

A 52

**Bericht Nr. 514**

**Porzellanleichtsteine „K“ und „T“  
der Krister Porzellanmanufaktur,  
Waldenburg (Schles.)**

8883



Oppau, am 29. September 1942 Sch/Gr.

**Betreff:** Bericht Nr. 514, Porzellanleichtsteine "K" und "T"

Wir bitten, die nachstehenden Berichtigungen vorzunehmen.

1.) S. 8 Die Klammer in Gleichung 3) muss den Exponenten "n" erhalten:

$$\frac{\lambda k}{\lambda'} = \text{konst.} \left( \frac{1 \cdot g \cdot op}{\lambda'} \cdot \frac{\lambda^2}{12 \cdot g^2} \cdot d^3 \cdot \frac{\Delta t}{T_m} \right)^n \quad 3)$$

2.) S. 10, Abs. 2, Z. 2:

".....Abbildung 6a für einen feinsporigen und 6b für einen grobsporigen Stein gezeigt."

3.) S. 11, Z. 2: "...gros-sporigen..."

Abs. 2, Z. 1: "....Temperaturursprunges...."

4.) S. 12, Z. 8: "In der Abbildung 7, Blatt 4, ist....."

Z. 1 von unten und Zeile 4 von unten: "....  $\lambda$  -werte...."

I. G. FARBENINDUSTRIE-AKTIENGESellschaft  
Technischer Prüfstand Oppau

8889

Oppau, am 29. September 1942 Sch/Gr.

**Betreff:** Bericht Nr. 514, Porzellanleichtsteine "K" und "T"

Wir bitten, die nachstehenden Berichtigungen vorzunehmen.

1.) S. 8 Die Klammer in Gleichung 3) muss den Exponenten "n" erhalten:

$$\frac{\lambda k}{\lambda'} = \text{konst.} \left( \frac{1 \cdot g \cdot op}{\lambda'} \cdot \frac{\lambda^2}{12 \cdot g^2} \cdot d^3 \cdot \frac{\Delta t}{T_m} \right)^n \quad 3)$$

2.) S. 10, Abs. 2, Z. 2:

".....Abbildung 6a für einen feinsporigen und 6b für einen grobsporigen Stein gezeigt."

3.) S. 11, Z. 2: "...gros-sporigen..."

Abs. 2, Z. 1: "....Temperaturursprunges...."

4.) S. 12, Z. 8: "In der Abbildung 7, Blatt 4, ist....."

Z. 1 von unten und Zeile 4 von unten: "....  $\lambda$  -werte...."

I. G. FARBENINDUSTRIE-AKTIENGESellschaft  
Technischer Prüfstand Oppau

8890

Oppau, am 29. September 1942 Sch/Gr.

**Betreff:** Bericht Nr. 514, Porzellanleichtsteine "K" und "T"

Wir bitten, die nachstehenden Berichtigungen vorzunehmen.

- 1.) S. 8 Die Klammer in Gleichung 3) muss den Exponenten "n" erhalten:

$$\frac{\lambda k}{\lambda} = \text{konst.} \left( \frac{1 \cdot g \cdot \text{op}}{\lambda} \cdot \frac{1}{12 \cdot 6^2} \cdot d^3 \cdot \frac{c \cdot t}{T_m} \right)^n \quad 3)$$

- 2.) S. 10, Abs. 2, Z. 2:

".....Abbildung 6a für einen feinporigen und 6b für einen grobporigen Stein gezeigt."

- 3.) S. 11, Z. 2: "...grossporigen..."

Abs. 2, Z. 1: "....Temperaturursprunges...."

- 4.) S. 12, Z. 8: "In der Abbildung 7, Blatt 4, ist....."

Z. 1 von unten und Zeile 4 von unten: "....  $\lambda$ -Werte...."

I.G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT  
Technischer Prüfstand Oppau

8891

*ju*

Oppau, am 29. September 1942 Sch/Gr.

**Betreff:** Bericht Nr. 514, Porzellanleichtsteine "K" und "T"

Wir bitten, die nachstehenden Berichtigungen vorzunehmen.

- 1.) S. 8 Die Klammer in Gleichung 3) muss den Exponenten "n" erhalten:

$$\frac{\lambda k}{\lambda} = \text{konst.} \left( \frac{1 \cdot g \cdot \text{op}}{\lambda} \cdot \frac{1}{12 \cdot 6^2} \cdot d^3 \cdot \frac{c \cdot t}{T_m} \right)^n \quad 3)$$

- 2.) S. 10, Abs. 2, Z. 2:

".....Abbildung 6a für einen feinporigen und 6b für einen grobporigen Stein gezeigt."

- 3.) S. 11, Z. 2: "...grossporigen..."

Abs. 2, Z. 1: "....Temperaturursprunges...."

- 4.) S. 12, Z. 8: "In der Abbildung 7, Blatt 4, ist....."

Z. 1 von unten und Zeile 4 von unten: "....  $\lambda$ -Werte...."

I.G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT  
Technischer Prüfstand Oppau

8892

*ju*

## Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 514

### Porzellanleichtsteine "K" und "T"

der Krister Porzellanmanufaktur, Waldenburg (Schles.).

**Übersicht:** Die Porzellanleichtsteine "K" und "T" der Krister Porzellanmanufaktur A.G., Waldenburg (Schles.), wurden auf ihre Eignung für die Zwecke der Hochdruckisolierung untersucht. Die wichtigsten Messdaten sind folgende:

		K	T
Grösste Wärmeleitzahl in Wasserstoff bei 70 at	kcal/hm <sup>°C</sup>	0,60	0,55
Porosität	Vol-%	78	90
Druckfestigkeit	kg/cm <sup>2</sup>	19	13
Wärmeausdehnung bei 20 - 50 <sup>°C</sup>	mm/mm <sup>°C</sup>	4x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-6</sup>
" " 150 - 200 <sup>°C</sup>	"	6x10 <sup>-6</sup>	19x10 <sup>-6</sup>

Die Wärmeleitzahlen der Steine in Wasserstoff sind bei Drücken unter 70 at vergleichsweise günstig. Bei Drücken über 70 at nehmen sie jedoch unzulässig hohe Werte an, sodass die Steine in der vorliegenden Beschaffenheit über 100 at nicht verwendet werden sollten. Die Wärmeausdehnungswerte sind bei "K" genügend hoch, bei "T" etwas reichlich. Auffällig ist die unterschiedliche Änderung der Werte mit der Temperatur und der starke Gang bei "T". Die Druckfestigkeiten sind ziemlich niedrig.

Zur Verbesserung der Steine ist anzustreben, unter Verringerung der Gesamtporosität die Einzelporen feiner und gleichmässiger zu machen.

Abgeschlossen am: 11. September 1942 Gr.

Bearbeiter: Ing. W. Schenker

*W. Schenker*

Die vorliegende Ausfertigung (1) enthält

- 13 Textblätter
- 4 Bildblätter
- 2 Zahlentafeln

#### Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1	26. 9. 42	Herrn Ob. Ing. Dr. Schierenbeck	14	28. 9. 42	Herrn Ob. Ing. Hemmann, Leuna
2	"	" " Berger, Lu. 10	15	"	" " Reg. B. Maier, "
3	"	" " Futterer, "	16	"	" " DI. Schwab, Leuna
4	"	" " Raichle, Lu. 558	17	"	Materialprüfungsbetrieb Leuna
5	"	" " Gähler, Lu. 10	18	26. 9. 42	Td./Erfahrungsaustausch,
6	"	" " Dipl. Ing. Ruhrberg, Op. 10	19	"	Techn. Prüfstand Op.
7	"	" " Ob. Ing. Hill, Op. 200	25	"	"
8	"	" " Dr. Kling, Op. 471	20	28. 3. 43	Oppersheim
9	"	" " DI. Schappert, Lu. 10			
10	"	" " Ing. Gg. Müller, Lu. 484			
11	"	" " Ing. J. Maier, Lu. 10			
12	"	" " Ing. Räder, Lu. 398			
13	"	" " Ing. Schenker, Op. 471			

8893

Porzellanleichtsteine "K" und "T"

der Krister Porzellanmanufaktur, Waldenburg (Schles.).

Einleitung

Es ist beabsichtigt, für DHD-Öfen an Stelle von Leichtschamottesteinen, insbesondere z.B. des Leichtschamottesteines "L O,9/26/2", aus Gründen der chemischen Neutralität Porzellansteine zu verwenden, insoweit diese einen günstigen Gehalt an Tonerde und einen geringen Eisenanteil besitzen. Es wurden daher die

Porzellansteine (Schamottelichtsteine) "K" und "T" der Krister Porzellanmanufaktur A.G., Waldenburg (Schles.), auf ihre Wärmeleitfähigkeit untersucht. Wenn auch für DHD-Öfen zunächst nur Drücke bis 70 at vorkommen, so wurde die Untersuchung doch weiter ausgedehnt, und zwar auf Wunsch des Betriebes, sodann aber auch wegen der besonderen Struktur der Steine.

Beide Sorten wurden in Wasserstoff und in Stickstoff untersucht, und zwar

Sorte "K" in Wasserstoff	bei	1 at,	70 at,	200 at,	300 at	und	600 at,
" " " Stickstoff	"	"	"	"	"	und	200 at,
Sorte "T" in Wasserstoff	"	"	"	"	"	"	"
" " " Stickstoff	"	"	"	"	"	"	"

Die Steine sind hochporös; jedoch besitzen die Poren nur in gewissen Gebieten die für Hochdruckisolierung erforderliche Kleinheit, während sie in anderen Gebieten viel zu gross sind und auch Hohlräume und Lunker auftreten, wie die Bilder 5a, b und c zeigen werden.

518 94/1

Tabelle 1: Die wichtigsten physikalischen Daten der Steine

Probe		K	L
Raumgewicht der Probesteine	kg/m <sup>3</sup>	376	333
" " Versuchskugeln	"	419	393
" " Wasserwägung	"	546	323
Spez.Gewicht,	"	2426	3375
Porenvolumen	%	78	90
Druckfestigkeit	kg/cm <sup>2</sup>	19,3	12,7
Wärmedehnung bei 20-50°C	mm/mm°C	4,0x10 <sup>-6</sup>	4,0x10 <sup>-6</sup>
" " 50-100"	"	3,6x10 <sup>-6</sup>	8,6x10 <sup>-6</sup>
" " 100-150"	"	3,2x10 <sup>-6</sup>	13,5x10 <sup>-6</sup>
" " 150-200"	"	6,4x10 <sup>-6</sup>	12,2x10 <sup>-6</sup>

Zieht man einmal die Mittel aus den drei Raumgewichtsangaben, so betragen diese 447 und 350 kg/m<sup>3</sup>. Die grösste Abweichung ist dann bei "K" +22,2%, bei "T" +12,0%. Bei den 8 für jede Versuchskugel verwendeten Steinen traten folgende Abweichung des Raumgewichtes auf:

Tabelle 2

Probe	K	T
Mittlere Abweichung %	4,8	8,0
Grösste " "	+8,7	+16,2

Vier ausgeschiedene Steine hatten Abweichungen von -11 und -11% bei "K" und -17 und +31% bei "T".

Die Ergebnisse der Wasserwägung sind an Steinresten von 148 bzw. 54 g Trockengewicht (ausgeschiedene Steine) gewonnen, sie haben

also, wenn auch sorgfältig gemessen, nur Einzelwertcharakter. Die Porosität kann man mit einiger Annäherung wie folgt aufteilen:

Tabelle 3

Probe	K	T
Offene Poren %	56	82
Geschlossene Poren %	22	8

Ein erheblicher Unterschied besteht auch im spezifischen Gewicht der beiden Proben.

Versuchsergebnisse:

Die Untersuchung der Sorte "K" erfolgte in der 1000 at-Bombe (170/90 mm  $\phi$ ), die der Sorte "T" in der 200 at-Bombe (200/100 mm  $\phi$ ). Es wurden Versuchsreihen für die einzelnen Drücke in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied  $\Delta t$  durchgeführt. Die gemessenen Wärmeleitzahlen sind auf den Zahlentafeln 1 und 2 niedergelegt und auf den Blättern 1 und 2 aufgetragen. Ausserdem sind sie in runden Werten in den Tabellen 4 bis 6 zusammengestellt.

Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit des Porzellansteines "K" in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied  $\Delta t$ .

Gas	Druck atabs	Temperaturunterschied $\Delta t$ in $^{\circ}\text{C}$				
		0	100	200	300	400
Wasserstoff	600	0,380	4,0 bei 35 $^{\circ}$		-	-
	300	0,380	2,550	-	-	-
	200	0,380	1,530	1,695	1,585	-
	70	0,380	0,595	0,595	0,600	0,600
	1	0,380	0,400	0,415	0,430	0,445
Stickstoff	300	0,180	3,070	-	-	-
	200	0,180	2,035	2,035	1,960	-
	70	0,180	0,870	0,935	0,920	0,900
	1	0,180	0,190	0,200	0,210	0,220

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeit des Porzellansteines "T"  
in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied  $\Delta t$ .

Gas	Druck atabs	Temperaturunterschied $\Delta t$ in $^{\circ}\text{C}$				
		0	100	200	300	400
Wasserstoff	200	0,308	1,480	1,548	1,548	-
	70	0,308	0,472	0,520	0,540	0,540
	1	0,308	0,320	0,332	0,344	0,355
Stickstoff	200	0,150	2,204	2,185	-	-
	70	0,150	0,618	0,642	-	-
	1	0,150	0,159	0,168	0,177	0,186

Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit der Porzellansteine "K" und "T"  
in Abhängigkeit vom Druck bei  $t_m = 75^{\circ}\text{C}$

Stein	Gasart	Druck in atabs				
		600	300	200	70	1
"K"	Wasserst.	4,70	2,13	1,35	0,60	0,40
	Stickst.	-	2,95	1,94	0,78	0,19
"T"	Wasserst.	-	-	1,18	0,45	0,32
	Stickst.	-	-	2,05	0,58	0,16

Die Wärmeleitfähigkeit der beiden Steine bei 1 atabs ist sowohl in Stickstoff als, der Gasart entsprechend, auch in Wasserstoff ziemlich niedrig. Auch ihre Zunahme mit steigender Temperatur ist bei diesem Druck schwach, siehe Abb.1 und 3, Blatt 1 und 2. Ihre Zunahme mit steigendem Gasdruck ist jedoch, wie besonders deutlich Abb.2 und 4, Blatt 1 und 2, erkennen lässt, außerordentlich stark. Bei 70 at, dem vorläufig höchsten

für DHD-Anlagen bemtztsten Druck, beträgt die Wärmeleitfähigkeit in Wasserstoff 0,60 bzw. 0,54 kcal/hm<sup>0</sup>C und hat damit Werte, die gerade noch tragbar sind, bei anderen Steinen übrigens erst um 200 at eintreten. Die entsprechenden Werte für Stickstoff liegen mit 0,90 und 0,64 sogar über denen für Wasserstoff. Oberhalb 70 at gehen die Wärmeleitahlen immer schneller hoch und erreichen bald Werte von 2, ja von 5 kcal/hm<sup>0</sup>C, sodass sich die Verwendung der Steine höchstens für Drücke aufwärts bis zu 100 at rechtfertigen lässt.

Zum Vergleich ist in den Abbildungen 2 und 4 die  $\lambda$ -p-Linie des Leichtschamottesteines "L 0,9/26/2" eingetragen<sup>1)</sup>, an dessen Stelle die Porzellansteine im DHD-Ofen verwendet werden sollen, der seinerseits allerdings ein Optimum darstellt. Dieser Stein hat bei 70 at in Wasserstoff eine Wärmeleitahl von 0,5 kcal/hm<sup>0</sup>C, also nicht viel weniger als die Porzellansteine; seine  $\lambda$ -p-Charakteristik verläuft jedoch viel flacher als die der Steine "K" und "T" und, seiner Feinporigkeit entsprechend, nach unten abgebogen und nicht wie bei "K" und "T" nach oben. Der Unterschied zwischen "L 0,9/26/2" und den Porzellansteinen bei höheren Drücken fällt als denkbar schroff ins Auge.

Die Druckfestigkeiten von "K" und "T" mögen mit 19 bzw. 13 kg/cm<sup>2</sup> vielleicht genügen, sind aber an sich recht gering (L 0,9/26/2 besitzt demgegenüber eine immerhin wesentlich höhere Druckfestigkeit von 48 kg/cm<sup>2</sup>).

Die Wärmeausdehnungszahl des "K"-Steines, dessen Verwendung vorzugsweise ins Auge gefasst war, dürfte mit Werten von 4 bis 6x10<sup>-6</sup>/°C gerade ausreichend sein, während die des "T"-Steines mit 4 bis 19x10<sup>-6</sup>/°C bei den hohen Temperaturen des DHD-Ofens möglicherweise zu gross ist ("L 0,9/26/2" hat ~5 bis 5,5x10<sup>-6</sup>/°C). Wie die Tabelle 1 zeigt, hat die Wärmeausdehnungszahl des "K"-Steines zwischen 20 und 200°C ein leicht ausgeprägtes Minimum, während die des "T"-Steines durch einen ausserordentlich starken Anstieg mit der Temperatur auffällt. Dieser Anstieg bei "T" könnte, besonders beim Anheizen, zu erheblichen Spannungen führen, denen die geringe Festigkeit unter Umständen nicht gewachsen wäre. Diese Erscheinungen sind in der Zusammensetzung

<sup>1)</sup> s. Bericht Techn. Prüfstand Op. Nr. 428 v. 26. 7. 40.

der Steine begründet. Im allgemeinen steigt die W.A.Z. ( $\beta$ ) mit steigender Temperatur; es kommen jedoch auch Maxima und Minima vor und ist auch das Auftreten mehrerer solcher durchaus möglich. Offenbar spielen hier Umwandlungspunkte eine Rolle.

Nach allem kann der Verwendung der beiden Porzellansteine "K" und "T" nur für nicht zu hohe Drücke, etwa bis zu 100 at, und auch für diesen Bereich nur bedingt, zugestimmt werden.

Möglichkeiten, diese Steine für Zwecke der Hochdruckisolierung geeigneter zu machen, werden sich aus den nachstehenden Betrachtungen ergeben.

### Grundsätzliche Betrachtungen

Über die Porositätsverhältnisse der Porzellansteine "K" (und "T") geben die Abbildungen 5a, b und c, Blatt 3, einen gewissen Aufschluss. Sie zeigen einen Schnitt über Eck, einen Längsschnitt und eine Aufsicht eines Porzellansteines "K". Wie man sieht und wie eingangs erwähnt, besitzt der Stein die für die Zwecke der Hochdruckinnenisolierung erforderliche Porenstruktur nur gebietsweise, so s.B. in Bild 5a und am Rande des Steines, in Bild 5c mehr in der Mitte der Fläche. Die groben Poren, Löcher und Lunker, s. bes. Bild 5a, setzen den Druck, bis zu dem die Steine einen annehmbaren Isolierwert haben, herab, da sie zur Entwicklung starker Konvektionswirkungen Anlass geben.

Sieht man als Grundvorgang bei der Wärmeübertragung durch ein porenhaltiges Körpersystem die Wärmeleitung in der festen Körpermasse und im porenfüllenden Gas an, so würde die Wärmeübertragung wohl von Körper- und Gasart, Gesamtporosität und Temperatur abhängen, aber nicht von der Porengröße und vom Druck. Diese üben jedoch neben den erstgenannten Faktoren in etwas anderer Weise eine zweifache Wirkung aus, und zwar durch ihren Einfluss auf die Konvektion und auf den Temperatursprung. Von diesen tritt die Konvektion vorzugsweise in größeren Poren auf und erhöht die Wärmeübertragung, der Temperatursprung tritt vorzugsweise in den feineren Poren auf und vermindert die Wärmeübertragung. Beide Einflüsse werden erkennbar, wenn man die gemessenen Wärme -

Leitzahlen" für die einzelnen Gase und Drücke über dem in der Probe herrschenden Temperaturunterschied (Temperaturgefälle)  $\Delta t$  aufträgt, s. hier die Abb. 1 und 3, und zwar zeigt sich die Konvektion in dem starken Anstieg der Kurven mit zunehmendem  $\Delta t$ , der umso stärker ist, je grösser der Gasdruck ist, der Temperatursprung darin, dass die einzelnen Kurven bei  $\Delta t = 0$  nicht in einen Punkt zusammenlaufen. Man erkennt, dass in den Porzellansteinen "K" und "T" eine unzulässig hohe Konvektion und kein Temperatursprung auftritt.

Den Vorgang der Konvektion hat Kling<sup>2)</sup> mit Hilfe der Gleichung

$$Nu = f(Pr, Gr) \quad -1)$$

mathematisch dargestellt. Es bedeuten

Nu die Nusselt'sche Kennzahl,

Pr die Prandtl'sche Kennzahl und

Gr die Grashof'sche Kennzahl,

die sämtlich dimensionslos sind. Mit der Festsetzung

$$Nu = \frac{\lambda_k}{\lambda'} \quad 2),$$

wo  $\lambda_k$  den konvektiven Anteil an der Wärmeübertragung und

$\lambda'$  die Wärmeleitfähigkeit des Gases bedeuten, erhält man aus 1) die entwickelte Gleichung

$$\frac{\lambda_k}{\lambda'} = \text{konst.} \left( \frac{\eta \cdot g \cdot c_p}{\lambda'} \cdot \frac{g^2}{\eta^2 \cdot g^2} \cdot d^3 \cdot \left( \frac{\Delta t}{T_m} \right)^n \right)$$

Hierin bedeuten noch

$\eta$  die dynamische Zähigkeit des Gases in  $\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ ,

$c_p$  die spez. Wärme des Gases bei konstantem Druck in  $\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ,

$g$  das spez. Gewicht des Gases in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$d$  eine charakteristische Abmessung des Systems in m,

$\Delta t$  den Temperaturunterschied in der Isolierung in  $^\circ\text{C}$  und

$T_m$  die absolute mittlere Temperatur in der Isolierung  $= (273 + t_m)$   
in  $^\circ\text{C}$

Weiter sei noch die Festsetzung getroffen, dass  $d$  die Porengrösse oder ein ihr äquivalentes Mass bedeute.

<sup>2)</sup> Kling, "Die Wärmeübertragung durch Hochdruckisolerstoffe", Bericht Nr. 359 v. 24.9.39, Techn. Prüfstand Oppau.

PS 97/1

Dann ergibt sich, zunächst für die benutzte Versuchsanordnung, bei der die Wärme von der Bombe an die Umgebungsluft übergeht, aus der Gleichung 3) folgendes.

Der Verlauf des Quotienten  $\Delta t/T_n$  mit wachsendem  $\Delta t$  hat den anfänglich mehr oder weniger steilen, später immer flacher werdenden Verlauf der  $\lambda - \Delta t$ -Linien zur Folge, s. Abb. 1 und 3, Blatt 1 und 2, der Faktor  $d^2$  die höhere Lage und den steileren Verlauf der Kurven für höhere Drücke, der Faktor  $d^3$  das gleiche für grössere Poren. Da die Zähigkeit der Gase mit steigender Temperatur zunimmt, so ist durch den Quotienten  $\mu^2/\gamma$  das Auftreten eines Maximums der  $\lambda - \Delta t$ -Kurven bedingt. Wie man aus den Abb. 1 und 3 erkennt, verschiebt sich dieses Maximum mit steigendem Druck in Richtung fallender  $\Delta t$ -Werte. Der Exponent hat beispielsweise Werte um 1.

Vorstehende Folgerungen treffen auch für die Praxis, für den Betrieb des Ofens, im wesentlichen zu, weil auch dort die Aussentemperatur der Isolierung vorzugsweise durch die Abgabe der Wärme an die umgebende Luft bestimmt ist.

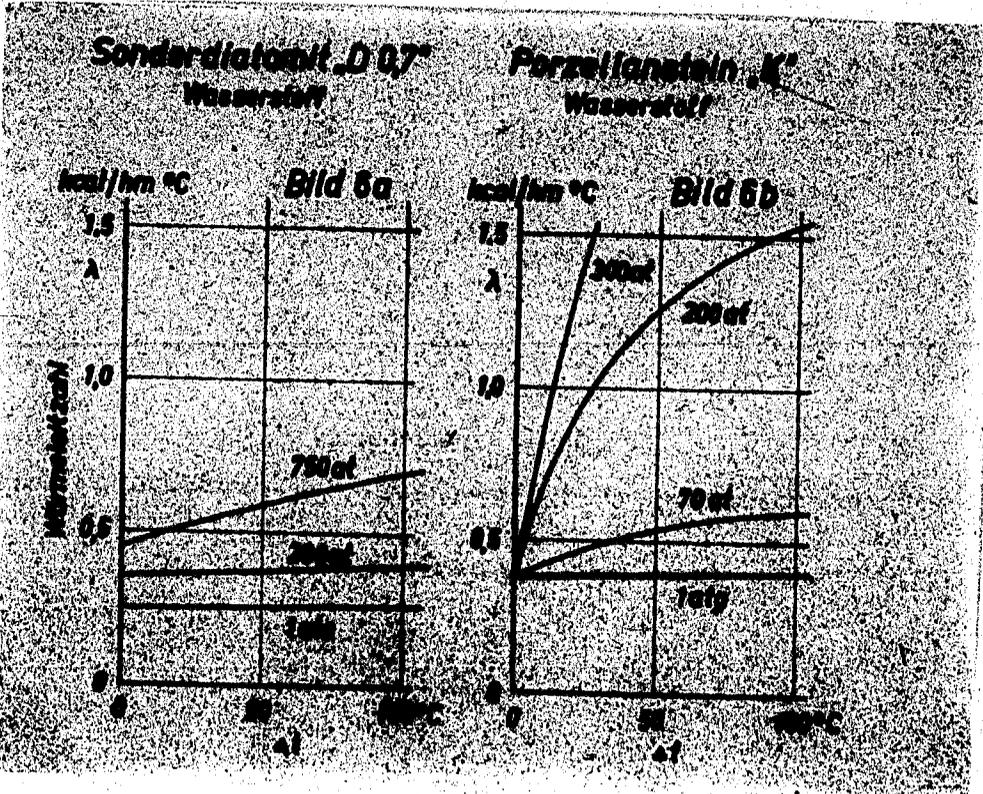
Die Folgerungen würden sich jedoch, ebenso wie die Kurvenform, bei anderer Versuchsanordnung, z.B. bei konstanter Aussentemperatur oder bei konstantem  $\Delta t$ , sinngemäss ändern, ohne dass sich jedoch an der Gleichung 3) selbst etwas ändert.

Aus der Gleichung 3) erklärt sich auch, dass die Wasserstoffkurven bei höheren Drücken durch die Stickstoffkurven überschritten werden, wenn die Konvektion stark ausgeprägt ist.

Führt man in der Gleichung 3) den Faktor  $(d^3)^n$  in die Konstante über, so kann man mit dieser Gleichung, sobald für irgend ein Gas und irgend einen Druck eine  $\lambda - \Delta t$ -Kurve mit ausgebildeter Konvektion aufgenommen ist, für denselben Stein die  $\lambda - \Delta t$ -Kurven für höhere Drücke und für andere Gase mit ziemlicher Genauigkeit berechnen. Auch eine rechnerische Extrapolation auf höhere Temperaturen lässt sich mit Benutzung dieser Gleichung ausführen.

Für den Temperatursprung sind ebenfalls, und zwar schon früher, Beziehungen aufgestellt worden. Er tritt auf als Folge der Behinderung der Gasmoleküle in unmittelbarer Nähe einer festen Wand und tritt praktisch in Erscheinung, sobald die Porengröße der freien Weglänge der Gasmoleküle vergleichbar wird. Diese beträgt in Wasserstoff von 1 atab  $\sim 0,1 \mu$  ( $1 \mu = 1/1000 \text{ mm}$ ), bei Stickstoff nur halb so viel und bei den meisten anderen Gasen noch weniger. Sie ist dem Gasdruck umgekehrt proportional. Der Temperatursprung tritt daher stärker auf in kleinen Poren und bei niederen Drücken, bei Wasserstoff schon in grösseren Poren und bei höheren Drücken, als in Stickstoff.

Wie sich Konvektion und Temperatursprung auswirken, sei schematisch an Hand der hier folgenden Abbildung 6a für einen <sup>und b für einen grobporigen</sup> feinsporigen Stein gezeigt.



8898/1

Mit der Betrachtung beim höchsten Druck, z.B. 750 at, anfangend, werden beim grossporigen Stein die  $\lambda - \Delta t$ -Kurven mit fallendem Druck flacher, um allmählich in die Gerade überzugehen, wobei sie bei  $\Delta t = 0$  (Anfangspunkt) alle aus demselben Punkt entspringen; erst bei weiterem Sinken des Druckes lösen sich aus dieser Geraden neue, tiefer und tiefer liegende Gerade ab. Bei einem feinporigen Stein dagegen sind die Kurven von vorneherein weniger steil und heben sich in ihrem Anfangspunkt schon bei höheren Drücken voneinander ab, u.U. noch ehe sie den linearen Charakter angenommen haben. Die absolute Höhe der  $\lambda - \Delta t$ -Linien dürfte im wesentlichen von der Gasporosität und der Gasart abhängen.

Naturgemäss sind die Gebiete des Temperatursprunges und der Konvektion nicht scharf voneinander getrennt, sondern gehen mehr oder weniger allmählich in einander über je nach Gleichmässigkeit und Form der Poren bzw. des Stoffes. Sieht man aber einmal hiervon ab und stellt sich den Isolierstoff wieder als ein Gefüge von festem Material und Gasräumen vor, in dem überall nur reine Wärmeleitung herrscht—ein Zustand, der bei idealer Struktur denkbar ist und in  $\lambda - \Delta t$ -Diagramm z.B. eine Gerade bedeuten könnte, aus deren Anfangspunkt nach oben alle Konvektionskurven entspringen und von der nach unten sich alle Temperatursprunglinien abheben würden—, so lässt sich für das System mit einiger Annäherung eine Wärmeleitzahl berechnen (Misch- oder Grenzwärmeleitzahl  $\lambda_{gr}$ ). Ist nun z.B. bei 1 atabs mit dem entsprechenden Gas eine Wärmeleitzahl  $\lambda$  gemessen worden, so kann diese sowohl kleiner als auch grösser sein als  $\lambda_{gr}$  und somit auf Temperatursprung oder Konvektion schliessen lassen. Es wäre danach möglich, ohne den Stoff unter Druck unterzuziehen zu müssen, einen ersten Anhalt dafür zu gewinnen, ob er für die Zwecke der Hochdruckisolierung geeignet erscheint oder nicht. Ein Mass liesse sich vielleicht in der Grösse

$$\varphi = \frac{\lambda_{gr} - \lambda}{\lambda_{gr}} \cdot 100\% \quad 4a)$$

oder

$$\varphi = \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_{gr}} \right) \cdot 100\% \quad 4b)$$

gewinnen, das man als "Gütesahl" für die betreffende Gasart bezeichnen könnte.

Für  $\lambda < \lambda_{gr}$  ist  $\psi > 0$ ,

für  $\lambda > \lambda_{gr}$  ist  $\psi = -\left(\frac{\lambda}{\lambda_{gr}} - 1\right) \cdot 100$ , wobei  $|\psi|$  beliebig gross sein kann.

Eine Unsicherheit liegt in der Annahme der Wärmeleitzaahl des festen Körpers ( $\lambda_f$ ), doch liegt diese für die hier in Frage kommenden Stoffe meist um 2,5 bis 3 kcal/hm<sup>0</sup>C.

In der ~~hier~~ ~~folgenden~~ Abbildung 7, Blatt 4, ist nun ein Diagramm der  $\lambda_{gr}$ -Werte unter Zugrundelegung von  $\lambda_f = 2,5$  und 3 für alle Porositäten und für Luft (besw. Stickstoff) und Wasserstoff als Füllgas gegeben. Dieses würde beispielsweise für die Porzellansteine "K" und "T" nachstehende Gütegrade in % ergeben.

Tabelle 7

Stein	$\lambda_f$	Luft (Stickstoff)	Wasserstoff
K	2,5	-5,9	0,0
	3,0	18,2	13,6
T	2,5	-66,7	-19,2
	3,0	-36,3	-6,9

Wie die Tabelle zeigt, liegen die  $\psi$ -Werte für "K" zu beiden Seiten der Grenskurve, die für "T" sämtlich im Konvektionsgebiet; die "Wasserstoffwerte" sind (mit einer Ausnahme) besser als die "Stickstoffwerte". Zum Vergleich seien die  $\psi$ -Werte zweier guter Isoliersteine mitgeteilt<sup>3)</sup>:

<sup>3)</sup> a. Bericht Techn. Prüfstand Op. Nr. 421 v. 27.5.40 und Nr. 428 v. 26.7.40.

8899/1

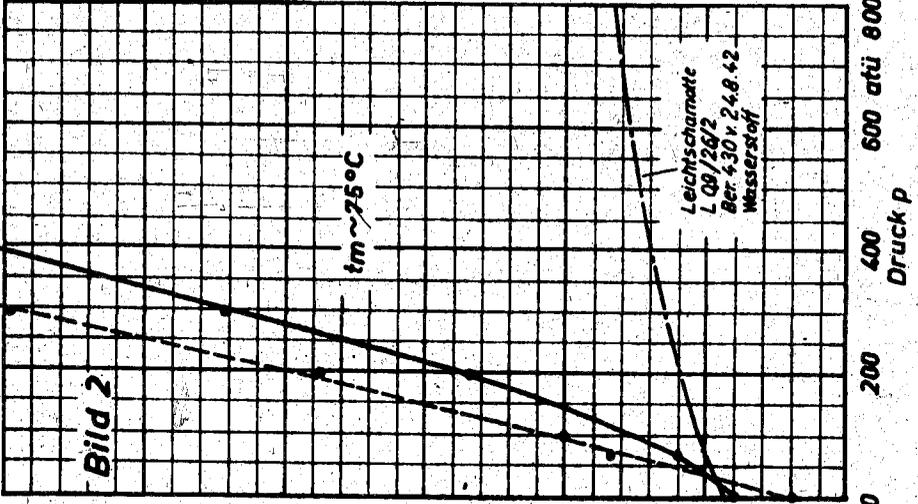
Tabelle 8

Stein	$\gamma$	Luft (Stickstoff)	Wasserstoff
D 0,7	2,5	32,6	39,8
	3,0	46,7	44,8
L 0,9/26/ 2	2,5	20,7	21,9
	3,0	33,7	32,8

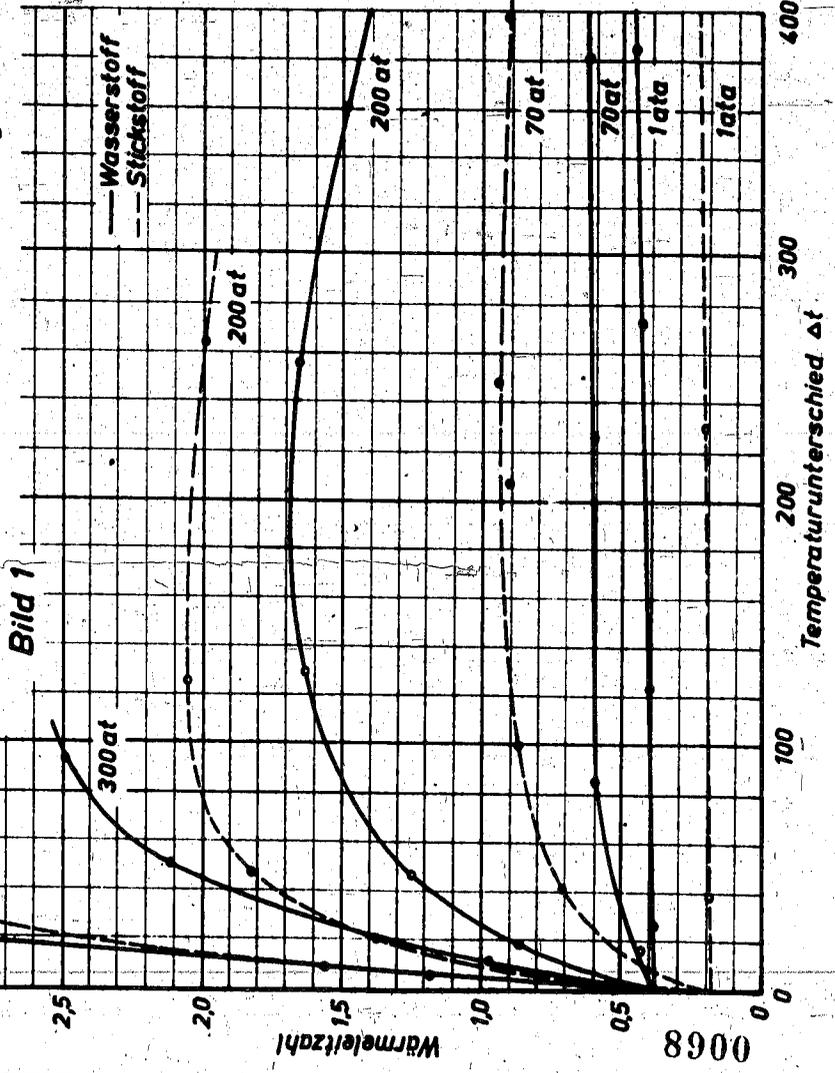
Die höheren  $\gamma$ -Werte an sich, sowie auch die schwächere Ausprägung des Unterschiedes zwischen den Stickstoff- und den Wasserstoffwerten lassen erkennen, dass diese beiden Steine bessere Porenverhältnisse besitzen als die beiden Porzellansteine.

Aus dem Diagramm geht endlich hervor, dass eine gleichgrosse Wärmeleitfähigkeit je nach der Gesamtporosität der Steine einer recht verschiedenen Eignung derselben für Hochdruckisolierzwecke entspricht.

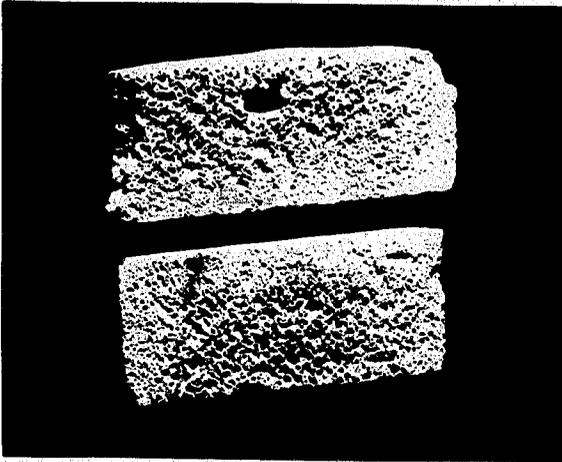
Würde man die Gesamtporosität der beiden Porzellansteine von 78 bzw. 90% beispielsweise auf 65% herabsetzen, dafür aber die einzelnen Poren wesentlich feiner (und gleichmässig) machen, sowie Löcher und Lunker sorgfältig vermeiden, so würde sich die Isolierfähigkeit der Steine bei hohen Drücken wesentlich verbessern, die Steine würden für höhere Drücke brauchbar und ausserdem fester werden.



**Wärmeleitfähigkeit v. Porzellan-Leichtstein .K"**  
der Krister Porz.-Manuf. A.G. Waldenburg (Schles.)

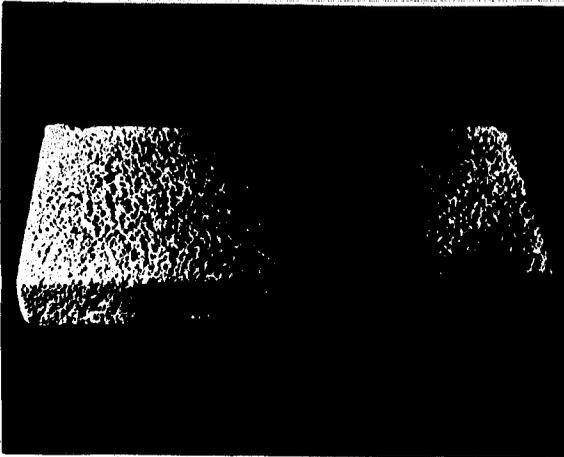






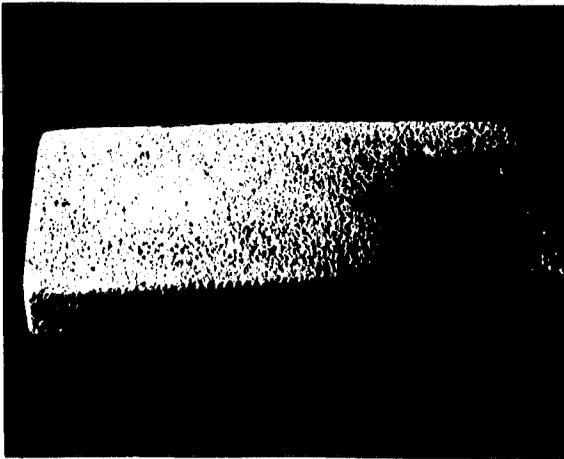
**Bild 5a**

Porzellanstein „K“  
Schnitt über Eck  
Stärke 55mm



**Bild 5b**

Porzellanstein „K“  
Längsschnitt  
255 × 120 × 23 mm



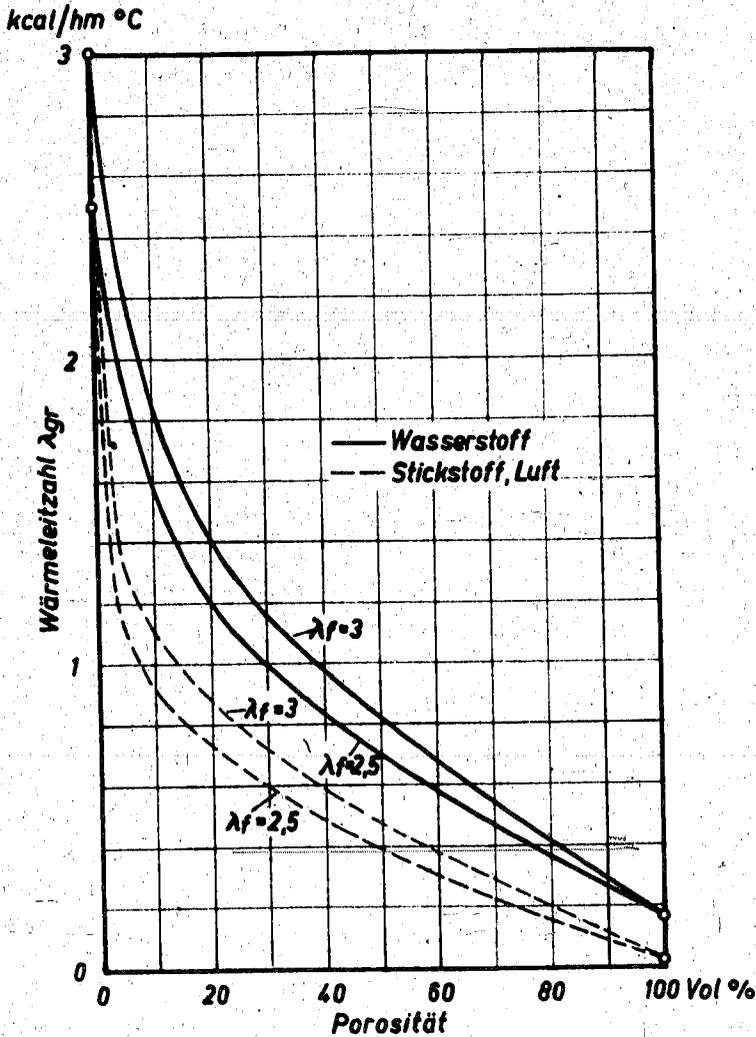
**Bild 5c**

Porzellanstein „K“  
Ansicht  
255 × 120 × 23mm

Maße des ganzen  
Steines:  
255 × 120 × 60mm

8901

Bild 7



8902