

Instrumentierte Eindringprüfung zur ambulanten quasi-zerstörungsfreien Prüfung mechanischer Eigenschaften

Hans-Jakob Schindler und Peter Bertschinger
Mat-Tec AG, Winterthur, Schweiz

1 Einleitung

Die Härteprüfung ist eine altbekannte und -bewährte Methode zur Charakterisierung des Widerstands eines Werkstoffs gegen lokale plastische Verformung der Oberfläche. Sie dient insbesondere auch zur einfachen, näherungsweise Bestimmung der Zugfestigkeit von Werkstoffen an kleinen Proben. Die Beziehung zwischen Härte und Zugfestigkeit ist bei elastisch-plastischen Werkstoffen theoretisch gut begründet, und lässt sich rechnerisch nachvollziehen. Entsprechende Zusammenhänge stehen deshalb etwas zu Unrecht im Ruf, „nur“ empirisch und damit unzuverlässig und ungenau zu sein. Grössere Abweichungen gibt es nur bei Materialien, bei welchen im einachsigen Zugversuch ein Bruch vor der Einschnürung auftritt, also bei relativ spröden Werkstoffen. Härte- oder Eindringprüfungen im Allgemeinen stellen deshalb durchaus vollwertige quasistatische Prüfungen der Werkstofffestigkeit dar. Natürlich sind die erzielbaren Genauigkeiten etwas geringer als bei einem einachsigen Zugversuch. Das hängt aber weniger mit dem Prinzip als mit der zu undifferenzierten Auswertung der klassischen Härtewerte zusammen. Mit der grösseren Datenmenge und entsprechender Auswertung der instrumentierten Eindringprüfung sind massgebliche Steigerungen der Aussagekraft möglich [1, 2, 3]. Die instrumentierte Eindringprüfung weist auch in der praktischen Anwendung einige wesentliche Vorteile auf. Mit der neuen internationalen Vornorm prEN ISO 14577 [4] wurde nun kürzlich eine weitere Voraussetzung dafür geschaffen, dass sich diese Prüfung wohl immer mehr auch in der Praxis durchsetzen wird.

Der wesentliche Unterschied zwischen einer Eindringprüfung und andern mechanischen Prüfungen ist ihre im Wesentlichen zerstörungsfreie Natur. Deshalb ist vor allem ihre ambulante Anwendung an Bauteilen von Interesse. Die klassischen Härteprüfungen nach Brinell, Vickers oder Rockwell haben diesbezüglich aber nur begrenzte Möglichkeiten, da sie eine aufwändige Optik und/oder ein spezielles Belastungs- und Messsystem erfordern, Dinge also, die nur schlecht in einem einfachen, kompakten mobilen Prüfgerät unterzubringen sind. Die heutigen mobilen Härtemessgeräte basieren deshalb im Allgemeinen auf anderen Messprinzipien [5]. Bekannt sind beispielsweise die Rückprallhärteprüfung oder das UCI-Verfahren. Diesen Prüfverfahren gemeinsam ist, dass weitere, theoretisch schwer erfassbare Zusammenhänge zwischen den zu ermittelnden Härtewerten und den gemessenen physikalischen Grössen herzustellen sind, was im Allgemeinen den Gebrauch von Vergleichsplatten nötig macht. Solche empirische Gesetzmässigkeiten schränken die Allgemeinheit der Auswertung zusätzlich ein. Kennwerte aus der mobilen Härteprüfungen stehen deshalb nicht zu Unrecht im Ruf, Näherungen mit schwer quantifizierbarer Genauigkeit zu sein.

Die instrumentierte Eindringprüfung bietet auch hinsichtlich der Mobilität der Prüfung neue Möglichkeiten. Prüfgeräte zur Messung der Eindringkurven lassen sich so kompakt konstruieren, dass sie für den mobilen Einsatz geeignet sind. Sie ermöglichen damit, Eindringprüfungen an Bauteilen in nahezu gleicher Weise wie an Proben im Labor

durchzuführen. Voraussetzung dazu ist ein Messgerät, das in der Lage ist, mit den bei einer mobilen Prüfung zusätzlichen Störeinflüssen umzugehen. Ein entsprechendes Gerät liegt mit dem neuen, weiter unten vorgestellten mobilen Indenter Unihard von Mat-Tec vor¹.

2 Instrumentierte Eindringprüfung und ihre Auswertung

Bei der instrumentierten Eindringprüfung wird die Verschiebung des Eindringkörpers als Funktion der aufgebracht Kraft gemessen (Fig. 1). Aus dem Verlauf dieser Kurve lassen sich charakteristische Kennwerte bestimmen, wie sie in der Norm prEN ISO 14577 [4] definiert sind. Damit bestehen im Vorgehen Analogien mit andern mechanischen Prüfungen wie dem einachsigen Zugversuch. Beispielsweise die Eindringhärte ist nach [4] definiert als

$$HU_{IT} = \frac{F_{\max}}{h_r^2 \cdot C_G} \quad (1)$$

Aus dieser Grösse lassen sich bei Bedarf die geläufigen Härtewerte wie HV oder HRC mittels weitgehend allgemein gültiger Umwertungsformeln mit guter Genauigkeit umrechnen.

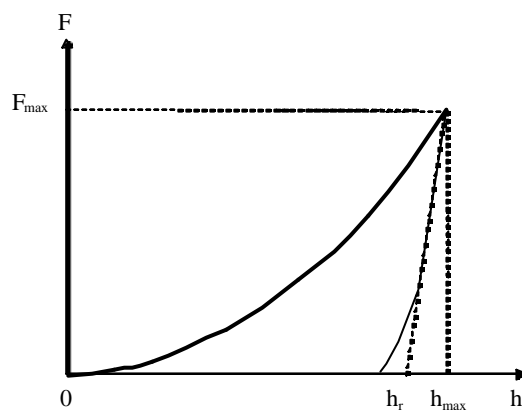


Fig. 1: Schematische Darstellung einer Kraft-Eindringkurve eines Konus oder einer Pyramide in die Oberfläche eines elastisch-plastischen Werkstoffs.

Die Ermittlung des elastisch-plastischen Stoffgesetzes aus einem Eindringdiagramm ist allerdings etwas komplizierter als beim einachsigen Zugversuch, da die elastischen und plastischen Verschiebungsfelder ausgeprägt lokal, mehrachsig und inhomogen sind. Zur Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms bedarf es deshalb einer relativ aufwändigen inversen Analyse. Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit numerischer Berechnungsmethoden wie die der Finiten Elemente (FEM) sind solche Auswertungen aber zumindest prinzipiell weitgehend problemlos geworden. Zur Illustration entsprechender Möglichkeiten ist in Fig. 2 ein Beispiel einer FEM-Berechnung der Eindringung einer harten Kugel in eine elastisch-plastische Platte gezeigt. Für letztere wurde ein Materialgesetz von folgender Form angenommen:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon && \text{für } \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sigma &= C \cdot \varepsilon^n && \text{für } \varepsilon > \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (2)$$

¹ Nach der Kenntnis der Autoren gibt es zurzeit kein weiteres ähnliches Produkt auf dem Markt.

wobei

$$\mathbf{e}_0 = \left(\frac{C}{E} \right)^{\frac{1}{1-n}} ; \quad C = \frac{R_m}{(1-n) \cdot n^n} \quad (2a)$$

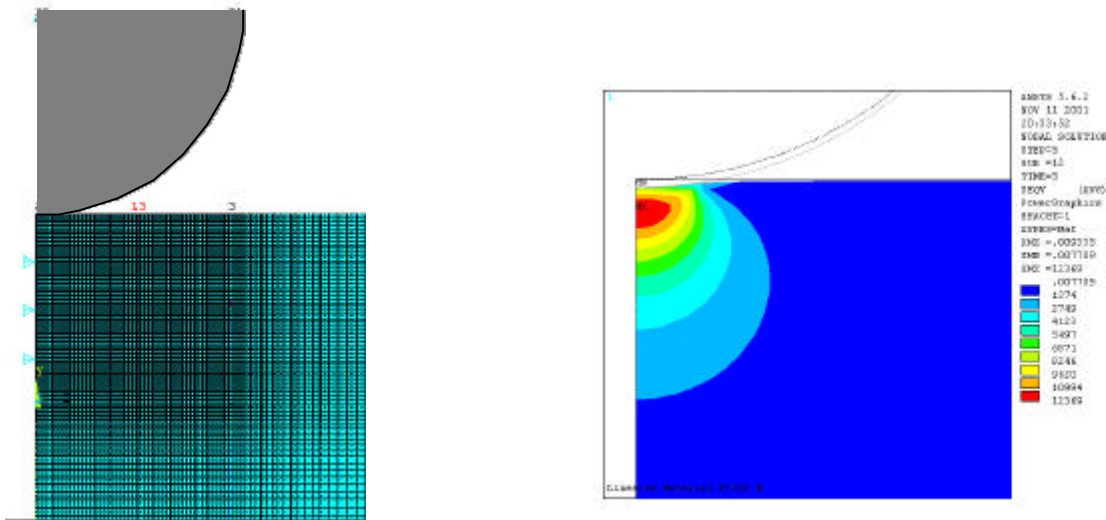


Fig. 2: FEM-Modell (innere Zone) des Eindrucks einer Kugel auf eine elastisch-plastische Oberfläche und berechnete Verteilung der Vergleichsspannung nach v. Mises.

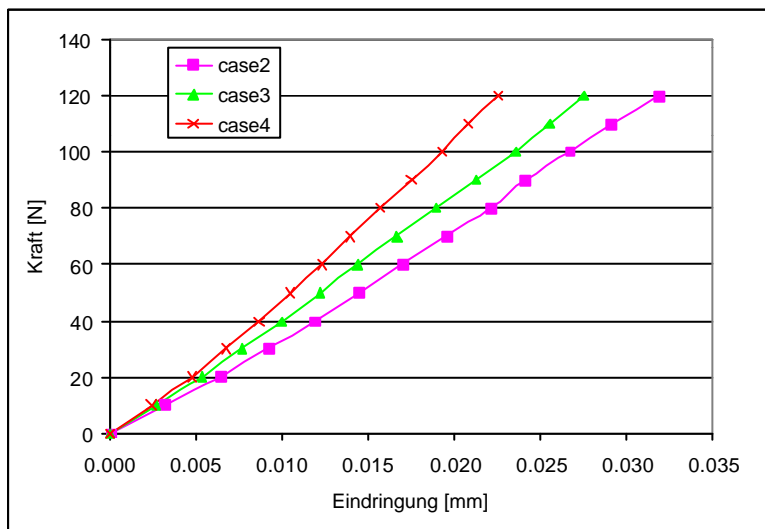


Fig. 3: Berechneter Verlauf der Kraft-Eindringkurven für das System gemäss Fig. 2 für Kugeldurchmesser 1.0 mm, E-Modul $E=210000$ MPa und folgende Parameter (vgl. Gl. (2)):
 Case 2: $R_m=400$ MPa, $n=0.2$, ($R_p=165$ MPa)
 Case 3: $R_m=400$ MPa, $n=0.1$, ($R_p=289$ MPa)
 Case 4: $R_m=600$ MPa, $n=0.2$, ($R_p=274$ MPa)

Fig. 3 zeigt anhand von Beispielen die Abhängigkeit der Kraft-Eindringungsdiagramme von den Materialparametern R_m (Zugfestigkeit) und n (Verfestigungsexponent bzw. wahre Gleichmassdehnung). Daraus lässt sich erkennen, dass in umgekehrter Weise die Werkstoffparameter R_m und n aus einem gemessenen Verlauf durch ein geeignetes inverses Verfahren bestimmen werden können. Der Zusammenhang zwischen diesen Parametern und der Streckgrenze R_p für das Materialgesetz (2) lautet:

$$R_p = E \cdot \left(\frac{C}{E} \right)^{1/n} \quad (3)$$

Die gezeigte numerische Simulation soll als Beispiel für zahlreiche weitere Auswertungsmöglichkeiten dienen. Die instrumentierte Eindringprüfung ist zweifellos die leistungsfähigste, allgemeinste und umfassendste Art der Härteprüfung. Zudem ist sie, wie nachfolgend gezeigt, auch in der Anwendung einfacher als die meisten herkömmlichen Verfahren. Rückblickend betrachtet erscheinen die zahlreichen „klassischen“ Härteprüfungen geradezu als Umwege. Diese sind nur deshalb nötig gewesen, weil es bis vor wenigen Jahren die erforderlichen genauen Messgeräte und die Möglichkeit zur Erfassung und schnellen Verarbeitung der anfallenden grossen Datenmengen in handlichen Geräten nicht gab. Heute aber ist die Situation eine andere: Dass die Auswertung der instrumentierten Eindringprüfung rein rechnerisch aufgrund gut definierter Messdaten erfolgt, macht sie automatisierbar und reproduzierbar.

3 Mobile Durchführung der instrumentierten Eindringprüfung

Wie einleitend erwähnt, kommen die Vorteile der Eindringprüfung als quasi-zerstörungsfreie Prüfmethode vor allem dann zum Tragen, wenn sie zur ambulanten Messung an Bauteilen eingesetzt werden kann. Erforderlich dazu ist ein Prüfgerät, das eine kontrollierte, kontinuierliche Lastaufbringung sowie die Kraft- und Wegmessung in einem kompakten, handlichen Gerät vereinigt, und das den unten diskutierten zusätzlichen Anforderungen einer mobilen Prüfung gerecht wird. Die entscheidende Voraussetzung für eine qualitativ mit einer Laborprüfung vergleichbaren mobilen Eindringprüfung ist aber eine innige Verbindung zwischen Prüfoberfläche und Prüfgerät, da Relativbewegungen während der Prüfung die Genauigkeit der Eindringmessung stark beeinträchtigen. Diese Verbindung, die ein Klemmen oder Aufspannen des Prüfgeräts an den Prüfling erfordert, ist der aufwändigste und einschränkendste Teil einer mobilen Prüfung.

Wenn es aber nicht um eine ambulante Prüfung von Labor-Qualität geht, sondern lediglich um die Ermittlung von approximativen Härtekennwerten, beispielsweise zur Qualitätskontrolle oder Materialunterscheidung, ist ein schnelleres, vereinfachtes Vorgehen möglich. Es hat sich gezeigt, dass eine für viele Anwendungen genügende Genauigkeit schon im einfachen freihändigen Einsatz zu erzielen ist. Darunter versteht man, dass das Prüfgerät lediglich an die zu prüfende Oberfläche gehalten und die benötigte Eindringkraft durch manuellen Druck auf einen entsprechenden Druckkopf erzeugt wird. Bei dieser Prüfungsart sind gewisse Relativbewegungen zwischen Prüfgerät und Oberfläche („Verwackeln“) praktisch unvermeidbar. Auch ist die Rechtwinkligkeit der Eindringrichtung nicht immer gewährleistet, und es können unterschiedliche Oberflächenqualitäten vorliegen. Damit ein Prüfgerät auch unter diesen erschwerten Bedingungen reproduzierbare Ergebnisse liefert, muss es mit diesen potentiellen Fehlerquellen so umgehen können, dass entsprechende Einflüsse minimalisiert werden. Das ist einerseits durch geeignete konstruktive Massnahmen und andererseits durch möglichst fehlertolerante Auswertungsalgorithmen zu erreichen.

Mit dem instrumentierten Indenter Mat-Tec Unihard (Fig. 4) liegt ein neues Prüfgerät vor, das diesen Anforderungen gerecht wird. Es wurde in modularer Bauweise so konzipiert, dass es in möglichst vielfältiger Weise einsetzbar ist – freihändig mit manueller Belastung, festklemmbar an ein Bauteil, mit externer oder eigener motorischer Kraftaufbringung, oder als

Prüfkopf in einer Universal-Zug/Druckmaschine im Labor. Mit diesem Gerät lassen sich somit die gleichen Prüfungen im Labor oder ambulant an einem Bauteil durchführen.



Fig. 4: Mobiler Indentor Mat-Tec Unihard mit Belastungskopf für manuelle Belastung

Als Beispiel für konstruktive Massnahmen, die beim Mat-Tec Unihard zur Minimalisierung von Störeinflüssen realisiert sind, ist die doppelte, symmetrische Wegmessung zu nennen, durch die kleine Winkelfehler kompensiert werden, sowie generell die Minimalisierung von Reibungs- und Querkrafteinflüssen. Seitens der Auswertung wird soweit wie möglich mit integralen Grössen gerechnet, die im Vergleich mit Momentanwerten weniger streuen und sich kontinuierlicher verhalten. Als Beispiel sei die Berechnung der Eindringhärte HU als Funktion der Kraft gezeigt. Das Eindringen einer konischen oder pyramidenförmigen Eindring Spitze in ein homogenes elastisches Material mit der Universal- oder „Martenshärte“ HU beschreibt eine Kurve der Form

$$F = c \cdot HU \cdot h^2 \quad (4)$$

wobei c eine dimensionslose Konstante bezeichnet, die von der Form des Eindringkörpers abhängt. Daraus folgt folgender Zusammenhang zwischen HU bei einer beliebigen Referenzkraft F ($F_0 < F < F_{\max}$) und der integralen Eindringarbeit $W_{0/F}$, die zwischen einer Bezugskraft F_0 und der Referenzkraft F zu leisten ist:

$$HU(F) = \frac{(F^{3/2} - F_0^{3/2})^2}{9 \cdot c \cdot W_{0/F}^2} \quad (5)$$

wobei

$$W_{0/F} = \int_{h_0}^h F \cdot dh \quad (6)$$

Die Bezugskraft F_0 ist so zu wählen, dass die unvermeidlichen Einlaufeffekte im Bereich von $h=0$, die auf Oberflächenrauigkeit oder geometrische Imperfektionen der Eindring Spitze zurückzuführen sind, aus der Berechnung fallen. Die Berechnung nach (5) hat den Vorteil einer Mittelung über dem gewählten Kraftbereich und der Irrelevanz des oft schwer zu definierenden 0-Punkts der Wegmessung.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Informationsgehalt einer Härteprüfung wird entscheidend erweitert, wenn sie instrumentiert durchgeführt wird. Dadurch wird die technologische Härteprüfung zu einem eigentlichen werkstoffmechanischen Versuch, mit dem sich bei entsprechender Auswertung das Spannungs-Dehnungs-Diagramm bzw. die Fließkurve und die darauf basierenden Festigkeitskennwerte wie Streckgrenze oder die Zugfestigkeit zumindest näherungsweise ermitteln lassen. Damit werden der Härteprüfung ganz neue Perspektiven als zerstörungsfreie mechanische Prüfung eröffnet.

Die neuen Möglichkeiten betreffen neben der erhöhten Aussagekraft auch die Flexibilität und Vielseitigkeit des Einsatzes, die Einfachheit der Versuchsdurchführung und die Objektivität der Messung. Ein entscheidender Vorteil der instrumentierten Härteprüfung im Vergleich mit den klassischen ist auch der, dass die Prüfung nicht mehr ans Labor gebunden ist. Eine instrumentierte Eindringprüfung lässt sich ebenso gut an einem Objekt wie an einer Probe durchführen. Ein geeignetes Prüfgerät steht mit dem neuen, modular aufgebauten instrumentierten Indenter Mat-Tec Unihard zur Verfügung.

Angesichts dieser Vorteile und nach der Einführung der neuen Norm prEN ISO 14577 steht einer raschen Verbreitung dieser Prüftechnik nichts mehr im Wege. Diese neue Universal- oder Martenshärte ist nicht als ein weiterer der jetzt schon zahlreichen Härtewerte zu betrachten, sondern als eine sinnvolle universelle Alternative dazu. Es ist davon auszugehen, dass die Martenshärte die klassischen Härtewerte in absehbarer Zeit verdrängen wird.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Öberg, H., Larsson, P-L., Magnus, O., J. Testing and Evaluation, Jan. 2001
- [2] Behnke, H.-H., Härterei-Technische Mitteilungen Vol. 48, 1993, pp. 3 – 10
- [3] Heermant, C., Dengel, D., PTB-Mitteilungen, Vol. 108, 1998, pp. 19 – 27
- [4] CEN Europäisches Komitee für Normung, prEN ISO 14577, April 2000
- [5] Michalzik, G., Schneider P., Materialprüfung, Vol. 39, 1997, pp. 350 - 356