Härteprüfung in der Tribologie – Und welche Härte?

Von Prof. Dr. Dietmar Schorr, Karlsruhe

Für die tribologische Bewertung eines Systems spielt die Oberflächenhärte der Reibpartner eine wichtige Rolle. Zur Bestimmung der Härte und dem Elastizitätsmodul des oberflächennahen Bereichs eines Bauteils bietet sich mit der Mikro- oder der Nanoindentierung eine Messtechnik an, die speziell auf die örtlichen Gegebenheiten des Oberflächenbereichs orientierte Messwerte liefert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die für die Messung entscheidende Prüflast korrekt gewählt wird. Die Messparameter werden auf der Basis des Verfahrens konstanter Multizyklus ermittelt.

Bei tribologischen Systemen (*Abb. 1*) spielen die Festigkeitseigenschaften in der Nähe des Bauteilrandes eine wichtige Rolle für die Reibung und den Verschleiß. Eine wichtige Festigkeitseigenschaft von Bauteilen ist die Härte nahe der Oberfläche, die sogenannte Oberflächenhärte. Diese Härte beeinflusst maßgeblich den abrasiven und den adhäsiven Verschleiß. Des Weiteren hängt der Reibbeiwert μ der trockenen Reibung von der Oberflächenhärte ab. Die Härte eines Bauteils ist definiert als der Widerstand, der dem Eindringen eines Prüfkörpers entgegengesetzt wird. Dieser wird mit verschiedenen genormten Prüfverfahren ermittelt.

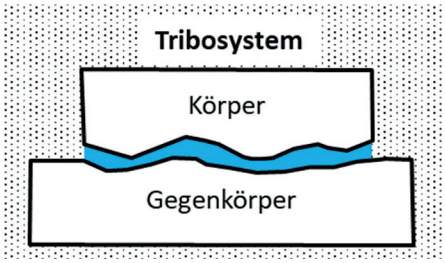

Abb. 1: Tribologisches System aus den drei Basiselementen Körper, Gegenkörper und tribologisches Medium

1 Prüfverfahren und Kenngrößen

Eines der Prüfverfahren zur Ermittlung der Härte ist die Vickers-Härteprüfung (*Abb. 2*) nach ISO 6507. Bei dieser dient eine vierseitige Pyramide als Prüfkörper, die in das Bauteil mit einer definierten Kraft eingedrückt wird. Es handelt sich bei der Vickersprüfung um ein optisches Messverfahren. Bei diesen wird zur Ermittlung der Härte einer Probe die Eindrucksgröße gemessen, die der Prüfkörper nach Entlastung der Prüfkraft hinterlässt.
Neben der Härte spielen weitere Festigkeitseigenschaften eines Bauteils für das Verhalten im tribologischen Kontakt eine Rolle. Eine wichtige Größe hierbei ist der Elastizitätsmodul (E-Modul), der im angelsächsischen

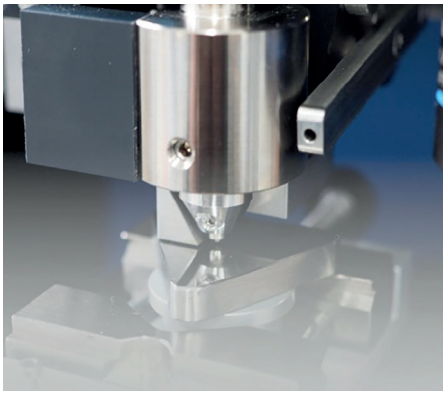

Abb. 2: Beispiel für eine Messeinrichtung zur Vickers-Härteprüfung (Bild:STZ, Karlsruhe)

Sprachraum als Young-Modulus bezeichnet wird. Dieser beschreibt das Verhältnis von Spannung und Dehnung im linear elastischen Verformungsbereich eines Werkstoffs (Hookesches Gesetz) (*Abb. 3*). Die Ermittlung erfolgt gewöhnlich durch den Zugversuch nach ISO 6892 mit Probestäben, die extra dafür angefertigt werden.
Der aus dem Zugversuch ermittelte Elastizitätsmodul und die aus den klassischen Härteprüfverfahren (Vickers, Rockwell, Brinell) ermittelte (Makro-)Härte repräsentieren in der Regel nicht die Festigkeitseigenschaften, die das Verschleiß- und Reibungsverhal-

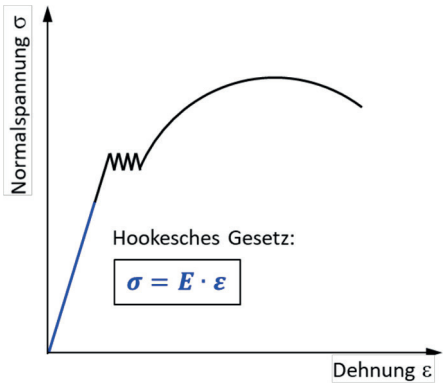

Abb. 3: Messkurve zur Bestimmung des E-Moduls gemäß dem Hookeschen Gesetz

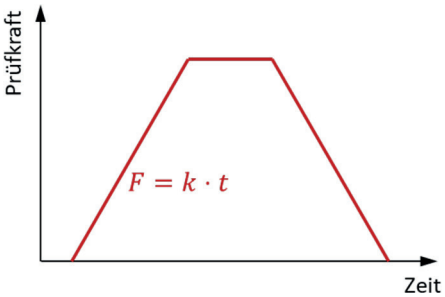

Abb. 4: Kraft-Weg-Kurve bei der instrumentierten Eindringprüfung

ten eines Bauteils bestimmen. Dies gilt auch für die Größe der Hertzschen Kontaktspannungen, die maßgeblich vom Elastizitätsmodul am Bauteilrand abhängen. Somit ist es unabdingbar, die Festigkeitskennwerte genau dort zu ermitteln, wo auch später der Kontakt der Bauteile vorliegt.

2 Instrumentierte Eindringprüfung

Die korrekte Ermittlung dieser Festigkeitskennwerte des Bauteils erfolgt mit Hilfe der sogenannten instrumentierten Eindringprüfung. Bei dieser werden während einer Be- und Entlastung die Prüfkraft und die Eindringtiefe kontinuierlich gemessen (*Abb. 4*). Aus der so gewonnenen Kraft-Weg-Kurve werden verschiedene Festigkeitskennwerte zur Charakterisierung der Bauteilrandschicht bestimmt (*Abb. 5*). Hierzu gehört neben der instrumentierten Eindringhärte H_{IT} auch der instrumentierte Elastizitätsmodul E_{IT}. Da dieser aus einer Eindringprüfung berechnet wird, erhalten die Formelkennzeichen den Zusatz ***IT***. Die instrumentierte Eindringhärte wird über mathematische Beziehungen in die Vickers-Härte HV_{IT} umgerechnet.
Wegen der geringen Prüfkräfte der instrumentierten Eindringprüfung eignet sich diese auch für die Härteprüfung von spröden Werkstoffen und für Beschichtungen. Je nach Größe der Prüfkraft wird bei der instrumentierten Eindringprüfung zwischen

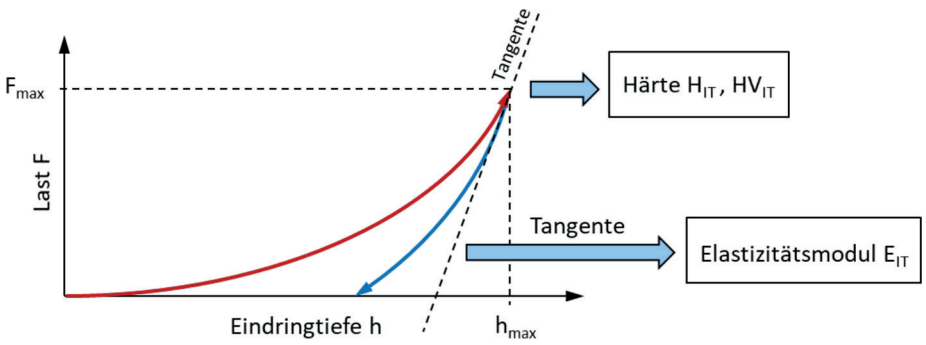

Abb. 5: Kurvenverlauf von Last und Eindringweg und der daraus zu ermittelten Werte für Härte und E-Modul

Mikroindentierung (Mikrohärteprüfung) und Nanoindentierung unterschieden. Als Prüfkörper kommen Vickers-, Knoop- und Berkovich-Prüfdiamanten zum Einsatz. Der Vorteil dieser Prüfkörper ist, dass die während der Prüfung im Bauteil auftretende Dehnung ε unabhängig von der Eindringtiefe ist.

3 Prüfbedingungen für korrekte Härtemessungen

Neben dem großen Verfahrensvorteil, die Festigkeitseigenschaften in der Nähe des Bauteilrandes bestimmen zu können, ist sowohl mit der Mikro- als auch mit der Nanoindentierung eine Matrixprüfung (Mapping) möglich. Durch diese flächenhafte Verteilung von Prüfpunkten wird die Homogenität der Probe ermittelt. Aufgrund der geringen Prüfkräfte und Eindringtiefen erfolgt mit der instrumentierten Eindringprüfung die Bestimmung von Einhärtetiefen über Härteverlaufsmessungen im präparierten Querschliff.

Das grundsätzliche Problem der Eindringprüfungen zur Ermittlung der Härte ist, dass eine geeignete Prüfkraft gewählt werden muss. Diese muss so gewählt werden, dass die folgenden Anforderungen erreicht werden:

- Die Festigkeitseigenschaften müssen nahe des tribologischen Kontakts, also am Bauteilrand, bestimmt werden
- Die Eindringtiefe muss so groß sein, dass ein ausreichendes Materialvolumen charakterisiert wird

Werden Prüfungen an einem Bauteil mit verschiedenen Prüfkräften von HV0.01 (Prüfkraft 0,09807 N) bis HV10 (Prüfkraft 98,07 N) durchgeführt, dann ergeben sich verschiedene Werte für die Härte und den Elastizitätsmodul. Dieser Einfluss ist in *Abbildung 6* für die Härte und in der *Abbildung 7* für den Elastizitätsmodul dargestellt.

4 Prüfkraftauswahl gemäß CMC

Die Ermittlung der richtigen Prüfkraft und Eindringtiefe zur Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen erfolgt mit dem sogenannten konstanten Multizyklus (CMC – Continous Multicylce) für die Prüfkraft (*Abb. 8*) beziehungsweise für den Kraft-Weg-Zusammenhang (*Abb. 9*). Bei diesem Messmodus wird die Probe mit verschiedenen Be- und Entlastungszyklen untersucht. Die minimale und maximale Prüfkraft werden dabei kontinuierlich mit jedem Zyklus erhöht. Dabei kann die inkrementelle

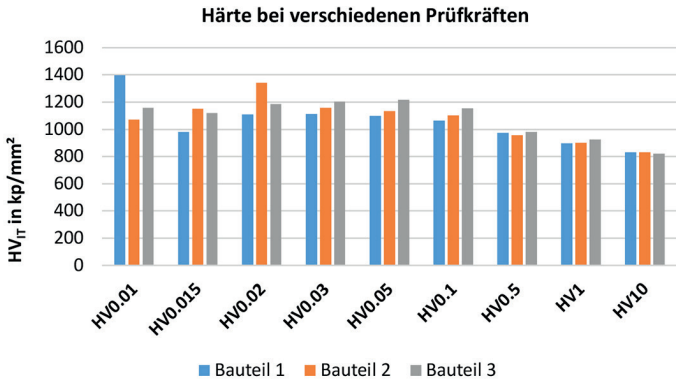

Abb. 6: Härtewerte an drei Musterteilen für unterschiedliche Prüflasten

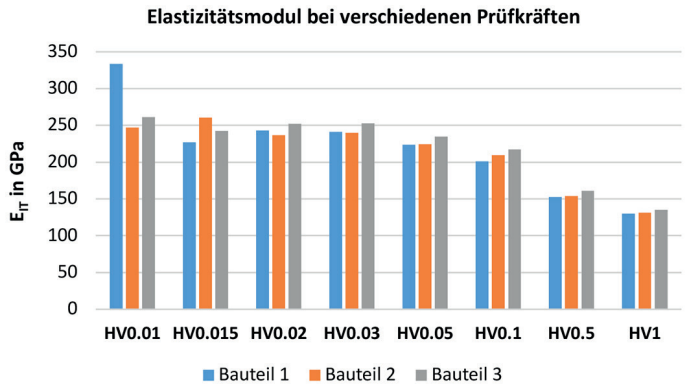

Abb. 7: Werte für den Elastizitätsmodul an drei Musterteilen für unterschiedliche Prüflasten

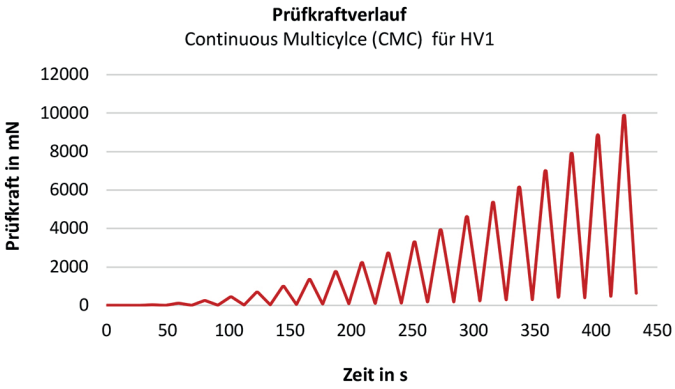

Abb. 8: Prüfkraftverlauf gemäß CMC für eine Härtemessung HV1

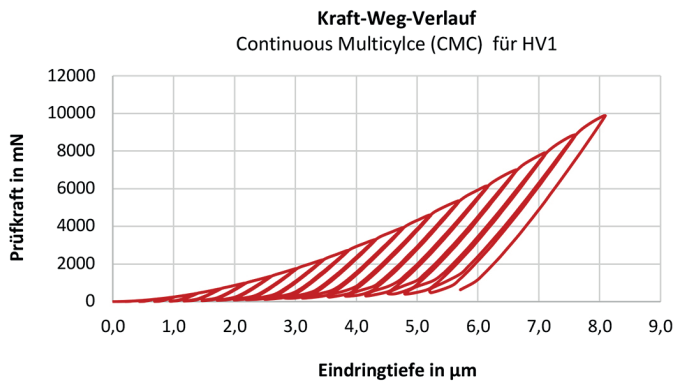

Abb. 9: Kraft-Weg-Verlauf gemäß CMC für eine Härtemessung HV1

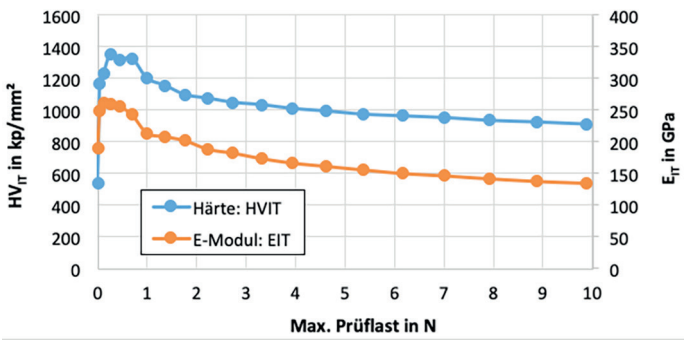

Abb. 10: Verlauf der Oberflächenhärte und des E-Moduls in Abhängigkeit von der Prüflast

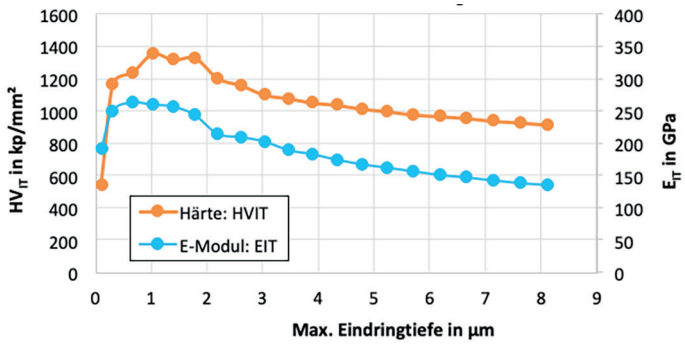

Abb. 11: Härte und Elastizitätsmodul an der Oberfläche eines Werkstücks bei unterschiedlichen Eindringtiefen

Zunahme der maximalen Kraft entweder linear oder quadratisch erfolgen.

Aus dem Verlauf der Messwerte in *Abbildung 10* ist erkennbar, dass die Werte zunächst mit zunehmender Prüfkraft größer werden, dann ein Plateau erreicht wird und anschließend nehmen die Werte für Härte und Elastizitätsmodul mit zunehmender Prüfkraft wieder ab.

Die Prüfkraftbereiche mit starker Veränderung der Messwerte sind ungeeignet zur Bestimmung der Festigkeitskennwerte. Denn eine geringe Variation der Prüfkraft hat große Änderungen der Messwerte zur Folge. Geeignet ist der Prüfkraftbereich mit guter Stabilität der Messwerte, der im Diagramm im Bereich von 100 mN bis 700 mN liegt. In diesem Bereich muss die Prüfkraft gewählt werden, um stabile und für das tribologische Verhalten relevante Festigkeitskennwerte zu bestimmen.

Die starke Veränderung der Messwerte für Härte und Elastizitätsmodul bei geringen Prüfkräften hat ihre Ursache darin, dass bei geringen Eindringtiefen im Bereich der Rauheit gemessen wird. Zudem werden dabei auch Inhomogenitäten des Materials erfasst. Nach dem Plateau im Bereich bis etwa 1,8 µm Eindringtiefe nähern sich die Werte für Härte und Elastizitätsmodul den Werten im Kernbereich (*Abb. 11*). Das sind die Bereiche, die durch die klassischen Prüfverfahren analysiert werden, aber nicht repräsentativ für das tribologische Verhalten sind.

5 Prüfungen am STZ Tribologie

Das Steinbeis-Transferzentrum Tribologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr) führt Oberflächenanalysen und Materialprüfungen an der Dualen Hochschule in Karlsruhe durch. Aufgrund der Laborausstattung können umfassende Untersuchungen und Projekte erfolgen. Es werden Einzelanalysen, ebenso wie komplette Projekte zur Verschleißreduzierung durchgeführt. Dabei wird sich der Elemente der analytischen Tribologie bedient, um nachhaltige Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Das Steinbeis-Transferzentrum arbeitet auf der wissenschaftlichen Grundlage einer Hochschule, mit der Handlungskompetenz eines Industrieunternehmens.

➲ **www.steinbeis-analysezentrum.com**