



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

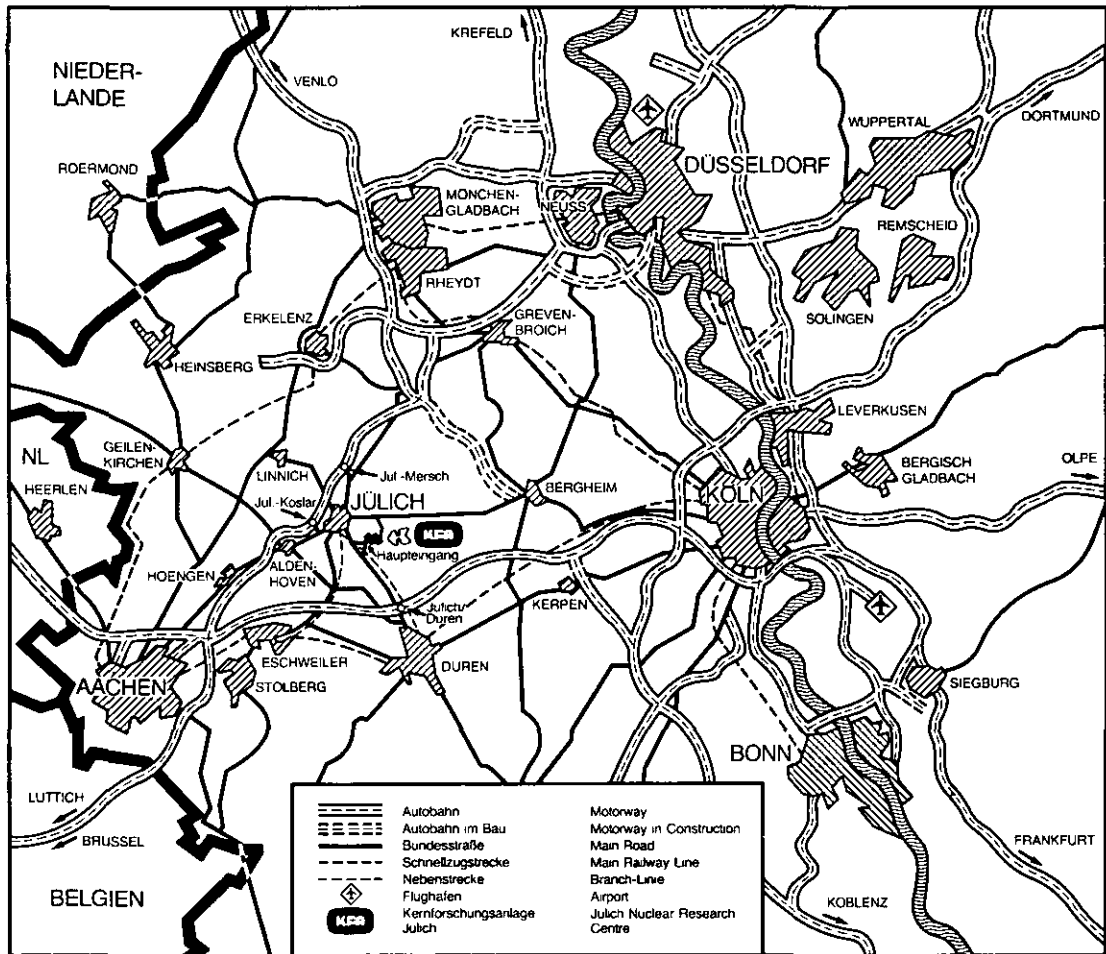
Institut für Reaktorbauelemente

**Weitere Untersuchungen an einer
Fasermattenisolierung mit massiven
Abstandhaltern unter dem Einfluß
axialer Druckgradienten**

von

P. Bröckerhoff und D. Stausebach

**Jül - Spez - 221
September 1983
ISSN 0343-7639**



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 221

Institut für Reaktorbauelemente Jül – Spez – 221

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Weitere Untersuchungen an einer
Fasermattenisolierung mit massiven
Abstandhaltern unter dem Einfluß
axialer Druckgradienten**

von

P. Bröckerhoff und D. Stausebach*

* INTERATOM, Bensberg

WEITERE UNTERSUCHUNGEN AN EINER FASERMATTENISOLIERUNG
MIT MASSIVEN ABSTANDHALTERN UNTER DEM EINFLUSS
AXIALER DRUCKGRADIENTEN

von

P. Bröckerhoff
und

D. Stausebach *

Kurzfassung:

Es werden weitere Untersuchungen an einer von INTERATOM gelieferten Isolierung, die aus Graphitrohren, aufgewickelten Fasermatten und Abstandhaltern aus faserverstärktem Kohlenstoff (CFC) besteht, beschrieben. Eine auf einen Verdränger montierte Scheibe erzeugte hohe lokale Druckgradienten, die zu einer Erhöhung der Wärmeverluste und Nusselt-Zahlen vor und hinter der Scheibe führten. Im Scheibenbereich wurden auf der Rohrwand Temperaturspitzen von bis zu 188 °C gemessen.

* INTERATOM, Bensberg

FURTHER INVESTIGATIONS ON A FIBRE BLANKET INSULATION
WITH MASSIVE SPACERS INFLUENCED BY AXIAL
PRESSURE GRADIENTS

by

P. Bröckerhoff

and

D. Stausebach *

Abstract:

Further investigations on an INTERATOM insulation have been carried out. It consisted of inner gas ducting tubes made of graphite, coiled fibre blankets and Carbon Fibre Composite (CFC) spacers. By means of a disc which was mounted on a displacement body axial pressure gradients were generated. These led to elevated thermal fluxes and Nusselt numbers before and behind the disc. Temperature peaks of 188 °C were measured on the pressure tube in this region.

*INTERATOM, Bensberg

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. Ziel der Arbeiten	1
2. Beschreibung des Versuchsaufbaus	2
2.1 Versuchsanlage	2
2.2 Testkomponenten	2
3. Versuchsdurchführung und -auswertung	3
4. Versuchsergebnisse	3
4.1 Temperaturen innerhalb der Isolierung	5
4.1.1 Luft	5
4.1.2 Helium	7
4.2 Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers	8
4.2.1 Luft	8
4.2.2 Helium	9
4.3 Wärmeverluste und Nusselt-Zahlen	10
4.3.1 Luft	10
4.3.2 Helium	12
5. Genauigkeit und Reproduzierbarkeit	13
6. Zusammenfassung	14
7. Bemerkungen	15
8. Literaturverzeichnis	15
9. Abbildungen	16

Die Arbeit ist im Rahmen des Zusammenarbeitsvertrages zwischen

Bergbau-Forschung GmbH,
Gesellschaft für Hochtemperaturreaktor Technik mbH,
Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Kernforschungsanlage Jülich GmbH und -
Rheinische Braunkohlenwerke AG

über die Entwicklung von Verfahren zur Umwandlung fester fossiler Rohstoffe mit Wärme aus Hochtemperaturreaktoren unter Förderung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie und das Land Nordrhein-Westfalen entstanden.

1. Ziel der Arbeiten

Über die Notwendigkeit von Innenisolierungen für die thermisch hoch beanspruchten Heißgasführungen wurde schon häufig berichtet. Diese Leitungen dienen im Falle der Hochtemperaturreaktoren dem Transport des Arbeitsmittels Helium. Hierbei soll bei einem PNP-Reaktor (Prototypanlage für Nukleare Prozeßwärme) die Heliumtemperatur der primären Heißgasleitung, die den Reaktor mit den wärmetauschenden Komponenten verbindet, im Betriebsfall $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einem Druck von 40 bar betragen. Für den Sekundärkreis wird eine Temperatur von $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einem Druck von 42 bar zugrundegelegt. Bei Störfällen wird mit höheren Heliumtemperaturen gerechnet.

Die Isolationssysteme haben die Aufgabe, das Tragrohr, das im Falle der Sekundärleitung auch als Druckrohr dient, bei möglichst geringen Wärmeverlusten vor unzulässig hohen Temperaturen zu schützen. Diese Bedingungen werden, wie frühere Untersuchungen gezeigt haben, mit Sicherheit von gestopften Faserisolierungen, siehe /1/, und bedingt von Folienisolierungen, siehe /2/, erfüllt. Allerdings enthalten sie metallische Teile, an die wegen der hohen Temperaturen besondere Anforderungen hinsichtlich Standzeiten gestellt werden müssen. Daher hatte sich das Interesse der Projektpartner, die die Heißgasleitung und -isolierung bearbeiten, auf den Einsatz von Festkeramiken gerichtet.

In /3/ wurde eine im Auftrag von GHT/IA von der KWU entwickelte neuartige Isolation vorgestellt. Sie bestand aus graphitischen Gasführungsrohren auf der Heißgasseite, die von massiven Abstandhaltern aus faserverstärktem Kohlenstoff (CFC) gegenüber dem Druckrohr zentriert wurden. Den Abbau der Temperaturen übernahmen auf die Graphitrohre gewickelte Fasermatten aus Saffil für die heißere Innen- und Cerablanket für die kältere Außenseite. Die ersten Versuche waren ohne jegliche Einbauten, z.B. Verdränger, durchgeführt worden. Ziel der ersten Meßreihe war es, die Isolationseigenschaften in Abhängigkeit von Gastemperatur, Druck und Heißgasgeschwindigkeit, d.h. axialen Druckgradienten, zu bestimmen. Im Gegensatz zu den auf der Heißgasseite bis auf die Druckentlastungsbohrungen geschlossenen Systemen war neben natürlicher auch erzwungene Konvektion beobachtet worden, vor allem bei Luft. Als Ursache wurde die zu große Permeabilität in radialer als auch axialer Richtung angesehen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter zeigten sich in ihrem Bereich auf der Rohraußenwand

sowohl bei den Luft- als auch Heliumversuchen Temperaturspitzen von bis zu 90 °C. Zusätzlich spielten auch noch axiale Druckgradienten eine Rolle, unter deren Wirkung heißes Gas durch die Spalte benachbarter Graphitringe und dann entlang der Abstandhalter nach außen strömen konnte.

In einer weiteren Versuchsreihe sollte die Isolierung unter dem Einfluß noch höherer lokaler Druckgradienten untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde ein Strömungsverdränger, der eine in axialer Richtung verschiebbare Scheibe trug, montiert. An der Isolierung und Instrumentierung brauchte bis auf zusätzliche Druckmeßstellen nichts geändert zu werden, so daß im folgenden meist auf die erste Testreihe verwiesen wird.

2. Beschreibung des Versuchsaufbaus

2.1 Versuchsanlage

Auch diese Versuche wurden im Hochdruckgaskanal durchgeführt. Dabei betragen die maximalen Gastemperaturen mit Luft etwa 300 °C und mit Helium fast 400 °C. Der höchste Druck lag bei etwa 38 bar.

2.2 Testkomponenten

Isolierung und Instrumentierung sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Einige wichtige Maße sind angegeben, außerdem die Materialien für Gasführungsrohre und Fasern auf der Innen- und Außenseite. Die Abstandhalter für die ersten beiden Schüsse wurden von Sigri, die der beiden letzten von Carbone Lorraine geliefert. Weitere Angaben zur Konstruktion, zum Wickeln der Matten und zu den verwendeten Werkstoffen sind /3/ zu entnehmen. Die zahlreichen angedeuteten Thermolemente dienen der Messung der Temperaturen innerhalb der Isolierung, an den Abstützelementen, entlang der Gasführungsrohre und auf dem Druckrohr.

Die Temperaturmeßstellen im Kühlwasser sind Abbildung 2 zu entnehmen. Unten ist die Testisolierung mit dem Strömungsverdränger, dessen Außendurchmesser 273 mm beträgt, angedeutet. Der Scheibendurchmesser beträgt 530 mm; die Scheibenstärke ist 20 mm. Die Scheibe wurde so auf dem Verdränger fixiert,

daß sie in der Mitte von Schuß 3 lag. Der Verdrängerkörper war am Flansch der Einlaufseite befestigt. Am stromabwärts gelegenen Ende konnte er frei dehnen. Die Druckanbohrungen vor und hinter der Scheibe zur Messung des Druckabfalls sind angedeutet.

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche wurden wiederum zunächst mit Luft, anschließend mit Helium durchgeführt. Als Parameter wurden Druck, Temperatur und Gebläsedrehzahl, also lokaler Druckgradient, variiert. Wie aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich ist, betragen die Drücke meist etwa 4 bar, 9 bar, 19 bar und 38 bar. Wegen der Graphitkorrosion war beabsichtigt, die Temperatur während der Luftversuche auf maximal 300 °C zu begrenzen. Die Versuche zeigten aber bereits bei den ersten Temperaturstufen im Bereich der Scheibe auf der Rohraußenwand starke Temperaturerhöhungen, so daß ein Abbruch der Versuche notwendig wurde. Die höchsten Heliumtemperaturen lagen bei fast 400 °C. Aus Zeitgründen wurden nur beim höchsten Druck drei Drehzahlen von etwa 2000 min⁻¹, 1000 min⁻¹ und 500 min⁻¹ gefahren. Die höchste Drehzahl entspricht einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 36 m/s im Spalt zwischen Scheibe und Gasführungsrohr. In den Tabellen 1 und 2 sind neben den Gasdrücken auch noch die Temperaturen auf der heißen Seite, Geschwindigkeiten im Spalt und Druckverluste über die Scheibe enthalten. Datenerfassung und Auswertung erfolgten in gleicher Weise wie in /3/ beschrieben. Die Wärmeverluste pro Schuß oder Sektor wurden auf eine mittlere Fläche bezogen, die aus den Innendurchmessern des Druckrohres und der Gasführungsrohre berechnet wurde. Bei Betrachtung des reinen Faser-raumes, wie z.B. bei der Berechnung der Nusselt-Zahlen, wurde anstelle des Innendurchmessers der Gasführungsrohre ihr Außendurchmesser eingesetzt. Die benötigten Stoffwerte für Luft und Helium wurden nach /4/ und /5/ berechnet. Bei der Bestimmung der Wärmeverluste aus den Kühlwassermengen, den Aufheizungen und der spezifischen Wärmekapazität wurde hier mit einem konstanten Wert von $c_{pw} = 4186,8 \text{ Ws}/(\text{kg K})$ gerechnet.

4. Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden in gleicher Weise wie in /3/ dargestellt. Da sich aber während der Versuche immer mehr auf Abstandhalten und Anpreß-

p_G [bar]	T_G [°C]	w_G [m/s]	Δp_G [N/m ²]	p_G [bar]	T_G [°C]	w_G [m/s]	Δp_G [N/m ²]
37,6	102	35,8	55427	38,0	200	35,8	45777
37,6	102	18,2	14816	37,9	199	18,1	11725
37,6	101	9,1	3653	37,9	198	9,3	3077
19,1	102	35,3	28832	19,3	200	35,5	23218
19,0	101	18,0	7311	19,3	198	17,9	5904
9,6	102	35,2	14546	9,2	200	34,9	10953
9,6	101	17,8	3607	9,2	199	17,8	2793
4,7	101	35,0	7131	4,6	199	34,9	5544
4,7	101	17,8	1768	4,6	198	17,6	1378

Tabelle 1: Luftversuche

p_G [bar]	T_G [°C]	w_G [m/s]	Δp_G [N/m ²]	p_G [bar]	T_G [°C]	w_G [m/s]	Δp_G [N/m ²]
37,2	305	36,8	5612	37,4	202	36,3	6285
37,2	303	18,6	1372	37,4	201	18,4	1619
37,2	300	9,7	357	37,4	200	9,5	407
19,4	303	37,0	2796	19,4	202	36,0	3247
19,3	301	19,4	710	19,4	201	18,1	821
9,7	302	35,6	1376	9,6	200	35,1	1583
9,7	298	18,1	343	9,7	198	17,0	395
4,8	298	34,6	660	4,8	199	34,7	780
4,8	292	16,4	162	4,8	195	17,0	192
37,3	398	37,1	4789	36,7	102	36,2	7764
37,3	396	18,7	1202	37,1	101	18,5	1974
37,3	392	10,0	318	37,2	101	9,7	498
19,3	397	36,5	2431	19,2	101	36,0	4011
19,1	393	18,3	604	19,2	101	18,2	1012
9,7	394	35,3	1167	9,7	101	35,4	1982
9,7	388	17,7	293	9,6	101	18,0	496
4,8	389	34,7	571	4,8	100	35,1	973
4,8	379	16,6	134	4,8	99	17,2	238

Tabelle 2: Heliumversuche

ringen befestigte Thermolemente gelöst hatten, muß auf die Diskussion der Temperaturen dieser Bauteile verzichtet werden. Ebenfalls verzichtet wird auf die Darstellung der Temperaturen entlang der Gasführungsrohre und des Druckmantels sowie innerhalb der Isolation. Sie scheinen wenig aussagekräftig.

4.1 Temperaturen innerhalb der Isolierung

Wie schon bei früheren Isolierungen dienen die Temperaturverteilungen in radialer Richtung als erstes Bewertungskriterium. Die folgenden Bilder zeigen die gemessenen Temperaturen für die Schnitte A-A und D-D, siehe Abbildungen 1 und 2. Mit den Symbolen wird zwischen den vier Sektoren oben, rechts, unten und links unterschieden. Der Versuchsaufbau, bestehend aus dem Graphitrohr auf der Innenseite, den Saffil- und Cerablanketfasermatten und dem Druckrohr mit Außenkühlung, ist unten schematisch angedeutet. Die vertikalen Linien geben die Lage der in radialer Richtung montierten Thermolemente wieder. Zur Vereinfachung enthält nur der Schnitt A-A die Gasdaten, also Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und den von der Scheibe verursachten Druckabfall. Die Diagramme für die Querschnitte A-A und D-D sind nebeneinander angeordnet. Aus Platzgründen werden nur die wichtigsten Ergebnisse, wie schon in /3/, dargestellt. Die Beschreibung der Ergebnisse erfolgt geordnet nach Temperatur- und Druckstufen.

4.1.1 Luft

Das Fahrprogramm mußte gegenüber dem ursprünglichen Plan geändert werden. Aufgrund der bereits bei den beiden unteren Temperaturstufen hohen Rohrwandtemperaturen wurde beschlossen, die ebenfalls vorgesehenen Versuche bei einer Gastemperatur von 300 °C aufzugeben, die Spalte zwischen den Gasführungsrohren abzudichten und die Versuche anschließend zu wiederholen. Dies führte schließlich zur dritten Versuchsserie. Aus diesem Grunde ist ein völliger Vergleich mit der ersten Reihe, siehe /3/, nicht möglich. Dort waren nur die Profile bei 300 °C Gastemperatur diskutiert worden. Es werden im folgenden lediglich die Versuche bei einer Gastemperatur von etwa 200 °C besprochen. Sie sind in den Abbildungen 3-14 dargestellt.

Da die Störstelle, d.h. die Scheibe, im Querschnitt A-A angebracht war, konnte auch in diesem Bereich mit deutlichen Unterschieden zu den früheren Versuchen gerechnet werden. Ein erster Blick zeigt auch wesentliche Differenzen zwischen den Querschnitten A-A und D-D. Dies ist im Gegensatz zu /3/ bereits beim kleinsten Druck von 4,6 bar der Fall, siehe die Abbildungen 3 und 4. Der von der Scheibe erzeugte Druckabfall beträgt bei einer Gasgeschwindigkeit von 34,9 m/s im Spalt zwischen Scheibe und Graphitrohr 5544 N/m^2 . Die Temperaturverteilungen im Querschnitt A-A weisen deutlich auf axiale Durchströmung hin. Der hohe Druckabfall wirkt über die gesamte Länge des Schusses 3. An der Stoßfuge zwischen den Rohren im zweiten und dritten Abschnitt dringt das heiße Gas ein und durchströmt die Matten. Eine deutliche Zuordnung der Temperaturen auf die vier Sektoren ist nicht möglich. Die aber in allen Quadranten nach oben verbogenen Profile schließen freie Konvektion aus. An der letzten Meßstelle innerhalb der Cerablanketmatten beträgt die maximale Temperaturdifferenz etwa 38 K. Im Schnitt D-D entspricht der Kurvenverlauf weitgehend der logarithmischen Verteilung. Die Ursache liegt in der Vermischung kalten und heißen Gases an der Stoßstelle zwischen den Schüssen 3 und 4. Das durch die Matten des dritten Schusses strömende Gas kühlt sich über die Länge ab und trifft an der nächsten Fuge auf heißes, zur Druckwand fließendes Gas. Die Menge des kühleren Gases wird aber kleiner sein. Somit kommt es in der Ebene D-D zu kleineren Wärmeverlusten. Die Rohrwandtemperaturen entsprechen in etwa denen im Querschnitt A-A.

Die Druck- und Dichtesteigerung bewirkt in beiden Meßebenen deutliche Veränderungen in den Temperaturverteilungen, siehe die Abbildungen 5-14. Im Querschnitt A-A steigen die Temperaturen zwischen den Fasermatten deutlich an, siehe die Abbildungen 5, 7 und 13, die für die Drücke 9,2 bar, 19,3 bar und 38 bar und die höchste Gasgeschwindigkeit gelten. Beim höchsten Druck, Abbildung 13, fällt die Temperatur in der Nähe der Wand von etwa $180 \text{ }^\circ\text{C}$ auf etwa $110 \text{ }^\circ\text{C}$ und $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Damit ist im Vergleich zu Abbildung 3 eine Erhöhung der Rohrwandtemperatur um den Faktor von etwa 3-4 erreicht. In der Meßebene D-D sind die Verhältnisse weniger schlimm, da sich die Druckdifferenzen hier nur noch geringfügig auswirken. Die maximale Rohrwandtemperatur beträgt aber doch fast $80 \text{ }^\circ\text{C}$, siehe Abbildung 14.

Den Einfluß der Druckgradienten bei konstanten Stoffwerten zeigen die Abbildungen 9-14. Die Temperaturen in Abbildung 9 ähneln denen in Abbildung 5,

auch wenn der von der Scheibe erzeugte Druckverlust etwa um den Faktor 3 kleiner ist. Für den Querschnitt D-D ist die Übereinstimmung weniger gut, vergleiche die Abbildungen 6 und 10. Allerdings sind die Rohraußentemperaturen annähernd gleich. Mit Erhöhung des Druckverlustes verschlechtern sich auch die Temperaturverteilungen, siehe die Abbildungen 11 und 12 bzw. 13 und 14. Bei höheren Gastemperaturen, also kleineren Dichten, dürften sich die Druckdifferenzen allerdings weniger stark bemerkbar machen.

4.1.2 Helium

Dies zeigt sich eindrucksvoll bei der Betrachtung der Heliumversuche. Hier wurden die Ergebnisse beim höchsten Druck und bei höchster Geschwindigkeit sowie die für größte Gastemperatur und alle Druckstufen ausgewählt. In den Abbildungen 15 und 16 sind die Temperaturen für einen Druck von 36,7 bar und eine Temperatur von 102 °C dargestellt. Die Druckdifferenz beträgt 7764 N/m². Im Vergleich zu den Luftversuchen sind die Rohrwandtemperaturen mit maximal 62 °C, Abbildung 15, und 45 °, Abbildung 16, sehr hoch, berücksichtigt man die Höhe der Gastemperatur. Der Verlauf der Temperaturen innerhalb der Isolierung ist in etwa gleich. Auch hier fehlt die aus früheren Versuchen bekannte klare Zuordnung auf die vier Sektoren, als lediglich natürliche Konvektion die Ursache für Temperaturunterschiede war. Mit zunehmender Heißgastemperatur werden die Verläufe günstiger, d.h. der Temperaturabfall über die Isolierung ist größer, siehe die Abbildungen 17-20. Allerdings steigen die Wandtemperaturen auf Werte von etwa 100 °C, siehe Abbildung 19. In /3/ betrug die maximale Rohrwandtemperatur bei gleichen Gasdaten nur 45 °C.

Die Temperaturen bei höchster Gastemperatur sind in den Abbildungen 21-30 dargestellt. Im Falle kleiner Dichte, Abbildungen 21 und 22, ähneln sie den Verläufen der ersten Versuchsreihe, siehe Abbildungen 20 und 21 in /3/. Die Geschwindigkeitserhöhung im Spalt zwischen Scheibe und Graphitrohr bewirkt keine Veränderungen der Temperaturprofile. Bei der nächst höheren Druckstufe von 9,7 bar sind im Bereich der Meßebene A-A aber bereits deutlich andere Temperaturkurven festzustellen, während im Schnitt D-D noch keine Auswirkungen zu erkennen sind. Dies gilt allerdings nicht mehr beim Heliumdruck von 19,3 bar. Hier werden in beiden Meßebenen deutliche Änderungen gegenüber der untersten Druckstufe und der ersten Serie sichtbar. Im Vergleich zu den Luftversuchen sind die Auswirkungen auf die Außenwand allerdings geringer.

Die Temperaturverteilungen für den höchsten Druck von 37,3 bar sind in den Abbildungen 27-30 dargestellt. Im Falle der kleineren Geschwindigkeit von 10 m/s im Spalt gibt es keine wesentlichen Abweichungen von den Temperaturprofilen der ersten Serie, vergleicht man die Abbildungen 27 und 28 mit 26 und 27 aus /3/. Erst der Anstieg der Geschwindigkeit auf 37,1 m/s, entsprechend einer Druckdifferenz von 4789 N/m^2 , bewirkt in den Schnitten A-A und D-D maximale Rohrwandtemperaturen von $110 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Auch innerhalb der Fasern treten im Vergleich zur ersten Serie größere Temperaturdifferenzen auf. Wegen der geringeren Dichte sind diese Unterschiede aber kleiner als bei Verwendung von Luft.

4.2 Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

In den folgenden Bildern werden die Auswirkungen der Obergeschwindigkeiten im Bereich der Scheibe auf die Temperaturen entlang der Rohrwand und innerhalb der Kühlsysteme für oberen und unteren Quadranten besprochen. Als Abszisse sind schematisch die drei vollen Schüsse 2, 3 und 4 sowie Ein- und Auslaufschuß zu erkennen. Die Rohrschlangen für die Wasserkühlung sind angedeutet. Zur Unterscheidung sind die Wandtemperaturen durchgezogen, die Wassertemperaturen gestrichelt gezeichnet.

4.2.1 Luft

Die Abbildungen 31-36 zeigen die Ergebnisse für die Luftversuche bei der höchsten Gastemperatur von etwa $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Wegen der um 100 K niedrigeren Temperatur ist ein Vergleich mit den Ergebnissen der ersten Serie nur begrenzt möglich. Es fällt aber sofort auf, daß im Gegensatz zu /3/ sich das Maximum der Rohrwandtemperaturen um eine Schußlänge nach vorne, in den Bereich des Abstandhalters zwischen Schuß 2 und 3, verschoben hat. Die in der ersten Serie höheren Temperaturen im Bereich des von Carbone Lorraine gelieferten Abstandhalters war mit der höheren Wärmeleitfähigkeit erklärt worden. Diese macht sich im vorliegenden Fall in diesem Bereich weniger stark bemerkbar. Infolge des Gasstaus kommt es zu Temperaturerhöhungen vor der Scheibe. Das heiße Gas wird durch den Spalt zwischen den benachbarten Gasführungsrohren und dann entlang der Abstandhalterelemente zur Rohrwand gefördert. Bereits beim kleinsten Druck, Abbildung 31, führt dies zu

einer maximalen Temperatur von 53°C . Im Vergleich zur ersten Serie, als die Gastemperatur 100 K höher war und die Wandtemperatur an dieser Stelle nur 40°C betrug, bedeutet dies auch höhere Wärmeverluste in diesem Bereich. Dies wird auch besonders bei der Betrachtung der Kühlwassertemperaturen deutlich. Während der Anstieg im vorderen Bereich nur recht schwach ist, steigen sie im Bereich des Abstandhalters stark an. Im Gegensatz dazu ist der Verlauf in der hinteren Hälfte annähernd stetig. Die Temperaturerhöhung auf der Rohrwand ist zwar ausgeprägt, aber weniger scharf als vor der Scheibe und in der ersten Serie. Diese Aussagen gelten auch für die Versuche bei $9,2\text{ bar}$ und $19,3\text{ bar}$, siehe die Abbildungen 32 und 33. Hier steigen die Rohrtemperaturen im Bereich des Abstandhalters vor der Scheibe auf 77°C bzw. 102°C . Wie auch beim kleinsten Druck weist der untere Sektor stets höhere Werte als der obere auf. Dies scheint eher auf Einbautoleranzen der Isolierung oder der Scheibe als auf physikalische Effekte zurückzuführen zu sein. Ein Druckanstieg auf $37,9\text{ bar}$ bei gleichzeitiger Verminderung der Geschwindigkeit, siehe die Abbildungen 34 und 35, bewirkt kleinere Außentemperaturen, die etwa bei 70°C bzw. 98°C liegen. Abbildung 36 zeigt die Verhältnisse für die höchste Drehzahl. Hierbei steigen die Wandtemperaturen über eine Strecke von 300 mm von 20°C auf 120°C . Der Abfall im Verlauf des Schusses 3 erfolgt weniger steil, vor allem für den unteren Quadranten, der deutlich höhere Werte aufweist. Erst in der Nähe des nächsten Abstandhalters kehrt sich dieser Trend um.

4.2.2 Helium

Die Abbildungen 37-44 enthalten die Wand- und Wassertemperaturen für Helium. Entsprechend der Beschreibung der Temperaturen innerhalb der Isolierung folgen zunächst die Werte beim höchsten Druck und den drei untersten Temperaturstufen. Hier ergibt sich das gleiche Bild wie bei den Versuchen mit Luft, nämlich das Verschieben des Temperaturmaximums in den Bereich des Abstandhalters vor der Scheibe, der starke Anstieg der Kühlwassertemperaturen in der Nähe dieses Abstandhalters und in einem weiten Bereich höhere Rohrwandtemperaturen im unteren Sektor als im oberen. Der Unterschied ist erkennbar in höheren Wassertemperaturen des unteren Sektors im gesamten hinteren Meßabschnitt und höheren Wandtemperaturen im weiten Bereich des dritten Schusses. Eine einleuchtende Erklärung für diese sich widersprechen-

den Ergebnisse steht aus. Mit fast $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ Rohrwandtemperatur wurde bei der Gastemperatur von $305\text{ }^{\circ}\text{C}$ der höchste Wert gemessen, siehe Abbildung 39.

Die Ergebnisse in Abbildung 40 bei einem Druck von 4,8 bar und einer Heißgastemperatur von $389\text{ }^{\circ}\text{C}$ ähneln denen der ersten Serie, siehe Abbildung 52 in /3/. Entlang der Rohrwand treten die Maxima im Bereich der Abstandhalter deutlich hervor. Der höchste Wert wurde zwischen den Schüssen drei und vier gemessen. Aber bereits bei der nächst höheren Druckstufe von 9,7 bar, Abbildung 41, zeigt sich das bei dieser Versuchsreihe charakteristische Verhalten mit dem Maximum der Rohrwandtemperaturen vor der Scheibe. Es ist mit $81\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch recht niedrig, verglichen mit etwa $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Abbildung 42. Den Geschwindigkeitseinfluß erkennt man deutlich bei der Betrachtung der Abbildungen 43 und 44. Bei fast gleichen Gasdaten bewirkt die Erhöhung der Druckdifferenz von 303 N/m^2 , Abbildung 43, auf 4789 N/m^2 , Abbildung 44, einen Anstieg von fast $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $188\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das bedeutet für den letzten Fall einen Temperaturanstieg von 165 K auf einer Strecke von 300 mm. Über dieselbe Länge steigt die Kühlwassertemperatur von etwa $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf etwa $61\text{ }^{\circ}\text{C}$. Im hinteren Meßbereich, also hinter der Scheibe, betragen die größten Temperaturdifferenzen im Kühlwasser zwischen unten und oben etwa 23 K. In der ersten Versuchsreihe hatten sie bei diesen Gasdaten nur etwa 6 K betragen. Die Unterschiede in diesem hinteren Abschnitt, auch bei den Rohrwandtemperaturen, deuten auf ungleichmäßige Durchströmung der Isolierung in der Abströmung hin.

4.3 Wärmeverluste und Nusselt-Zahlen

Im folgenden Abschnitt werden die Wärmeverluste und Nusselt-Zahlen der einzelnen Meßabschnitte und Quadranten besprochen und miteinander verglichen. Erst sie ermöglichen eine Beurteilung der Auswirkung der lokalen Druckgradienten auf die Konstruktion.

4.3.1 Luft

Die Abbildungen 45 und 46 zeigen die über den Umfang des Rohres aufsummierten Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Gasdruck. Jedes Bild enthält die

Verluste für beide Meßabschnitte. Abbildung 45 gilt für die kleinere Geschwindigkeit von 17,9 m/s, Abbildung 46 für den höheren Wert von 35,3 m/s. Die angegebenen Geschwindigkeiten stellen ebenso Mittelwerte dar wie die Temperaturen, die auf der rechten Seite angegeben sind. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen der ersten Serie, siehe die Abbildungen 57-60 in /3/, fällt sofort auf, daß nun die Wärmeverluste in Meßabschnitt I über denen des zweiten Abschnitts liegen. In der ersten Versuchsreihe waren die höheren Verluste in II einmal mit zwei Abstandhaltern, zum anderen mit der entschieden höheren Wärmeleitfähigkeit ihres Materials erklärt worden. Die hohen, von der Scheibe hervorgerufenen Druckdifferenzen, bewirken in der vorderen Hälfte einen Anstieg der Wärmeverluste auf 9000 W/m^2 , Abbildung 45, und 14000 W/m^2 , Abbildung 46 bei einer Gastemperatur von nur $200 \text{ }^\circ\text{C}$. In der ersten Serie waren bei dieser Temperatur und der höchsten Geschwindigkeit nur Werte von 1800 W/m^2 erreicht worden. Noch im Abschnitt II liegt der maximale Wärmeverlust mit 10000 W/m^2 etwa um den Faktor 3 über dem in /3/. Die Geschwindigkeitserhöhung wirkt sich erwartungsgemäß im Scheibenbereich stärker aus als im hinteren Abschnitt. Der Anstieg der Wärmeverluste ist, bis auf Ausnahmen, linear. Wegen der offenen Heißgasseite ist dies aber im wesentlichen auf erzwungene Konvektion zurückzuführen, d.h. die Fasern werden zwangsdurchströmt.

Die Wärmeverluste der einzelnen Quadranten sind in den Abbildungen 47 und 48 in Abhängigkeit vom Druck für die höchste Geschwindigkeit dargestellt. Für Abschnitt I gibt es keine klare Zuordnung der Verluste auf die einzelnen Sektoren. Allerdings weist der obere Quadrant im gesamten Druckbereich die höchsten Werte auf. Sie steigen von etwa 3000 W/m^2 beim kleinsten auf fast 18000 W/m^2 beim höchsten Druck. Damit liegen sie deutlich über den Werten der ersten Serie, vergleiche Abbildung 61 in /3/. Zumindest beim kleinsten Druck weist der hintere Abschnitt, siehe Abbildung 48, fast dieselben Verluste auf wie in /3/. Im Gegensatz zur ersten Serie zeigen die Seiten rechts und links etwa gleich hohe Werte. Mit 14300 W/m^2 wurde für den oberen Quadranten der größte Verlust gemessen. Damit liegt er fast um den Faktor 2 höher als in der Versuchsreihe ohne Scheibe.

Entsprechend den höheren Wärmeverlusten sind auch die Nusselt-Zahlen, deren Definition und Berechnung in /3/ näher erläutert wurden, angestiegen auf Werte von 320, siehe Abbildung 49. Das Bild gibt die Werte für beide Meßabschnitte in Abhängigkeit vom Druck für höchste Geschwindigkeit wieder.

Auch hier weist die vordere Hälfte bereits beim kleinsten Druck höhere Werte als die hintere auf. Wegen der Durchströmung ist für alle Sektoren ein Anstieg mit dem Druck feststellbar. In der ersten Serie wies zumindest der untere Quadrant des vorderen Meßabschnitts noch einen annähernd konstanten Verlauf auf. Einen Vergleich mit früheren Isolationssystemen ist wegen der hohen Druckgradienten, die in Wirklichkeit nicht auftreten, und der geringen Gastemperatur nicht sinnvoll.

4.3.2 Helium

Die Abbildungen 50-53 zeigen die Gesamtwärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck für beide Abschnitte, zwei Geschwindigkeiten und vier Gastemperaturen. Im Gegensatz zu /3/ erfolgt der Anstieg der Wärmeverluste, abgesehen von den in Abbildung 52 dargestellten Ergebnissen, nicht linear mit dem Druck. Außerdem liegen die Meßwerte im gesamten Druckbereich meist deutlich höher. Eine Ausnahme bildet hier Abbildung 51, in der zumindest für die höheren Gastemperaturen in etwa dieselben Werte gemessen wurden. Mit 8500 W/m^2 liegt im Fall der kleinen Geschwindigkeit der maximale Wert um den Faktor 3,8 über dem der ersten Serie. Fast der doppelte Wärmeverlust wird bei Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit erkennbar, siehe Abbildung 52. Im zweiten Meßabschnitt, Abbildung 53, erfolgt bei der höchsten Gastemperatur ein Anstieg von etwa 2800 W/m^2 auf 7300 W/m^2 . Trotz der geringen Heliumdichte und der damit im Vergleich zu den Luftversuchen kleineren Druckgradienten sind deutlich höhere Wärmeverluste festzustellen. Dies konnte bei der Betrachtung der Temperaturverteilungen innerhalb der Isolation nicht unbedingt erwartet werden. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter innerhalb des hinteren Meßabschnitts wird, ebenso wie bei den Versuchen mit Luft, durch die Zwangsdurchströmung im vorderen Bereich ausgeglichen. Außerdem muß, wenn auch schwächer, natürliche Konvektion innerhalb der Fasern vorhanden sein.

Aus den Abbildungen 54-57, in denen die Verteilung der Wärmeverluste über den Umfang in Abhängigkeit vom Druck für die höchste Temperatur und zwei Geschwindigkeiten dargestellt sind, geht hervor, daß in fast allen Fällen der obere Sektor die höchsten Werte aufweist. Das entspricht den Ergebnissen aus /3/ und deutet, wie oben erwähnt, auch auf freie Konvektion hin. Nur in Abschnitt II fehlt eine ganz deutliche Zuordnung im unteren Druckbereich, siehe die Abbildungen 55 und 57. Beim Ausgangsdruck von etwa 4,5 bar

liegen die Verluste im Falle der unteren Geschwindigkeit, siehe die Abbildungen 54 und 55 bei 1500 W/m^2 bzw. 2600 W/m^2 . Mit der Geschwindigkeitsverdopplung steigen sie auf 2000 W/m^2 bzw. 2800 W/m^2 , siehe die Abbildungen 56 und 57. Mit 25800 W/m^2 wurde beim höchsten Druck in der vorderen Hälfte im oberen Sektor der Spitzenwert gemessen. Er liegt damit fast um den Faktor 2 über dem vergleichbaren Wert des Abschnitts II. Der Druckeinfluß auf die Verluste des unteren Quadranten ist im Bereich II fast Null, während im vorderen Abschnitt die Verluste auf fast 11000 W/m^2 ansteigen.

Die Abbildungen 58 und 59 geben einen Überblick über die Nusselt-Zahlen beider Abschnitte als Funktion des Drucks für beide Geschwindigkeiten. Während Abbildung 73 in /3/ eindrucksvoll die um den Faktor 2 höheren Werte des hinteren Bereichs zeigt, haben sich die Verhältnisse in der Meßreihe mit Scheibe umgekehrt. Bereits im Fall geringer Strömungsgeschwindigkeit, Abbildung 58, weisen alle Sektoren in Abschnitt I höhere Nusselt-Zahlen auf. Sie steigen im oberen Quadranten von 2,3 auf 17,7 beim höchsten Druck. Im hinteren Meßbereich betragen die Werte für beide Seiten fast konstant 4. Unten gibt es einen geringen Abfall, oben einen Anstieg von 3 auf 6,7. Die Verdopplung der Geschwindigkeit hat, zumindest für den oberen Sektor der vorderen Hälfte, ebenfalls fast eine Verdopplung der Nusselt-Zahlen zur Folge, Abbildung 59. Selbst im unteren Sektor beträgt der entsprechende Wert 14. Die Ausgangswerte beim kleinsten Druck betragen nur 3. Damit entsprechen sie trotz höherer Geschwindigkeit den Werten in /3/. Dies trifft in etwa auch für den hinteren Abschnitt zu, der bei kleinem Druck sogar noch niedrigere Werte als bei der ersten Untersuchung aufweist. Im unteren Sektor liegen die Nusselt-Zahlen im gesamten Druckbereich bei etwa 3,5. Die Seiten weisen in etwa dieselben Werte auf. Lediglich im oberen Sektor wurde beim höchsten Druck mit 16,2 ein höherer Wert als in /3/ gemessen.

5. Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Auch hier wird auf eine Fehleranalyse verzichtet. Die Wartezeiten bis Erreichen des Beharrungszustandes betragen ebenfalls etwa 10 h. Entsprechend den Versuchen der ersten Serie wird die Genauigkeit bei der Messung der Wassermengen mit etwa 3% angegeben. Im allgemeinen lag die Abweichung der Summe der Einzelmengen, verglichen mit dem Summenstrom, unterhalb dieser Marke. Unter Berücksichtigung aller die Ergebnisse beeinflussenden Größen

wird die Genauigkeit mit besser als 10% geschätzt. Aus Zeitgründen mußte auch bei diesen Versuchen auf die Wiederholung eines Meßpunktes bei etwa gleichen Meßzuständen verzichtet werden.

6. Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit beschriebene Isolierung war von der Firma KWU in Auftrag von INTERATOM entwickelt worden. Sie bestand aus graphitischen Gasführungsrohren und aufgewickelten Fasermatten aus Saffil auf der heißen und Cerablanket auf der kalten Seite. Die mittlere Faserdichte betrug etwa 130 kg/m^3 . Abstandhalter aus faserverstärktem Kohlenstoff übernahmen die Zentrierung der Gasführungsrohre gegenüber dem Druckrohr. In einer ersten Versuchsreihe war diese Isolierung im HD-Kanal bei Heißgasgeschwindigkeiten von maximal etwa 23 m/s unter Luft und Helium untersucht worden. Da man bei der Montage bewußt auf axiale und radiale dichte Abschottungen verzichtet hatte, zeigten die Wärmeverluste und Nusselt-Zahlen eine starke Abhängigkeit vom Druck und von der Geschwindigkeit. Dies ließ den Schluß zu, daß sowohl freie als auch erzwungene Konvektion vorhanden sind. Eine zweite Versuchsreihe mit hohen lokalen Druckgradienten sollte ihre Auswirkungen auf die Temperaturverteilungen und Wärmeverluste zeigen. Daher wurde ein Strömungsverdränger mit einer geraden Scheibe in das Rohr eingebaut. Die Scheibe war etwa in der Mitte des mittleren Schusses montiert.

Wegen zu hohen Wandtemperaturen wurden die Luftversuche auf die Temperaturstufen $100 \text{ }^\circ\text{C}$ und $200 \text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt. Mit Helium wurde das vorgesehene Programm bis $400 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Sowohl die Temperaturen innerhalb der Isolierung und auf der Rohrwand als auch die Wärmeverluste lassen den Schluß zu, daß der Wärmetransport infolge erzwungener Konvektion, hervorgerufen durch die Druckgradienten im Scheibenbereich, im Vergleich zur ersten Serie zugenommen hat. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der zwei im hinteren Meßbereich liegenden Abstandhalter wurde kompensiert bzw. übertroffen von der Wirkung der axialen und radialen Durchströmung. Heißes Gas wurde vor der Scheibe zwischen zwei Gasführungsrohren nach außen gefördert. Die ermittelten Nusselt-Zahlen liegen über denen der ersten Serie und damit auch weit über denen der bereits früher untersuchten gestopften Faserisolation. Wegen offener Heißgasseite und fehlender Strömungsbarrieren mußte aufgrund der Untersuchungen an der Kohlesteinisolation mit diesem Ergebnis gerechnet

werden. Dieser Versuch gestattet jedoch noch keine Aussagen darüber, ob auch die porösen graphitischen Gasführungsrohre durchströmt wurden oder nur die Fugen zwischen ihnen der Grund für die Verschlechterung der Ergebnisse war. Hierzu sind weitere Versuche mit abgedichteten Stoßstellen erforderlich.

7. Bemerkungen

Die Verfasser bedanken sich bei den zahlreichen Mitarbeitern der beteiligten Partner, die zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung dieser umfangreichen Untersuchung beigetragen haben.

8. Literaturverzeichnis

- /1/ Bröckerhoff, P.; Scholz, F.
Untersuchungen an zwei gestopften Faserisolierungen in einem horizontalen Druckrohr
JüL-1241-RB (1975)
- /2/ Bröckerhoff, P.; Scholz, F.
Untersuchungen an einer Folienisolierung in einem horizontalen Druckrohr
JüL-1108-RB (1974)
- /3/ Bröckerhoff, P.; Stausebach, D.
Erste Untersuchungen an einer gewickelten Fasermattenisolierung mit massiven Abstandhaltern aus faserverstärktem Kohlenstoff
JüL-1840 (1983)
- /4/ Hammeke, K.; Pietralla, G.; Presser, K.H.
Thermodynamische Stoffwerte von Luft, Kohlendioxid und Stickstoff bei hohen Temperaturen und Drücken
JüL-383-RB (1966)
- /5/ Harth, R.; Hammeke, K.
Thermodynamische Stoffwerte von Helium im Bereich von 0-3000 °C und 0,2-200 bar
JüL-666-RB (1970)

9. Abbildungen

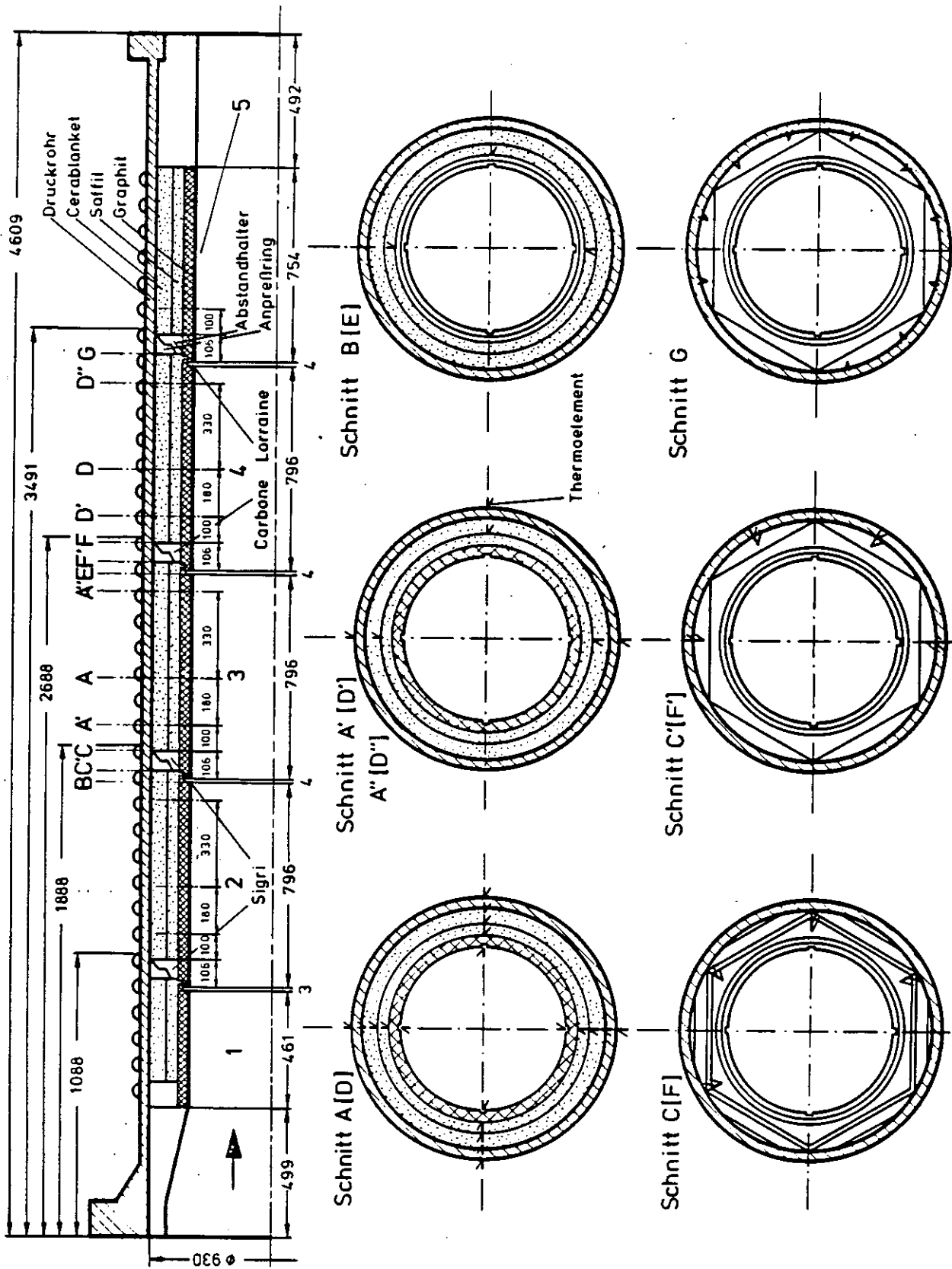


Abb. 1: Testisolierung und Thermoelemente

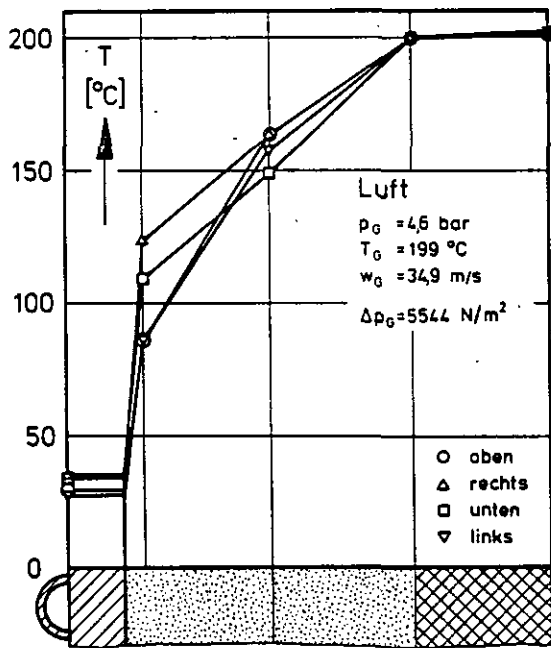


Abb. 3: Temperaturen innerhalb der Isolierung

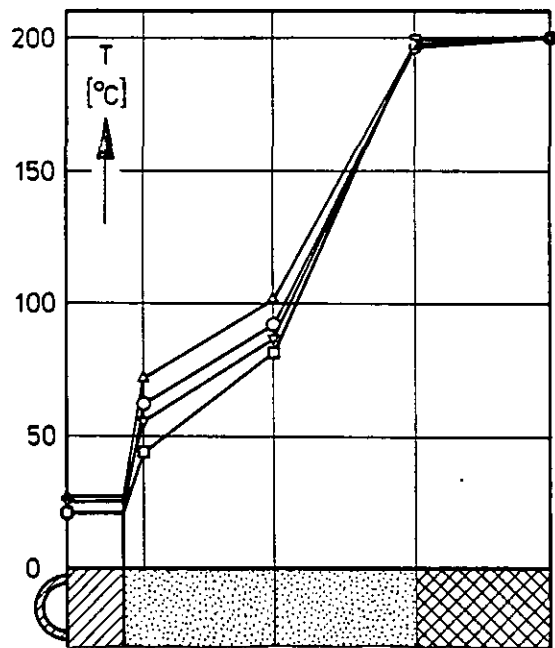


Abb. 4: Temperaturen innerhalb der Isolierung

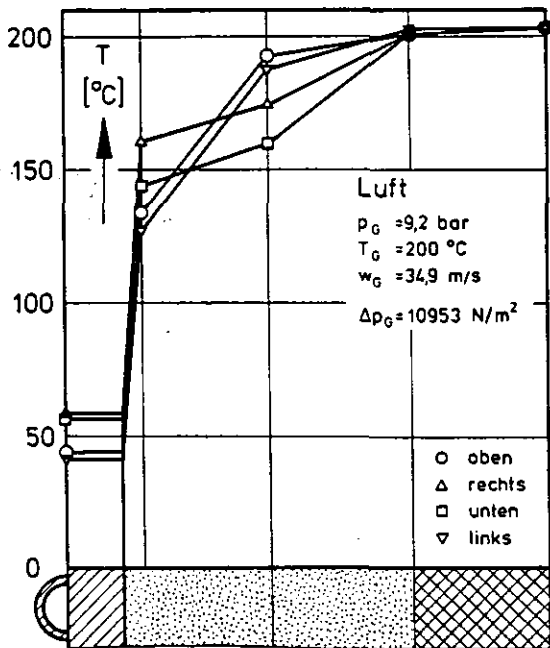


Abb. 5: Temperaturen innerhalb der Isolierung

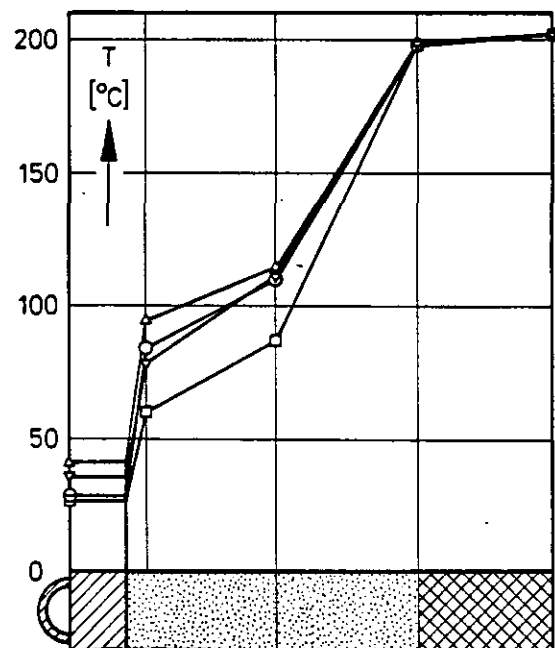


Abb. 6: Temperaturen innerhalb der Isolierung

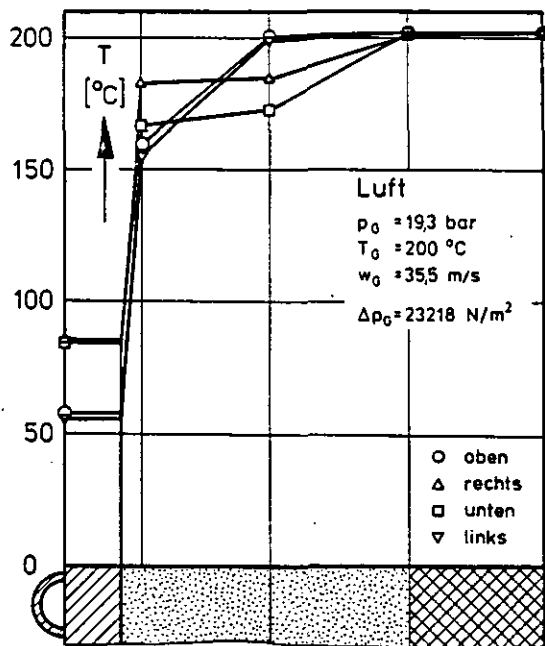


Abb. 7: Temperaturen innerhalb der Isolierung

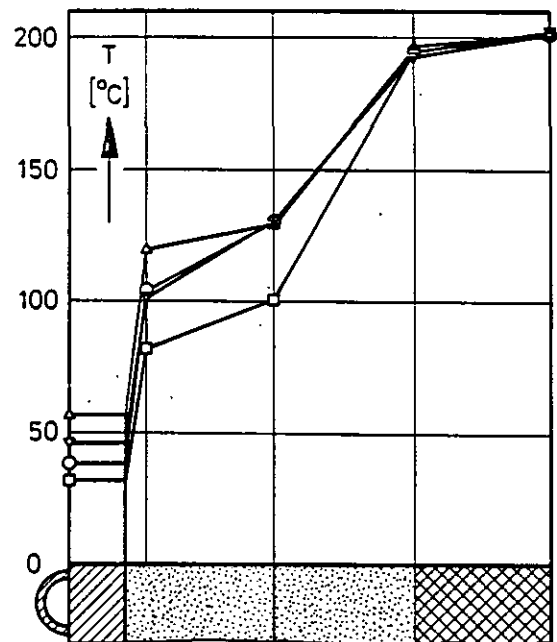


Abb. 8: Temperaturen innerhalb der Isolierung

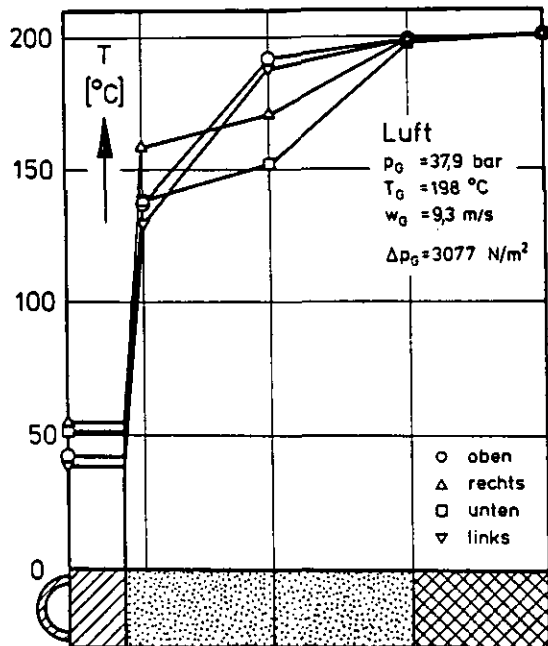


Abb. 9: Temperaturen innerhalb der Isolierung

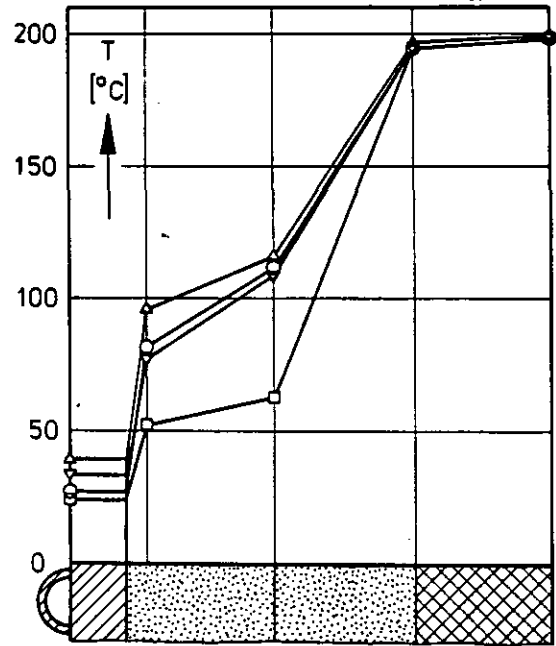


Abb. 10: Temperaturen innerhalb der Isolierung

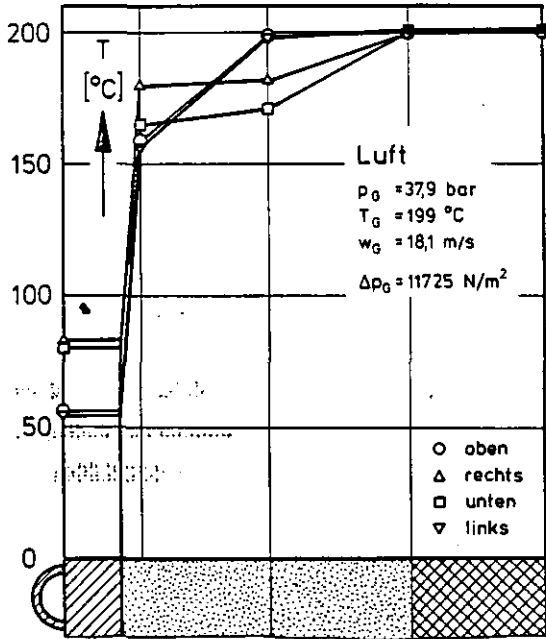


Abb. 11: Temperaturen innerhalb der Isolierung

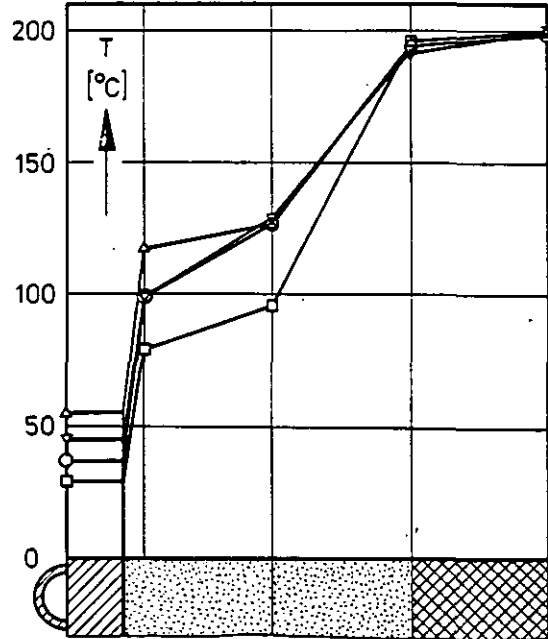


Abb. 12: Temperaturen innerhalb der Isolierung

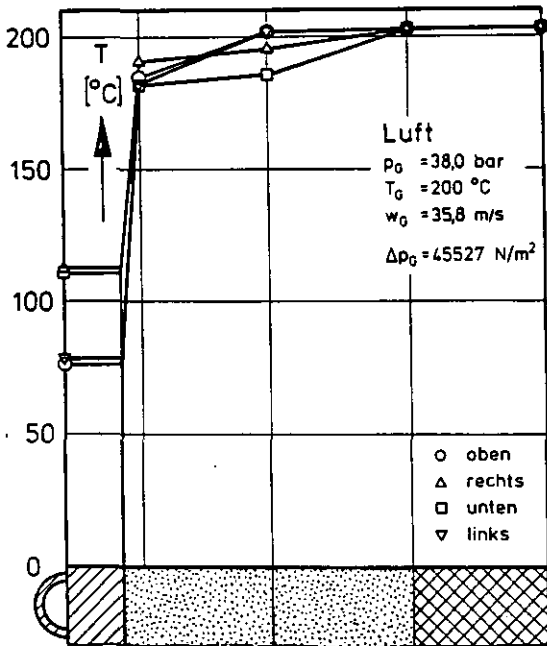


Abb. 13: Temperaturen innerhalb der Isolierung

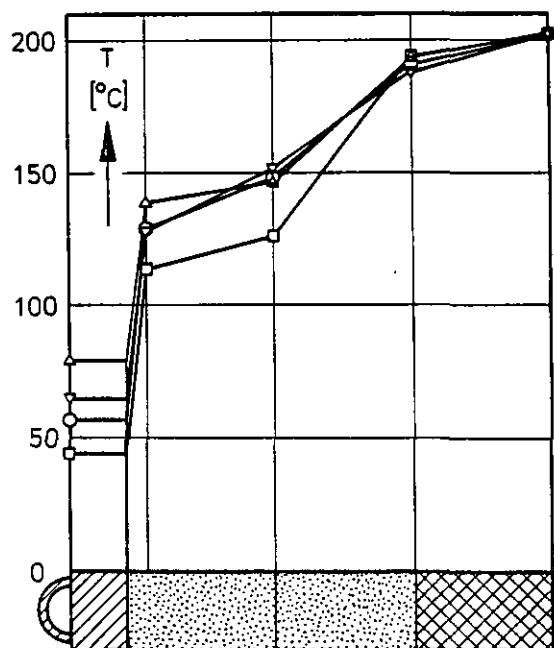


Abb. 14: Temperaturen innerhalb der Isolierung

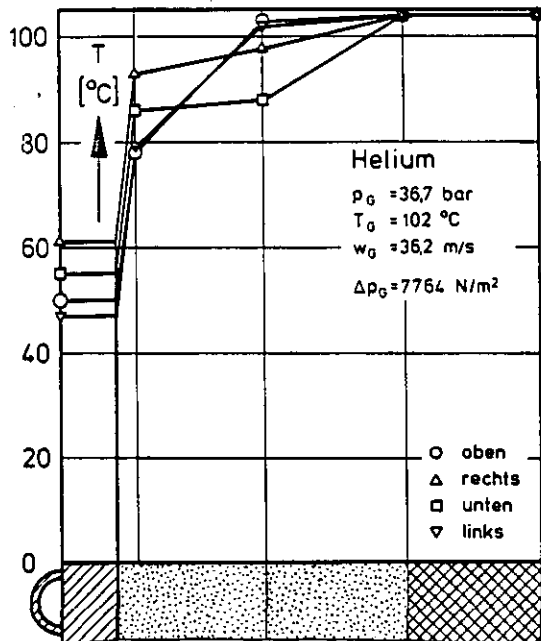


Abb. 15: Temperaturen innerhalb der Isolierung

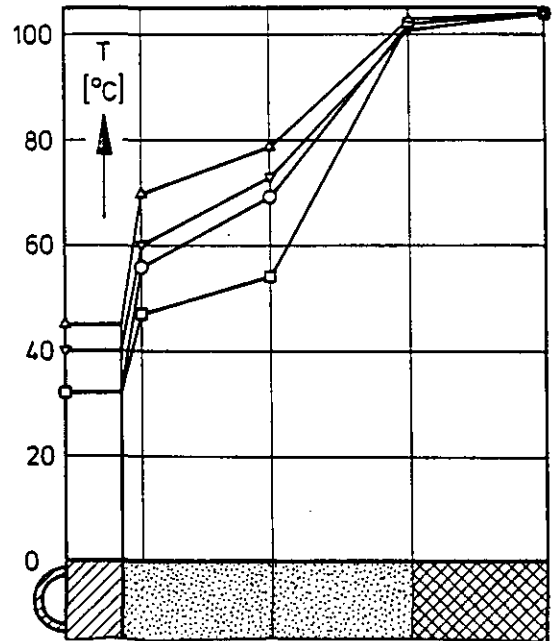


Abb. 16: Temperaturen innerhalb der Isolierung

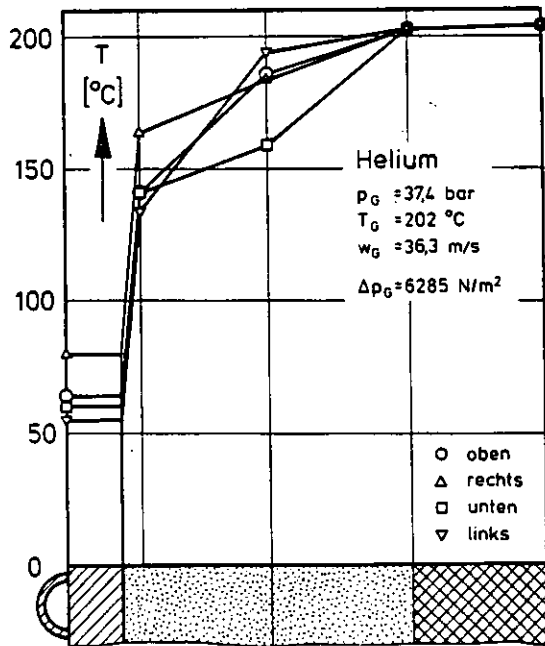


Abb. 17: Temperaturen innerhalb der Isolierung

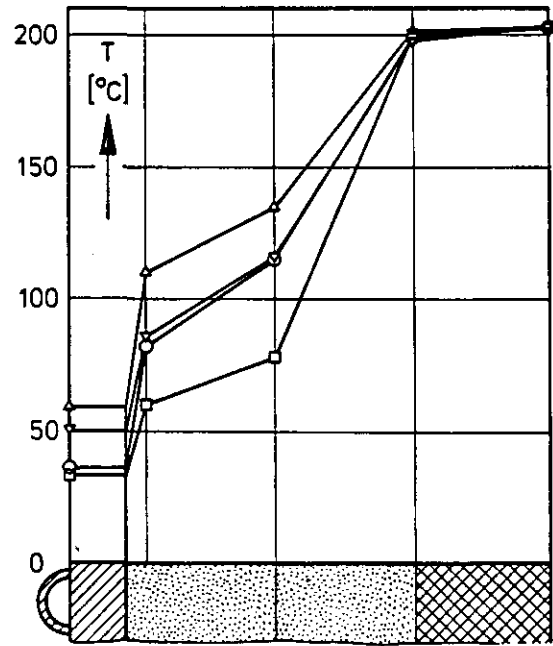


Abb. 18: Temperaturen innerhalb der Isolierung

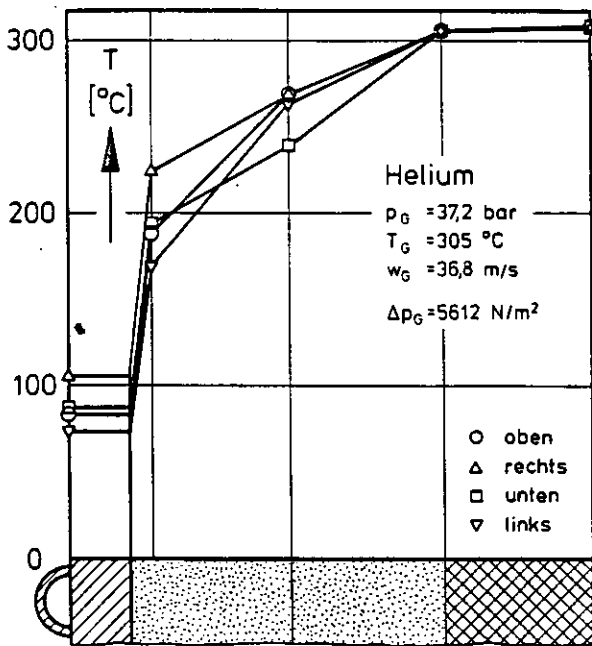


Abb. 19: Temperaturen innerhalb der Isolierung

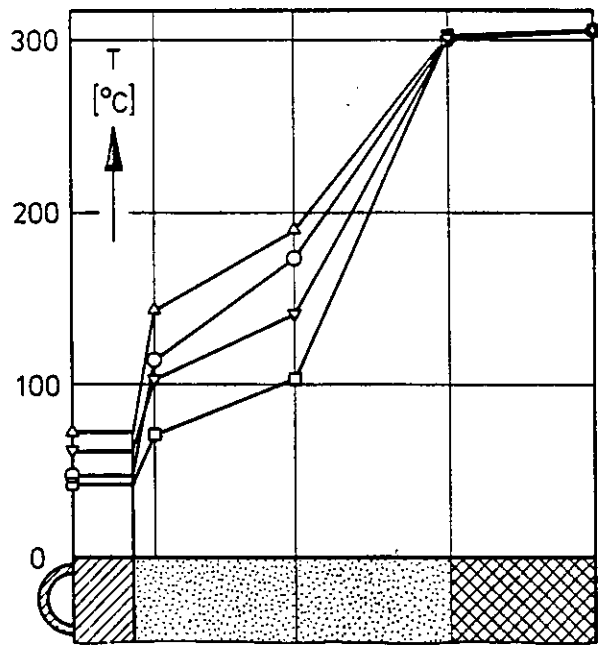


Abb. 20: Temperaturen innerhalb der Isolierung

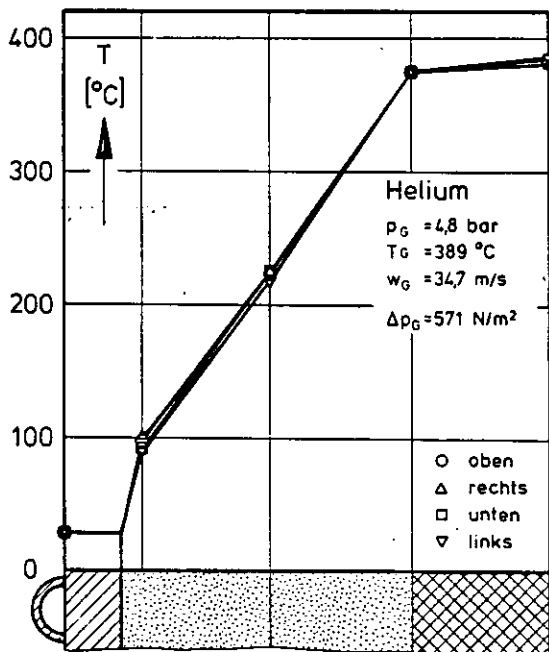


Abb. 21: Temperaturen innerhalb der Isolierung

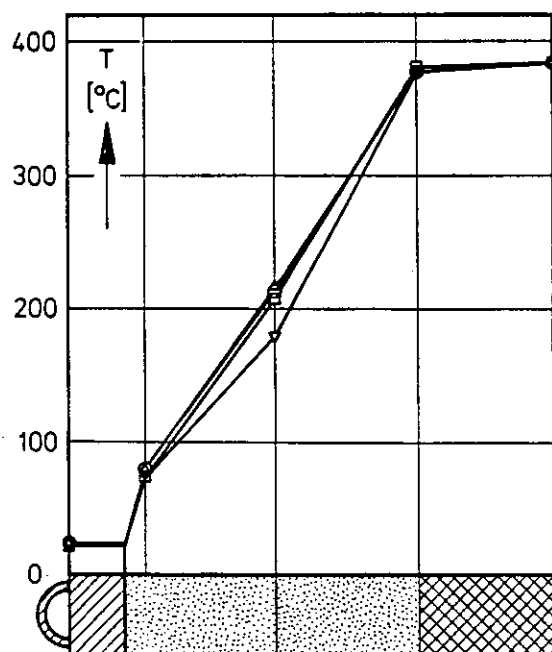


Abb. 22: Temperaturen innerhalb der Isolierung

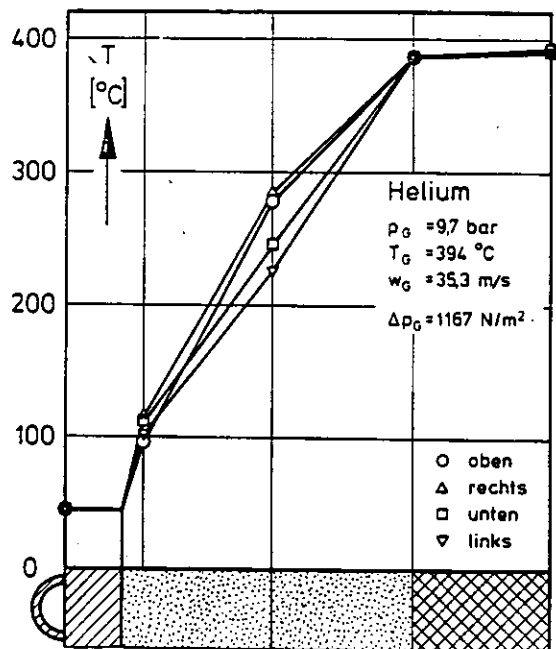


Abb. 23: Temperaturen innerhalb der Isolierung

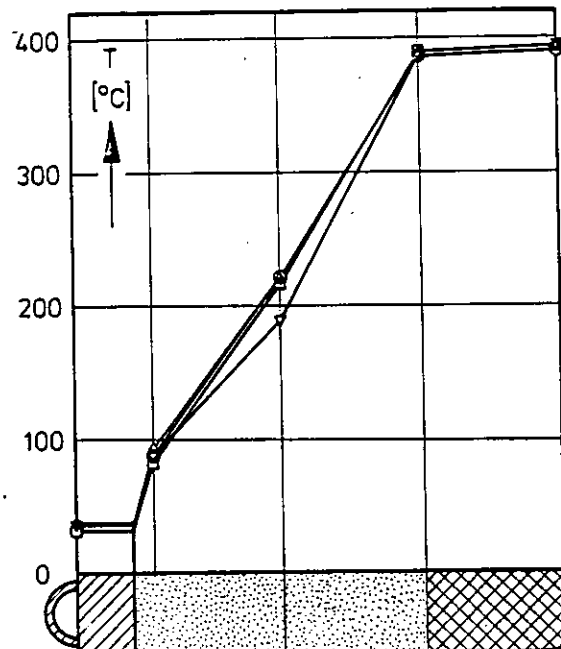


Abb. 24: Temperaturen innerhalb der Isolierung

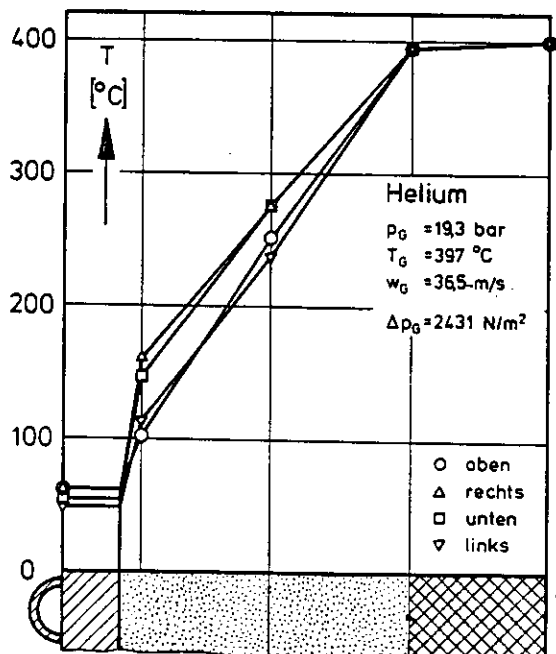


Abb. 25: Temperaturen innerhalb der Isolierung

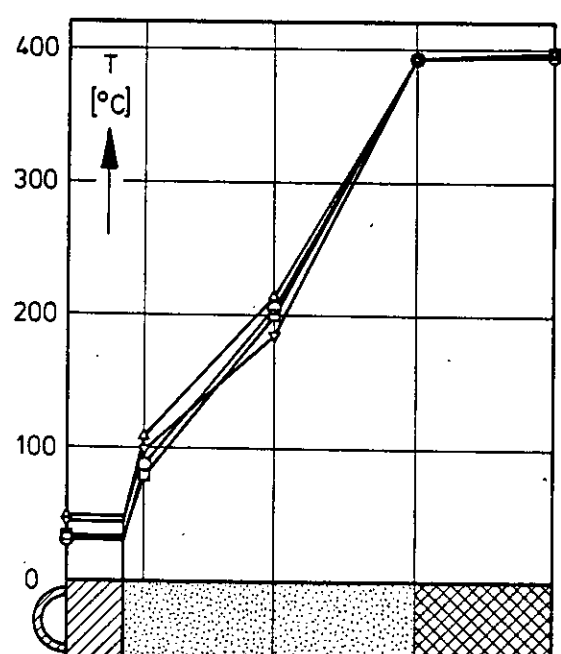


Abb. 26: Temperaturen innerhalb der Isolierung

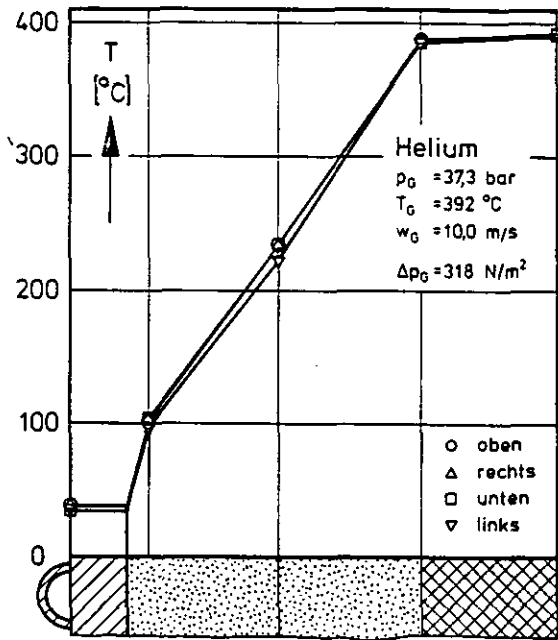


Abb. 27: Temperaturen innerhalb der Isolierung

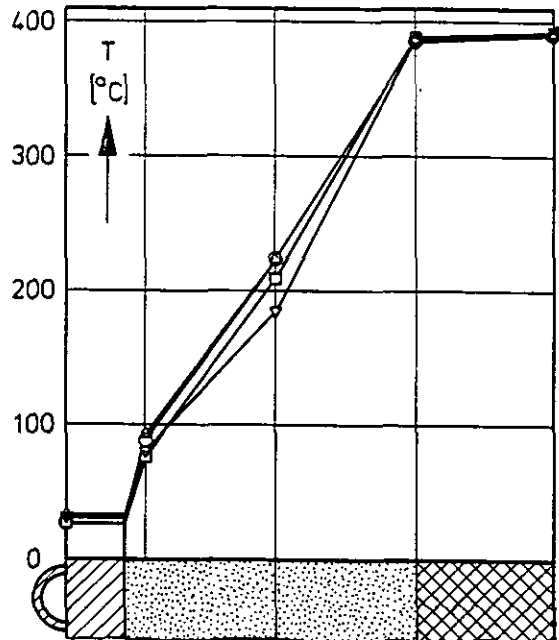


Abb. 28: Temperaturen innerhalb der Isolierung

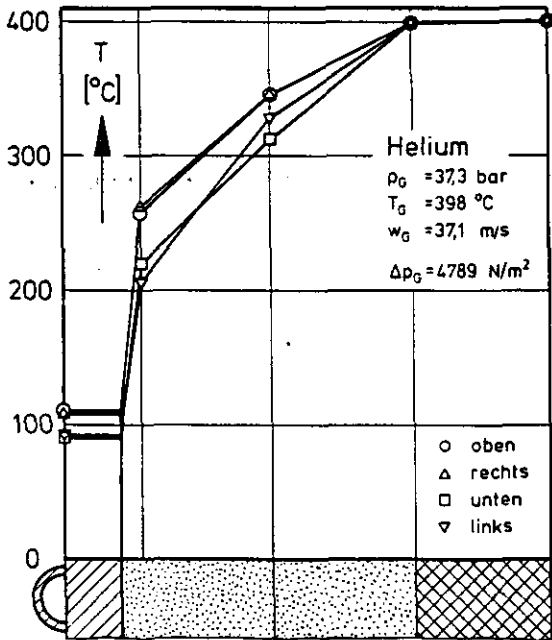


Abb. 29: Temperaturen innerhalb der Isolierung

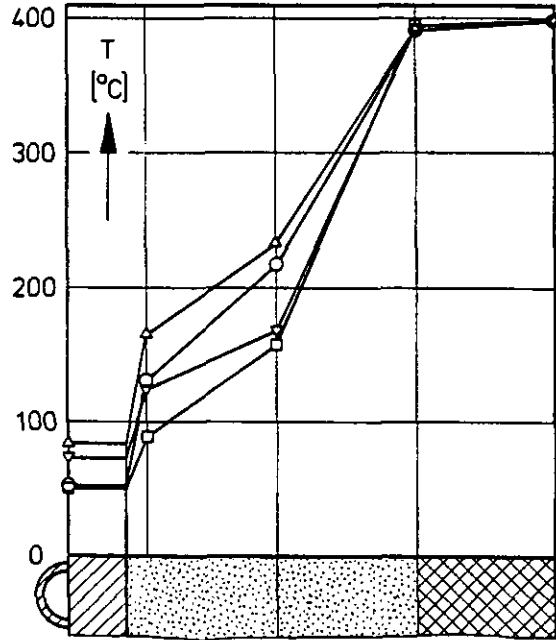


Abb. 30: Temperaturen innerhalb der Isolierung

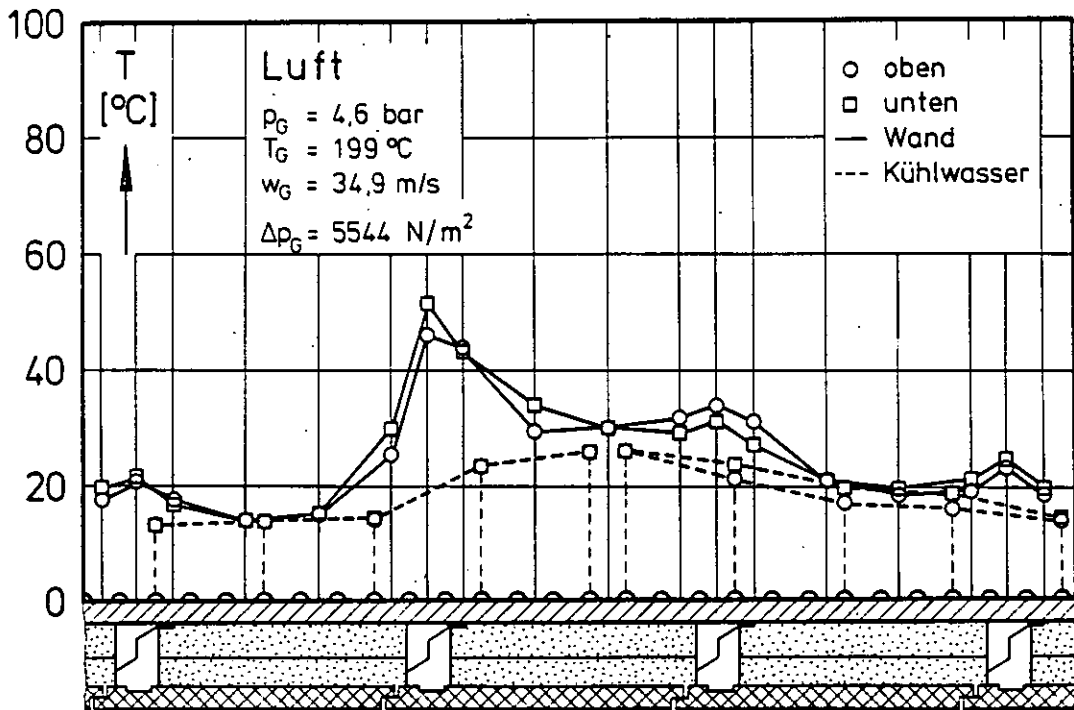


Abb. 31: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

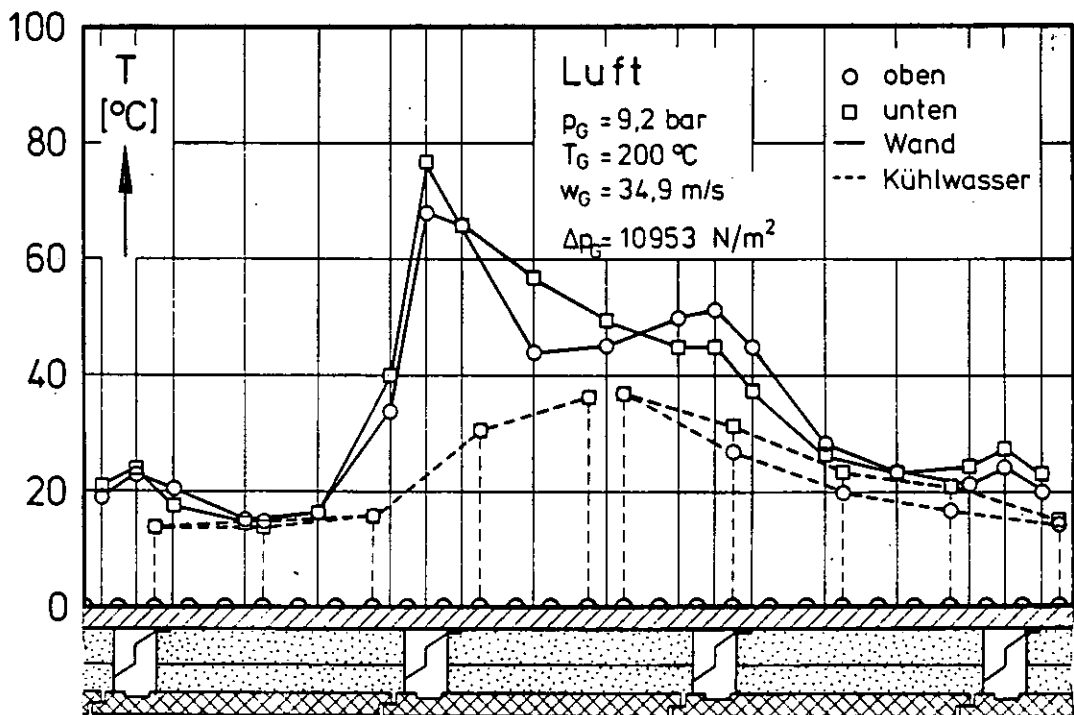


Abb. 32: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

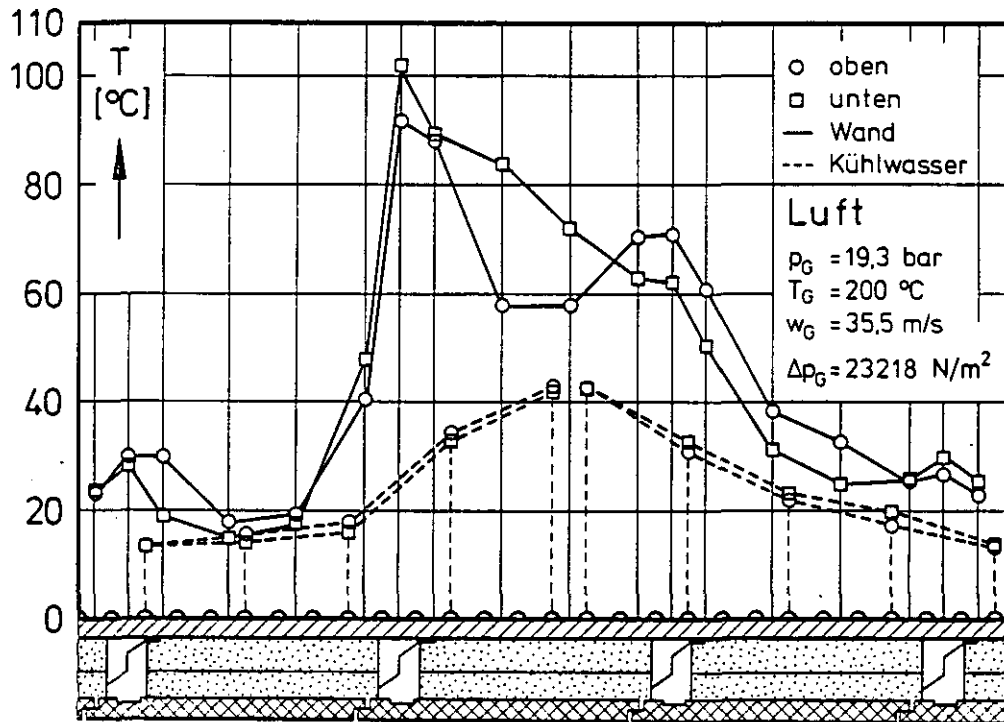


Abb. 33: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

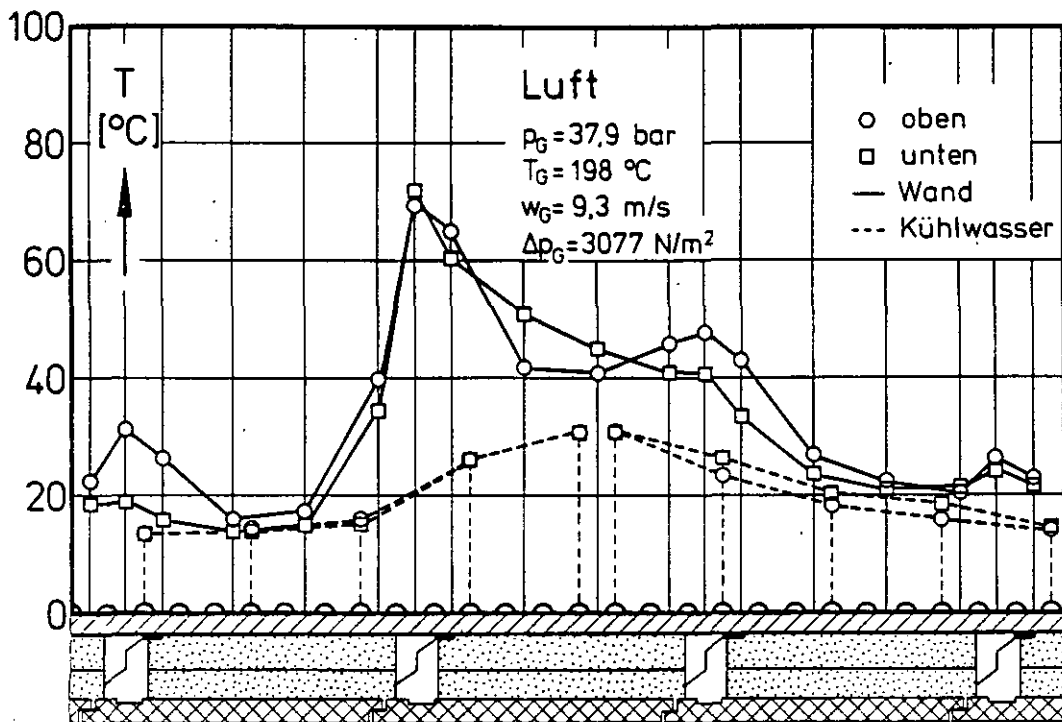


Abb. 34: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

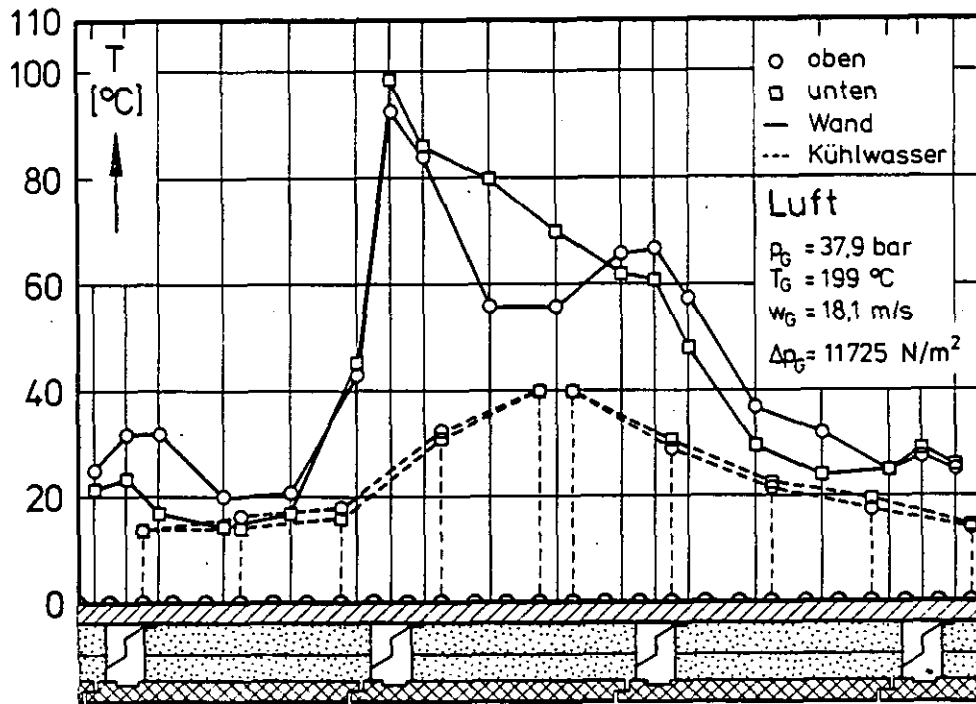


Abb. 35: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

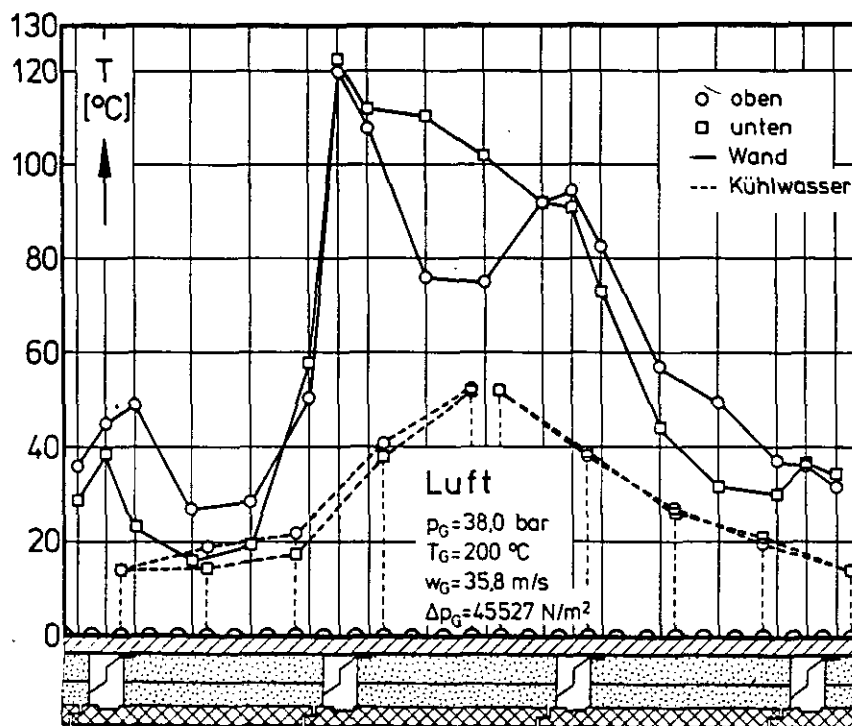


Abb. 36: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

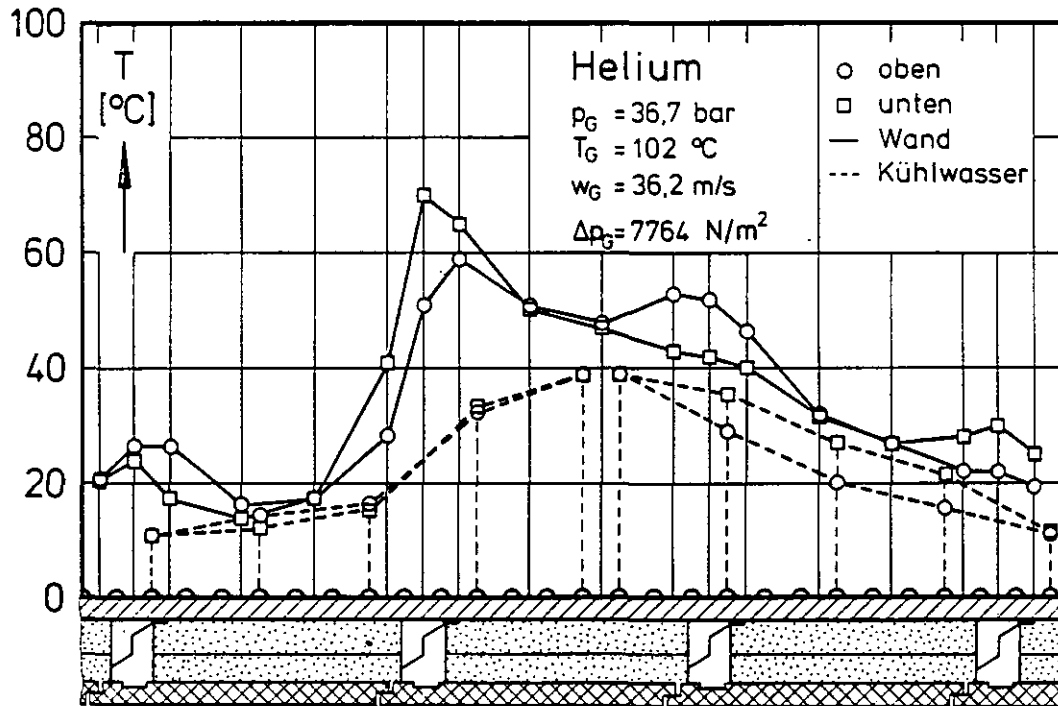


Abb. 37: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

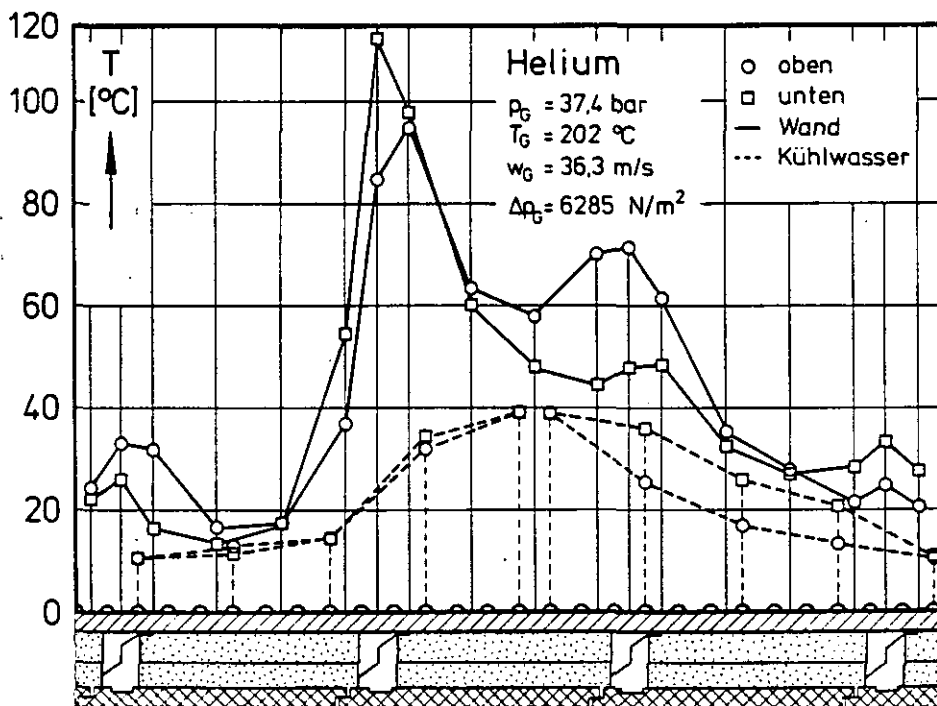


Abb. 38: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

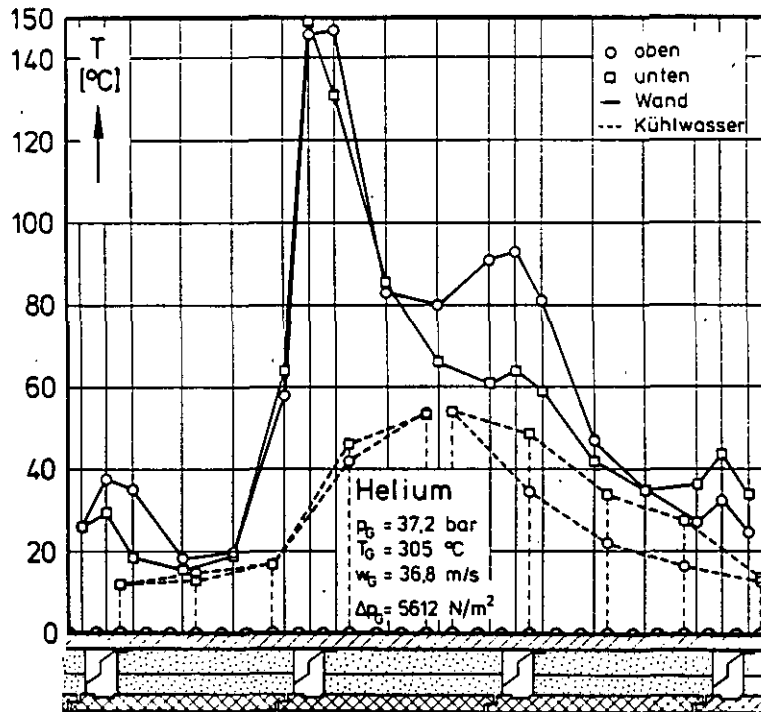


Abb. 39: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

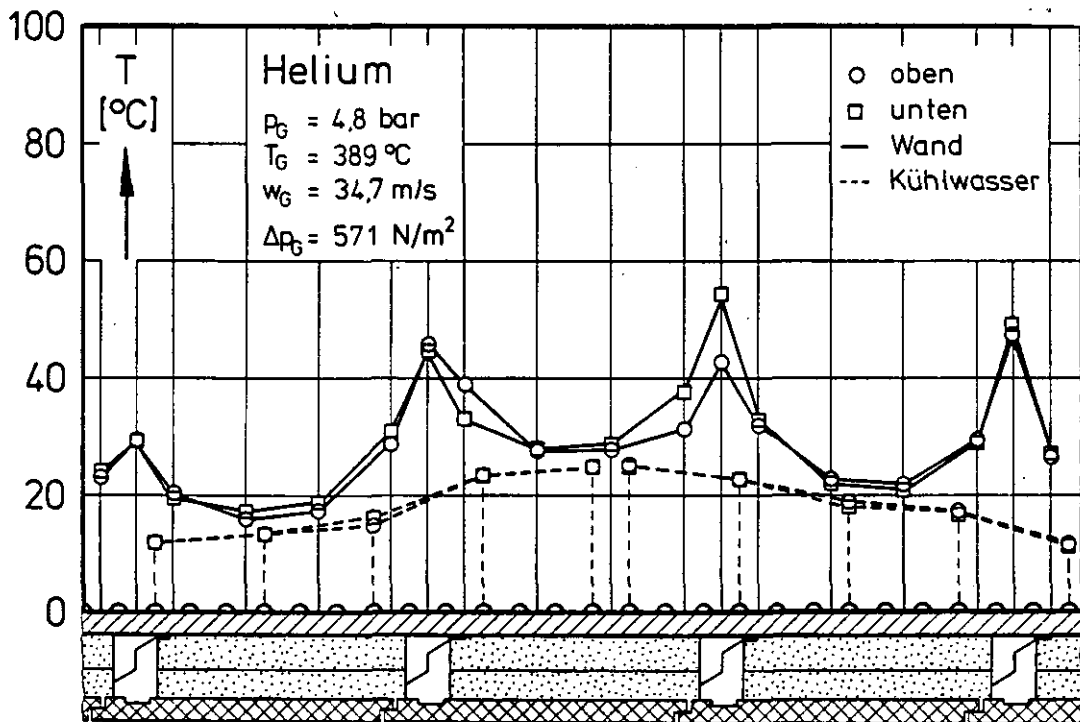


Abb. 40: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

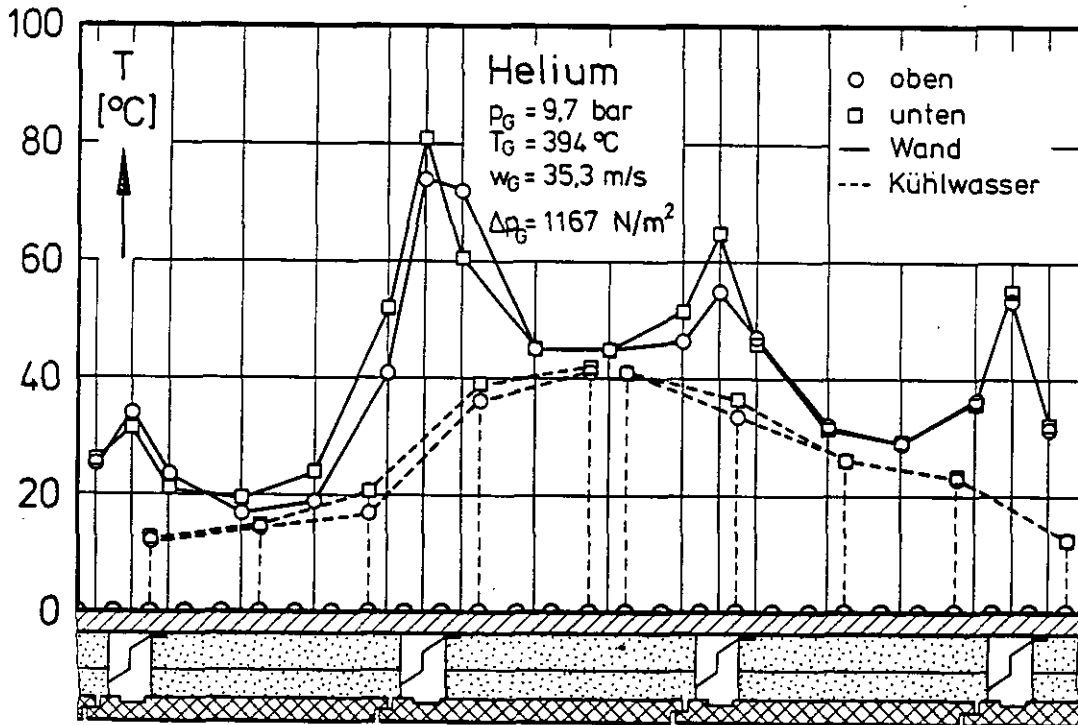


Abb. 41: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

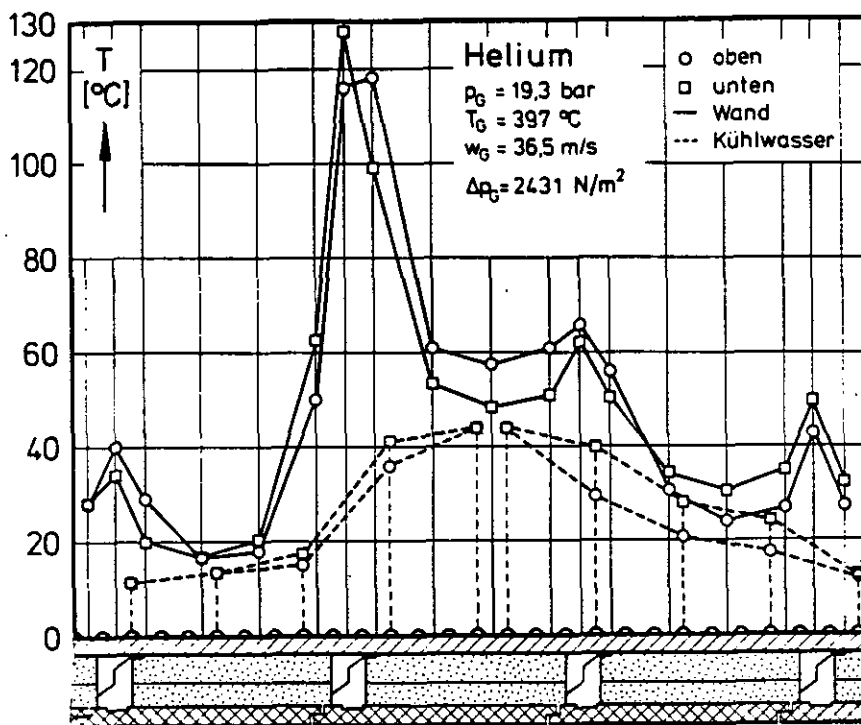


Abb. 42: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

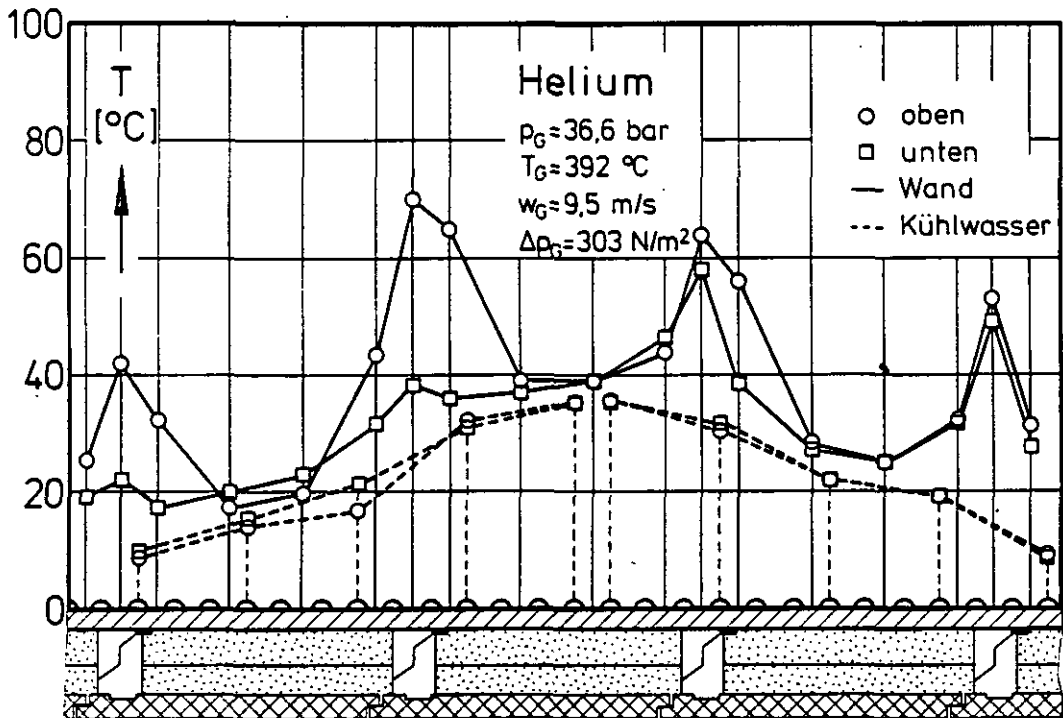


Abb. 43: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

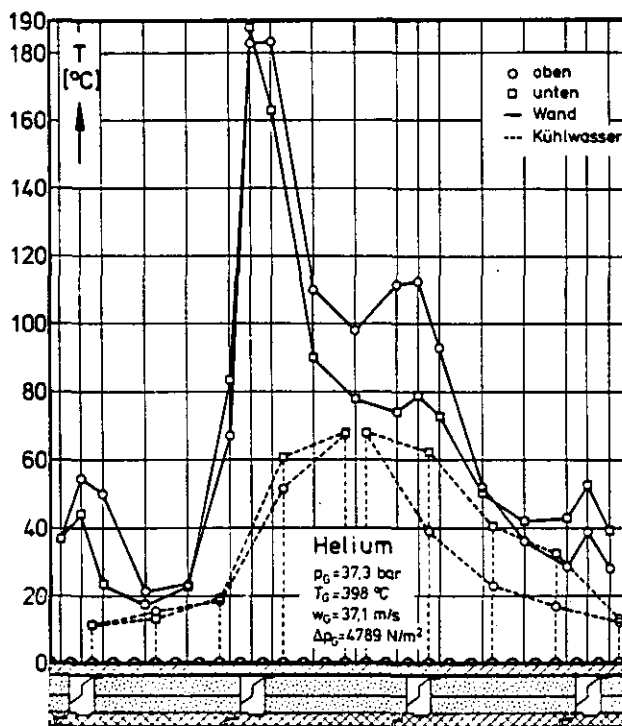


Abb. 44: Temperaturen der Rohrwand und des Kühlwassers

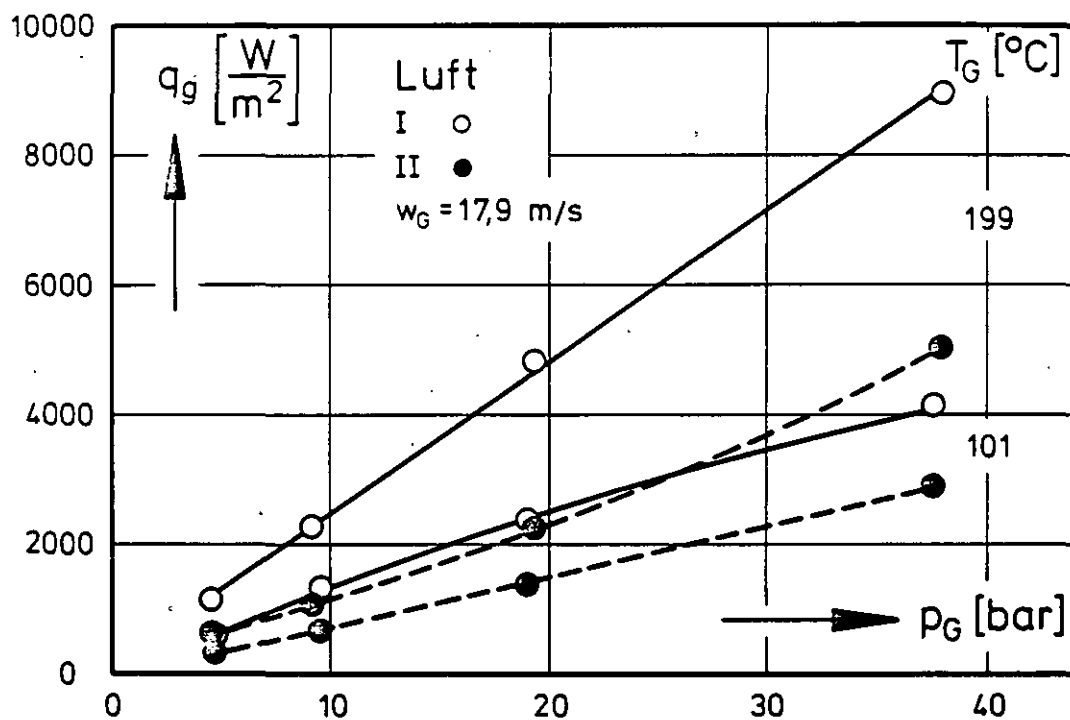


Abb. 45: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

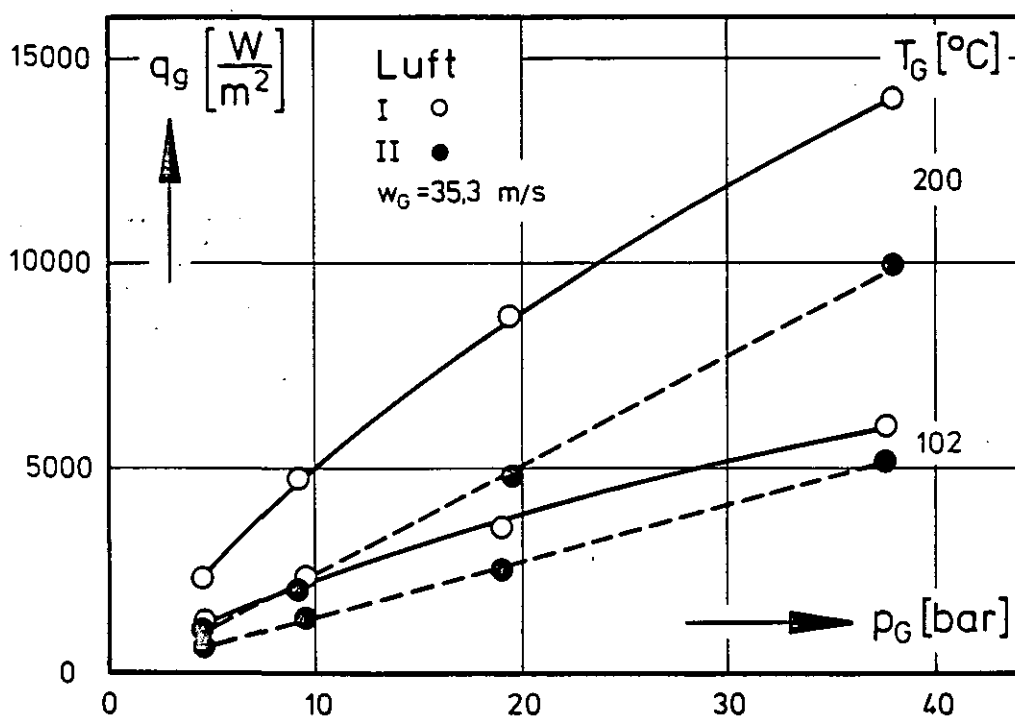


Abb. 46: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

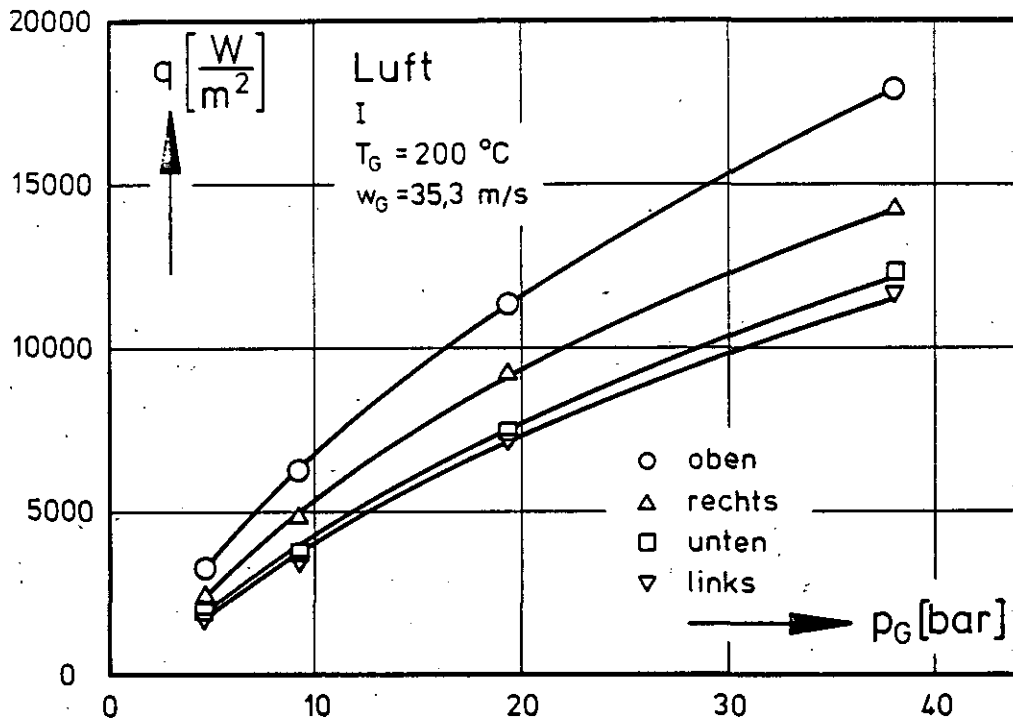


Abb. 47: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

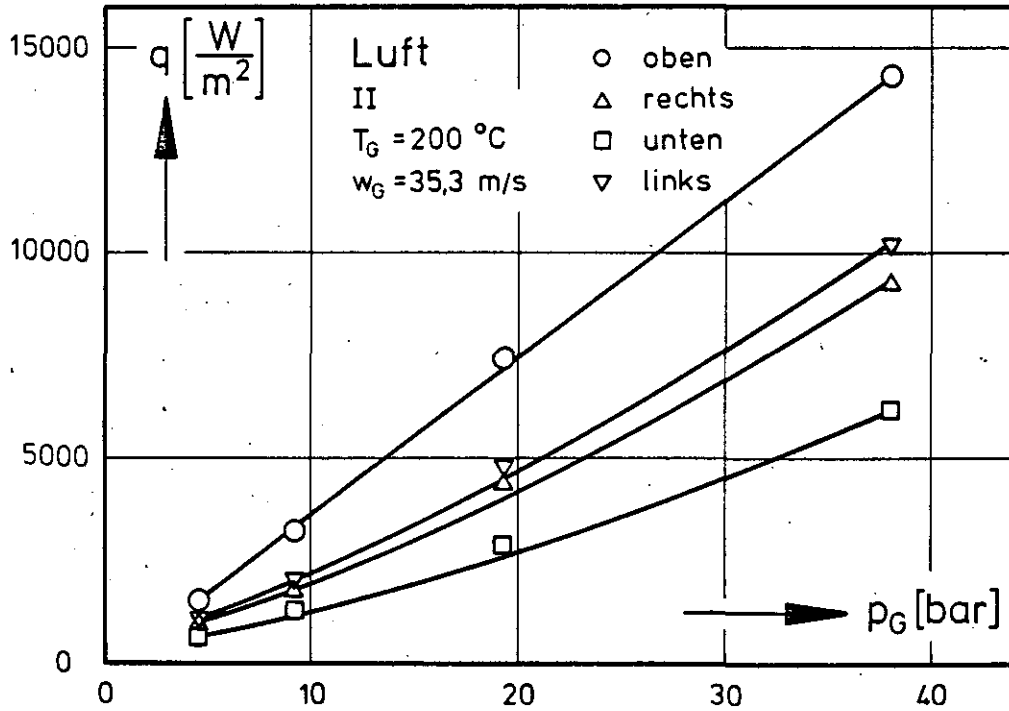


Abb. 48: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

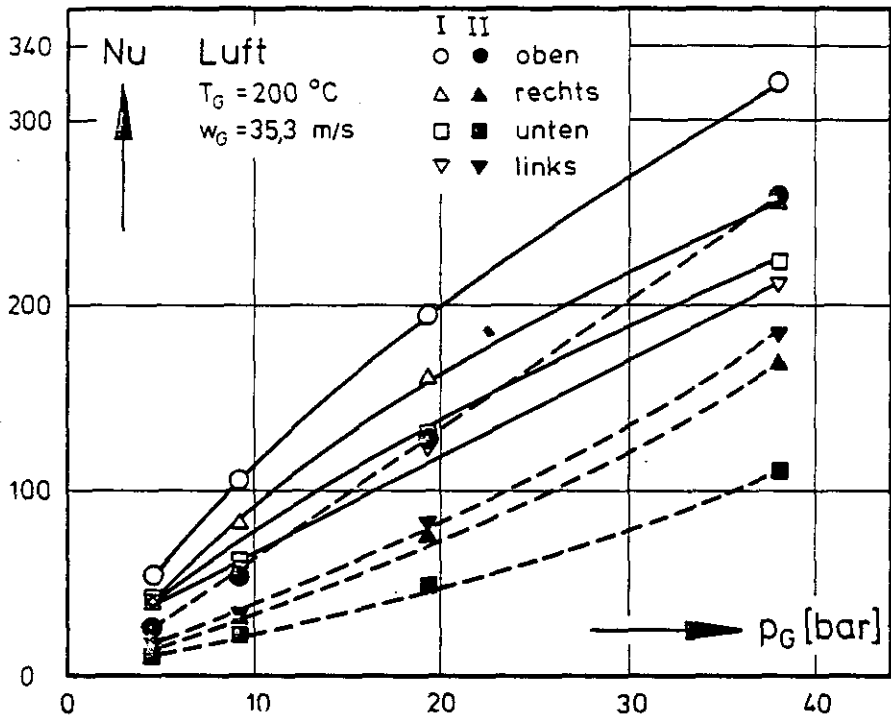


Abb. 49: Nusselt-Zahlen in Abhängigkeit vom Druck

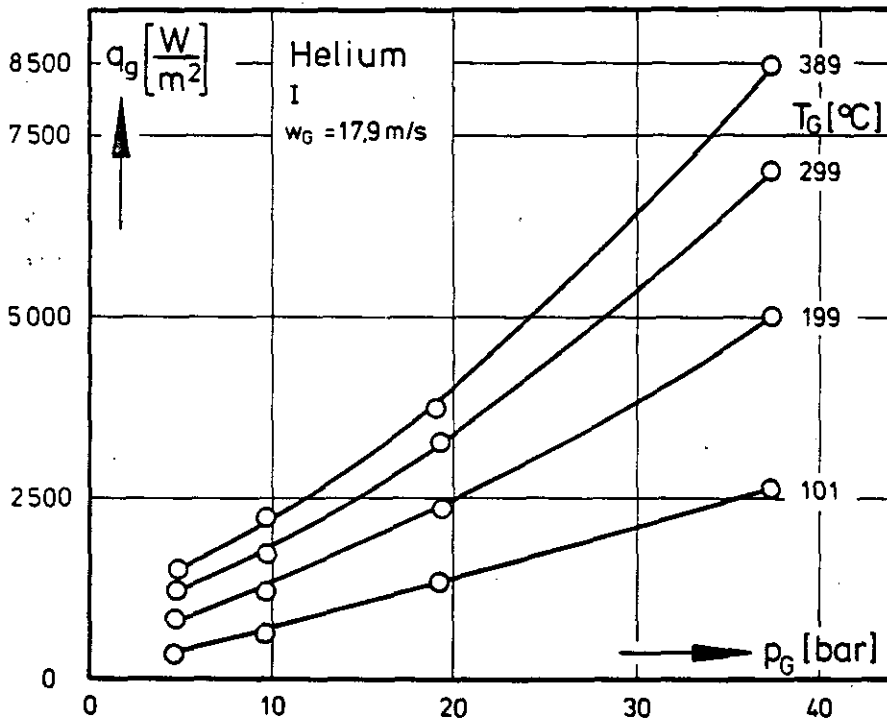


Abb. 50: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

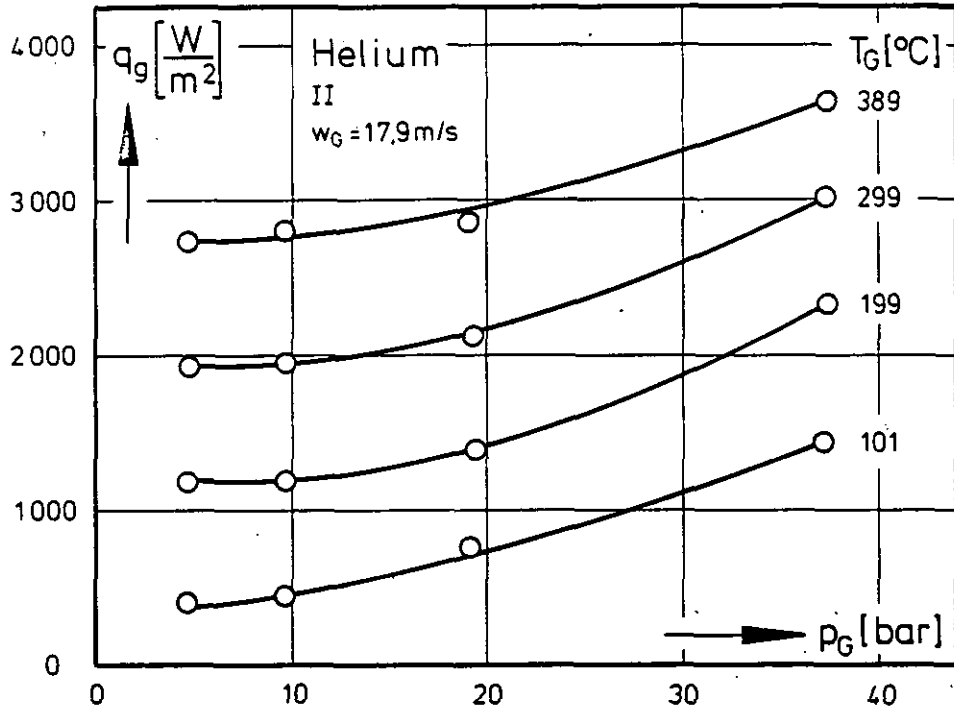


Abb. 51: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

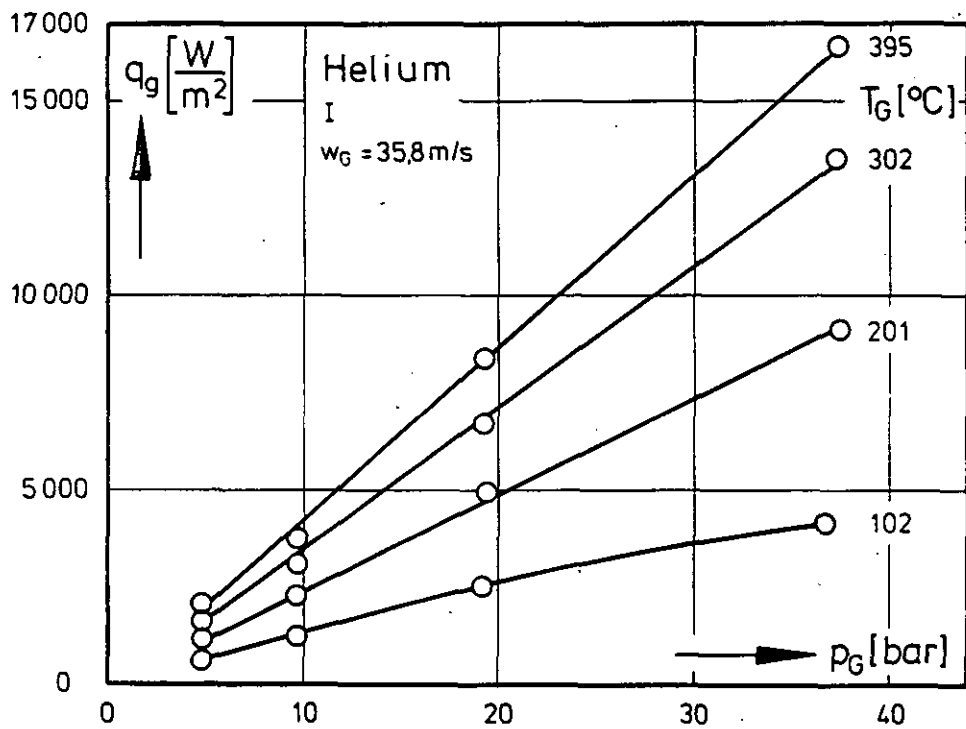


Abb. 52: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

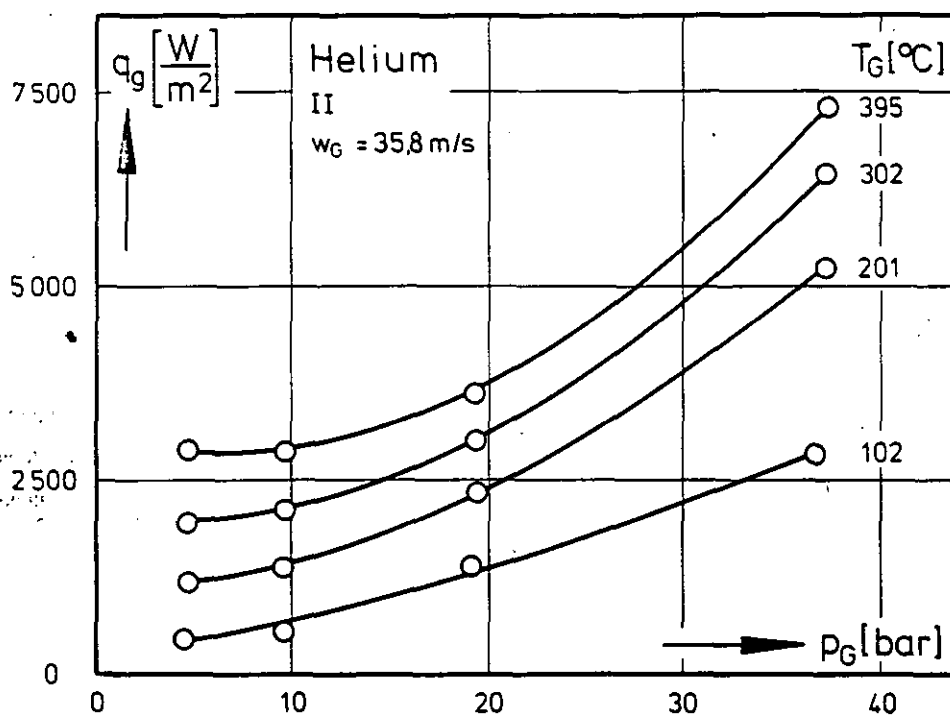


Abb. 53: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

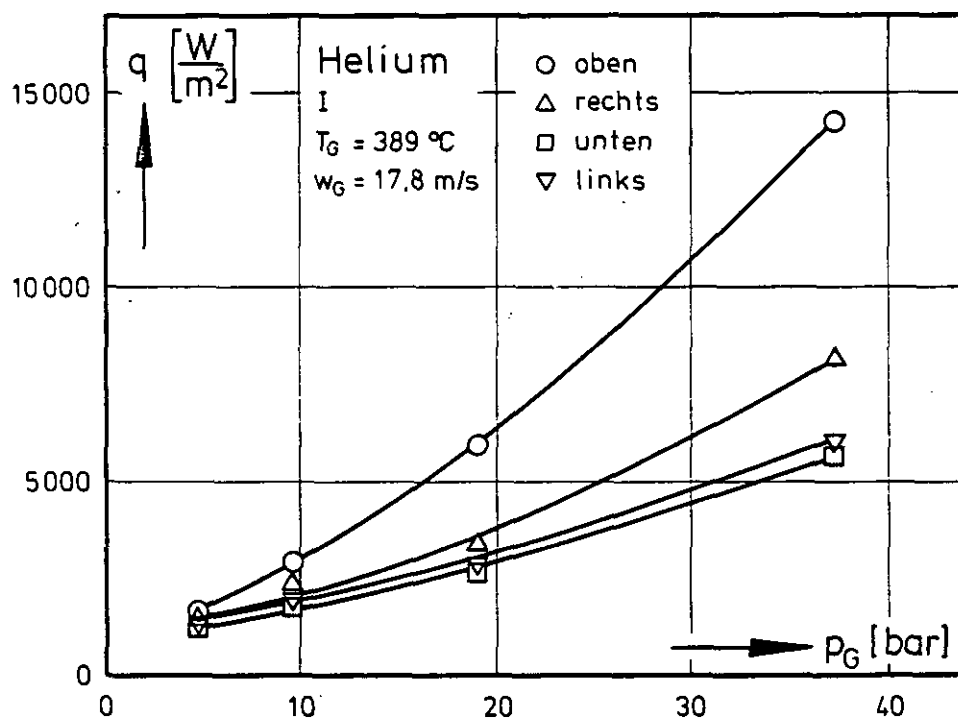


Abb. 54: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

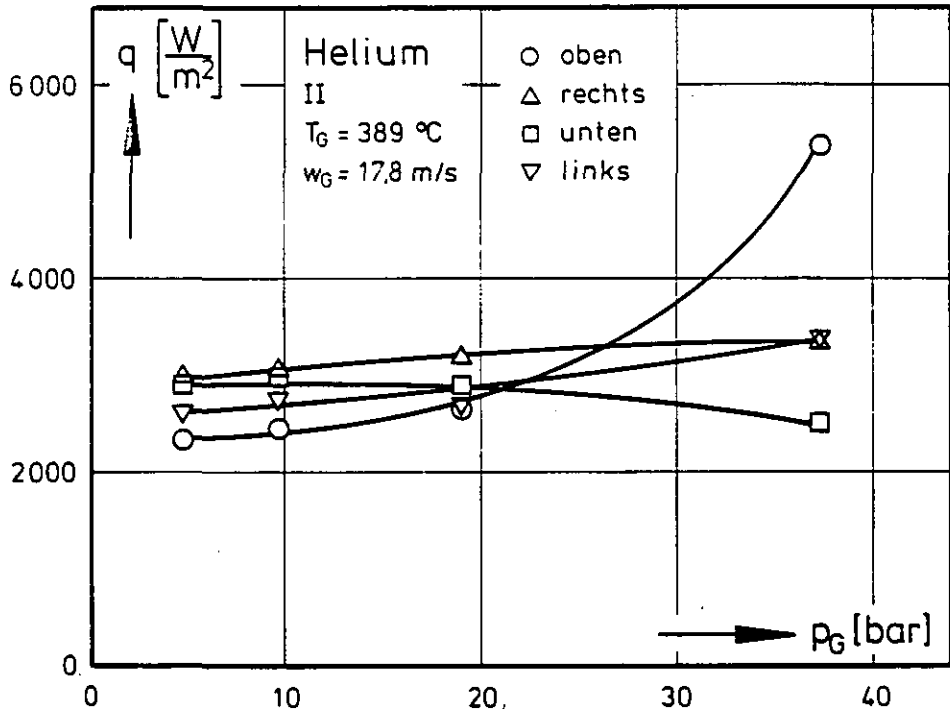


Abb. 55: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

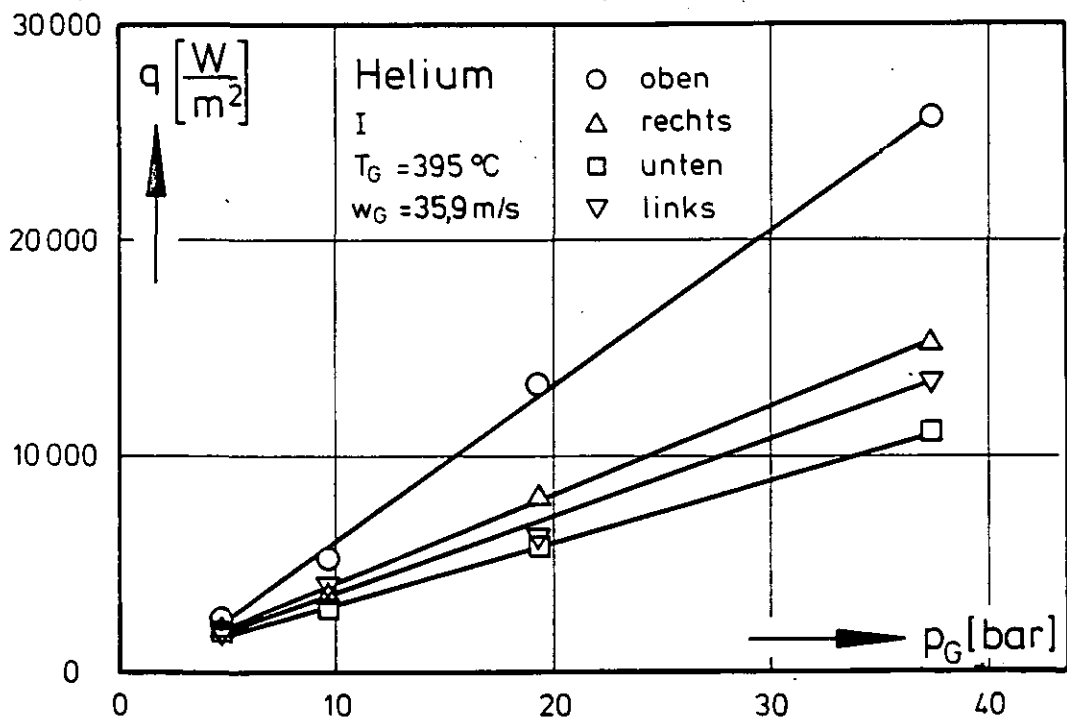


Abb. 56: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

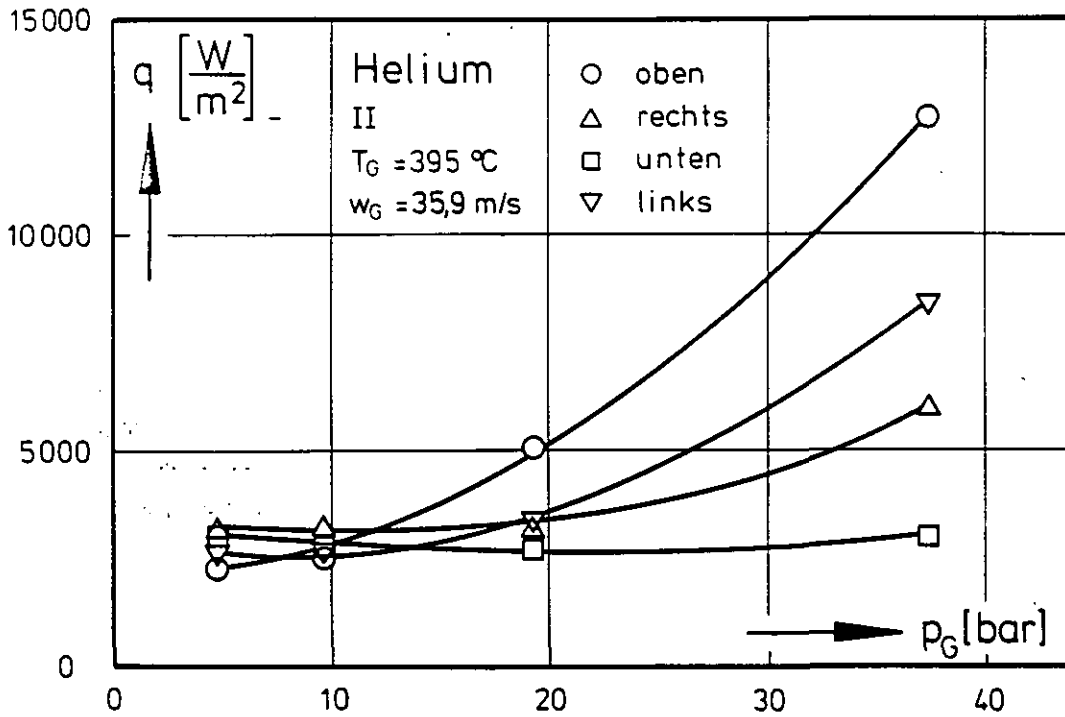


Abb. 57: Wärmeverluste in Abhängigkeit vom Druck

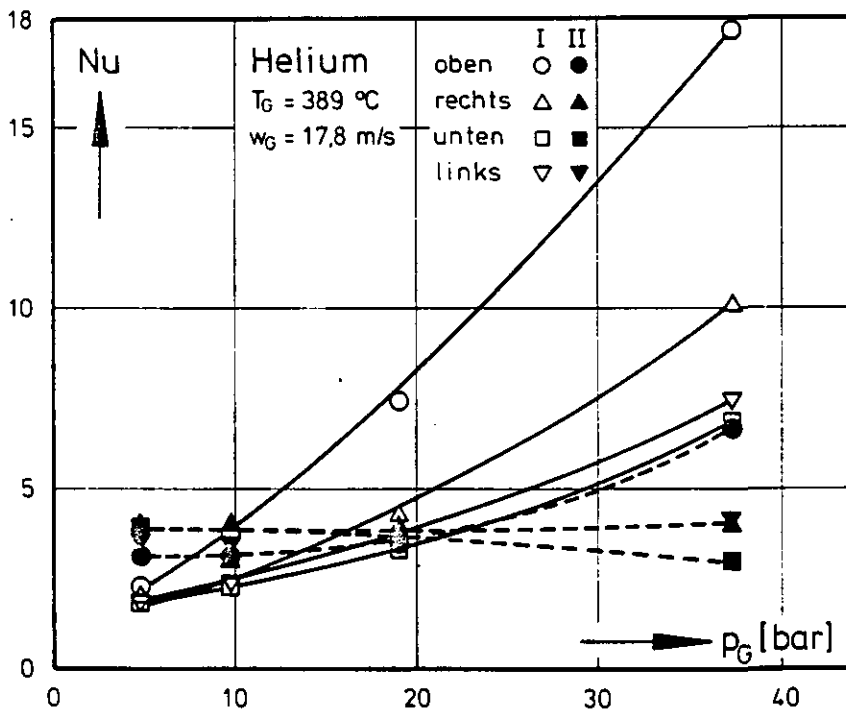


Abb. 58: Nusselt-Zahlen in Abhängigkeit vom Druck

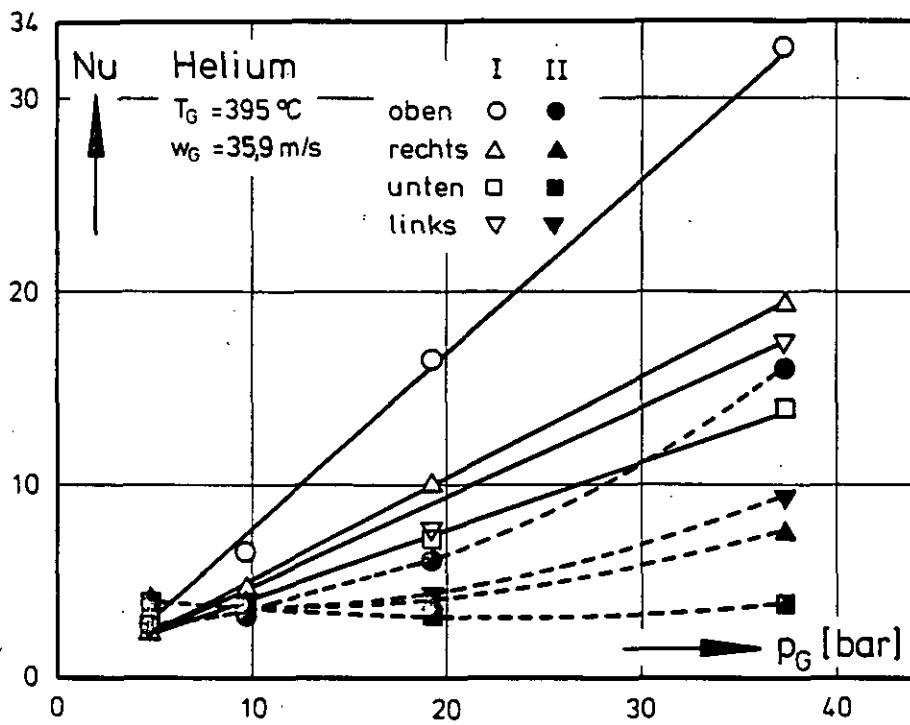


Abb. 59: Nusselt-Zahlen in Abhängigkeit vom Druck