

FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Nr. 2368

**Herausgegeben im Auftrage des Ministerpräsidenten Heinz Kühn
vom Minister für Wissenschaft und Forschung Johannes Rau**

Dr. -Ing. Ramaswamy Lakshmanan

Max-Planck-Institut für Eisenforschung

**Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit
bei der Härteprüfung**



Westdeutscher Verlag 1974

© 1974 by Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen
Gesamtherstellung: Westdeutscher Verlag

ISBN-13: 978-3-531-02368-7 e-ISBN-13: 978-3-322-88258-5
DOI: 10.1007/978-3-322-88258-5

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Tabelle der Bezeichnungen	1
2. Einleitung	5
3. Schrifttumsübersicht	6
3.1 Absolute Härte	6
3.2 Technische Härteprüfverfahren	7
3.2.1 "Statische" Verfahren	7
3.2.2 "Dynamische" Verfahren	11
4. Aufstellung und Lösung der Differentialgleichungen für die Bewegungsvorgänge bei der Härteprüfung	14
4.1 Grundlagen	14
4.2 Aufstellung der Gleichungen	16
4.3 Lösung	19
5. Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	31
5.1 Baumann-Hammer	31
5.2 Elektrische Ausrüstung	32
5.3 Aufnahme von Kraft-Zeit-Kurven	34
6. Versuchsergebnisse	36
6.1 Auswertung	36
6.2 Darstellung	38
6.3 Besprechung	40

	Seite
7. Rechenergebnisse	47
7.1 Berechnungen für einfache Stöße	47
7.2 Anwendung auf den Baumann-Hammer	53
7.3 Vergleich von Rechen- und Versuchsergebnissen	54
8. Technische Anwendung des Baumann-Hammers	59
9. Zusammenfassung	61
10. Literaturverzeichnis	63

Tafeln und Bilder

1 Tabelle der Bezeichnungen

A, A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄	Koeffizienten
a	Werkstoffkennzahl (Meyer-Härte)
B	Koeffizient
b	Werkstoffkennzahl (Potenzgesetz)
c ₁ , c ₂ , c ₃	Federkonstanten (Bild 2)
D	Kugeldurchmesser
d	Kalottendurchmesser, allgemein
d _o	aus Brinell-Härte berechneter Durchmesser
d _b	aus der Kraft P ₁₂ berechneter Durchmesser
d _m	aus der Probe gemessener Durchmesser der Kalotte
F, F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₄	Koeffizienten
g	Erdbeschleunigung (9812,6 mm/s ²)
H	Härte, allgemein
HB	Brinell-Härte
HRB	Rockwell-B-Härte
H _{st}	statische Härte in den Berechnungen
H _P	Härte der Proben (statisch nach Brinell bestimmt)
H _D	Dynamische Härte
HM	Meyer-Härte
H _{abs}	absolute Härte (nach Hertz)
h	Eindringtiefe, allgemein
h ₁	Eindringtiefe der Kugel in die Probe

$h_1 \max$	größter Wert für h_1
$h_1^o \max$	Eindringtiefe bei starrer Unterlage
h_2	Zusammendrückung der Probe
h_3	Zusammendrückung der Kraftmeßdose
$h_3 \max$	größter Wert für h_3
h_m	aus der Probe gemessene Eindringtiefe der Kalotte
I_o	Gesamtimpuls des Systems
I_1, I_2, I_3	Impuls der einzelnen Massen
$I_{1 \text{ gem}}, I_{2 \text{ gem}}, I_{3 \text{ gem}}$	aus Kraft-Zeit-Kurven berechnete Impulse
L	Fallarbeit (Potenzgesetz)
M	Masse ($= m_2 + m_3$)
m_1, m_2, m_3	Massen, allgemein (Bild 2)
m_E	Masse des Eindringkörpers
m_F	Masse des Führungsstiftes
m_B	Masse des Bolzens
N_1, N_2, N_3, N_4	Hilfsgrößen
n	Härteexponent (Meyer-Härte)
P	Kraft, allgemein

P_o	statische Kraft	
P_1	Kraft auf die Probe	
$P_{1 \max}$	maximaler Wert für P_1	
$P_{1 \max}^o$	auf die Probe wirkende Kraft ohne Berücksichtigung der Unterlagenfederung	
P_{11}	erstes Kraftmaximum	} aus dem Kraft-Zeit-Diagramm
P_{12}	zweites Kraftmaximum	
P_{13}	drittes Kraftmaximum	
P_W	Widerstandskraft	
P_B	Bremskraft	
p_m	mittlerer Druck	
s_1, s_2, s_3	Zusammendrückungswege der Feder (Bild 2)	
s_1^s, s_3^s	Zusammendrückungswege - statischer Anteil	
s_1^d, s_3^d	Zusammendrückungswege - dynamischer Anteil	
t	Zeitintervalle, allgemein	
t_{\max}	Zeitmaximum (Grenzwert für t)	
$t_{1 \max}$	Zeit für $h_{1 \max}$ bzw. $P_{1 \max}$	
$t_{1 \max}^o$	Zeit für $h_{1 \max}^o$ bzw. $P_{1 \max}^o$	
t_{11}, t_{12}, t_{13}	den Kraft-Maxima zugehörige Zeitintervalle von Null aus gemessen	

$t_{11 \text{ min}}, t_{12 \text{ min}}$	
t_E	Null-Durchgänge der Kraft-Zeit-Kurve von Null aus gemessen
v	Geschwindigkeit, allgemein
$v_o (= v_{Eo})$	Anfangsgeschwindigkeit des Eindringkörpers
v_{Bo}	Geschwindigkeit des Bolzens vor dem elastischen Stoß
v_{B1}	Geschwindigkeit des Bolzens nach dem Stoß
v_{Fo}	Geschwindigkeit des Führungsstiftes vor dem elastischen Stoß
v_{F1}	Geschwindigkeit des Führungsstiftes nach dem Stoß
W	Hilfsgröße
Y	Hilfsgröße
y	Exponent (Potenzgesetz)
α	Konstante
β	Exponenten
ϑ	Hilfsgröße
ϕ_1, ϕ_2	Kreisfrequenz
Ω	Hilfsgröße
ω_o, ω_1	Kreisfrequenzen, allgemein (<u>Bild 6</u>)

2 Einleitung

Im Schrifttum wird zwischen physikalischer und technischer Härte unterschieden. Der physikalische Härtebegriff geht auf H. Hertz¹⁾²⁾ und F. Auerbach³⁾ zurück, wonach Härte diejenige Belastung ist, bei der eine eben sichtbare Deformation an dem zu prüfenden Körper erkennbar wird. Hingegen bedient man sich in der Technik der Definition der Härte nach A. Martens⁴⁾, derzufolge man unter Härte den Widerstand versteht, den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers unter meßbarer plastischer Verformung entgegensetzt.

Diese Definition ist genau genommen unzulänglich, wenn man berücksichtigt, daß der Eindringwiderstand eines Werkstoffes von verschiedenen anderen Werkstoffeigenschaften wie Elastizität, Plastizität und Viskosität mitbeeinflußt wird. Die technische Härte ist somit keine physikalisch eindeutig definierte Werkstoffeigenschaft⁵⁾⁶⁾⁷⁾. Dennoch weist die bei ferritischem Stahl empirisch gefundene Proportionalität zwischen der Härte nach dem Brinellschen Verfahren und der Zugfestigkeit auf eine Vergleichbarkeit der Fließvorgänge bei beiden Prüfverfahren hin, also auf die Möglichkeit eines zahlenmäßigen Bildes des Formänderungswiderstandes eines Werkstoffes⁸⁾. Demzufolge sind alle Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit gleichzeitig auch geeignet, Vergleichswerte für die mittlere Härte zu liefern, da sie nicht nur die Oberflächenhärte erfassen, sondern auch die Härte im Inneren des Werkstoffs. Von diesem Standpunkt aus kann das Spannung-Dehnung-Schaubild, das man bei einem Zugversuch erhält, auch als Vergleichskurve für die Härte herangezogen werden. Von Nachteil wäre allerdings, daß man außer der Zugfestigkeit keinen besonders ausgezeichneten Kennwert erhalten würde⁹⁾¹⁰⁾. Die Hertzsche Definition der Härte entspricht beispielsweise der Elastizitätsgrenze, die auf der Spannung-Dehnung-Kurve nicht eindeutig festgelegt werden kann.

Zur Messung der Härte ist eine Anzahl von Verfahren entwickelt worden, Verfahren, die im wesentlichen Eindringversuche sind. Der Eindruck geschieht entweder langsam ("statische" Verfahren) oder schlagartig ("dynamische" Verfahren).

Bei technischen Verfahren der Härteprüfung wird ein in den Abmessungen genau festgelegter Prüfkörper mit einer bestimmten Belastung senkrecht in eine Probe eingedrückt und die Eindruckfläche bzw. die Eindringtiefe gemessen.

Hierbei ist im einzelnen zu beachten, daß Abmessungen, Oberflächenbeschaffenheit und Homogenität des Prüfgutes, Form, Genauigkeit der Abmessungen und Härte des Eindringkörpers, Belastungsgeschwindigkeit, Größe, Konstanz und Einwirkdauer des Prüfdruckes, Form des Eindruckes und Ausmessungsgenauigkeit des Eindruckes eine wesentliche Rolle spielen.

In der vorliegenden Arbeit wird daraus die Belastungsgeschwindigkeit als besonders wichtige Einflußgröße herausgegriffen. Es soll versucht werden, die Wichtigkeit der Belastungsgeschwindigkeit und der Belastungsdauer bei der "dynamischen" Härteprüfung mathematisch zu begründen, um damit einen Vergleich mit der "statischen" Prüfung zu ermöglichen.

3 Schriftumsübersicht

3.1 Absolute Härte

Eine Sonderstellung unter den verschiedenen Härteprüfverfahren nimmt das Verfahren zur Bestimmung der sogenannten absoluten Härte ein, bei der die Belastung nur bis zu einer eben sichtbaren plastischen Verformung auf dem zu prüfenden Körper führt. Bei dieser von H. Hertz¹⁾²⁾¹¹⁾ entwickelten

Methode wird im Gegensatz zu allen anderen Prüfverfahren eine Kugel aus demselben Stoff wie der des zu prüfenden Körpers verwendet und die Belastung nur bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze gesteigert. Hertz definiert die absolute Härte als denjenigen im Mittelpunkt der entstehenden kreisförmigen Druckfläche in normaler Richtung herrschenden Druck, bei dem gerade die Elastizitätsgrenze erreicht wird. Zu ihrer Berechnung leitete H. Hertz²⁾ folgende Formeln her

$$H_{abs} = \frac{6 P}{\pi d^2} \quad , \quad d^3 = const. P \quad . \quad (1)$$

Hierin ist P die Druckkraft bei Erreichen der Elastizitätsgrenze und d der Durchmesser der Druckfläche. Um diese Belastung P zu bestimmen, wurden verschiedentlich Versuche unternommen, z.B. von F. Auerbach³⁾, der für die praktische Anwendbarkeit eine geeignete Apparatur entwickelte. Diese Apparatur wird von E. Berndt¹²⁾ beschrieben.

3.2 Technische Härteprüfverfahren

3.2.1 "Statische" Verfahren

Im folgenden werden einige Verfahren, bei denen die Belastungsgeschwindigkeit niedrig ist, betrachtet.

Bei der Härtebestimmung mit der Zylinderdruckprobe nach A. Föppl¹³⁾ und F.M. Schwerd^{14) 15)} werden zwei Halbzylinder aus demselben Stoff kreuzweise übereinandergelegt und solange gegeneinander gedrückt, bis gerade plastische Verformung sichtbar wird. Als Härte gilt der mittlere Druck

$$p_m = \frac{4 P}{\pi d^2} \quad (2)$$

worin P die Druckkraft und d der Eindruckdurchmesser sind. Ein ähnliches Verfahren ist die Zylinderdruckprobe nach J.H. Cowdrey ¹⁶⁾

Die größte Bedeutung errangen jedoch Verfahren, bei denen als Prüfkörper eine Kugel oder ein Kegel aus besonderen Werkstoffen wie gehärtetem Stahl oder Diamant benutzt werden.

Die Kugeldruckprüfung nach J.A. Brinell ^{17) 18) 19)} besteht im wesentlichen darin, daß eine gehärtete Stahlkugel mit einem bestimmten Durchmesser D mit vorgeschriebener Belastung P in die blanke Oberfläche einer Probe eingedrückt wird. Als Härtezahl gilt der in kp/mm^2 ausgedrückte Quotient aus der Belastung und der aus dem Eindruckdurchmesser d berechneten Oberfläche der Kalotte.

$$HB = \frac{2 P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

oder

$$HB = \frac{P}{\pi D h} \quad (4)$$

worin h die Tiefe der Kalotte ist.

An dieser Stelle sei auch auf die Kugeldruckhärte nach E. Meyer ^{20) 21)} hingewiesen. Diese unterscheidet sich von der Härtemessung nach Brinell nicht durch das Verfahren, sondern durch die Auswertung; Meyer bezieht die Prüfkraft auf die Projektion des Eindruckes

$$HM = p_m = \frac{4 P}{\pi d^2} \quad (5)$$

Für geringe Belastungen fallen Brinell-Härte und Meyer-Härte anfangs zusammen, gehen mit zunehmender Belastung auseinander, wobei die

Meyer-Härte regelmäßig zunimmt, aber die Brinell-Härte nach Erreichen eines höchsten Wertes wieder abnimmt^{22) 23) 24)} (Bild 1). Da die Projektion eines Eindruckes stets kleiner als seine Oberfläche ist, ist HM stets größer als HB. Mit zunehmender Eindringtiefe weichen HM und HB immer mehr voneinander ab. Nach Untersuchungen von E. Meyer^{23) 24)} gilt die von E. Rasch^{25) 26)} für zwei Kugeln und von A. Föppl²⁷⁾ für zwei Zylinder angegebene Gleichung⁺⁾

$$P = a \left(\frac{d}{d_0} \right)^n, \quad d_0 = 1 \text{ mm} \quad (6)$$

worin a und n werkstoffabhängige Werte sind, grundsätzlich auch für das Brinellsche Härteprüfverfahren. Der Härte-Exponent n variiert nach Versuchen von E. Meyer²⁰⁾ und P.W. Döhmer²⁸⁾ für Stahlwerkstoffe zwischen 2,0 und 2,6. Dieser Härte-Exponent hängt nicht nur vom Werkstoff ab, sondern auch von der vorangegangenen thermischen und mechanischen Behandlung. a ist gleich der Kraft, die man zur Erzeugung eines Projektionskreises von 1 mm Durchmesser benötigt. Bei konstantem Durchmesser D des Eindringkörpers ist a eine Werkstoffkennzahl^{20) 22)} Sie schwankt nach E. Meyer^{20) 21)} für eine Reihe verschiedener Werkstoffe zwischen 20 und 270 kp.

Die Gültigkeit des Potenzgesetzes wurde von E. Meyer^{20) 21)} und von R. Mailänder^{29) 30)} für Härten bis zu 600 Brinell-Einheiten nachgewiesen. Die untere Grenze ist dadurch gegeben, daß die Elastizitätsgrenze überschritten werden muß.

Nach E. Meyer²⁰⁾ ist das ältere Verfahren nach Föppl-Schwerd^{13) 14) 15)} der Brinell-Härteprüfung grundsätzlich gleich und unterscheidet sich nur in

⁺⁾ Die Gleichung wurde umgestellt, weil nach Definition für $d = d_0 = 1 \text{ mm}$ $a = P$ ist. Hiernach ist a in kp anzugeben.

der Form des Eindruckes. Nach Feststellung von A. Föppl²⁷⁾ ist die berechnete Härte abhängig von der absoluten Größe des Zylinderhalbmessers. Die bei der Zylinderdruckprobe für die Härte erhaltenen Werte sind wesentlich kleiner als die bei der Kugeldruckprobe ermittelten. Die Gleichung (6) nach A. Föppl²⁷⁾ und E. Meyer²¹⁾ behält grundsätzlich ihre Gültigkeit, die Werte für a sind jedoch erheblich kleiner als bei der Kugeldruckprobe.

E. Meyer²¹⁾ zeigte, daß bei festgehaltenem Verhältnis P/D^2 unabhängig von der Belastung gleiche Härtezahlen erhalten werden. So ist schon sehr früh für Stähle die Verhältniszahl 30 kp/mm^2 eingeführt worden³¹⁾. Nach DIN 50 351 ist die Belastung so zu wählen, daß der Durchmesser der Kalotte zwischen $0,2$ und $0,7 D$ liegt.

Bei sehr tiefen Eindrücken macht sich ein starker Abfall der Härtezahlen bemerkbar, der durch einen Wulst hervorgerufen wird. Die Messung der Eindringtiefe hat andererseits den Vorteil, daß diese Methode das verdrängte Material nicht berücksichtigt und dadurch nur die Eindringtiefe gegenüber der ursprünglichen Oberfläche angibt. Hier wird nach Gleichung (4) gerechnet und die so erhaltenen Härteziffern sind größer als wenn man die Härte nach dem Eindruckdurchmesser ermittelt (P. Goerens, R. Mailänder³²⁾).

Beim Eindrücken einer Kugel in eine Probe pflanzen sich die Spannungen in das Innere des Metalles fort und erreichen große Tiefen, in denen plastische bzw. elastische Formänderungen festzustellen sind. Schließlich wird eine Zone erreicht, in der auch elastische Formänderungen nicht mehr nachweisbar sind (vgl. D. Deutsch³³⁾, P. Bardenheuer³⁴⁾, A. Krisch³⁵⁾). Größe und Richtung der Spannungen sowie der zugehörigen Verformungen wechseln von Ort zu Ort, so daß eine Härtezahl aus Kraft und Eindruckfläche nur einen mittleren, nicht genauer definierten Punkt auf einer Fließkurve darstellen kann und so kein ausgezeichneter physikalischer Wert ist,

obwohl bei Stahl zwischen Zugfestigkeit und Brinell-Härte eine enge Beziehung besteht ^{36) 37) 38)}. Die Brinell-Härte ist ein Zahlenwert, der jederzeit wiederholbar ist.

Nur vollständigkeithalber sei hier noch auf die Verfahren nach Vickers und Rockwell hingewiesen, die sich hauptsächlich durch die Form des Eindringkörpers von den bisher besprochenen unterscheiden.

3.2.2 "Dynamische" Verfahren

Diese Härte-Prüfverfahren verdanken ihre Anwendung in der Technik weniger einer zeitlich schnelleren Prüfung, als vielmehr den einfachen und leichteren Geräten, die besser den Betriebsuntersuchungen angepaßt worden sind. Die dynamischen Härte-Prüfverfahren unterscheiden sich grundsätzlich durch zwei Arbeitsweisen: die dynamisch "plastischen" und die dynamisch "elastischen". Letztere wird besonders zur Prüfung schwerer Walzen angewendet (Skleroskop), soll hier aber nicht näher behandelt werden.

Bei den dynamisch "plastischen" Verfahren wird der entstandene plastische Verformungseindruck als Grundlage für die Härteberechnung verwendet. Bei diesem Verfahren wird im allgemeinen eine Kugel durch Schlag, entweder mit einem Fallgewicht oder durch Federbelastung in die Probe eingeschlagen. Schon die Arbeiten von H. Hertz ^{1) 11)} und auch die von G. Moreau ^{39) 40)}, F. Wüst und P. Bardenheuer ⁴¹⁾, C.A. Edwards und F.W. Willis ⁴²⁾ und M. v. Schwarz ⁴³⁾ zeigen die Wichtigkeit der dynamischen Härte-Prüfverfahren. Nach den Arbeiten von E. Meyer ²¹⁾ und J.J. Schneider ⁴⁴⁾, die die Kugel-Fallprobe untersuchten, sowie von J. Class ⁴⁵⁾ kann analog zu Gleichung (6) folgende Gleichung aufgestellt werden

$$L = b \left(\frac{d}{d_0} \right)^y, \quad d_0 = 1 \text{ mm} \quad (7)$$

worin L die Fallarbeit bedeutet. Der Exponent y liegt (nach Schneider) zwischen 4 und 4,2. F. Wüst und P. Bardenheuer⁴¹⁾ kommen aufgrund ihrer Untersuchungen mit beschwerten Kugeln ebenfalls zu einem Wert 4.

Im Gegensatz zur Fallhärteprüfung erlangte die dynamische Schlaghärteprüfung, bei der die Schlagenergie durch eine Feder (z.B. Baumann-Hammer) oder durch einen Hammerschlag (z.B. Poldi-Härteprüfer) erzeugt wird, eine größere technische Bedeutung.

Der am meisten verwendete Schlaghärteprüfer, der nach dem Federentlastungsprinzip arbeitet, ist der Kugelschlaghammer von Baumann-Steinrück, der 1921 von R. Baumann^{46) 47)} und von H. Steinrück⁴⁸⁾ beschrieben wurde. Dieser Hammer unterscheidet sich von dem Kugelschlaghammer nach Grafen-Werner, der auf einem ähnlichen Prinzip beruht, nur durch die Einstellbarkeit der verschiedenen Schlagstufen. Beim Baumann-Hammer läßt sich die halbe und volle Schlagstufe einstellen. Das Verfahren der Kugelschlaghärteprüfung nach Baumann oder nach Grafen-Werner arbeitet mit den gleichen Kugelabmessungen wie das Brinell-Verfahren.

Die Arbeiten von P. Goerens und R. Mailänder³²⁾ und R. Baumann⁴⁷⁾ verdeutlichen, daß die Schlaghärteprüfung empfindlicher gegenüber der Härte reagiert als die Brinell-Probe, und ein geringer Fehler bei der Ausmessung bei den Schlagversuchen zu einem größeren Fehler führt als beim statischen Brinell-Verfahren. Obwohl für dieses Verfahren die gleichen Gesetzmäßigkeiten zu gelten scheinen wie für die statische Kugeldruckprobe, liegen noch keine Messungen vor, wie groß eigentlich die Kräfte bei der Schlaghärteprüfung sind. Auch Geschwindigkeitsmessungen fehlen, so daß für die Gegenüberstellung beider Verfahren noch Unterlagen fehlen. Die verschiedenen Arbeiten älteren Datums und die Arbeiten von A. Krisch^{49) 50)} in der neueren Zeit zeigen die Wichtigkeit des Geschwindigkeitseinflusses bei der Härteprüfung. Um die Bedeutung der dynamischen Kräfte bei der Härte-

prüfung untersuchen zu können, muß der Versuchsapparat so beschaffen sein, daß der Eindringkörper mit genügend hoher Geschwindigkeit und damit verbundenen großen Verzögerungen in die Probe eindringen kann.

Als dynamische Härteprüfgeräte stehen die Fallhärteprüfer nach F. Wüst und P. Bardenheuer, der Schlaghärteprüfer nach Baumann und der Poldi-Härteprüfer zur Verfügung. Alle diese Verfahren benutzen die Kugel als Eindringkörper. So ist es naheliegend, den Brinell-Prüfer auch für dynamische Untersuchungen zu benutzen. Dagegen sprechen die zu erwartenden hohen Kräfte schon bei geringer Erhöhung der Geschwindigkeit. Außerdem sind höhere Geschwindigkeiten schwer einzustellen. An derselben Schwierigkeit der Geschwindigkeitseinstellung scheitert auch der Fallhärteprüfer.

Obwohl es möglich wäre, den Poldi-Härteprüfer zu benutzen, ist es sehr umständlich, gleichmäßig reproduzierbare Schläge (hierbei auch die Anfangsgeschwindigkeit) zu erzielen. Auch würde der Vergleichskörper bekannter Härte, der bei diesem und bei ähnlichen Härteprüfern benutzt wird, eine Analyse der Vorgänge erschweren. Für den Baumann-Hammer spricht die beinahe gleichbleibende Schlagenergie. Da der Feder-Stauchweg in engen Grenzen konstant bleibt und auch zwei verschiedene Einstellmöglichkeiten bietet, kann die hohe Anfangsgeschwindigkeit definiert gewählt werden.

Somit bietet sich der Baumann-Hammer zusammen mit dem statischen Brinell-Prüfer als geeignetes Modell zur Untersuchung der dynamischen Kräfte bei der Härteprüfung an.

4 Aufstellung und Lösung der Differentialgleichungen für die Bewegungsvorgänge bei der Härteprüfung

4.1 Grundlagen

Die Verfahren nach Brinell, Vickers und Rockwell werden als statische Härteprüfverfahren bezeichnet. Hierbei wird stillschweigend angenommen, daß die Verformungsgeschwindigkeit eine geringe Rolle spielt. Tatsächlich aber sind die sogenannten statischen Härteprüfverfahren einem Geschwindigkeitseinfluß unterworfen. Die Belastungsgeschwindigkeiten sind zwar durch die Zeiten, die in Normen festgelegt worden sind, begrenzt, aber dennoch sind die zeitlichen Kraftsteigerungen bei Härteprüfverfahren wesentlich größer als beim Zugversuch. Die ersten Versuche, die Bedeutung der Beschleunigungskräfte bei der Härteprüfung mathematisch zu erfassen, wurden 1964 von A. Krisch^{49) 50)} unternommen. Das dort angenommene Beispiel war der Brinellsche Kugeldruckversuch mit einem Kugeldurchmesser von $D = 10 \text{ mm}$ und $P_o = 3\,000 \text{ kp}$ Belastung. Hierbei setzte er eine einfache Differentialgleichung in der Form

$$P_o - m \frac{d^2h}{dt^2} - P_W - P_B = 0 \quad (8)$$

an, wobei P_o die statische Kraft aus dem Belastungsgewicht ist, $m \frac{d^2h}{dt^2}$ die Trägheitskraft des Eindringkörpers, P_W der Widerstand, der von der Probe dem Eindringen des Prüfkörpers entgegengesetzt wird, P_B die Bremskraft des Gerätes und h die Eindringtiefe. Diese Betrachtung der Härteprüfung ergab, daß bei einer Anfangsgeschwindigkeit des Eindringkörpers von Null, also, wenn der Eindringkörper in Berührung mit der Prüfoberfläche ist und erst dann belastet wird, die Trägheitskraft auf den gleichen Wert wie die Gewichtskraft ansteigt, wenn die Bewegung des Eindringkörpers nicht durch die Gerätebremse gehemmt wird. Diese

Untersuchung der Härteprüfung zeigte die Wichtigkeit der zusätzlichen Massenkräfte. Besonders groß werden diese Massenkräfte bei der Fall- und der Schlaghärteprüfung sein, während die statischen Kräfte viel kleiner als bei der Brinellprüfung sind. Der Baumann-Hammer ist daher ein geeignetes technisches Beispiel, diese dynamischen Kräfte zu untersuchen.

Bevor auf die Herleitung der Differentialgleichungen für die Verhältnisse bei der Schlaghärteprüfung näher eingegangen wird, seien einige Bemerkungen über den Stoß gemacht. Stöße zwischen zwei Körpern sind entweder elastisch, d.h. ohne bleibende Formänderungen der Körper, oder plastisch. Nach B. de St. Venant⁵¹⁾ bestimmen die beim Stoß erzeugten Wellen die Art des elastischen Stoßes. Seine Theorie gilt für Stöße, in denen zumindest ein Körper ein langer zylindrischer Stab ist. Dagegen nimmt H. Hertz¹⁾ an, daß die beim Stoß auftretenden Spannungen und Verformungen, die er als dieselben auffaßt wie beim statischen Zusammendrücken, die größere Bedeutung haben; diese Auffassung gilt für Körper, in denen die Stoßzeiten größer sind als die, die elastische Wellen für das Durchlaufen der Körper benötigen.

Bei plastischen Stößen ist es bekannt, daß ein für jedes Material charakteristischer "Fließdruck" überwunden werden muß, bevor eine bleibende Formänderung auftreten kann. Dieser Fließdruck ist bei Stößen größer als bei statischen Versuchen^{52) 53)}. A.W. Crook⁵⁴⁾ untersuchte den vollplastischen Stoß für zylindrische Stäbe mit kugeliger Ausbildung eines Endes und kam zu dem Ergebnis, daß die Eindringtiefe h linear von der Stoßkraft P abhängig ist

$$P = \alpha h \quad (9)$$

worin α eine vom mittleren Druck und der Geometrie des Eindringkörpers abhängige Konstante ist (z.B. $\alpha = \pi D p_m$ für eine Kugel, wobei D der Kugeldurchmesser und p_m der mittlere Druck ist)^{53) 54)}

Bei der Herleitung der Gleichungen werden folgende Annahmen gemacht^{53) 54) 55)} :

1. Der Stoß zwischen dem Eindringkörper und der Probe ist so schnell, daß die plastische Verformung unmittelbar einsetzt. Der elastische Übergang wird vernachlässigt.
2. Während der Verformung bleibt der mittlere Druck (Formänderungswiderstand) konstant.
3. Wenn die Stoßkraft ihren höchsten Wert erreicht hat, ist der plastische Vorgang beendet.
4. Der Kraftabfall, d.h. die Rückfederung gehorcht nur elastischen Gesetzen.

4.2 Aufstellung der Gleichungen

Die Aufstellung der Differentialgleichungen für die Verhältnisse beim Baumann-Hammer wurde dadurch erschwert, daß die für eine Schwingungsgleichung gewöhnlich benutzten Größen nicht sicher festgelegt werden konnten. So ist die Kraftmeßeinrichtung nicht starr, sondern muß nachgiebig angenommen werden, da für praktische Messungen eine Kraftmeßdose unter die Probe gesetzt wurde. Diese bedeutete eine zusätzliche Elastizität der Probenunterlage. Die Gleichungen waren also aus einem Modell zu entwickeln, das aus einem durch drei Federn