

Abb. 3. Temperatur nach dem Durchgang einer Stoßwelle nach McQueen u. Marsh [4].

außer von den Stoßwellenparametern von der Schmelzdruckkurve des Materials ab. Im Bereich niedriger Drücke wird für die Schmelzdruckkurve häufig die aus der Lindemann-Beziehung abgeleitete Formel von Simon [17] verwendet. Die experimentelle Ermittlung der Schmelzdruckkurve im statischen Hochdruckversuch bis 50 kbar für eine größere Zahl von Materialien zeigt jedoch, daß die Formel von Simon einen zu großen Anstieg der Schmelztemperatur mit dem Druck liefert und im Druckbereich von einigen 100 kbar zu großen Fehlern führt.

Eine bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Daten, vor allem bei Metallen, gibt eine von Kennedy und Mitarbeitern aufgestellte Beziehung für die Schmelzdruckkurve [18],[19]:

$$T_m = T_{m,0} \cdot \left(1 + C \frac{\Delta V}{V_0}\right) \quad (1)$$

(T_m Schmelztemperatur beim Druck p ; $T_{m,0}$ Schmelztemperatur unter Atmosphärendruck, C materialabhängiger Koeffizient; V_0 spezifisches Volumen unter Atmosphärendruck; V spezifisches Volumen beim Druck p im Fall isothermer Kompression; $\Delta V = V_0 - V$). Aufgrund der statischen Hochdruckversuche an Alkalimetallen, die sich durch besonders hohe Volumenänderungen $\Delta V/V_0$ auszeichnen, dürfte Gl. (1) selbst noch bei Drücken entsprechend einer isothermen Volumenänderung von 50 % gültig sein. Im Bereich hoher dynamischer Drücke (bis 700 kbar) wurde Gl. (1) durch die Stoßwellenversuche von Kormer et al. [20] an NaCl- und KCl-Einkristallen bestätigt. (Wegen der Transparenz dieser Materialien und der hohen Temperatur hinter der Stoßwelle ist hier eine Temperaturbestimmung auf optischem Weg möglich.) Gleichzeitig wurde

Tabelle 1. Thermisches Verhalten von Metallen unter Stoßwellenbelastung (Sprenganordnung mit Comp. B als Sprengstoff und senkrechtem Auftreffen der Detonationswelle; Ausgangstemperatur $T_0 = 20^\circ\text{C}$)

	Cu	Fe	Al	Cd	Tl	Sn	Pb
in der Stoßwelle							
Druck p_1 [kbar]	472	459	353	437	450	417	451
Temperatur T_1 [°C]	405	560	523	1085	1915	1020	1965
Schmelzpunkt T_m [°C]	2170	2500	1875	1045	1100	690	1300
Aggregatzustand	fest	fest	fest	gerade flüssig	flüssig	flüssig	flüssig
nach der Druckentlastung							
Temperatur T_2 [°C]	190	~300	210	321	613	380	525
Schmelzpunkt $T_{m,0}$ [°C]	1083	1536	659	321	304	232	328
Aggregatzustand	fest	fest	fest	teils fest, teils flüssig	flüssig	flüssig	flüssig

durch diese Versuche gezeigt, daß eine dem Siedeverzug entsprechende Schmelzverzögerung nicht auftritt.

In Tabelle 1 sind für eine Reihe von Metallen Kennwerte für das zu erwartende thermische Verhalten unter Stoßwellenbelastung zusammengestellt. Sie wurden aus den in der Literatur vorliegenden experimentellen und theoretischen Stoßwellendaten [2],[4],[5],[6],[21] in Verbindung mit Gl. (1) berechnet. Bei der Bestimmung der Temperatur T_1 wurde in allen Fällen, in denen der flüssige Zustand zu erwarten ist, als Näherung für die Schmelzwärme der Wert unter Atmosphärendruck eingesetzt (für die Schmelzwärme unter hohem Druck existieren bisher nur einzelne theoretische Ansätze [22]). Abbildung 3 zeigt theoretische Kurven der Temperaturen nach der Druckentlastung.

4. Experimente

4.1. Versuchsanordnung

Um Aufschluß über die Größenordnung der beim Stoßwelledurchgang erreichten Temperatur zu gewinnen, wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht, unter welchen Versuchsbedingungen das Material nach der Druckentlastung im flüssigen Zustand vorliegt. Die Versuchsanordnung mußte hierzu so ausgelegt sein, daß man charakteristische Unterschiede zwischen dem Verhalten fester und flüssiger Körper im Sprengversuch feststellen kann. Wir gingen hierbei davon aus, daß in den Fällen, in denen das Material nach Stoßwelledurchgang im flüssigen Zustand vorliegt, eine Instabilität der Form und teilweise ein Versprühen (Bildung eines Flüssigkeitsnebels) auftreten sollte. Dies sollte sich in Röntgenblitzaufnahmen der Probe im Freiflug durch die Auflösung der Konturen bemerkbar machen. Hinweise auf die Entstehung eines Flüssigkeitsnebels sollten sich darüber hinaus aus der Untersuchung aufgefangener Materialteile ergeben.

Die Materialien für die Versuche wurden unter dem Gesichtspunkt großer Unterschiede im Schmelzpunkt und in der nach dem Stoßwelledurchgang zu erwartenden Temperatur ausgewählt:

1. Aluminium und Kupfer als Vertreter der Metalle, deren Temperatur nach Stoßwelledurchgang noch weit unterhalb des Schmelzpunkts liegen sollte;
2. Blei und Zinn als Vertreter der Metalle, bei denen der Übergang in den flüssigen Zustand zu erwarten ist;
3. Glas als ein Material, das fest bleiben sollte, aber vollständig zertrümmert oder gar zerstäubt wird;

4. Wasser als ideal fluides Medium. (Zur Erhöhung des Röntgenkontrasts wurde Cäsiumchlorid zugesetzt, wodurch die Dichte auf etwa 2 g/cm^3 anstieg.)

Abb. 4 zeigt die Ladungsanordnung für die Röntgenblitzaufnahmen. Bei den gewählten Ladungsabmessungen trifft die Detonationswelle überall weitgehend senkrecht auf die Materialprobe auf²⁾. Die Masse der scheibenförmigen Materialprobe war in allen Fällen etwa gleich (Probendicke je nach Dichte zwischen 2 und 6 mm), um nach der Detonation auch in allen Fällen etwa gleiche Geschwindigkeit im Freiflug zu erhalten.

Aus dem Verhältnis von Ladungshöhe und Probendicke ergibt sich, daß die Temperatur nach Durchgang der ersten Stoß- und Entlastungswelle in allen Teilen der Probe annähernd gleich ist. Der weitere Temperaturanstieg durch die nachfolgenden Spannungswellen kleinerer Amplitude ist zwar innerhalb der Probe uneinheitlich; da dieser Anstieg jedoch nach Abschätzungen höchstens 10 bis 20 % des Temperaturwerts nach Durchgang der ersten Stoß- und Entlastungswelle beträgt, sind die Unterschiede in der Endtemperatur der einzelnen Massenelemente klein.

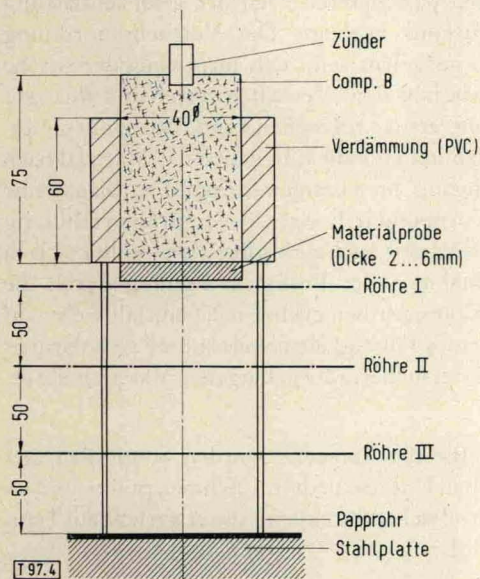


Abb. 4. Sprenganordnung für Röntgenblitzaufnahmen. Durchstrahlungsrichtungen der Röntgenblitzröhren jeweils um 45° gegeneinander versetzt.

Im Gegensatz zur Endtemperatur ergeben sich für die Endgeschwindigkeit der einzelnen Massenelemente größere Unterschiede. Wegen der Form des Schwadenkopfs erhalten nämlich die achsnahen Elemente eine größere Geschwindigkeit als die Randpartien der Probe. Der Geschwindigkeitsgradient erleichtert das Erkennen des jeweils vorliegenden Aggregatzustands in den Röntgenblitzaufnahmen, da bei festem und bei flüssigem Material unter der Einwirkung dieses Gradienten unterschiedliche Verformungs- bzw. Fließvorgänge auftreten. (Der nochmalige Temperaturanstieg während des freien Flugs infolge der zu leistenden Verformungsarbeit ist relativ klein; er beträgt bei dem in den Versuchen auftretenden Verformungsgrad größenordnungsmäßig 70°C im Fall von Kupfer und weniger als 10°C im Fall von Blei.)

2 Auf die Verwendung von Planwellengeneratoren zur Herstellung einer exakt ebenen Welle wurde aus Kostengründen verzichtet.

Abb. 5 zeigt die Vorrichtung zum Auffangen von Teilen der Materialprobe in Wasser. Der Aufbau der Ladung ist bis auf die Zweiteilung der Probe gleich wie bei den Röntgenblitzversuchen. Durch die Dämmanordnung aus abwechselnd geschichteten Stahl- und Filzscheiben, die den Detonationsstoß vom Auffangtopf fernhalten soll, ergab sich unbeabsichtigt ein zusätzlicher Test auf das Vorliegen des festen oder flüssigen Zustands bei den durchfliegenden Probeteilchen. Durch den auf diese Dämmanordnung übertragenen Stoß werden nämlich einzelne Filzfasern abgelöst und in die zentrale Bohrung gewirbelt, wo sie von der durchfliegenden Probe eingefangen und mitgerissen werden. Besteht die Probe aus einem Nebel flüssiger Metallteilchen, so kann sich dieser Nebel auf den mitgerissenen Fasern niederschlagen, d. h. die Fasern werden dann gewissermaßen mit flüssigem Metall getränkt. Dementsprechend wurde bei den Auffangversuchen zusätzlich zur Größenverteilung und Form der Probenpartikeln auch die Beschaffenheit der mitgerissenen Filzfasern untersucht.

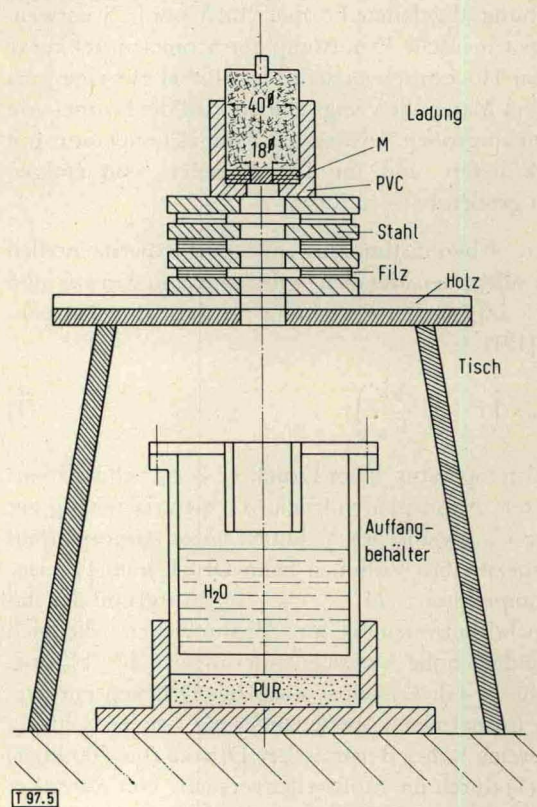


Abb. 5. Anordnung für Auffangversuche. M = Materialprobe, zweigeteilt; PUR = Polyurethanschaum.

4.2. Versuche mit energiereichem Sprengstoff (Comp. B)

4.2.1. Röntgenblitzuntersuchungen

Bei der Verwendung von Comp. B als Sprengstoff sind im Fall von Aluminium, Kupfer, Blei und Zinn ungefähr die in Tabelle 1 angegebenen Temperaturen zu erwarten. Bei Glas läßt sich aufgrund der Untersuchungen von Wackerle [23] an Quarz ein Stoßwellendruck von etwa 300 kbar und eine Temperatur nach der Druckentlastung von etwa $+250^\circ \text{C}$ abschätzen; die Endtemperatur müßte somit auf jeden Fall weit unterhalb des Erweichungsbereichs liegen.

Im Fall des Wassers errechnet sich für den Zustand in der Stoßwelle ein Druck von etwa 190 kbar und eine Temperatur von etwa $+1200^\circ \text{C}$ [24]. Unter diesen Bedingungen ist