

Instrumentierte Eindringprüfung: Mehr als nur Härte

Hans-Jakob Schindler
Mat-Tec SA, Unterer Graben 27, CH-8401 Winterthur, Schweiz
schindler@mat-tec.ch

Zusammenfassung

Mit der instrumentierten Eindringprüfung (IEP) lassen sich neben der Härte weitere Materialkennwerte wie Zugfestigkeit und Streckgrenze bestimmen. Das sie ohne aufwändige Optik auskommt, ist die IEP ist für ambulante Messungen an Bauteilen geradezu prädestiniert. Mit dem Mat-Tec Unihard S5 liegt ein Prüfgerät vor, das für den mobilen Einsatz konzipiert wurde. Ein für die Erfordernisse der Praxis speziell vorteilhafter Eindringkörper ist eine Kugel mit relativ kleinem Radius. Aus den damit gewonnenen Eindringkurven lassen sich neben guten Näherungen der Brinell-Härte auch die Spannungs-Dehnungskurve und damit deren Kennwerte $R_{p0.2}$ und R_m abschätzen. Eine entsprechende, für den mobilen Einsatz geeignete Auswertungsmethode für Kugeleindringversuche wird erläutert. Die Messunsicherheit der mittels IEP bestimmten Kennwerte wurde durch Vergleiche an Stählen verschiedener Klassen abgeklärt. Sie liegt bei $\pm 10\%$ und dürfte damit den Erfordernisse der Praxis in den meisten Fällen genügen.

1. Einleitung

Es kommt immer wieder vor, dass die Sicherheit eines Bauteils zu beurteilen ist, der Werkstoff aber nicht genügend bekannt oder seine mechanischen Eigenschaften nicht lückenlos dokumentiert sind, oder dass Änderungen infolge von Alterungseffekten oder Wärmeeinwirkungen nicht ausgeschlossen werden könne Oft ist eine Probenentnahme aus dem fraglichen Bauteil für eine normgerechten Zugprüfung entweder nicht machbar oder zu kostspielig. In solchen Fällen muss versucht werden, die erforderlichen Kennwerte so gut es geht zerstörungsfrei am Bauteil zu bestimmen. Dafür eignet sich die Härteprüfung und ganz besonders die instrumentierte Eindringprüfung (IEP), mit der nicht nur die Härte, sondern auch weitere charakteristische Grössen des Festigkeit und Duktilität erfasst werden können. Dass dabei im Vergleich zu einem normgerechten Zugversuch die Genauigkeit etwas geringer ist, wird durch die Einfachheit und Kostengünstigkeit der Prüfung aufgewogen und lässt sich in vielen Problemstellungen der Praxis in Kauf nehmen.

Die IEP ist eine fast logische Erweiterung und Verfeinerung der klassischen Härteprüfung. Wie bei letzteren wird unter einer vorgegebenen Kraft eine harte Spitze oder eine Kugel mit kleinem Radius in die Oberfläche des Prüflings gedrückt [1]. Aus der Grösse des entstehenden plastischen Eindrucks lassen sich Rückschlüsse auf die Festigkeit und Härte ziehen. Anders als bei der Härteprüfung nach Vickers oder Brinell wird nicht die Fläche des dabei erzeugten bleibenden Eindrucks gemessen, sondern die Eindringtiefe als Funktion der aufgewendeten Kraft aufgezeichnet. Der Informationsgehalt einer solchen Kurve ist wesentlich grösser als der eines einzelnen klassischen Härtewerts. Neben den klassischen Härtewerten lassen sich daraus auch weitere Kennwerte wie E-Modul, Kriechmodul oder sogar die Spannungs-Dehnungskurve des Materials näherungsweise bestimmen. Die IEP und seine Auswertung ist in der Norm EN ISO 14577 [1] geregelt. Was die Auswertung betrifft, behandelt sie nur die IEP-Kurven von pyramidenförmigen oder konischen Eindringkörpern, nicht aber die

Ermittlung der Spannungs-Dehnungskurve aus einem Kugeleindringversuch. Auf dieses in der Prüfpraxis wichtige Thema wird im vorliegenden Bericht schwergewichtig eingegangen. Neben dem höheren Informationsgehalt bestehen die Vorteile der IEP gegenüber der klassischen Härteprüfung darin, dass keine aufwändige Optik erforderlich ist und dass er deswegen auch geringere Anforderungen an die Oberflächenqualität stellt. Dies macht die IEP geradezu prädestiniert für die ambulante Prüfung an Bauteilen. Im Vergleich zu andern mobilen Härteprüfmethoden wie die Rückprallhärte oder das UCI-Verfahren hat die IEP den Vorteil, dass die Härte nicht indirekt über Korrelationen, sondern direkt aus einer physikalischen Kurve bestimmt wird. Damit ist die Methode auf alle elastisch-plastischen Werkstoffe in gleicher Weise anwendbar. Die entstehenden Eindrücke sind die gleichen wie bei den klassischen Härteprüfungen und können bei Bedarf, z.B. zur Überprüfung der Ergebnisse oder für Quervergleiche, auch optisch ausgewertet werden.

Angesichts der Bedeutung der zerstörungsfreien Materialprüfung an Bauteilen in der Praxis und der diesbezüglichen Vorteile der IEP ist es erstaunlich, dass sie in der mobilen Härteprüfung erst zaghafte Anwendung findet. Das dürfte vor allem daran liegen, dass geeignete Messgeräte noch rar sind. Solche Geräte stellen nämlich überaus hohe Anforderungen an die Robustheit des Geräts, die Einfachheit der Handhabung, die Genauigkeit der Kraft- und Verschiebungsmessung und der Fehlertoleranz der Auswertungsprozedur. Entscheidend ist dabei die Genauigkeit der Messung der Eindringtiefe, die selbst unter Kräften im Makrobereich typischerweise höchstens wenige Hundertstelmmillimeter beträgt und deren Genauigkeit besser als $0.1 \mu\text{m}$ sein muss. Ein Prüfgerät, das diese Anforderungen erfüllt, ist der Mat-Tec Unihard S5, das nachfolgend kurz vorgestellt wird. Zur Messung gehört auch eine zuverlässige Auswertungssoftware mit robusten Algorithmen. Zu diesem Zweck wurde das Programm EISIT entwickelt, dessen Grundlage im Kapitel 4.2. beschrieben wird.

2. Mat-Tec Unihard S5 – ein mobiles Messgeräte für die ambulante IEP

Bei der ambulanten Prüfung an einem Bauteil gibt es naturgemäß zahlreiche Einflussfaktoren, welche die Messung der Eindringtiefe stark beeinflussen können: Beschaffenheit und Ebenheit der Oberfläche, lokale Verfestigung durch mechanische Bearbeitung, Eigenspannungen, etc. Eine gewisse Streuung der Ergebnisse ist also schon allein aus diesen Gründen zu erwarten. Deshalb kommt es bei einem mobilen Gerät für die IEP nicht in erster Linie auf die Genauigkeit an – die Einfachheit und Stabilität der Messung und die Robustheit der Auswertungsmethode sind mindesten ebenso hoch zu gewichten. Komplexere Mess- und Auswertungsverfahren wie die inverse Analyse mittels FEM [5, 6] oder eine durch periodische Entlastungen unterbrochene Kraftaufbringung [7] sind für den mobilen Einsatz eher ungeeignet.

Von zentraler Bedeutung für die Messung der Eindringtiefe ist eine gute Verbindung zwischen Messgerät und Prüfling. Die erforderliche hohe Messgenauigkeit ist nur zu erreichen, wenn der Kontakt zwischen Messgerät und der Oberfläche des Prüflings absolut fest ist, so dass durch die Lastaufbringung keine störenden Relativbewegungen entstehen. Dies erfordert ein Festklemmen oder Aufspannen des Prüfgeräts an den Prüfling.

Im instrumentierten Indenter Mat-Tec Unihard S5 (Fig. 4) sind diese Grundsätze berücksichtigt. Das Gehäuse ist stabil genug, um mit dem Prüfling mittels Schraubzwinge, einen Spanngurt oder – wie in Fig. 2 gezeigt – über eine Magnethalterung festgehalten zu werden. Das Kraft- und Wegmesssystem basiert auf Dehnungsmessungen elastischer Elemente. Es weist keine beweglichen Teile auf, die zu Reibungseinflüssen oder einer Abnutzung durch den Ge-

brauch führen könnten. Es ist stossicher und weitgehend temperaturunabhängig. Die Kraftaufbringung erfolgt hydraulisch. Dadurch wirken sich allfällige Störungen, die vom motorischen Antrieb ausgehen können, nicht auf die Messung aus. Wenn eine innige Verbindung mit dem Prüfling möglich ist (was auch von der Messsituation abhängt), lässt sich die IEP am Bauteil im Prinzip mit der gleichen Genauigkeit durchführen wie an einer Probe im Labor.

Die Eindring Spitze ist auf einfache Weise austauschbar. Alle gängigen Spitzen-Formen wie Vickers, Berkovic, Würfecke, Konus oder Kugel können eingesetzt werden. Je nach Ziel und Zweck der Prüfung empfiehlt sich die eine oder die andere Form – alle haben ihre Vor- und Nachteile. Als in vielen Fällen zweckmässig hat sich ein kugelförmiger Eindringkörper aus Hartmetall (90°-Konus mit ausgerundeter „Spitze“) erwiesen. Diese Form erlaubt neben der Bestimmung der Härte auch eine Abschätzung der Streckgrenze und der Zugfestigkeit. Zudem ist eine Hartmetallkugel weitgehend unempfindlich auf mechanische Beschädigungen – ein im Praxiseinsatz nicht unwesentlicher Vorteil.

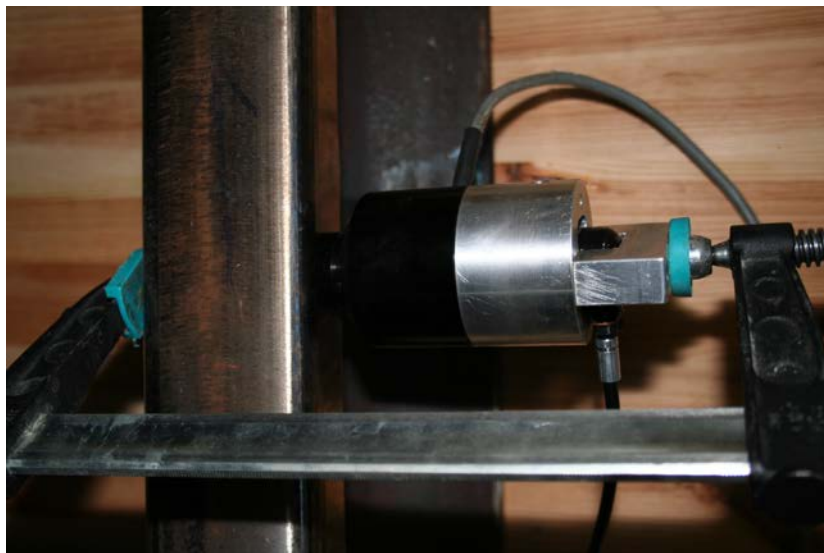


Fig. 1: Mobiler Indenter Mat-Tec Unihard, festgeklemmt an Messobjekt, gezeigt am Beispiel einer Eisenbahnschiene.

3. Auswertung der gemessenen Eindringkurven

Das primäre Messergebnis einer IEP ist die Eindringkurve $F(v)$. Deren Form hängt von der Form des Eindringkörpers ab. Grundsätzlich sind dabei zwei Typen zu unterscheiden: Pyramiden oder Kegel einerseits (Fig. 2a) und Kugeln andererseits (Fig. 2(b)). Im Fall eines idealplastischen Werkstoff (keine Kaltverfestigung, unendlicher E-Modul) führen erstere aus theoretischen Gründen zu einem parabolischen Verlauf der Eindringkurve, letztere zu einer Geraden. In beiden Fällen besteht die erste Schwierigkeit darin, die Verschiebung $v=v_0$ zu bestimmen, die dem ersten Kontakt und damit dem Nullpunkt der Eindringung h entspricht. Dieser Punkt ist wegen der Rauigkeit der Oberfläche und der unvermeidlichen Imperfektionen der Form des Eindringkörpers physikalisch und mathematisch unscharf bestimmt, für die Ermittlung verschiedener Kennwerte aber von grosser Bedeutung.

Die Auswertung der Diagramme von spitzen Eindringkörper, also jene des Typs Fig. 2(a), ist in der Norm EN ISO 14577 [1] geregelt. Standard-Kennwert aus der IEP nach ist die Martens-Härte, die als

$$HM = \frac{F}{h^2 \cdot A_s} \quad (2)$$

definiert ist, wobei der Nenner in (2) die aus $h(F)$ berechnete Oberfläche des Eindrucks bezeichnet. Dieser Wert lässt sich als Funktion der Kraft F oder der Eindringtiefe h bestimmen. HM hängt von der Spitzenform ab, namentlich dem Winkel α . Bei homogenem Material ist HM unabhängig von der Prüfkraft. Entsprechend lässt eine Änderung von HM in Funktion von F oder h auf ein inhomogenes Materialverhalten im Bereich der Oberfläche schließen. HM kann näherungsweise auf andere Härtewerte umgerechnet werden. Wenn das Hauptziel die Bestimmung eines HV-Werts ist, empfiehlt sich der in EN ISO 14577 als

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{h_r^2 \cdot A_s} \quad (2)$$

definierte Kennwert („Eindringhärte“), der bei Verwendung eines Vickers-Eindringkörpers direkt (d.h. ohne Verwendung empirischer Korrelationen) in HV umrechnen lässt. Auch HRC lässt sich bei Verwendung eines entsprechenden Eindringkörpers direkt aus der Eindringkurve berechnen. Bei homogenem Material lässt sich aus der Steigung s_e im oberen, linearen Bereich der Entlastungskurve (vgl. Fig. 2(a)) auch der E-Modul ermitteln. Die Genauigkeit ist dabei erstaunlicherweise nicht wesentlich geringer als beim Zugversuch.

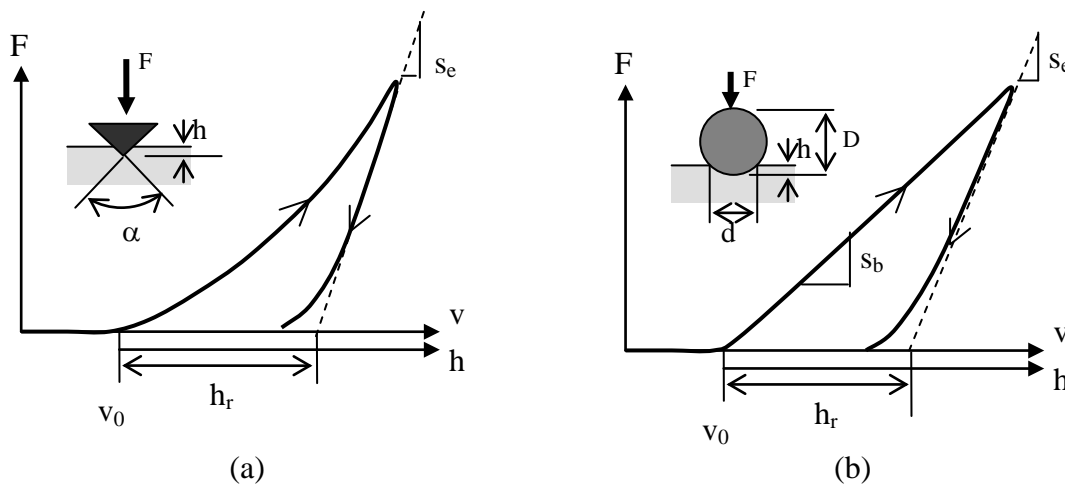


Fig. 2: Schematische Darstellung einer Kraft-Eindringkurve eines Konus oder einer Pyramide (a) bzw. einer Kugel (b) in die Oberfläche eines elastisch-plastischen Werkstoffs.

Zur Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kurve sind pyramidenförmige oder konische Spitzen ungünstig, weil der plastische Deformationszustand wegen der geometrischen Ähnlichkeit des Eindrucks unabhängig von der Kraft ist. Hierzu eignet sich die IEP mit einem kugelförmigen Eindringkörper weit besser, weil bei einer bestimmten Kraft ein elastisch-plastischer Übergang stattfindet und die Referenz-Dehnung mit zunehmender Eindringung zunimmt [3, 4]. Somit lässt sich beispielsweise mittels einer inversen Finite-Elemente-Analyse aus einer Eindringkurve einer harten Kugel das Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermitteln [5, 6]. Letzteres reagiert allerdings sehr sensitiv schon auf kleine Unterschiede in der gemessenen Kurve, was zu störenden mathematischen Schwingungen im Diagramm führen kann. Bei der Methode nach Haggag [7] wird die Lastaufbringung durch Teilentlastungen unterbrochen, was die Versuchssteuerung erschwert und die Versuchsdauer erhöht. Zur raschen Auswertung einer ambulanten Prüfung sind solche Verfahren deshalb weniger geeignet. Im Folgenden wird die

Auswertungsprozedur beschrieben, die im Programm EISIT implementiert ist und es ermöglicht, aus einem Kugeleindringversuch die Härte HB, die Streckgrenze R_p und die Zugfestigkeit R_m näherungsweise zu bestimmen.

4. Auswertung des instrumentierten Kugeleindringversuchs

4.1. Theoretische Grundlagen

Man betrachte die Eindringung einer starren Kugel mit Durchmesser D in eine ebene Oberfläche eines elastisch-plastischen Materials unter einer Kraft F (Fig. (2(b))). Eine einachsige Referenzspannung lässt sich zu

$$\sigma_r(F) = \frac{4 \cdot F}{c_t \cdot \pi \cdot d^2(F)} \quad (3)$$

ansetzen, wobei d den Kontaktkreisdurchmesser bezeichnet und c_t die Erhöhung der einachsigen Fließspannung durch die Mehrachsigkeit des Spannungszustands quantifiziert. Die Rotationssymmetrie des Spannungsfelds entspricht näherungsweise einem ebenen Dehnungszustand, sodass mit

$$c_t \approx 3 \quad (4)$$

zu rechnen ist. Unter der Annahme eines starr-plastischen Verhaltens ergibt sich der Kontaktkreisdurchmesser zu

$$d(F) = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (v - v_0) - (v - v_0)^2} \quad (5)$$

wobei v die gemessene Relativverschiebung und v_0 die Position des ersten Kontakts bezeichnet. Einsetzen von (5) in (3) führt zu

$$\sigma_r(F) = \frac{F}{c_t \cdot \pi \cdot [D \cdot (v - v_0) - (v - v_0)^2]} \quad (6)$$

Obschon das plastische Dehnungsfeld im Bereich des Eindrucks inhomogen und zweiachsig ist, lässt sich eine plastische Vergleichsdehnung ε_r (Referenzdehnung) einführen, die den Dehnungszustand im Eindruckbereich pauschal charakterisieren soll. Sie lässt sich aus Dimensionsgründen als

$$\varepsilon_r(F) = c_\varepsilon(n) \cdot \frac{d(F) - d_p}{D} \quad (7)$$

ansetzen, wobei d_p den Kontaktkreisdurchmesser beim elastisch-plastischen Übergang bezeichnet, der definitionsgemäss bei $v=v_p$ auftritt und aus dem Kraftverlauf bestimmt wird (siehe unten, Gl. (15)). Der Proportionalitätsfaktor c_ε lässt sich experimentell oder mittels FEM bestimmen, indem bei einem Werkstoff mit bekanntem einachsigen Spannungs-Dehnungs-Diagramm die zur Referenzspannung σ_r nach (6) mit (7) verglichen wird. Experimentelle und numerische Vergleiche ergaben

$$c_e \approx 0.25 \quad (8)$$

was gut mit Ergebnissen in [8] übereinstimmt, aber etwas höher liegt als der in [9] vorgeschlagene Wert von 0.2. Es ist aber anzunehmen, dass c_e nicht eine universelle Konstante ist, sondern namentlich vom Verfestigungsverhalten des Materials abhängt.

Die Bestimmung von σ_r mittels (6) im Bereich des elastisch-plastischen Übergangs erfordert eine sehr hohe Genauigkeit in der Bestimmung von v_0 , was angesichts der weiter oben diskutierten Problematik der Definition des ersten Kontakts eine grundsätzliche Schwierigkeit darstellt. Durch Ableitung von Gl. (6) nach v findet man aber folgende Alternative zu (6) zur Berechnung von σ_r :

$$\sigma_r(F) = \frac{1}{c_i \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{dF}{dv} \quad (10)$$

Mit Gl. (10) lässt sich $\sigma_r(F)$ berechnen, ohne dass v_0 zuvor bestimmt werden muss. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass Gl. (6) – (10) sich auf den plastischen Zustand beziehen und dass es sich bei σ_r und ϵ_r um wahre Spannungen bzw. Dehnungen handelt.

4.2. Kennwertermittlung mit dem Auswertungs-Programm EISIT

Das Auswertungsprogramm EISIT (Evaluation of instrumented indentation tests) ermöglicht neben der in EN ISO 14577 vorgegebenen Auswertung von IEP-Kurven mit spitzen Eindringkörpern auch eine näherungsweise Bestimmung des Spannungs-Dehnungsdiagramms aus einer IEP-Kurve mit kugelförmigem Eindringkörper, sowie die Umrechnung auf die Brinell-Härte HB. Das rechnerische Vorgehen zur Ermittlung der Brinell-Härte HB, der Streckgrenze $R_{p0.2}$ und der Zugfestigkeit R_m wird im Folgenden erläutert.

Brinell-Härte HB

Im Prinzip lässt sich die Brinell-Härte aus der Eindringkurve $F(v)$ eines kugelförmigen Eindringkörpers rein theoretisch berechnen. Der dabei erforderliche Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Eindruckgrösse von diversen Werkstoffparametern ab, namentlich vom Verfestigungsverhalten, das zu unterschiedlichen Aufstülpungen am Rand des Eindrucks führt. HB-Werte aus dem IEP sind deshalb prinzipiell nicht mit normgerecht bestimmten HB identisch, aber gute Näherungen davon. Im Folgenden werden sie zur Unterscheidung als HB_{IEP} bezeichnet.

Aus Gl. (10) geht hervor, dass für ein starr-idealplastisches Material mit einer linear ansteigenden Eindringkurve zu rechnen ist. Auch für ein elastisch-plastisches Material ist die Eindringkurve näherungsweise linear. Deren mittlere Steigung, s_b , enthält jedoch auch den elastischen Anteil der Relativverschiebung, der wenig mit der Härte zu tun hat und mit der Steigung der Entlastungskurve s_e (Fig. 2(b)) wie folgt rechnerisch eliminiert werden kann:

$$s_p = \frac{s_b \cdot s_e}{s_e - s_b} \quad (11)$$

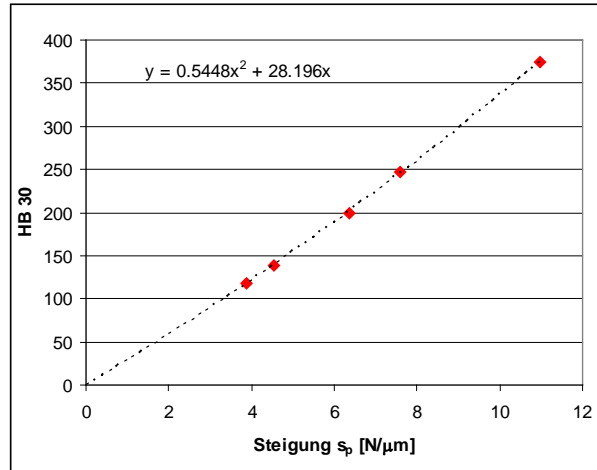


Fig. 3: Zusammenhang zwischen der plastischen Steigung s_p und der Härte HB 30 für einige Härteprüfplatten

Fig. 3 zeigt den durch Messungen an einigen Härtevergleichplatten gefundenen Zusammenhang zwischen der plastischen Steigung s_p und der Härte. Wie erwartet besteht ein näherungsweise linearer Zusammenhang, der sich durch die in Fig. 3 graphisch gezeigte quadratische Korrelationskurve

$$HB_{IEP} = 28.196 \cdot \frac{s_b \cdot s_e}{s_e - s_b} + 0.5448 \cdot \left(\frac{s_b \cdot s_e}{s_e - s_b} \right)^2 \quad (12a)$$

beschreiben lässt¹. Dieser Zusammenhang gilt für $F_{\max} \approx 200$ N und $HB < 400$. Mit (12) lässt sich HB aus dem IEP-Diagramm erhalten. Man beachte, dass bei der Bestimmung von HB mittels (12a) der Nullpunkt v_0 nicht auftaucht, womit eine wichtige Quelle der Messunsicherheit eliminiert ist.

Unabhängig davon lässt sich HB auch über die bekannte Korrelation zwischen HB und der Zugfestigkeit aus dem nachfolgend (siehe nächster Abschnitt, Gl. (14a)) berechneten $R_{m(I)}$ bestimmen, d.h. unter Verwendung von (14a) durch

$$HB_{IEP(I)} \cong \frac{C}{3.1} \cdot \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (12b)$$

Da es sich um unabhängig voneinander bestimmte Werte handelt, ist keine exakte Übereinstimmung zwischen HB_{IEP} und $HB_{IEP(I)}$ zu erwarten. Ein Vergleich kann zur Kontrolle der Messung dienen.

Zugfestigkeit

Mit (6) bis (8) lässt sich die wahre Spannungs-Dehnungskurve bestimmen. Bei einem Kugeldurchmesser von $D=1$ mm und Belastung auf 200 N erhält man die Dehnung allerdings nur bis ca. 8%, also bei weitem nicht bis zur Gleichmassdehnung. Zur Bestimmung der Zugfestigkeit muss die Kurve deshalb extrapoliert werden. Dies ist möglich, indem das wahre Spannungs-Dehnungs-Diagramm im plastischen Bereich durch

¹ Aus der IEP bestimmte Kennwerte wie HB, $R_{p0.2}$ oder R_m werden mit einem zusätzlichen Index versehen, um sie von den entsprechenden Normwerten zu unterscheiden.

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad (13)$$

approximiert und auf die wahre Gleichmassdehnung $\varepsilon = n$ extrapoliert wird. Die Zugfestigkeit ergibt sich sodann zu

$$R_{m(I)} = C \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (14a)$$

wobei e die Basis des natürlichen Logarithmus ist. Eine zweite von der Bestimmung von v_0 unabhängige Möglichkeit zur Abschätzung von R_m führt über die Steigung der Eindringkurve. Unter der Annahme, dass σ_r und R_m korrelieren, ist aufgrund der Beziehung (10) ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen s_p und R_m zu erwarten, wobei der Proportionalitätsfaktor für $D = 1$ mm bei etwa $(c_r \cdot \pi)^{-1}$ liegen sollte, also bei rund 0.1. Dies bestätigte sich durch Vergleiche von Messdaten von verschiedenen Baustählen, wo folgende Korrelation gefunden wurde:

$$R_{m(II)} = 0.0995 \cdot s_p = 0.0995 \cdot \frac{s_b \cdot s_e}{s_e - s_b} \quad (14b)$$

Streckgrenze

Im Prinzip erhält man die Streckgrenze aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Moment des elastisch-plastischen Übergangs. In der anfänglichen elastischen Phase des Kontakts verläuft die Eindringkurve aus theoretischen Gründen proportional zu $F^{3/2}$, um beim Erreich der Elastizitätsgrenze bei $v=v_p$ in den durch (10) beschriebenen näherungsweise linearen Verlauf überzugehen. Deshalb muss zwischen der elastischen und elastisch-plastischen Phase ein Vorzeichenwechsel der Kurvenkrümmung auftreten, d.h. beim Übergang gilt

$$\left. \frac{d^2 F}{dv^2} \right|_{v=v_p} = 0 \quad (15)$$

Aus (15) lässt sich v_p bestimmen. Die Streckgrenze ergibt sich sodann aus (6) zu

$$R_{p(IEP)} = \sigma_r(v=v_p) \quad (16)$$

Der elastisch-plastische Übergang ist im Kraft-Weg-Diagramm des Kugeleindruck-Versuchs weniger ausgeprägt wie beim einachsigen Zugversuch. Gleichzeitig verläuft die Spannungs-Dehnungs-Kurve in diesem Bereich relativ steil. Auch reagiert die Messung in diesem Bereich empfindlich auf Störungen wie beispielsweise Eigenspannungen. Der Genauigkeit der Streckgrenzenermittlung aus dem Kugeleindruckversuch sind deshalb Grenzen gesetzt.

5. Vergleiche mit Werten aus dem Zugversuch

Im Folgenden werden Ergebnisse gezeigt, die mit IEP und dem Auswertungsprogramm EISIT an Probestücken von Baustählen verschiedener Festigkeit und Kaltverformungsgraden ermittelt wurden. Die normgerechte Härte HB 30 bzw. HV, die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der verschiedenen Werkstoffe waren bekannt, so dass ein Vergleich möglich war. Die folgen-

den Vergleiche basieren auf den Durchschnitts aus 2 oder 3 IEP-Messungen. Bei einigen Stählen handelt es sich um kalt gerecktes Material, dessen Spannungs-Dehnungskurve somit vermutlich richtungsabhängig war, was in der Korrelation mit der Härte eine grundsätzliche Schwierigkeit darstellt. Entsprechend widerspiegeln Unterschiede zwischen Mess- und Soll-Werten nicht unbedingt eine geringe Messgenauigkeit, sondern können auch mit dem Werkstoffverhalten oder der mechanischen Bearbeitung der Oberfläche zusammenhängen.

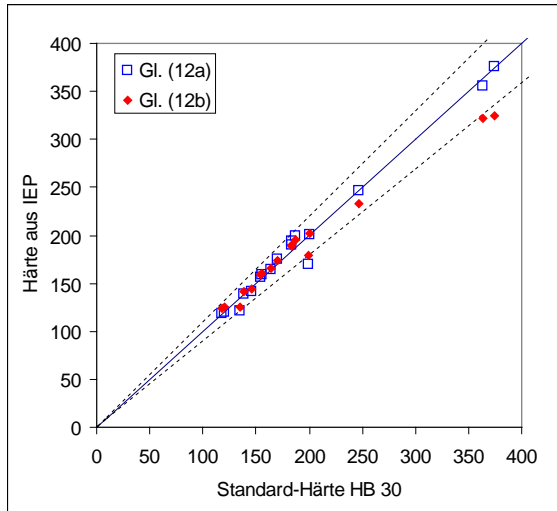


Fig. 4: Vergleich der aus dem IEP bestimmten HB mit der normgerechten Härte HB 30. Die gestrichelten Linien markieren eine Abweichung von $\pm 10\%$.

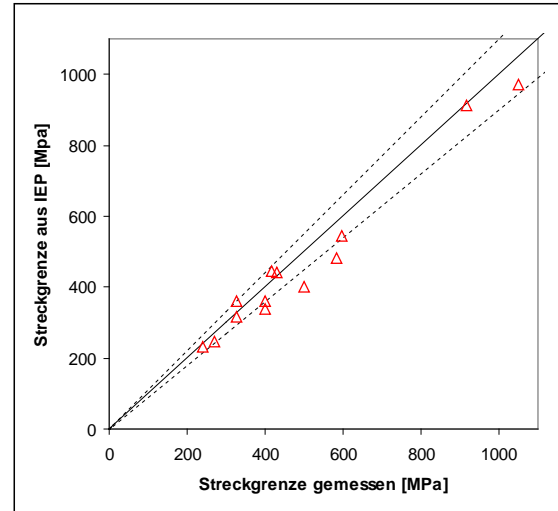


Fig. 5: Vergleich der aus dem IEP bestimmten Streckgrenze R_{pIEP} mit der normgerechten $R_{p0.2}$. Die gestrichelten Linien markieren eine Abweichung von $\pm 10\%$.

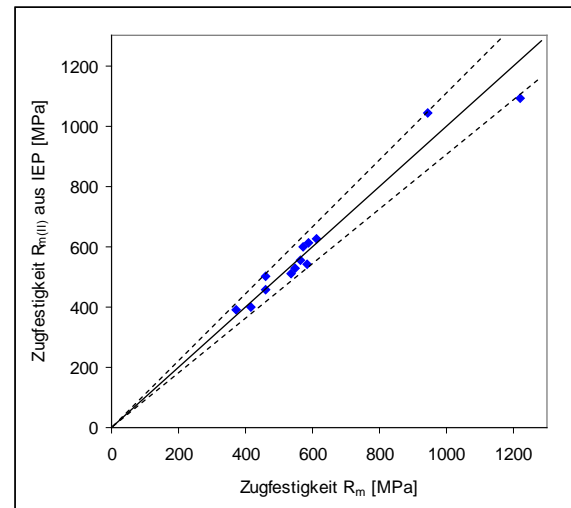
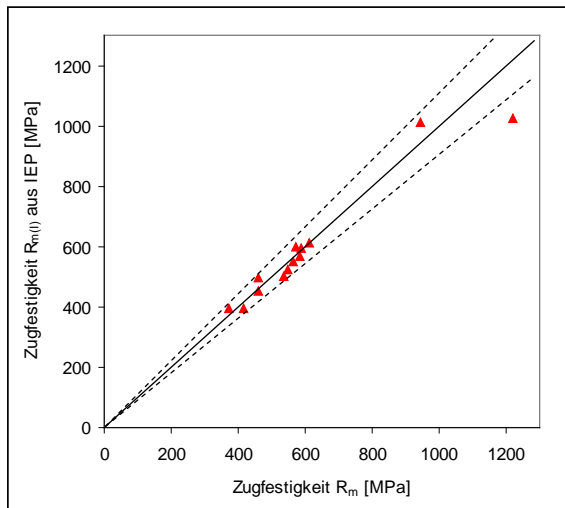


Fig. 6: Vergleich der Zugfestigkeit aus der IEP mit jener aus dem Zugversuch: links Gl. 14(a), rechts Gl. 14(b). Die gestrichelten Linien markieren eine Abweichung von $\pm 10\%$.

Fig. 4 zeigt den Vergleich der mittels IEP bestimmten HB-Werten mit normgerecht gemessenen. Die Übereinstimmung darf – mit einer Ausnahme – als gut bezeichnet werden. Im Bereich $HB < 250$ sind die $HB_{IEP(II)}$ tendenziell etwas näher bei HB, bei höherer Härte liegen aber $HB_{IEP(I)}$ besser. In Fig. 5 sind die aus dem IEP prognostizierten Streckgrenzen mit den im Zugversuch gemessenen verglichen. Angesichts der oben erläuterten prinzipiellen Schwierigkeit der Messung von $R_{p0.2}$ im IPE darf die Übereinstimmung als befriedigend bezeichnet werden. Tendenzuell wird $R_{p0.2}$ unterschätzt. Bei den grössten Abweichungen handelt es sich vorwiegend um kaltgereckte Stähle. In diesen Fällen ist schon aus physikalischen Gründen

eine gewisse Abweichung zwischen dem Verhalten im Zugversuch und im Kugeleindringversuch zu erwarten.

In Fig. 6 sind die aus dem IEP bestimmten Zugfestigkeiten $R_{m(I)}$ und $R_{m(II)}$ mit der normgerecht gemessenen verglichen. Die Übereinstimmung ist besser als $\pm 10\%$ und darf generell als gut bezeichnet werden. $R_{m(I)}$ wird durch Extrapolation des σ - ϵ -Diagramms bestimmt und sollte deshalb die genaueren Ergebnisse liefern als $R_{m(II)}$, das lediglich auf einer Korrelation mit s_p beruht. Bei grösseren Abweichungen zwischen $R_{m(I)}$ und $R_{m(II)}$ ist dennoch letzterem der Vorzug zu geben: Abweichung zwischen $R_{m(I)}$ und $R_{m(II)}$ können nämlich auf Ungenauigkeiten der Messkurve hinweisen, die sich in der robusten Berechnung von $R_{m(II)}$ im Allgemeinen weniger stark auswirken als in $R_{m(I)}$.

6. Schlussfolgerungen

Die IEP ist eine sinnvolle Erweiterung der Härtemessung. Sie liefert im Vergleich mit der klassischen Härtemessung deutlich mehr an Information und eignet sich gut für mobile Messungen. Speziell bewährt für die Bedürfnisse in der Praxis hat sich die Kugeleindringprüfung. Was die Härtemessung betrifft liefert sie vergleichbare Ergebnisse wie eine IEP mit spitzem Eindringkörper, darüber hinaus aber noch brauchbare Näherungen für die Streckgrenze und die Zugfestigkeit. Über das Streckgrenzenverhältnis oder den Verfestigungsexponenten n lassen sich auch Informationen zur Kaltverfestigung gewinnen. Die Unsicherheit der mittels IPE bestimmten Festigkeitskennwerte liegt bei etwa $\pm 10\%$. Die Abweichung namentlich der Streckgrenze kann erheblich grösser sein, wenn an der Oberfläche Störungen wie Eigenspannungen oder Kaltverfestigung vorliegen.

Referenzen:

- [1] Ullmer, Ch., 2004. Die Reihe DIN EN ISO 14577 – Erste weltweit akzeptierte Normen für die instrumentierte Eindringprüfung, www.dgm.de/past/2004/werkstoffpruefung/download/687_34.pdf
- [2] Am. Soc. for Testing and Materials, ASTM Standard E 140 – 07, , 2007. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope, West Conshohocken
- [3] Schindler, H.J., 2004. On quasi-nondestructive strength and toughness testing of elastic-plastic materials, *Int. Journal of Solids and Structures*, 42, 717-725.
- [4] Schindler, H.J., 2003. Abschätzung der wahren Spannungs-Dehnungskurve mit instrumentierten Kugeleindruckversuchen, In: *Werkstoffprüfung 2003*, VDEh, Bad Neuenahr
- [5] Boucaille, J.L., Stauss, S., Felder, E., Michler, J., 2003. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters, *Acta Materialica*, Vol. 51, Issue 6, 2 April 2003, 1663–1678
- [6] He, M.Y., Odette, G.R., Lucas, G.E., Schroeter, B., 2002. A FEM study relating load-penetration curves to yield and post-yield behaviour. In: *ASTM STP 1418*, 306 – 320
- [7] Haggag, F.M., 2001. In-situ non-destructive measurement of key mechanical properties of oil and gas pipelines, in: *PVP*, Vol. 429, ASME, 99-104
- [8] Clough, R.B., Webb, S.C., Armstrong, R.W., 2003. Dynamic hardness measurements using dropped ball, *Materials Science and Engineering A360*, 396-407
- [9] Tabor, D., 1951. *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, New York