

Sinterkörper aus Eisen*.

Von

G. F. Hüttig und A. Vidmajer.

Aus den Instituten für Anorganische und Physikalische Chemie der Technischen Hochschule Graz und den Laboratorien des Metallwerkes Plansee, Reutte/Tirol.

Mit 6 Abbildungen.

(Eingelangt am 18. Febr. 1952. Vorgelegt in der Sitzung am 28. Febr. 1952.)

1. Fragestellung.

Das die klassische Chemie beherrschende Stoffgesetz besagt, daß ein kompakter, aus einer einzigen Atom- oder Molekülart aufgebauter Stoff unter gegebenen äußeren Verhältnissen eine von der Natur festgelegte Kombination von Eigenschaften darstellt, so daß bei genauer zahlenmäßiger Kenntnis *einer* einzigen Eigenschaft *alle* anderen Eigenschaften damit festgelegt sind. Anders bei den Sinterkörpern. Auch bei chemisch identischen Gebilden mit dem gleichen Raumerfüllungsgrad können die einzelnen Eigenschaften je nach der Charakteristik der Teilchen und ihrer Lagerung innerhalb weiter Grenzen variiert werden. Daraus ergeben sich die allgemeinen Fragen: 1. In welchen Grenzen können die einzelnen Eigenschaften variiert werden? 2. Wenn für eine bestimmte Eigenschaft ein bestimmter Wert realisiert wird, inwieweit sind dadurch auch die Werte für die anderen Eigenschaften festgelegt?

Die vorliegende Arbeit hat es sich zur Aufgabe gemacht, ein möglichst planmäßiges und zuverlässiges Beobachtungsmaterial zu dieser Problemstellung zu bringen. Ausgangsmaterial waren verschiedene Siebfractionen eines Hametag-Eisenpulvers, mit welchem Reihenversuche so durchgeführt wurden, daß der Preßdruck und die Sintertemperatur als Variable erscheinen. An den nach dem Abkühlen auf Zimmertemperatur resultierenden Sinterkörpern wurden die Dichte, die elektrische Leitfähigkeit, die Härte und die Zerreißfestigkeit gemessen¹.

* Herrn Prof. Dr. A. Skrabal zum 75. Geburtstag gewidmet.

2. Ausgangsmaterialien.

Für die Herstellung sämtlicher Sinterkörper wurde frisch reduziertes Hametag-Eisenpulver verwendet. Die chemische Analyse ergab einen Gehalt von 0,020% Kohlenstoff und 0,50% Mangan. Die Ergebnisse der Siebanalyse sind in der Tabelle 1, Kolonne 2 („Gesamtpulver“), aufgenommen. Die mikroskopische Untersuchung zeigt die für Hametag-Eisenpulver charakteristische tellerartige Form der Teilchen. Durch Sieben wurde das Pulver in zwei Fraktionen zerlegt, von denen das „feine Pulver“ die Teilchen mit einem Durchmesser kleiner als $1,5 \cdot 10^{-2}$ cm, das „grobe Pulver“ die Teilchen mit einem größeren Durchmesser enthielt. Die Ergebnisse der Siebanalyse (Mittelwerte aus 3 Bestimmungen) dieser beiden Siebfraktionen sind in der Tabelle 1 in den Kolonnen 3 und 4 aufgenommen. Für die Herstellung der Sinterkörper wurde jede Siebfraktion für sich gesondert verwendet.

Tabelle 1. Ergebnisse der Siebanalyse der Ausgangspulver.

1	2	3	4
Korndurchmesser (mm)	Gesamtpulver (%)	Feines Pulver (%)	Grobes Pulver (%)
> 0,40	Spuren	—	—
0,40—0,30	5	—	Spuren
0,30—0,20	35	Spuren	42,5
0,20—0,15	25	15	49
0,15—0,10	20	58	7,5
0,10—0,06	5,5	23	0,5
< 0,06	6	3,5	—
Summe	96,5 ²	99,5 ²	99,5 ²
Füllvolumen (ccm/100 g) ..	42	48	43

Die Pulver wurden unter einem Druck von 1 bzw. 2, 4 und 6 Tonnen/qcm in die Form eines hantelförmigen Flachzerreistabes gepreßt. Die Gesamtlänge desselben beträgt 10 cm und die Breite im mittleren Teil 1 cm; es wurde jeweils eine solche Pulvermenge gepreßt, daß der hierbei resultierende Preßling eine Höhe von 0,5 cm hatte. Als Preßwerkzeug wurde eine gefederte Schwebemantelmatrize mit einem bei dem Pressen feststehenden Unterstempel verwendet. Dieser Unterstempel diente nach der Pressung als Auswerfer des fertigen Preßlings. Bei dem Pressen ist auf die Einhaltung einer gleichmäßigen Predauer zu achten. Außerdem darf der Preßstempel (Oberstempel) nicht auf das zu pressende Gut aufhmmern, sondern muß langsam in die Matrize eintauchen und gleichmäßig im Preßdruck ansteigend die gewünschte obere Grenze des Preßdruckes erreichen. Stufenweises oder stoweises Ansteigen des Preßdruckes hat eine Schieferung des Preßlings zur Folge.

Die Sinterung der Preßlinge erfolgte bei fünf verschiedenen Temperaturen, und zwar bei 700, 850, 1000, 1150 und 1260° C. Die Sinterdauer betrug für

¹ Der vorliegenden auszugsweisen Wiedergabe liegt die ausführliche Darstellung bei A. Vidmajer, Dissertation, Technische Hochschule Graz (1951), zugrunde.

² Rest auf 100% ist Verstaubungsverlust.

alle Proben *drei Stunden*. Als Sinterofen wurde der in der Pulvermetallurgie gebräuchliche, mit einem Molybdänleiter beheizte Durchsatzofen verwendet. Eine Beschreibung der Konstruktion und Wirkungsweise geben *R. Kieffer* und *B. Natter*³. Die angegebene Sinterdauer bezieht sich auf die Zeit, welche der Sinterling in der angenähert temperaturkonstanten Ofenzone verweilte, wohingegen die Aufheizungs- und Abkühlungszeit hierin nicht eingerechnet ist. Die Sinterung erfolgte so, daß je 30 Parallelproben in ein Eisenschiffchen mit den Abmessungen $32 \times 10 \times 4$ cm in Aluminiumoxyd so eingebettet wurden, daß sich die Preßlinge nicht unmittelbar berührten.

Diese Schiffchen wurden hierauf mit einem etwas größeren Eisenschiffchen überdeckt und das ganze in ein Graphitschiffchen gestellt, dessen freigebliebener Raum gleichfalls mit Aluminiumoxyd ausgefüllt wurde. Alle Sinterungen wurden in einem reinen getrockneten Wasserstoffstrom vorgenommen (Restwassergehalt < 1 mg/Liter).

3. Untersuchungsmethoden.

Die Bestimmung der *Dichte* ($= D$) erfolgte an Sinterlingen, die mit einer sehr dünnen Paraffinschicht überzogen waren. Bei den in der Tabelle 2 aufgenommenen Dichtewerten ist der auf das Paraffin entfallende Anteil eliminiert.

Die Messung der spezifischen *elektrischen Leitfähigkeit* ($= L$) erfolgte so, daß an dem schlanken Teil des Zerreißstabes der Spannungsabfall über eine bestimmte Länge mit einem hochempfindlichen Drehspulinstrument gemessen wurde. Des ferneren wurde der Querschnitt des Sinterlings mit einer Tastuhr genau ausgemessen.

Die Bestimmung der *Härte* ($= H_v$) erfolgte mittels eines in der Industrie üblichen Apparates⁴ nach der Methode von *Vickers*. Für die Härtemessung herangezogen wurde nur der mittlere schlanke Teil der Probekörper. Um die Ränder der Eindrücke scharf zu erhalten, wurden die für die Härtebestimmung vorgesehenen Prüflinge an den Preßflächen angeschliffen.

Die Prüfung der *Zerreißfestigkeit* ($= Z$) erfolgte auch in einer in der Technik gebräuchlichen Maschine⁵. Um genaue und ausreichende reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist es erforderlich, stets dieselbe Hubgeschwindigkeit der Zerreißmaschine einzustellen. Die in der Tabelle 2 aufgenommenen *Z*-Werte beziehen sich auf den tatsächlich beobachteten Querschnitt von $1 \cdot 0,5$ qm.

4. Ergebnisse der Messungen

sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Alle daselbst angegebenen Zahlen stellen Mittelwerte aus einer größeren Anzahl von Parallelversuchen dar. Die mittleren Abweichungen vom Mittel betragen bei der Dichte $\pm 1\%$, bei der elektrischen Leitfähigkeit $\pm 5\%$, bei der Härte $\pm 3\%$ und bei der Zerreißfestigkeit $\pm 2\%$ des in der Tabelle aufgenommenen Wertes. Für die Schwankungen in den beobachteten Werten sind in erster Reihe die Preßdruckschwankungen bei der Herstellung der Preßlinge verantwortlich.

³ *R. Kieffer* und *B. Natter*, Radex-Rundschau 1948, 49.

⁴ „Dia-Testor“, Bauart Poldihütte; Ott-Wolpert-Werke, Ludwigshafen.

⁵ Losenhausen-Universalprüfmaschine; Losenhausenwerk, Düsseldorf-Grafenberg.

5. Auswertung.

In den folgenden Abb. 1 bis 6 sind die beobachteten Eigenschaftswerte (Tabelle 2) in einer solchen Weise in der Abhängigkeit von Preßdruck und Sintertemperatur dargestellt, daß sie einen Beitrag zur Beschreibung des Sinterverlaufes ergeben⁶.

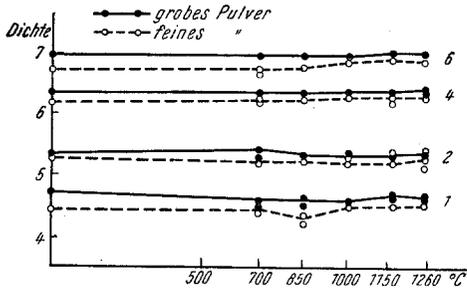


Abb. 1. Dichte.

In der Abb. 1 ist auf der Abszisse die Sintertemperatur und auf der Ordinate die Dichte aufgetragen. Die vier Kurvenpaare unterscheiden sich durch den an ihrem

Tabelle 2. Ergebnisse der Messungen.

	3 Stdn. gesintert bei ... °C	Preßdruck in t/qcm				
		1	2	4	6	
Feines Pulver > 0,06 mm < 0,15 mm	20	4,40	5,25	6,17	6,71	= D
		0,0018	0,0145	0,0503	0,151	= L
		14,0	23,7	51,5	81,4	= H _v
		—	60	80	90	= Z
	700	4,47	5,19	6,20	6,71	= D
		1,54	2,81	5,17	6,40	= L
		14,7	23,5	37,0	50,3	= H _v
		95	217	485	710	= Z
	850	4,30	5,30	6,25	6,78	= D
		2,17	3,66	5,64	6,70	= L
		11,5	19,1	35,8	53,6	= H _v
		168	315	653	883	= Z
	1000	4,54	5,26	6,26	6,88	= D
		2,31	3,62	5,21	6,57	= L
		13,3	20,7	36,5	55,8	= H _v
		195	390	680	1035	= Z
	1150	4,58	5,31	6,26	6,90	= D
		2,37	3,59	5,10	6,13	= L
		15,9	21,9	37,7	59,0	= H _v
		280	445	795	1190	= Z
	1260	4,62	5,37	6,33	6,86	= D
		2,34	3,57	4,87	5,73	= L
		17,4	26,6	42,7	62,8	= H _v
		303	498	920	1258	= Z

⁶ Die in dieser Beziehung schon vorliegenden Erkenntnisse können in dem Werk von R. Kieffer und W. Hotop, „Sintereisen und Sinterstahl“, Wien: Springer-Verlag, 1948, eingesehen werden.

Fortsetzung der Tabelle 2.

	3 Stdn. gesintert bei ... °C	Preßdruck in t/qcm				
		1	2	4	6	
Grobes Pulver > 0,15 mm < 0,35 mm	20	4,72	5,28	6,33	6,94	= D
		0,0015	0,0111	0,0666	0,163	= L
		11,2	18,5	48,4	78,1	= H _v
		—	—	—	88	= Z
	700	4,58	5,36	6,35	6,94	= D
		1,19	2,21	4,80	6,41	= L
		11,7	21,4	32,7	48,8	= H _v
		85	120	320	535	= Z
	850	4,59	5,33	6,33	6,96	= D
		2,07	3,24	5,52	6,91	= L
		11,5	19,8	34,8	49,8	= H _v
		119	250	538	790	= Z
	1000	4,62	5,32	6,34	6,92	= D
		2,06	3,18	5,40	6,54	= L
		11,9	21,9	36,4	50,3	= H _v
		155	273	615	810	= Z
	1150	4,69	5,37	6,35	6,96	= D
		2,11	3,07	4,78	6,12	= L
		17,4	28,6	40,9	53,4	= H _v
		240	333	710	1020	= Z
	1260	4,62	5,26	6,39	7,00	= D
		2,10	3,18	4,63	5,92	= L
		21,5	23,9	39,7	61,3	= H _v
		255	410	740	1060	= Z

rechten Ende verzeichneten Preßdruck (t/qcm). Bei allen Figuren beziehen sich die voll ausgezogenen Kurven auf das „grobe“ und die gestrichelt gezeichneten auf das „feine“ Pulver als Ausgangsmaterial. — Die Dichte wächst mit steigendem Preßdruck stark an. Während beispielsweise das grobe Pulver, das mit 1 t gepreßt nur eine Dichte von 4,72 hat, zeigt dasselbe Pulver nach einem Pressen mit 6 t bereits eine Dichte von 6,94. Dieser Wert kommt demjenigen des kompakten Eisens ($D = 7,86$) bereits recht nahe. Bei gleicher Druckbehandlung zeigt das gepreßte grobe Pulver stets etwas höhere Dichtewerte als das feine Pulver. Bemerkenswert ist es, daß die Dichte, welche das Pulver bei dem Pressen bei Zimmertemperatur erhält, bei darauffolgendem Erhitzen (Sintern) bis hinauf zu Temperaturen von 1260° C praktisch unverändert bleibt.

In der gleichen Weise, wie in der Abb. 1 die Ergebnisse der Dichtemessungen bildlich dargestellt sind, bringt die Abb. 2 die Meßergebnisse bezüglich der *elektrischen Leitfähigkeiten*. Auffallend ist es, daß der Preßdruck von maßgeblichem Einfluß auf die Höhe des Leitfähigkeits-

wertes ist, daß aber dieser Preßeffekt durch die Sinterung gleichsam erst entwickelt werden muß. Ferner liegt die Leitfähigkeit der aus dem feinen Pulver hergestellten Proben durchwegs über der des groben Pulvers; mit steigendem Preßdruck verkleinert sich dieser Unterschied etwas. Auffallend ist ferner der Leitfähigkeitsverlauf oberhalb 850° C. Für die mit 4 und 6 t/qcm gepreßten Pulver durchläuft die Leitfähigkeit bei den bei 850° gesinterten Proben ein Maximum. Die bei 1 und 2 t/qcm

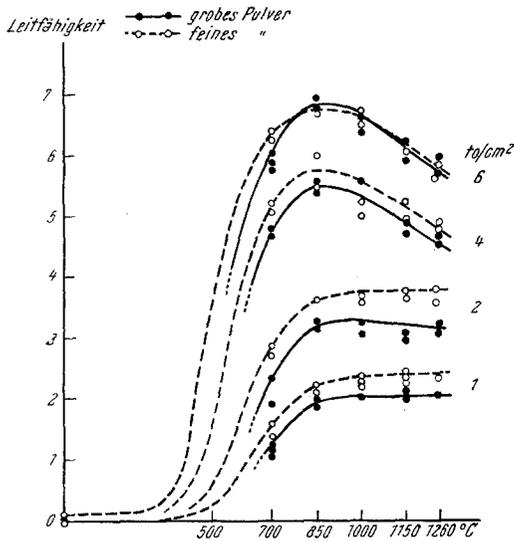


Abb. 2. Spezifische elektrische Leitfähigkeit in der Abhängigkeit von der Sintertemperatur.

hergestellten Preßlinge zeigen für diese Sinter-temperatur einen Knick in der Kurve des Leitfähigkeitsverlaufes; oberhalb dieser Sinter-temperatur steigt die Leitfähigkeit dieser niedrig verdichteten Proben nicht mehr weiter an. Da die den Maxima bzw. den Wendepunkten zugeordnete Sinter-temperatur in der Nähe der Temperatur der β/γ -Umwandlung des Eisens liegt, so wäre es naheliegend, diesen Effekt mit dadurch bedingten irreversiblen Lagerungsänderungen in Zusammenhang zu bringen.

Wahrscheinlicher ist es jedoch, daß bei dieser Temperatur ein Prozeß einer schwachen Aufkohlung, wie er durch die Anwesenheit des Kohleschiffchens und der Wasserstoffatmosphäre möglich ist, einsetzt. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde eine Reihe von Kohlenstoffbestimmungen durchgeführt, deren Ergebnisse in der Tabelle 3 aufgenommen sind. Man sieht, daß das Absinken bzw. die Verzögerung in dem Temperaturanstieg der Leitfähigkeiten symbat mit einer schwachen Aufkohlung vor sich geht. Die Beziehungen zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Kohlenstoffgehalt des Eisens sind bekannt⁷. In unserem Fall ist zu bedenken, daß die analytisch ermittelten Kohlenstoffmengen Mittelwerte darstellen, daß jedoch die den elektrischen Leitfähigkeitswert in erster Reihe bestimmenden „Brücken“ als aktivste Teile des Sinterlings der Aufkohlung in einem höheren Maße unterliegen werden, als dies der Mittelwert anzeigt.

⁷ E. Maurer und F. Stäblein, Z. anorg. allg. Chem. 137, 115 (1924).

Die Abhängigkeiten der *Zerreißfestigkeit* von der Sintertemperatur und dem Preßdruck sind in den Abb. 3 bzw. 4 dargestellt. Die Zerreißfestigkeit steigt mit der Sintertemperatur nach einer ähnlichen Funktion wie die elektrische Leitfähigkeit an (vgl. die Abb. 3 und 2), nur daß die bei höheren Temperaturen auftretenden Aufkohlungserscheinungen das Bild der Zerreißfestigkeit weniger verändern als das der elektrischen Leitfähigkeit. Mit zunehmendem Preßdruck steigt im allgemeinen die Zerreißfestigkeit streng linear an. Bei den gepreßten und nachher nicht gesinterten Proben ist die Zerreißfestigkeit sehr klein. beraschend war das Ergebnis, daß die vor dem Zerreißen mit Paraffin überzogenen Sinterlinge eine merklich niedrigere Zerreißfestigkeit hatten als die paraffinfreien Probekörper. Die Bruchdehnung war sehr gering; sie betrug bei den festesten Proben etwa 2%.

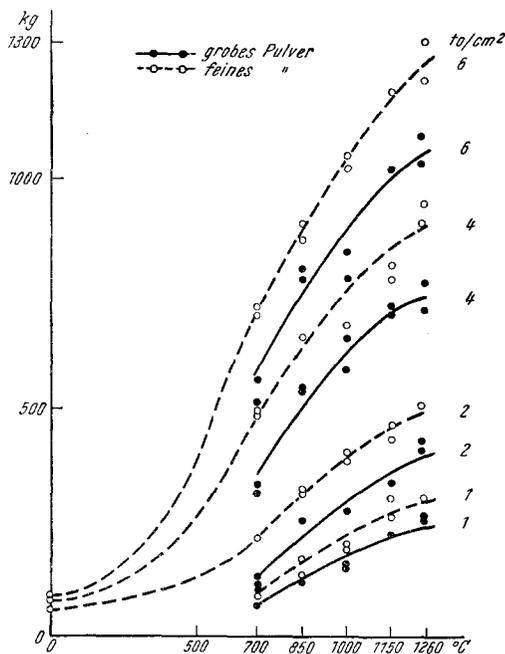


Abb. 3. Die Zerreißfestigkeit in Abhängigkeit von der Sintertemperatur.

In den Abb. 5 und 6 sind die Ergebnisse der *Hrtmessungen* aufgenommen. Die Härte ist sowohl eine ausgeprägte Funktion des Preßdruckes (und damit auch der Dichte bzw. Raumerfüllung) als auch der Sintertemperatur. Die Abhängigkeit von dem Preßdruck erweist sich unter den von uns ein-

Tabelle 3. Analytische Bestimmungen des Kohlenstoffs in den Sinterlingen.

Pulverart	Preßdruck t/qcm	3 Stdn. gesintert bei ... °C					
		20	700	850	1000	1150	1260
		Feines Pulver	1	0,02 0,02	0,02 0,03	0,05 0,04	0,10 0,12
Grobes Pulver	6	0,02 0,02	0,02 0,03	0,03 0,03	0,06 0,07	0,11 0,12	0,11 0,11

gehaltenen Versuchsbedingungen als nahezu linear (vgl. Abb. 6), wohingegen die Abhängigkeit von der Sintertemperatur komplexer Natur ist. In Übereinstimmung mit Untersuchungen von *W. Trzebiatowski*⁸ an Kupferpreßlingen kommt auch hier dem ungesinterten Material der höchste Härtewert zu. Mit steigender Sintertemperatur sinkt die Härte ab, durchläuft ein Minimum und steigt sodann wieder langsam an. Diese Erscheinung kann durch die Annahme erklärt werden, daß die

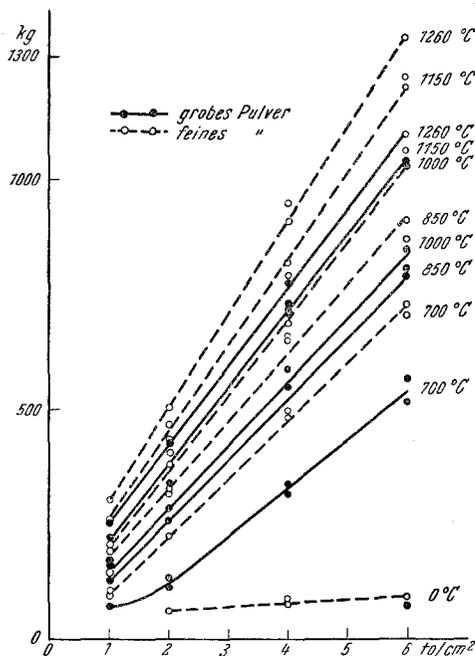


Abb. 4. Die Zerreißfestigkeit in Abhängigkeit von dem Preßdruck.

durch die Kaltverformung bewirkte, weit über dem regulischen Wert liegende Härte beim Erwärmen infolge Entspannung und Kristallerholung abnimmt, um dann bei einer bestimmten Temperatur mit dem verfestigenden Vorgang der Sinterung in Konkurrenz zu treten, welcher bei noch höheren Sintertemperaturen schließlich allein für den Härtewert bestimmend wird.

Auch die Korngröße ist von Einfluß auf die Härte. Nach *A. Smekal*⁹ erfolgt die Zerkleinerung immer an Gitterfehlstellen, so daß mit zunehmendem Zerteilungsgrad die Zahl der Fehlstellen im Korn abnimmt. Ein Preßling aus einem fehlerstellenarmen Material wird aber höhere

Härtewerte aufweisen als ein solcher aus fehlerstellenreichem. Daher auch die steigende Härte mit abnehmender Korngröße, wie dies aus den Abb. 5 und 6 deutlich zu ersehen ist.

In der Abb. 5 ist der Verlauf der Härte minima eingezeichnet. Die derzeitige Auslegung dieser Kurve geht dahin, daß man durch sie Aussagen über die untersten erforderlichen Heißpretemperaturen erhält. Dabei ist der Teil der Kurve, der eine positive Tangenten­neigung zur Abszisse aufweist, wirtschaftlich wenig sinnvoll, da dort die zur Erreichung eines Effektes notwendigen Zeiten sehr lang sein werden.

⁸ *W. Trzebiatowski*, Z. physik. Chem., Abt. B 24, 75 (1934).

⁹ *A. Smekal*, Handbuch der Physik, Bd. 24/2. 1933.

An dieser Stelle ist noch eine weitere Beobachtung vorzubringen: Es gibt einen Mindestdruck, der aufgewendet werden muß, um bearbeitbare (z. B. schleifbare) Preßlinge zu erhalten. Unterhalb dieses Verfestigungsgrades zerpulvert die Probe bei der Bearbeitung. Diese Erscheinung ist an das Auftreten von Kaltschweißstellen geknüpft. Auch diese Kaltschweißungen traten beim feinen Pulver schon bei niedrigeren Preßdrücken auf als beim groben. — Dieser Mindestpreßdruck lag bei den verwendeten Pulvern zwischen 2 und 3 t/qcm.

6. Lagerungskonstante¹⁰.

Für die Sinterkörper und andere geometrische, in gleicher Weise charakterisierte poröse Körper hat sich eine Gruppe von Eigenschaften abgrenzen lassen, die wir unter dem Namen „Leitfähigkeitseigenschaften“ zusammenfassen wollen. Zu diesen Eigenschaften zählen wir die elektrische (Gleichstrom), die magnetische (Permeabilität), die dielektrische und die thermische Leitfähigkeit sowie die Selbstdiffusion und die Zerreißfestigkeit. Ihr gemeinsames Merkmal ist es, daß ihre Wertangaben nur in Verbindung mit einem Vektor (der Richtung, in welcher der

angegebene Wert gilt) sinnvoll ist und daß sie alle untereinander durch eine gemeinsame Konstante ($k =$ „Lagerungskonstante“) ver-

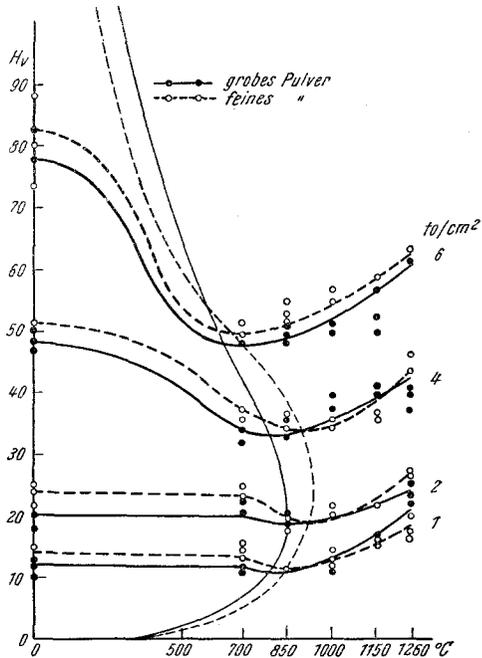


Abb. 5. Die Härten in Abhängigkeit von der Sinter Temperatur.

¹⁰ Mit der Ausdehnung des von *W. Doebke* [*Z. techn. Physik* **11**, **12** (1930)] geprägten Begriffes der Lagerungskonstante auf eine Gruppe von Eigenschaften und seine Anpassung auf Sinterkörper beschäftigten sich in den letzten Jahren die folgenden Arbeiten: *G. F. Hüttig*, *Angew. Chem.* **64**, **41** (1952); Abschn. 5. — *K. Torkar*, *Mh. Chem.* **82**, **689** (1951). — *K. Torkar*, *Powder Metallurgy Bulletin* **6**, **13** (1951). — *G. F. Hüttig*, *Powder Metallurgy Bulletin* **6**, **7** (1951). — In dem von *W. E. Kingston* herausgegebenen Sammelwerk „Fundamental Problems of Sintering Processes“, New York: McGraw-Hill Book Comp., 1951, die Beiträge von *W. E. Kingston* und *G. F. Hüttig* sowie von *G. F. Hüttig*, *K. Adlassnig* und *O. Foglar*. — *G. F. Hüttig* und *K. Torkar*, *Kolloid-Z.* **115**, **24** (1949).

knüpft und für den beobachteten Körper in der beobachteten Richtung auch dem Zahlenwerte nach eindeutig festgelegt sind. Diese Konstante ist formal durch die folgende Beziehung definiert:

$$k = \frac{(E/E_0)(1 - D/D_0)}{2(D/D_0 - E/E_0)}.$$

Hierin bedeutet D die Dichte des Sinterlings und D_0 die Dichte des gleichen Stoffes im kompakten Zustand, so daß also der Quotient D/D_0 als „Raumerfüllungsgrad“ anzusprechen ist. E bedeutet den Wert irgendeiner der Leitfähigkeitseigenschaften des Sinterlings und E_0 den Wert der gleichen Eigenschaft und des gleichen Stoffes im kompakten Zustand. Hierbei muß die Eigenschaft in einem so definierten Maß angegeben sein, daß es für das Vakuum den Wert Null und für den kompakten Stoff einen endlichen positiven Wert anzeigt; das ist beispielsweise bei den üblichen Angaben der elektrischen Leitfähigkeit in reziproken Ohm oder der Zerreißeigenschaft in kg/qcm ohnein der Fall.

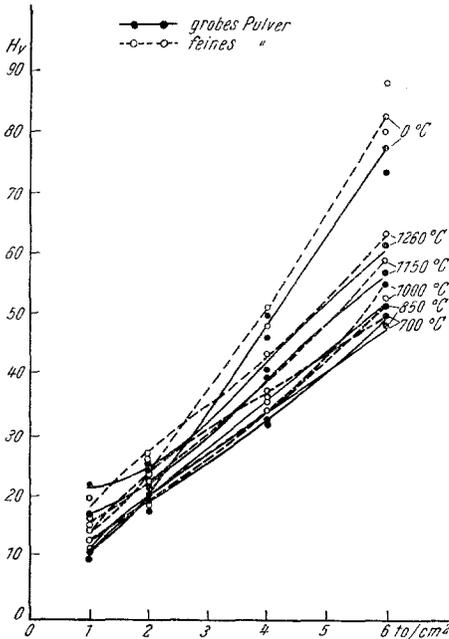


Abb. 6. Die Härten in Abhängigkeit von dem Preßdruck.

Die von uns aufgestellte Deduktion besagt also nichts weniger, als daß jede der angegebenen Leitfähigkeitseigenschaften, die für den gleichen Körper in der gleichen Richtung zutrifft, mit ihrem Wert in die obige Gleichung eingesetzt, immer den *identischen* Zahlenwert von k ergeben muß. In bezug auf ihre modellmäßige Deutung ist die Lagerungskonstante k so definiert, daß sie einerseits um so größer wird, je mehr die Orientierung der Poren des Sinterlings in der Stromrichtung liegt, um schließlich bei einer vollkommenen Parallelschaltung den Wert $k = \infty$ zu erreichen, während sie andererseits um so kleiner wird, je mehr die Orientierung der Poren senkrecht zur Stromrichtung liegt, um in dem Grenzfall der idealen Hintereinanderschaltung den Grenzwert $k = 0$ zu erreichen. Haben die in dem Sinterkörper statistisch verteilten Poren Kugelgestalt, so liegt k erfahrungsgemäß bei 0,3.

Die Zuständigkeit unserer Deduktionen ist an bestimmte Voraussetzungen geknüpft: Der Sinterling darf sich nur aus *einer* Atom- (oder Molekül-) Art aufbauen (also keine Fremdeinschlüsse oder Überzüge aus fremdem Material enthalten), die Masse muß die Leerräume allseitig umschließen, so daß sie als das Medium des Systems angesprochen werden kann, und es dürfen keine Verspannungen, insbesondere auch keine „Aktivierungen“ auftreten, die — wie beispielsweise eine übermäßige Kleinheit der Teilchen — zu einer Veränderung der dem kompakten Körper zukommenden Werte der „spezifischen“ Eigenschaften führen könnten.

Die Erfahrung lehrt, daß diese Voraussetzungen gut erfüllt sein können bei Metallsinterlingen, die im Wasserstoffstrom auf so hohe Temperaturen gebracht werden, wie sie bei der technischen Herstellung pulvermetallurgischer Erzeugnisse angewendet werden. Wo sich in den mit der gleichen Lagerungskonstante errechneten Eigenschaftswerten Diskrepanzen ergeben, vermag deren Diskussion zu einer Beurteilung der die Anomalie veranlassenden Ursachen führen. Dank der leichten Oxydierbarkeit und Aufkohlbarkeit des Eisens und seinem rund bei 900° C liegenden Umwandlungspunkt, dessen Durchschreiten wohl sicher den Wert der Lagerungskonstante verändert, neigt das Eisen wohl stärker als die meisten anderen sintertechnisch verwendeten Metalle zu solchen Anomalien; am geringsten dürften dieselben bei den unter hohen Drucken gepreßten und etwas unterhalb der Umwandlungstemperatur gesinterten Produkten sein. Für die mit 6 t gepreßten und bei 850° gesinterten Proben gibt die Tabelle 4 eine Gegenüberstellung der beobachteten (Kolonne 4) und der nach obiger Gleichung berechneten (Kolonne 5) Eigenschaftswerte. Bei der Berechnung wurde die für das kompakte Eisen spezifische Dichte von 7,86, elektrische Leitfähigkeit von 9,80 reziproke Ohm und eine Zerreißfestigkeit von 1250 kg/(1 cm · 0,5 cm) unterstellt und der Wert der Lagerungskonstanten mit 0,25 festgelegt.

Tabelle 4. Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit = L und der Zerreißfestigkeit = Z für Sinterlinge von $t = 850^{\circ}\text{C}$ und Preßdruck = 6 t/qcm mit $k = 0,25$.

1	2	3	4	5	6
Pulverart	Eigenschaft	Dichte beob.	Eigen- schaftswert beob.	Eigen- schaftswert ber.	Prozentuale Abweichung
Feines Pulver	Elektrische Leitfähigkeit	6,78	6,70	6,65	+ 0,75
	Zerreißfestigkeit	6,78	883	849	+ 4,00
Grobes Pulver	Elektrische Leitfähigkeit	6,96	6,91	7,07	— 2,26
	Zerreißfestigkeit	6,96	790	901	— 12,32

Angesichts der großen Empfindlichkeit der elektrischen Leitfähigkeit gegenüber Veränderungen im Kohlenstoffgehalt und der Zerreißfestigkeit gegenüber Inhomogenitäten kann die Übereinstimmung der beobachteten und berechneten Werte als annehmbar bezeichnet werden.

Die vorliegende Arbeit ist mit Unterstützung der Dr. *Paul Schwarzkopf*-Stiftung ausgeführt worden, wofür auch an dieser Stelle unser herzlichster Dank ausgesprochen sei.