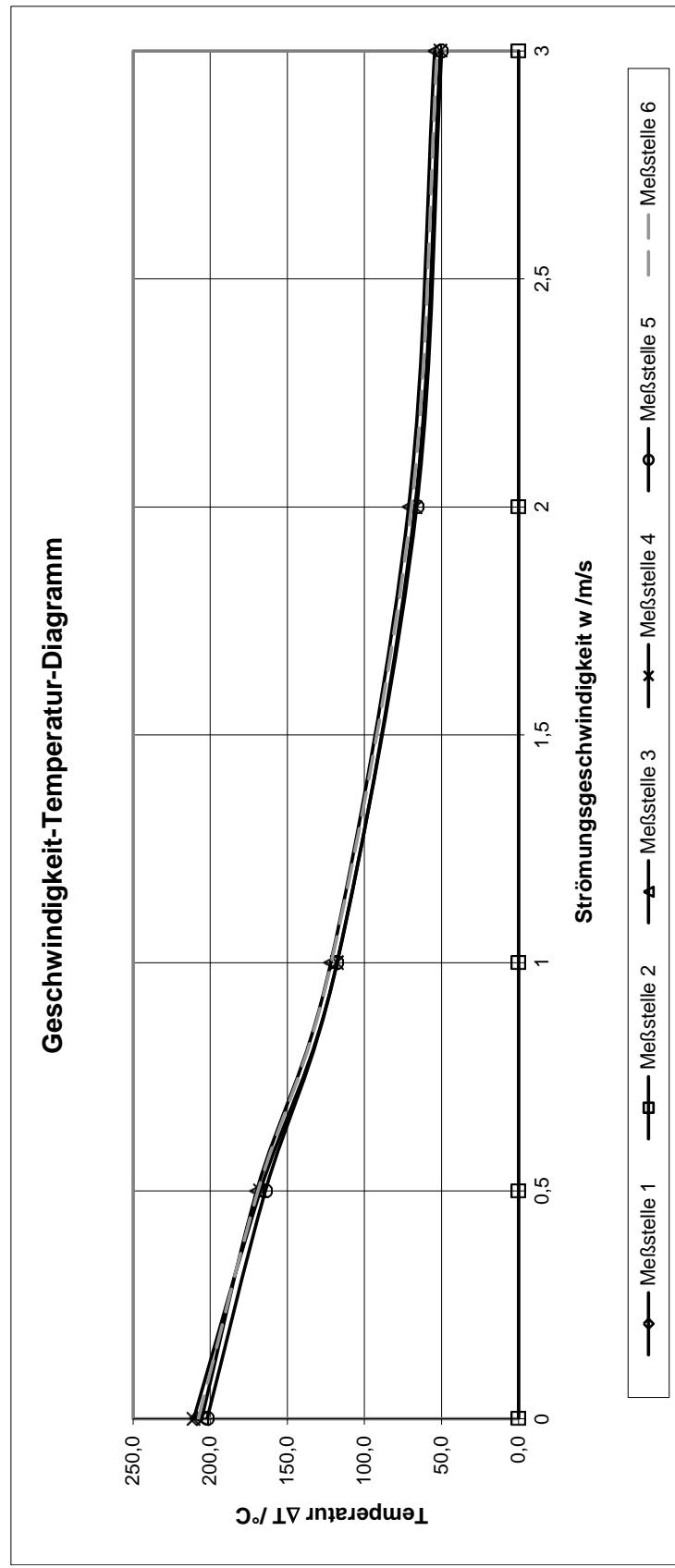
41	+	70.1	GRD	C
42	+	17.3	GRD	C
43	+	69.9	GRD	C
44	+	66.0	GRD	C
45	+	66.6	GRD	C
46	+	67.4	GRD	C

Prüfkörper R15H20B75AW

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	18,0	226,7	208,7	18,0	0,0	223,5	205,5	228,7	210,7	220,0	202,0	225,7	207,7	206,9	500
0,5	20,0	20,0	0,0	20,0	0,0	189,8	169,8	187,5	167,5	184,2	164,2	189,0	169,0	167,6	500
1	19,0	19,0	0,0	19,0	0,0	140,8	121,8	136,7	117,7	136,8	117,8	140,5	121,5	119,7	500
2	18,0	18,0	0,0	18,0	0,0	89,3	71,3	85,2	67,2	84,1	66,1	87,5	69,5	68,5	500
3	19,0	19,0	0,0	19,0	0,0	73,4	54,4	69,7	50,7	68,9	49,9	71,8	52,8	52,0	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

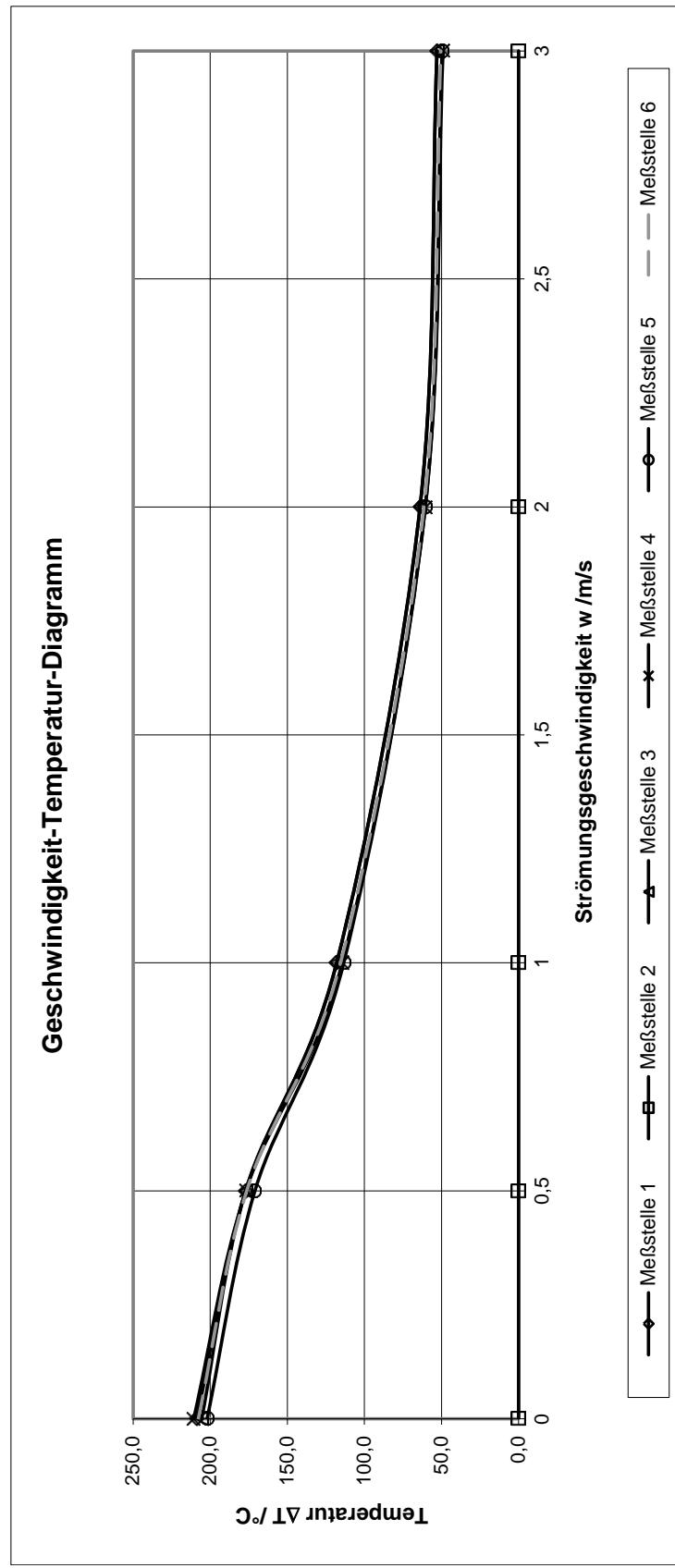
R15H20B75AW0°

Prüfkörper R15H20B75AW

45° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	18,0	226,7	208,7	18,0	0,0	223,5	205,5	228,7	210,7	220,0	202,0	225,7	207,7	206,9	500
0,5	19,0	196,0	177,0	19,0	0,0	196,0	177,0	195,9	176,9	190,0	171,0	195,3	176,3	175,6	500
1	18,0	136,0	118,0	18,0	0,0	136,0	118,0	132,4	114,4	131,4	113,4	133,5	115,5	115,9	500
2	18,0	81,9	63,9	18,0	0,0	81,9	63,9	78,5	60,5	78,5	60,5	79,4	61,4	62,0	500
3	17,0	69,9	52,9	17,0	0,0	69,9	52,9	66,0	49,0	66,6	49,6	67,4	50,4	51,0	500

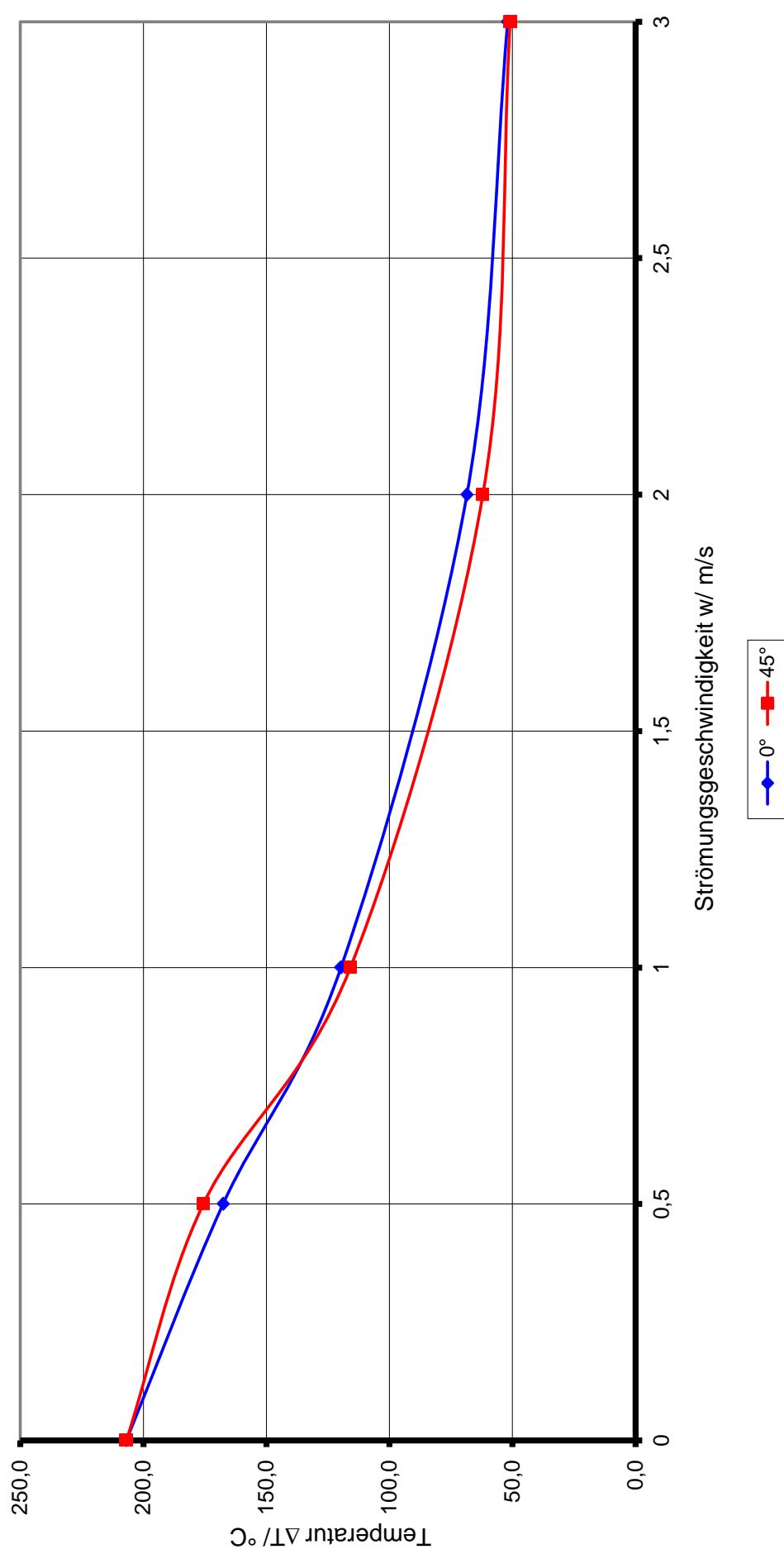
Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

—◆— Meßstelle 1 —■— Meßstelle 2 —▲— Meßstelle 3 —×— Meßstelle 4 —○— Meßstelle 5 —— Meßstelle 6

Gegenüberstellung des R15H20B75AW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln



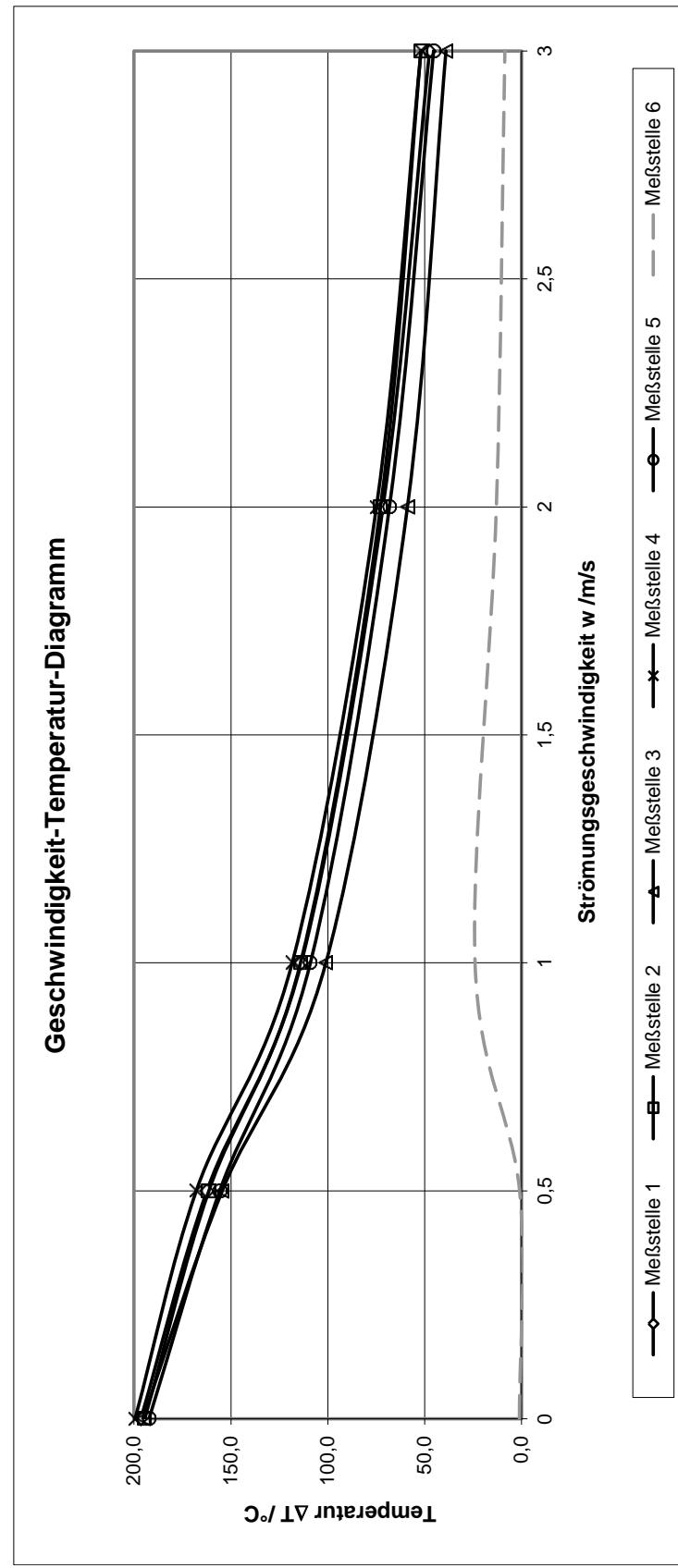
Abschnitt D

R15H20B75AW Gegenüberstellung_Winkel

Prüfkörper R15H10B75AW

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	16,1	212,6	196,5	210,6	194,5	211,6	195,5	215,6	199,5	208,4	192,3	17,2	1,1	195,7	500
0,5	16,8	179,2	162,4	178,2	161,4	171,3	154,5	184,7	167,9	172,6	155,8	17,8	1,0	160,4	500
1	17,1	130,8	113,7	131,2	114,1	118,1	101,0	135,5	118,4	126,1	109,0	41,1	24,0	111,2	500
2	16,8	88,3	71,5	89,6	72,8	75,7	58,9	91,7	74,9	85,0	68,2	29,8	13,0	69,3	500
3	16,7	64,2	47,5	68,6	51,9	55,7	39,0	68,6	51,9	62,1	45,4	25,3	8,6	47,1	500



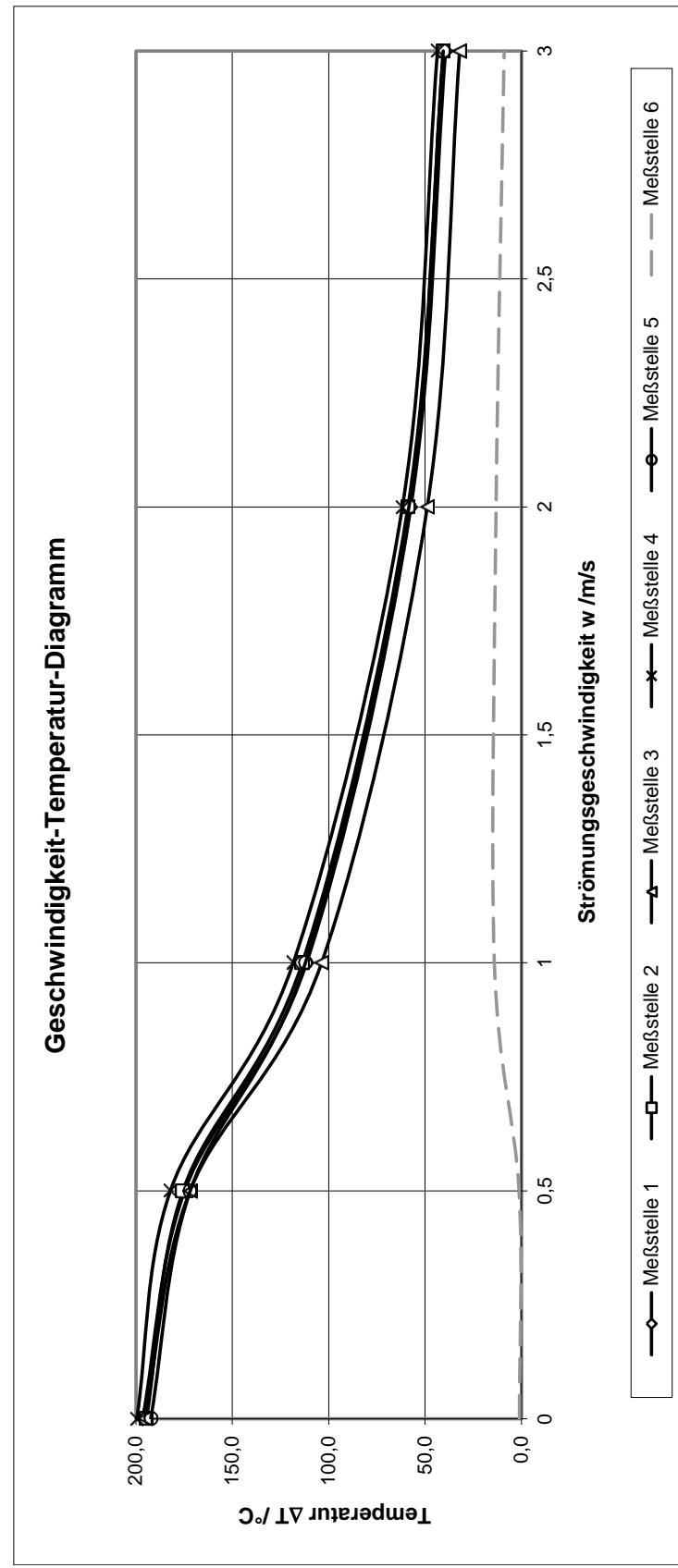
Abschnitt D

R15H10B75AW 0°

Prüfkörper R15H10B75AW

45° Anströmung

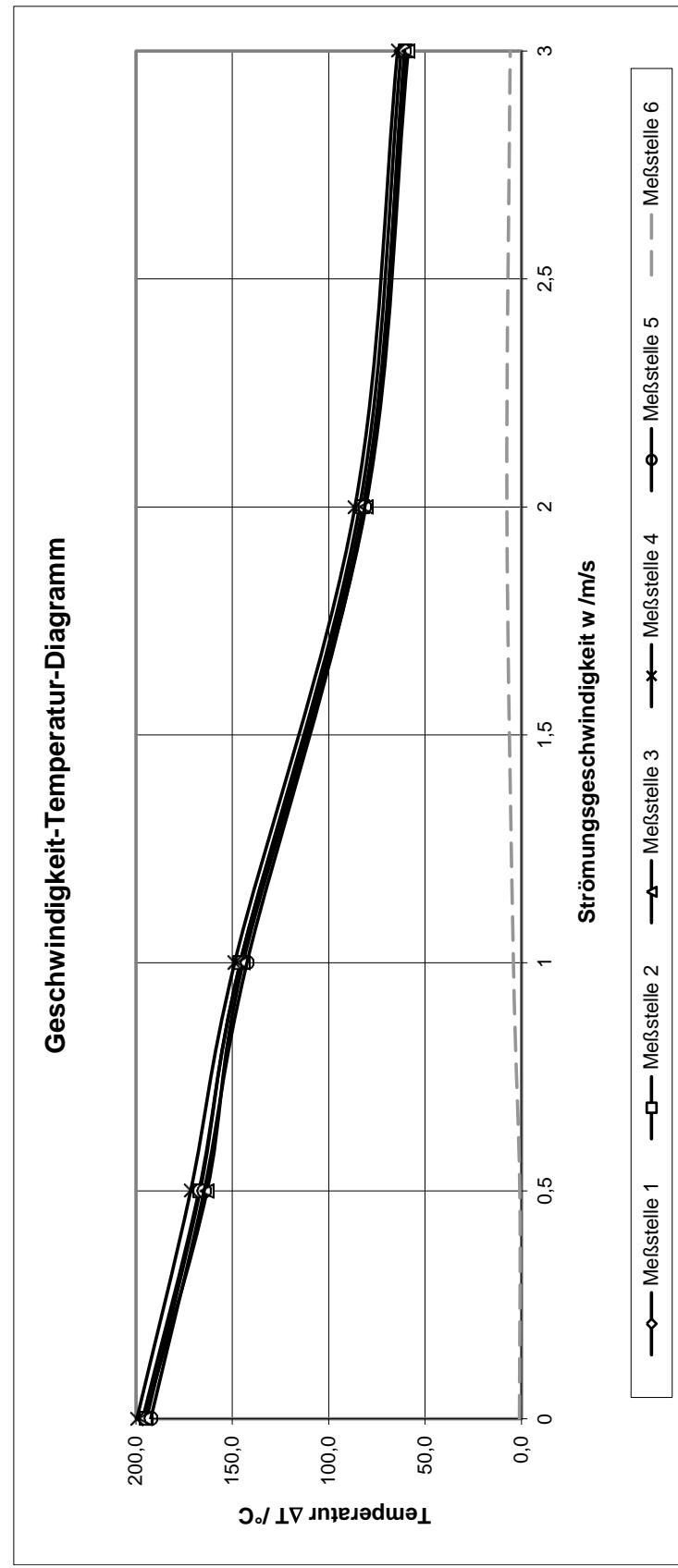
Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	16,1	212,6	196,5	210,6	194,5	211,6	195,5	215,6	199,5	208,4	192,3	17,2	1,1	195,7	500
0,5	16,8	191,5	174,7	192,4	175,6	188,7	171,9	198,9	182,1	188,6	171,8	18,1	1,3	175,2	500
1	17,1	128,6	111,5	130,8	113,7	120,8	103,7	135,5	118,4	129,2	112,1	31,2	14,1	111,9	500
2	17,2	74,6	57,4	76,1	58,9	66,1	48,9	79,0	61,8	75,6	58,4	30,4	13,2	57,1	500
3	16,6	56,0	39,4	57,1	40,5	48,7	32,1	60,2	43,6	57,2	40,6	25,6	9,0	39,2	500



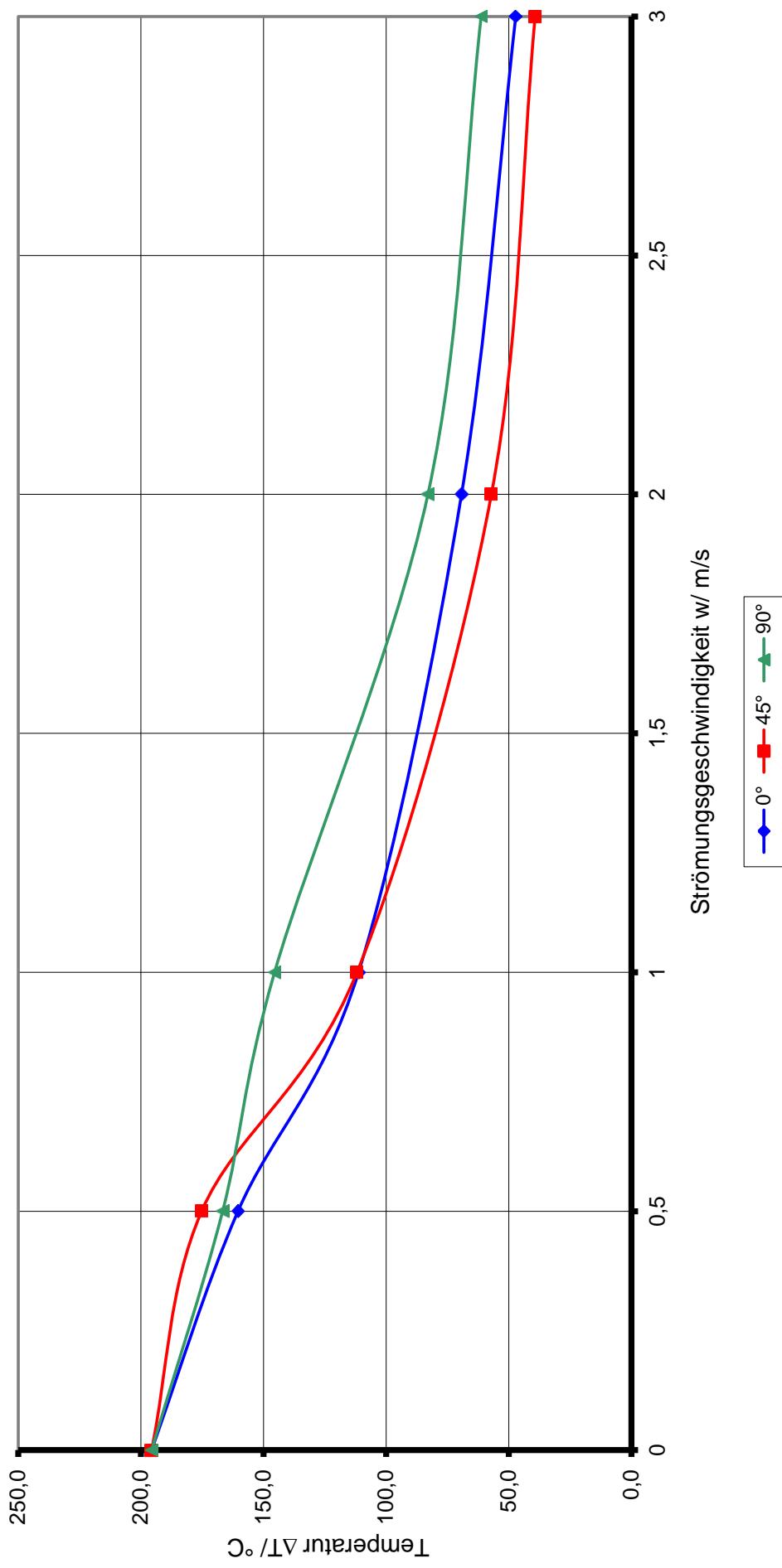
Prüfkörper R15H10B75AW

90° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	16,1	212,6	196,5	210,6	194,5	211,6	195,5	215,6	199,5	208,4	192,3	17,2	1,1	195,7	500
0,5	17,7	185,0	167,3	184,4	166,7	180,8	163,1	189,3	171,6	182,3	164,6	18,6	0,9	166,7	500
1	17,5	163,4	145,9	163,4	145,9	161,9	144,4	166,3	148,8	159,9	142,4	21,7	4,2	145,5	500
2	17,6	101,6	84,0	99,9	82,3	98,4	80,8	104,0	86,4	98,9	81,3	25,2	7,6	83,0	500
3	17,4	79,8	62,4	77,6	60,2	76,2	58,8	81,7	64,3	78,0	60,6	23,3	5,9	61,3	500



Gegenüberstellung des R15H10B75AW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

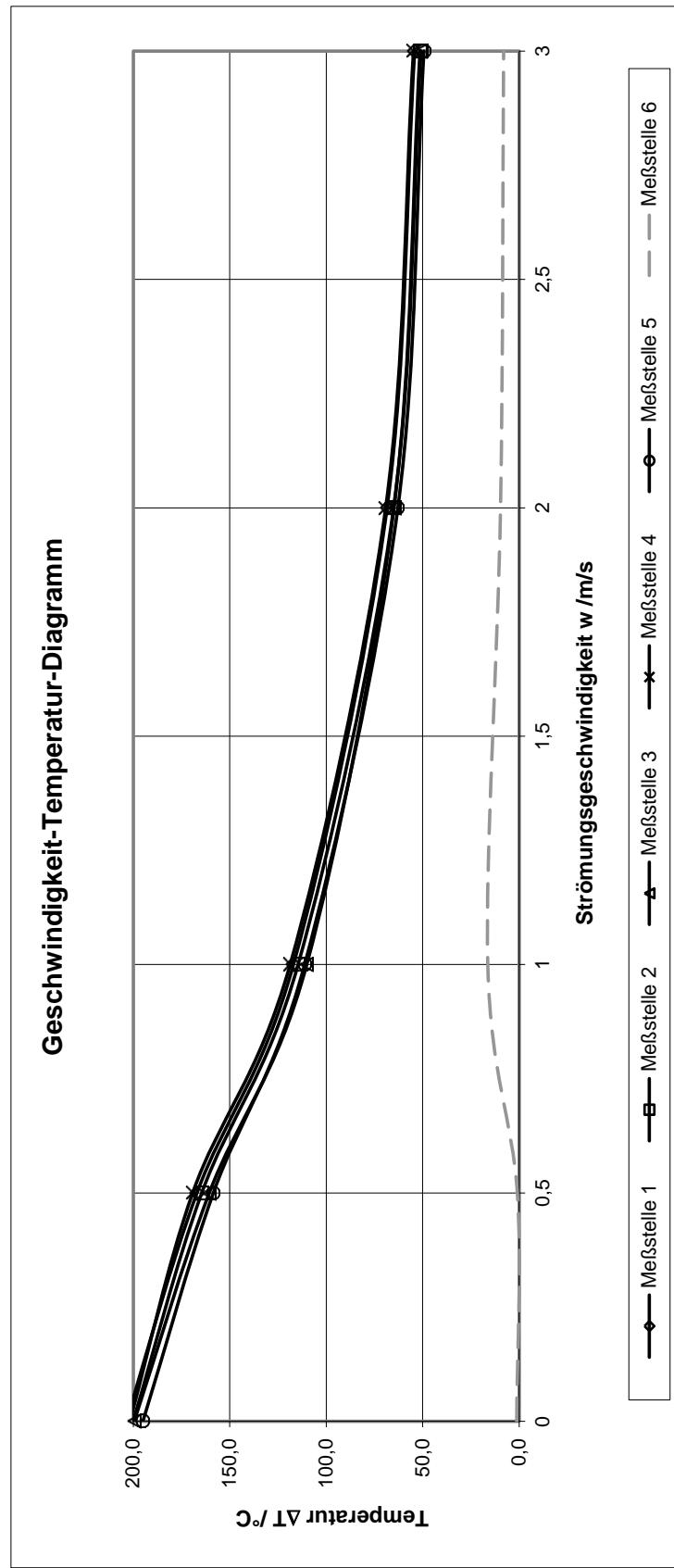


Prüfkörper R15H10B75AW-4x75A

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT_{mittel} °C	W
0	18,5	222,2	203,7	218,6	200,1	218,0	199,5	220,3	201,8	213,5	195,0	19,8	1,3	200,0	500
0,5	18,8	185,8	167,0	183,3	164,5	179,4	160,6	188,0	169,2	177,3	158,5	19,8	1,0	164,0	500
1	18,2	135,2	117,0	132,8	114,6	128,3	110,1	136,9	118,7	129,4	111,2	34,5	16,3	114,3	500
2	18,2	86,7	68,5	83,3	65,1	83,1	64,9	87,4	69,2	81,1	62,9	27,9	9,7	66,1	500
3	18,3	72,5	54,2	69,2	50,9	69,7	51,4	73,1	54,8	67,7	49,4	26,4	8,1	52,1	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

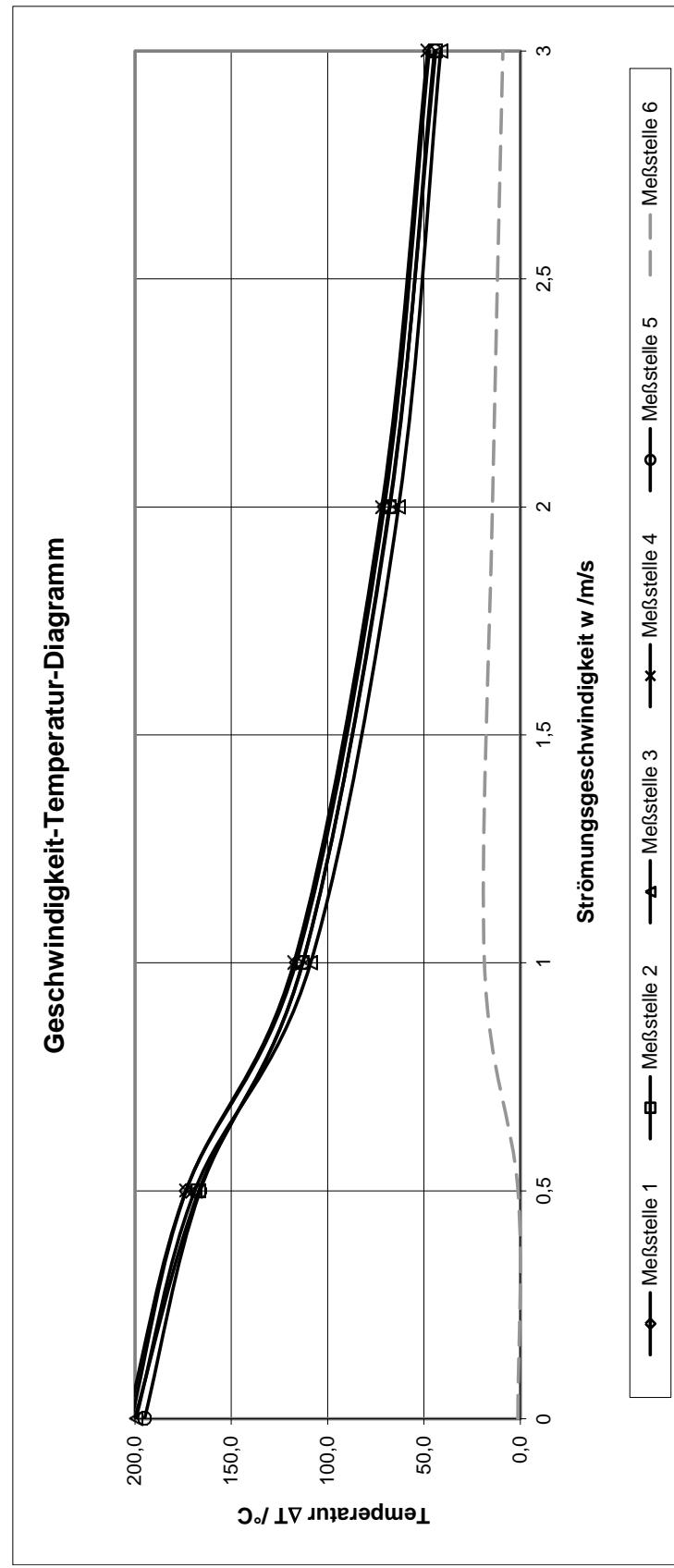
R15H10B75AW-4x75A°

Prüfkörper R15H10B75AW-4x75A

45° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	18,5	222,2	203,7	218,6	200,1	218,0	199,5	220,3	201,8	213,5	195,0	19,8	1,3	200,0	500
0,5	18,8	192,3	173,6	185,6	166,9	187,7	169,0	192,2	173,5	184,9	166,2	20,0	1,3	169,8	500
1	18,8	135,2	116,4	131,7	112,9	127,6	108,8	136,3	117,5	131,8	113,0	37,5	18,7	113,7	500
2	19,2	89,8	70,6	87,2	68,0	82,4	63,2	91,1	71,9	86,9	67,7	33,7	14,5	68,3	500
3	19,1	66,4	47,3	63,0	43,9	60,5	41,4	67,2	48,1	63,7	44,6	28,2	9,1	45,1	500

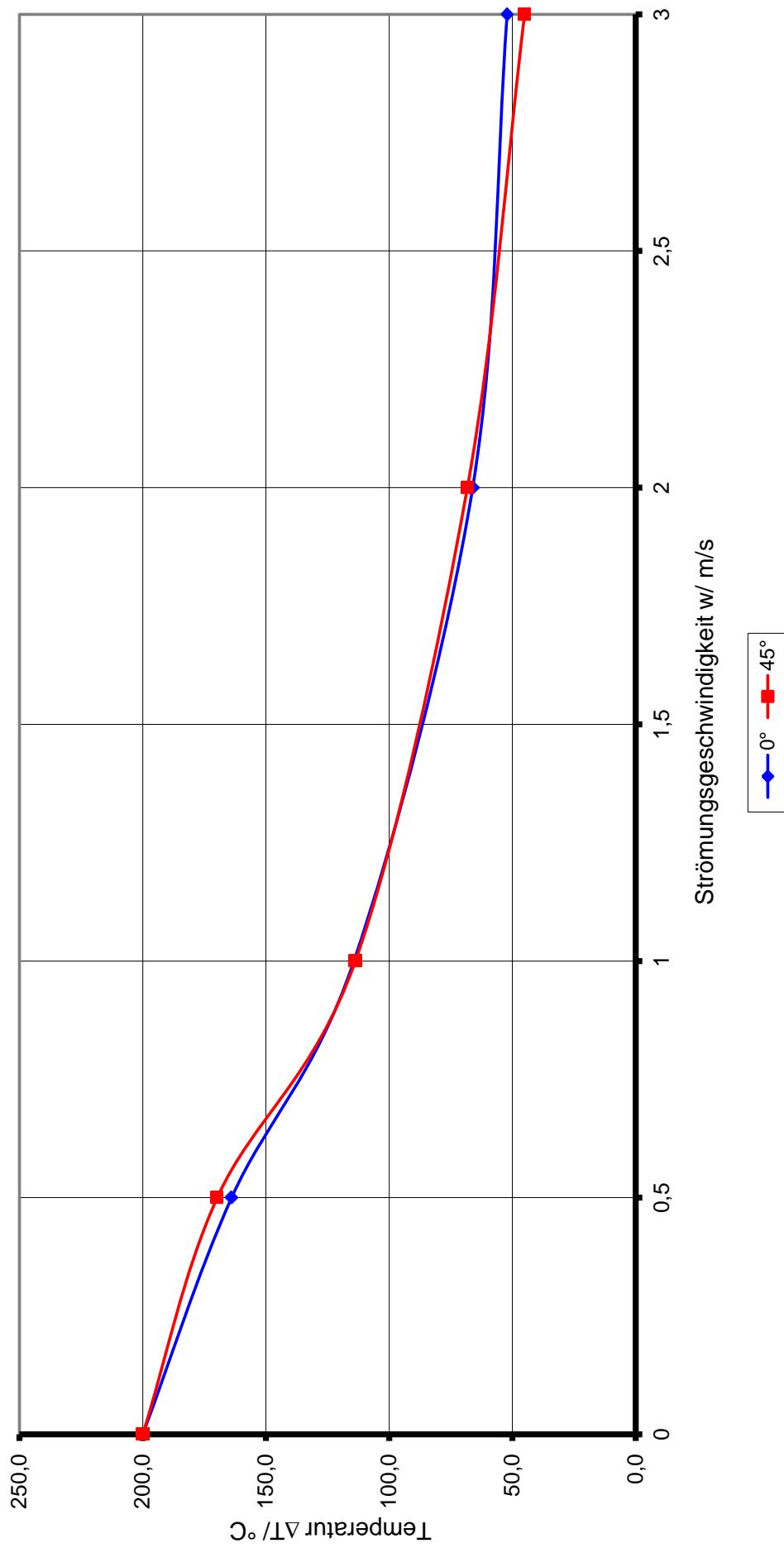
Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

R15H10B75AW-4x75A45°

Gegenüberstellung des R15H10B75AW-4x75A Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

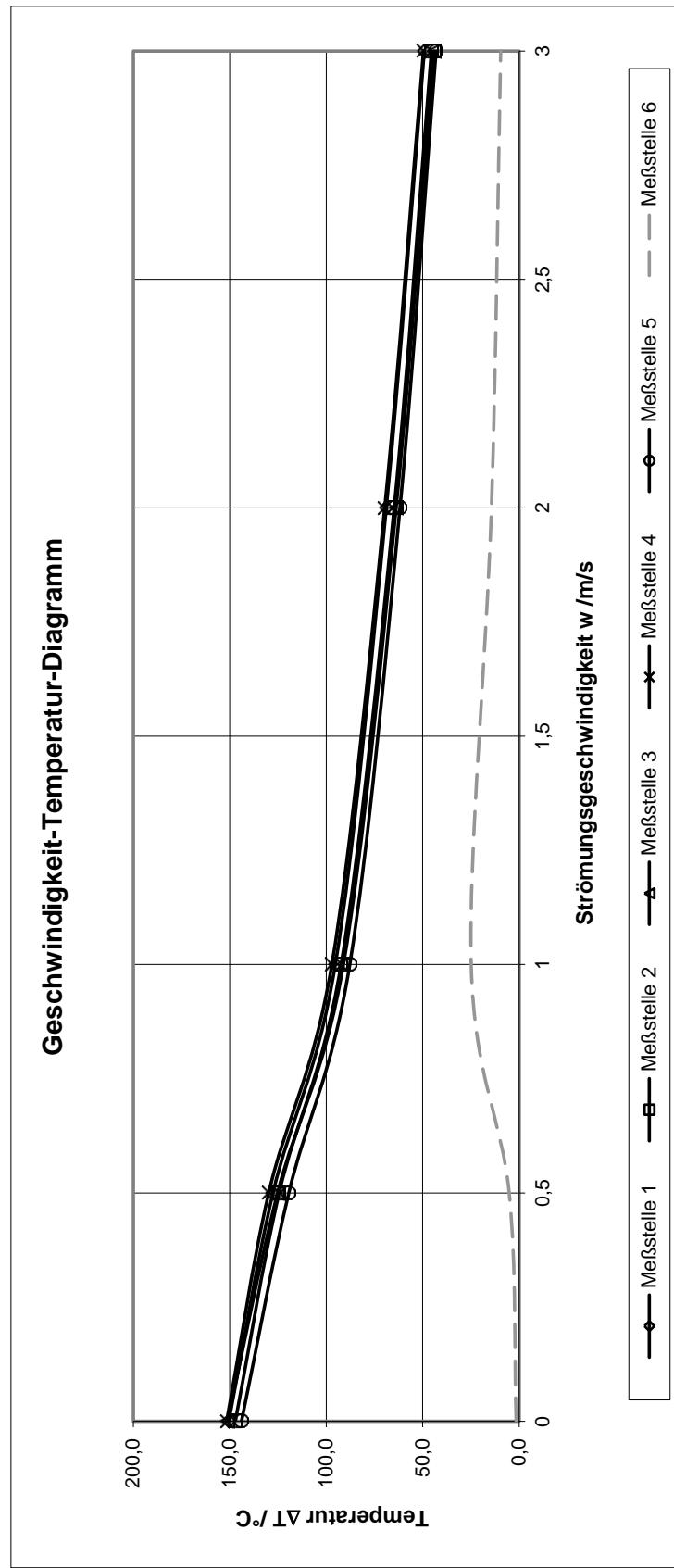


Abschnitt D

R15H10B75AW-4x75AGegenüberstellung_Winkel

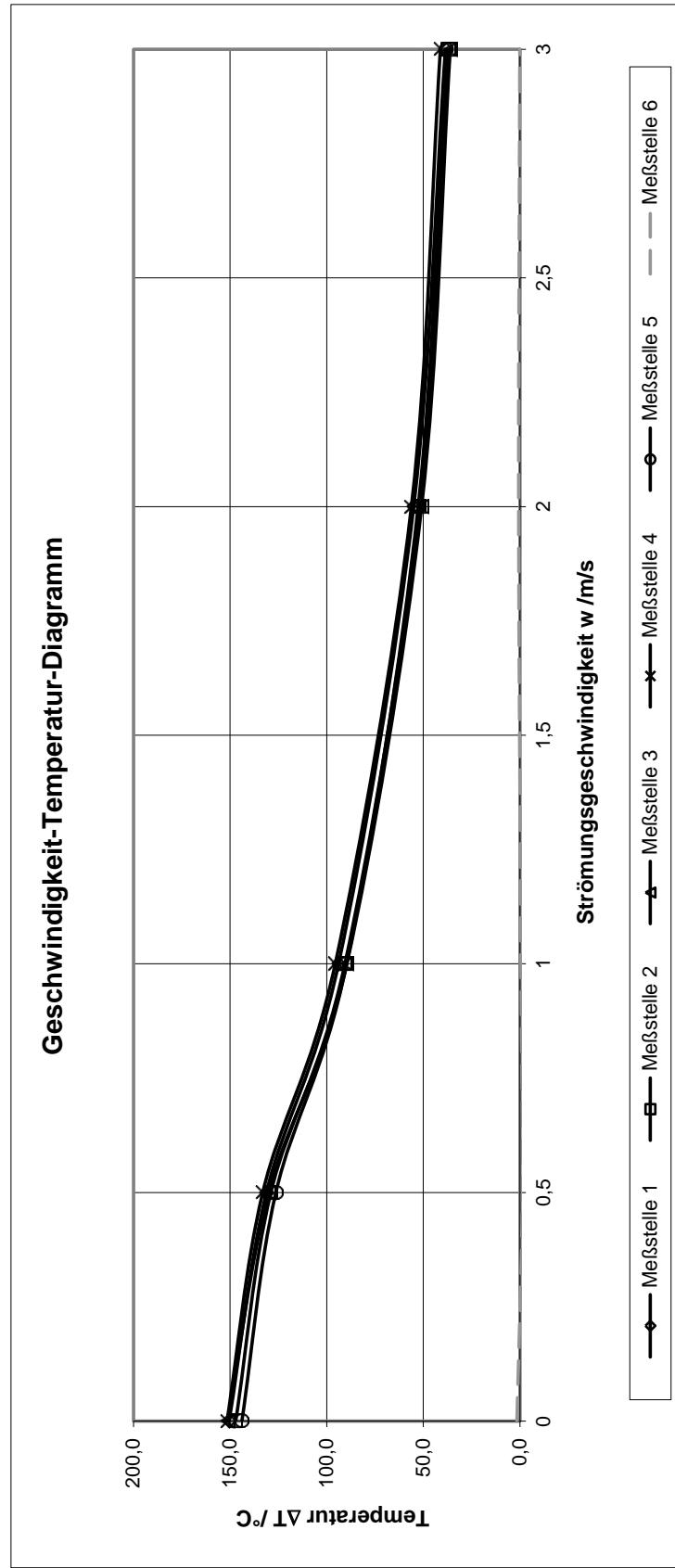
Prüfkörper R15H10B75AS

0° Anströmung



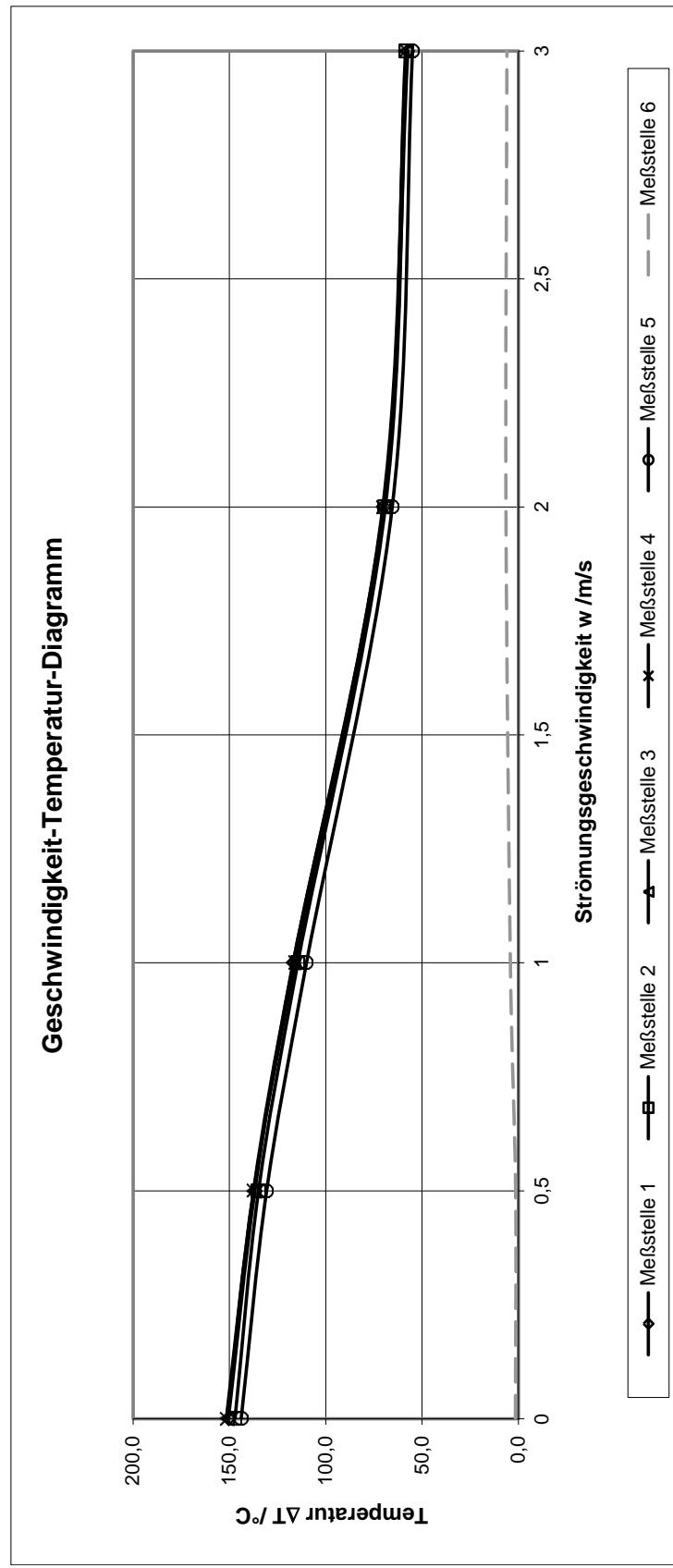
Prüfkörper R15H10B75AS

45° Anströmung

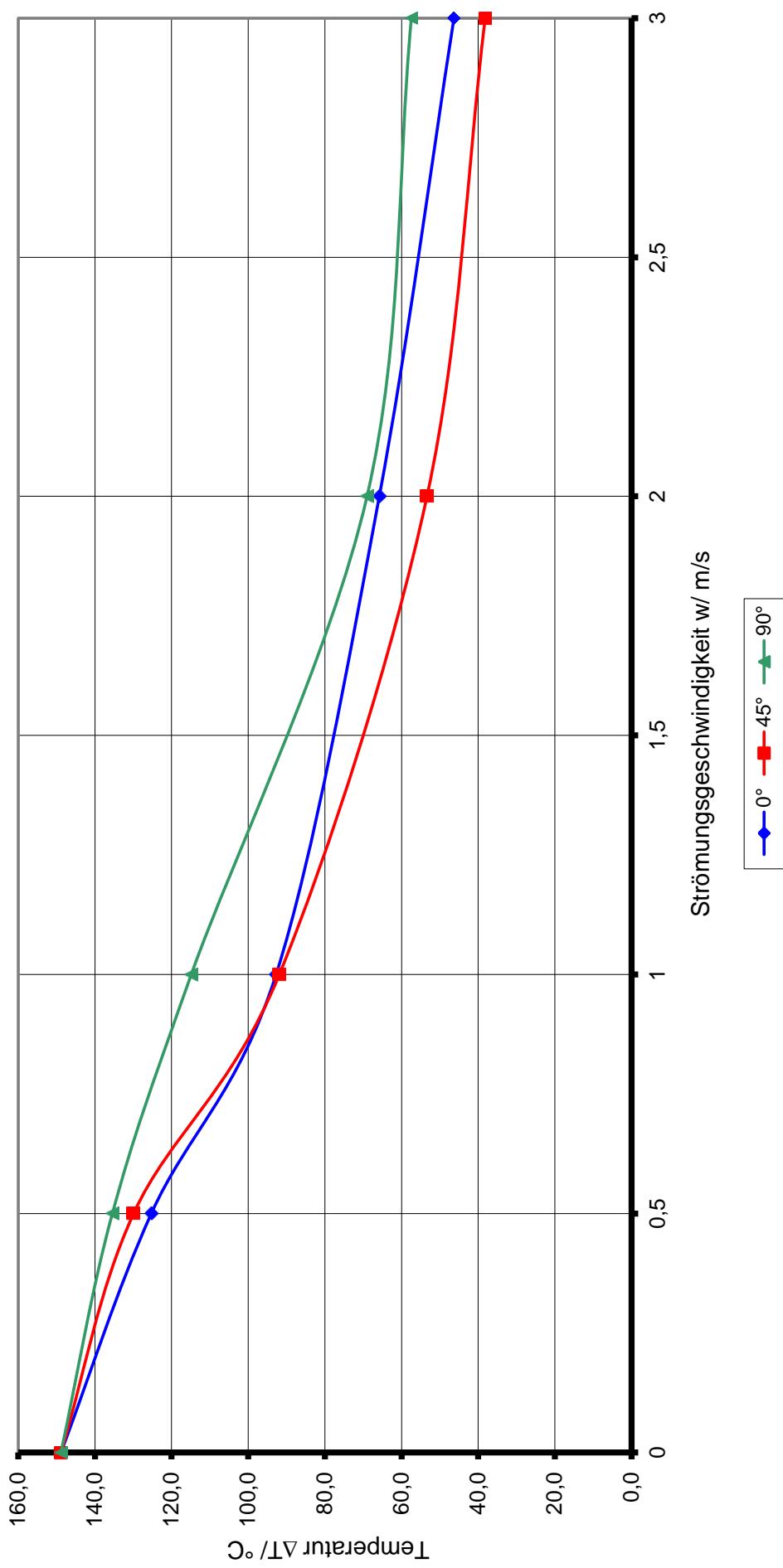


Prüfkörper R15H10B75AS

90° Anströmung



Gegenüberstellung des R15H10B75AS Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

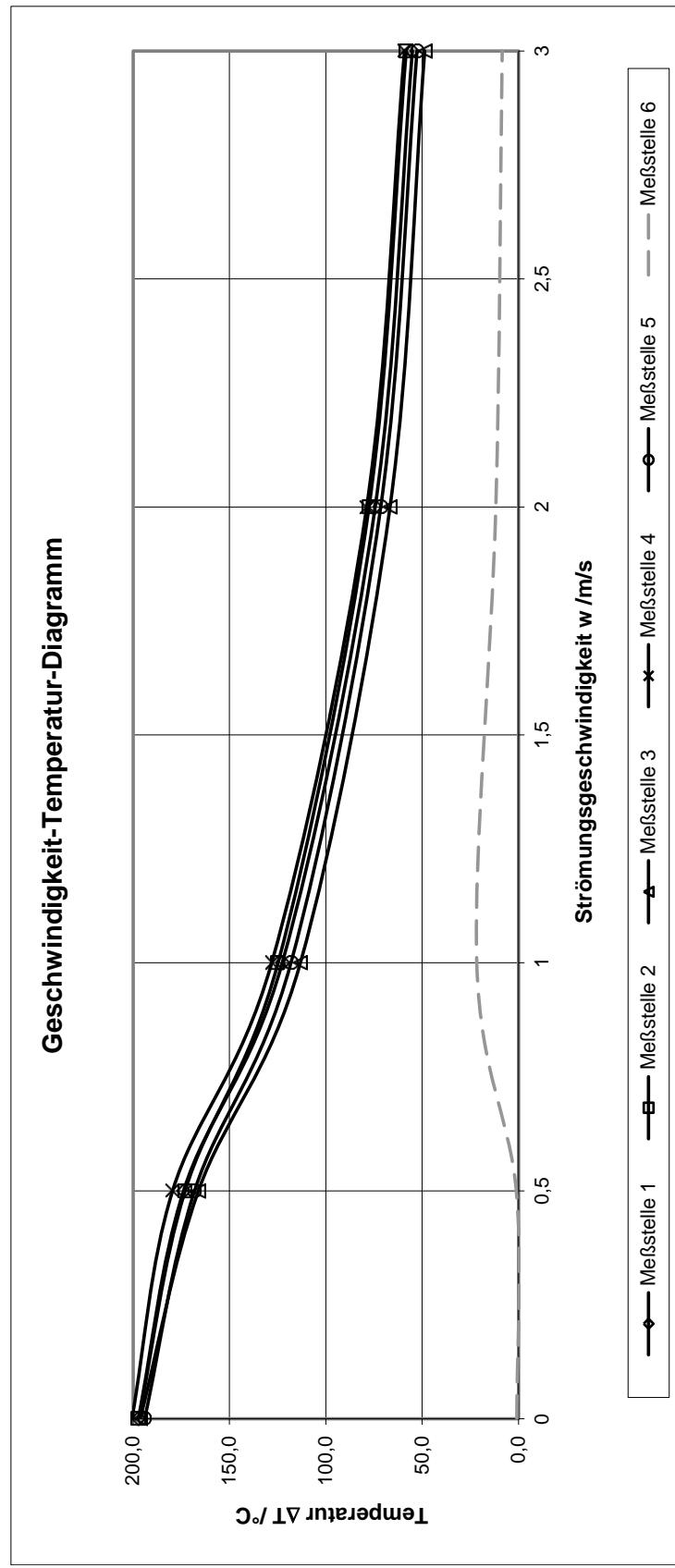


Prüfkörper R15H10B90AW

0° Anströmung

Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	16,2	213,5	197,3	213,3	197,1	212,5	196,3	216,8	200,6	210,2	194,0	171,1	0,9	197,1	500
0,5	16,8	190,6	173,8	189,8	173,0	182,9	166,1	196,3	179,5	184,9	168,1	18,0	1,2	172,1	500
1	17,0	139,6	122,6	141,8	124,8	130,2	113,2	145,1	128,1	135,1	118,1	38,7	21,7	121,4	500
2	17,0	91,4	74,4	94,6	77,6	83,7	66,7	95,8	78,8	88,5	71,5	28,8	11,8	73,8	500
3	16,7	71,8	55,1	75,0	58,3	65,4	48,7	75,9	59,2	69,4	52,7	25,2	8,5	54,8	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

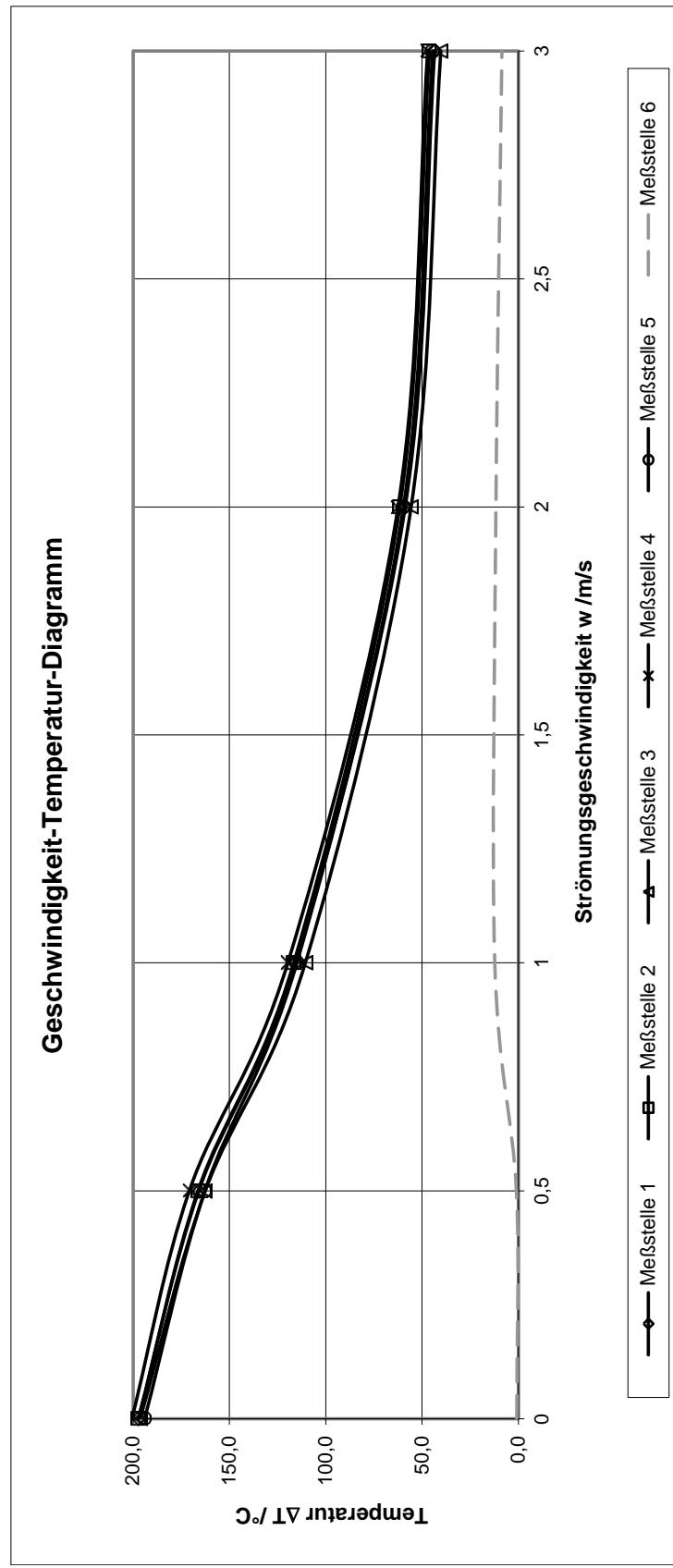
R15H10B90AW 0°

Prüfkörper R15H10B90AW

45° Anströmung

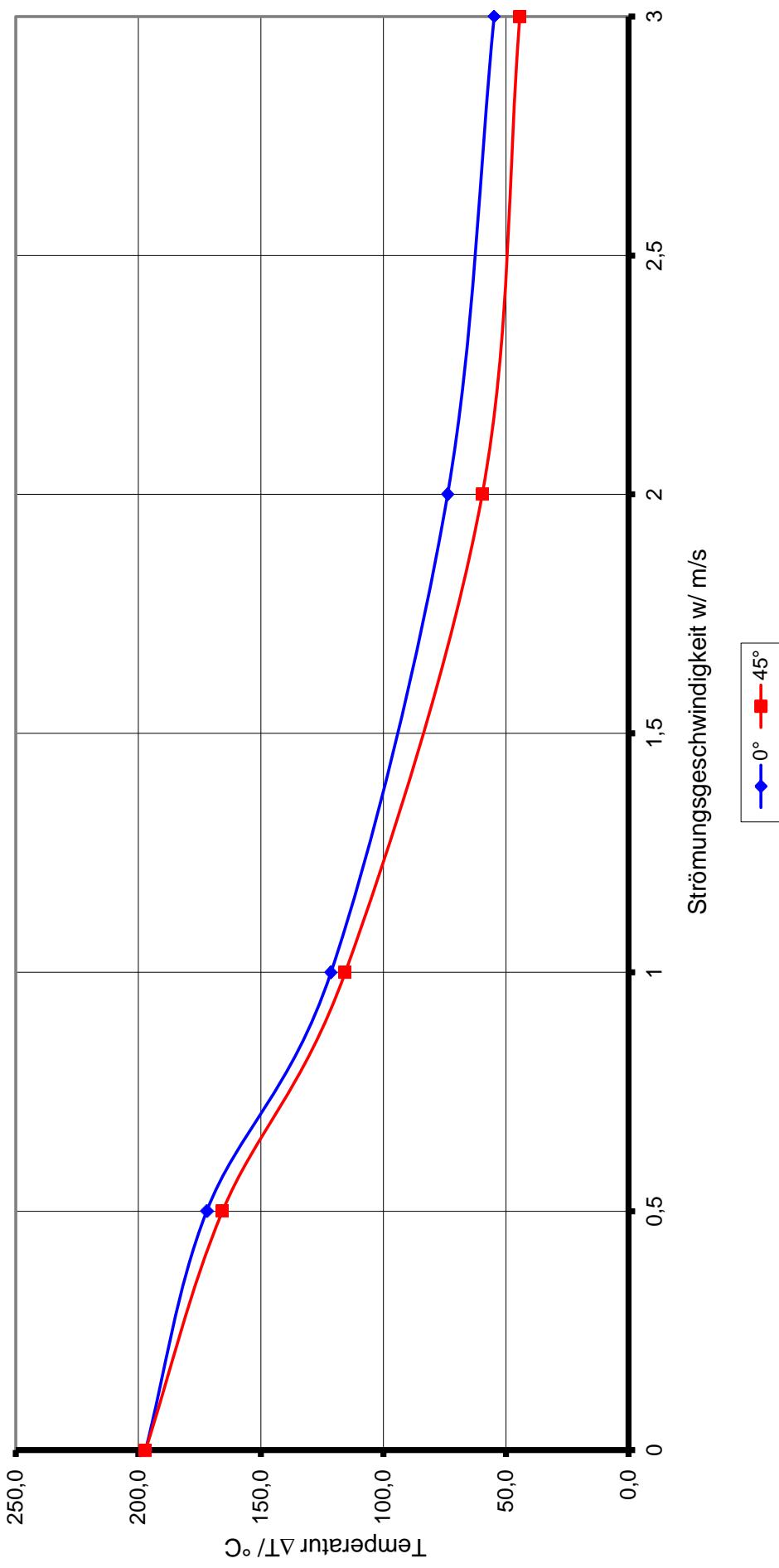
Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	16,2	213,5	197,3	213,3	197,1	212,5	196,3	216,8	200,6	210,2	194,0	171,1	0,9	197,1	500
0,5	16,4	182,3	165,9	182,7	166,3	178,9	162,5	187,2	170,8	179,1	162,7	17,5	1,1	165,6	500
1	16,5	132,3	115,8	133,1	116,6	127,1	110,6	136,2	119,7	131,5	115,0	28,8	12,3	115,5	500
2	16,6	75,4	58,8	78,2	61,6	72,3	55,7	79,1	62,5	76,3	59,7	28,3	11,7	59,7	500
3	16,6	60,1	43,5	62,8	46,2	56,9	40,3	63,7	47,1	61,1	44,5	25,2	8,6	44,3	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



Abschnitt D

Gegenüberstellung des R15H10B90AW Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln

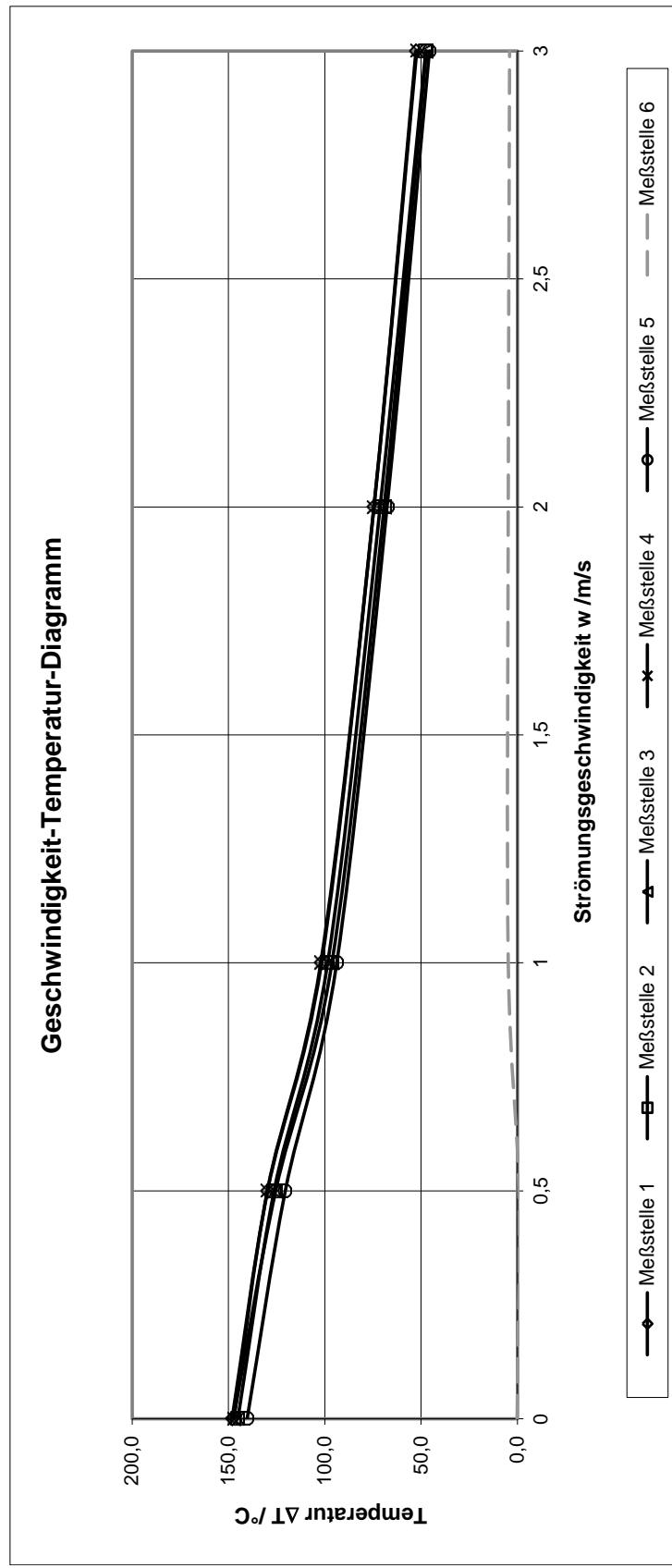


Prüfkörper R15H10B90AS

0° Anströmung

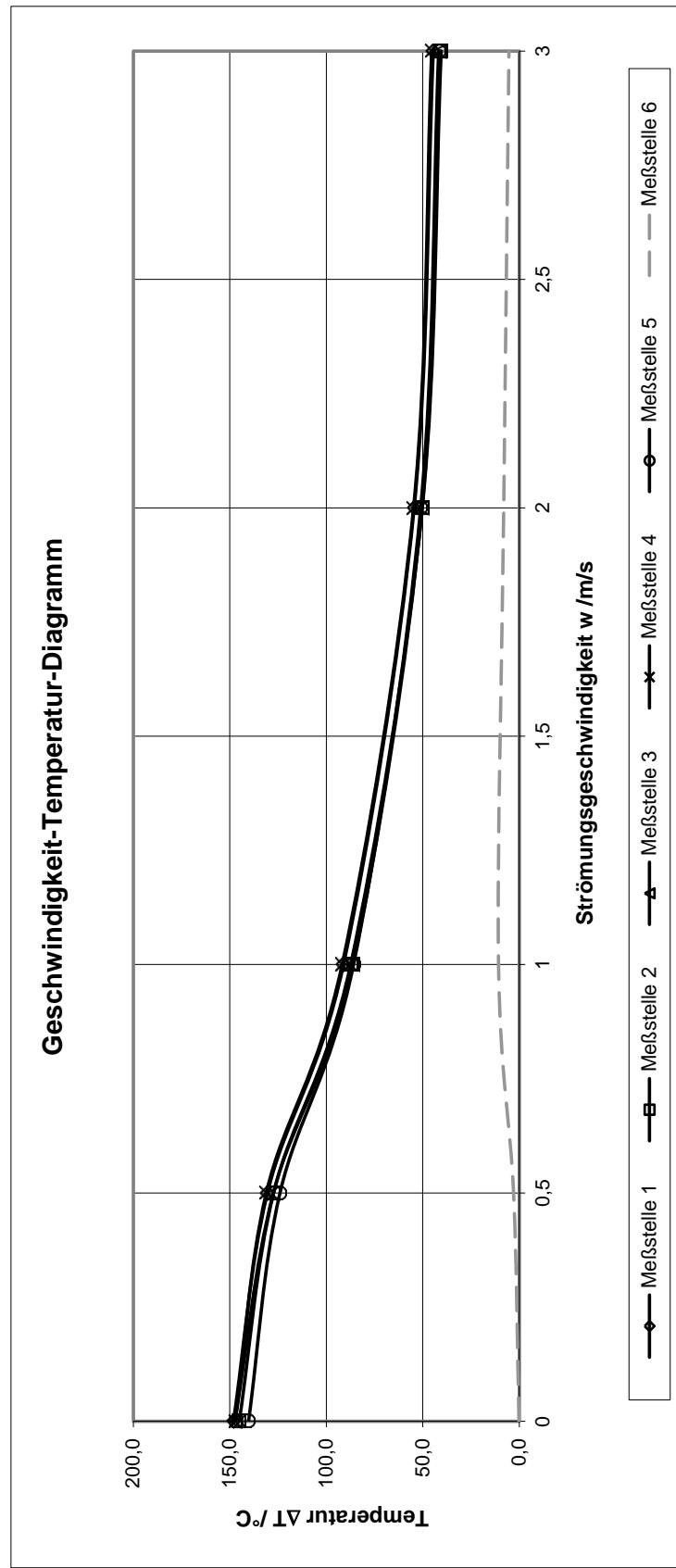
Geschw. m/s	Luft °C	Temperatur			Heizleistung										
		Messstelle 1 °C	ΔT	Messstelle 2 °C	ΔT	Messstelle 3 °C	ΔT	Messstelle 4 °C	ΔT	Messstelle 5 °C	ΔT	Messstelle 6 °C	ΔT	ΔT _{mittel} °C	W
0	20,2	168,3	148,1	165,3	145,1	167,6	147,4	167,4	147,2	160,5	140,3	20,4	0,2	145,6	500
0,5	21,6	151,3	129,7	147,9	126,3	147,1	125,5	151,4	129,8	142,1	120,5	20,9	-0,7	126,4	500
1	20,7	122,4	101,7	119,2	98,5	117,0	96,3	122,8	102,1	114,5	93,8	25,5	4,8	98,5	500
2	20,4	94,9	74,5	91,7	71,3	89,6	69,2	94,9	74,5	88,1	67,7	25,2	4,8	71,4	500
3	19,9	72,6	52,7	67,5	47,6	67,2	47,3	72,2	52,3	65,6	45,7	24,0	4,1	49,1	500

Geschwindigkeit-Temperatur-Diagramm



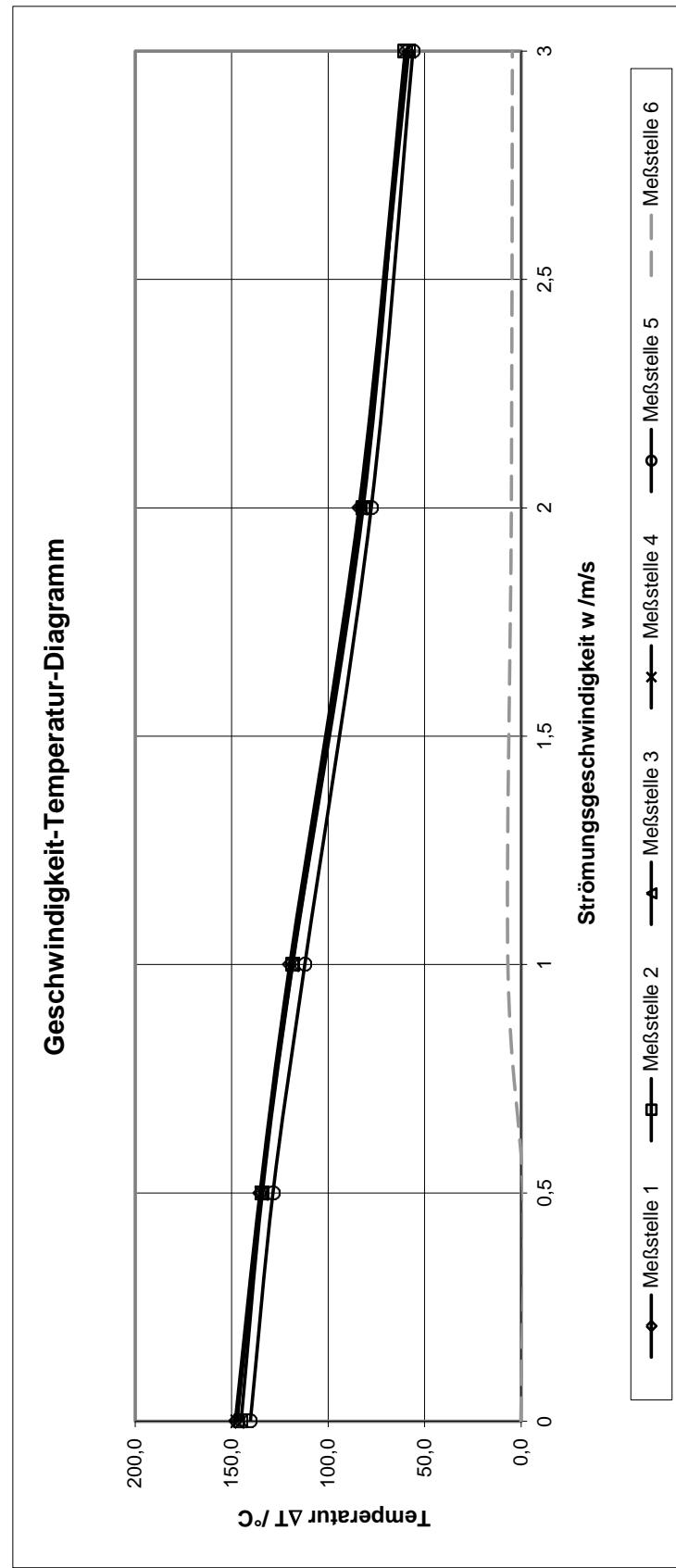
Prüfkörper R15H10B90AS

45° Anströmung

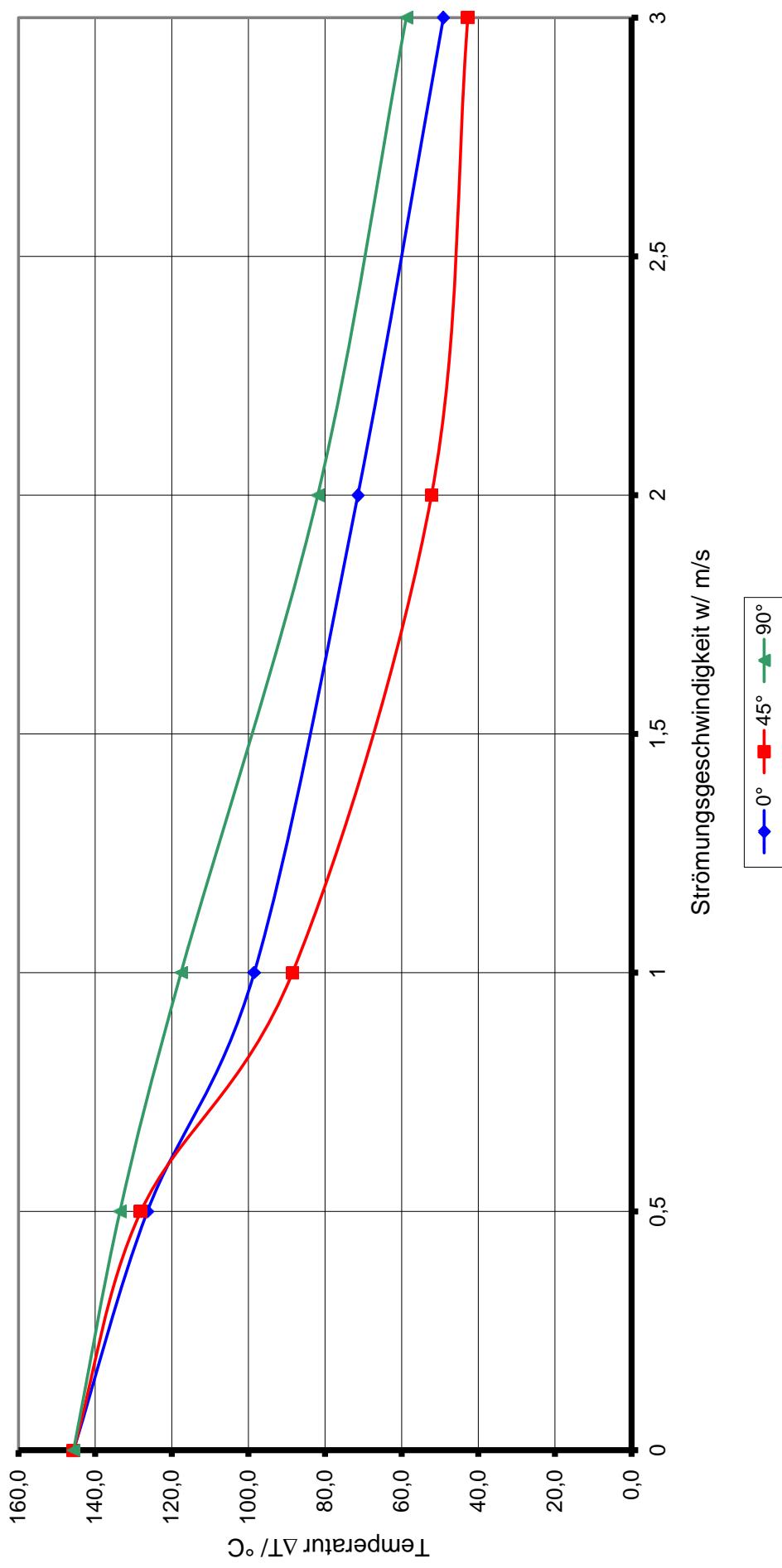


Prüfkörper R15H10B90AS

90° Anströmung



Gegenüberstellung des R15H10B75AS Körpers unter verschiedenen Anströmungswinkeln



Abschnitt E – Interpretation und Schlussfolgerungen

- | | |
|---------------------------------|----------|
| 1. Unberippter Körper | Seite 2 |
| 2. Berippte Körper | Seite 5 |
| 2.1. Rippenabstand | |
| 2.2. Rippenstärke | |
| 2.3. Querfräslagen | |
| 2.4. Schwarzer Körper | |
| 3. Konstruktionshinweise | Seite 10 |

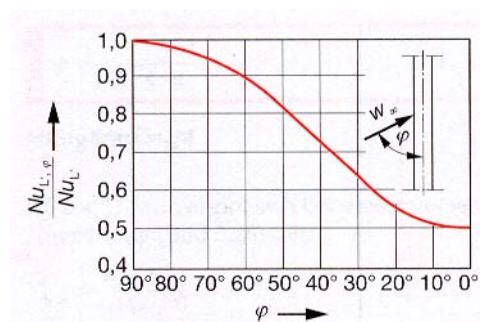
1. Unberippter Körper:

Die Messungen starteten mit dem unberippten Körper. Der Körper wurde gegenüber den Messungen mit den berippten Körpern nur mit 250 W beaufschlagt. (siehe Abschnitt D Berechnungsergebnis).

Das Ziel lag darin, eine Basis für die folgenden Messungen und Berechnungen zu erhalten. Wie sich bald zeigte, stellte der glatte Körper die größte Herausforderung dar, da hier relativ wenig Faktoren die Endtemperatur bestimmen, die Berechnung jedoch z. T. weit von der Messung abweicht.

Gut ersichtlich aus den Messergebnissen ist der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung wobei die Wärmeabfuhr bei der turbulenten besser ist.

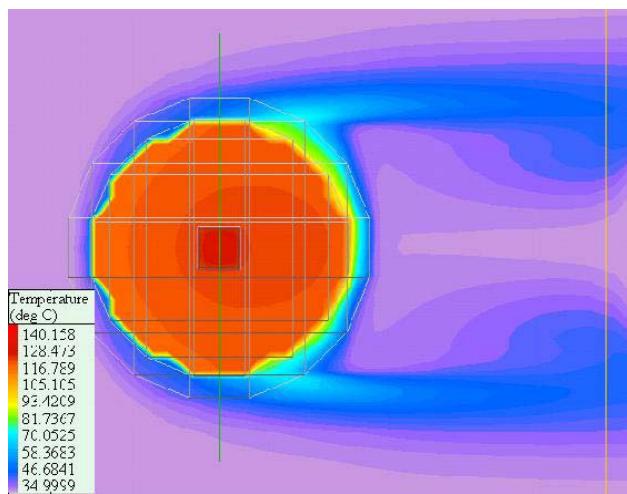
Der Übergang liegt zwischen 0,5m/s und 1m/s. Dies war aus den Erkenntnissen aus der Theorie auch so zu erwarten (siehe Diagramm: Gegenüberstellung des GlattW Körpers unter verschiedenen Anströmwinkeln).



Die bessere Wärmeabfuhr der „2m/s - Messung“ bei Anströmung unter 45° im Vergleich zur Geradanströmung war jedoch vollkommen überraschend, desto mehr als selbst im VDI Wärmeatlas ein Abnehmen der Wärmeabfuhr bei Queranströmung, 75% der

Wärmeabfuhr bei 45°, prognostiziert war.

Die bessere Wärmeabfuhr bei Queranströmung und 2m/s könnte folgende Ursachen haben: Die Kanten des Prüflings führen bei Queranströmung zum früheren Umkippen in eine turbulente Strömung, allerdings bedarf es einer entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit. Weshalb dann bei 3m/s die Messung bei Geradanströmung wieder besser ist, kann auch nur mittels den Strömungsverhältnissen gedeutet werden. Der wärmeabführende Wirbel wird bei 3m/s bereits wieder soweit gestreckt, dass die Wirkung für die Wärmeabfuhr gering ist und folglich das „bloße“ Darüberstreichen bei Geradanströmung besser kühlst.



Wie bei diesem Bild einer Simulation ersichtlich, haben die Wirbel schon bei 1m/s eine beachtliche Größe. Umso mehr ist es vorstellbar, die bessere Wärmeabfuhr bei 2m/s und Queranströmung so zu erklären. Die bessere Wärmeabfuhr der Geradanstömung bei niederen Strömungsgeschwindigkeiten

dürfte ebenfalls auf die Turbulenzen zurückzuführen sein. Bei solch geringen Geschwindigkeiten wo die freie Konvektion dominiert reicht die Strömungsgeschwindigkeit womöglich noch nicht zur Ausbildung eines Wirbels, der „Anströmschatten“ aufgrund der Queranströmung behindert jedoch die Wärmeabfuhr einer der Seitenflächen.

Die Berechnungswerte für den unberippten Körper und die Messwerte für die Anströmwinkel 0° und 45° sind in Diagramm „Gegenüberstellung GlattW; Messung – Rechnung“ dargestellt.

Die exorbitante Abweichung der Berechnungsergebnisse von den Messergebnissen speziell bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten kann verschiedene Ursachen haben:

- Zum einen stellt die Überlagerung der freien und der erzwungenen Konvektion ein Problem für sich dar (*siehe Abschnitt B: Theoretische Grundlagen*).
- Eine andere Fehlerquelle ist der Wärmeübergang durch Strahlung. Im Gegensatz zur Konvektion hängt die Wärmestrahlung von der vierten Potenz der Temperatur ab. Daraus ist ersichtlich, dass bei zunehmender Temperatur die Strahlung immer mehr an Bedeutung gewinnt. Bei 0m/s (freie Konvektion) und 0,5m/s liegen die Temperaturen am höchsten, demzufolge ist der Einfluss der Strahlung dort auch am größten, die

Abweichung der Berechnung von der Messung ebenso. Eine wesentliche Größe für die Wärme die ein Körper durch Strahlung abführt ist der Emissionskoeffizient. Wählt man den Emissionskoeffizienten falsch, bzw. hat der geprüfte Körper einen anderen Koeffizienten als nach Tabelle für den Werkstoff und Oberfläche bestimmt, so wird die Berechnung speziell bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten verfälscht. Folglich könnte auch ein inkorrekt er Emissionskoeffizient für die Differenz verantwortlich sein.

2. Berippte Körper:

Die Überlegungen für den unberippten Körper gelten sinngemäß auch für die berippten Körper. Die entgegen der Theorie teilweise bessere Wärmeabfuhr der Queranströmung kann auch bei den Rippenkörpern mit der Bildung der Wirbel interpretiert werden. Es ist folglich sinnlos für jeden Körper die selbe Theorie wieder auszuführen und lediglich die Strömungsgeschwindigkeiten bei denen eine Besserstellung eintritt abzuändern. Vielmehr ist es von Interesse das Augenmerk auf die Gemeinsamkeiten verschiedener Prüfkörper zu legen und die Unterschiede dieser Körper zueinander zu beleuchten. Hier kann die Vorgehensweise analog der Auswahl der Prüfkörper erfolgen.

2.1 Rippenabstand:

Zu Beginn steht hier die Ermittlung des optimalen Rippenabstandes aus den Messungen (siehe Diagramm: Gegenüberstellung R15H20B45AW, R15H20B60AW und R15H20B75AW; Rippenabstände 4,5mm, 6mm und 7,5mm).

Aufgrund der fehlenden Theorie bezüglich des optimalen Rippenabstandes waren wir hier vollkommen auf die Versuche angewiesen. Lediglich das FEM-Programm „Flotherm“ lieferte noch Impulse und einen optimalen Rippenabstand von 6mm der sich dann jedoch nicht als das Optimum herausstellen sollte.

Der optimale Rippenabstand ergibt sich aus der größeren Oberfläche bei geringerem Rippenabstand (mehr Rippen) zum einen, und der abnehmenden Fähigkeit des strömenden Fluid Wärme abzuführen, aufgrund des Druckverlusts der Strömung, herrührend von der Durchströmung der Rippenzwischenräume, auf der anderen. Zwischen diesen Faktoren gilt es ein Optimum zu finden.

Das Optimum liegt dort, wo die Strömung zwischen den Rippen so gering als möglich gebremst wird, die Oberfläche jedoch so groß als möglich ist.

Ist man nicht durch den Einbauraum begrenzt, löst man das Optimierungsproblem indem man Rippenabstände von der Breite der doppelten Grenzschichtdicke wählt (keine gegenseitige Beeinflussung der Strömungsschichten, geringster Druckverlust) und zugleich die Oberfläche über lange Rippen vergrößert.

In unserem Fall sind wir jedoch eingeschränkt auf eine Rippenhöhe von 15mm. Folglich gilt es den Rippenabstand zu optimieren, d. h. die Wärmeabfuhr für diesen Einflussfaktor zu maximieren.

Für die Berechnung bedeutet das Fehlen von Berechnungshinweisen, bezüglich des Druckverlustes, Abweichungen von den Messungen, die nur mittels einer Korrekturfunktion zu beheben sind.

Diese Korrekturfunktion beschreibt den Druckverlust in Abhängigkeit des Rippenabstandes und der Strömungsgeschwindigkeit.

$$Ko = f(\delta, w)$$

Die Korrekturfunktion wurde empirisch aus den Messergebnissen ermittelt und stellt eine brauchbare Näherung dar. Ihr maximaler Fehler beträgt 10%.

Siehe Diagramme: Gegenüberstellung der Körper; Messung – Rechnung sowie Tabellen und Diagramme über die Korrekturfunktion im Anhang.

Wie die Gegenüberstellung der Rippenkörper R15H20B45AW, R15H20B60AW und R15H20B75AW zeigt, liegt bei freier Konvektion (0 m/s) der optimale Rippenabstand bei 7,5 mm.

Dies ist auch der maßgebliche Bereich, da mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit die Werte der einzelnen Körper immer näher zusammenrücken und die Kühlung des Körpers dort sowieso gewährleistet ist. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt der Einfluss des Druckverlusts zudem ab, da die Grenzschicht zunehmend mit der Strömungsgeschwindigkeit kleiner wird und die Optimierung des Rippenabstandes dann wie leicht ersichtlich nur beschränkt Vorteile bringt.

$$\text{Grenzschicht } \delta = \sqrt{\frac{32 \cdot v \cdot l}{w}}$$

Mit v...Viskosität der Luft

L...Überströmlänge

w...Strömungsgeschwindigkeit

Lediglich bei der Queranströmung hebt sich der 4,5mm Körper von den restlichen Messergebnissen ab.

Aufgrund des engen Rippenabstandes erschwert dieser Körper bei schräger Anströmung das Strömen des Fluid noch zusätzlich und in höherem Maße als die restlichen Rippenabstände und bewirkt eine schlechtere Wärmeabfuhr.

Die Gegenüberstellung der Rippenabstände 7,5mm und 9mm hatte zum Ziel den optimalen Rippenabstand noch genauer auszuloten (*siehe Diagramm: Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B90AW; Rippenabstände 7,5mm, 9mm*).

Wie die Messergebnisse zeigen, liegt das Optimum im Bereich zwischen 7,5mm und 9mm, wobei der Rippenkörper mit 7,5mm Rippenabstand geringfügig (2°C bei freier Konvektion) besser ist.

Für die Konstruktion und Dimensionierung der Kühlrippen in der praktischen Anwendung bedeutet dies, dass jener Rippenabstand zwischen 7,5mm und 9mm gewählt werden soll, bei dem die meisten Rippen auf dem Körper Platz haben.

2.2 Rippenstärke:

Ein weitere Anhaltspunkt der Maximierung der Wärmeabfuhr ist die Rippenstärke. Auch sie hat Anteil an der Maximierung der Oberfläche, es ist jedoch auf den Rippenwirkungsgrad, die Mindestfestigkeit der Rippen und auf die Fertigung Rücksicht zu nehmen. Folglich kann die Rippenstärke nur soweit minimiert werden, als alle Festigkeitsforderungen an die Rippen erfüllt sind, die Fertigung noch möglich bzw. wirtschaftlich sinnvoll ist und der Rippenwirkungsgrad nicht so weit verschlechtert wird, dass die Rippen am vorderen Drittel kaum mehr Wärme abführen. Ein Sicherheitsaspekt obliegt gleichfalls der Optimierung der Rippenbreite. So darf die Rippe nicht so schmal sein, dass eine Verletzungsgefahr durch eine eventuelle Schneidwirkung der Rippe besteht.

Im Zuge der Maximierung der Wärmeabfuhr reduzierten wir die Rippenstärke von 2mm auf 1mm. Wie die Gegenüberstellung der Rippenkörper in Diagramm: *R15H20B75AW und R15H10B75AW; Rippenbreite 1mm und 2mm* zeigt, bewirkt eine Verringerung der Rippenstärke eine Absenkung der Temperatur

wie erwartet. Die erzielte Verbesserung betrug bei freier Konvektion (0m/s) rund 10°C, mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit verringerte sich der positive Einfluss der geringeren Rippenstärke jedoch zunehmend.

Bezüglich des Rippenwirkungsgrades wäre eine weitere Verringerung der Rippenstärke vorteilhaft gewesen, aufgrund von Sicherheitsüberlegungen und der immer aufwendigeren Fertigung blieb es jedoch bei einer Rippenstärke von 1mm.

Im Anwendungsfall ist es nicht sinnvoll unter die Grenze von 1mm Rippenabstand zu gehen, der Rippenwirkungsgrad sollte zudem immer im Auge behalten werden.

2.3 Querfräslungen:

Wie wir schon festgestellt haben, hängt die Wärmeabfuhr maßgeblich von den Strömungsverhältnissen, sprich laminare oder turbulente Strömung ab. Anhand der Diagramme sind diese Strömungsverhältnisse gut zu erkennen. Der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung findet bei allen Körpern im Bereich von 0,5m/s und 1m/s statt. Bemerkenswert ist jedoch, dass der Übergang bei der Queranströmung in einem engeren Bereich vor sich geht als bei der Geradanströmung wo fast ein fließender Übergang zu beobachten ist.

Da eine turbulente Strömung maßgeblich den abgeführten Wärmestrom beeinflusst, ist ein weiterer Faktor der Rippendimensionierung das Umkippen in eine turbulente zu begünstigen.

Dies versuchten wir durch Querfräslungen zu bewerkstelligen. Bei Geradanströmung versprachen wir uns davon zusätzliche Turbulenzen durch die geschaffenen Kanten, bei Schräganströmung zusätzlich eine Verbesserung der Strömungsbedingungen, d.h. ein geringerer Strömungswiderstand aufgrund der Kanäle.

Die Querfräslungen wurden in der selben Breite ausgeführt wie die Rippenabstände: 7,5mm breit und 4 mal bzw. 8 mal am Umfang.

Die Verringerte Oberfläche sollte durch bessere Strömungsbedingungen nicht nur kompensiert, sondern im Gegenteil die Wärmeabfuhr verbessert und die Temperatur gesenkt werden.

Die ersten Messergebnisse (*siehe Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B75AW-4x75A; Rippenabstände 7,5mm und 7,5mm mit Querfräslungen*) ergaben jedoch ein anderes Bild. Die Verringerte Oberfläche konnte nicht wettgemacht werden. Die Ergebnisse waren bei Geradanströmung durchwegs um 5°C schlechter, lediglich bei 2m/s war eine Verbesserung messbar. Bei Queranströmung stellte sich ein besseres Ergebnis bei 0,5m/s ein.

Den Körper mit 8 Querfräslungen am Umfang haben wir bisher noch nicht getestet, wir erwarten allerdings auch keine Verbesserung sondern eine zusätzliche Verringerung der Wärmeabfuhr aufgrund der noch geringeren Oberfläche.

2.4 Schwarzer Körper:

Ein weiterer Körper, der letzte in unserem Prüfprogramm stellt der schwarz eloxierte Körper dar. Aufgrund der schwarzen Farbe wird die Wärmeabfuhr durch Strahlung erhöht, die Strömungseigenschaften bleiben unverändert, d. h. auf die Wärmeabfuhr durch Konvektion wird kein Einfluss genommen.

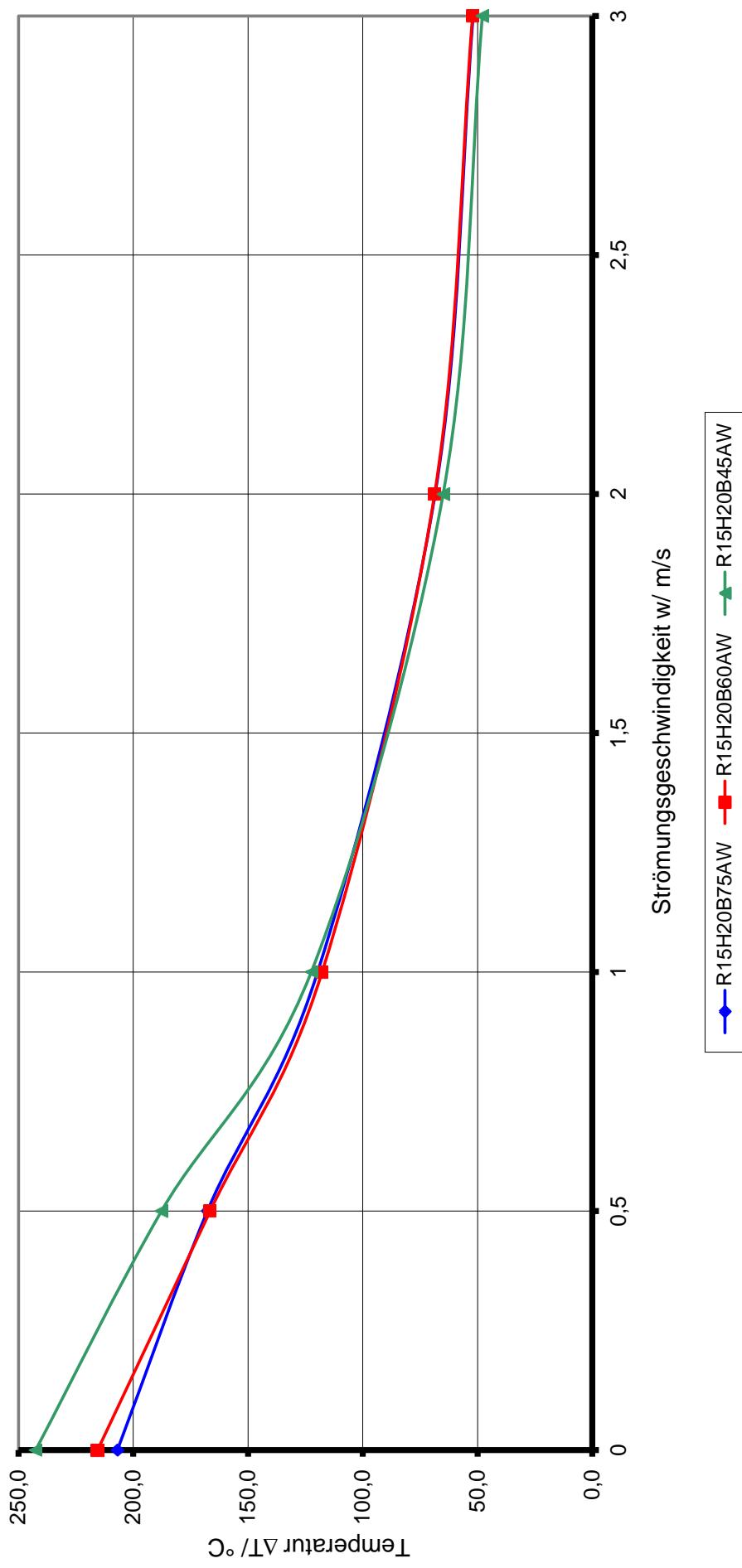
3. Konstruktionshinweise:

Die aufgrund der Messungen erlangten Kenntnisse können in der Praxis in folgender Form zur Anwendung gelangen:

- Den gegebenen Einbauraum grundsätzlich ausnützen. D. h. die Rippen so lang wie nötig bzw. ausreichend lang ausführen falls genügend Raum zur Verfügung steht.
- Der Rippenabstand ist so zu bestimmen, dass jener Abstand zwischen 7,5mm und 9mm gewählt wird, bei dem am meisten Rippen auf dem Körper Platz haben.
- Die Rippenstärke ist so gering wie möglich auszuführen, allerdings muss der Rippenwirkungsgrad stets im Auge behalten werden. Auf Gefahren durch scharfe Kanten, Schneidegefahr → Verletzungsgefahr ist insbesondere zu achten. Ein Grenzwert ist eine Rippenstärke von 1mm.
- Querfräslungen sind aufgrund des höheren Fertigungsaufwandes nicht zu empfehlen.
- Den Rippenkörper schwarz eloxieren um die Wärmeabfuhr durch Strahlung zu maximieren.

Gegenüberstellung R15H20B45AW, R15H20B60AW und R15H20B75AW

Rippenabstände 4,5mm, 6mm und 7,5mm
Anströmung 0°

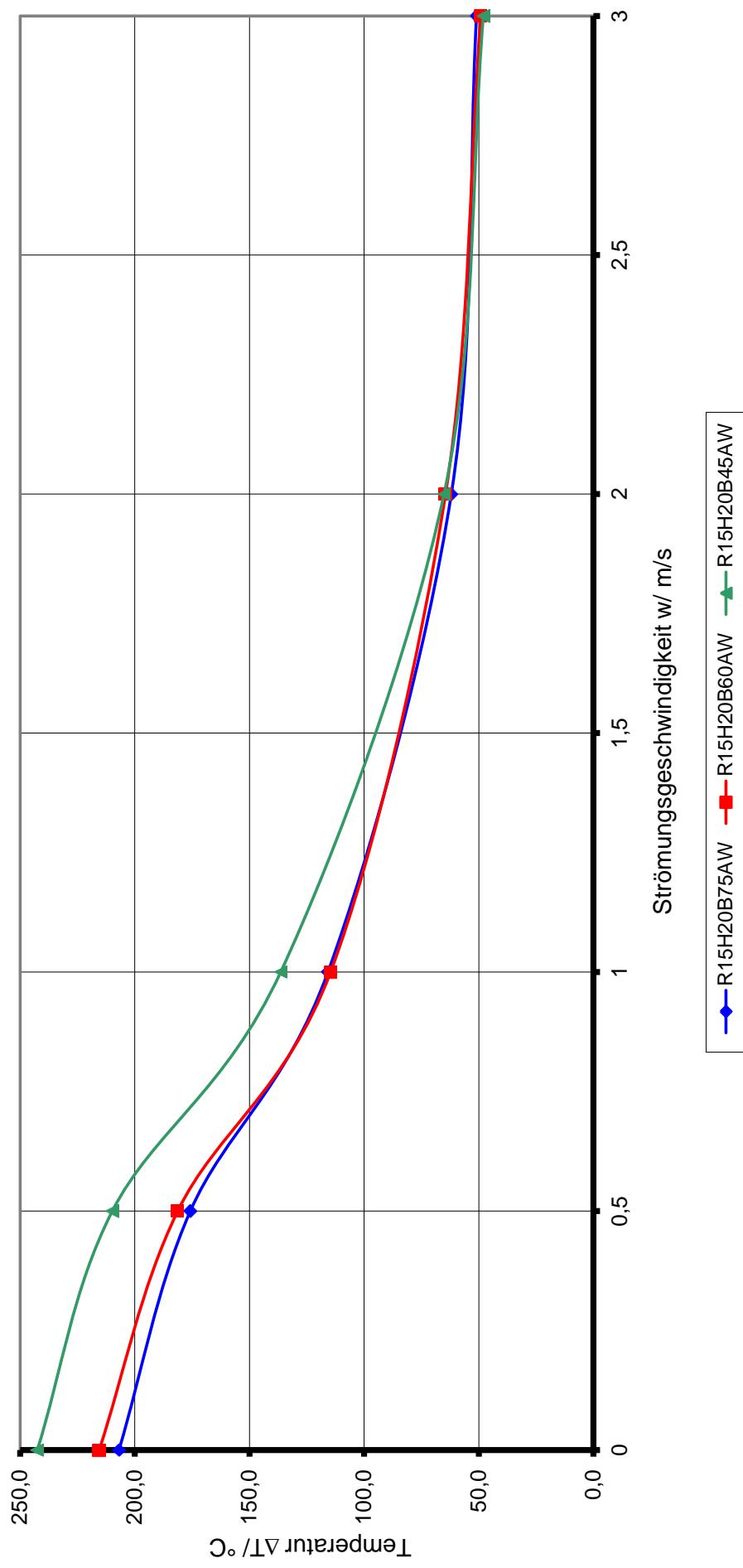


Abschnitt E

Vergleichsdiagramm R_Abstand_4,5_6_7,5_0°

Gegenüberstellung R15H20B45AW, R15H20B60AW und R15H20B75AW

Rippenabstände 4,5mm, 6mm und 7,5mm
Anströmung 45°

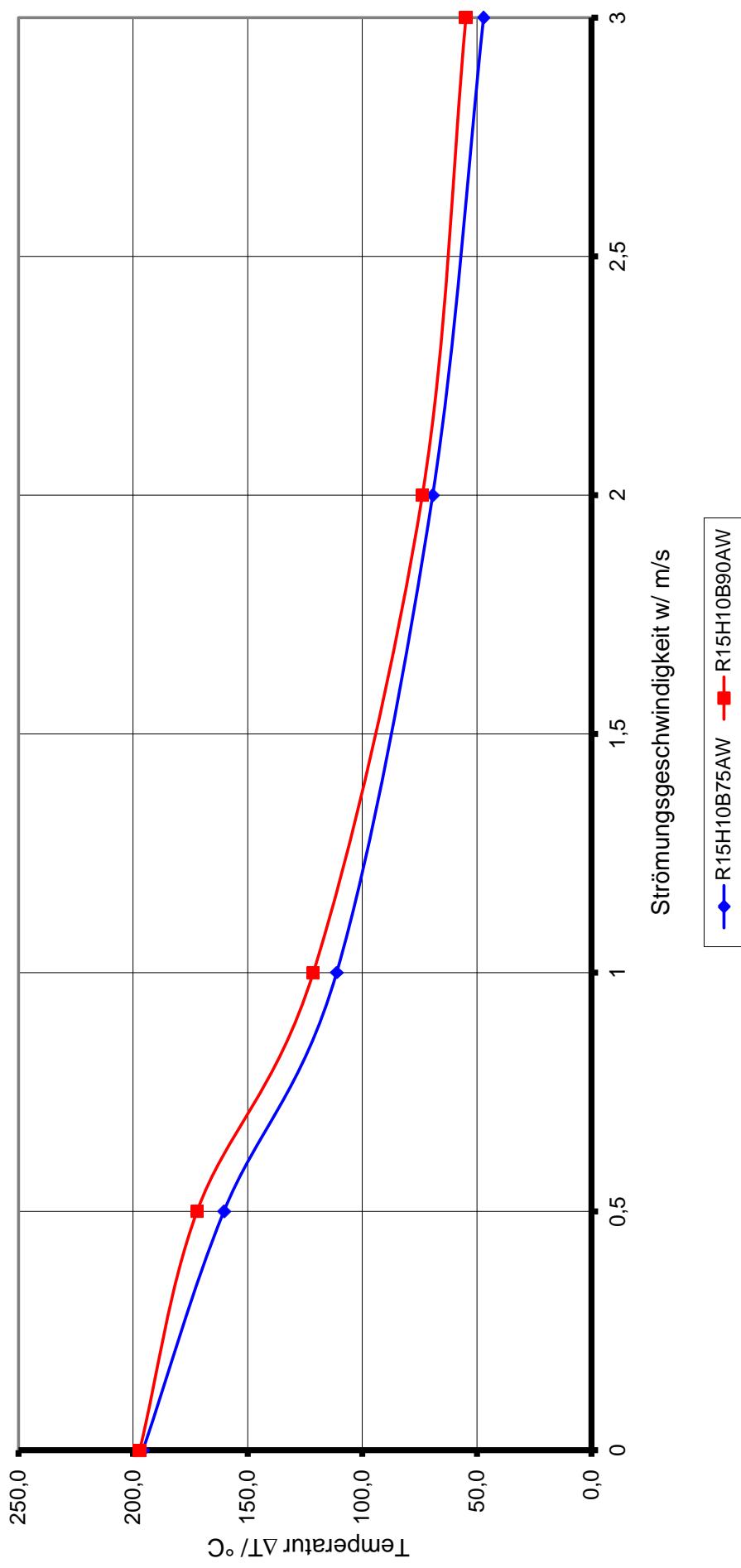


Abschnitt E

Vergleichsdiagramme R_Abstand_4,5_6_7,5_45°

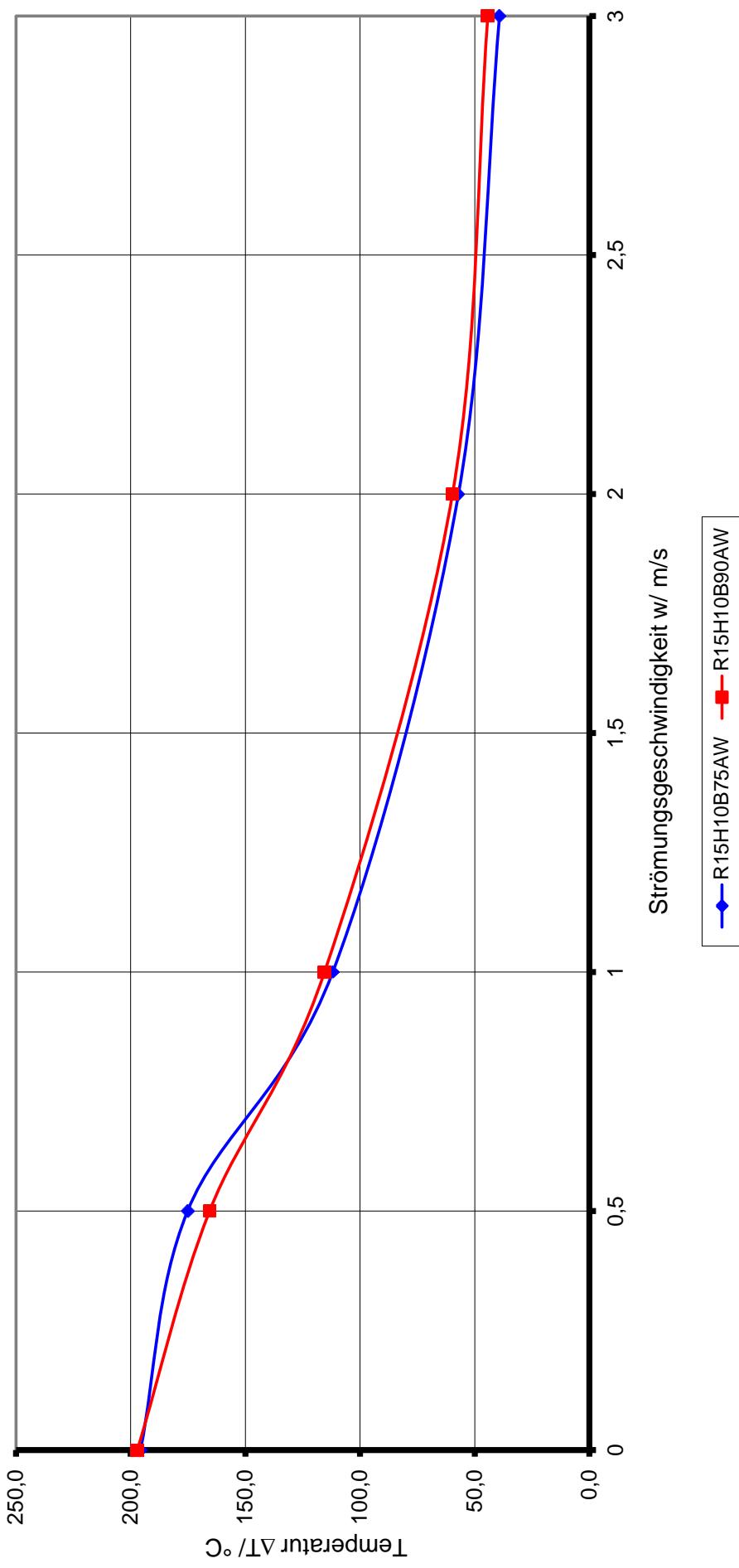
Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B90AW

Rippenabstände 7,5mm, 9mm
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B90AW

Rippenabstände 7,5mm und 9mm
Anströmung 45°

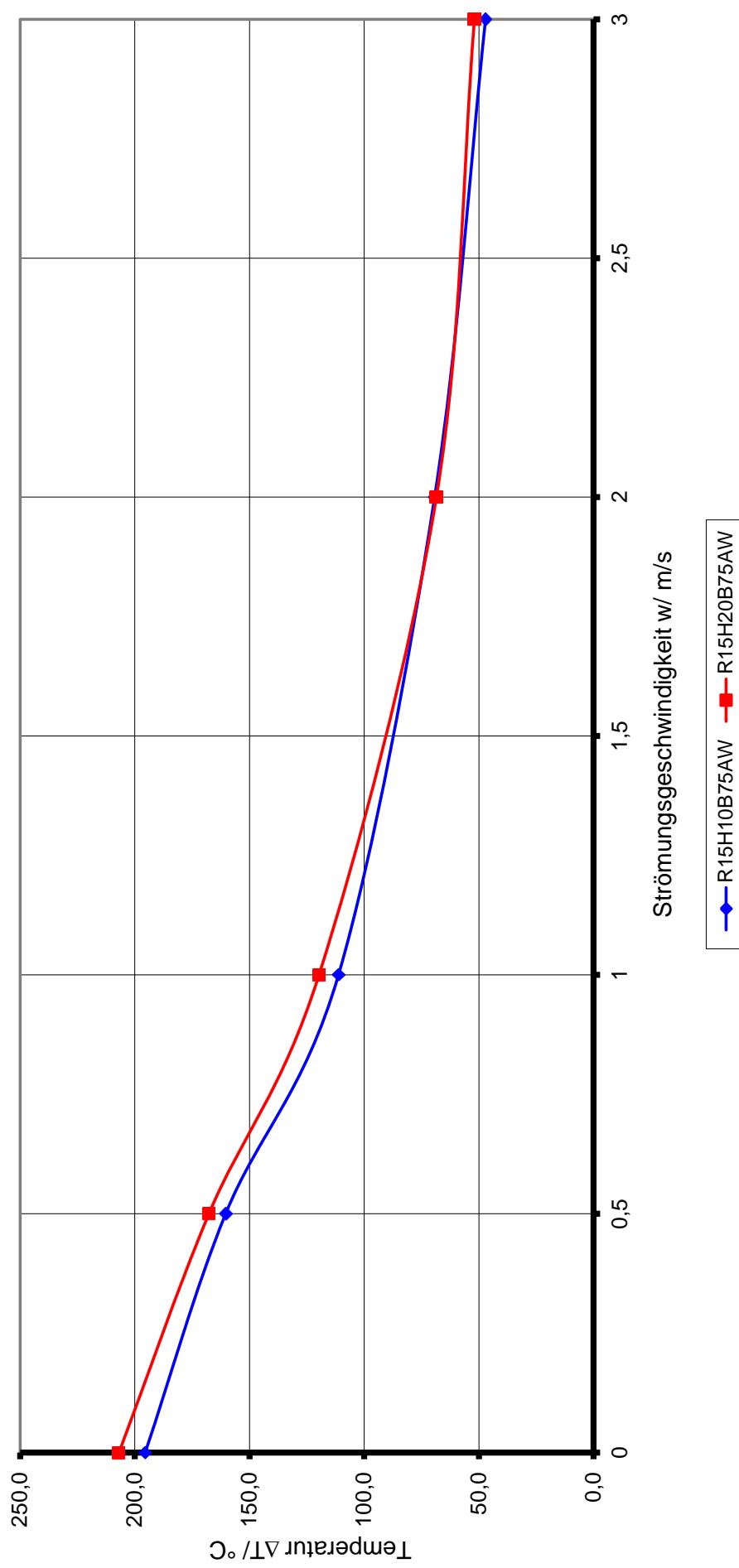


Abschnitt E

Vergleichsdiagramme Rippenabstände 7,5 u 9_45°

Gegenüberstellung R15H20B75AW und R15H10B75AW

Rippenbreite 1mm und 2mm
Anströmung 0°

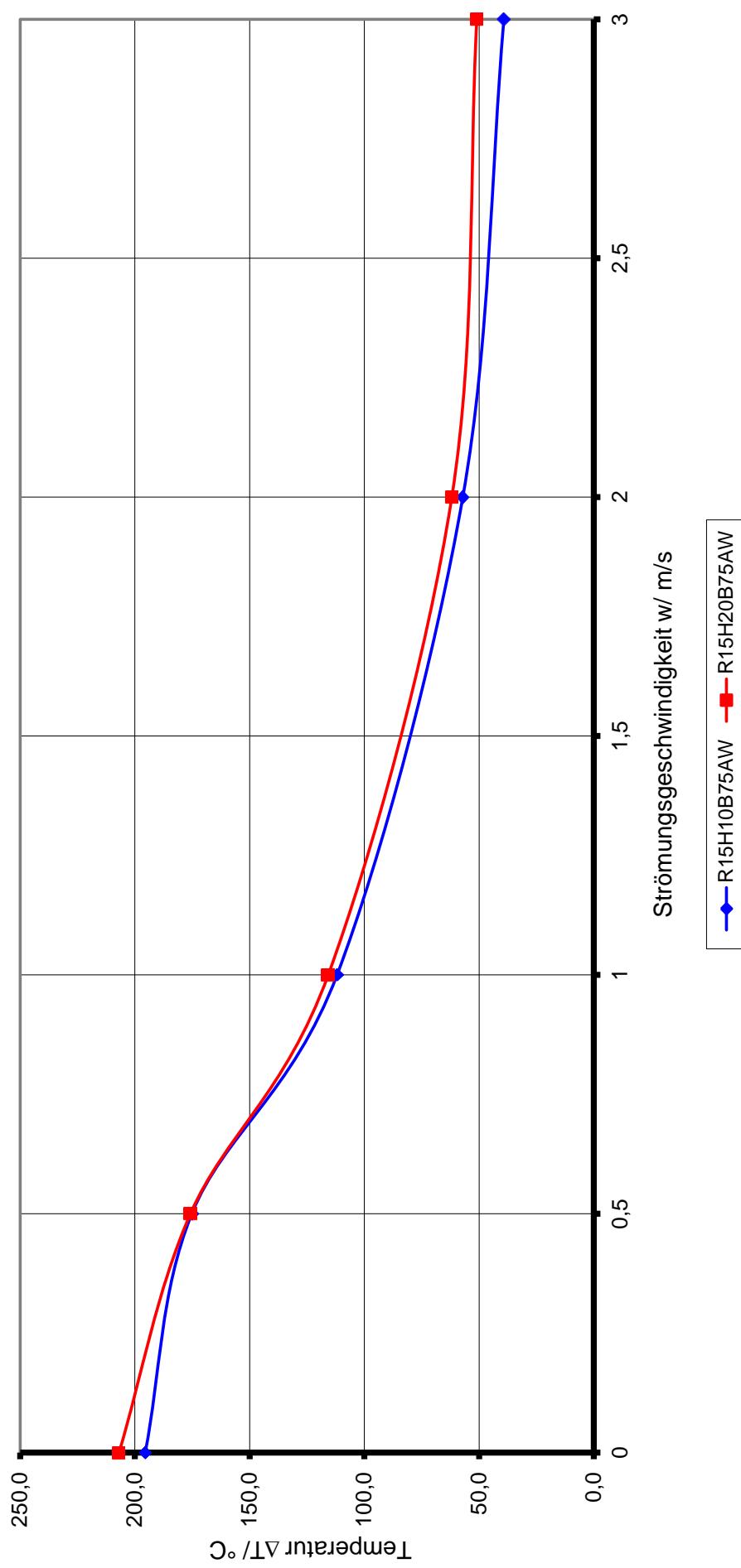


Abschnitt E

Vergleichsdiagramme Rippenbreite1_u_2_0°

Gegenüberstellung R15H20B75AW und R15H10B75AW

Rippenbreite 1mm und 2mm
Anströmung 45°

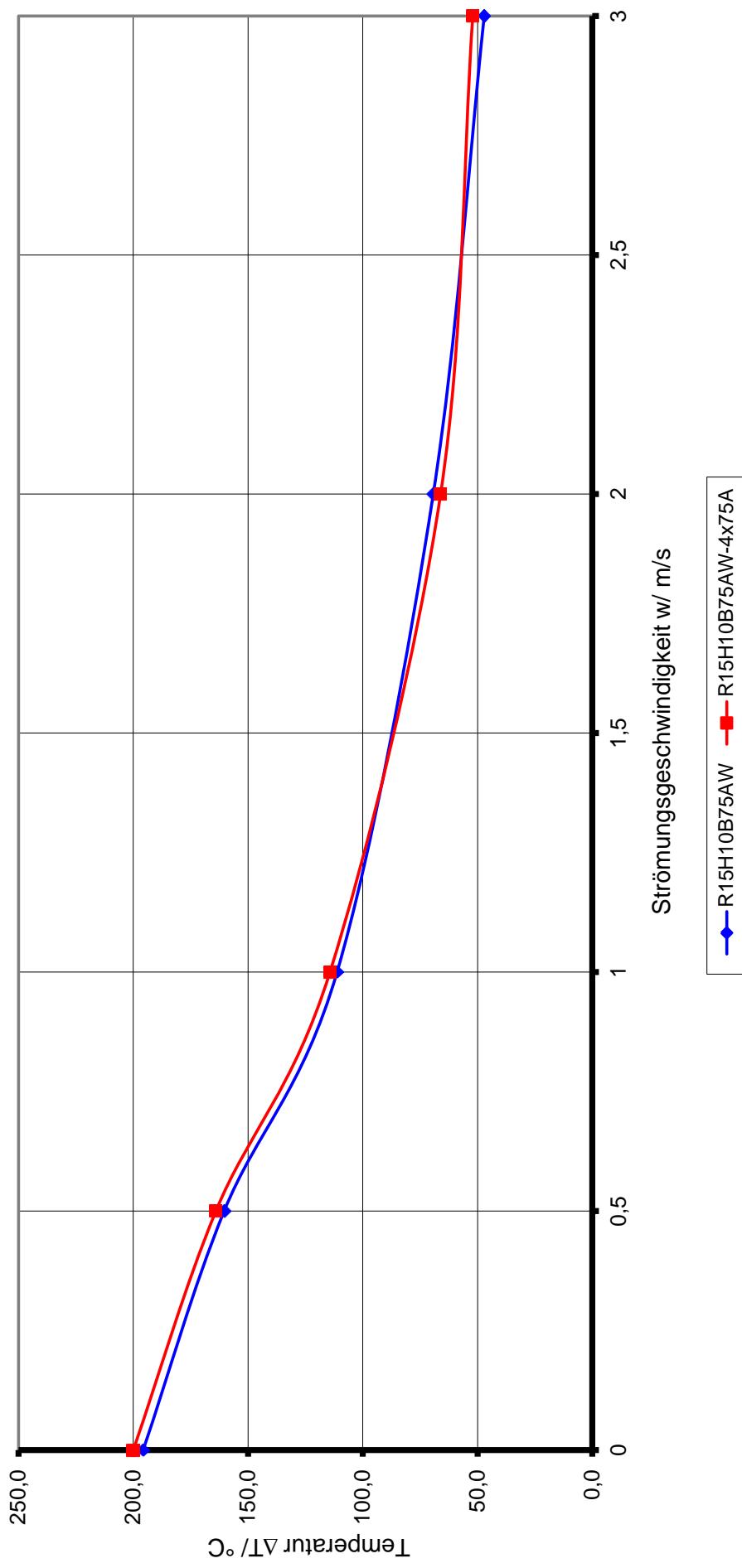


Abschnitt E

Vergleichsdiagramme Rippenbreite1_u_2_45°

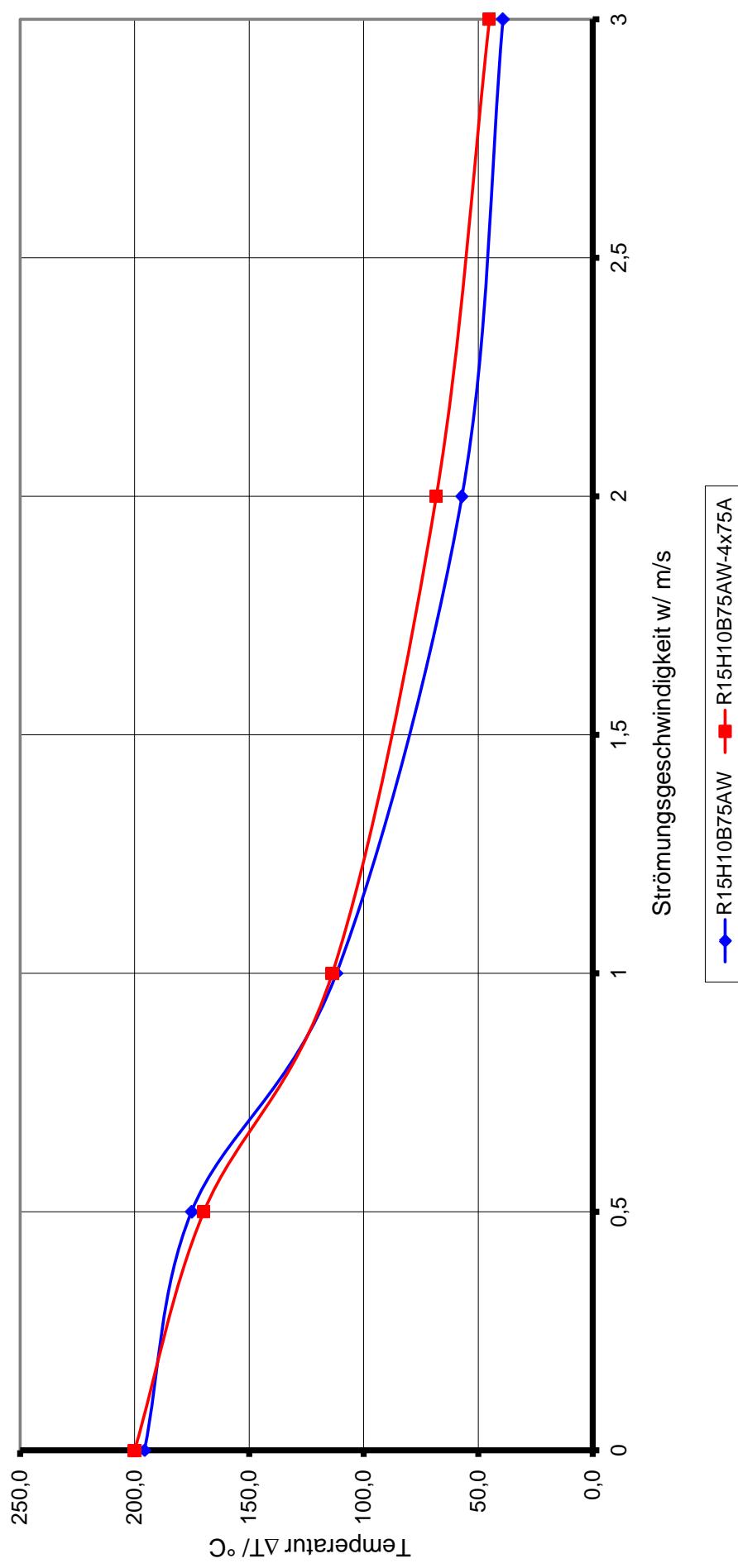
Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B75AW-4x75A

Rippenabstände 7,5mm und 7,5mm mit Querfräslungen
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B75AW-4x75A

Rippenabstände 7,5mm und 7,5mm mit Querfrässungen
Anströmung 45°

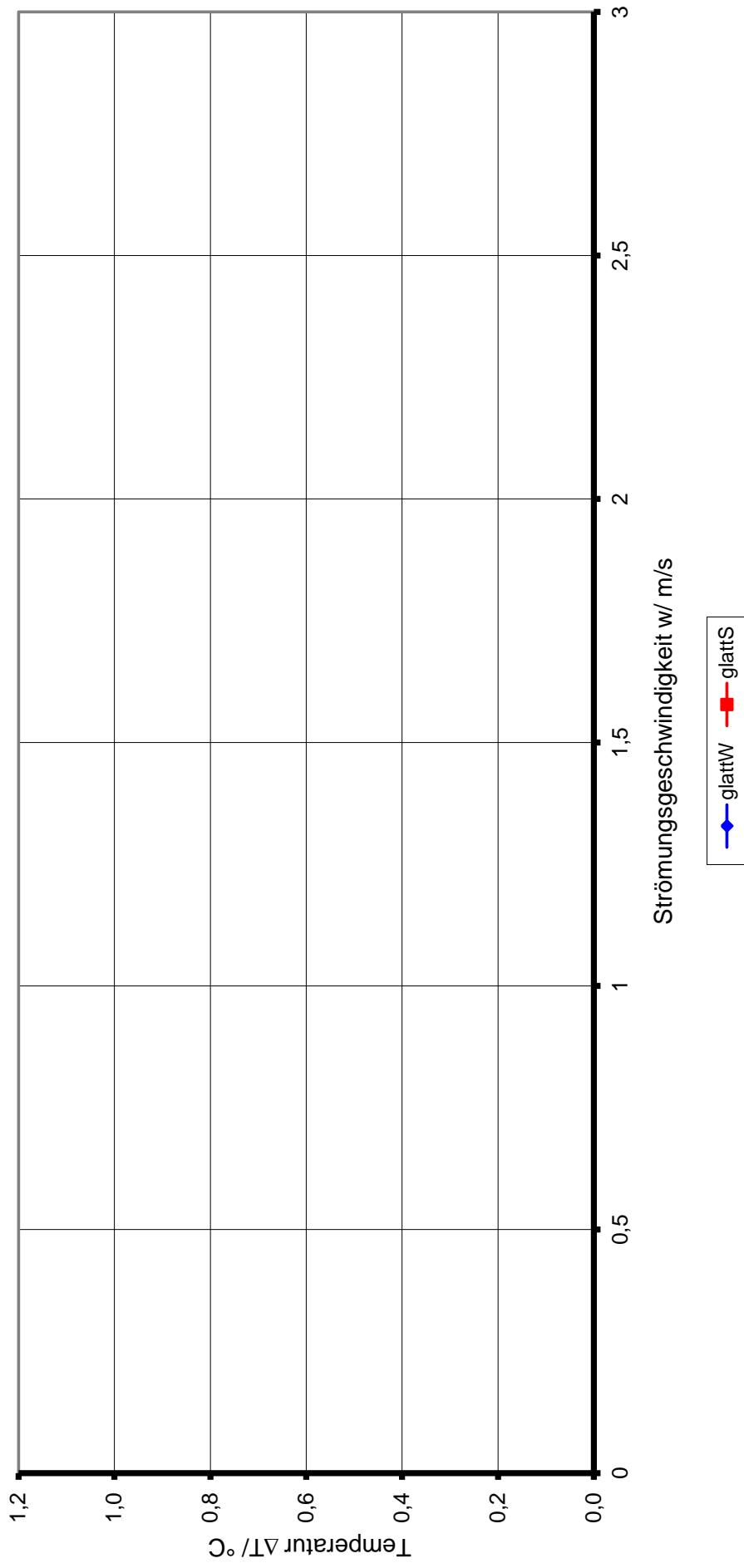


Abschnitt E

Vergleichsdiagramm mit_u_ohne_Querfr._45°

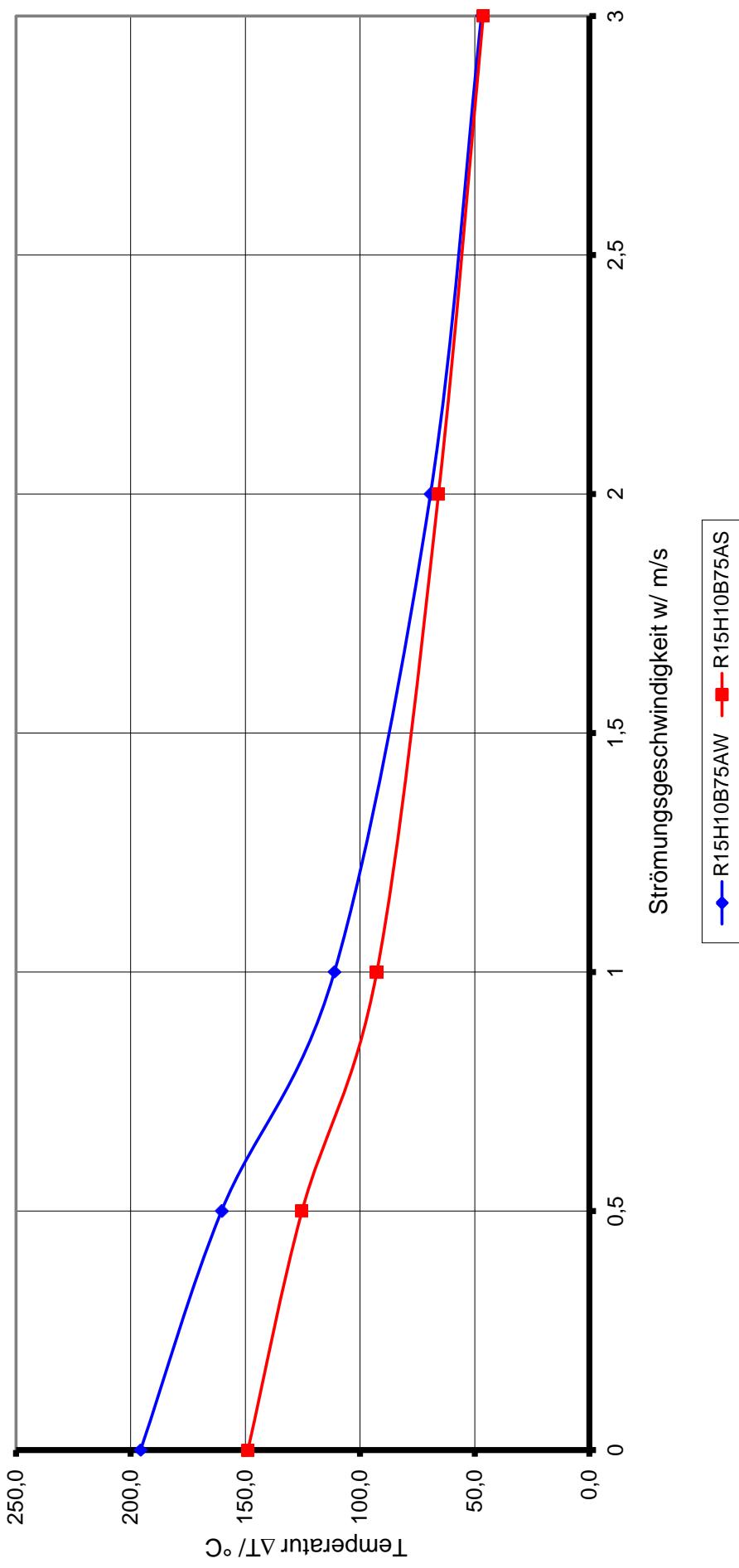
Gegenüberstellung glattW und glattS

Farbe Schwarz und Weiß
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H10B75AW und R15H10B75AS

Farbe Schwarz und Weiß
Anströmung 0°

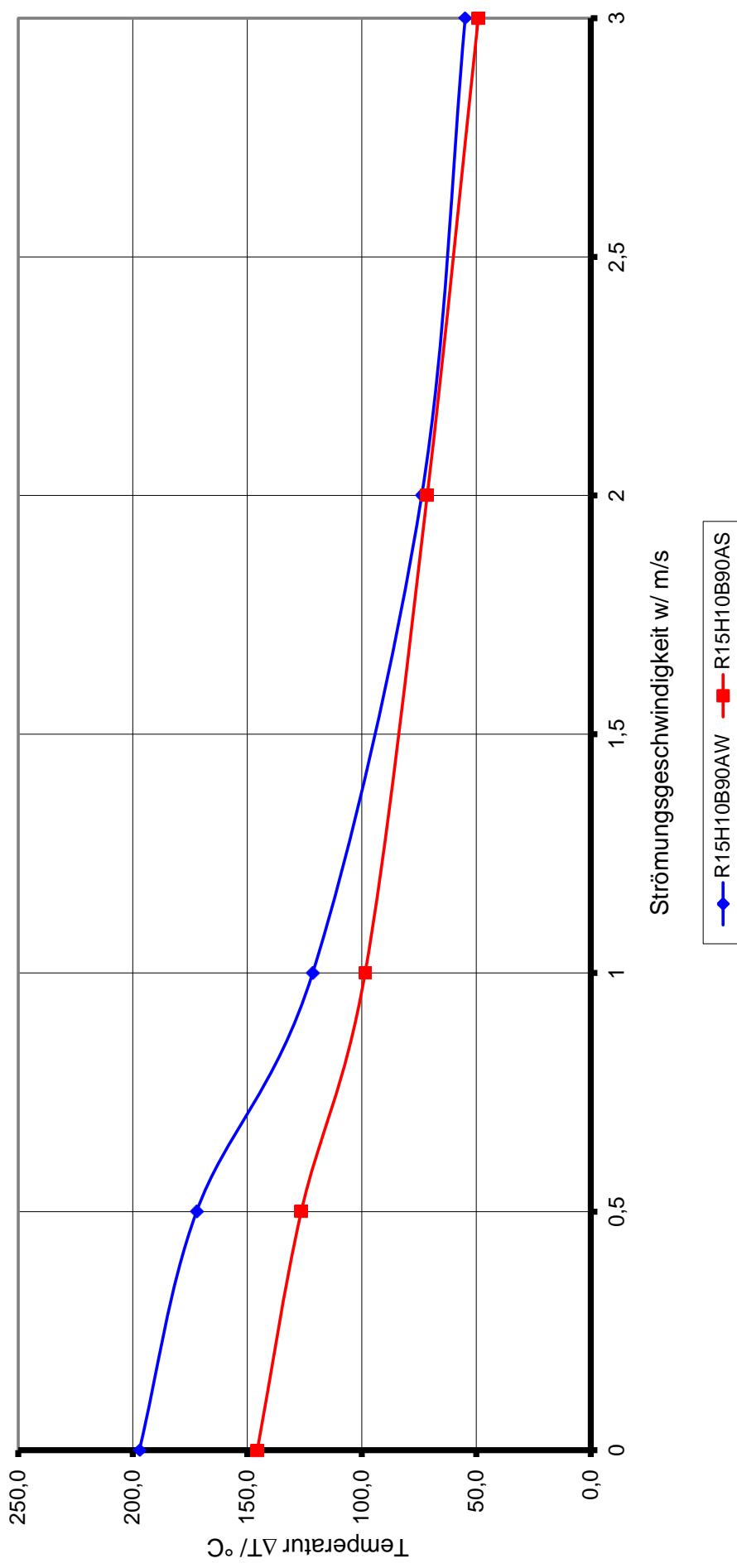


Abschnitt E

VergleichsdiagrammeSchwarz-Weiß_B75_0°

Gegenüberstellung R15H10B90AW und R15H10B90AS

Farbe Schwarz und Weiß
Anströmung 0°



Abschnitt E

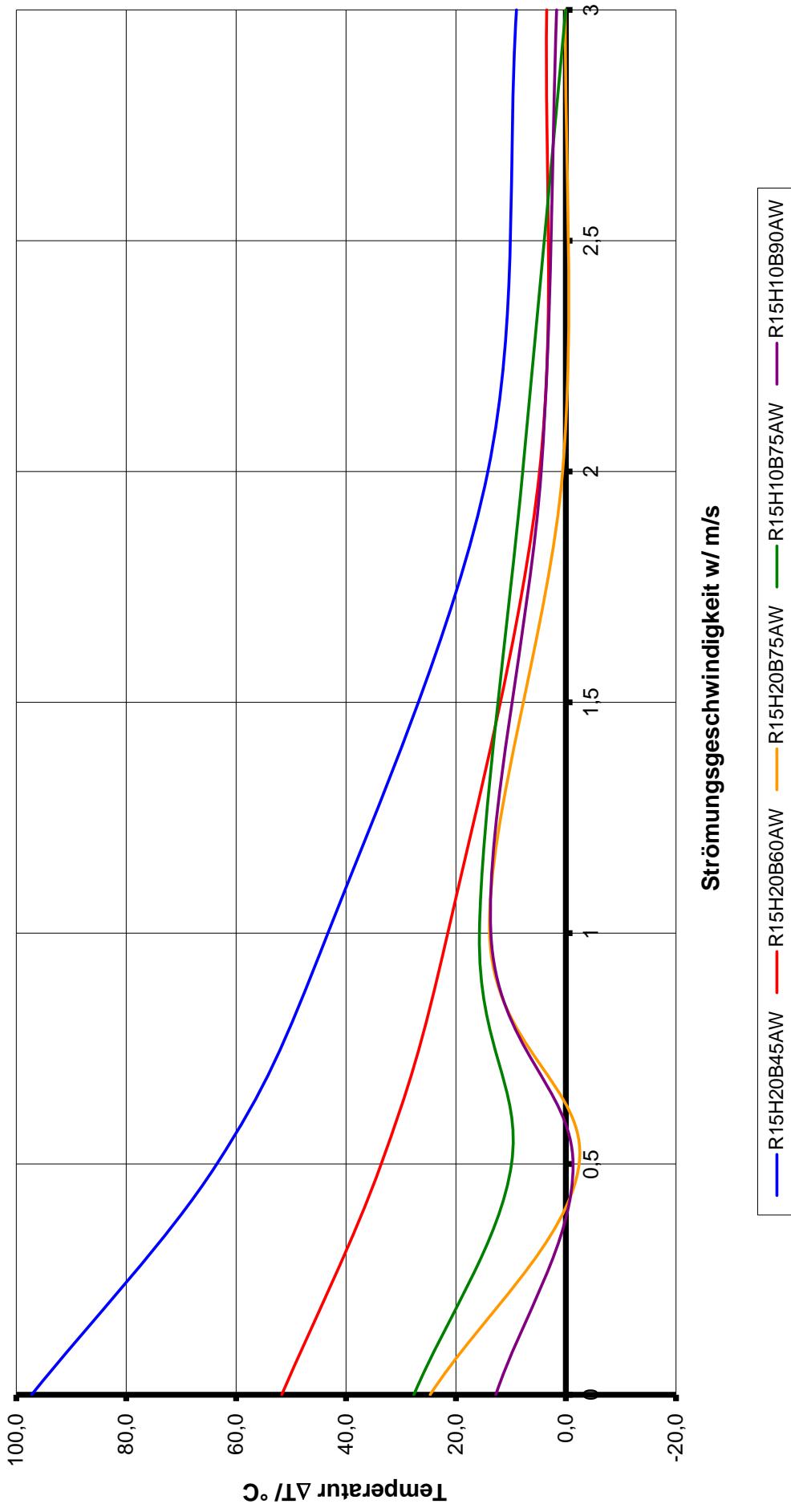
VergleichsdiagrammeSchwarz-Weiß_B90_0°

Gegenüberstellung von Messung und Rechnung bei Anströmung unter 0°

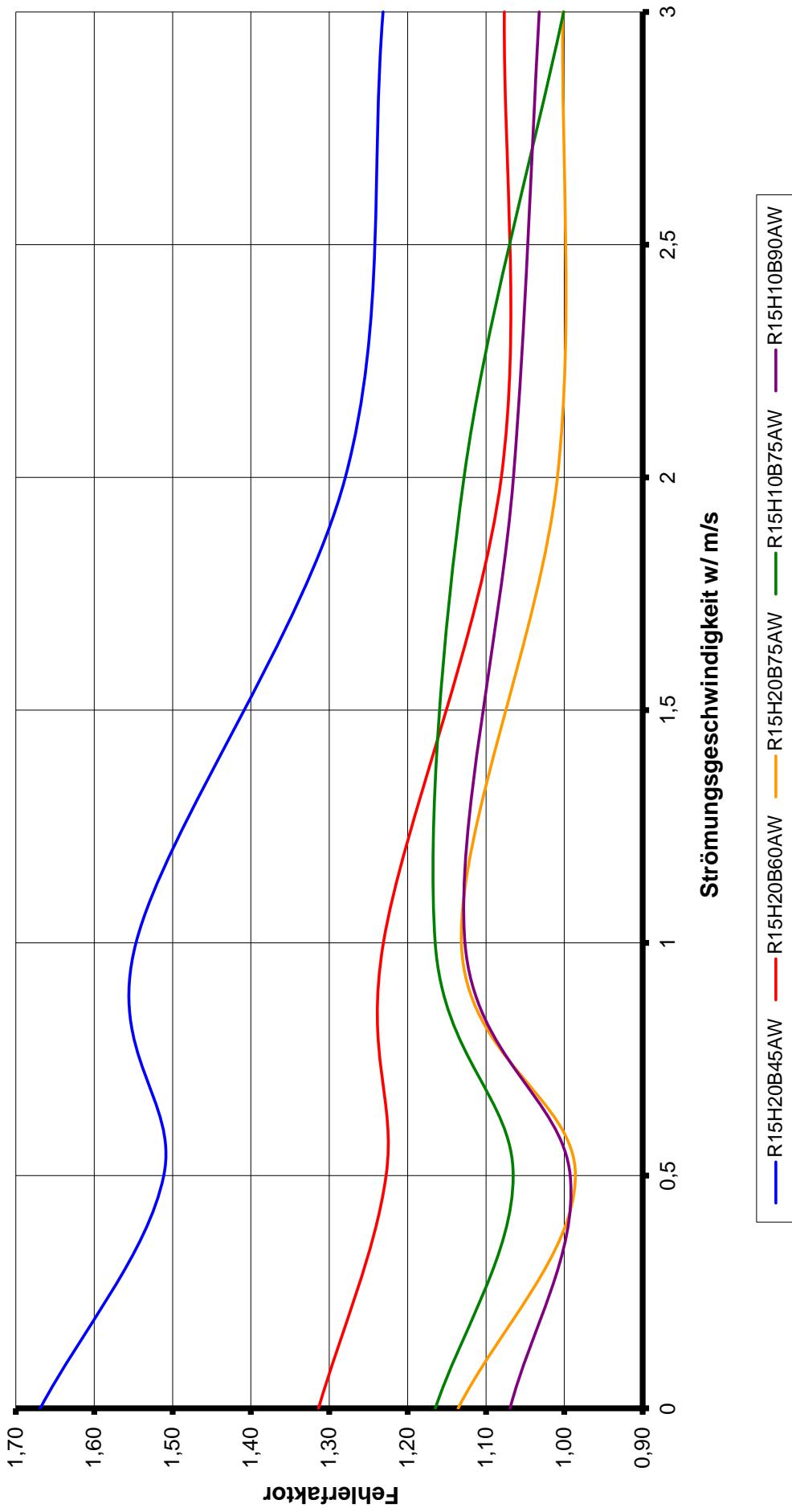
		R15H20B45AW						R15H20B60AW					
Strömungs-geschw.	Messung	Rechnung	Differenz	Faktor	Korrektur	Prozent	Messung	Rechnung	Differenz	Faktor	Korrektur	Prozent	
m/s	°C	°C	°C	1	°C	%	°C	°C	°C	1	°C	%	
0	242,5	145,3	97,2	1,67	248,8	2,6%	216,5	164,8	51,7	1,31	197,9	-8,6%	
0,5	187,7	124,2	63,5	1,51	190,6	1,5%	181,3	147,7	33,6	1,23	170,0	-6,3%	
1	122,5	79,2	43,3	1,55	113,1	-7,7%	114,6	93,1	21,5	1,23	104,3	-9,0%	
2	65,0	50,8	14,2	1,28	66,3	2,0%	64,5	59,7	4,8	1,08	64,8	0,5%	
3	47,9	38,9	9,0	1,23	48,1	0,5%	49,2	45,7	3,5	1,08	48,8	-0,9%	
		R15H20B75AW						R15H10B75AW					
Strömungs-geschw.	Messung	Rechnung	Differenz	Faktor	Korrektur	Prozent	Messung	Rechnung	Differenz	Faktor	Korrektur	Prozent	
m/s	°C	°C	°C	1	°C	%	°C	°C	°C	1	°C	%	
0	206,9	182,2	24,7	1,14	195,9	-5,3%	195,7	168,0	27,7	1,16	180,6	-7,7%	
0,5	167,7	170,1	-2,4	0,99	179,7	7,2%	161,6	151,7	9,9	1,07	160,3	-0,8%	
1	119,7	105,8	13,9	1,13	110,6	-7,6%	111,2	95,5	15,7	1,16	99,8	-10,3%	
2	68,5	67,9	0,6	1,01	70,1	2,3%	69,3	61,4	7,9	1,13	63,4	-8,5%	
3	52,0	51,9	0,1	1,00	53,2	2,3%	47,1	47,1	0,0	1,00	48,3	2,4%	
		R15H10B90AW											
Strömungs-geschw.	Messung	Rechnung	Differenz	Faktor	Korrektur	Prozent							
m/s	°C	°C	°C	1	°C	%							
0	197,1	184,3	12,8	1,07	190,5	-3,3%							
0,5	172,1	173,4	-1,3	0,99	177,8	3,3%							
1	121,4	107,7	13,7	1,13	109,9	-9,5%							
2	73,8	69,3	4,5	1,06	70,3	-4,7%							
3	54,8	53,1	1,7	1,03	53,7	-2,0%							

Messung: Messwerte ΔT der Prüfkörper
 Rechnung: Rechenergebnis ohne Korrekturfunktion; d. h. Berechnung gemäß Theorie
 Differenz: Abweichung von Messung und Rechnung
 Faktor: Verhältnis Messung zu Rechnung
 Korrektur: Rechenergebnis mit Korrekturfunktion
 Prozent: Abweichung des korrigierten Ergebnisses von der Messung

Differenz zwischen Messung und Rechnung Anströmung 0°

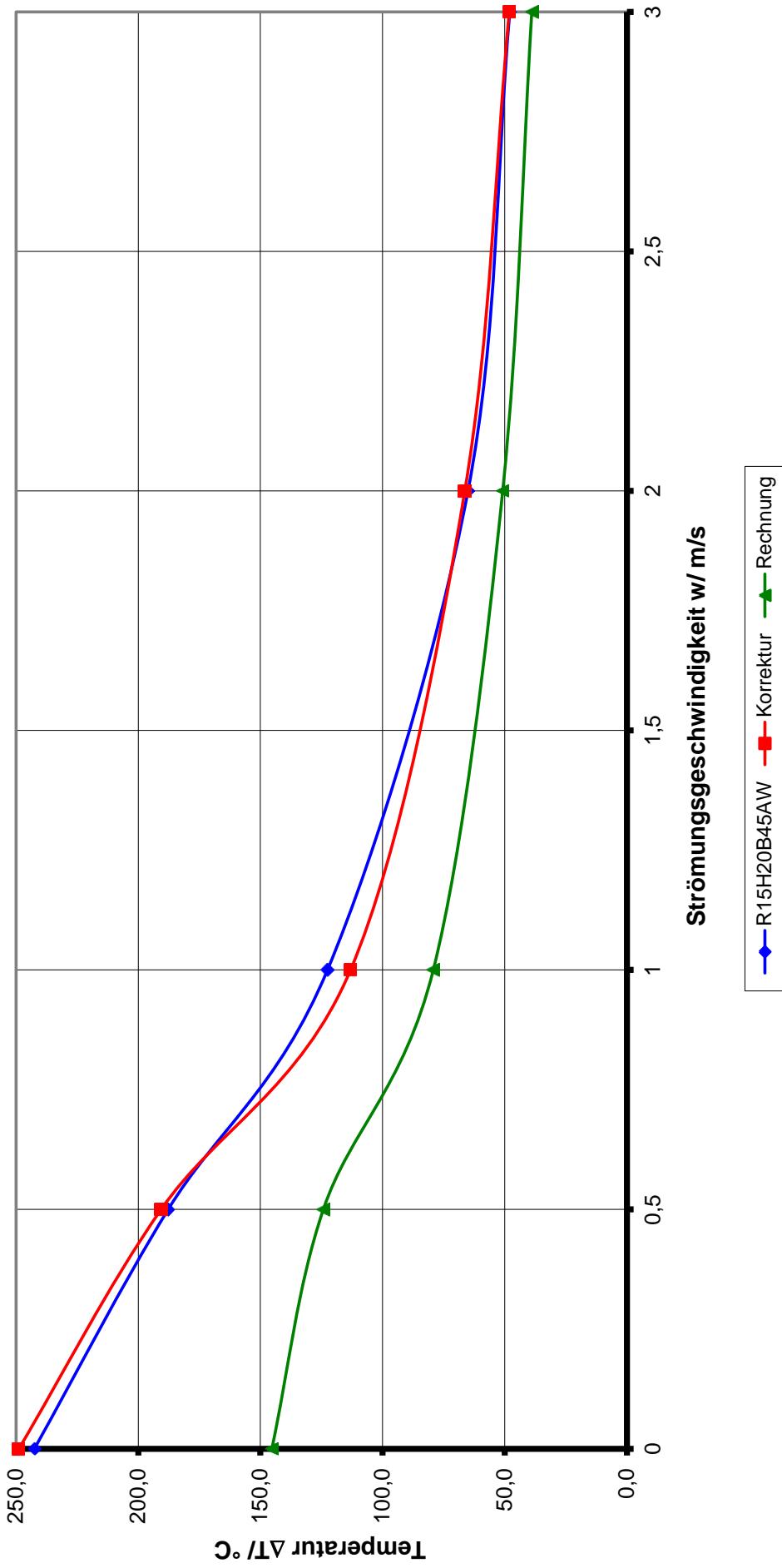


Verhältnis Messung zu Rechnung Anströmung 0°



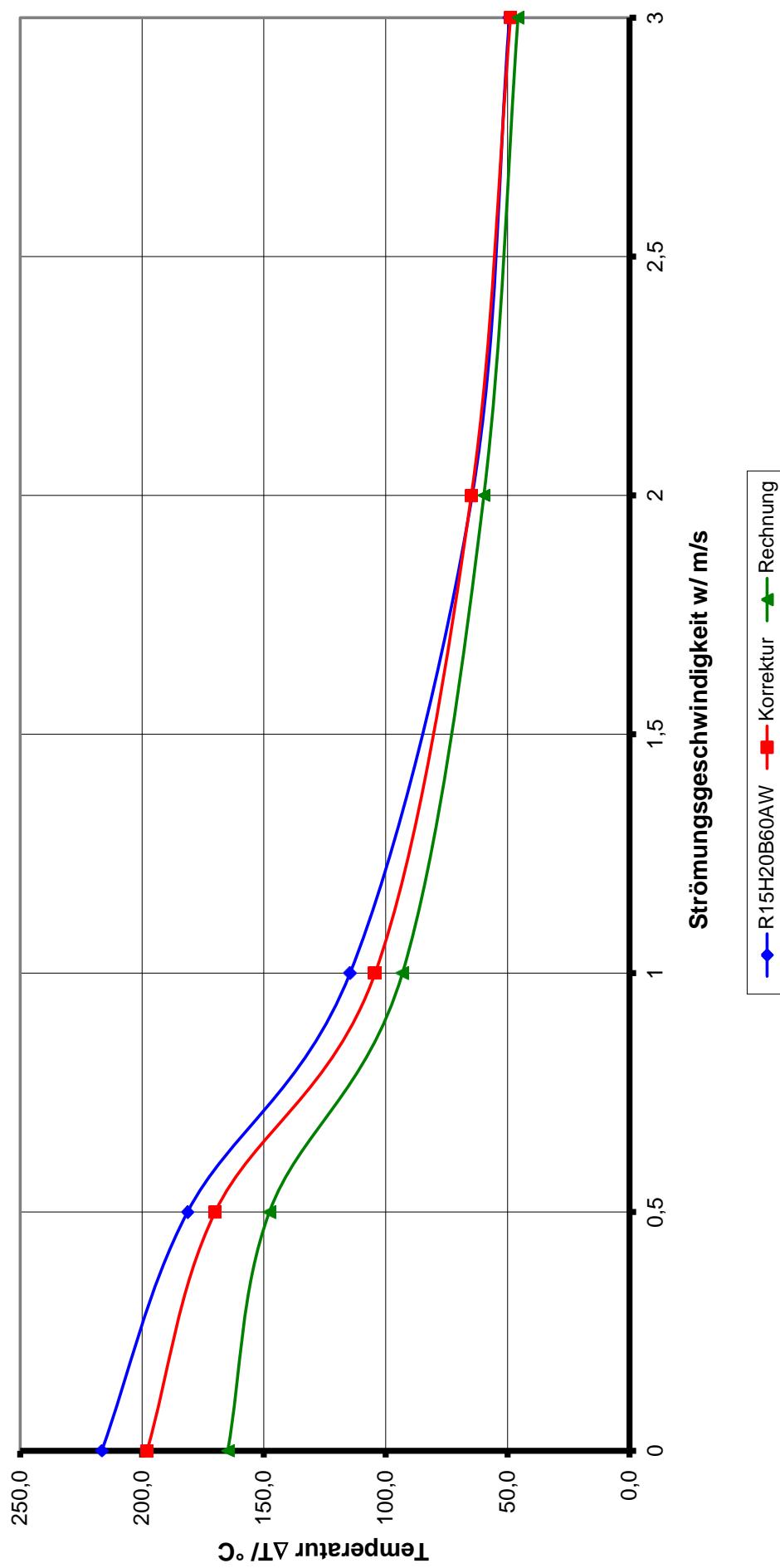
Gegenüberstellung R15H20B45AW

Messung - Rechnung
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H20B60AW

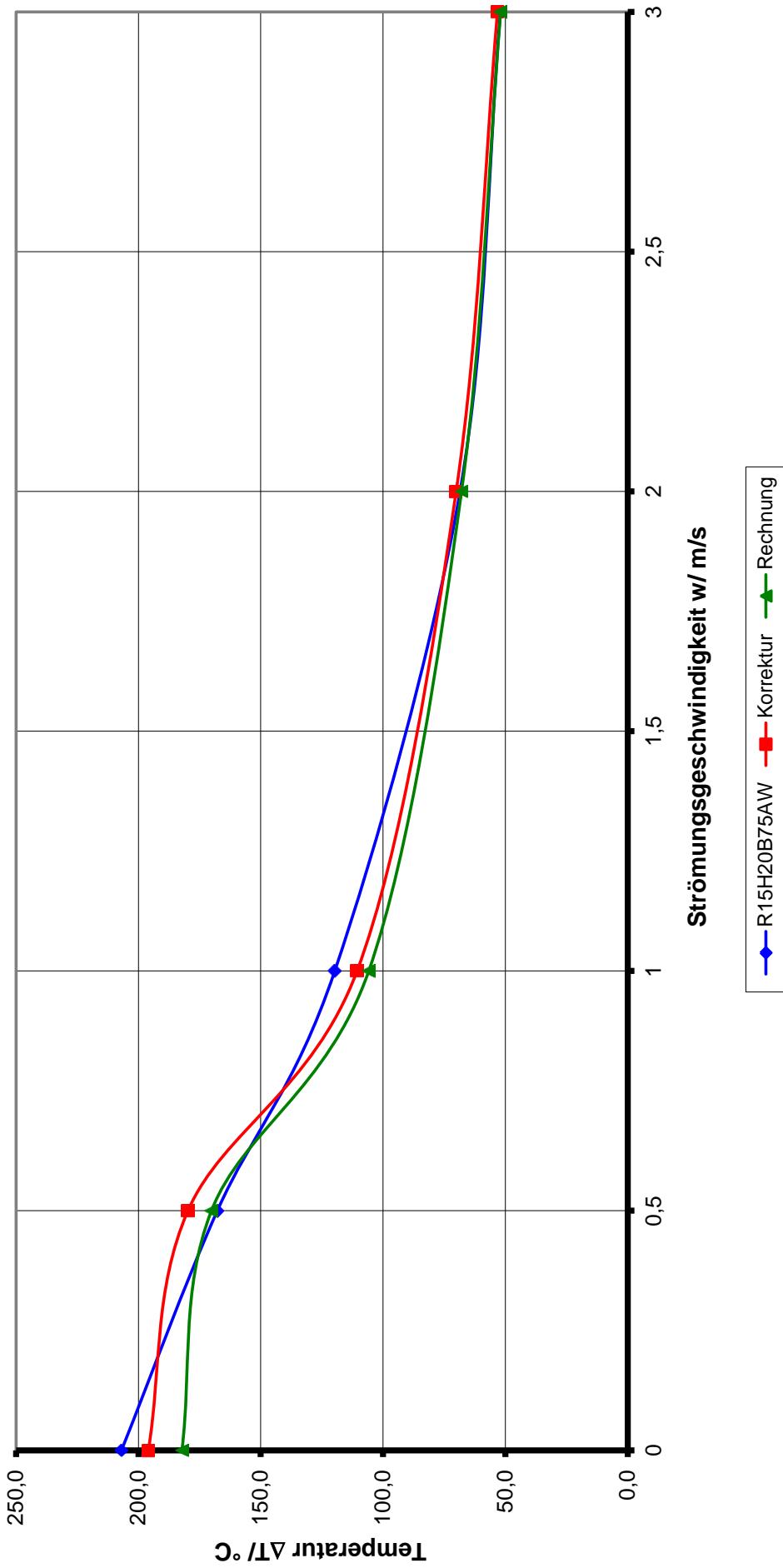
Messung - Rechnung
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H20B75AW

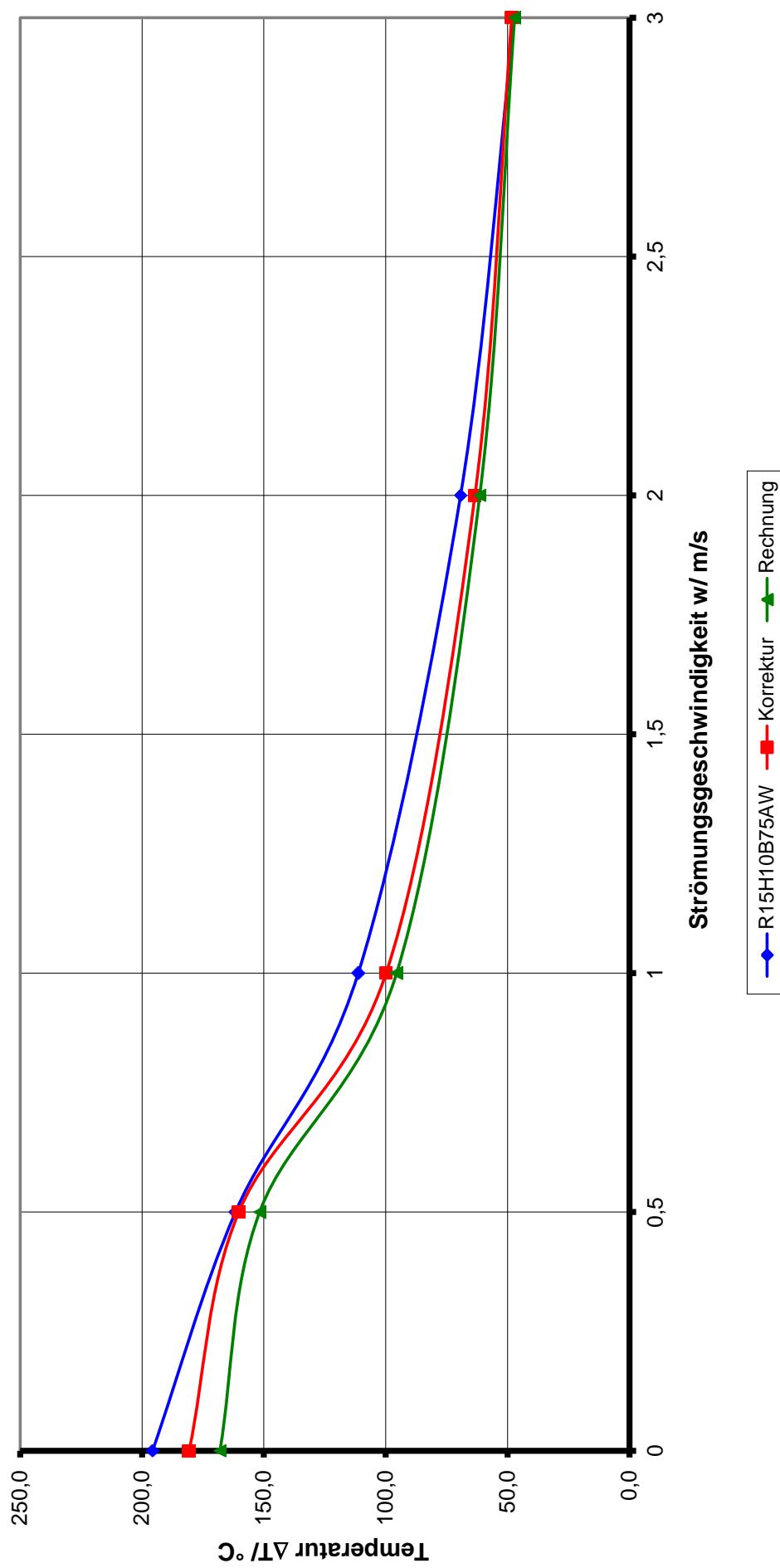
Messung - Rechnung

Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H10B75AW

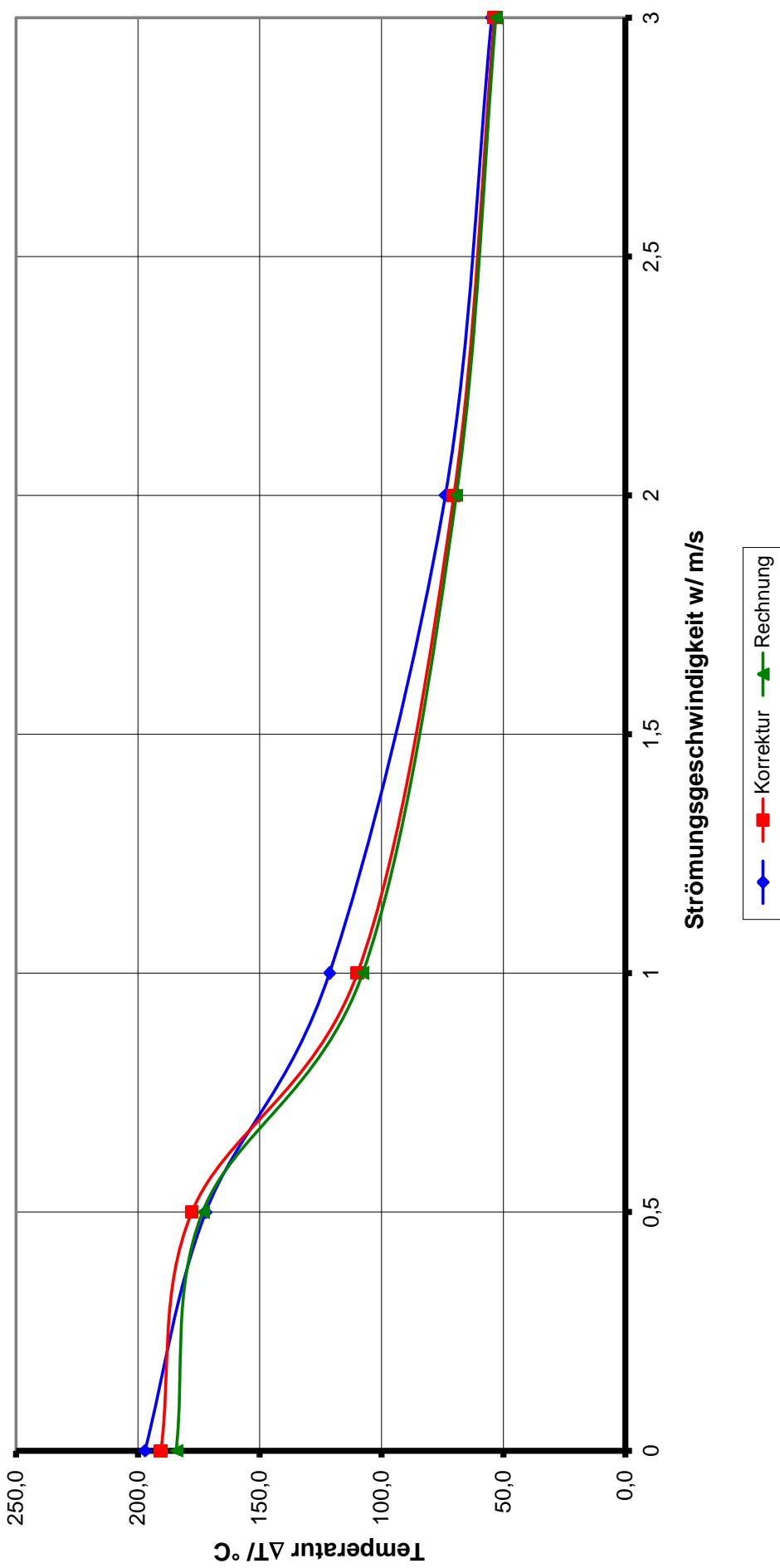
Messung - Rechnung
Anströmung 0°



Gegenüberstellung R15H10B90AW

Messung - Rechnung

Anströmung 0°



Gegenüberstellung GlattW

Messung - Rechnung
Anströmung 0°, 45°

