

Kapitel 1

Hinweise zur Laborarbeit

1.1 Laborordnung

Diese Laborordnung dient dazu, einen reibungslosen und unfallsicheren Laborbetrieb zu ermöglichen. In den Laboren darf nur arbeiten, wer sich an diese Laborordnung hält. Mit der Aufnahme einer Arbeit in einem der Labore erkennen Sie diese Laborordnung an.

1.1.1 Allgemeines

- Personen, die nicht im Besitz der erforderlichen körperlichen und geistigen Voraussetzungen sind, kann die Arbeit im Labor nicht gestattet werden.
- Schwangere dürfen den Laborbereich nur eingeschränkt nutzen (Rücksprache mit dem Laborpersonal).
- Das Essen, Trinken und Rauchen im Labor ist unzulässig.
- Unbefugten ist der Zutritt zu den Laboratorien verboten.
- Die Einrichtungen des Labors sind schonend zu behandeln.
- Jegliche Geräte etc., die nicht zum Bestand des Labors gehören, dürfen nur mit Genehmigung der Laborleitung benutzt werden.
- Nicht nur im eigenen Interesse sind die Sicherheitsbestimmungen streng zu beachten. Personenschäden durch Unfall unterliegen den Haftungsgrundsätzen der Hochschule.
- Die Flucht- und Rettungswege sind freizuhalten. Die Brandschutzordnung ist zu beachten.

1.1.2 Schutzmaßnahmen und Verhaltensregel

- Die Laboratorien sind sauber und in einem ordnungsgemäßen Zustand zu halten. Der Fußboden ist von abgestellten Gegenständen freizuhalten. Die Brandlasten sind auf ein Minimum zu begrenzen.
- Der Arbeitsplatz ist jeweils nach Beendigung der Arbeit in ordnungsgemäßem Zustand (sauber und aufgeräumt) zu verlassen.

- Nicht isolierte Teile können Spannung führen! Daher ist es notwendig, die entsprechenden Unfallverhütungs- und VDE-Vorschriften zu beachten (einzusehen in der HS-Bibliothek).
- Versuchsauf- und -umbau dürfen nur im spannungslosen Zustand durchgeführt werden.
- Zur sicheren Durchführung von Praktikumsversuchen gehört auch eine ausreichende Vorbereitung. Erkennbar nicht ausreichende Kenntnisse oder Vorbereitung führen zum Ausschluss vom Versuch oder aus dem Labor.
- Nach Versuchsende sind alle Geräte an ihren ursprünglichen Standort zu bringen. Defekte Geräte sind sofort dem Aufsichtspersonal zu melden.

1.1.3 Datenschutz

- Verwenden Sie nur die für die jeweilige Aufgabenstellung benötigte und Ihnen genannte Software.
- Lassen Sie keine Software laufen, die als Angriff auf andere Rechner angesehen werden kann. (Port-Scans führen bei manchen Rechnern im HS-/RUB-Netz “automatisch” zu einem Strafantrag.)
- Die in den Laborbereichen zur Verfügung gestellten Daten und Datenträger, sowie alle Programme unterliegen dem Daten- bzw. dem Urheberschutz. Sie dürfen weder Dritten zugänglich gemacht werden, noch zu anderen als Ausbildungszwecken verwendet werden.
- Zugriffe auf das HS-Netzwerk und auf das Internet sind ausdrücklich nur zu wissenschaftlichen und zu Lehrzwecken gestattet. Halten Sie sich ganz streng an diese Bedingung. Zuwiderhandlungen verletzen den Wissenschaftsnetzvertrag der HS Bochum.
- Vermeiden Sie auf jeden Fall das Laden / Betrachten von Inhalten, das diese Bedingung verletzt.
- Zuwiderhandlungen gegen die genannten Bedingungen führen zum Ausschluss aus dem Labor. Sie können insbesondere im Zusammenhang mit Netz- und Softwarenutzung und Datenschutz auch Strafverfahren zur Folge haben!

1.1.4 Notfalleinrichtungen

- Zu den Notfalleinrichtungen gehören Handfeuerlöscher, Löschdecke, Notdusche, Augendusche, Hauptschalter für Elektroversorgung, Verbandkästen.
- Alle Notfalleinrichtungen dürfen weder verstellt noch verhängt werden. Sie sind gut erkennbar und frei zugänglich zu halten.
- Alle Beschäftigten müssen die Standorte der Notfalleinrichtungen kennen und über ihre Funktion unterrichtet sein.

- Handfeuerlöscher, die benutzt oder auch nur angebraucht wurden, sowie beschädigte (auch bei beschädigter Plombe) sind zwecks Austauschs umgehend beim internen Gebäudeservice zu melden (Tel.: 02056 5848-16701 bzw. 02056 5848 16700).

1.1.5 Erste Hilfe-Leistung

- Bei allen Hilfeleistung auf die eigene Sicherheit achten.
- Bei Unfällen mit leichten Verletzungen ist der Ersthelfer zu kontaktieren. Bei Unfällen mit schwerwiegenden Verletzungen sowie mit Verletzungen, deren Art und Schwere nicht eingeschätzt werden kann, ist unverzüglich ein Notarzt zu alarmieren und ein Ersthelfer zu kontaktieren.
- Bis zum Eintreffen des Notarztes Erste Hilfe leisten.

1.1.6 Notrufnummer (Feuerwehr / Krankentransport / Polizei)

- Telefon: 112

1.1.7 Entsorgung

- Die Entsorgung von Gefahrstoffen und Elektronikschrott erfolgt durch den internen Gebäudeservice (Tel.: 02056 5848-16701 bzw. 02056 5848 16700).

1.2 Hinweise zur Sicherheit

Die Arbeit im Labor erfordert im besonderen Maße Ihre Sorgfalt und Vorsicht. Unbeschadet der in der Laborordnung festgeschriebenen Verhaltensregeln sind die folgenden Hinweise für Sie für *jeden* Versuch wichtig:

- Prüfen Sie zu **Ihrer eigenen Sicherheit** die Funktion des **Not-Aus-Schalters** an Ihrem Labortisch (bei nicht funktionierendem Not-Aus-Schalter rufen Sie den/die Betreuer/in).
- Beachten Sie: an Ihrem Labortisch befinden sich Steckdosen, die **nicht über Not-Aus-Schalter gesichert** sind (siehe Kennzeichnung).
- Prüfen Sie zu **Ihrer eigenen Sicherheit** die Funktion des **Fehlerstrom- (FI-) Schutzschalters** an Ihrem Labortisch (bei nicht funktionierendem FI-Schutzschalter rufen Sie den/die Betreuer/in).

Kapitel 2

Zugversuch

2.1 Versuchsziel

Es soll die Festigkeit metallischer Prüflinge im Zugversuch bestimmt werden.

2.2 Theorie zum Versuch

2.2.1 Festigkeit als Werkstoffeigenschaft

Von Konstruktionswerkstoffen wird (naiv formuliert) erwartet, dass sie möglichst “stabil” sind. Bei genauerer Betrachtung gibt es jedoch keine einzelne Werkstoffeigenschaft, die diese Qualität beschreibt. Aus der Vielzahl unterschiedlicher mechanischer Werkstoffeigenschaften sollen im Praktikum zu “Werkstoffe des Maschinenbaus” drei besonders wichtige untersucht werden: die Festigkeit, die Härte und die Zähigkeit. Im vorliegenden Versuch wenden wir uns zunächst der Festigkeit zu.

Konkret interessieren wir uns für das Verhalten eines Werkstoffs unter quasistatischer, uniaxialer Zugbelastung. “Quasistatisch” meint dabei, dass die Belastung so langsam aufgebracht wird, dass ihr Effekt von dem einer zeitlich unveränderlichen Belastung nicht zu unterscheiden ist (insbesondere, dass die Belastung nicht ruckartig eingebracht wird; solche Einflüsse betrachtet man bspw. im Kerbschlagbiegeversuch). Als “Zugbelastung” bezeichnet man eine Belastung, deren Wirkung zu einer Verlängerung des Bauteils in Richtung der Belastung führt. Aufgrund des dritten NEWTONschen Gesetzes benötigt man dabei stets ein Widerlager und ein bewegliches Lager, das sich vom Widerlager entfernt, um eine solche Zugbelastung aufzubringen. “Uniaxial” bedeutet dabei, dass über den gesamten relevanten Bereich der Probe (den, der geprüft wird) die Kraftlinien parallel und entlang der Richtung der Zugbewegung liegen. Für den Zugversuch benötigt man daher eine sog. Zugprüfmaschine bzw. Werkstoffprüfmaschine (häufig auch einfach “Prüfmaschine”), die eine langsame, steuer- und messbare Wegänderung des beweglichen Lagers erzeugt, und gleichzeitig die wirkende Kraft misst. Auf diese Weise werden sog. Kraft-Weg-Kurven erzeugt.

2.2.2 Elastische Verformung

Man beobachtet nun im Versuch verschiedene Bereiche im Kraft-Weg-Diagramm. Zunächst beobachtet man einen linearen Bereich, der dem HOOKEschen Gesetz folgt:

$$F = -k\Delta L \quad (2.1)$$

mit F der wirkenden Zugkraft und ΔL der durch diese Kraft verursachten Änderung der absoluten Probenlänge L . k ist dann die Federkonstante der Werkstoffprobe. Das Vorzeichen in der Gleichung deutet an, dass die äußere Kraft *gegen* den Werkstoff arbeitet, d.h. der Werkstoff übt eine rücktreibende, negative Kraft aus. Tatsächlich trägt man jedoch im Zugversuch meist eine positiv gewertete Zugkraft gegen eine positiv gewertete Verlängerung auf. Dieses Konvention entspricht nicht der oben gegebenen (letztere ist in der Physik üblich), kann jedoch natürlich widerspruchsfrei ebenfalls verwendet werden, solange man dies *konsistent* tut. Um keine Verwirrung in die Formeln zu bringen, belassen wir das negative Vorzeichen für unsere Betrachtungen in der Formel.

Offensichtlich skaliert die Kraft, die für eine bestimmte Längenänderung notwendig ist, mit dem Querschnitt der Probe. Es ist daher sinnvoll, nicht die Kraft zu betrachten, sondern die Kraft bezogen auf den Probenquerschnitt S . Diese bezogene Größe bezeichnet man als Zugspannung:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

Ebenso offensichtlich skaliert die Längenänderung, die mit einer bestimmten Zugkraft erzielt werden kann, mit der absoluten Länge der Probe. Es ist daher sinnvoll, nicht die Längenänderung zu betrachten, sondern die Längenänderung bezogen auf die absolute Länge. Diese bezogene Größe bezeichnet man als Dehnung:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.3)$$

Setzt man diese beiden bezogenen Größen in das HOOKEsche Gesetz ein, so erhält man:

$$\sigma = - \left(k \frac{L}{S} \right) \epsilon = -E\epsilon \quad (2.4)$$

Diese so neu eingeführte Größe E bezeichnet man als Elastizitätsmodul (teilw. auch kurz E-Modul, bzw. engl. *Young's modulus*). Er bezeichnet für eine elastische Verformung (so lange sich also die Kraft-Weg-Kurve linear verhält) das Verhältnis aus Spannung und Dehnung, und ist daher eine Werkstoffkenngröße, die dieselbe Funktion hat, wie die Federkonstante als Bauteilkenngröße. Stahl hat typischerweise einen Elastizitätsmodul im Bereich von $200 \text{ GPa} = 200 \text{ kN/mm}^2$.

Während sich der Stahl in Zugrichtung ausdehnt, kontrahiert er quer dazu—andernfalls erführe er eine Volumen- und Dichteänderung entsprechend der erzeugten Dehnung. Dieser Effekt ist bspw. von gedehnten Gummibändern bekannt (auch wenn es sich bei Gummi nicht im gleichen Sinne wie bei Metallen um eine elastische Dehnung handelt). Dennoch ist diese sog. Querkontraktion *nicht* genau so groß, dass das Werkstoffvolumen erhalten bliebe; das Volumen vergrößert sich tatsächlich, nur eben nicht so stark, wie es ohne Querkontraktion der Fall wäre. Um das Ausmaß der Querkontraktion zu beschreiben, führt man eine sog. Querkontraktionszahl ein (teilw. auch als POISSON-Zahl bezeichnet, als Formelzeichen sind das μ und das ν üblich):

$$\mu = -\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} \quad (2.5)$$

Dabei ist ϵ_{\parallel} die Dehnung in Zugrichtung (gerade die zuvor eingeführte Dehnung ϵ) und ϵ_{\perp} die Dehnung quer zur Zugrichtung. Da es sich in dieser Richtung um eine Kontraktion handelt, wurde die Gleichung mit negativem Vorzeichen notiert. Die Querkontraktionszahl beschreibt also das Verhältnis von Dehnung in Belastungsrichtung zu Kontraktion quer zur Belastungsrichtung. Das gesamte Volumen der Probe berechnet sich dann jederzeit aus:

$$V = SL = S_o(1 + \epsilon_{\perp})^2 L_o(1 + \epsilon_{\parallel}) \quad (2.6)$$

mit S_o bzw. L_o dem Querschnitt bzw. der Länge der Probe vor der elastischen Verformung. Damit das Volumen erhalten ist, muss gelten:

$$1 = (1 - \mu\epsilon_{\parallel})^2(1 + \epsilon_{\parallel}) \Leftrightarrow 1 - \mu\epsilon_{\parallel} = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon_{\parallel}}} \approx 1 - \frac{1}{2}\epsilon_{\parallel} \quad (2.7)$$

Im letzten Schritt wurde eine TAYLOR-Reihenentwicklung bis zur linearen Ordnung durchgeführt. Daraus folgt, dass Volumenerhalt gerade für eine Querkontraktionszahl von $\mu = 0.5$ gegeben wäre; tatsächlich findet man für Stahl typische Werte im Bereich von 0.3, d.h. das Volumen vergrößert sich bei elastischer Verformung unter Zugspannung.

2.2.3 Plastische Verformung

Als elastische Verformung bezeichnet man den linearen Anteil, der sich zurückformt, wenn die Belastung entfernt wird. Wenn man nun jedoch die Belastung immer weiter erhöht, kommt es zusätzlich zu einer plastischen Verformung, die sich *nicht* zurückformt, wenn die Belastung entfernt wird. In der Kraft-Weg-Kurve wird das deutlich durch ein Abweichen von der HOOKEschen Gerade (die Länge ändert sich schneller für steigende Kraft, als es der Federkonstanten bzw. Steifigkeit der Probe entspricht). Diese plastische Verformung geht zurück auf ein Aufbrechen von Bindungen im Kristallgitter, und die Ausbildung neuer Bindungen; um das zurückzubilden, bräuchte es eine erneute Kraft in entgegengesetzte Richtung (das Reduzieren der zuerst aufgebrachten Kraft genügt nicht).

Es ist nun so, dass es in einem Kristallgitter i.d.R. einfacher ist, eine Bindung quer “abzuscheren”, als sie längs “abzureißen”. Das heißt, der Werkstoff versagt bevorzugt unter einer Belastung, für die die Kraft tangential an der Versagensebene liegt, nicht normal darauf. Eine solche Kraft bezeichnet man als Schub- bzw. Scherkraft, bzw. bezogen auf die belastete Fläche als Schub- bzw. Scherspannung:

$$\tau = \frac{F_{\tan}}{S} \quad (2.8)$$

Diese Definition sieht genauso aus wie die der Zugspannung, nur dass für die Schubspannung die Kraft senkrecht auf der Oberflächennormalen, also in der Ebene Fläche A liegt; für die Zugspannung war die Kraft parallel zur Oberflächennormalen, also senkrecht zur Fläche A . Im Zugversuch wird nun jedoch gezielt eine Zugspannung eingebracht. Trotzdem findet plastisches Versagen bevorzugt durch Schubspannungen statt. Betrachten wir ein einfaches geometrisches Argument, um das einzusehen (daraus folgt auch eine Erkenntnis über die erwartete Bruchgeometrie).

Wir betrachten eine beliebige, schräge Ebene in einer Werkstoffprobe, für die wir einen rechteckigen Querschnitt S_o annehmen (vgl. Abb. 2.1). Ziel ist es, die Spannungsverhältnisse so einer Ebene zu verstehen. Die Ebene liegt unter einem Winkel ϑ zur Ebene, die senkrecht auf der Belastungsrichtung liegt. Wenn also $\vartheta = 0$ ist, dann entspricht diese

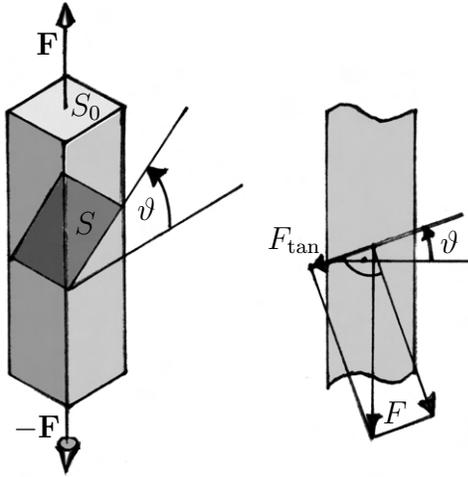


Abbildung 2.1: Bruchgeometrie im Gleitbruch. Dunkelgrau ist die Bruchfläche S dargestellt, hellgrau die Fläche S_o .

Ebene einfach der Querschnittsfläche S_o . Falls $\vartheta \neq 0$ ist, dann gilt für die Fläche dieses Schnitts durch unsere Werkstoffprobe:

$$S = \frac{S_o}{\cos \vartheta} \quad (2.9)$$

Je größer also der Winkel ϑ ist, desto größer wird die belastete Fläche, und aus diesem Grunde wird die Spannung (Kraft pro Fläche) bei gegebener Fläche umso kleiner. Gleichzeitig wirkt die äußere Zugspannung ja stets senkrecht zur Fläche S_o . Wir zerlegen nun diese Kraft in eine Normal- und eine Tangentialkomponente auf der schrägen Ebene. Die Normalkomponente wird offensichtlich umso kleiner, je größer der Winkel ϑ ist.

Für Zugbelastung kann man also feststellen, dass sowohl die Fläche am kleinsten ist, als auch die Normalkraft am größten, wenn die Fläche senkrecht auf der Zugrichtung liegt. Also ist auch die Zugspannung selbst am größten, wenn die potentielle Bruchebene senkrecht zur Belastungsrichtung liegt. Diese Bruchgeometrie ist typisch für sprödes Versagen (kristalline, glitzernde Oberfläche quer zur Belastungsrichtung). Man spricht von einem spröden Gewaltbruch bzw. von einem Spaltbruch.

Für Scherbelastung gilt zwar nach wie vor, dass die Fläche mit zunehmenden Winkel ϑ zunimmt, gleichzeitig nimmt aber auch die Tangentialkomponente der Kraft zu; diese Effekte können sich teilw. ausgleichen. Betrachten wir daher die Winkelabhängigkeit der Schubspannung. Für die Fläche gilt Gleichung (2.9), für die Tangentialkomponente der Kraft gilt:

$$F_{\text{tan}} = F \sin \vartheta \quad (2.10)$$

Für die Schubspannung folgt entsprechend:

$$\tau = \frac{F \sin \vartheta}{S_o / \cos \vartheta} = \sigma \sin \vartheta \cos \vartheta = \frac{\sigma}{2} \sin 2\vartheta \quad (2.11)$$

In der letzten Umformung wurden ein Additionstheorem der trigonometrischen Funktionen verwendet. Der Sinus wird bei 90° maximal, also wird die Schubspannung für einen Winkel $\vartheta = 45^\circ$ maximal. Für einen sog. zähen Gewaltbruch bzw. Gleitbruch beobachtet man daher eine Bruchfläche unter ca. 45° zur Belastungsrichtung, *obwohl* durch diese Geometrie die Trennfläche größer ist, als unbedingt erforderlich wäre.

Eine weitere Information erhalten wir aus Gleichung (2.11). Wenn wir diejenige mechanische Zugspannung als R_e bezeichnen, bei der erstmals eine plastische Verformung

unter uniaxialer Zugspannung beobachtet wurde, und als τ_p die zugehörige Schubspannung, dann gilt:

$$\tau_p = \frac{R_e}{2} \quad (2.12)$$

R_e bezeichnet man als Streckgrenze, τ_p als Scherfestigkeit.

Wir hatten zuvor für die elastische Verformung neben der Dehnung in Längsrichtung auch die Kontraktion in Querrichtung betrachtet und gefunden, dass die elastische Verformung i.A. *nicht* volumenerhaltend ist (es wird elastische Energie in den Werkstoff eingebracht, die diese Volumenänderung ggü. dem Gleichgewichtszustand geringster Energie stabilisiert). Da die plastische Verformung auch ohne äußere Krafteinwirkung bleibt, ist das letzte Argument hier nicht gegeben, und sie wird daher weitgehend volumenerhaltend sein. Es findet also eine Formänderung statt, aber keine Volumenänderung. Wenn die Probe plastisch verlängert wurde, reduziert sich ihre Querschnitt gerade so, dass das Volumen unverändert bleibt (wie beim Drahtziehen, wo der Draht ja auch mit jeder Zugstufe nicht nur dünner, sondern entsprechend auch länger wird).

2.2.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Im Zugversuch nimmt man nun das Kraft-Weg-Verhalten auf mit dem Ziel, daraus Information zu erhalten über das Spannungs-Dehnungs-Verhalten (die wesentlichen Gleichungen waren bislang formuliert in den werkstoffspezifischen Größen Spannung σ und Dehnung ϵ). Während die Umrechnung nach Gleichungen (2.2) und (2.3) formal hinreichend einfach ist, ist jedoch zu beachten, dass sich die Probe ja im Versuch verformt, so dass stets zu unterscheiden ist zwischen dem Anfangsquerschnitt S_o und dem momentanen Querschnitt S (gemeint ist stets die Querschnittsfläche, nicht der Durchmesser!), sowie zwischen der Anfangsmesslänge L_o und der momentanen Länge L . Zur weiteren Unterscheidung betrachtet man noch den kleinsten Querschnitt nach dem Bruch S_u und die Messlänge nach dem Bruch L_u (also entlastet).

Wichtig ist nun, dass zwar S_o und L_o vor dem Experiment gemessen werden können, sowie S_u und L_u nach dem Experiment, es i.d.R. jedoch keine einfache Möglichkeit gibt, S und L kontinuierlich zu messen. Es ist daher nicht unmittelbar möglich, die wahre Spannung (engl. *true stress*) σ und die wahre Dehnung (engl. *true strain*) ϵ im Experiment zu kennen. Statt dessen arbeitet man mit der sog. Spannung bzw. Nennspannung (engl. *engineering stress*) R und der Dehnung (engl. *engineering strain*) e . In vielen Fällen werden hierbei trotzdem die Symbole σ und ϵ verwendet.

Sowohl die Verwendung der Dehnung statt der wahren Dehnung, als auch die Verwendung der Nennspannung statt der wahren Spannung hat einen merklichen Einfluss auf die Form der Messkurve. Die Dehnung setzt sich zusammen aus einem elastischen und einem plastischen Anteil. Das kann man quantifizieren, indem man die Messlänge nach dem Bruch L_u mit der Anfangsmesslänge L_o vergleicht, bzw. die Veränderung der Messlänge mit der Anfangsmesslänge:

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \quad (2.13)$$

Die so erhaltene Größe bezeichnet man als Bruchdehnung. Sie stellt eine wichtige Werkstoffkenngröße dar; dennoch ist sie nicht unabhängig von der Probengeometrie (was für reine Stoffgrößen der Fall sein sollte). Das liegt daran, dass die Probe in den meisten Fällen zum Zeitpunkt des Bruchs nicht gleichmäßig verformt ist.

Während der Dehnung werden die folgenden Stadien unterschieden:

- elastische Dehnung: entspricht der HOOKESchen Gerade, die Querkontraktion ist gleichmäßig über die Probe verteilt und entspricht der POISSON-Zahl.
- Gleichmaßdehnung: plastische Verformung, die Querkontraktion ist gleichmäßig über die Probe verteilt und entspricht Volumenerhalt.
- Einschnürdehnung: plastische Verformung, allerdings kommt es (häufig nahe dem Zentrum der Probe) zu einer Einschnürung. Dadurch wird die Spannung in diesem Bereich größer (Kraft ist entlang der Probe konstant, drittes NEWTONSches Gesetz, während die Fläche hier verkleinert ist), und die weitere plastische Verformung findet bevorzugt in diesem Bereich statt, wodurch die Einschnürung verstärkt wird.

Der Bruch findet schließlich nahe der engsten Stelle der Einschnürung statt. Gleichzeitig hängen Einschnürdehnung und Gleichmaßdehnung unterschiedlich mit der Anfangsmesslänge zusammen. Während bspw. die Längenänderung aufgrund der Gleichmaßdehnung einfach mit der Anfangsmesslänge skaliert, wird die Längenänderung aufgrund der Einschnürdehnung kaum von der Probenlänge abhängen (eher von der Länge des eingeschnürten Bereichs). Da die Bruchdehnung beide Anteile enthält (nicht aber die elastische Dehnung, da die ja nach dem Bruch zurückformt), ist sie selbst abhängig von der Probengeometrie. Falls man das Ergebnis nicht weiter indiziert, geht man von Proben aus für die gilt:

$$L_o = 5\sqrt{\frac{4}{\pi}S_o} \quad (2.14)$$

Für runden Querschnitt ist das erfüllt, falls die Anfangsmesslänge dem fünffachen Durchmesser entspricht. Das ist für unseren Versuch der Fall (Anfangsmesslänge 30 mm, Durchmesser rund 6 mm). Abweichende Probengeometrien werden als Index am Formelzeichen A vermerkt.

In Abb. 2.2 sind verschiedene Anteile der Dehnung graphisch anhand einer beispielhaften Spannungs-Dehnungskurve unterschieden. Es ist A_t die gesamte Dehnung beim Bruch (totale Dehnung, elastischer und plastischer Anteil), A selbst ist hingegen nur der plastische Anteil, der nach dem Bruch gemessen wird. A_{gt} ist die gesamte Dehnung bei Höchstkraft (elastischer und plastischer Anteil), A_g ist hingegen nur der plastische Anteil der Gleichmaßdehnung. $A - A_g$ ist entsprechend der plastische Anteil der Einschnürdehnung. Der Unterschied besteht jeweils darin, dass man, um den plastischen Anteil zu erhalten, mit einer Steigung entsprechend der HOOKESchen Gerade von der Spannungs-Dehnungskurve ausgehend auf die Abszisse projiziert. Für eine senkrechte Projektion erhält man sowohl den elastischen als auch den plastischen Anteil der Dehnung.

In der gleichen Weise, in der man eine Bruchdehnung angibt, wird auch die Brucheinschnürung angegeben:

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \quad (2.15)$$

Das Vorzeichen im Zähler ist hier gerade anders herum als in Gleichung (2.13), weil der Querschnitt kleiner wird, während die Messlänge größer wird im Verlaufe des Experiments. Dazu wird der Durchmesser der Probe vor der Experiment, sowie im Bereich größter Einschnürung nach dem Experiment mit dem Messschieber bestimmt. Beachten Sie unbedingt, dass Sie auf diese Weise nicht S_o und S_u direkt bestimmen (also keine Flächen, sondern Längen)!

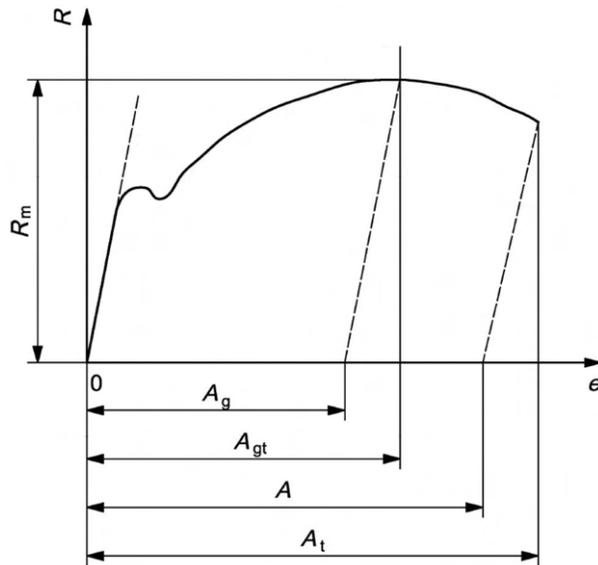


Abbildung 2.2: Definition der Dehnungen in der Spannungs-Dehnungs-Kurve (adaptiert aus [DINf]).

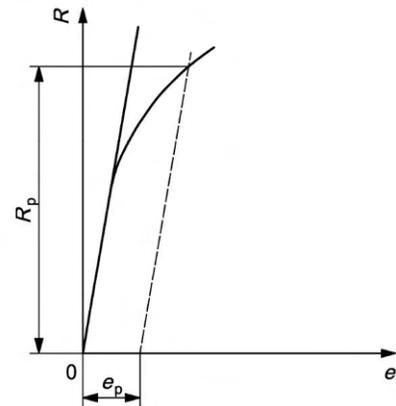


Abbildung 2.3: Definition der Dehngrenze in der Spannungs-Dehnungs-Kurve [DINf].

Weitere charakteristische Kennwerte erhält man aus dem Kraft-Weg- bzw. dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm (letzteres erhält man durch Umskalieren mit dem Anfangsquerschnitt und der Anfangsmesslänge). Man beobachtet also zunächst einen steilen, linearen Anstieg, der dem elastischen Verhalten entspricht. In der Regel kann man jedoch hieraus nicht sofort den Elastizitätsmodul bestimmen, weil die gemessene Verformung (die ja im elastischen Bereich sehr gering ist) sowohl eine Verformung der Prüfmaschine als auch des Prüflings enthält. Erst für die wesentlich größeren, plastischen Verformungen des Prüflings ist eine quantitative Interpretation der gemessenen Längenänderungen möglich.

Wenn die Streckgrenze R_e erreicht wird, weicht die sog. Verfestigungskurve von der HOOKEschen Gerade ab, und fällt unter diese ab (mehr Dehnung, weniger Spannung als im elastischen Fall). Für eine spröde Probe folgt bald darauf der Bruch und das Diagramm bricht ab (kaum plastische Verformung möglich). Für eine eher duktile Probe folgt auf die elastische Verformung ein mehr oder weniger breiter Bereich der plastischen Verformung.

Falls der Übergang aus dem elastischen in den plastischen Bereich sehr allmählich ist, ist es schwierig möglich, R_e sicher zu bestimmen. Statt dessen bestimmt man ersatzweise die sogenannte Dehngrenze R_p , indem man ein Kriterium für eine prozentuale Abweichung von der HOOKEschen Gerade verwendet. Konkret geht man folgendermaßen vor. Man zeichnet eine Parallele zur HOOKEschen Gerade, waagrecht (entlang der Dehnungsachse) verschoben um eine vorgegebene plastische Dehnung e_p , bspw. 0.2 % (vgl. Abb. 2.3). Dann identifiziert man den Schnittpunkt mit der Verfestigungskurve, und liest den zugehörigen Spannungswert als (in diesem Fall) 0.2 %-Dehngrenze $R_{p0.2}$ ab. Es sind verschiedene Kriterien üblich, daher muss die Zahl 0.2 in jedem Fall mit angegeben werden.

Allerdings beobachtet man nicht in allen Fällen so einen weichen Übergang in die plastische Verformung. Teilweise sieht man auch einen sehr klar identifizierbaren Knick, wie in Abb. 2.4 dargestellt. In diesem Fall ist die Bestimmung einer Dehngrenze nicht sinnvoll. Allerdings ist im linken und mittleren Beispiel auch die Angabe einer Streckgrenze nicht eindeutig möglich. Aus diesem Grund führt man eine untere Streckgrenze, R_{eL} , und eine obere Streckgrenze, R_{eH} , ein (von engl. *lower* und engl. *higher*), wie in der

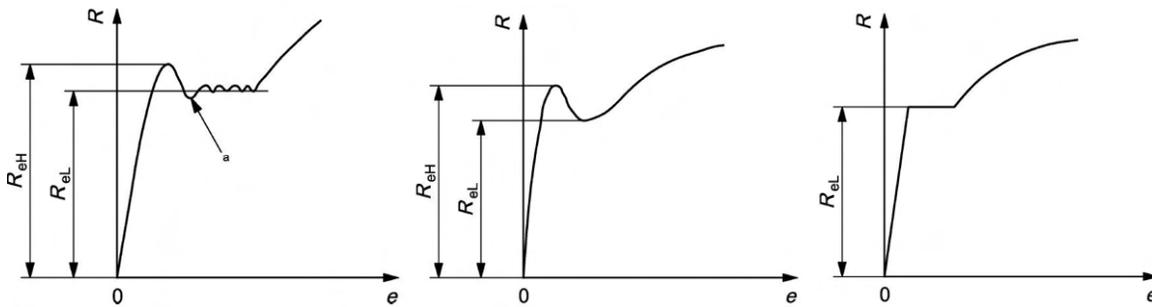


Abbildung 2.4: Definition der oberen und der unteren Streckgrenze in der Spannungs-Dehnungs-Kurve [DINf].

Abbildung dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass für die obere Streckgrenze die höchste Kraft abgelesen wird vor dem Knick, für die untere Streckgrenze jedoch nicht die niedrigste unmittelbar danach (das ist ein Überschwinger, gekennzeichnet durch das Zeichen a); statt dessen wird die niedrigste Kraft *nach* diesem Überschwinger verwendet.

Das ausgeprägte Plateau im linken Teilbild in Abb. 2.4 ist charakteristisch für eine sog. LÜDERS-Dehnung, die auch in Form diagonaler Versetzungstreifen auf der Probe optisch sichtbar sein kann. Das ist kein universelles Merkmal von Spannungs-Dehnungs-Kurven, und ist in vielen Fällen nicht vorhanden. Gibt es “nur” einen einfachen Überschwinger in der Kurve, verwendet man einfach den Hoch- und Tiefpunkt, um R_{eH} und R_{eL} zu bestimmen (mittleres Teilbild). Gibt es keinen Überschwinger, sondern “nur” ein Plateau, so wird diese Kraft zur Angabe einer unteren Streckgrenze verwendet (rechtes Teilbild).

Mit Einsetzen der plastischen Verformung steigt die Kraft nun immer weiter an, obwohl der Querschnitt zunehmend reduziert wird (ohne der Messung zugänglich zu sein). Das bedeutet aber, dass die wahre Spannung sogar noch steiler ansteigt als die Nennspannung. Das liegt daran, dass durch die plastische Verformung das Gefüge modifiziert wird und “verfestigt” (sog. Kaltverfestigung). Aus diesem Grund nennt man die Kurve, die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt wird, auch “Verfestigungskurve”. Der Bereich der ansteigenden Verfestigungskurve markiert den Bereich der Gleichmaßdehnung.

Man beobachtet dann weiter, dass die Verfestigungskurve abfällt, bis sie beim Bruch der Probe abrupt abbricht (da in diesem Moment natürlich die Kraft auf null abfällt). Dieser Abfall bedeutet *nicht*, dass die wahre Spannung sich reduziert; tatsächlich verfestigt die Probe weiter, die wahre Spannung steigt unverändert. Der Grund für das Abfallen der Verfestigungskurve liegt im Einschnüren der Probe begründet. Durch die Einschnürung der Probe reduziert sich der wirksame Querschnitt drastisch, so dass trotz erhöhter wahrer Spannung die Kraft, und damit die Nennspannung abfällt. Das Maximum in der Verfestigungskurve markiert also das Einsetzen der Einschnürdehnung (bis zum Abbruch der Kurve).

Die höchste gemessene Nennspannung bezeichnet man als Zugfestigkeit R_m . Alle genannten Größen, R_e , R_p und R_m , werden als Nennspannungen angegeben werden, *nicht* als wahre Spannungen (daher auch das Formelzeichen R statt σ). Die wahre Spannung ist im Verlauf des Experiments *nicht* am höchsten, wenn R_m erreicht wird, sondern beim Bruch. Da $S_u < S_o$ ist sie insbesondere beim Bruch stets größer als R_m .

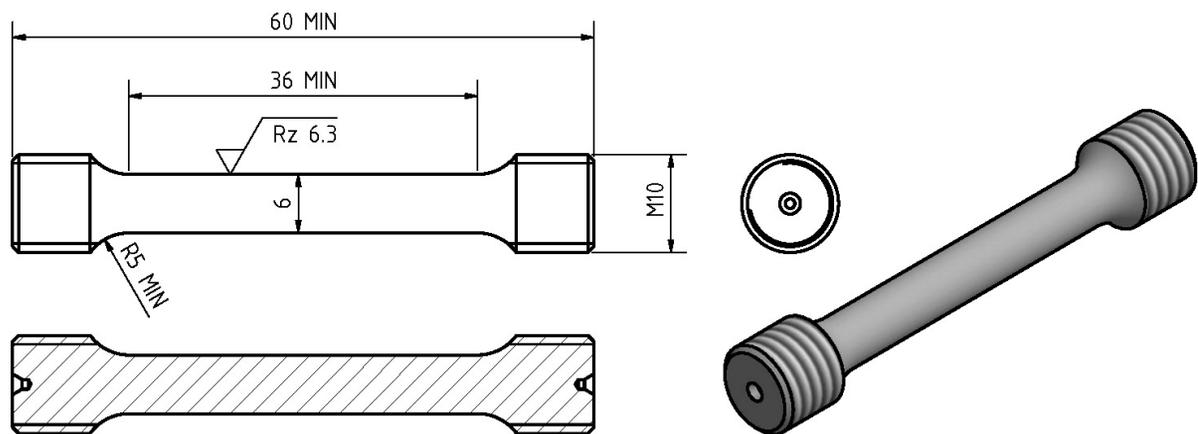


Abbildung 2.5: Im Praktikum verwendete Zugproben der Form B: Rundproben mit Gewindeköpfen (nach [DINb])

2.3 Versuchsdurchführung

Wir verwenden vorbereitete Probestäbe DIN 50125–B 6×30 aus unterschiedlichen Werkstoffen (vgl. Abb. 2.5). Beachten Sie, dass das Maß $L_c \geq 36$ mm *nicht* der Länge $L_o = 30$ mm entspricht! Die Prüflänge wird im Bereich konstanten Querschnitts festgelegt. Unter Verwendung einer (elektromechanischen) Zweispindel-Prüfmaschine ZWICK/ROELL Z020 TN (vgl. Abb. 2.6a) werden Kraft-Weg-Kurven aufgenommen. Die Durchführung des Versuchs erfolgt, soweit möglich, gemäß den Angaben in DIN EN ISO 6892-1 [DINf]. Danach ist vor Versuchsbeginn die Zugprobe auszumessen; insbesondere der Durchmesser d_o an den Enden und in der Mitte der Messlänge L_o , die zuvor durch Messmarken markiert wurde. Aus dem Mittelwert der einzelnen Durchmesser wird der Ausgangsquerschnitt S_o berechnet. Beachten Sie, dass die Messlänge L_o konventionsgemäß für diese Probenart als 30 mm angenommen und markiert wird, *obwohl* die Länge konstanten Durchmessers L_c etwas größer ist.

Danach wird die Probe momentenfrei in die vorgesehenen Vorrichtungen der Prüfmaschine eingespannt. Im Kraftpfad (zwischen Traverse und Maschinenbett) befinden sich schließlich folgende Teile (vgl. Abb. 2.6b):

- ① bewegliche Traverse
- ② Kraftaufnehmer Xforce 20 kN
- ③ Schulterprobenhalter (oben)
- ④ Einsatz für M10 Gewindekopfproben (oben)
- ⑤ Probe
- ⑥ Einsatz für M10 Gewindekopfproben (unten)
- ⑦ Schulterprobenhalter (unten)
- ⑧ festes Maschinenbett

Folgendes Vorgehen ist für die vorhandene Prüfmaschine einzuhalten (die eigentliche Bedienung der Maschine erfolgt ausschließlich durch den/die Betreuer/in oder unter Aufsicht des/der Betreuers/in). Der Computer wird eingeschaltet, das Programm testXpert II wird gestartet (blaues Würfel-Symbol). Es öffnet sich die Prüfvorschrift “Zugversuch_Praktikum”. Links unten sehen Sie ein Feld, in dem Sie Daten zur Prüfung eintragen können (Durchmesser der Probe und Versuchslänge, sowie Ihre Gruppennummer, den/die Namen des/der Prüfer/in, sowie den geprüften Werkstoff).



Abbildung 2.6: (a) Am Campus Velbert/Heiligenhaus verwendete Prüfmaschine ZWICK/ROELL Z020 TN. (b) Prüfraum ausgestattet für den Zugversuch. (c) Einsetzen der Probe inkl. Einsätzen. (d) Verspannen der Einsätze in den Schulterprobenhaltern. (e) Steuerung testControl II. Vergleiche Text für die Bezeichnung der Bauteile und Schalter.

Die Maschine wird eingeschaltet durch einen Drehschalter an der Steuerung testControl II (seitlich rechts unten); das Wechseln der Kontrollleuchte von blau auf orange auf grün wird abgewartet. Die Maschine wird dann durch den Taster ⑥ aktiviert (vgl. Abb. 2.6e). Entsprechend wird sie später durch den Taster ⑦ deaktiviert. Der darunter befindliche Notaus-Schalter ⑧ hat die seinem Namen entsprechende Funktion, und ist nur im Notfall (dann aber auch ohne Verzug!) zu betätigen. Die Taster ⑨ und ⑩ sind mit durchsichtigen Kappen abgedeckt, und werden im Normalbetrieb *nicht* verwendet. Sie dienen als sogenannte Notverfahrtaster, wenn die Maschine aus Sicherheitsgründen selbst abgeschaltet hat, und alle anderen Taster deaktiviert wurden. Falls ein solcher Notfall eintritt, werden diese Taster durch den/die Betreuer/in bedient. Die Verwendung dieser Taster birgt ein großes Verletzungs- und Beschädigungs-Risiko, da die vorgesehenen Sicherheitseinstellungen hiermit umgangen werden!

Im Normalbetrieb wird die Maschine statt dessen durch die Verfahrtaster ④ und ⑤ manuell verfahren. Die vorgesehene Prüfung läuft automatisiert ab über die Taster ①, ② und ③. Alle diese Taster sind alternativ auch in der Computer-Steuerung auf dem Bildschirm noch einmal realisiert. Diese können vollkommen gleichwertig zu den Tastern an der Maschine verwendet werden. ① startet die Messung, ② unterbricht bzw. stoppt sie zu einem beliebigen Zeitpunkt. ③ fährt die Ausgangsposition an. Diesen Taster dürfen *nur dann* betätigt werden, wenn sich *keine* Probe oder sonstige Hindernisse in der Maschine befinden! Andernfalls besteht das Risiko einer Beschädigung der Maschine, insbesondere des Kraftaufnehmers. Wenn sich keine Probe beziehungsweise Probenbruchstücke mehr in der Maschine befinden, wird dieser Taster nun als erstes betätigt. Da die Maschine unbelastet ist, kann die Schutztür geöffnet werden (das wird unter Belastung, also während des Versuchs nicht mehr möglich sein).

Die Probe ⑤ wird nun beidseitig in zwei Einsätze ④ und ⑥ eingeschraubt. In beiden Schulterprobenhaltern ③ und ⑦ ist die gerändelte Einstellwalze so zu verdrehen, dass sich der innen sichtbare, zylindrische Kern öffnet. Wenn beide Kerne weit genug geöffnet sind, kann die Probe inkl. Einsätzen eingeschoben werden (bis zum Zentrum, über einen Rastpunkt hinweg, vgl. Abb. 2.6c). Es werden dann die Einsätze relativ zur Probe so verdreht, dass die Einsätze satt zum Zentrum hin an den Schulterprobenhaltern anliegen. Dann wird die Probe vermittelt durch die Einstellwalzen mit den zylindrischen Kernen in die jeweils andere Richtung verspannt (vom Zentrum weg, vgl. Abb. 2.6d).

Dieses Vorgehen hat folgenden Zweck: Einerseits würde die Maschine zwar beim Öffnen ohnehin früher oder später den Formschluss erreichen, und die Probe ziehen. Ohne das Verspannen würde sich die gespeicherte elastische Energie jedoch beim Bruch schlagartig entladen, und kann dabei gegebenenfalls selbst den vergleichsweise robusten, hier verwendeten Kraftaufnehmer durch eine Kraftspitze zerstören. Das Verspannen stellt also sowohl einen wohlkontrollierten Start, als auch ein wohlkontrolliertes Ende der Messung sicher. Für die Zeit dazwischen wäre es tatsächlich nicht notwendig. Es ist nicht nötig oder wünschenswert, in jedwede Richtung mit viel Kraft zu verspannen. Handfest genügt in jedem Fall. Beachten Sie, welche Kraftübersetzung wir durch einen Gewindetrieb haben! Während der Einstellung wird die Kraftanzeige des Kraftaufnehmers beobachtet.

Es muss nun die Schutztür geschlossen werden. Ein sattes Einrasten stellt sicher (nicht mit Gewalt, aber doch mit Bestimmtheit die Tür schließen), dass die Maschine nicht bereits bei sehr geringen Kräften aus Sicherheitsgründen abschaltet. Die Messung wird durch Betätigen des Tasters ① gestartet. Der Monitor zeigt unmittelbar die aufgenommene Kraft-Weg-Kurve in absoluten Einheiten. Diese Kurve wird nach der Messung im PDF-

Format gespeichert und kann unmittelbar am Arbeitsplatz ausgedruckt werden.

Beachten Sie bei allen zerstörenden Prüfverfahren dass die Prüfung *nicht* wiederholbar ist und daher der erste Durchlauf in der Regel der einzige ist. Diese Prüfung ist nicht schwierig durchzuführen, bedarf aber natürlich, wie jede Prüfung, sorgfältiger Arbeit.

Nach dem Bruch der Probe wird diese aus der Prüfmaschine ausgespannt. Beachten Sie dabei zunächst, dass die Maschine auch nach detektiertem Bruch noch eine kurze Strecke weiter öffnet. Die Tür ist dann entriegelt, und die Einsätze samt Probenbruchstücken können in umgekehrter Reihenfolge wie beim Einspannen beschrieben wieder entnommen werden (also erst die Verspannung der Einsätze gegen die Halterungen lösen!). Je nach Qualität des Gewindes, das die Probe aufweist, verklemmen die Proben teilweise im Einsatz. In dem Fall wird eine Zange verwendet, um das Probenbruchstück zu greifen. Versuchen Sie niemals nicht (!), größere Kräfte auf gebrochene Metallteile mit der Hand auszuüben. Es besteht die Gefahr, sich an einem scharfkantigen Bruch zu verletzen. Der Einsatz kann gleichzeitig mit der Hand gehalten werden; die relativ geringen benötigten Kräfte sollten kein Spannwerkzeug notwendig machen.

Die Bruchstücke werden mit den Bruchflächen wieder zusammen gelegt. Nun wird an der Abstand der vorher aufgebracht Markierungen ausgemessen. Weiterhin wird der Durchmesser der Probe d_u an der Bruchstelle ermittelt. Aus den hier aufgenommenen Daten sind u.a. die Werte für die Bruchdehnung (A) und Brucheinschnürung (Z) zu ermitteln und in das Versuchsprotokoll einzutragen.

Zur Unsicherheit der Kraft- und Wegmessungen in diesem Versuch sind folgende Anmerkungen zu machen. Die Kraftmessung entspricht Genauigkeitsklasse 0.5 bis hinab zu einem abgelesenen Wert von 20 N, d.h. 0.5 % relative Unsicherheit. Die Wegmessung ist i.W. dadurch kompromittiert, dass die Prüfmaschine selbst (und insbesondere der Kraftaufnehmer) nicht unendlich steif ist. Die Positionsmessung der Traverse ist daher zwar an sich sehr genau, entspricht aber nicht exakt dem eigentlich interessierenden Weg an der Probe. Um die Prüfung normgerecht durchzuführen, müsste ein zusätzlicher Wegaufnehmer eingesetzt werden, der unmittelbar an der Probe die Positionen abgreift. Solche Aufnehmer gibt es entweder berührend oder nicht berührend. Die berührenden sind vergleichsweise preiswert, jedoch empfindlich (sie dürfen i.d.R. während des eigentlichen Bruchs nicht mehr anliegen). Die berührungslosen sind gemessen an unseren Zielen im Praktikum zu kostspielig. Im hier durchgeführten Versuch verwenden wir eine berührende Wegmessung unter Verwendung eines sogenannten Extensometers, das vor dem Bruch der Probe entfernt wird.

Kapitel 3

Härteprüfung

3.1 Versuchsziel

Es soll die Härte metallischer Prüflinge nach BRINELL, sowie nach VICKERS bestimmt werden.

3.2 Theorie zum Versuch

3.2.1 Härte als Werkstoffeigenschaft

Im “Zugversuch” haben wir bereits die Festigkeit untersucht, als eine von drei zentralen mechanischen Werkstoffkenngrößen: der Festigkeit, der Härte und der Zähigkeit. In diesem Versuch wenden wir uns nun der Härte zu.

Wenn wir zwei Werkstoffe vergleichen, so bezeichnen wir denjenigen als härter, der in der Lage ist, den jeweils anderen zu beschädigen. Will man keine zwei Werkstoffe vergleichen, sondern nur für einen die Härte messen, erfordert diese einfachste Härtebestimmung, dass man ihn mit verschiedenen Werkstoffen bekannter Härte vergleicht, und so eine schrittweise Einordnung erhält (so funktioniert bspw. die Härteskala nach MOHS). Alternativ kann man als Vergleichswerkstoff stets einen sehr hoher Härte wählen (jedenfalls höher als die Härte des zu prüfenden Werkstoffs), und das Ausmaß der Beschädigung am zu prüfenden Werkstoff bestimmen. Vorteilhaft hierbei ist, dass so nicht nur eine schrittweise Einordnung erfolgen kann, sondern eine kontinuierliche, quantitative Messung vorgenommen werden kann.

Dabei wird ausgenutzt, dass für das Eindringen eines Eindringkörpers (engl. *indenter*) in eine homogene Werkstoffoberfläche die aufzubringende Kraft F mit der Streckgrenze R_e des zu prüfenden Werkstoffs skaliert, sowie mit der Querschnittsfläche A , über die eine plastische Verformung verursacht wird:

$$F \propto R_e A \tag{3.1}$$

Die Streckgrenze bezeichnet dabei das erste Abweichen der Spannungs-Dehnungs-Kurve von der HOOKEschen Gerade (wenn also erstmals zur elastischen Dehnung eine plastische Verformung hinzu kommt). Wenn man nun also den Quotienten F/A an einer Probenoberfläche experimentell bestimmt, kann man daraus eine werkstoffspezifische Information erhalten, die man als Härte bezeichnet. Die Härte enthält Information, die i.A. nicht

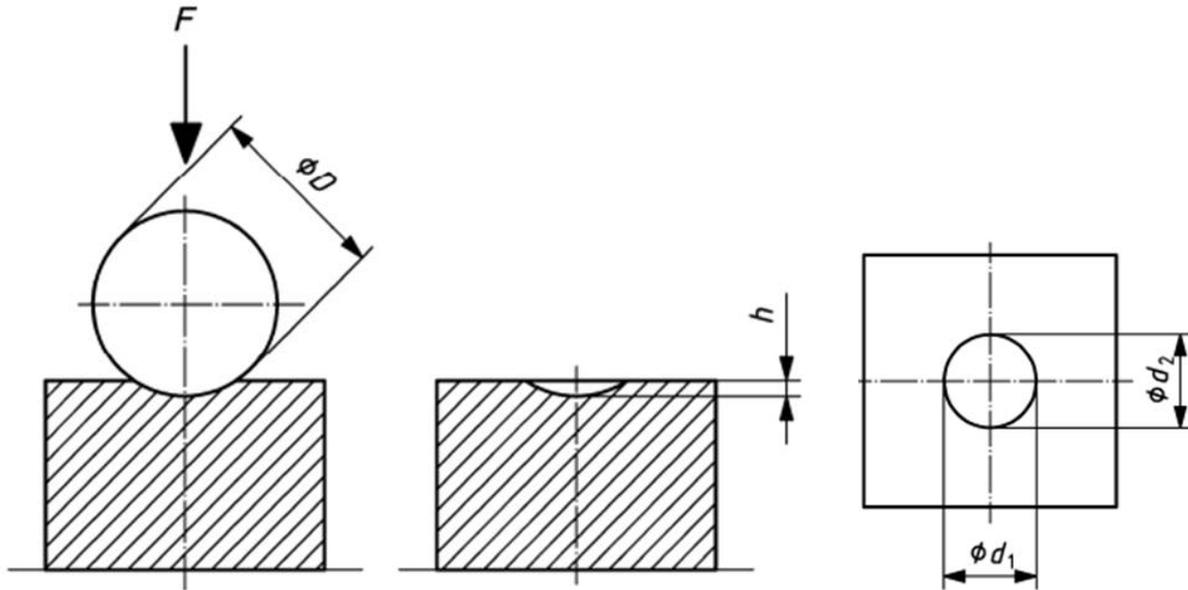


Abbildung 3.1: Geometrie der Härteprüfung nach BRINELL [DINd]

im Spannungs-Dehnungs-Diagramm enthalten ist, auch wenn R_e prinzipiell aus diesem Diagramm bestimmt werden kann. Ein Grund dafür ist, dass die Zugprüfung auf das Probenvolumen wirkt, die Härteprüfung jedoch auf die Probenoberfläche. An beiden Informationen besteht Interesse, jedoch unterscheiden sich technisch bedingt i.d.R. die Eigenschaften im Volumen und an der Oberfläche eines Werkstoffs und besonders eines Bauteils.

Einen zusätzlichen Einfluss hat dabei, auf welche Weise die Verformung herbei geführt wird, und welche Form der Indenter hat. Aus diesem Grunde werden verschiedene Prüfverfahren unterschieden; zwei davon werden wir in diesem Versuch kennen lernen.

3.2.2 Härteprüfung nach Brinell

Für die Härteprüfung nach BRINELL wird als Eindringkörper eine Hartmetallkugel verwendet. Es wurde alternativ auch eine Stahlkugel verwendet; um diese beiden Prüfmethoden zu unterscheiden, ist das Resultat stets zu kennzeichnen als HBW (für Härte – BRINELL – Wolframcarbid), in Unterscheidung zu HBS (für Härte – BRINELL – Stahl). Auch die Bezeichnung HB ohne weitere Spezifizierung sollte vermieden werden, um Unsicherheiten zu vermeiden. Offensichtlich ist für das angestrebte Messverfahren die härteste Kugel die beste; sobald eine Wolframcarbid-Kugel verfügbar ist, gibt es keinen Grund mehr, eine Stahlkugel zu verwenden.

Die eigentliche Messung erfolgt nach folgendem Prüfablauf. Die Hartmetallkugel mit Durchmesser D wird ruckfrei auf die zu prüfende Oberfläche aufgesetzt. Es wird die Normalkraft F dann stetig erhöht bis zu ihrem Nennwert, und für eine bestimmte Zeitspanne t auf diesem Wert gehalten. Dabei dringt die Kugel um eine Länge h in den Prüfling ein. Dann wird die Kugel entlastet und entfernt. Es wird der Durchmesser d des entstandenen Eindrucks auf der Oberfläche des Prüflings gemessen (vgl. Abb. 3.1). Es wird dabei stets der Durchmesser in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen gemessen, und dann ihr arithmetischer Mittelwert für die Bestimmung der Härte verwendet.

Es ist nun für die Auswertung zu beachten, dass in Gleichung (3.1) nicht die Quer-

schnittsfläche eines Kreises mit Durchmesser d zu verwenden ist, sondern die Oberfläche der eingedrückten Kugelkalotte:

$$A = \frac{\pi}{2} D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) = \frac{\pi}{2} D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right) \quad (3.2)$$

Diese Unterscheidung ist *sehr* wichtig. Beachten Sie bspw., dass für eine Eindringtiefe von $D/2$ der Durchmesser des Eindrucks gerade D ist, und auch für größere Normalkräfte nicht mehr größer wird (es wird dann anschaulich “nur noch” ein Loch durch den Prüfling gestanzt). Daraus leitet sich sofort ab, dass es für diese Prüfmethode geeignete und ungeeignete Prüfkraft gibt, abhängig von der Härte des Prüflings. Darauf kommen wir in einem Moment zurück.

Als Maßzahl MZ der BRINELL-Härte gibt man den Quotienten aus Prüfkraft und Eindruckoberfläche an:

$$MZ = \left(0.102 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right) \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

Der Vorfaktor geht dabei zurück auf die Umrechnung zwischen eigentlicher Normalkraft, und aufgelegter Masse, durch die die Normalkraft realisiert wird im Erdschwerefeld:

$$\frac{1}{g} \approx 0.102 \frac{\text{s}^2}{\text{m}} \quad (3.4)$$

für $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Die Einheit, die in Gleichung (3.3) hinter diesem Faktor auftaucht, unterscheidet sich von der in Gleichung (3.4). Das liegt einfach daran, dass es üblich ist, die Maßzahl einheitenfrei anzugeben. Tatsächlich handelt es sich bei dieser Maßzahl also um das Verhältnis aus aufgelegter Masse und Eindruckoberfläche, d.h. der Messwert hat die SI-Einheit kg/mm^2 . Vereinzelt findet man diese Einheit auch explizit notiert an Härtewerten. Insgesamt erhält man eine einheitenfreie Maßzahl daher aus:

$$MZ = \left(0.102 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right) \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2} \right)} \quad (3.5)$$

Das Ergebnis der Prüfung wird angegeben in der Form:

$$111 \text{ HBW}22/33/44 \quad (3.6)$$

mit 111 der mit Gleichung (3.5) bestimmten Maßzahl, 22 dem Kugeldurchmesser D in Millimetern, 33 der aufgelegten Masse im Erdschwerefeld in Kilogramm, und 44 der Einwirkdauer der Prüfkraft in Sekunden. Die letzte Angabe kann wegfallen, wenn ein vorgesehener Bereich von 10 bis 15 Sekunden eingehalten wird; nur Abweichungen müssen angegeben werden. Dass an dieser Stelle die aufgelegte Masse im Erdschwerefeld notiert wird, und nicht die einwirkende Normalkraft, ist auch der Grund dafür, dass übliche Härteprüfmaschinen nur “krumme” Kraftwerte vorsehen. Das sind jeweils die Kräfte, die zu “glatten” Massen gehören, so dass die Notation der Ergebnisse vereinfacht wird.

Es muss bei der Durchführung des Versuchs darauf geachtet werden, dass eine “sinnvolle” Kombination von Kräften und Geometrien gewählt wird. Dazu gehören zwei Überlegungen. Zum Ersten, dass die Verformung an der Oberfläche der Probe startet (das tut sie automatisch) und im Wesentlichen im Volumen der Probe endet (das kann kritisch sein).

Tabelle 3.1: Mindestdicke H der Proben in Abhängigkeit vom mittleren Eindruckdurchmesser d für $D = 2.5$ mm [DINd].

d in [mm]	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
H in [mm]	0.29	0.40	0.53	0.67	0.83	1.02	1.23	1.46	1.72	2.00

Das heißt, die Probe muss “dick genug” sein, dass der verformte Bereich der Probe sich nicht bis an die gegenüberliegende Oberfläche ausdehnt (dann misst man *falsch* die Werkstoffeigenschaften der Unterlage mit). Ein sicheres Anzeichen für eine zu dünne Probe ist eine sichtbare Veränderung auf der Probenrückseite. Als Grenze ist einzuhalten, dass die Probe acht mal so dick ist, wie der Eindruck tief ist. Eine Probendicke von vierfachem Kugeldurchmesser (in diesem Versuch also ein Zentimeter) sollte daher stets genügen (ist aber nicht immer nötig!). Eine Tabelle für die Festlegung der mindesten Probendicke H abhängig vom gemessenen Eindruckdurchmessers d findet sich in [DINd]. Für den in unserem Versuch verwendeten Kugeldurchmesser gilt der in Tabelle 3.1 wiedergegebene Auszug.

Zum Zweiten ist zu überlegen, dass die eingedrückte Kugel eine “sinnvolle” Lage zur Oberfläche des Prüflings einnehmen soll. Ist die Eindringtiefe zu gering, ist der Winkel zwischen eingedrückter Kalotte und ebener Prüflingsoberfläche sehr gering, und der Versuch ist unter dem Mikroskop kaum auswertbar (schlechter Kontrast). Ist die Eindringtiefe zu groß, ergibt sich keine gute “Auflösung” der gemessenen Härtewerte (für $h > D/2$ ergibt sich gar keine Veränderung des im Mikroskop beobachteten Durchmessers). Es gibt daher einen Bereich messtechnisch besonders sinnvoller Eindringtiefen, korrespondierend zu beobachteten Eindruckdurchmessern zwischen $d = 0.24D$ und $0.6D$. Um diesen sinnvollen Bereich zu treffen, wählt man die Prüfparameter (Kugeldurchmesser D und Prüfkraft F) so, dass sich ein geeigneter sog. Beanspruchungsgrad ergibt. Der Beanspruchungsgrad ist definiert als:

$$B = \left(0.102 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right) \frac{F}{D^2} \quad (3.7)$$

Ein weiches Material erfordert dabei einen geringen Beanspruchungsgrad, ein hartes Material einen hohen Beanspruchungsgrad. In Tabelle 3.2 sind empfohlene Beanspruchungsgrade tabelliert.

Das experimentelle Vorgehen ist nun also, dass man zunächst einen Kugeldurchmesser wählt (dieser Schritt entfällt in unserem Experiment, weil wir nur eine Kugel zur Verfügung haben). Im Allgemeinen ist eine große Kugel zu bevorzugen ($D = 10$ mm), da auf diese Weise die Werkstoffeigenschaften über einen möglichst großen Bereich gemittelt werden. Dagegen kann entweder eine zu geringe Probendicke sprechen oder fehlende Möglichkeit, die erforderlichen Prüfkraft aufzubringen.

Als nächstes identifiziert man so gut wie möglich den Werkstoff des Prüflings und ordnet ihn in Tabelle 3.2 einer Werkstoffgruppe zu. Ausgehend davon legt man den Beanspruchungsgrad fest. Zusammen mit dem Kugeldurchmesser ergibt sich eine geeignete Prüfkraft. In der Regel sind die Prüfkraft nur schrittweise wählbar. Man wählt also die nächstliegende. Mit diesen Parameter kann dann die Prüfung durchgeführt werden.

Anhand des Ergebnisses (Eindrucksdurchmesser) kann man dann auch identifizieren, ob der Beanspruchungsgrad richtig gewählt wurde; ob nämlich die Bedingung $d/D =$

Tabelle 3.2: Beanspruchungsgrad B für verschiedene metallische Werkstoffe [DINd]

Werkstoff	Maßzahl	Beanspruchungsgrad
Stahl; Nickel- und Titanlegierungen		30
Gusseisen	< 140	10
	≥ 140	30
Kupfer und Kupferlegierungen	< 35	5
	35 bis 200	10
	> 200	30
Leichtmetalle und ihre Legierungen	< 35	2.5
	35 bis 80	5; 10; 15
	> 80	10; 15
Blei und Zinn		1

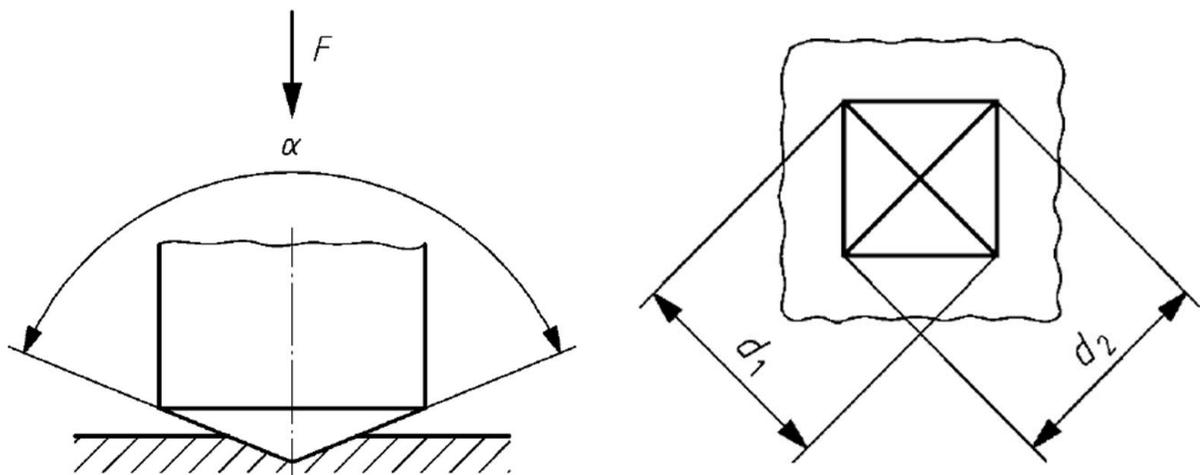


Abbildung 3.2: Geometrie der Härteprüfung nach VICKERS [DINe]

0.24...0.6 erfüllt ist. Falls das nicht der Fall ist, muss die Prüfung wiederholt werden mit entsprechend angepasstem Beanspruchungsgrad. Gleichzeitig kann man bei dieser Gelegenheit anhand von Tabelle 3.1 noch einmal verifizieren, dass die Probendicke ausreichend war für den Versuch.

Bei der Durchführung des Versuchs ist weiter darauf zu achten, dass die Prüfabdrücke mindestens um den zweieinhalbfachen Eindruckdurchmesser vom Rand der Probe entfernt sein müssen. Zwei benachbarte Abdrücke müssen mindestens den dreifachen Eindruckdurchmesser voneinander entfernt sein (beide Angaben beziehen sich jeweils auf die Mittelpunkte der Abdrücke). Der Grund für diese Angaben ist, dass durch die Kaltverformung beim Eindruck des Indentors das Werkstoffgefüge modifiziert wird, und jeder neue Eindruck in das ursprüngliche Gefüge gesetzt werden soll, nicht in das modifizierte.

3.2.3 Härteprüfung nach Vickers

Für die Härteprüfung nach VICKERS wird als Eindringkörper eine vierseitige Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136° verwendet (vgl. Abb. 3.2). Der Prüfablauf

entspricht im Wesentlichen dem der Härteprüfung nach BRINELL; es sollen daher in diesem Abschnitt die Unterschiede hervorgehoben werden. Diese Unterschiede hängen direkt oder indirekt mit der Wahl der Indenter-Geometrie zusammen.

Diamant ist deshalb sinnvoll, weil er einer der härtesten Werkstoffe überhaupt ist (die wenigen Materialien, die noch härte sind, sind sehr exotisch). Dadurch ist die Anforderung, härter zu sein als der zu prüfende Werkstoff, i.d.R. automatisch erfüllt. Für eine Pyramide ist Diamant als Material technisch gut realisierbar (wenige ebene Flächen, die geschliffen und poliert werden können); eine Kugel aus Diamant zu realisieren, wäre weniger gut möglich.

Der Pyramideneindruck hat den zusätzlichen Vorteil, dass unabhängig von der Prüfkraft und der Eindringtiefe dieselben geometrischen Verhältnisse vorliegen (ein kleiner Pyramideneindruck hat die gleichen Winkel und Flächenverhältnisse wie ein großer). Aus diesem Grunde ist es bei der VICKERS-Messung auch nicht erforderlich, einen Beanspruchungsgrad zu bestimmen vor der Messung. Statt dessen geht in die Wahl der Prüfkraft die Überlegung ein, was man eigentlich wissen möchte: ist man interessiert an der mittleren Härte des Werkstoffgefüges, so wählt man eine große Prüfkraft, so dass der Eindruck groß genug wird, mehrere Körner und Korngrenzen zu überdecken; man spricht dann von einer VICKERS-Härteprüfung. Falls eine solche Messung nicht möglich ist (bspw. weil die Probe zu dünn ist), kann man bei kleinerer Kraft prüfen; man spricht dann von einer VICKERS-Kleinkrafthärteprüfung. Schließlich kann man sich aber auch für Härteunterschiede innerhalb des Gefüges interessieren. Ein Grund kann sein, dass das Gefüge aus verschiedenartigen Körnern besteht, und man die Härte dieser Körner einzeln bestimmen möchte. Ein anderer Grund kann sein, dass man eine Oberflächenhärtung durchgeführt hat, die Probe quer zu Oberfläche geöffnet hat (metallographischer Schliff) und nun in verschiedenen Abständen zur Oberfläche fein aufgelöst die Veränderung der Härte bestimmen möchte. In beiden Fällen kann man eine VICKERS-Mikrohärteprüfung durchführen.

Im Praktikum soll eine VICKERS-Härteprüfung durchgeführt werden. Ausgewertet wird hier nicht, wie bei der BRINELL-Härteprüfung, der Durchmesser des Eindrucks (das ist nur für einen Kalotten-Eindruck sinnvoll), sondern die Diagonale des Eindrucks; man misst die beiden Diagonalen einzeln und bildet für die Auswertung den arithmetischen Mittelwert dieser Werte. Für ebene Prüflinge, wie im Praktikum, darf der relative Unterschied der beiden Diagonalen nicht größer sein als 5 %. Falls dieser Fall eintritt, darf das Ergebnis verwendet werden, es muss im Prüfbericht aber auf diesen Umstand hingewiesen werden.

Zusätzlich kann es vorkommen, dass der Eindruck eine mehr oder weniger von der idealen Pyramidenform abweichende Geometrie hat (entweder mit konvexen oder konkaven Verzerrungen, vgl. Abb. 3.3). Eine solche abweichende Geometrie kann durch eine Differenzlänge z quantitativ beschrieben werden. Für die Bestimmung der Maßzahl kann dann folgende Korrektur vorgenommen werden (dieses Vorgehen ist jedoch nicht vorgesehen in [DINe]):

$$d \rightarrow d \pm \sqrt{2}z \quad (3.8)$$

Für die VICKERS-Härteprüfung soll die Diagonale zwischen 0.02 mm und 1.40 mm liegen (für kleinere Eindrücke wird die Messunsicherheit erhöht). Um diesen Bereich einzuhalten, kann je nach geprüftem Werkstoff die Prüfkraft variiert werden. Wie auch bei der BRINELL-Härteprüfung ergeben sich "krumme" Werte für die üblichen Prüfkräfte, weil der Standard ursprünglich ausgeht von aufgelegten Massen (in kg) im Erdschwerefeld. Die standardisierten Bereiche sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt. Empfohlen wird die

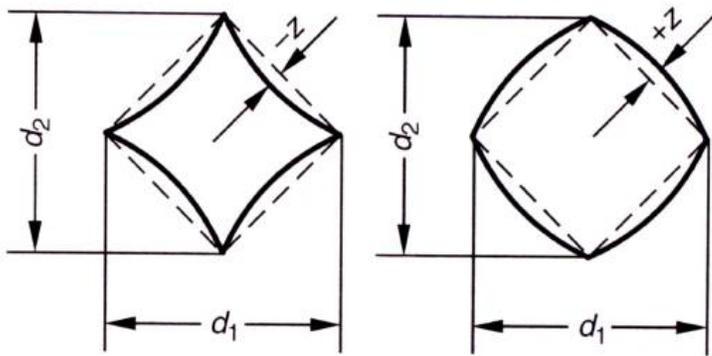


Abbildung 3.3: Verfahren zur Korrektur von der Pyramidenform abweichender Eindrucksgeometrien [MZ11].

Tabelle 3.3: Bereiche der Prüfkraft [DINe]

aufgelegte Masse	Prüfkraft	Bezeichnung
$5 \text{ kg} \leq m$	$49.03 \text{ N} \leq F$	VICKERS-Härteprüfung
$0.2 \text{ kg} \leq m < 5 \text{ kg}$	$1.961 \text{ N} \leq F < 49.03 \text{ N}$	VICKERS-Kleinkrafthärteprüfung
$0.01 \text{ kg} \leq m < 0.2 \text{ kg}$	$0.09807 \text{ N} \leq F < 1.961 \text{ N}$	VICKERS-Mikrohärteprüfung

Massenstaffelung 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; und 100 kg. Für kleinere Massen im Mikrohärtebereich werden abweichend von diesem Schema 10; 15; 20; und 25 g empfohlen. Andere Massen sind jedoch explizit zulässig.

Ein Vorteil der Härteprüfung nach VICKERS besteht darin, dass die Maßzahl der Härteprüfung (oberhalb 5 kg aufgelegter Masse) weitgehend unabhängig ist von der gewählten Prüfkraft, so dass Werte, die mit unterschiedlichen Prüfkraften ($\geq 5 \text{ kg}$) gemessen wurden, direkt miteinander verglichen werden können. Es ist daher verschiedentlich üblich, in diesem Bereich die Angabe der Prüfkraft nicht auszuschreiben. Trotzdem sollte sie aus Gründen der Übersichtlich- und Vergleichbarkeit stets genannt werden. Insbesondere ist zu beachten, dass diese Unabhängigkeit von der Prüfkraft im Kleinkraft- und besonders im Mikrohärte-Bereich auch für die Härteprüfung nach VICKERS *nicht* mehr gilt. Hier ist eine Nennung der Prüfkraft in jedem Fall unerlässlich!

Diese Maßzahl der VICKERS-Härteprüfung wird in ähnlicher Weise bestimmt wie für die BRINELL-Härteprüfung, nur dass natürlich die Berechnung der Querschnittsfläche sich nun an den geänderten geometrischen Verhältnissen des Indenters orientieren muss:

$$A = \frac{d^2}{2 \sin(\alpha/2)} \tag{3.9}$$

mit $\alpha = 136^\circ$ dem Öffnungswinkel der Pyramide. Dieser Öffnungswinkel ergibt sich daraus, dass man den Winkel betrachtet, der sich für einen kugelförmigen Indenter bei optimalem Beanspruchungsgrad an der Probenoberfläche ergibt (entsprechend $d/D=0.375$).

Es kann damit zur Bestimmung der Maßzahl unverändert die Gleichung (3.3) verwendet werden. Es ist jedoch üblich, die Gleichung (3.9) und den konkreten Winkel α sofort einzusetzen. Auf diese Weise erhält man:

$$MZ = \left(0.102 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}\right) \frac{F}{A} = \left(0.1891 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}}\right) \frac{F}{d^2} \tag{3.10}$$

Das Ergebnis der Prüfung wird angegeben in der Form:

$$111 \text{ HV}33/44 \quad (3.11)$$

mit 111 der mit Gleichung (3.10) bestimmten Maßzahl, 33 der aufgelegten Masse im Erdschwerefeld in Kilogramm, und 44 der Einwirkdauer der Prüfkraft in Sekunden. Wieder kann diese letzte Angabe wegfallen, wenn ein vorgesehener Bereich von 10 bis 15 Sekunden eingehalten wird; nur Abweichungen müssen angegeben werden.

Ähnlich wie bei der BRINELL-Härteprüfung ist eine mindeste Probendicke für eine verlässliche Prüfung erforderlich. Für die VICKERS-Härteprüfung beträgt sie das 1.5-fache der mittleren Eindrucksdiagonalen; sobald es auf der Rückseite der Probe sichtbare Veränderungen gibt, ist das auch hier ein Zeichen für eine zu geringe Probendicke.

Der Abstand des Mittelpunkts eines Prüfeindrucks muss für Stahl, Kupfer und Kupferlegierungen (Gruppe 1) mindestens das Zweieinhalbfache der mittleren Eindrucksdiagonalen betragen. Für Leichtmetalle, Blei, Zinn und deren Legierungen (Gruppe 2) mindestens das Dreifache der mittleren Eindrucksdiagonalen. Der Mittelpunktsabstand zwischen zwei Eindrücken muss für Werkstoffe aus Gruppe 1 mindestens das Dreifache der mittleren Eindrucksdiagonalen betragen, für Werkstoffe aus Gruppe 2 mindestens das Sechsfache der mittleren Eindrucksdiagonalen. Der Grund hierfür ist derselbe wie bei der BRINELL-Härteprüfung. Falls die Eindrucksdiagonalen variieren zwischen den Eindrücken, ist der größte Wert zu Grunde zu legen.

Es ist abschließend zu beachten, dass Maßzahlen, die mit unterschiedlichen Härteprüfverfahren ermittelt wurden, *nicht* ineinander umgerechnet werden können. Es kursieren zwar "Faustformeln", die genau dies formal leisten, auch ähneln sich die Maßzahlen bestimmter Prüfverfahren in bestimmten Bereichen untereinander. Ein direktes Umrechnen ist jedoch in keinem Fall zulässig. Direkt vergleichbar sind Härteangaben nur, wenn sie mit derselben Methode ermittelt wurden.

3.3 Versuchsdurchführung

Die Härteprüfungen werden mit einem Universal-Härteprüfgerät mit optischer Mattscheibeneinrichtung durchgeführt. Abbildung 3.4 zeigt das im Praktikum verwendete Prüfgerät, das eine Variation der Belastung zwischen 49 N und 2.452 kN zulässt. Der Wechsel des Eindringkörpers wird ausschließlich durch den/die Betreuer/in vorgenommen. Die benötigte Kraftstufe wird seitlich am Gerät mittels der vorgesehenen Druckknöpfe gewählt. Diese Knöpfe dürfen *nur* betätigt werden, wenn das Gerät im kraftfreien Zustand ist! Es ist wichtig, dass der gewünschte Knopf voll einrastet, und dass der zuvor eingerastete Knopf sich gleichzeitig gelöst hat, und bis zum äußeren Anschlag ausgerückt ist. Solange Kraftstufen zwischen 294 bis 2.452 kN verwendet werden (also bspw. ab HV 30 aufwärts), braucht die Ölbremse nicht angepasst zu werden. Andernfalls wird auch diese Anpassung ausschließlich durch den/die Betreuer/in vorgenommen.

Das zu vermessende Werkstück wird auf dem Prüftisch so lange in vertikaler Richtung verfahren (unteres, rostrotes Handrad), bis sich seine Oberfläche auf der Mattscheibe scharf abbildet. An dieser Stelle wird es durch Drehen des oberen, gerändelten Handrades fixiert. Die Anpresskraft muss größer sein als die gewählte Prüfkraft. Der schwarze Auslöseschalter (unten vorn an der grünen Geräteverkleidung) wird so lange gedrückt gehalten, bis der große Handhebel unten rechts sich nach oben bewegt, und die Messung



Abbildung 3.4: Am Campus Velbert/Heiligenhaus im Praktikum eingesetztes Härteprüfgerät HPO 250 des VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig.

startet. Die Hartmetallkugel bzw. die Diamantpyramide wird positioniert und gleichzeitig der Belastungsmechanismus gestartet. Es wird dann eine Norm-konforme Belastungszeit abgewartet, bevor der Eindringkörper durch Niederdrücken des Handhebels gelöst wird. Der Eindringkörper wird weg geklappt, gleichzeitig wird das Messmikroskop positioniert. Mit der eingebauten, drehbaren Messskala wird die für die jeweilige Messung relevante geometrische Eigenschaft vermessen.

Kapitel 4

Kerbschlagbiegeversuch

4.1 Versuchsziel

Es soll die Zähigkeit metallischer Prüflinge im Kerbschlagbiegeversuch nach CHARPY bestimmt werden.

4.2 Theorie zum Versuch

4.2.1 Zähigkeit als Werkstoffeigenschaft

Im “Zugversuch” haben wir die Festigkeit metallischer Proben untersucht, gefolgt von der “Härteprüfung” zur Bestimmung einer zweiten zentralen mechanischer Werkstoffkenngröße. In diesem Versuch wenden wir uns nun der Zähigkeit zu. Wir hatten bei Härte und Festigkeit gesehen, dass es qualitativ unterschiedliche Eigenschaften sind, obwohl sie in bestimmten mikroskopischen Einflussgrößen miteinander verknüpft sind (bspw. in der Scherfestigkeit). Ebenso ist es mit der Zähigkeit. Im Zugversuch hatten wir bereits gesehen, dass man zwischen sprödem und duktilem Verhalten unterscheiden kann (für spröde Werkstoffe erfolgt der Bruch nahe der HOOKESchen Gerade, für duktile weit rechts davon). Ebenso ist Ihnen vielleicht bekannt, dass für bestimmte Materialgruppen eine große Härte mit einer Tendenz zum Spröbruch einhergeht (und umgekehrt). Gleichzeitig kann jedoch die im Kerbschlagbiegeversuch bestimmte Kenngröße weder aus dem Zugversuch noch aus der Härteprüfung direkt abgeleitet werden; sie stellt eine echt neue Information dar.

Die Unterscheidung nach “spröde” und “zäh” ist aus dem Alltag vertraut. Sprödes Versagen erwartet man typischer Weise bei sehr hoher Verformungsgeschwindigkeit (bspw. wenn ein Porzellangegegenstand auf einen harten Boden fällt), oder bei sehr ungleichmäßiger Belastung (bspw. wenn man mit einem scharfkantigen Gegenstand an ein Glas schlägt). Weiter ist vielleicht bekannt, dass bei tiefen Temperaturen die Tendenz zum Spröbruch bei einigen Werkstoffen ansteigt. Wichtig ist dabei, dass diese Tendenz zum Spröbruch *nicht* sofort mit bspw. der Festigkeit korreliert: Ein fallendes Keramikmesser wird eher brechen als ein fallendes Stahlmesser; dennoch ist die Festigkeit des Stahls nicht notwendig höher oder niedriger als die der Keramik.

Das Beispiel ist gut geeignet, um die Unterscheidung der Eigenschaften zu verdeutlichen. Durch den freien Fall hat das Messer einen hohen Energieinhalt (kinetische Energie), der während des Aufpralls umgesetzt wird. Es wirkt zu diesem Zeitpunkt kaum statische

Kraft (von der Schwerkraft abgesehen, die sehr gering ist), das Versagensszenario unterscheidet sich darin also von dem des Zugversuchs. Die kinetische Energie wird nun zunächst im Werkstoff gespeichert. Beschrieben wird diese Energieaufnahme durch das Kraft-Weg-Diagramm, da das Produkt aus Kraft und Weg gerade eine mechanische Arbeit ist. Da die Kraft sich abhängig vom (Verformungs-) Weg ändert, müssen wir hier das Integral:

$$\int F \, dx \quad (4.1)$$

ansetzen (also die Fläche unter der Kurve), statt des einfachen Produkts. Die Idee ist aber dieselbe.

Betrachten wir zunächst das fallende Keramikmesser. Wir hatten gesehen, dass es für den Sprödbbruch typisch ist, dass die Verfestigungskurve bereits sehr kurz nach der ersten Abweichung von der HOOKEschen Gerade abbricht und der Werkstoff versagt. Die Fläche unter dieser Kurve ist klein, weil zwar die Kraft groß werden kann (hohe Festigkeit), der Weg jedoch stets klein bleibt (wenig Verformung). Entsprechend kann nur wenig kinetische Energie aufgenommen werden, und der nicht absorbierte Überschuss an kinetischer Energie führt zum Werkstoffversagen.

Betrachten wir nun im Vergleich das fallende Stahlmesser. Hier haben wir gesehen, dass die Verfestigungskurven einen hohen plastischen Anteil zeigen, d.h. nach dem Erreichen von R_e steigt zwar die Kraft nur wenig weiter an, die Probe kann sich jedoch sehr nennenswert auf diesem hohen Krafniveau verformen. Die Fläche unter dieser Kurve ist vergleichsweise sehr viel größer als für die Keramik. Die kinetische Energie kann also teilweise in Form elastischer Verformung aufgenommen werden, und ggf. darüber hinaus in Form plastischer Verformung. Die Klinge ist danach zwar etwas verbogen, das Messer bleibt jedoch nutzbar.

Bis hierher wurde eine Interpretation der Eigenschaften “Sprödigkeit” und “Zähigkeit” erläutert, die bereits im Zugversuch ablesbar wäre. Wir haben ja mit dem Kraft-Weg-Diagramm argumentiert. Die Erfahrung zeigt nun, dass in diesem Diagramm *nicht* alle Information enthalten ist. Die Auswertung des quasistatischen Kraft-Weg-Diagramms erlaubt daher *keine* abschließende Bewertung der Anfälligkeit gegen Sprödbbruch.

4.2.2 Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit

Zum Ersten versagt das fallende Messer in einer dynamischen Belastung, nicht in einer quasistatischen Belastung. Die Belastung hat, anschaulich formuliert, keine Zeit sich gleichmäßig über den Werkstoff zu verteilen, so dass es lokal bereits früher als aus dem Zugversuch erwartet zur Überlastung und damit zum spröden Versagen kommt. Die Tendenz zum Sprödbbruch nimmt also mit erhöhter Verformungsgeschwindigkeit zu.

4.2.3 Der Einfluss der Mehrachsigkeit

Zum Zweiten wird das fallende Messer nicht uniaxial belastet, wie im Zugversuch. Durch komplexe Bauteilgeometrien, und relativ dazu zufällige Belastungsrichtungen tritt eine “verschärfte”, sog. mehrachsige Belastungssituation auf. Folgendermaßen kann man plausibilisieren, was geschieht (das Argument ist nicht streng richtig, gibt aber einen nützlichen Eindruck der Situation). Wir betrachten zunächst einen Werkstoff, der uniaxial belastet

wird. Wir wissen, dass seine Verformung in Richtung der Belastung (im elastischen Bereich) durch seinen Elastizitätsmodul beschrieben wird, und seine Verformung quer dazu durch die Querkontraktionszahl. Durch diese uniaxiale Belastung ist also seine gesamte Verformung, in alle drei Raumrichtungen bereits festgelegt. Wenn nun eine zweite Belastungsrichtung hinzukommt, können nicht für beide Belastungsrichtungen gleichzeitig alle elastischen Bedingungen erfüllt werden—das System ist überbestimmt, und reagiert darauf mit einer erhöhten Tendenz zum spröden Versagen.

Diese Mehrachsigkeit ist übrigens nicht so zu verstehen, dass es sich um zwei am selben Ort simultan einwirkende Kräfte mit unterschiedlicher Richtung handelte (darin liegt auch die Ungenauigkeit im Argument oben). Zwei solche Kräfte würden sich in einem homogen, ausgedehnten Werkstoff einfach zu *einer* resultierenden Kraft addieren. Kritisch sind vielmehr Krümmungen von Kraftlinien, und Konzentrationen von Kraftlinien in bestimmten Bauteilbereichen. Folgende Gedanken sind hierzu nützlich. Jede Kraft, die in ein Bauteil auf einer Oberfläche eingekoppelt wird, muss ihr Widerlager finden in einer fixierten zweiten Oberfläche—das fordert das dritte NEWTONsche Gesetz. Dieses Gesetz gilt auch für jedes einzelne Volumenelement des Bauteils. Das heißt, für jedes Volumenelement kann man einen Vektor angeben, von welcher ersten zu welcher zweiten Oberfläche wieviel Kraft durch dieses Volumenelement hindurchgeleitet wird. Da keine Kraft mitten im Bauteil “versickern” kann, muss jede solche Kraftlinie vollständig durch das Bauteil hindurch ohne Unterbrechung fortgesetzt sein, und die beiden belasteten Bauteiloberflächen verbinden.

In einem Bauteil konstanten Querschnitts (wie die Proben im Zugversuch) verteilt sich die Belastung gleichmäßig über den Querschnitt, und alle Kraftlinien verlaufen parallel und mit konstanter Dichte (so ist der Versuch extra gestaltet). Ändert jedoch das Bauteil seinen Querschnitt, weist Ecken, Kanten und Einschnitte auf, so müssen sich die Kraftlinien entsprechend krümmen, und auf einem verengten Querschnitt konzentrieren. Solche Krümmungen, und veränderlichen Konzentrationen von Kraftlinien erhöhen die Tendenz zum Sprödbbruch. Verkürzt kann man sagen, dass mehrachsige Belastungszustände die Tendenz zum Sprödbbruch erhöhen. Solche mehrachsigen Belastungszustände findet man bevorzugt im Bereich von starken Querschnittsänderungen oder engen Krümmungsradien der Bauteilkontur (beides geht häufig einher).

4.2.4 Der Einfluss der Temperatur

Zum Dritten erhöht sich, wie oben bereits erwähnt, die Tendenz zum Sprödbbruch durch erniedrigte Probertemperatur. Das liegt übrigens *nicht* daran, dass ein sehr heißer Stahl ja näher an seiner flüssigen Phase ist, und daher eher zäh reagiert. Die Temperaturbereiche, für die wir uns hier interessieren, sind allesamt *sehr* weit entfernt von der flüssigen Phase, und es treten teilweise sehr merkliche Änderungen bereits bei vergleichsweise geringen Temperaturänderungen auf.

Man unterscheidet dreierlei Formen des Temperaturverhaltens. Die erste Form (Typ I) ist in Abb. 4.1 dargestellt (eine hohe verbrauchte Schlagenergie KV korrespondiert zu einem zähen Werkstoff, eine niedrige Schlagenergie korrespondiert zu einem spröden Werkstoff). In diesem Fall gibt es einen Bereich hoher Temperatur, der eher zähes Verhalten zeigt (markiert durch die Ziffer 1, die sog. Hochlage). Für erniedrigte Temperaturen schließt sich ein Temperaturbereich an, in dem die Kurve mehr oder weniger jäh in ein sprödes Verhalten abfällt (markiert durch die Ziffer 2, das sog. Übergangsbereich, bzw. der

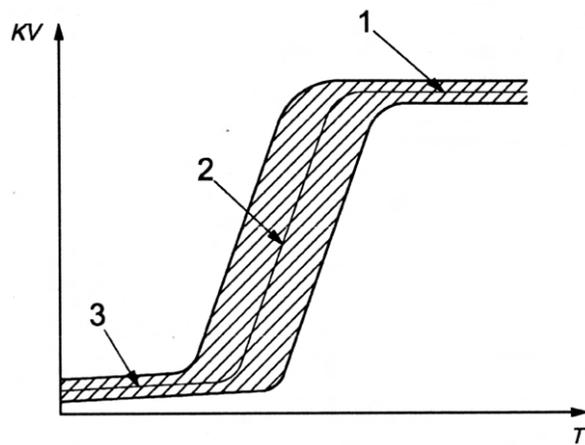


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der verbrauchten Schlagenergie KV über der Temperatur T [DINc].

Steilabfall). Für tiefe Temperaturen erhält man eher sprödes Verhalten (markiert durch die Ziffer 3, die sog. Tieflage). Diese Art des Werkstoffverhaltens erhält man bspw. für Baustähle, unlegierte und legierte Stähle mit ferritisch-perlitischem Gefüge, sowie für Metalle mit kubisch-raumzentriertem (bcc) und hexagonalem (hcp) Kristallgitter [MZ11].

Als Typ II sind Werkstoffe zu unterscheiden, die keinen ausgeprägten Steilabfall, sondern für alle Temperaturen sprödes Verhalten zeigen. Diese Art des Werkstoffverhaltens erhält man bspw. für Gusseisen mit Lamellengraphit (“Grauguss”), hochfeste Stähle und martensitisch gehärtete Werkstoffzustände [MZ11]. Als Typ III sind schließlich Werkstoffe zu unterscheiden, die ebenfalls keinen ausgeprägten Steilabfall, aber für alle Temperaturen zähes Verhalten zeigen. Diese Art des Werkstoffverhaltens bezeichnet man als kaltzäh, und man erhält es bspw. für reine Metalle mit kubisch-flächenzentriertem (fcc) Kristallgitter, für homogene Legierungen solcher Metalle, sowie für austenitische Stähle (die ebenfalls ein fcc-Kristallgitter haben) [MZ11].

4.2.5 Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Der Kerbschlagbiegeversuch hat zum Ziel, die drei vorgenannten Einflussgrößen in einem standardisiertem Experiment einbeziehen zu können. Zum Ersten soll eine hohe Verformungsgeschwindigkeit erzielt werden; das ist im Zugversuch nicht möglich. Statt dessen wird hier die Last durch einen Schlag mit einer Hammerfinne eingebracht (markiert durch das Zeichen G im linken Teilbild in Abb. 4.2). Die Energie wird durch die Umwandlung potentieller Energie (im oberen Ausgangspunkt der Finne) in kinetische Energie (im Aufprallpunkt auf die Probe) eingebracht. Der Versuch ähnelt also dem fallenden Messer, nur dass hier nicht die Probe selbst fällt, sondern ein auf die Probe eintreffender Hammer.

Der Hammer zerschlägt nun eine Werkstoffprobe, die am unteren Umkehrpunkt in den Weg des Hammers gelegt wurde (gegen ein Widerlager) und schwingt auf der Rückseite weiter aus. Allerdings erreicht er nicht dieselbe Ausgangshöhe H wie zuvor, sondern nur eine geringere Endhöhe h . Diesem Unterschied in Steighöhen entspricht ein Unterschied in Energie:

$$K = mg(H - h) \quad (4.2)$$

mit m der Masse der Hammerfinne und $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ der Fallbeschleunigung. Man bezeichnet dann K als Schlagenergie; das ist gerade die Energie, die in Form plastischer Verformung in der Probe deponiert werden konnte, bevor die Probe zerbrochen ist und keine weitere Energie mehr aufgenommen hat. Ist also diese Schlagenergie hoch, so handelt

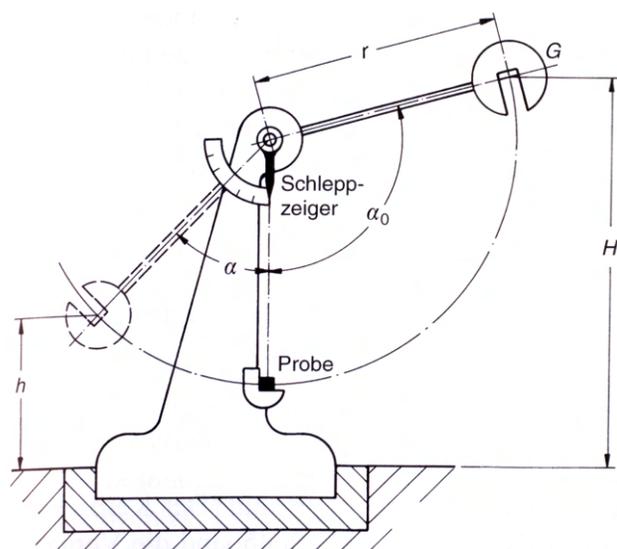


Abbildung 4.2: Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung beim Kerbschlagbiegeversuch (links [MZ11]). Das im Praktikum am Campus Velbert/Heiligenhaus eingesetzte Pendelschlagwerk INSTRON CEAST 9050 mit 50 J Arbeitsvermögen (rechts).

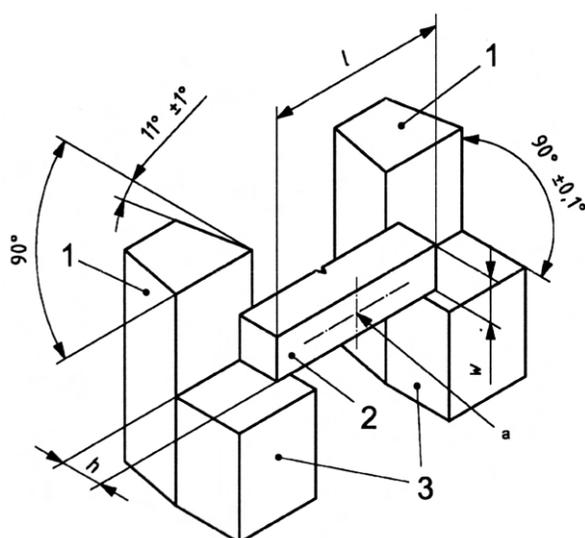


Abbildung 4.3: Versuchsanordnung im Kerbschlagversuch nach CHARPY [DINc].

es sich um eine zähe Probe; ist sie niedrig, so handelt es sich um eine spröde Probe. Aus Gründen der experimentellen Umsetzung werden dabei nicht die Höhen H und h gemessen, sondern der Radius r und die Winkel α_0 und α , die für diesen Radius zu H und h korrespondieren (vgl. linkes Teilbild in Abb. 4.2). Der Zusammenhang zwischen den Größen ergibt sich unmittelbar aus geometrischen Betrachtungen. Allerdings brauchen diese Umrechnungen häufig gar nicht manuell ausgeführt zu werden, insbesondere für Schlagwerke mit automatischer Erfassung des Winkels (vgl. rechtes Teilbild in Abb. 4.2). In diesem Fall kann die Umrechnung direkt durch die Auswerteeinheit des Schlagwerks ausgeführt werden, so dass der Bediener unmittelbar die interessierende Schlagenergie ablesen kann.

Auf diese Weise kann also eine hohe Verformungsgeschwindigkeit realisiert werden. Um auch den Einfluss unterschiedlicher Probentemperaturen untersuchen zu können, ist es vorteilhaft, die Probe "nur" einzulegen gegen einen Anschlag, und von einer aufwen-

digen Spannung abzusehen. Dadurch kann die Probe innerhalb weniger Sekunden aus einem kalten bzw. warmen Reservoir entnommen werden und der Versuch gestartet werden, so dass man im Wesentlichen davon ausgehen kann, dass die Probentemperatur der Temperatur des Reservoirs entspricht, obwohl das Experiment selbst bei Raumtemperatur durchgeführt wird. Achten Sie aber darauf, dass das nur dann gilt, wenn diese Experimente auch entsprechend flink ausgeführt werden! In Abb. 4.3 ist die Geometrie des Auflagers (3) und Widerlagers (1) gemeinsam mit einer Probe (2) dargestellt (die Abmaße h , l und w der Proben werden wir in einem Moment besprechen). Mit dem Zeichen a ist der Auftreffpunkt der Finnenschneide markiert. Bitte achten Sie *unbedingt* darauf, dass im CHARPY-Versuch die Kerbe in der Probe zum Widerlager hin, und von der Finnenschneide weg orientiert ist! Die Probe muss genau zentriert eingelegt werden. Zu diesem Zweck ist im verwendeten Aufbau eine Zentriereinrichtung installiert, deren Funktion im Abschnitt 4.3 beschrieben wird.

In Abbildung 4.4a und 4.4b sind die für den CHARPY-Versuch bevorzugt vorgesehenen Proben skizziert. Die Weite von 10 mm bezeichnet sog. Normal-Proben. Für ISO-V-Proben ist zusätzlich die Verwendung von Untermaß-Proben vorgesehen mit einer Weite von 7.5; 5.0; und 2.5 mm. Der Kerb ist in allen Fällen symmetrisch angebracht. Die Höhe im Kerbgrund beträgt 8 mm für die ISO-V-Probe und 5 mm für die ISO-U-Probe. Für die ISO-U-Probe können auch andere Höhen im Kerbgrund festgelegt werden (2 mm oder 3 mm).

Zusätzlich sind weitere besondere Probengeometrien zulässig, insbesondere auch *kleinere* Proben (vgl. Abb. 4.4c–e). Hintergrund dieser zusätzlich festgelegten Geometrien ist, dass aus verschiedenen Gründen teilw. die Verwendung der bevorzugten Probengeometrien nicht möglich, bzw. nicht wünschenswert ist. Dazu gehört entweder die Untersuchung von Halbzeugen, deren Geometrie die Entnahme größerer Proben nicht erlaubt, oder die Untersuchung von Halbzeugen, für die aus anderen als geometrischen Gründen große Proben nicht wünschenswert sind (bspw. teure oder toxische Proben). Schließlich kann die Begrenzung des Arbeitsvermögens eines gegebenen Pendelschlagwerks ein Grund sein, auf kleine Proben auszuweichen. Es ist zu beachten, dass für DVMK- und KLST-Proben auch jeweils andere, angepasst Auf- und Widerlager zu verwenden sind. Diese Auflagerelemente sind für das verwendete Schlagwerk verfügbar, und können bei Bedarf eingesetzt werden.

4.2.6 Auswerteverfahren: Schlagenergie

Der Kerbschlagbiegeversuch ergibt auf diese Weise als erstes Ergebnis eine einzige Zahl, nämlich die Schlagenergie, angegeben in der SI-Einheit Joule. Wurde eine V-Kerb-Probe verwendet, wird das Ergebnis als KV bezeichnet; wurde eine U-Kerb-Probe verwendet, wird das Ergebnis als KU bezeichnet. Darüber hinaus kann das Ergebnis weiter spezifiziert werden durch den Radius der Hammerfinne, speziell als KV_2 für 2 mm Radius, bzw. KV_8 für 8 mm Radius (für U-Kerb-Proben entsprechend KU_2 bzw. KU_8). Wichtig ist dabei das Verständnis, dass die Hammerfinne die Probe *nicht* durchschneidet, sondern stumpf ist und in erster Linie eine Energie einbringt in die Probe. Aufgrund der Abhängigkeit der Tendenz zum Spröbruchverhalten von der Mehrachsigkeit und der Verformungsgeschwindigkeit ist hierbei jedoch die Geometrie der Hammerfinne trotzdem ein Einflussfaktor, der entsprechend gekennzeichnet wird. Die vollständige Angabe des Ergebnisses hat die Form:

$$KX_1 222/33 = 44 \text{ J} \quad (4.3)$$

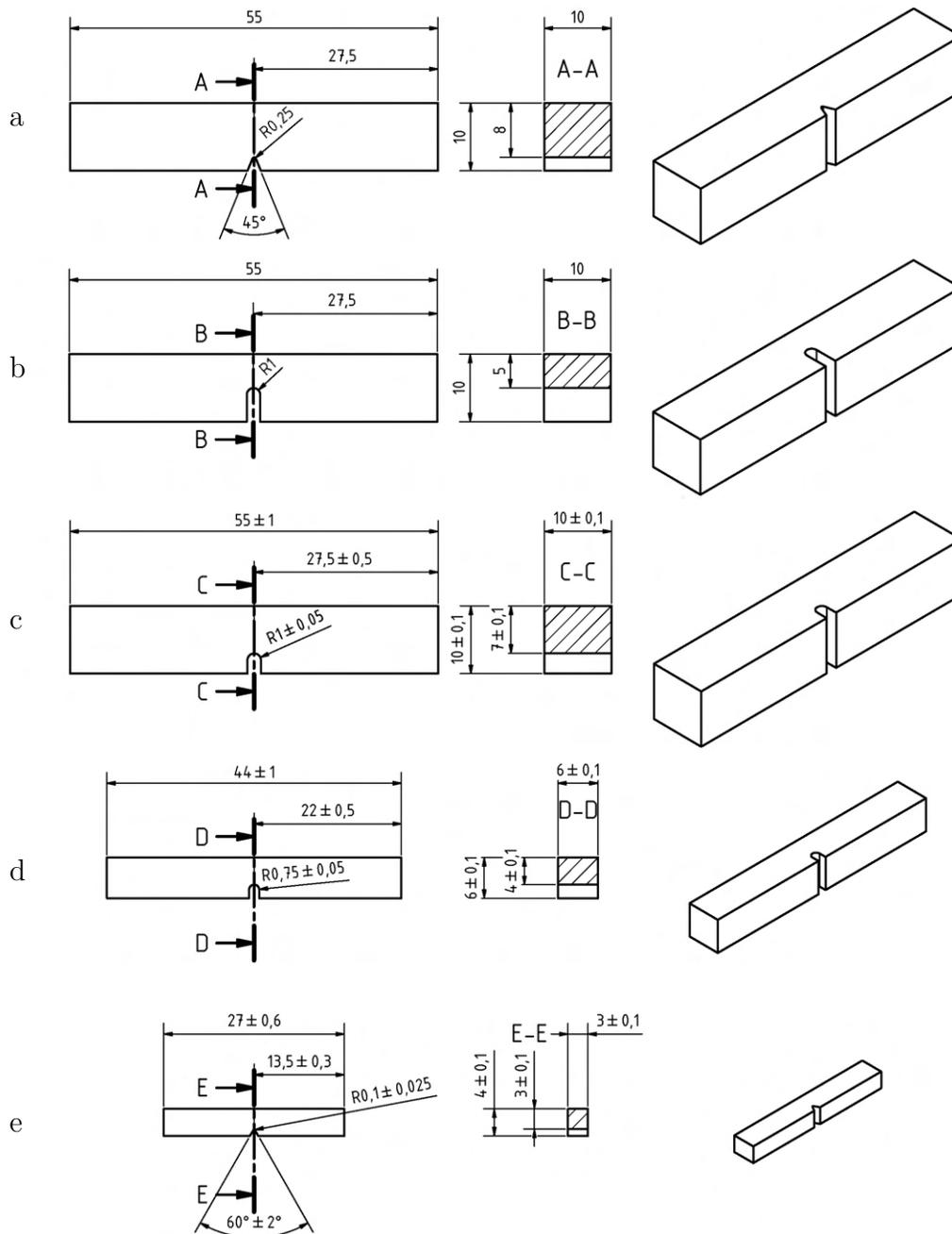


Abbildung 4.4: Probengeometrien im Kerbschlagversuch nach CHARPY. (a) ISO-V-Probe; (b) ISO-U-Probe; (c) DVM-Probe; (d) DVMK-Probe; und (e) KLST-Probe ((a) und (b) nach [DINc], (c) – (e) nach [DINa]).

mit X entweder V oder U , je nach Probenform, 1 entweder 2 oder 8 für 2 mm oder 8 mm Radius der Hammerfinne, 222 dem Nennarbeitsvermögen des Pendelschlagwerks in Joule (üblich sind bspw. 150 J bzw. 300 J, im Praktikum stehen uns 50 J zur Verfügung), 33 der Probenweite w in Millimetern, und 44 dem Zahlenwert der beim Bruch verbrauchten Schlagenergie in Joule. Die Angabe des Nennarbeitsvermögens kann wegfallen, falls es 300 J beträgt. Die Angabe der Probenweite kann wegfallen, falls Normal-Proben mit $w = 10$ mm verwendet wurden.

Es ist davon abzusehen, eine flächenbezogene Schlagenergie anzugeben (was in der Vergangenheit teilw. üblich war; diese Größe wurde Kerbschlagzähigkeit genannt). Statt dessen wird die absolute Schlagenergie gemeinsam mit einem Hinweis auf die Proben- und Finnengeometrie angegeben. Der Grund dafür ist, dass die erhaltenen Zahlenwerte weder mit der Probenweite w noch mit der Probenhöhe h streng korrelieren (selbst für gleiche Form des Kerbs). Ist eine Probe bspw. sehr wenig weit, ist das geometrische Verhältnis vom Zentrum zum Rand, an dem sich eine plastische Verformung zuerst zeigt, ein gänzlich anderes als für eine weitere Probe. Ebenso hat die gesamte Probenhöhe natürlich einen direkten Einfluss auf das Verhältnis zwischen Kerbtiefe und Höhe im Kerbgrund, und verändert dadurch die Randbedingungen der Verformung. Auch wenn also eine "kleine" Probe daher tendenziell weniger Energie absorbieren wird als eine "große", ist es nicht sinnvoll, durch eine Normierung auf die Querschnittsfläche den Eindruck zu erwecken, es sei eine spezifische Stoffgröße bestimmt worden. Das ist nicht der Fall. Der Kerbschlagversuch ermittelt stets eine Bauteilgröße, bezogen auf eine standardisierte Bauteilgeometrie. Daher sind in diesem Versuch zu unterscheiden Einflussgrößen, die einerseits im Werkstoff begründet liegen (Wärmebehandlungszustand, Legierungszusammensetzung, Alterung, etc.), und die andererseits in der Geometrie der Probe und den Versuchsbedingungen begründet liegen (Probengeometrie, insbes. Kerbschärfe, Temperatur, Nennarbeitsvermögen des Schlagwerks und damit Verformungsgeschwindigkeit, etc.). Um das Ergebnis möglichst aussagekräftig zu machen für den Werkstoff, werden wichtige Einflussgrößen, die in der Geometrie und den Versuchsbedingungen begründet liegen, im Ergebnis explizit mit genannt (vgl. Gleichung (4.3)).

4.2.7 Auswerteverfahren: Bruchaussehen

Zusätzlich zur Schlagenergie wird man stets das Bruchaussehen bewerten; mindestens qualitativ, und nach Möglichkeit auch halbquantitativ. Dahinter steht die Beobachtung, die bereits aus dem Zugversuch bekannt ist, dass nämlich das Bruchbild für sprödes und zähes Versagen sich grundsätzlich deutlich unterscheidet (Spalt- bzw. Gleitbruch). Für sprödes Versagen findet man kaum plastische Verformung, und eine kristalline, glitzernde Bruchoberfläche. Für zähes Versagen findet man sichtbare plastische Verformung, und eine faserige, metallisch glänzende Bruchoberfläche. Im Kerbschlagbiegeversuch beginnt der Bruch i.d.R. zäh, und versagt schließlich spröd. Das bedeutet, dass der Gleitbruchanteil am Rand der Bruchfläche zu suchen ist, und der Spröbruchanteil im Zentrum. In Abb. 4.5 unten links ist das schematische Vorgehen skizziert (Draufsicht auf den Bruch). Die mit der Ziffer 1 gekennzeichnete Fläche entspricht dem Kerb, die mit der Ziffer 2 gekennzeichnete Fläche dem Spaltbruch, und die mit der Ziffer 3 gekennzeichnete Fläche dem Gleitbruch.

Um das halbquantitativ auszuwerten, bestimmt man die Maße A und B , berechnet daraus eine Fläche, und vergleicht sie mit der gesamten gebrochenen Fläche (ausgehend von einer V-Kerb-Probe findet sich in DIN EN ISO 148-1:2011-01: *Metallische Werkstoffe*—

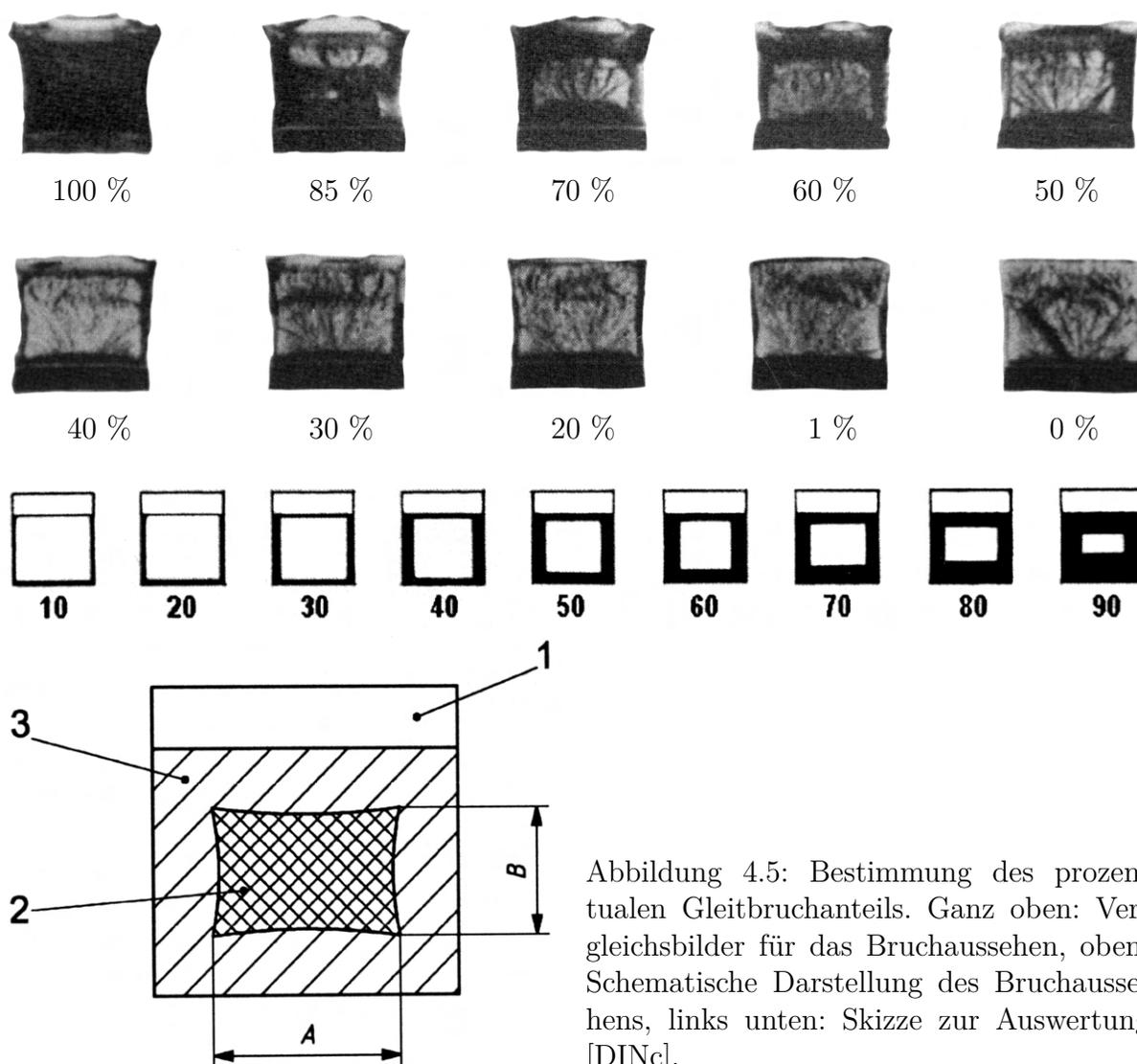


Abbildung 4.5: Bestimmung des prozentualen Gleitbruchanteils. Ganz oben: Vergleichsbilder für das Bruchaussehen, oben: Schematische Darstellung des Bruchaussehens, links unten: Skizze zur Auswertung [DINc].

Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy—Teil 1: Prüfverfahren eine Tabelle, wo man sofort ausgehend von den beiden Maßen ein Ergebnis ablesen kann). Alternativ kann man das Bruchbild mit sog. Richtreihen vergleichen, von denen zwei Beispiele in Abb. 4.5 dargestellt sind (ganz oben: photographische Richtreihe, oben: schematische Richtreihe).

4.2.8 Auswerteverfahren: seitliche Breitung

Als zusätzliches Maß für die erfolgte plastische Verformung kann die sog. seitliche Breitung LE ausgemessen werden. Da die Probe während der plastischen Verformung auf der der Hammerfinne zugewandten Seite kontrahiert, und sich auf der dem Hammer abgewandten dehnt, kann man diese bleibende Dehnung bzw. Kontraktion als Maß der plastischen Verformung hernehmen. Problematisch dabei ist, dass die gesamte Probe “verbogen” wird, d.h. die Länge der beiden nach dem Bruch wieder zusammengefügt Bruchteile auf den beiden Seiten kann kaum einfach bestimmt werden. Allerdings ist bekannt, dass eine plastische Kontraktion in einer ersten Richtung mit einer volumenerhaltenden Querdehnung einhergeht und umgekehrt. Als Kriterium für den Grad der plastischen Verformung

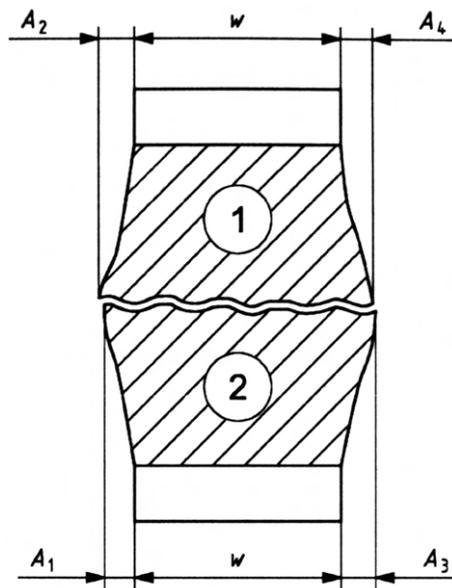


Abbildung 4.6: Auswertverfahren der seitlichen Breitung [DINc].

kann man daher auch die seitliche Breitung auf der der Hammerfinne zugewandten Seite hernehmen.

Da der Bruch nicht notwendig am Ort der größten Breitung stattfindet, sind dafür grundsätzlich vier Maße zu bestimmen (vgl. Abb. 4.6), nämlich die Aufstauchungen A_1 und A_3 auf den beiden Seiten des Probenstücks 2, und die Aufstauchungen A_2 und A_4 auf den beiden Seiten des Probenstücks 1. Als seitliche Breitung wird dann bezeichnet:

$$LE = \max(A_1, A_2) + \max(A_3, A_4) \quad (4.4)$$

Praktisch ist das Ziel, für die beiden exakt wieder zusammengelegten Probenstücke die größte auftretende Breitung über die Probe zu ermitteln, unabhängig vom Ort des Bruchs. Falls sich Grate gebildet haben an einer Aufstauchung, sind diese nicht mitzumessen (ggf. durch feines Schleifpapier vorsichtig entfernen). Falls eine Aufstauchung nach dem Bruch verändert wurde (bspw. weil die Probe irgendwo eingeklemmt wurde nach dem Bruch), so ist das zu notieren, und die seitliche Breitung darf dann nicht ausgewertet werden.

4.2.9 Auswertverfahren: Übergangstemperatur

Es wurde bereits zuvor die qualitative Form von Kurven des Typs I diskutiert (vgl. Abb. 4.1). Um diese spezielle Kurvenform zu dokumentieren, wird man eine Serie von Versuchen durchführen, wobei die Proben auf verschiedene Temperaturen temperiert sind. Die Anzahl der Proben muss groß genug sein, um trotz der Streuung der Werte einen klaren Kurvenverlauf interpolieren zu können. Als Ergebnis wird eine Übergangstemperatur T_t bestimmt, wobei es jedoch keine bindende Norm gibt, wie diese Temperatur zu wählen ist. Falls also eine Übergangstemperatur angegeben wird, so ist daher gleichzeitig zu notieren, wie sie bestimmt wurde (das sollte sich auch aus der jeweils gültigen Spezifikation ergeben, die der Anlass für die Durchführung des Versuchs war). Übliche Kriterien sind bspw. das Erreichen:

- eines absoluten Schwellwerts in der Schlagarbeit (in Joule).
- eines relativen Schwellwerts in der Schlagarbeit (Anteil des Werts in Hochlage in Prozent).

- eines relativen Schwellwerts im Gleitbruchanteil (in Prozent).
- eines absoluten Schwellwerts in der seitlichen Breitung (in Millimetern).

In diesem Praktikum soll das Erreichen von 50 % der Schlagarbeit in Hochlage als Kriterium verwendet werden.

4.3 Versuchsdurchführung

Es liegen Kerbschlagproben vor mit gegebenenfalls von der Norm *abweichender* Geometrie (um die Prüfbarkeit bei vergleichsweise geringem Arbeitsvermögen der Apparatur zu gewährleisten).

Folgendes Vorgehen wird für das vorhandene Pendelschlagwerk INSTRON CEAST 9050 eingehalten (die eigentliche Bedienung der Maschine erfolgt ausschließlich durch den/die Betreuer/in oder unter Aufsicht des/der Betreuer/in). Die Maschine wird eingeschaltet durch einen Kippschalter auf der *Rückseite*. Nach dem ersten Einschalten der Maschine wird zunächst eine Kalibrierung durchgeführt. Es wird zu diesem Zweck der Energieverlust über zwölf Schwingungsperioden gemessen, und mit internen Grenzwerten verglichen.

Es wird nun der Hammer manuell angehoben, und in gehobener Stellung durch Einrücken (Drücken) des Arretierungsknopfes ② mechanisch fixiert (vgl. Abb. 4.7c und 4.7d). Diese Sperre kann durch einfaches Ausrücken (Ziehen) des Knopfes ② allein *nicht* wieder aufgehoben werden. Sie ist durch einen zusätzlichen mechanischen Sicherungsmechanismus verriegelt. Diese Maßnahme stellt sicher, dass einerseits gefahrlos Prüfraum hantiert werden kann, und dass andererseits beim Auslösen des Mechanismus' beide Hände des Bedieners erforderlich sind, so dass es ohne Vorsatz für einen einzelnen Bediener unmöglich ist, durch den Hammerschlag die oberen Extremitäten zu verletzen. Beachten Sie, dass das *nur* deshalb gilt, weil der Arbeitsablauf es nicht erlaubt, dass in den Weg des Hammers gegriffen wird. Die umgesetzte Energie in diesem Versuch ist beträchtlich, und ein Umgehen der Sicherheitsvorkehrungen kann schwerste Verletzungen verursachen!

Es wird vor der Auslösung *in jedem Fall* die Schutztür vollständig geschlossen (sie rastet hörbar in ihrer Ruheposition ein). Sie bietet einen zusätzlichen Schutz gegen versehentliches Hineingreifen weiterer Personen (bzw. des Bedieners, nachdem der Hammer einmal ausgelöst wurde). Außerdem schützt sie während eines Experiments vor Splintern, die eine ernsthafte Gefährdung besonders für die Augen darstellen können. Wir drücken nun "Start" im Bedienfeld, und lösen dann den Hammer mechanisch aus. Hierzu drücken wir den Sicherungshebel ① (hinter dem bzw. im schwarzen Handgriff versteckt), und rücken dann den Knopf ② vollständig aus (vgl. Abb. 4.7e). Der Hammer ist nun frei, und schwingt entsprechend hin und her. Im Bedienfeld werden die vollständigen Perioden mitgezählt, bis die Messung bei zwölf Perioden stoppt. Wo zuvor einfach "Hammer unbekannt" stand, wurde nun der Hammer mit seiner Bezeichnung und Seriennummer identifiziert, außerdem wird der Grenzwert für den Energieverlust über zwölf Perioden angegeben (0.250 J). Unten rechts wird die tatsächlich verlorene Energie angezeigt. Ist sie geringer als der Grenzwert, ist das entsprechende Feld grün hinterlegt. Falls das *nicht* der Fall ist, können keine normgerechten Prüfungen durchgeführt werden. Kehren Sie durch "Verlassen" wieder in das Ausgangsmenü zurück.

In der Zwischenzeit schwingt der Hammer immer weiter (der genannte Grenzwert für den Energieverlust bedeutet eine Güte größer ca. 1250). Um weiter arbeiten zu können,

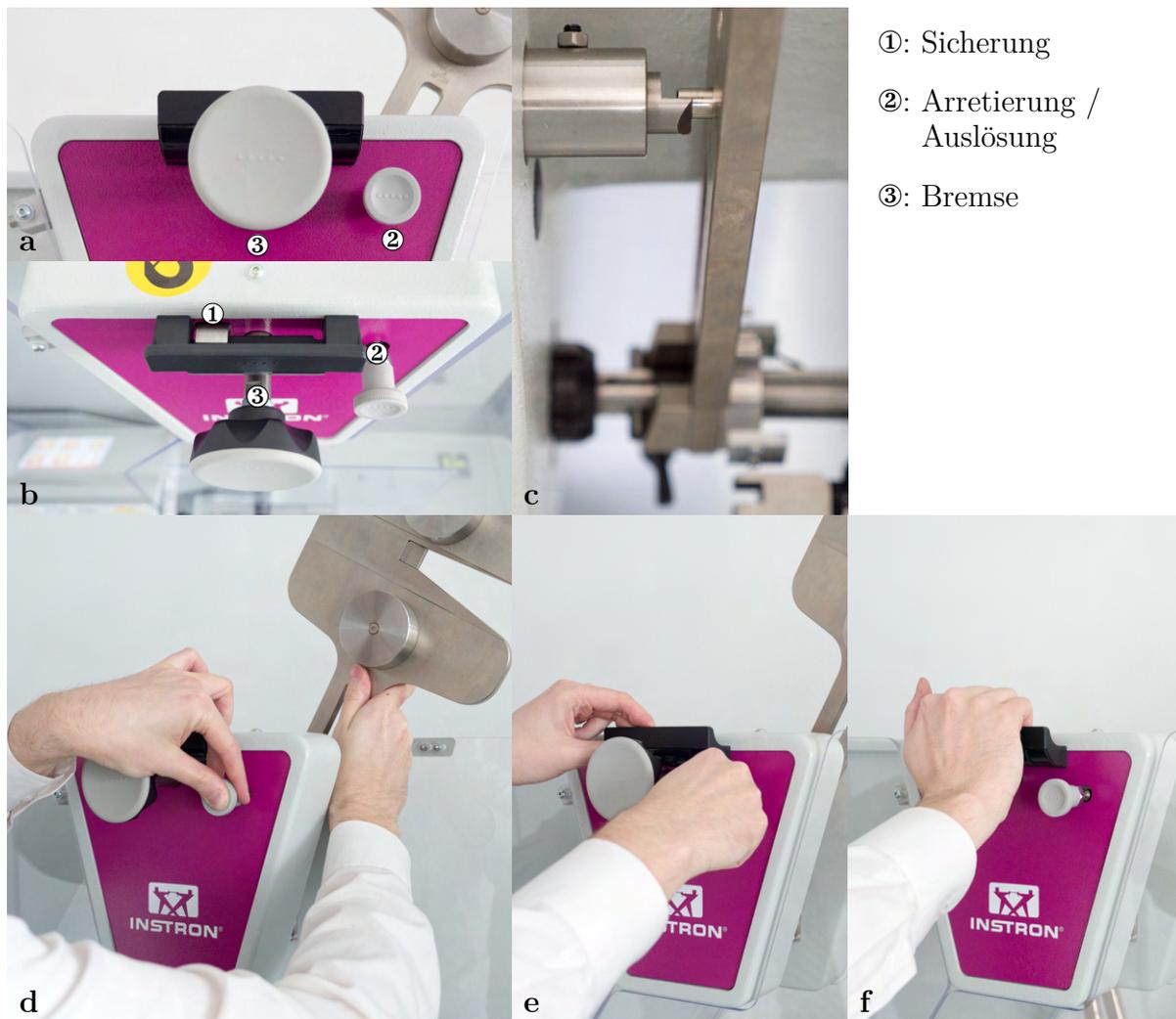


Abbildung 4.7: Bedienelemente und Bedienung des INSTRON-Pendelschlagwerks. (a, b) Bezeichnung der Bedienelemente. (c) Mechanische Arretierung des Hammers (oben im Bild, innenliegend). (d) Anheben und Arretieren des Hammers. (e) Auslösen des Hammers. (f) Bremsen des Hammers nach dem Experiment.

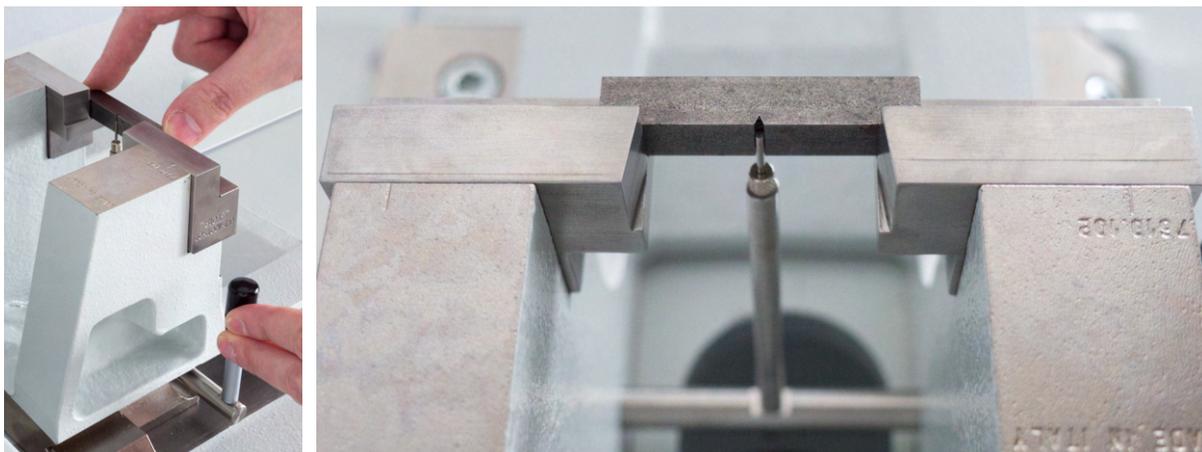


Abbildung 4.8: Zentriereinrichtung am INSTRON-Pendelschlagwerk.

muss der Hammer daher manuell gestoppt werden. Hierzu drücken wir den großen Bremsknopf ③. Dabei kann der schwarze Handgriff als Widerlager verwendet werden (vgl. Abb. 4.7f). Es handelt sich um eine einfache, mechanische Reibungsbremse. Um eine hohe Bremswirkung zu erzielen, muss daher entsprechend fest gedrückt werden. Erst wenn der Hammer in der Ruhestellung verharrt, darf die Schutztür wieder geöffnet werden, und ein erstes Experiment durchgeführt werden. Zu keinem Zeitpunkt darf die Schutztür bei sich frei bewegendem Hammer geöffnet sein! Auch bei manueller Bewegung des Hammers ist mit gebührender Vorsicht vorzugehen.

Ein erstes Experiment wird mit einer Probe bei Raumtemperatur durchgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass die entsprechenden Handgriffe sicher beherrscht werden, bevor wir in die Situation kommen, sie mit Handschuhen, Zangen oder sonstigen Hilfs- und Schutzvorkehrungen durchzuführen. Es wird eine Probe entsprechend der CHARPY-Versuchsanordnung auf das Auf- und Widerlager aufgelegt. Mithilfe der Zentriereinrichtung wird sichergestellt, dass die Kerbe exakt mittig liegt, gegenüber dem Auftreffpunkt der Hammerfinne. Dafür wird zunächst die Probe nach Augenmaß mittig eingelegt, und dann mit dem seitlichen Hebel den Zentrierstift aufgerichtet, bis er sich in die Kerbe legt, und diese dadurch in die Mitte zieht (vgl. Abb. 4.8). Dabei wird gleichzeitig mit leichtem Druck gegengehalten und der Zentrierstift aufgerichtet; mit ein wenig Übung funktioniert das problemlos. Vor dem Versuch muss in jedem Fall der Zentrierstift wieder vollständig horizontal abgelegt werden! Andernfalls beeinflusst er die Messung, da er sich im Bewegungsbereich des Hammers befindet, und er kann zerstört werden durch den Aufprall der Hammerfinne.

Es wird nun die Schutztür wieder vollständig geschlossen, und im Bedienfeld die zweite Option (oben mittig) “Transaktionen” gewählt (das sind Messungen). Der Hammer Schlag wird wie oben beschrieben ausgelöst, und wir warten mind. das Erreichen des linken Hochpunkts des Hammers ab, bevor die Bewegung gebremst wird (der Steigwinkel auf der linken Seite entspricht gerade dem gesuchten Versuchsergebnis). Die Probenfragmente werden aus dem Prüfraum entfernt. Hierzu gibt es in “Schlagrichtung” eine Schublade, die links seitlich gezogen werden kann, um die Fragmente zu entnehmen. Falls Fragmente unmittelbar nach unten fallen, rutschen sie durch ein Loch in einen Behälter, der durch Ziehen der großen frontalen Schublade entleert werden kann. Wir vergewissern uns in jedem Fall, dass alle wesentlichen Fragmente (i.d.R. zwei) der Probe entnommen wurden. Falls etwas fehlt, suchen, finden und entnehmen wir es! Jegliche im Prüfraum verbleibenden Gegenstände stellen eine Gefährdung für die Anlage und weitere Experimente dar.

Unter der Überschrift “Aktuelle Chargenergebnisse” werden einige Messwerte angezeigt; besonders relevant ist die ganz rechts dargestellte Energie. Ausgehend von der Probengeometrie einer Normprobe mit $(10 \times 10) \text{ mm}^2$ Querschnitt wird außerdem die bezogene Energie angezeigt. Diese Größe wird jedoch für den Kerbschlagbiegeversuch i.d.R. nicht verwendet. Außerdem wird der Anteil der verbrauchten Energie am verfügbaren Arbeitsvermögen dargestellt. Diese Angabe ist aus folgendem Grund interessant. Die Schlagarbeit soll nämlich 80 % des Arbeitsvermögens nicht überschreiten (damit der gesamte Schlag mit ausreichend hoher Verformungsgeschwindigkeit durchgeführt werden kann). Falls diese Grenze überschritten wird, gelten die Werte als ungenau und müssen entweder verworfen, oder doch zumindest entsprechend gekennzeichnet werden. Wird eine Probe nicht zerschlagen, darf das Ergebnis verwendet werden. Falls sich die Probe jedoch im Schlagwerk verklemmt, darf das Ergebnis *nicht* verwendet werden.

Falls Proben für die Messung der Temperaturabhängigkeit zur Verfügung stehen, wird je eine Probe im Eisfach eines Kühlschranks auf -20 °C gekühlt und eine in Eiswasser auf 0 °C gekühlt. Eine Probe wird auf Raumtemperatur belassen, eine wird in einem Wasserbad auf ca. 50 °C (ggf. Wärmemischung durch Zugabe von kochendem Wasser), eine wird in kochendem Wasser auf 100 °C erhitzt. Höhere Temperaturen können im Ofen erzielt werden.

Bei der Entnahme aus den Temperaturreservoirs vergewissern wir uns, welche Temperatur tatsächlich vorliegt. Nach erfolgter Temperatureinstellung werden die Proben rasch in das Pendelschlagwerk eingesetzt und zerschlagen (die Norm fordert eine Zeit kleiner 5 s).

Beachten Sie, dass sowohl sehr kalte als auch sehr heiße Oberflächen Anlass für Verbrennungen sein können! Verwenden Sie die bereitgestellte persönliche Schutzausrüstung. Das Pendelschlagwerk darf nur mit wirksamer Schutzverkleidung verwendet werden.

Die $K(T)$ -Kurve wird aufgezeichnet. Die bei den einzelnen Temperaturen auftretenden Bruchflächen werden hinsichtlich ihrer spröden und duktilen Anteile lichtmikroskopisch untersucht und in geeigneter Weise quantitativ beurteilt (USB-Mikroskop). Möglichkeiten zur Festlegung von Übergangstemperaturen werden diskutiert.

Nach Durchführung der letzten Messung (an einem gegebenen Termin) muss der Hammer in der vertikalen Ruheposition verbleiben (niedrigste Energie, geringstes Gefährdungspotential), und das Pendelschlagwerk wird am rückseitigen Hauptschalter ausgeschaltet. Es ist nicht erforderlich, die Auswertungseinheit in jedweder Form "herunterzufahren".

Literaturverzeichnis

- [DINa] DIN 50115:1991-04: *Prüfung metallischer Werkstoffe—Kerbschlagbiegeversuch—Besondere Probenformen und Auswerteverfahren.*
- [DINb] DIN 50125:2009-07: *Prüfung metallischer Werkstoffe—Zugproben.*
- [DINc] DIN EN ISO 148-1:2011-01: *Metallische Werkstoffe—Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy—Teil 1: Prüfverfahren.*
- [DIND] DIN EN ISO 6506-1:2006-03: *Metallische Werkstoffe—Härteprüfung nach Brinell—Teil 1: Prüfverfahren.*
- [DINE] DIN EN ISO 6507-1:2006-03: *Metallische Werkstoffe—Härteprüfung nach Vickers—Teil 1: Prüfverfahren.*
- [DINF] DIN EN ISO 6892-1:2009-12: *Metallische Werkstoffe—Zugversuch—Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.*
- [MZ11] Eckard Macherauch and Hans-Werner Zoch. *Praktikum in Werkstoffkunde.* Vieweg + Teubner Verlag, 2011.