

EUR 357.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

PHYSIKALISCH-THERMISCHE EIGENSCHAFTEN
VON Na-, K- UND NaK-LEGIERUNGEN
IM TEMPERATURBEREICH ZWISCHEN
SIEDEPUNKT UND ETWA 1300° C

von

K.-H. SPILLER

1963



Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien

Wärmeübertragungsdienst

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt ;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird zum Preise von 85 bfrs. verkauft. Bestellungen sind zu richten an : PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES — 98, chaussée de Charleroi, Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung

- an die BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence Ma Campagne) — Brüssel — Konto Nr. 964.558 ;
- an die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST COMPANY — New York — Konto Nr. 121.86 ;
- an die LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. — 10 Moor-gate, London E.C.2,

als Bezug ist anzugeben : « EUR 357.d — Physikalisch-thermische Eigenschaften von Na-, K- und NaK-Legierungen im Temperaturbereich zwischen Siedepunkt und etwa 1300° C.

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 357.d

PHYSICALISCH-THERMISCHE EIGENSCHAFTEN VON Na-, K- UND NaK-LEGIERUNGEN IM TEMPERATURBEREICH ZWISCHEN SIEDEPUNKT UND ETWA 1300° C von K.-H. SPILLER

Europäische Atomgemeinschaft — EURATOM
Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra (Italien)
Wärmeübertragungsdienst
Brüssel, Juni 1963 — 66 Seiten — 10 Abbildungen

Für die Flüssig-Metalle Natrium, Kalium und Natrium-Kalium-Legierungen werden für das Temperaturgebiet zwischen Siedepunkt und 1300° C zunächst die zur Zeit bekannten Zahlenwerte für die Größen: Dichte, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Viskosität, Oberflächenspannung, Dampfdruck und Verdampfungswärme zusammengestellt und zwar für die flüssige und die dampfförmige Phase, soweit das in Frage kommt. Dieses Material wird kritisch

EUR 357.d

PHYSICO-THERMAL PROPERTIES OF Na-, K- and NaK-ALLOYS IN TEMPERATURE RANGE BETWEEN BOILING POINT AND ABOUT 1300° C by K.-H. SPILLER

European Atomic Energy Community — EURATOM
Joint Nuclear Research Center
Ispra Establishment (Italy)
Heat Exchanges Service
Brussels, June 1963 — Pages 66 — Figures 10

For metals Na-, K- and NaK-alloys in their liquid state, in the temperature range between saturation point and 1300° C figures already known concerning density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, surface tension, vapour pressure and heat of vaporization are given. These cover also the vapour phase, when applicable. These figures are examined critically. Graphs of the most likely figures plotted against temperature have been made as well as a Mollier-diagram of Na. This report is concluded by data concerning melting heats and corrosion.

EUR 357.d

PHYSICO-THERMAL PROPERTIES OF Na-, K- and NaK-ALLOYS IN TEMPERATURE RANGE BETWEEN BOILING POINT AND ABOUT 1300° C by K.-H. SPILLER

European Atomic Energy Community — EURATOM
Joint Nuclear Research Center
Ispra Establishment (Italy)
Heat Exchanges Service
Brussels, June 1963 — Pages 66 — Figures 10

For metals Na-, K- and NaK-alloys in their liquid state, in the temperature range between saturation point and 1300° C figures already known concerning density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, surface tension, vapour pressure and heat of vaporization are given. These cover also the vapour phase, when applicable. These figures are examined critically. Graphs of the most likely figures plotted against temperature have been made as well as a Mollier-diagram of Na. This report is concluded by data concerning melting heats and corrosion.

EUR 357.d

PHYSICO-THERMAL PROPERTIES OF Na-, K- and NaK-ALLOYS IN TEMPERATURE RANGE BETWEEN BOILING POINT AND ABOUT 1300° C by K.-H. SPILLER

European Atomic Energy Community — EURATOM
Joint Nuclear Research Center
Ispra Establishment (Italy)
Heat Exchanges Service
Brussels, June 1963 — Pages 66 — Figures 10

For metals Na-, K- and NaK-alloys in their liquid state, in the temperature range between saturation point and 1300° C figures already known concerning density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, surface tension, vapour pressure and heat of vaporization are given. These cover also the vapour phase, when applicable. These figures are examined critically. Graphs of the most likely figures plotted against temperature have been made as well as a Mollier-diagram of Na. This report is concluded by data concerning melting heats and corrosion.

gesichtet. Die Bestwerte sind in ihrer Temperaturabhängigkeit graphisch dargestellt zuzüglich eines Mollier-Diagrammes für Natrium. Die Arbeit wird ergänzt durch Daten über die Schmelzwärmen und einen Abriss über das Korrosionsverhalten der betrachteten Flüssigmetalle.

EUR 357.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

PHYSIKALISCH-THERMISCHE EIGENSCHAFTEN
VON Na-, K- UND NaK-LEGIERUNGEN
IM TEMPERATURBEREICH ZWISCHEN
SIEDEPUNKT UND ETWA 1300° C

von

K.-H. SPILLER

1963



Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien

Wärmeübertragungs-Dienst

I N H A L T

	Seite
Zusammenfassung	
1. Einleitung	6
2. Zusammenstellung von Stoffwerten für das Siedegebiet, wie sie zur Zeit bekannt sind	7
Hierzu Tabellen 1-8.	
3. Die Bestwerte der Stoffeigenschaften für das Siedegebiet	15
Hierzu die Abbildungen 1-10.	
4. Was muß also noch gemessen werden?	25
5. Korrosionsverhalten	28
Hierzu Tabelle 9.	
6. Literatur	32

VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN.

Tabelle 1 : Dichte von Flüssigkeit und gesättigtem Dampf.

Tabelle 1a: Dichte des überhitzten Na-Dampfes

Tabelle 2 : Spezifische Wärme

Tabelle 3 : Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 4 : Viskosität

Tabelle 5 : Oberflächenspannung

Tabelle 6 : Dampfdruck

Tabelle 7 : Verdampfungswärme

Tabelle 8 : Schmelzwärme

Tabelle 9 : Korrosionsverhalten

Abb. 1 : Dichte der flüssigen Phase

Abb. 2 : Dichte des gesättigten Dampfes

Abb. 3 : Dichte des überhitzten Dampfes von Na

Abb. 4 : Spezifische Wärme

Abb. 5 : Wärmeleitfähigkeit

Abb. 6 : Viskosität

Abb. 7 : Oberflächenspannung

Abb. 8 : Dampfdruck

Abb. 9 : Verdampfungswärme

Abb. 10 : Mollier-Diagramm für Na

**PHYSIKALISCH-THERMISCHE EIGENSCHAFTEN VON
Na, K UND NaK-LEGIERUNGEN IM TEMPERATURBEREICH ZWISCHEN
SIEDEPUNKT UND ETWA 1300°C**

ZUSAMMENFASSUNG

Für die Flüssig-Metalle Natrium, Kalium und Natrium-Kalium-Legierungen werden für das Temperaturgebiet zwischen Siedepunkt und 1300°C zunächst die zur Zeit bekannten Zahlenwerte für die Größen : Dichte, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Viskosität, Oberflächenspannung, Dampfungswärme zusammengestellt und zwar für die flüssige und die dampförmige Phase, soweit das in Frage kommt. Dieses Material wird kritisch gesichtet. Die Bestwerte sind in ihrer Temperaturabhängigkeit graphisch dargestellt zuzüglich eines Mollier-Diagrammes für Natrium. Die Arbeit wird ergänzt durch Daten über die Schmelzwärmen und einen Abriss über das Korrosionsverhalten der betrachteten Flüssigmetalle.

SUMMARY

For Metals Na, K and NaK-alloys in their liquid state, in the temperature range between saturation point and 1300°C figures already known concerning density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, surface tension, vapour pressure and heat of vaporization are given. These cover also the vapour phase, when applicable. These figures are examined critically. Graphs of the most likely figures plotted against temperature have been made as well as a Mollier-diagram of Na. This report is concluded by data concerning melting heats and corrosion.

1. EINLEITUNG

Dieser Bericht hier schliesst sich an D-8/RT 009/61, ISP Nr. 9 R, an. Während in dem Vorgänger die physikalischen Stoffeigenschaften besonders wichtiger Flüssigmetalle zwischen Schmelzpunkt und Siedepunkt behandelt wurden, wird im vorliegenden Bericht das über den Siedepunkt hinausgehende Temperaturgebiet bearbeitet.

Zur Zeit, als ISP 9R geschrieben wurde, galt es als besonderer Vorzug der Flüssigmetalle, dass man bei ihrer Anwendung als Kühlmittel nicht bis in das Gebiet des Siedens hineinzugehen brauchte, da die physikalischen und wärmetechnischen Eigenschaften schon vorher eine ausgezeichnete Wärmeabfuhr und Energieausbeute gestatten. Natrium z. B. besitzt erst bei 883°C einen Dampfdruck von 1 atm, so dass man eine "Kühlung" bis zu dieser Temperatur ohne Überdruck betreiben kann. In letzter Zeit führte die Entwicklung aber dazu, auch bei den Flüssigmetallen die durch das Sieden zu erwartenden Verbesserungen noch auszunutzen. Dadurch wird es nun wichtig, eine möglichst genaue Kenntnis der Stoffeigenschaften im Siedegebiet zu besitzen. Da es sich dann um 2 Phasen -Flüssigkeit und Dampf- handelt, sind die Eigenschaften für beide von Interesse.

Nachrichten aus Amerika zufolge, ist es dort gelungen, eine mit Kaliumdampf getriebene Turbine über längere Zeit in Betrieb zu halten. Wenn somit die Material- und Konstruktionsfragen für die Verwendung von Alkalimetalldämpfen in Turbinen ihrer Lösung näher kommen, gewinnt der Siedebereich dieser Metalle umsomehr an Bedeutung.

Ferner sind die Eigenschaften der Flüssigmetalle unter Siedebedingungen für das Abschätzen der Folgen ungewollten Siedens (burn-out) wichtig.

Im Folgenden werden zunächst die zur Zeit bekannten Stoffwerte von Natrium, Kalium und NaK-Legierungen für das Siedegebiet unter Angabe der Quellen zusammengetragen. Nach kritischer Betrachtung werden die Bestwerte herausgestellt. Zugleich wird sich ergeben, welche Werte fehlen. Ferner sind Angaben über das Korrosionsverhalten gesammelt und so bearbeitet worden, dass sich ein möglichst brauchbarer Überblick über dieses vielfältige Gebiet ergibt.

Vorab sei noch bemerkt:

- a) Bei den NaK-Legierungen bedeutet die Angabe %K Gewichtsprozent.
- b) Für die überhitzten Dämpfe der betrachteten Metalle wurden Werte nur für die Dichte von

überhitztem Na-Dampf in der Literatur gefunden.

- c) Die freigelassenen Nummern im Literaturverzeichnis sollen dazu dienen, wichtige noch erscheinende Arbeiten nachzutragen. Das Literaturverzeichnis ist eine über den Quellenachweis für die vorliegende Arbeit hinausgehende Literaturzusammenstellung für das betrachtete Gebiet.
- d) Diesem Bericht liegen keine eigenen Messungen zugrunde, wohl aber auch eigene Berechnungen verschiedener Werte, die bei den Tabellen in der Spalte "Quelle" mit "Berechnung" gekennzeichnet sind.

2. ZUSAMMENSTELLUNG VON STOFFWERTEN FÜR DAS SIEDEGEBIET, WIE SIE ZUR ZEIT BEKANNT SIND

2.1 Dichte ρ

Für die Dichte standen die Quellen (R1) bis (R5) - siehe die Literaturzusammenstellung unter 6 - zur Verfügung. Dabei sind die Ergebnisse von (R2) bis (R5) in (R1) verarbeitet; in (R2) ist noch (R7) berücksichtigt.

In Tabelle 1 sind für Natrium und Kalium die Zahlenwerte der Dichte für das flüssige Metall und den gesättigten Dampf enthalten, wie sie von (R1) bzw. (R2) und (R5) für Na genannt werden und von (R1), (R3), (R4) und (R5) für Kalium.

Die Werte für flüssiges Na sind nach der Gleichung:

$$\rho_{\text{Na}_1} = 0,9490 - 22,3 \cdot 10^{-5} \cdot t - 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right], t \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Gl. 1

berechnet. Diese Formel wird auch von SITTIG (R15) verwendet, aber nur bis 650°C. (R2) bzw. (R1) haben offensichtlich bis 1300°C weitergerechnet. Messungen der Dichte von Na liegen für das Siedegebiet wohl gar nicht vor.

Für gesättigten und überhitzten Na-Dampf ist in (R2) die Dichte aus den Werten der spezifischen Volumen errechnet. Diese wiederum sind aus der Gasgleichung für vollkommene Gase unter Anwendung des Kompressibilitätsfaktors berechnet. Die Zahlenwerte für den überhitzten Dampf sind in Tabelle la zusammengestellt.

Wie (R5) seine Werte für flüssige Phase und gesättigten Dampf erhalten hat, ist nicht feststellbar, da nur Pausen der Kurven vorhanden sind, der Text aber nicht zu erhalten ist.

Für NaK-Legierungen liegen keine Dichtewerte zahlenmässig vor im Bereich über 700°C. Bis dahin übereinstimmen gemessene und berechnete Werte der flüssigen Phase innerhalb 0,3 bis 0,8 % (R10), sodass man ermutigt wird, auch über 700°C hinaus Werte zu berechnen. Die Gleichung dafür lautet:

$$V_{\text{NaK}} = X_{\text{Na}} \cdot V_{\text{Na}} + X_{\text{K}} \cdot V_{\text{K}} \quad \text{Gl. 2}$$

mit $V_i = \text{spezif. Volumen} = \frac{1}{\rho_i}$; $X_i = \text{Molenbrüche.}$

Für NaK mit 44 Gew. % K wurden von 800 bis 1300°C Werte für Tabelle 1 ausgerechnet für den flüssigen Zustand.

Bei einer etwaigen Berechnung für den dampfförmigen Zustand ist die Dimerisation zu beachten, das heisst die Tatsache, dass sich mit steigender Temperatur zunächst in zunehmendem Masse einatomiger Dampf- zu zweiatomigen Teilchen zusammenschliesst.

2.2. Spezifische Wärme c_p

Aus Quelle (R1) bzw. (R2) und (R5) entnimmt man Werte der spezif. Wärme von Na, die unter anderen in Tabelle 2 enthalten sind, umgerechnet auf unsere Einheiten. Dabei gibt (R2) an, dass die Werte für flüssiges Na von (R15) stammen und mit denen von (R7) abgestimmt wurden; auch ist extrapoliert worden. (R15) ihrerseits hat bis 900°C die genauen Messungen des National Bureau of Standards (R16) zugrundegelegt und bis 1125°C extrapoliert. (R16) benutzt bis 900°C für flüssiges Na die Gleichung

$$C_{p, \text{Na fl.}} = 1,43674 - 5,8049 \cdot 10^{-4} \cdot t + 4,6229 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \left[\frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right]$$

t in °C

Gl. 3

Besser als $\pm 0,5$ % Fehler bis 900°C

Eine neuere Arbeit aus dem NBS, (R14) gibt für flüssiges Na Werte bis 927°C.

Die spezif. Wärmen von gesättigtem Na-Dampf in Tabelle 2 stammen aus (R2), (R5), (R13) und (R14), wobei (R2) Werte aus (R7) entnommen hat und unter der Annahme kontrollierte, dass der Dampf als ideales Gas betrachtet werden könne. Die unter der Quellenangabe (R14) aufgeführten Werte für gesättigten Na-Dampf wurden hier aus den von (R14) gegebenen Werten für 1- und 2-atomigen Na-Dampf unter Verwendung der aus (R15) entnommenen Dimerisationsanteile berechnet. (R13) gibt nach 1- und 2-atomigem Dampfzustand getrennte Werte. Errechnet man mittels der Dimerisationsanteile die Werte für den Gleichgewichtsdampf, so findet man Zahlen, die zwischen denen von (R1) und (R14/15) liegen.

Für Kalium stammen die Zahlenwerte in Tabelle 2 aus den Quellen (R1), (R5), (R13), (R14) und (R19). (R19) gibt vom Schmelzpunkt bis 800°C für die Berechnung der spezif. Wärme unter Sättigungsbedingungen folgende Gleichung für Kalium an:

$$C_{sK \text{ fl.}} = 0,84074 - 3,1688 \cdot 10^{-4} \cdot t + 3,1435 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

t in °C Gl. 4

Die in (R1) angeführten Werte sind offensichtlich nach dieser Gleichung berechnet.

Über die spezif. Wärme von gesättigtem K-Dampf geben (R1) und (R13) Werte, wobei sich die von (R13) nur getrennt auf 1- und 2-atomigen K-Dampf beziehen.

Die spezif. Wärmen der flüssigen Phase von NaK-Legierungen können nach der Formel

$$C_{sNaK} = W_{Na} \cdot C_{Na} + W_K \cdot C_K, \quad \text{Gl. 5}$$

wobei W_i die jeweiligen Gewichtsanteile sind, berechnet werden (R10).

Von (R19) sind NaK-Legierungen bis 797°C gemessen worden. Aus den Messergebnissen wurden die folgenden Gleichungen durch (R19) aufgestellt - C_s = spezif. Wärme unter Sättigungsbedingungen:

$$C_{sNaK; 78,26 \% K} = 0,93860 - 2,1924 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,1091 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0,05636 \cdot (1 - 0,0040549 \cdot t) \cdot e^{-0,0040549 \cdot t}$$

t in °C; von 0-800°C Gl. 5a

$$C_{s\text{NaK}; 53,64 \%K} = 1,13625 - 5,1798 \cdot 10^{-4} \cdot t + 4,6266 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad \text{Gl. 5b}$$

t in $^{\circ}\text{C}$; von $50-800^{\circ}\text{C}$

$$C_{s\text{NaK}; 44,80 \%K} = 1,16587 - 4,3818 \cdot 10^{-4} \cdot t + 3,7974 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad \text{Gl. 5c}$$

t in $^{\circ}\text{C}$; von $50-800^{\circ}\text{C}$

Die von (R19) angegebenen Werte sind - ab 700°C aufwärts - auch in die Tabelle 2 eingetragen, ferner Berechnungen nach Gl. 5 zu denselben Legierungszusammensetzungen.

Über die spezif. Wärme des Dampfes von NaK-Legierungen findet man in der Literatur keine Angaben. Eine Berechnung könnte nach Gl. 5 erfolgen, wenn die Gewichtsanteile im Dampfraum zugrundegelegt werden. Man kann sie aus den Dampfdichten errechnen. Aber für die Ermittlung der spezif. Wärme ist die Dimerisation zu beachten und für Kalium liegen uns Zahlenwerte darüber nicht vor.

2.3. Wärmeleitfähigkeit λ

In Tabelle 3 sind die Werte für die Wärmeleitfähigkeit im betrachteten Gebiet hoher Temperaturen zusammengestellt.

Für flüssiges Na hat (R1) die Zahlenwerte aus (R2) entnommen und diese Quelle hat bis 550°C die Werte von (R15) benutzt. Oberhalb 550°C wurde nach der in (R15) enthaltenen Gleichung

$$\lambda_{\text{Na fl.}} = 0,2166 - 0,000116 \cdot t \quad \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^{\circ}\text{C}} \right] \quad \text{Gl. 6}$$

berechnet und abgeglichen mit Werten aus (R10) und (R7).

Für gesättigten Na-Dampf bezieht sich (R1) auf (R2), die die Werte nach einem umfangreichen Verfahren berechnet und mit einigen Angaben aus (R7) vergleicht.

Die Wärmeleitfähigkeit des flüssigen K hat (R1) aus (R4) genommen, wobei graphisch extrapoliert worden sein muss, da man aus (R4) nur bis 630°C Werte entnehmen kann.

Für die Wärmeleitfähigkeit von K-Dampf und von NaK-Legierungen liessen sich keine Angaben finden.

2.4. Viskosität μ

Für die Viskosität des flüssigen Na bezieht sich Quelle (R1) auf (R2). Diese bestimmt μ nach einer Methode von ANDRADE entspr. der Beziehung

$$\log \mu = A + \frac{B}{T}$$

Wenn 2 Werte bekannt sind, können weitere berechnet werden. (R2) nimmt bekannte Werte aus (R10). Diese Quelle aus dem Jahre 1955 dürfte schon etwas überholt sein. Und tatsächlich erhält man nach SITTIG (R15) bei Temperaturen über 950°C andere Werte für die Viskosität, siehe Tabelle 4. Der Unterschied beträgt maximal 5,4 % bei 1300°C. (R15) rechnet nach der Formel:

$$\log \mu = -1,09127 + 382 / (t + 313) \quad \text{Gl. 7}$$

$$\mu \text{ in cp, } t \text{ in } ^\circ\text{C}$$

und gibt Werte für μ bis 930°C. Daran anschliessend wurde hier bis 1300°C nach Gl. 7 weiter gerechnet. SITTIG gibt zwischen 500 und 900°C als Fehler $\pm 10\%$ an.

Die Viskosität von gesättigtem Na-Dampf hat (R1) aus (R2) entnommen. Hierin war sie nach einem umständlichen Verfahren errechnet, nicht etwa gemessen worden; siehe Tabelle 4. (R2) hat ihre Werte noch mit denen von (R7) verglichen.

Die Viskosität von flüssigem K beim Siedepunkt entnimmt (R1) der Quelle (R3). Bis etwa 815°C gibt (R18) Werte an. Darüber hinaus bis 983°C bezieht sich (R1) auf eine graphische Darstellung in (R4) ohne Zahlenwerte anzugeben. Man kann auch tatsächlich aus dieser Graphik in (R4) nicht annähernd genau Zahlenwerte entnehmen.

Für die Viskosität von K-Dampf bringt (R1) berechnete Werte, siehe Tabelle 4.

Für NaK-Legierungen findet man keine Angaben.

2.5. Oberflächenspannung σ

Die Zahlenangaben für Na in (R1) stammen aus (R2). Dort wurden sie nach der aus dem SITTIG (R15) stammenden Gleichung:

$$\sigma = 202 - 0,10 \cdot t, \quad \sigma \text{ in dyn/cm} \quad \text{Gl. 8} \\ t \text{ in } ^\circ\text{C}$$

errechnet. Diese Formel ist aus Messungen abgeleitet, die nur bis 450°C aufwärts ausgeführt wurden; (R2) hat aber bis 1300°C extrapoliert. Werte in Tabelle 5.

Nach Gl. 8 errechnet sich für $\sigma = 0$ eine Temperatur von 2020°C . Dies müsste die Kritische-Temperatur sein. (R1) gibt zwei Werte $T_c = 1663^\circ\text{C}$ und aus anderer Quelle $T_c = 2000^\circ\text{C}$. (R2) benutzt als kritische Daten: $T_c = 2273^\circ\text{K}$, $P_c = 343 \text{ atm}$.

Für die Oberflächenspannung des Kaliums gibt in dem interessierenden Temperaturbereich (R1) einen Wert an, der aus (R3) stammt; siehe Tabelle 5.

Über NaK-Legierungen sind keine Angaben vorhanden.

Interessant wegen der Benetzungseigentümlichkeiten sind die Ergebnisse von (R30). Diese Dinge gehören eigentlich nicht hierher, da sie in einem Gebiet unterhalb des hier betrachteten Temperaturbereiches vor sich gehen; jedoch sollte auf die Arbeit hingewiesen werden.

2.6. Dampfdruck p

Für Na gibt (R1) Werte, die aus (R2) stammen, wo sie nach der Gleichung

$$\log p = 6,354 - \frac{5567}{T} - 0,5 \cdot \log T \quad \text{Gl. 9} \\ p \text{ in atm, } T \text{ in } ^\circ\text{K}$$

bis 1300°C berechnet sind, siehe Tabelle 6 - die Zahlenwerte sind sofort auf die Einheit $\underline{\text{bar}}$ umgerechnet. Diese Gleichung ergibt sich aus den Messungen verschiedener Autoren, die maximal bis 1135°C reichen.

(R15) rechnet wie (R34) nach der Formel

$$\log p = 4,521 - 5220 / T \quad \text{Gl. 10}$$

p in atm, T in °K

Werte ebenfalls in Tabelle 6. Messungen wurden von (R34) bis 1135°^t ausgeführt.

(R36) gibt bis 1300°C Werte an und findet, dass die Formel

$$\log p = 6,270 - \frac{5589}{T} - 0,5 \log T \quad \text{Gl. 11}$$

p in atm, T in °K

die Messungen am besten wiedergibt.

Im russischen Originaltext von (R36) sind die Ergebnisse sowohl in Tabellenform wie in graphischer Darstellung enthalten. Zieht man in der Graphik eine mittelnde Kurve durch die Werte der Messreihen 1 bis 3 - die Verfasser verbinden die Punkte überhaupt nicht- und entnimmt dann die Werte von 900-1300°C in 50° Abstand (s. Tab. 6) so erhält man Zahlenangaben (beachten, dass die Russen atü aufgetragen haben!), die schon wesentlich besser mit den amerikanischen Messungen übereinstimmen als die Werte aus der Tabelle von (R36). Nach Gl. 11 berechnete Werte zeigen nur in der Umgebung von 1200°C wenig Abweichung von den in der Tabelle 6 genannten Werten. Die Gl. 11 ist also nicht gut für Berechnungen in einem grösseren Temperaturbereich zu gebrauchen.

(R39) ist der Ansicht, dass ein Glied mit log T von einiger Grösse bei ausgedehnten Extrapolationen zu Ungenauigkeiten führt und gibt folgende Gleichungen für Na bzw. K und eine NaK-Legierung mit 69,4 % K an:

$$\log p_{\text{Na}} = 4,52172 - 5220,42/T \quad \text{Gl. 12}$$

$$\log p_{\text{K}} = 4,09537 - 4205,78/T \quad \text{Gl. 13}$$

$$\log p_{\substack{\text{NaK} \\ 69,4\%}} = 4,12607 - 4397,99/T \quad \text{Gl. 14}$$

p in atm T in °K

Für Na hat (R39) bis 1147°C gemessen und bis 1287°C gerechnet. Es wurde noch ein Wert nach Gl. 12 für 1300°C zusätzlich berechnet.

Für K hat (R39) bis 1021°C gemessen und bis 1168°C gerechnet; es wurde bis 1300°C nach Gl.13 weiter gerechnet.

Aus (R5) lagen abgezeichnete Kurven vor mit eingetragenen Punkten bei runden Fahrenheitgraden. Werte siehe Tab. 6.

Die Angaben der Quelle (R13) sind rechnerisch entstanden.

(R1) gibt für Kalium Werte, die aus (R33) und (R5) stammen; s. Tab.6. Wie die Werte erhalten wurden, war bisher nicht feststellbar, da die Originalliteratur noch nicht vorliegt.

(R35) hat von 587°C bis 1008°C den Dampfdruck von K gemessen, s. Tab.6, und findet zur Berechnung die Beziehung

$$\log p_K = 4,096 - 4207/T \quad \text{Gl.15}$$

p in atm abs., T in °K

die praktisch mit Gl.13 identisch ist.

(R18) findet aus Messungen zwischen 500 und 1100°C für K die Gleichung

$$\log p = 4,196 - 4331,9/T \quad \text{Gl.16}$$

p in atm abs., K in °K

(R18) gibt seine Ergebnisse nur als graphische Darstellung, aus der für Tabelle 6 einzelne Werte entnommen und umgerechnet wurden. Zum Vergleich sind Berechnungen nach Gl.16 ausgeführt worden, die zeigen, dass Messung und Berechnung nur bis ca. 1040°C einigermaßen übereinstimmen.

Für NaK lagen nur Messungen von (R39) vor an einer Legierung mit 69,4 Gew.-% K. Die Werte, umgerechnet auf $\left[\text{ }^{\circ}\text{C} \right]$ und $\left[\text{bar} \right]$ sind auch in Tab.6 enthalten. Über 1052°C hinaus bis 1300°C wurden Werte nach Gl.14 berechnet. Bei 1052° liegt der gemessene Wert 1,4 % höher als der gerechnete. Man ist also wohl berechtigt zu extrapolieren.

Allgemein gilt für NaK-Legierungen die Beziehung

$$p_{\text{NaK}} = X_{\text{Na}} \cdot p_{\text{Na}} + X_{\text{K}} \cdot p_{\text{K}} \quad \text{Gl.17}$$

wobei X die Molenbrüche sind.

2.7. Verdampfungswärme L_v

Quelle (R1) hat ihre Angaben über die Verdampfungswärme beim Na aus (R2) und (R5) und für K aus (R5) entnommen. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 7 zusammengestellt und reichen bei Na bis 1300°, bei K bis 1228°C.

(R10) gibt Werte für Na und K beim normalen Siedepunkt, die aber veraltet sind, da die Dimerisation zu 2-atomigem Dampf nicht berücksichtigt ist. Zum Beispiel ist beim Na am normalen Siedepunkt 17 % des Dampfes dimerisiert.

Die Quelle (R15), die aber nur Na bearbeitet, berechnet die Verdampfungswärme unter Beachtung der Dimerisation bis 1125°C. Diese Zahlenwerte sind ebenfalls in Tab. 7 enthalten, ferner noch je 1 Wert für Na und K, die man in Quelle (R13) findet.

2.8. Schmelzwärme L_f

Da in dem Bericht, der diesem hier inhaltlich vorangeht, die Schmelzwärmen nicht enthalten waren, sollen sie der Vollständigkeit wegen hier noch erwähnt werden.

In der Literatur wurden jeweils 5 Werte für Na und K gefunden. Für NaK verschiedener Zusammensetzung lassen sich die Werte ja dann ausrechnen.

3. DIE BESTWERTE DER STOFFEIGENSCHAFTEN FÜR DAS SIEDEGEBIET

3.1. Dichte

3.1.1. Dichte von Na

3.1.1.1. Dichte in flüssigem Zustand

Da die Originalarbeit zur Quelle (R5) nicht in angemessener Zeit zu erhalten war, kann nicht festgestellt werden, wie die Werte entstanden sind. (R15) aber macht einen besonders sorgfältigen Eindruck und man sollte

die nach Gl.1 berechneten
Werte zugrunde legen.

Bei Temperaturen unterhalb der hier interessierenden gibt
(R15) eine Genauigkeit von $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ an. Man beachte noch, dass Mes-
sungen wohl nur bis 712°C vorliegen.

3.1.1.2. Dichte des gesättigten Dampfes

Nur die

Zahlenwerte von (R2)

waren zugänglich. (Betr. (R5) s.oben).

3.1.1.3. Dichte des überhitzten Dampfes

Nur die

Werte der Quelle (R2), umge-
rechnet zur Tabelle Ia

wurden in der Literatur gefunden und weiter verarbeitet.

3.1.2. Dichte von K

3.1.2.1. Dichte in flüssigem Zustand

Die von Quelle (R1) zusammen-
getragenen Werte

sind uns nur bekannt.

3.1.2.2. Dichte des gesättigten Dampfes

Ebenfalls nur

die von Quelle (R1) zusammen-
gestellten Werte

sind vorhanden.

3.1.3. Dichte von NaK

3.1.3.1. Dichte in flüssigem Zustand

Da im Siedebereich keine Werte für NaK-Legierungen vorliegen, wurde als Beispiel, für das gerade besonderes Interesse bestand, die Legierung NaK mit 44 % K und 56 % Na

berechnet nach Gl. 2

3.1.3.2. Dichte des gesättigten Dampfes.

Es wurden keine Angaben gefunden.

Bei einer Berechnung nach Gl. 2 ist die Dimerisation zu beachten.

Die genannten Bestwerte der Dichten sind in Abbildung 1 für die flüssige Phase, in Abb. 2 für den gesättigten Dampf und in Abb. 3 für überhitzten Na-Dampf graphisch dargestellt.

3.2. Spezifische Wärme.

3.2.1. Spezifische Wärme von Na

3.2.1.1. Flüssige Phase

Die sorgfältigsten Arbeiten sind zweifellos aus dem National Bureau of Standards, Washington, hervorgegangen. Dem entsprechend wird man

die Werte von (R14) und (R16) mit den Extrapolationen aus (R2) und die Berechnung nach Gl. 3 zugrunde legen.

Bis 200°C soll der Fehler kleiner als $\pm 0,5\%$ sein.

3.2.1.2. Gesättigter Dampf

Da die Original-Arbeiten (R5) und (R7) nicht hereinkommen, die Quellen (R14) und (R15) aber als sehr zuverlässig gelten können, wird man

den nach (R14/15) berechneten Werten den Vorzug geben.

Eine Berechnung mit den Werten von (R13) unter Berücksichtigung der Dimerisation gibt praktisch die gleichen Werte.

3.2.2. Spezifische Wärme von K

3.2.2.1. Flüssige Phase

Auch für K stammen die zuverlässigsten Arbeiten aus dem National Bureau of Standards.

Man nimmt also die Werte von (R14) bzw. (R19) mit der Extrapolation nach Gl. 4, wie sie von (R1) angegeben werden.

3.2.2.2. Gesättigter Dampf

Man wird

die von (R1) genannten Werte

verwenden, denn ausser diesen sind uns nur die Angaben von (R13) bekannt, die aber noch eine Berechnung unter Verwendung des Dimerisationsgrades erfordern.

3.2.3. Spezifische Wärme von NaK-Legierungen

3.2.3.1. Flüssige Phase

Bis 800°C liegen

gute Messungen von (R19)

vor. Darüber hinaus kann die

Berechnung nach Gl. 5

erfolgen.

3.2.3.2. Gesättigter Dampf

In der Literatur finden sich keine Messungen. Man kann

Berechnungen nach Gl. 5

vornehmen, wobei zu beachten ist, dass die Gewichtsanteile für den Dampfraum zu nehmen sind; ferner muss auch die Dimerisation berücksichtigt werden.

In Abb. 4 sind die Bestwerte der spezifischen Wärme graphisch wiedergegeben.

3.3. Wärmeleitfähigkeit

3.3.1. Wärmeleitfähigkeit von Na

3.3.1.1. Flüssige Phase

Wir kennen nur

die Werte aus Tabelle 3 bzw.
eine Berechnung nach Gl. 6.

Die Berechnung weicht praktisch nicht von den Tabellenwerten ab bis 1000°C , und bei 1300°C liefert sie einen um nur 1,8 % kleineren Wert.

3.3.1.2. Gesättigter Dampf

Uns sind nur

die in Tab. 3 gebrachten Werte

bekannt.

3.3.2. Wärmeleitfähigkeit von K

3.3.2.1. Flüssige Phase

Nur

die Werte aus Tabelle 3

stehen zur Verfügung.

3.3.2.2. Gesättigter Dampf

Uns sind keine Daten bekannt.

3.3.3. Wärmeleitfähigkeit von NaK

Oberhalb von 700°C liegen keine Angaben vor.

Abb 5 zeigt die Bestwerte für die Wärmeleitfähigkeit in graphischer Darstellung.

3.4. Viskosität

3.4.1. Viskosität von Na

3.4.1.1. Flüssige Phase

Die

nach (R15) und Gl. 7 berechneten Werte

dürften am zuverlässigsten sein.

3.4.1.2. Gesättigter Dampf

Nur die

Werte der Tabelle 4, aus (R1) bzw. (R2) stammend,

sind bekannt.

3.4.2. Viskosität von K

3.4.2.1. Flüssige Phase

Gute Werte fehlen völlig. Bis 800°C kann man aus (R18) Anhaltspunkte entnehmen. Eine ziemlich unbrauchbare Graphik in (R4) reicht bis 983°C.

3.4.2.2. Gesättigter Dampf

Nur die

Werte aus (R1) in Tabelle 4

sind vorhanden.

3.4.3. Viskosität von NaK

Über 700°C fehlen jegliche Werte.

Die Bestwerte für die Viskosität sind in Abb. 6 aufgezeichnet.

3.5. Oberflächenspannung

3.5.1. Oberflächenspannung von Na

Es existieren nur die

Berechnungen nach Gl. 8

wie sie in Tabelle 5 zu finden sind.

3.5.2. Oberflächenspannung von K

Es ist nur 1 Wert bei 762°C bekannt; siehe Tabelle 5.

3.5.3. Oberflächenspannung von NaK

Uns sind keine Werte bekannt.

In Abbildung 7 ist die Oberflächenspannung graphisch dargestellt.

3.6. Dampfdruck

3.6.1. Dampfdruck von Na

Stellt man die in Tab. 6 zusammengetragenen Werte der Quellen (R2, 5, 13, 15, 34, 36, 39) für den Dampfdruck von Na graphisch dar, so ergibt sich, dass bis gut 900°C alle Werte praktisch übereinstimmen. Darüber hinaus laufen die verschiedenen Quellen auseinander. Die grössten Werte liefert dann (R2), die kleinsten (R5) und (R36). Dagegen decken sich die Werte von (R13, 15, 34 u. 39) weitgehend. (R13) berechnet auf theoretischer Grundlage. Die drei anderen Quellen stammen alle von dem gleichen Arbeitsteam um BONILLA/MAKANSI; im SITTIG ist lediglich ein Teil des Zahlenmaterials weiterbearbeitet

worden. Die Originalarbeiten machen einen besonders guten Eindruck. Ihre Werte liegen etwa in der Mitte zwischen allen anderen Quellen, und die letzte Veröffentlichung stammt aus dem Jahre 1962. Es dürfte also richtig sein,

für den Dampfdruck von Na
die Quelle (R39) und die Be-
rechnungsgleichung 12

zugrunde zu legen. Als "Standard error" gibt (R39) 2,2 % des Druckes an. Nach den Zahlenangaben aus (R39) - umgerechnet auf $\sqrt{\text{bar}}$ - ist die Dampfdruckkurve für Na in Abb. 8 gezeichnet worden. Sie entspricht damit der Gl. 12.

3.6.2. Dampfdruck von K

Auch für K zeigen die verschiedenen Quellen über den Dampfdruck - (R1, 5, 13, 18, 35, 39) - bis 900°C eine befriedigende Übereinstimmung. Darüber hinaus liefert zunächst (R18) die kleinsten, (R5) die grössten Werte, was sich bei Temperaturen etwa über 1050°C genau umkehrt. In den beiden Fällen, (R5) und (R18), mussten konkrete Zahlenwerte aus nur ungenau auswertbaren graphischen Darstellungen entnommen werden. Die genauesten Angaben findet man bei (R35) und (R39) vor und die Zahlenwerte liegen auch ziemlich in der Mitte des gesamten Streubereiches aller Quellen. Quelle (R39) stammt aus dem Jahre 1962. Man kann wohl

für den Dampfdruck von K
die Quelle (R39) und die Be-
rechnungsgleichung 13

zugrunde legen.

(R39) gibt 1,2 % des Druckes als "Standard error" an.

Die Dampfdruckkurve für K in Abb. 8 ist nach den Zahlenwerten von (R39), umgerechnet in $\sqrt{\text{bar}}$, gezeichnet und entspricht der Gl. 13.

3.6.3. Dampfdruck von NaK

In die graphische Darstellung der Dampfdrücke der Abb. 8 ist auch die einzige für eine NaK-Legierung (69,4 Gew. % K) vorhandene Messung, aus der Quelle (R39) stammend, eingetragen. Da (R39) schon bei Na und K das grösste Vertrauen beanspruchen konnte, kann man sich vielleicht auf die Richtigkeit verlassen, zumal eine

Berechnungen des Dampfdruckes für NaK-Legierungen nach Gl. 17

sich praktisch mit der gezeichneten Kurve deckt; bei 1200°C ist die Abweichung von der Kurve + 1,2 % bei ca. 1000°C - 0,75 %. (R39) gibt als "Standard error" für NaK 2,5 % des Druckes an.

3.7. Verdampfungswärme

3.7.1. Verdampfungswärme von Na

Betrachtet man die Tabelle 7 über die Verdampfungswärme, so stellt man fest, dass für Na die Werte von (R15) zwischen 0,27 und 0,84 % niedriger liegen als die von (R1). Quelle (R15) macht den besten Eindruck; die von (R1) gegebenen Werte für Na reichen aber bis zu höheren Temperaturen. Eine daraus gezeichnete Kurve ist leicht konkav nach oben gekrümmt, was unwahrscheinlich ist, da die Verdampfungswärme mit der Temperatur sinkt, um bei der kritischen Temperatur zu 0 zu werden. Es erscheint als richtig,

die Verdampfungswärme von Na aus Quelle (R15) zu entnehmen und oberhalb 1125°C linear zu extrapolieren.

3.7.2. Verdampfungswärme von K

Für K sind mit Temperaturabhängigkeit

nur die Werte von (R5) vorhanden.

Der Einzelwert von (R13) passt gut dazu. Die Quelle (R10) scheidet aus, da die Dimerisation nicht berücksichtigt ist.

3.7.3. Verdampfungswärme von NaK

Für NaK-Legierungen lassen sich die Verdampfungswärmen aus den Werten für Na und K additiv berechnen entsprechend der Legierungszusammensetzung.

Für Na und K sind die Bestwerte der Verdampfungswärmen in Abb. 9 aufgezeichnet.

3.8. Schmelzwärme

3.8.1. Schmelzwärme von Na

Da 4 von den 5 Werten der Tabelle 8 praktisch übereinstimmen, und da die dazugehörigen Quellen (R13, 14, 15, 16) auch als zuverlässig bekannt sind, ist zu empfehlen:

Die Schmelzwärme für Na
beim Tripel-Punkt $97,82^{\circ}\text{C}$
ist $113,2 \cdot 10^3 \text{ [J/Kg]}$.

3.8.2. Schmelzwärme von K

Von den 5 Angaben in Tabelle 8 dürften die von (R13, 14, 19) am zuverlässigsten sein. Das Mittel daraus ergibt die

Schmelzwärme von K beim
Tripel-Punkt $63,2^{\circ}\text{C}$ zu
 $59,52 \cdot 10^3 \text{ [J/Kg]}$.

3.8.3. Schmelzwärme von NaK

Entsprechend der Legierungszusammensetzung errechnet man die Schmelzwärme von NaK-Legierungen aus den Werten von Na und K.

3.9. Mollier-Diagramm

3.9.1. Mollier-Diagramm für Na

Aus einem Mollier-Diagramm kann man die Zusammenhänge zwischen Enthalpie, Entropie, Druck, Temperatur und Dampfdruck entnehmen.

Für Na bringt (R2) ein Mollier-Diagramm und Angaben, wie die Enthalpien und Entropien berechnet wurden. Auch (R14) und (R16) geben Daten der Enthalpien und Entropien und (R15) solche der Enthalpien. (R14) und (R16) stammen aus dem National Bureau of Standards, Washington, und dürfen sicher einen hohen Grad von Genauigkeit beanspruchen. (R16) bringt Werte aber nur bis 900°C . Bis dahin übereinstimmen die Enthalpieangaben von (R16) völlig mit denen von (R14). Beim Umrechnen der von beiden Quellen in verschiedenen Einheiten angegebenen Werte

ist zu beachten, dass (R16) den Nullpunkt der Enthalpie auf 0°C gelegt hat, (R14) dagegen auf 0°K . (R2) benutzt als Nullpunkt den Schmelzpunkt des Natriums bei $97,81^{\circ}\text{C}$ und zwar auf der flüssigen Seite. (R2) übereinstimmt gut mit (R15) und (R15) vielfach auch gut mit (R14). Für die Entropie-Werte gilt dasselbe. Da (R2) die meisten der für ein Mollier-Diagramm benötigten Daten schon in expliziter Form und bis zu hohen Temperaturen enthält, wurde das Mollier-Diagramm der Abb.10 nach den Werten der Quelle (R2) gezeichnet, wobei weitgehend eine Umrechnung in die bei uns üblichen Einheiten erfolgte.

3.9.2. Mollier-Diagramm von K

Für das Aufzeichnen des Mollier-Diagramms von K stehen nur wenig Zahlenwerte direkt zur Verfügung. Ein Teil liesse sich noch aus theoretischen Betrachtungen ermitteln. Jedenfalls ist noch eine derartige Rechenarbeit mit der Aufstellung des Mollier-Diagramms für K verbunden, dass es den Rahmen dieses Berichtes, der sich mit dem zur Zeit Bekannten befasst, überschreitet.

3.9.2. Mollier-Diagramm von NaK.

Für NaK-Legierungen gilt das unter 3.9.2. für K Gesagte in verstärktem Masse.

4. WAS MUSS ALSO NOCH GEMESSEN WERDEN?

Nachdem im Kapitel 2 alle Werte zusammengestellt worden sind, die uns über das betrachtete Gebiet z. Zt. bekannt sind und nachdem im Kapitel 3 die besten Werte davon herausgesucht worden sind, kann nun auch gesagt werden, über welche Grössen noch keine ausreichenden Angaben vorliegen.

4.1. Dichte

Für flüssiges Na gibt es im Siedebereich keine Messungen der Dichte. Wie die Werte für K erhalten wurden ist nicht feststellbar, da die Literaturquellen (R3) und (R5) nicht hereinkommen. Auch für NaK gibt es keine Messungen über 700°C . Soweit überhaupt feststellbar, sind die Werte für die Dampfdichten berechnet.

Im Siedegebiet fehlen also Messungen über die Dichten überhaupt.

Die verfügbaren rechnerischen Werte für den flüssigen Zustand dürften brauchbar sein; zumindest sollte man Messungen erst in Erwägung ziehen, wenn sich begründete Zweifel an der Richtigkeit der in Kapitel 3 genannten Bestwerte ergeben. Für flüssiges K scheint dies oberhalb 1200°C gegeben zu sein (Starke Krümmung der Kurve in Abb. 1).

Für die Dämpfe ist zwar ein Kompressibilitätsfaktor berücksichtigt worden bei der Brechung der spezifischen Volumen; aber die Werte erscheinen weniger konkret fundiert als die der flüssigen Phase.

Was die Dichte anbetrifft, wird man also vielleicht exakte Messungen der Dampfdichte am ehesten benötigen.

4.2. Spezifische Wärme

Oberhalb 897°C für flüssiges Na und 797°C für flüssiges K und flüssige NaK-Legierungen fehlen Messungen. Eine weite Extrapolation bis 1300°C erscheint gewagt. Die spezifische Wärme der Dämpfe ist nur berechnet.

Da die besten Messungen für die betrachteten flüssigen Stoffe aus völlig anerkannter Quelle (NBS, Washington) stammen, kann man vielleicht bis gut 1000°C extrapolieren. Jedenfalls dürften Messungen an den flüssigen Substanzen erst oberhalb 1000°C und erst dann erforderlich sein, wenn Mängel an den gegebenen Werten offensichtlich geworden sind. Dabei genügt es, genaue Werte für flüssiges Na und flüssiges K zu haben, da die flüssigen NaK-Legierungen dann nach Gl. 5 gut berechnet werden können.

Für die Dämpfe von NaK-Legierungen ist die Berechnung nicht so einfach möglich, da die Dimerisation hinzukommt.

Die angegebenen Bestwerte für gesättigten Na- und K-Dampf sind wohl nicht so genau wie die Werte für die flüssigen Phasen. Bis 1228°C liegen für Na- und K-Dampf Werte vor, die zunächst einmal ausreichen werden. Zahlangaben über die spezif. Wärme des Dampfes von NaK-Legierungen fehlen aber völlig.

4.3. Wärmeleitfähigkeit

Im Siedebereich sind uns Messungen über die Wärmeleitfähigkeit von Na, K und NaK-Legierungen für die flüssige wie für die dampfförmige Phase nicht bekannt.

Die angegebenen Bestwerte sind für flüssiges Na rechnerisch und für flüssiges K graphisch extrapoliert. Sie können wohl zunächst dem Bedarf gerecht werden.

Die Angaben für gesättigten Na-Dampf sind von der betreffenden Quelle umständlich errechnet und hätten wohl bald eine Kontrolle durch gemessene Daten nötig.

Für die Wärmeleitfähigkeit von K-Dampf und von NaK-Legierungen bestehen oberhalb 700°C keine Angaben, sodaß hier Messungen bald notwendig werden können.

4.4. Viskosität

Die Viskosität von flüssigem Na nach Abb. 6 ist rechnerisch extrapoliert worden. Sie dürfte bis etwa 1000°C ziemlich zuverlässig sein. Die von gesättigtem Na-Dampf ist umständlich errechnet und wohl nicht so zuverlässig. Diese Werte mögen zunächst ausreichen.

Für flüssiges K liegen Messungen nur bis gut 800°C vor, und es ist keine Berechnungsgleichung für die Extrapolation vorhanden. Auch eine etwaige graphische Extrapolation mit Hilfe von Werten aus dem Bereiche unterhalb des Siedens könnte höchstens weitere Anhaltspunkte liefern ohne jedem Anspruch auf Genauigkeit. Somit sind Viskositätsmessungen an K oberhalb 800°C bald erforderlich. Wie (R18) aussagt, sind solche Messungen bis 1150°C beim Battelle-Institut, Columbus, Ohio, im Gange.

Für K-Dampf sind bis 1000°C berechnete Werte vorhanden, die zunächst einmal ausreichen werden.

Die Viskositäten von NaK-Legierungen und ihren Dämpfen sind über 700°C unbekannt. Man müßte sie also eigentlich bald messen, kann sich aber für Überschlagsrechnungen dadurch helfen, daß die Werte zwischen denen von Na und K liegen werden.

4.5. Oberflächenspannung

Über die Oberflächenspannung von Na und K existieren im betrachteten Temperaturgebiet keine Messungen.

Für Na gibt es bis 1300°C Werte, die rechnerisch aus Messungen extrapoliert sind, die schon bei 450°C abbrechen. Da der Zusammenhang der Oberflächenspannung mit der Temperatur bis dahin streng linear verläuft, kann man annehmen, daß eine weite Extrapolation noch ziemlich richtige Werte liefert.

Für K sind die Angaben, auch unterhalb des hier betrachteten Temperaturbereiches, sehr mangelhaft, so daß Messungen bald dringend notwendig sein werden. Selbst Messungen unterhalb des Siedepunktes würden, wenn sie genau ausgeführt werden, viel nutzen, da man dann wenigstens auch für K extrapolieren könnte.

Auch für NaK-Legierungen sind keine Daten bekannt.

4.6. Dampfdruck

Über den Dampfdruck liegen zahlreiche Angaben vor; der von Na wurde schon bis 1300°C gemessen, von K bis ca. 1200°C und von einer NaK-Legierung bis 1052°C .

Infolge der zahlreichen von einander unabhängigen Veröffentlichungen für Na und K, konnten leicht die Bestwerte mit einer gewissen Sicherheit angegeben werden. Man sollte aber beachten, daß für K oberhalb 1050°C die verschiedenen Quellen etwas stärker streuen, sodaß Dampfdruckmessungen an K bei Temperaturen über 1050°C noch sinnvoll sind.

Für NaK-Legierungen sind Messungen wohl nicht erforderlich, da sich die Dampfdrücke gut aus den Werten für Na und K berechnen lassen.

4.7. Verdampfungswärme

Die Angaben über die Verdampfungswärmen von Na und K sind rechnerisch entstanden. Die in Abb. 9 aufgezeichneten Bestwerte werden wahrscheinlich für die üblichen Berechnungen ausreichend sein. Ein Vergleich mit guten gemessenen Werten wäre natürlich reizvoll.

Für NaK-Legierungen sind Messungen keinesfalls erforderlich, da sich die Werte der Verdampfungswärme aus denen von Na und K entsprechend der Legierungszusammensetzung additiv berechnen lassen.

5. KORROSIONSV ERHALTEN

Über die Auswirkung der Korrosion beim Arbeiten mit Na, K und NaK-Legierungen gibt es schon einige Literatur. Im Folgenden ist das Wesentlichste erwähnt, wie es sich aus den zusammenfassenden

Quellen (R10), (R44) und (R45) ergibt.

Graphit und Kohlenstoff

Graphit wird bei Temperaturen über 450°C von Na benetzt und das Na durch Kapillarität in den Graphitporen absorbiert. Ganz allgemein neigen Flüssigmetalle, die in poröse Stoffe eingedrungen sind, dazu, bei Temperaturwechsel das Gefüge dieser Stoffe zu sprengen. Eine wesentliche Korrosion des Graphits durch flüssiges Na tritt nur ein, wenn der Kohlenstoff, der ins Na übergegangen ist, an anderer Stelle abgelagert werden kann. Das geschieht gerne an rostfreiem Stahl bei Temperaturen über 500°C. Dieser Vorgang verläuft bereits in isothermen Systemen. Bei nicht isothermen Systemen wird durch das Na der C von heißen zu kalten Stellen transportiert. Flüssigmetalle bewirken also eine Stoffwanderung. So wechselt z. B. im flüssigen Na auch der C eines Kohlenstoffstahles zur Oberfläche eines rostfreien Stahles über, insbesondere, wenn am Orte des C-Stahles eine höhere Temperatur herrscht als am Orte des rostfreien Stahles. Dadurch wird der rostfreie Stahl spröde.

Von K wird Graphit wesentlich stärker angegriffen als von Na.

Eisen, Chrom und Nickel

Fe, Cr und Ni lösen sich bei mäßig hohen Temperaturen nur wenig im Na; zwischen 100 und 500°C übersteigt die Löslichkeit $10^{-3}\%$ nicht. Verunreinigungen durch feine Metallspäne und Schweißschlacke können groß dagegen sein.

Eintauchen in Flüssigmetalle setzt die Zerreißfestigkeit von Metallen herab.

Wirkung von Verunreinigungen des Flüssig-Metalls

Handelsreines Na hat nach (R44) folgende Verunreinigungen:

K	Ca	Fe	Mg	Si	O ₂	H ₂	C
0,01-0,05	0,01-0,02	0,001	0,001-0,2	0,001-0,2	>0,003	0,005	0,006 %

(R10) nennt als Hauptverunreinigungen O₂, Ca, Cl, Li, Hg. Die aggressivsten sind O₂, Mg und Ca. Mg und Ca reagieren insbesondere mit dem Ni hitzebeständiger Stähle. Überschüssiges Ca wandelt Na-Oxyd in noch weniger lösliches Ca-Oxyd um. Hydrokarbonate bilden mit Na unlösliche Rückstände. Na, das Ca enthält, muß vor N₂ geschützt

werden, da sich Kalziumnitrid als unlöslicher Niederschlag bildet. Ein O₂-Gehalt gehört zu den heftigsten Ursachen für eine Korrosionswirkung der Alkalimetalle. Bei mehr als 100 ppm O₂ wird der Angriff auf viele Materialien wesentlich intensiver. Außerdem bewirkt der O₂ leicht ein Verstopfen der Systeme an den kälteren Stellen entsprechend der raschen Abnahme der Löslichkeit der Oxyde in den flüssigen Metallen mit fallender Temperatur. Ausgenutzt wird dieser Effekt im Plugging-Indikator zur Bestimmung des O₂-Gehaltes und zum Beseitigen der Oxyde durch Ausfrieren.

Eine Zusammenstellung über die Widerstandsfähigkeit verschiedener Materialien gegen Na, NaK und K ist in Tab. 9 gegeben. Dabei ist als "Kurzzeitbetrieb" eine Verwendungsdauer von einigen zehn bis einigen hundert Stunden zu verstehen, also im Wesentlichen eine Benutzung im Laboratorium. "Dauerbetrieb" ist langfristig dagegen, so daß schon eine mehr industrielle Verwendung in Betracht gezogen werden kann. Ein _____ bedeutet, daß der Stoff für die betreffende Betriebsart ungeeignet ist; gegebenenfalls unter den hinzugefügten besonderen Bedingungen. Es muß noch gesagt werden, daß gereinigte Flüssigmetalle zugrunde liegen. Bei einem wesentlichen Oxydgehalt z. B. würden die zulässigen Temperaturen niedriger sein.

Zu den Werten der Tabelle 9 ist festzustellen:

Die zulässigen Temperaturen ergeben sich bei Kapselversuchen höher als bei Kreislaufversuchen. Im Kapselversuch ist das Material dem heißen, gegebenenfalls dem siedenden Flüssigmetall und seinem Dampf ausgesetzt, evtl. dem zurückfliessenden Kondensat. Im Loop strömt das heiße Flüssigmetall oder/und der Dampf, wodurch die Beanspruchung wesentlich verschärft ist. Weiter stellte sich die Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeit und Dampf bei Versuchen mit Cb und Cb-1 % Zr als sehr wesentlich heraus, weil die Korrosion mit der Geschwindigkeit erheblich zunimmt.

Bei Betrieb unterhalb ca. 510°C sind normaler C-Stahl und niedrig chromierte Stähle (1 - 2,25 % Cr) für Na und NaK ausreichend, wenn die Geräte sauber hergestellt werden und wenn durch Kalte-Fallen Verunreinigungen, insbesondere Na-Oxyd, beseitigt werden. Der Zwang zu einer sehr sauberen Verarbeitung ist ein großes Erschwernis für die Verwendung dieser einfachen Stähle. Höher chromierte Stähle sind daher doch vorzuziehen.

Bei Dauerbeanspruchung unterhalb Glühtemperaturen ist Austenitischer-Stahl 18/8 der richtige Baustoff. Bei höheren Temperaturen besteht weniger Erfahrung, aber der Stainless Steel Typ 347, der stabilisiert ist, hat kaum Unterschiede gezeigt gegenüber dem einfacheren 18/8.

Für Kurzzeitbetrieb mit Na im Kreislauf sind die Stähle 316 SS, 321 SS, Inconel und Haynes 25 (L-605) bis 1020°C erprobt.

Zu beachten ist, daß die korrosionsfesteren Stähle leider eine geringere Wärmeleitfähigkeit und eine größere Wärmeausdehnung haben als die weniger korrosionsfesten Stähle.

Nach (R18) wird oberhalb 870°C Stainless Steel überhaupt ungeeignet für Arbeiten mit K. Man verwendet dann Cb-1 % Zr als Baustoff, der im Kurzbetrieb mit K bis 1100°C erprobt zu sein scheint und für Na im Dauerbetrieb bei Kapselversuchen bis 1200°C. Noch widerstandsfähiger als Cb-1 % Zr gegen Korrosion bei der Verwendung mit K ist Mo und einige seiner Legierungen.

Für die Isolierstoffe gilt allgemein, daß sie dicht gebrannt sein müssen. Poröse Isolierstoffe saugen sich voll und bersten bei Temperaturwechsel. Ferner ist die Reinheit wesentlich; während manche Binder, insbesondere Si, mit dem Flüssig-Metall reagieren.

Sehr reine und dichte Oxyde von Al, Mg und besonders Ti und Zr widerstehen auch bei Glühtemperaturen dem Angriff der betrachteten Flüssig-Metalle ganz gut. Die Karbide von Wo, Ti und Cr, mit Ni oder Co gebunden, verhalten sich im Dauerbetrieb bis 540°C ausgezeichnet gegen Na und sind im Kurzzeitbetrieb bis 900°C zu brauchen.

Einzelheiten über das Korrosionsverhalten sind aus der Tabelle 9 zu ersehen.

6. LITERATUR

Dichte

- 1 Literature Survey on Liquid Metal Boiling
R. E. BALZHISER et al., Univ. of Michigan (Dec.1961)
ASD Techn. Rep. 61-594.
- 2 The Thermodynamic and Transport Properties of Sodium and Sodium Vapor.
E. L. DUNNING
ANL - 6246 (Oct. 1960).
- 3 Boiling Liquid-Metal Heat Transfer Space-Nuclear Conference (May 1961)
W. R. GAMBILL et al. , American Rocket Soc. ORNL, Preprint.
- 4 Boiling Rubidium as a Reactor Coolant. Preparation of Rb-Metal Phys. and Thermod. Prop. and Compatibility with Inconel.
J. J. WHITMAN et al. , CF 55-6-49 (Pt.1), (Aug.1954).
- 5 Thermodyn. Prop. of Alkali Metal Vapors and Mercury, 2nd Revision.
C. J. MEISL, R 60 FPD 358-A, Flight Propulsion Div. GE Comp. (1962).
- 6 Density and Viscosity of Molten Materials. Part I: Density of Sodium and Sodium Hydroxyd .
M. NISHIBAYASHI, WADC-TR-53-308 (Pt.1) (Nov.1953).
- 7 Properties of Inorganic Coolants for Space Applications, WADC-TR-59-598.
- 8 Über den Einfluß der Dimerisation auf die thermo-physikalischen Eigenschaften von Dämpfen der Alkali-Metalle bis 1500°C.
L. D. VOLJAK, F. Ing. - Phys. (russ.) 5 (1962) 3, 51-57 und 7, 83-85.
- 9 Specific Gravity of a Bubbling Gas Liquid Mixture.
L. S. AKSELROD et al. KHIM PROM 1 (1954).
- 10 Liquid Metals Handbook, Sodium-NaK Supplement (1955).
B. JACKSON - TID 5277.

11

12

Spezifische Wärme

- 1 s. unter "Dichte".
- 2 s. " "
- 5 s. " "
- 7 s. " "
- 10 s. " "
- 13 Zahlenwerte und Funktionen. LANDOLT-BÖRNSTEIN
Bd. II/4 - Springer Verlag (1961).
- 14 Thermodynamic Properties of the Alkali Metals
EVANS et al., Journal of National Bureau of Standards 55,
No. 2, 83-96 (1955). Research-Paper 2608.
- 15 Sodium. Its Manufacture, Properties and Uses.
M. SITTING, Amer. Chem. Soc. Monograph Series No. 133.
Reinhold Publishing Corp. New York; Chapman & Hall, Ltd,
London (1956).
- 16 Heat Capacity of Sodium between 0 and 900°C, the Triple Point
and Heat of Fusion.
GINNINGS, DOUGLAS, BALL. J. Research Nat. Bur. Stand.
45, 23-33 (1950).
- 17 Specific Heats of Liquids, of Liquid Metals and Liquid Salts.
T.B. DOUGLAS. First nuclear engine and science congress
(1957).
- 18 The Engineering Properties of Potassium.
J. F. WALLING, Brookhaven Nat. Lab. (May 1962).
Kontrakt Nr. NAS5-584, Battelle Inst.
- 19 Heat Capacity of Potassium and 3 Pot-Sod. Alloys between 0 and
800°C, the Triple Point and Heat of Fusion of Potassium.
T.B. DOUGLAS et al., I. Am. Chem. Soc. 74, 2472 (1952).

20

21

Wärmeleitfähigkeit

1 s. unter "Dichte".

2 s. " "

4 s. " "

7 s. " "

10 s. " "

15 s. " "Spezif. Wärme"

22

23

24 Atomics International: Mißt die Wärmeleitfähigkeit von Flüssigmetall-Dampf.

Viskosität

1 s. unter "Dichte".

2 s. " "

3 s. " "

4 s. " "

7 s. " "

10 s. " "

15 s. " "Spezif. Wärme"

18 s. " " "

25 On the Viscosity of Liquid Metals.
A. M. KOROLKOW, AEC-TR-4202 (Oct. 1960).

26

27

28

29 Atomics International: Mißt μ von Flüssig-Metall-Dampf.

Oberflächenspannung

1 s. unter "Dichte".

2 s. " "

3 s. " "

15 s. " "Spez. Wärme".

30 Method and Results of Sodium Wetting Tests.
H. H. WINKLER et al. KAPL-P-231 (27.12.1949).

31

32

Dampfdruck

1 s. unter "Dichte".

2 s. " "

5 s. " "

13 s. " "Spez. Wärme".

15 s. " " "

18 s. " " "

33 Powerplant Heat Cycles for Space Vehicles.
MAC KAY et al., MD-60-177 (1960).

- 34 Determiration of the Vapour Pressure of Sodium.
MAKANSI, MUENDEL, SELKE; J. Phys. Chem, 59, 40-2
(1955).
- 35 Vapour Pressure of Potassium.
MAKANSI, MADSEN, SELKE, BONILLA; I. Phys. Chem. 60,
No. 1, S. 128 (Jan.1956).
- 36 Determiration of Sodium Vapor Pressure at Temperatures from
880 to 1300°C.
P. L. KIRILLOW et al. Inzhener fiz zhur akad nauk belorus
SSR 2 (May 1959). J. of Eng. Phys. 11, 5 (1959) S. 3
- 37 Experimental Determiration of Potassium Vapor Pressure in
the 550-1280 °C Temperature Range.
N. S. GRACHEV, P. L. KIRILLOV, AD-260-009.
- 38 Metal Cell for Use in Vapor Pressure Measurements by the
Effusion Method.
BLAIRS et al.; J. Sci. Instr. 38, 12 S.469 (1961).
- 39 Vapor Pressure of Alkali Metals III.
BONILLA, SAWHNEY, MAKANSI. Liquid Metals Research Lab.
Columbia University, New York (1962).
- 40

Verdampfungswärme

- 1 s. unter "Dichte".
- 2 s. " "
- 5 s. " "
- 10 s. " "
- 13 s. " "Spez. Wärme".
- 15 s. " " "
- 34 s. " "Dampfdruck".
- 35 s. " "

- 41 Zur Berechnung der latenten Verdampfungswärme von Alkali-
Metallen.
SPILJRIN, ASINOWSKIJ; I. Ing. Phy. (russ.) 5 (1962) 4, 35/40.

42

Schmelzwärme

- 10 s. unter "Dichte".
- 13 s. " "Spezif. Wärme".
- 14 s. " " "
- 15 s. " " "
- 16 s. " " "
- 19 s. " " "
- 43 Handbook of Chemistry and Physics 42.
Chemical Rubber Publishing Comp., Cleveland, Ohio.

Korrosionsverhalten

- 10 s. unter "Dichte".
- 44 Liquid-Metal Heat Transfer Media.
S. S. KUTATELADZE et al.; translated from Russian.
Consultants Bureau, Inc., New York; Chapman and Hall, Ltd,
London, (1959).
- 45 NASA-AEC Liquid Metals Corrosion Meeting, held at Brook-
haven National Lab., 14-15.12.1961. TID-7626 (Pt.1) (April 1962)
- 46 Problems of Corroding Structural Materials by Liquid Metals.
A. DVORAK. AD-259-250 (11.7.1961).
- 47 Le refroidissement par métaux liquides. Problèmes de compa-
tibilité.
R. DARRAS; Energie Nucléaire 3, (Mars-Avril 1961), S.128-138.

- 48 Some Observations on the Interaction of Liquid Sodium with
Cast Irons and Plain Carbon Steels.
A.A. SMITH et al.; University of Cambridge, Eng. I. Iron Steel
Inst. (London) 196, (1960).
- 49 Korrosion durch Flüssig-Metalle als Kühlmittel in Reaktoren.
I, II. W. Machu. Atomkernenergie 3, 97-100, 141-4 (1958).
- 50 Siliconizing of Metals in Liquid NaK.
E. S. FISHER et al.; TID-7526 (1957).

Tabelle 1: Dichte

Stoff	Temperatur (°C)	Dichte (kg/m ³)		Quelle (R...)
		ρ_l	ρ_v gesättigt	
Na	800	759	0,128	} 1 2 15
	850	747	0,214	
	900	734	0,333	
	950	721	0,510	
	1000	709	0,746	
	1050	696	1,04	
	1100	683	1,41	
	1150	670	1,87	
	1200	656	2,47	
	1250	643	3,12	
	1300	629	3,88	
			berechnet	
Na	727	769		} 5
	760		0,081	
	816		0,140	
	871		0,232	
	949	729		
	982		0,572	
	1093		1,14	
	1171	689		
K	762	663	0,490	} 1 3 4 5
	838	649	0,905	
	950	628	1,86	
	1060	609	3,33	
	1172	591	5,38	
	1228	583	6,62	
	1400	569	-	
NaK 44 % K	800	722		} Berechnung n. Gl. : (2).
	900	700		
	1000	677		
	1100	655		
	1200	633		
	1300	610		

Tabelle 1a: $10^3 \times$ Dichte des überhitzten Na-Dampfes $[\text{kg/m}^3]$ (Berechnung aus den spezif. Vol.)
 bei einem Druck von

Temp. (°C)	0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,10	0,25	0,5	1,0	2,5	5,0	7,5	10	15	[atm]
428 (T _s)	0,405														
497 (T _s)		1,84													
500	0,366	1,84													
533 (T _s)			3,56												
550	0,337	1,73													
571 (T _s)				7,04											
600	0,322	1,63	3,22	6,84											
628 (T _s)					16,8										
650	0,309	1,53	3,07	6,33	16,1										
676 (T _s)						32,3									
700	0,298	1,45	2,92	5,89	14,9	31,5									
747 (T _s)							78,1								
750	0,278	1,37	2,75	5,57	14,1	29,3									
800	0,261	1,31	2,59	5,27	13,3	28,3	71,9								
812 (T _s)								149							
850	0,249	1,25	2,49	5,03	12,7	26,7	67,1	142							
881 (T _s)									282						
900	0,239	1,19	2,40	4,80	12,1	24,3	62,9	130	275						
950	0,229	1,14	2,30	4,60	11,5	23,3	59,5	122	259						
991 (T _s)										692					
1000	0,221	1,10	2,21	4,41	11,05	22,3	56,5	115	242	633					
1050	0,212	1,06	2,12	4,24	10,6	21,4	54,1	110	226	610					
1088 (T _s)											1350				
1100	0,204	1,02	2,04	4,08	10,25	20,5	51,8	105	217	588	1320				
1150	0,197	0,980	1,97	3,94	9,87	19,8	50,0	101	207	552	1200				
1154 (T _s)												1910			
1200	0,190	0,952	1,90	3,80	9,52	19,1	48,0	96,7	198	519	1110	1730			
1202 (T _s)													2490		
1250	0,184	0,917	1,84	3,68	9,09	18,4	46,1	93,3	189	495	1040	1630	2260		
1279 (T _s)														3570	
1300	0,178	0,885	1,78	3,56	8,69	17,8	44,6	90,2	182	463	978	1530	2110	3370	

Tabelle 2: Spezifische Wärme

Stoff	Temp. (°C)	Spezif. Wärme [J/kg °C]		Quelle (R...)
		c _{pl.}	c _{pv.gesättigt}	
Na	800	1,268 · 10 ³	0,900 · 10 ³ 0,896 · 0,896 · 0,896 · 0,896 · 0,896 · 0,896 · 0,896 · 0,900 · 0,900 · 0,900 · 10 ³	1 2 5 7 15 16
	850	1,277 ·		
	900	1,289 ·		
	950	1,302 ·		
	1000	1,320 ·		
	1050	1,340 ·		
	1100	1,358 ·		
	1150	1,381 ·		
	1200	1,399 ·		
	1250	1,424 ·		
	1300	1,445 · 10 ³		
		bis 900°C besser ± 0,5 %.		
Na	727	1,261 · 10 ³	0,892 · 10 ³ 0,890 · 0,889 · 0,889 · 0,889 · 0,889 · 10 ³	1: 14 v: Be- rechnung nach 14/15
	827	1,276 ·		
	927	1,294 · 10 ³		
	1027			
	1127			
	1227			
Na	727	1,261 · 10 ³		
Na ₁	727		0,904 · 10 ³	13
	1227		0,904 ·	
	1727		0,907 ·	
	2727		0,948 · 10 ³	
Na ₂	727		0,847 · 10 ³	
	1227		0,865 · 10 ³	
K	727	0,778 · 10 ³ gemessen	0,530 · 10 ³ 0,528 · 0,528 · 0,528 · 0,528 · 0,529 · 10 ³	1 5 14
	838	0,796 ·		
	950	0,822 ·		
	1060	0,859 ·		
	1172	0,901 ·		
	1228	0,926 · 10 ³		

K	700	$0,773 \cdot 10^3$	} ge- messen		}	19			
	800	$0,788 \cdot 10^3$							
K	727	$0,777 \cdot 10^3$							
K ₁	727				$0,532 \cdot 10^3$	}	13		
	1227				$0,532 \cdot$				
	1727				$0,537 \cdot 10^3$				
K ₂	727				$0,505 \cdot 10^3$	}			
	1227				$0,533 \cdot 10^3$				
NaK 78,3%K	700	$0,882 \cdot 10^3$	} gemessen			}	19		
	800	$0,893 \cdot 10^3$							
53,6%K	700	$1,000 \cdot 10^3$							
	800	$1,018 \cdot 10^3$							
44,8%K	700	$1,045 \cdot 10^3$							
	800	$1,058 \cdot 10^3$							
NaK 78,3%K	700	$0,878 \cdot 10^3$						}	Berechnung nach Gl. 5
	800	$0,893 \cdot$							
	1000	$0,942 \cdot$							
	1200	$1,019 \cdot 10^3$							
53,6%K	700	$0,997 \cdot 10^3$							
	800	$1,011 \cdot$							
	1000	$1,061 \cdot$							
	1200	$1,138 \cdot 10^3$							
44,8%K	700	$1,040 \cdot 10^3$							
	800	$1,053 \cdot$							
	1000	$1,104 \cdot$							
	1200	$1,182 \cdot 10^3$							

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit

Stoff	Temp. (°C)	Wärmeleitfähigkeit [W/m °C]		Quelle (R...)	
		λ_l	λ_v gesättigt		
Na	800	51,9	$14,3 \cdot 10^{-3}$	1	
	850	49,4	14,8 ·	2	
	900	46,9	15,3 ·	7	
	950	44,4	15,8 ·	10	
	1000	41,9	16,2 ·	15	
	1050	39,8	16,7 ·	berechnet	
	1100	37,3	17,2 ·		
	1150	34,7	17,6 ·		
	1200	32,2	18,1 ·		
	1250	30,2	18,5 ·		
	1300	28,1	$19,1 \cdot 10^{-3}$		
	K	800	31,4		extrapoliert
900		30,2			
1000		29,2			
1100		28,2			
1200		27,1			
1300		26,1			
1400		25,2			

Tabelle 4: Viskosität

Stoff	Temp. (° C)	Viskosität [kg/ms]		Quelle (R...)
		μ_l	$\mu_{v_{\text{gesättigt}}}$	
Na	800	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$0,117 \cdot 10^{-4}$	1 2 10 }
	850	1,73 ·	0,120 ·	
	900	1,67 ·	0,122 ·	
	950	1,63 ·	0,129 ·	
	1000	1,59 ·	0,136 ·	
	1050	1,57 ·	0,139 ·	
	1100	1,54 ·	0,142 ·	
	1150	1,52 ·	0,149 ·	
	1200	1,50 ·	0,157 ·	
	1250	1,49 ·	0,161 ·	
	1300	$1,48 \cdot 10^{-4}$	$0,165 \cdot 10^{-4}$	
Na	800	$1,79 \cdot 10^{-4}$		15 Berechnung nach Gl. 7
	850	1,73 ·		
	900	1,67 ·		
	950	1,63 ·		
	1000	1,58 ·		
	1050	1,54 ·		
	1100	1,51 ·		
	1150	1,48 ·		
	1200	1,45 ·		
	1250	1,42 ·		
	1300	$1,40 \cdot 10^{-4}$		
K	Siede- punkt	$1,29 \cdot 10^{-4}$		1, 3
K	800	$1,296 \cdot 10^{-4}$		18
K	Siede- punkt		$0,0537 \cdot 10^{-4}$	1
	816		0,0582 ·	
	872		0,0636 ·	
	927		0,0706 ·	
	983		$0,0744 \cdot 10^{-4}$	

Tabelle 5: Oberflächenspannung

Stoff	Temp. °C	Oberflächenspannung σ [N/m]	Quelle (R...)
Na	800	0,122	1 2 15
	850	0,117	
	900	0,112	
	950	0,107	
	1000	0,102	
	1050	0,097	
	1100	0,092	
	1150	0,087	
	1200	0,082	
	1250	0,077	
	1300	0,072	
K	762	0,070	1, 3

Tabelle 6: Dampfdruck

Stoff	Temp. (° C)	Dampfdruck [bar] p	Quelle (R...)	
Na	800	0,459	1 2	
	825	0,589		
	850	0,746		
	875	0,959		
	881	1,013		
	900	1,190		
	925	1,488		
	950	1,858		
	975	2,228		
	1000	2,746		
	1025	3,242	berechnet	
	1050	3,906		
	1075	4,686		
	1100	5,437		
	1125	6,439		
	1150	7,380		
	1175	8,610		
	1200	9,933		
	1225	11,31		
	1250	13,06		
1275	14,92	gemessen (berechnet)		
1300	16,64			
Na	800		0,448	15
	825		0,581	
	850		0,743	
	875		0,941	
	880		0,986	
	900		1,181	
	925		1,463	
	950		1,799	
	975	2,192		
	1000	2,648		
	1025	3,176		
	1050	3,782		
	1075	4,468		
	1100	5,250		
	1125	6,144		

	1129	6,368	}	gemessen	34
	1133	6,496			
	1135	6,570			
	1200	9,63			Berechnung nach Gl. 10
	1250	12,59			
	1275	14,30			
	1300	16,18			
Na	900	1,19	}	gemessen	36
	950	1,78			
	1000	2,45			
	1050	3,60			
	1100	4,91			
	1150	6,68			
	1200	8,95			
	1250	11,70			
	1300	15,70			
Na	762	0,304	}	gemessen	39
	809	0,506			
	881	1,013			
	928	1,520			
	964	2,026			
	993	2,531			
	1018	3,039			
	1059	4,051			
	1093	5,060			
	1121	6,077			
	1147	7,090			
	1170	8,104			
	1209	10,133			
	1287	15,200			
	1300	16,18			
				berechnet	Berechnung nach Gl. 12
Na	760	0,276			
	872	0,876			
	982	2,14			
	1093	4,76			
	1207	8,84			
Na ₁₊₂	882	1,013	}	berechnet	13
	964	2,026			
	1093	5,065			

K	684	0,506	} gemessen	39	
	754	1,013			
	800	1,520			
	835	2,026			
	864	2,531			
	889	3,039			
	931	4,051			
	965	5,060			
	995	6,077			
	1021	7,090			
	1044	8,104			} berechnet
	1086	10,133			
	1168	15,200			
	1200	17,62			
1300	26,80				
K	649	0,315	} gemessen (?)	5	
	760	1,02			
	872	2,66			
	982	6,00			
	1093	9,93			
	1207	16,90			
K	754	1,013	} berechnet	13	
	836	2,026			
	965	5,065			
K	727	0,753		1	
	839	2,002		5	
	950	4,435		33	
	1060	8,575			
	1172	14,72			
	1227	18,71			
K	746	0,945	} gemessen	35	
	763	1,107			
	764	1,076			
	787	1,331			
	815	1,738			
	818	1,775			
	833	1,991			
	846	2,158			

	874	2,746		
	902	3,335		
	926	3,900		
	954	4,718		
	972	5,318		
	997	6,210		
	1008	6,612		
K	700	0,586	gemessen	18
	800	1,46		
	900	3,11		
	1000	5,94		
	1100	12,84		
	700	0,562	Berechnung nach Gl.16	
	1000	6,30		
	1100	11,15		
NaK 69,4% K	609	0,160	gemessen	39
	675	0,346		
	797	1,084		
	842	1,510		
	864	1,853		
	873	1,950		
	905	2,512		
	938	3,164		
	962	3,475		
	977	4,135		
	998	4,695		
	1018	5,350		
	1029	5,755		
	1040	6,157		
	1052	6,600		
	1052	6,51		
1100	8,49	Berechnung nach Gl.14		
1200	14,02			
1250	17,56			
1300	21,68			

Tabelle 7: Verdampfungswärme

Stoff	Temp. (°C)	Verdampfungswärme [J/kg]	Quelle (R...)
Na	800	$3,86 \cdot 10^6$	1 2 5
	900	3,75 ·	
	1000	3,67 ·	
	1100	3,59 ·	
	1200	3,53 ·	
	1300	$3,48 \cdot 10^6$	
		berechnet } zu Gleichgewichts- dampf aus 1- und 2- atomigem Na	
Na	B.P.	$4,34 \cdot 10^6$	10, 34
Na	B.P.	$4,26 \cdot 10^6$	zu 1-atomigem D. zu 2-atomigem D. zu Gleichgewichts- dampf
	"	$2,50 \cdot 10^6$	
	"	$3,76 \cdot 10^6$	
	800	$3,84 \cdot 10^6$	
	850	3,79 ·	
	900	3,74 ·	
	950	3,69 ·	
	1000	3,65 ·	
	1050	3,60 ·	
	1100	3,56 ·	
1125	$3,54 \cdot 10^6$		
		berechnet } zu Gleichgewichts- dampf aus 1- und 2- atomigem Na	15
Na	890	$3,87 \cdot 10^6$	13
K	753,8	$1,98 \cdot 10^6$	13
K	B.P.	$2,08 \cdot 10^6$	10, 35
K	727	$1,99 \cdot 10^6$	1 5
	838	1,94 ·	
	950	1,89 ·	
	1060	1,83 ·	
	1172	1,78 ·	
	1228	$1,75 \cdot 10^6$	
		} zu Gleichgewichts- dampf	

Tabelle 8: Schmelzwärme

Stoff	Temperatur (°C)	Schmelzwärme [J/kg]	Quelle (R..)
Na	97,80(T.P.)	$113,2 \cdot 10^3$	10,16
		$113,3 \cdot 10^3$	15
	97,82(T.P.)	$113,1 \cdot 10^3$	14
	97	$132,7 \cdot 10^3$	43
	97,82	$113,2 \cdot 10^3$	13
K		$59,68 \cdot 10^3$	10
	63,2(T.P.)	$59,67 \cdot 10^3$	19
	63,2(T.P.)	$59,29 \cdot 10^3$	14
	62	$65,7 \cdot 10^3$	43
	63,2	$59,60 \cdot 10^3$	13

Tabelle 9: Korrosionsverhalten

Material	in	geeignet für		Angaben fehlen	Quelle (R...)
		Dauerbetrieb bis °C	Kurzzeitbetrieb bis °C		
Reines Fe	NaK	900		über 900°C	10, 44
Grau-Guss	NaK	ca 250	(600)	über 900°C	10, 44
Weicher C-Stahl	NaK	ca 470	800	über 900°C	10, 44
Cr-Stahl, 2-9 % Cr, Mo, Si, Ti	NaK	600	810	über 810°C	10, 44
Ferritic Stainless Steel	NaK	900		über 900°C	10, 44
Austen. Stainless Steel	NaK	900		über 900°C	10, 44
18 Cr, 8 Ni; 304 SS	NaK	900		über 900°C	10, 44
310 SS (25 Cr, 20 Ni)	NaK	900		über 900°C	10, 44
316 SS	Na		1020	über 1020°C	45
	NaK	760		über 760°C	45
	K		870	über 870°C	45
321 SS	Na		1020	über 1020°C	45
	K		982	über 982°C	45
Ni	NaK	900		über 900°C	10, 44
Inconel (13 Cr, 6,5 Fe)	Na		1020	über 1020°C	45
	NaK	900		über 900°C	10, 44
	K		982	über 982°C	45

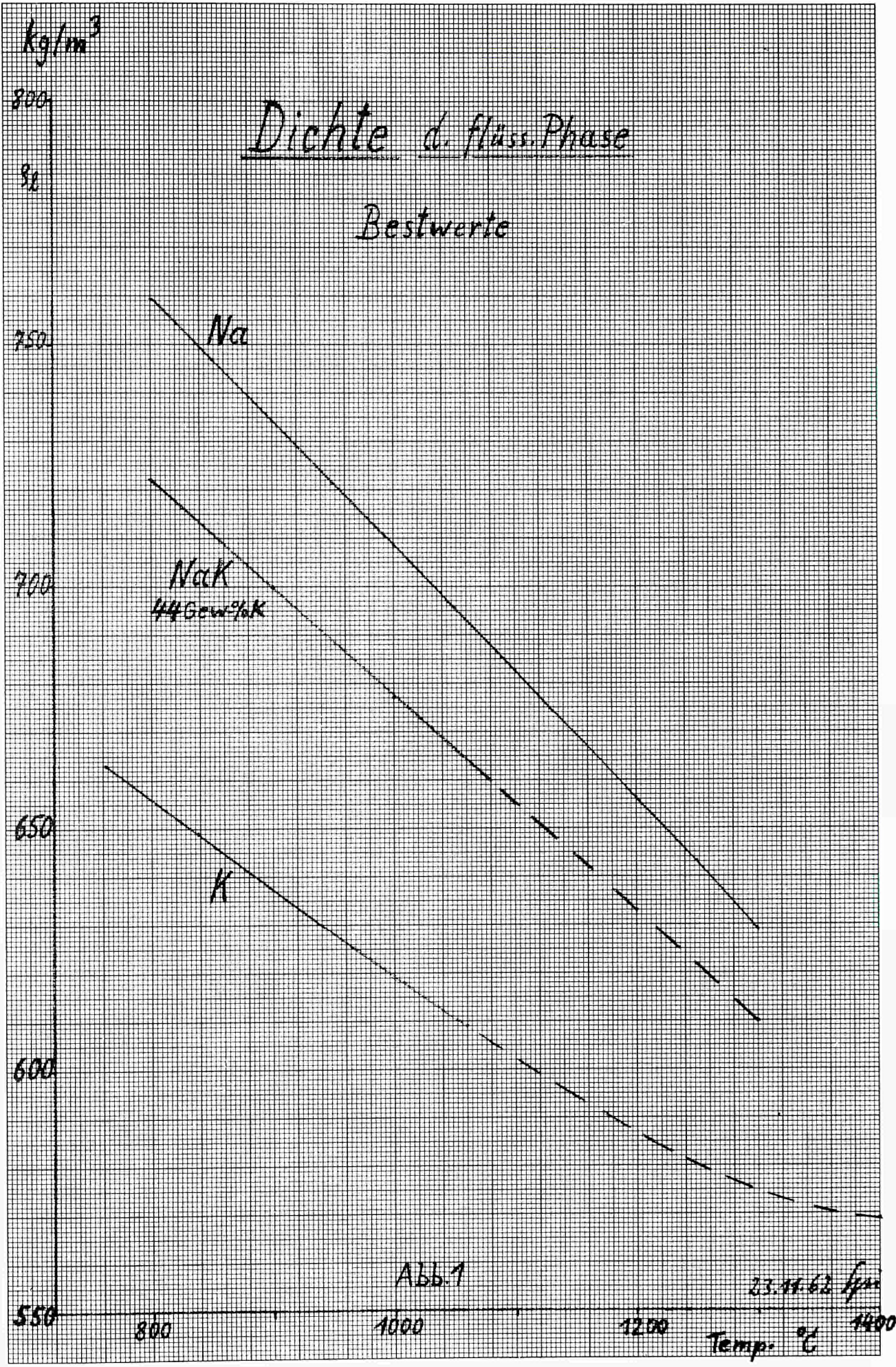
Nichrome (15 Cr, 25 Fe)	NaK	900		über 900°C	10, 44
Monel (30 Cu)	NaK	600	800	über 800°C	10, 44
Hastelloy A, B, C	NaK	900		über 900°C	10, 44, 45
Hastelloy N	NaK	(816)	816	über 816°C	45
Hastelloy X	K	900 (Kapsel)	982	über 982°C	45
	K	732 (Loop)			
Cr	NaK	900		über 900°C	10, 44
Co	NaK	900		über 900°C	10
Haynes 25 L-605	Na		1020	über 1020°C	45
	NaK	900		über 900°C	10, 44
	K	1010		über 1010°C	45
Nb, Cb	NaK	900	1093 (Kapsel) 982 (Loop)	über 900°C	10, 44
	K	— bei hohen Fl.-und Dampf-Geschw.		über 1093°C	45
	K			über 982°C	45
Cb- 1 % Zr	Na	1200 (Kapsel)	1150 (Kapsel) 982 (Loop)	über 1200°C	45
	K	— bei hohen Fl. -und Dampf-Geschw.		über 1150°C	45
Mo	Na		1020 (Loop)		45
	Na		1500	über 1500°C	44
	NaK	940		über 940°C	10, 44
	K		982 (Loop)	über 982°C	45

Bei dieser einfachen Aufstellung kommt Mo relativ zu schlecht heraus. Der Gewichtsverlust durch Korrosion liegt bei Cb 4-10 mal höher als bei Mo, Cb- 1% Zr ist etwas besser als Cb; dies gilt für K.

Mo-0,5 % Ti	K	982 (Kapsel)	1093 (Kapsel)	über 1093°C	45
Ta	NaK	900		über 900°C	10, 44
	K	— (Loop)	620 (Loop)	über 982°C	45
	K		970 im Loop		45
Ti	NaK	600	nicht mehr zulässig	über 900°C	10, 44
			900		
V	NaK	500		über 500°C	10
Wo	NaK	900		über 900°C	10, 44
	K		538 (Kapsel)	über 538°C	45
Zr	NaK	610		über 610°C	10, 44
Cu, elektrolyt	NaK	300	400	über 900°C	10
Al-Bronze (5-8 % Al)	NaK	600		über 600°C	10, 44
Be-Bronze (2 % Be)	NaK	600		über 600°C	10, 44
Cu mit 20-30 % Ni	NaK	600	760	über 760°C	10
Be	NaK	600	900	über 900°C	10, 44
Pt	NaK	—	—	unter 500°C	10, 44

Au	NaK	—	—	unter 160°C	10, 44
Ag	NaK	—	—	unter 160°C	10, 44
Al ₂ O ₃ dicht gebrannt	NaK	500	800	über 800°C	10, 44
	K	538		über 538°C	45
Synth. Sapphire	Na		900	über 900°C	44
MgO	NaK	220	660	zwischen 660-800°C	10, 44
MgO m. 12 % Poren	Na		940	über 940°C	44
MgO, Einkristall	Na	925		über 925°C	44
MgO· 3,5 Al ₂ O ₃ Synth. Spinel	Na	löst sich bei 925°C restlos!			
BeO (sehr dicht)	NaK	800		über 800°C	10, 44
	K	538		über 538°C	45
Ti- und Zr-Oxyd rein und dicht gebrannt	NaK	werden nicht angegriffen.			10
Zr-Oxyd, 23 % Poren	Na	zerstört bei 890°C.			44
Th-Oxyd	Na	925		über 925°C	44
Wo-, Ti-, Cr-Karbid mit Ni oder Co gebunden	Na	540	900	über 900°C	10

Si-Karbid-Einkristall	Na		900	über 900°C	44
Mo-Disilizid	Na		900	über 900°C	44
Porzellan	NaK	300		über 300°C	44
Pyrex-Glas	NaK	250	460	über 460°C	10, 44
Quarz, geschmolzen	NaK	300		über 300°C	44
Graphit, sehr dicht	Na	800		über 900°C	10, 44
	K	600			44
Mica, heiß gepreßt: schon bei 500°C zerstört.					10



Dichte d. ges. Dampfes

Bestwerte

kg/m³

8
7
6
5
4
3
2
1
0

800

1000

1200

Temp. °C

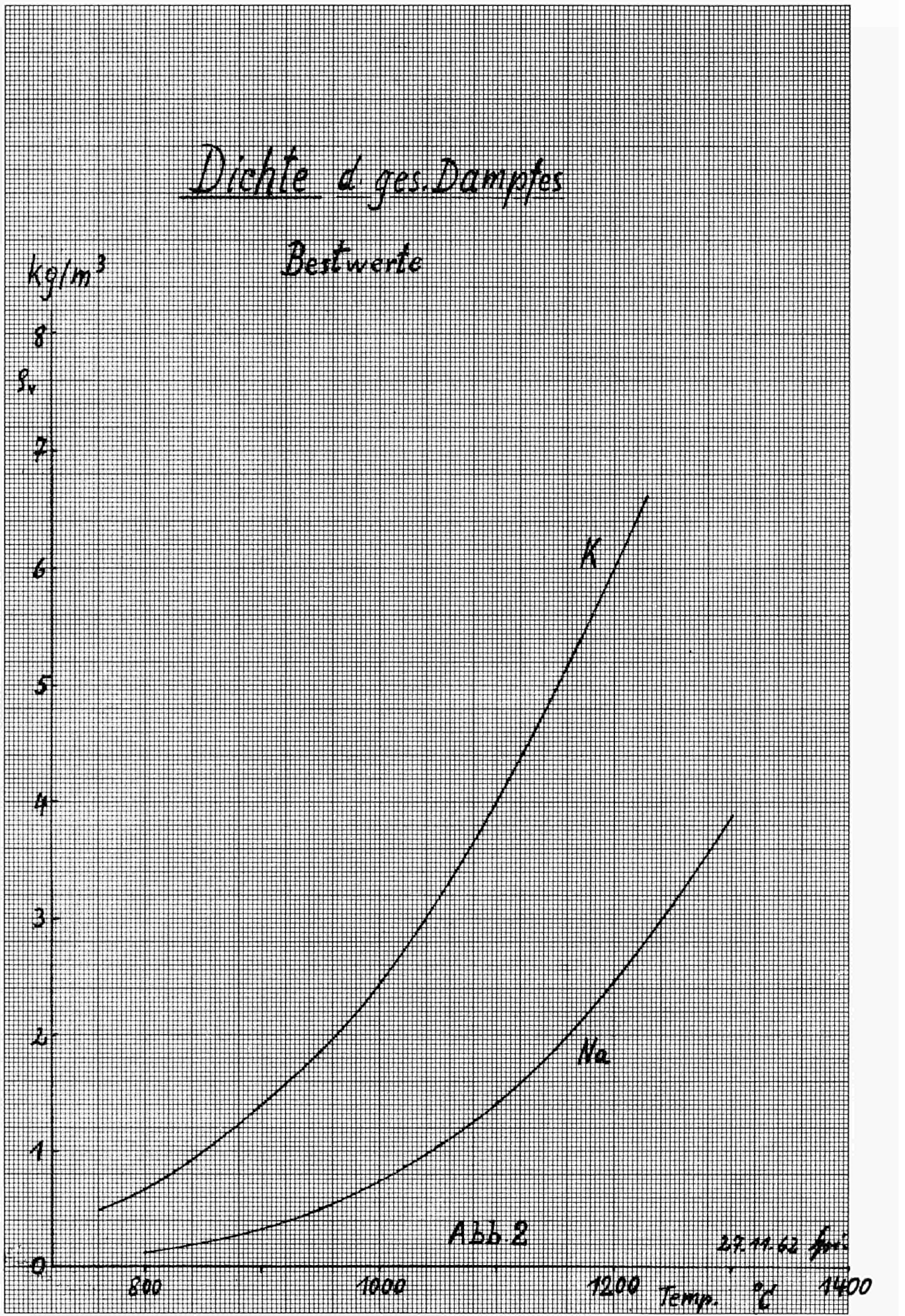
1400

K

Na

Abb. 2

27.11.62 fmi



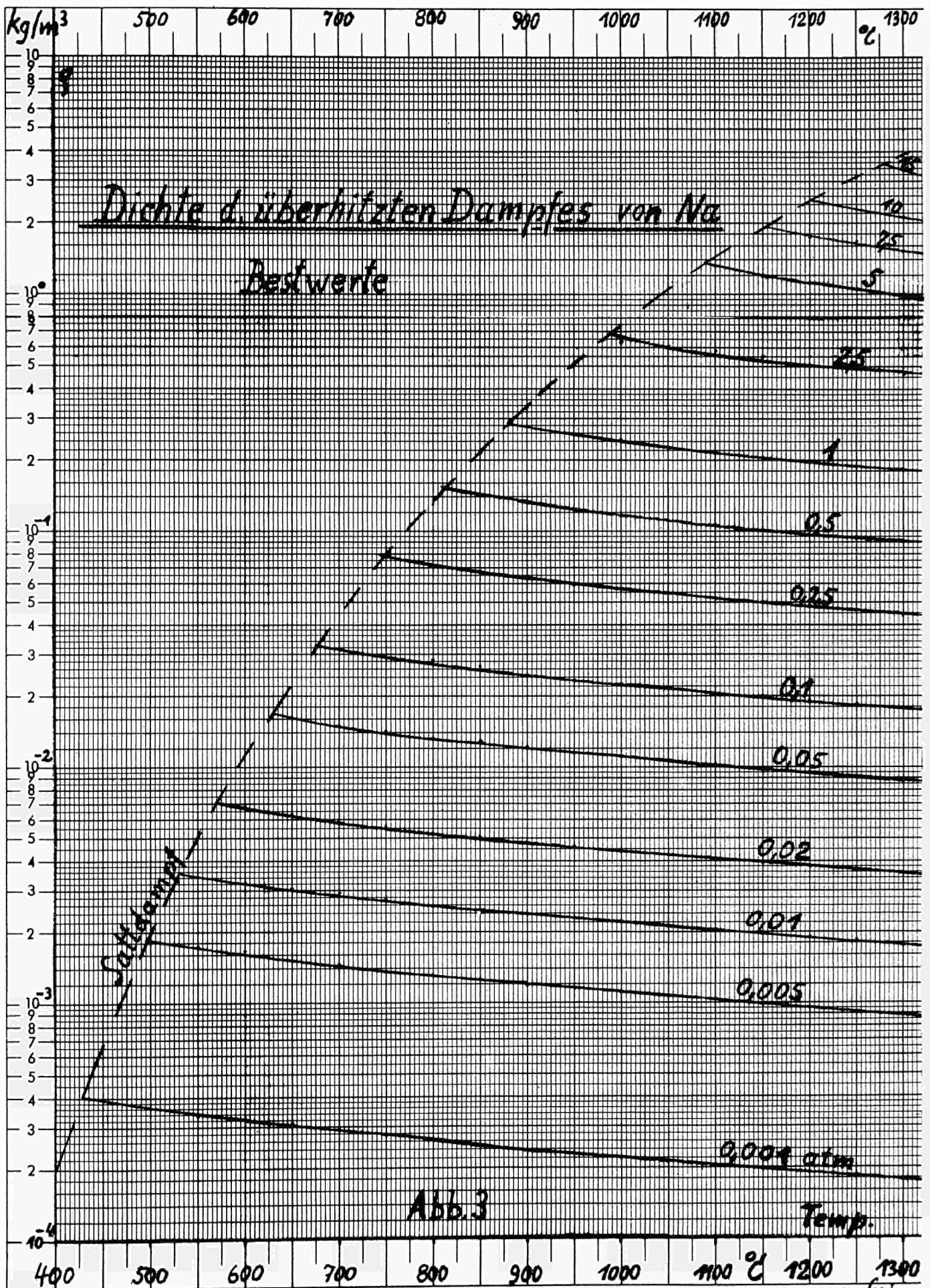


Abb. 3

24.1.63 h.m.

Spezif. Wärme

Bestwerte

c_p
J/kg $^{\circ}$ C

$\times 10^3$

1,5

1,4

1,3

1,2

1,1

1,0

0,9

0,8

0,7

0,6

0,5

Na₂

%K

44,8

53,6

NaK₂

78,3

K₂

Na₂

K₂

700

800

900

1000

1100

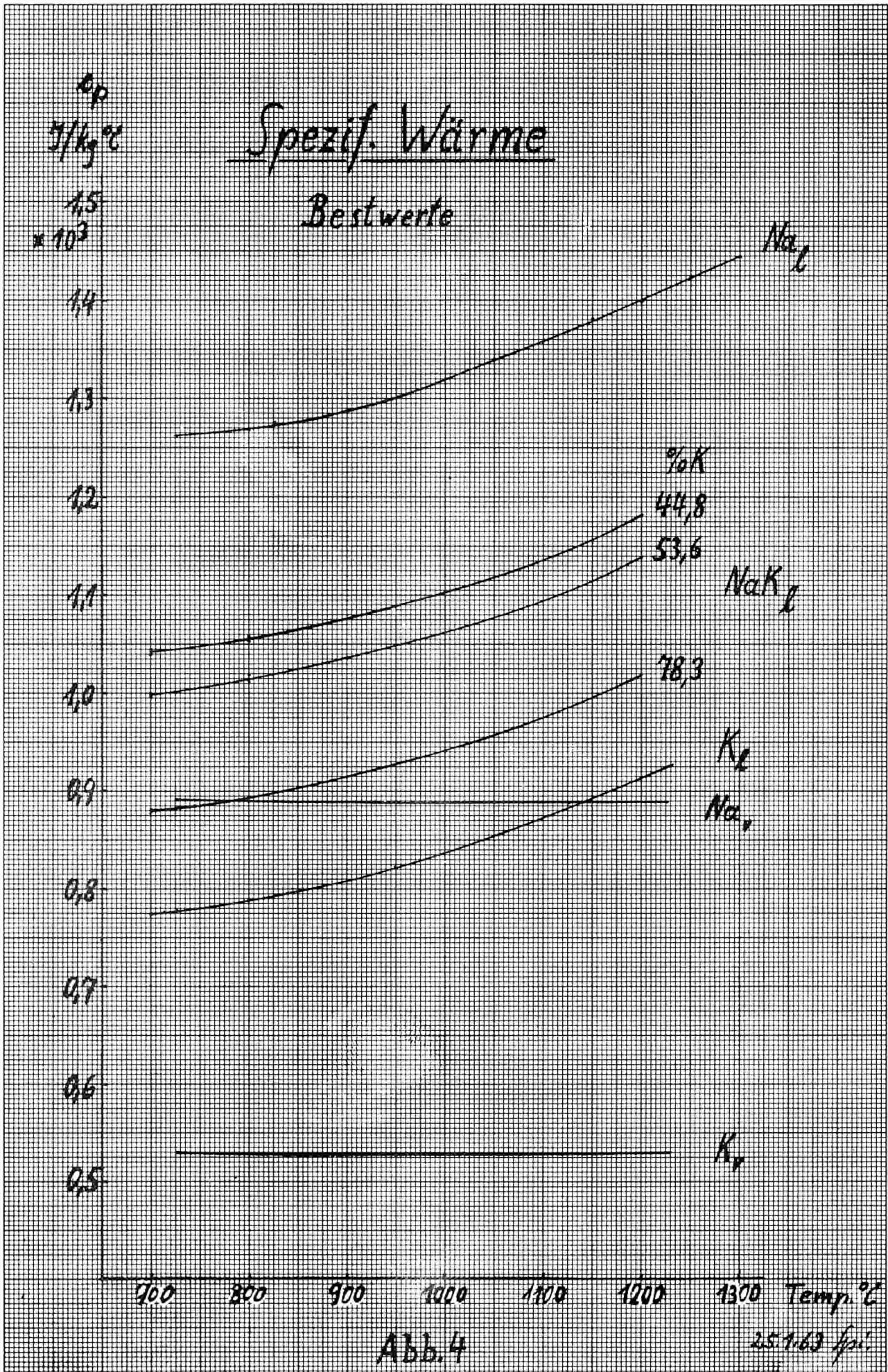
1200

1300

Temp. $^{\circ}$ C

Abb. 4

25.1.63 *hpi*



Wärmeleitfähigkeit

Bestwerte

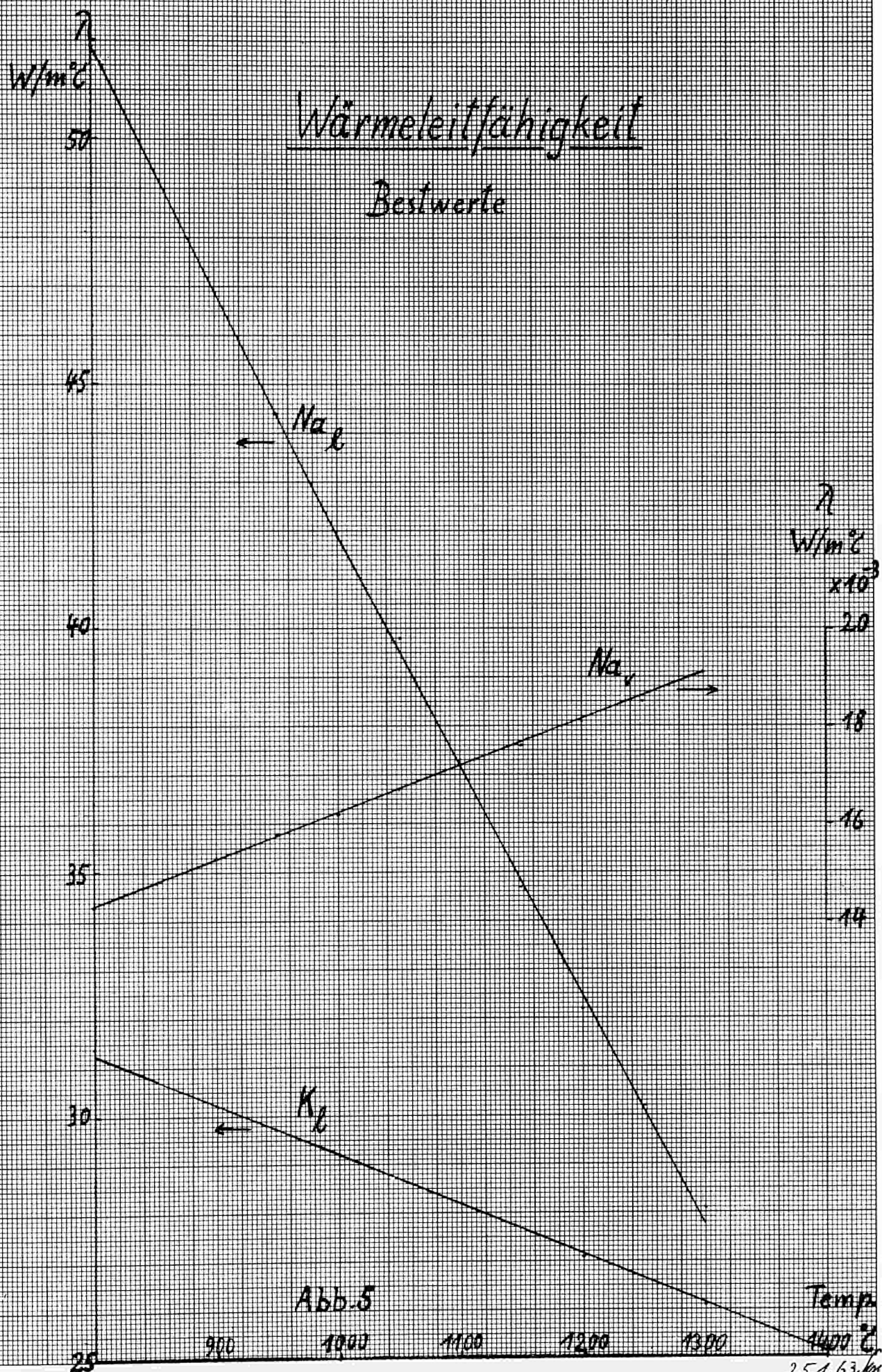
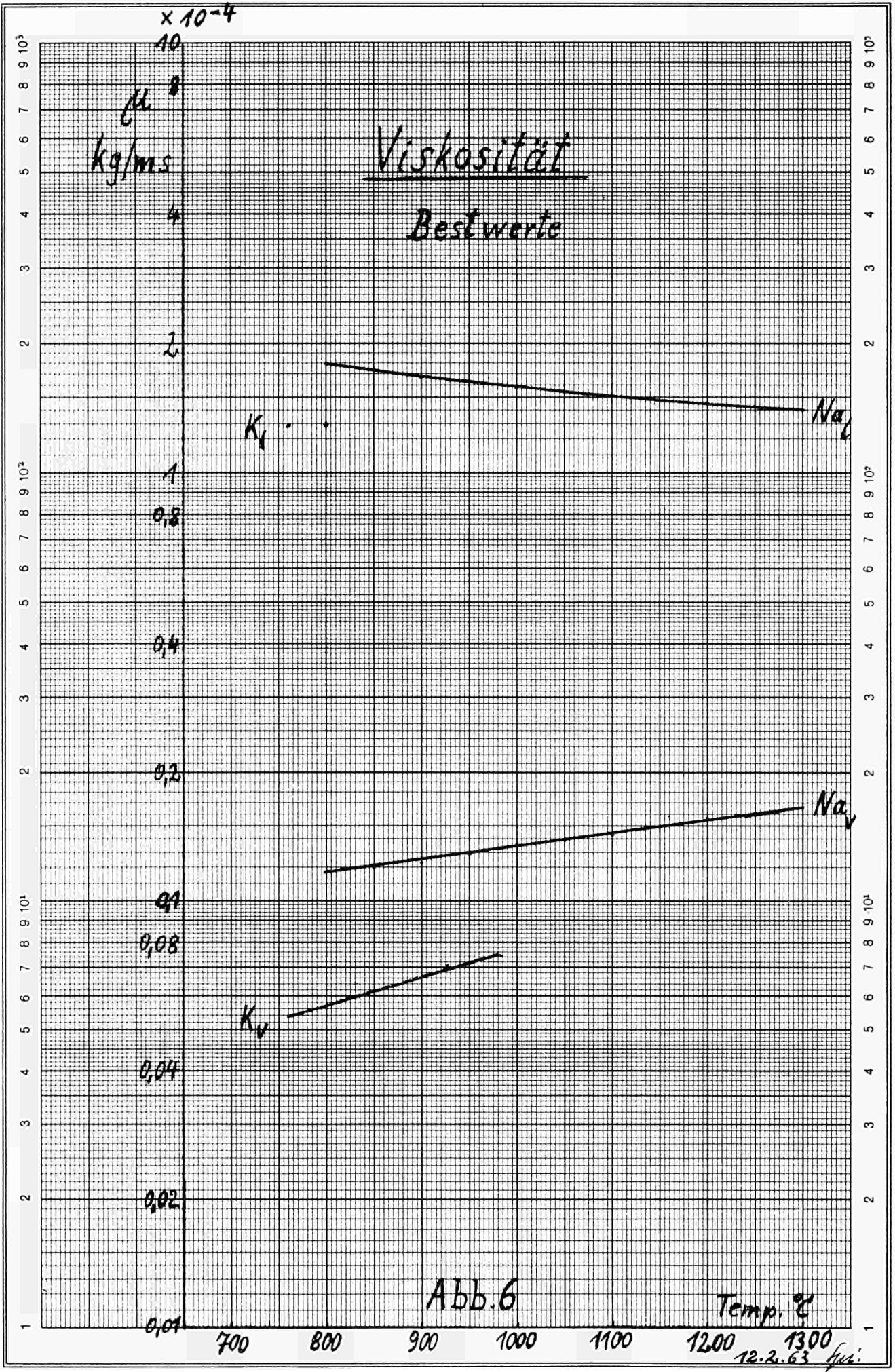


Abb. 5

25.1.63/jr.



Oberflächenspannung

Bestwerte

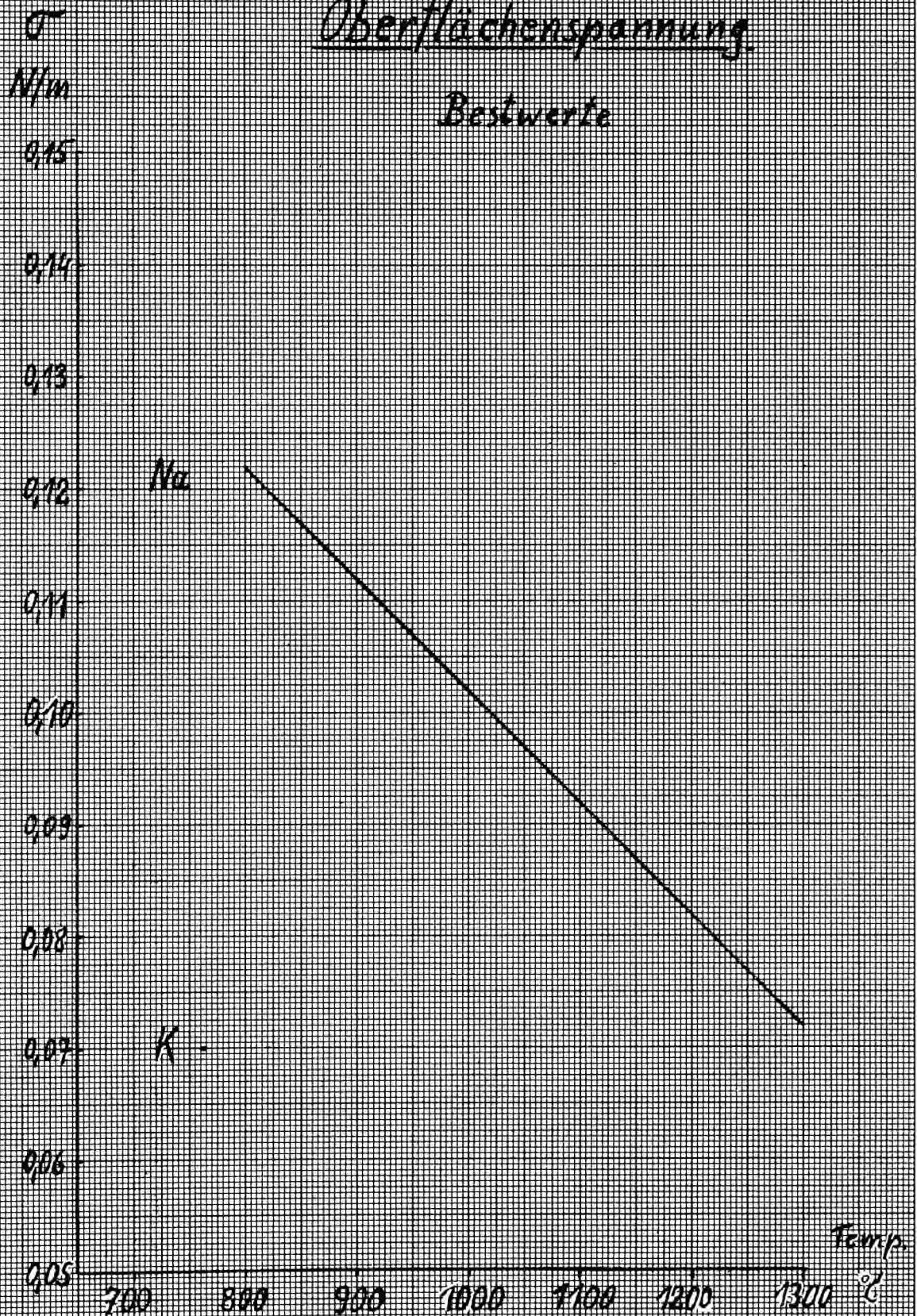
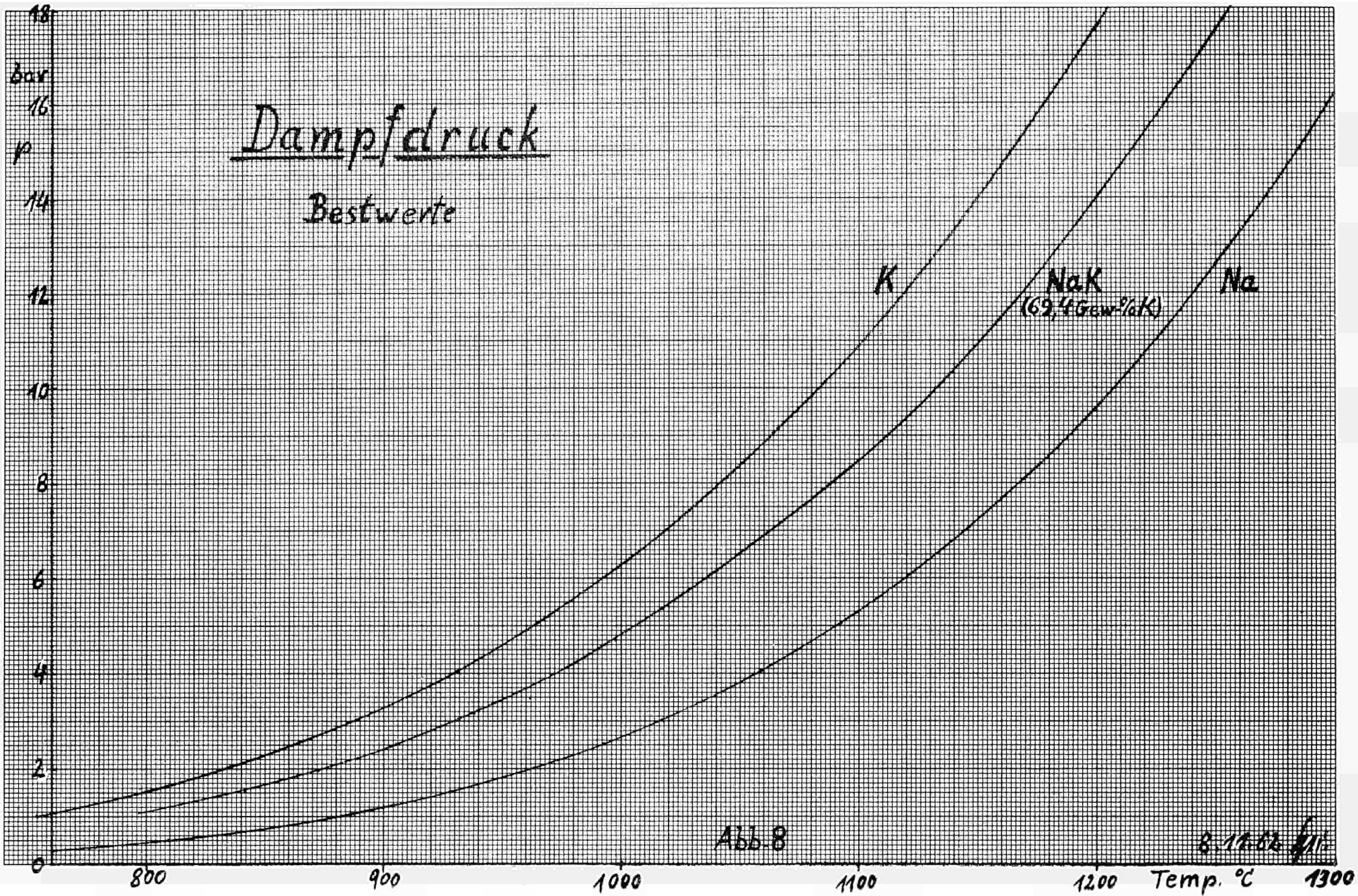
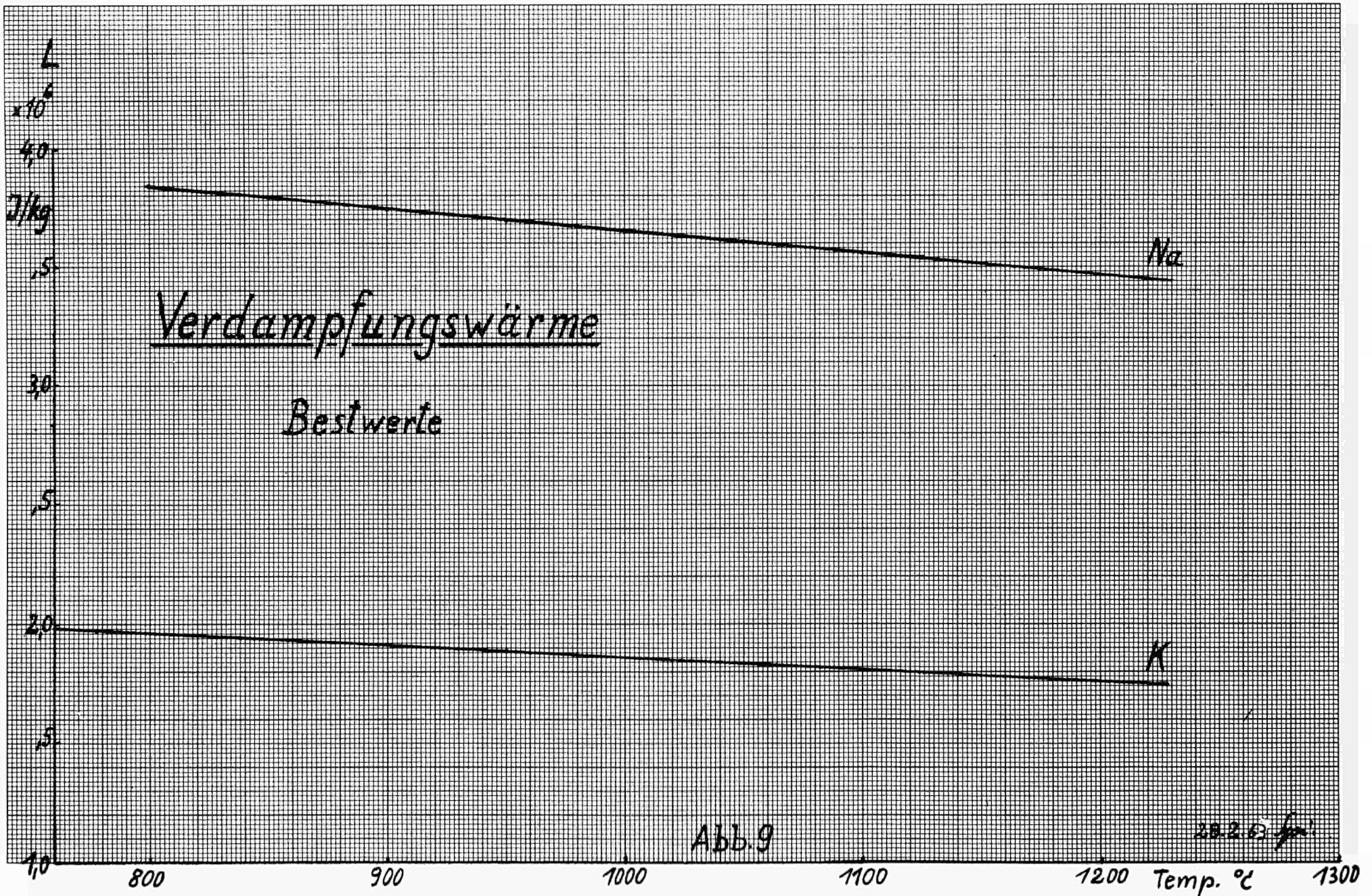
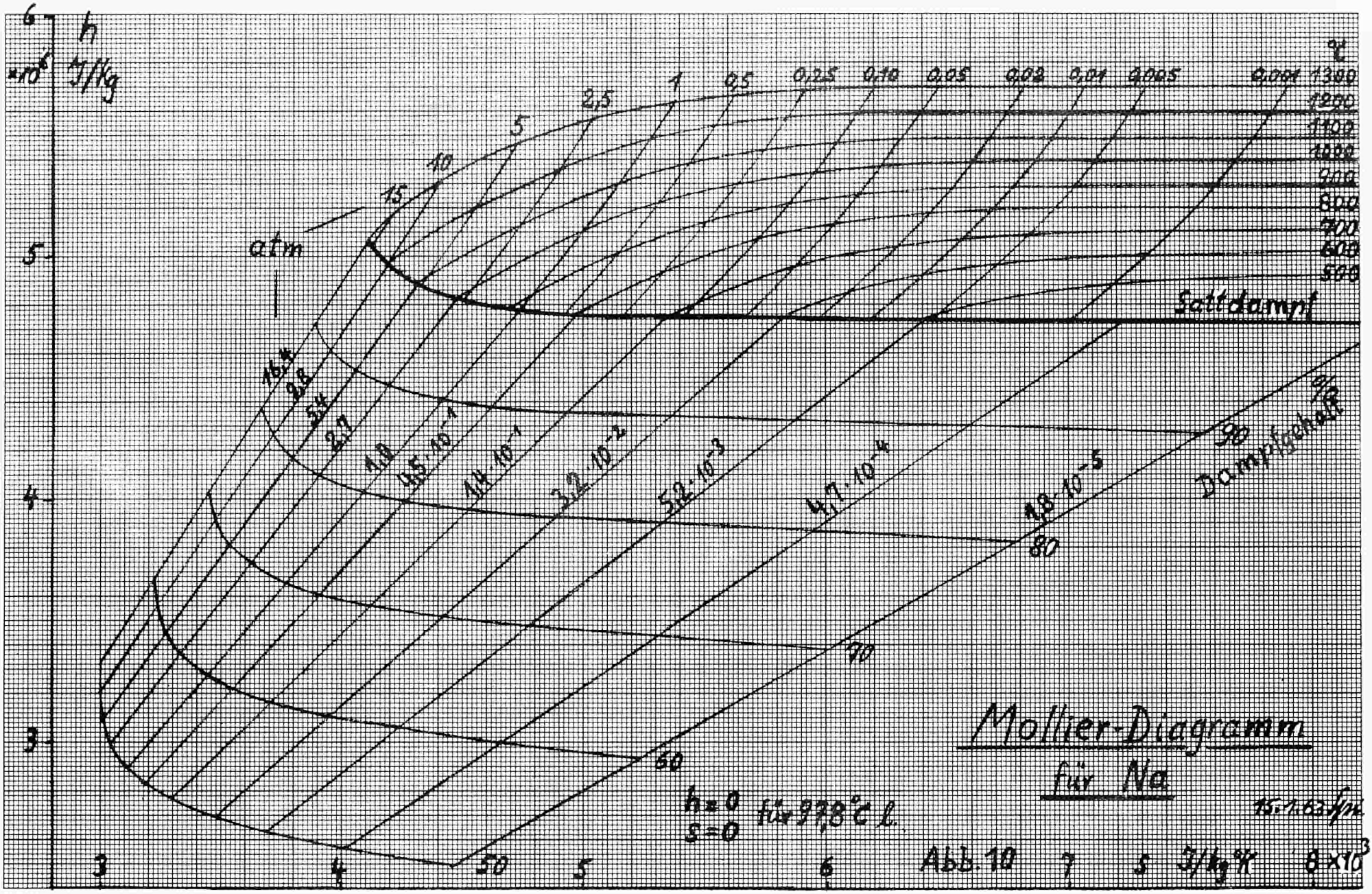


Abb. 7

13.2.63/jm







Mollier-Diagramm

für Na

$h=0$ für 99.8°C
 $s=0$

15.7163 kJ/m^3

Abb. 10 s $\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$ $\times 10^3$

CDNA00357DEC