

**DIN EN ISO 8401**

ICS 17.040.20

Einsprüche bis 2016-09-22  
Vorgesehen als Ersatz für  
DIN EN ISO 8401:1995-01

**Entwurf**

**Metallische Schutzschichten –  
Überblick über Verfahren zur Messung der Duktilität  
(ISO/FDIS 8401:2016);  
Deutsche und Englische Fassung FprEN ISO 8401:2016**

Metallic coatings –  
Review of methods of measurement of ductility (ISO/FDIS 8401:2016);  
German and English version FprEN ISO 8401:2016

Revêtements métalliques –  
Vue d'ensemble sur les méthodes de mesurage de la ductilité (ISO/FDIS 8401:2016);  
Version allemande et anglais FprEN ISO 8401:2016

**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-07-22 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter [www.din.de/go/entwuerfe](http://www.din.de/go/entwuerfe) bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter [www.entwuerfe.normenbibliothek.de](http://www.entwuerfe.normenbibliothek.de), sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an [nmp@din.de](mailto:nmp@din.de) möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter [www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe](http://www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe) oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter [www.dke.de/stellungnahme](http://www.dke.de/stellungnahme) abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 88 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

## **Nationales Vorwort**

Dieses Dokument (FprEN ISO 8401:2016) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Großbritannien) gehalten wird.

Der zuständige deutsche Arbeitsausschuss ist der NA 062-01-61 AA „Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der FprEN ISO 8401 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

## **Änderungen**

Gegenüber DIN EN ISO 8401:1995-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Korrektur der Formel C.10;
- b) Anpassung an die aktuellen Gestaltungsregeln.

## **Metallische Schutzschichten — Überblick über Verfahren zur Messung der Duktilität (ISO/FDIS 8401:2016)**

*Revêtements métalliques — Vue d'ensemble sur les méthodes de mesurage de la ductilité (ISO/FDIS 8401:2016)*

*Metallic coatings — Review of methods of measurement of ductility (ISO/FDIS 8401:2016)*

ICS:

Deskriptoren:

Dokument-Typ: Europäische Norm  
Dokument-Untertyp:  
Dokumentstufe: parallele formelle Abstimmung vorgelegt  
Dokumentsprache: D

STD Version 2.8f

## Inhalt

|                                                                                                                              | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Europäisches Vorwort .....                                                                                                   | 3     |
| Vorwort .....                                                                                                                | 4     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                                                    | 5     |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                                                               | 6     |
| 3 Begriffe .....                                                                                                             | 6     |
| 4 Prüfungen an freien Folien .....                                                                                           | 8     |
| 4.1 Allgemeines .....                                                                                                        | 8     |
| 4.2 Zugversuch .....                                                                                                         | 8     |
| 4.3 Biegeversuch (mit Mikrometerschraube) .....                                                                              | 11    |
| 4.4 Faltversuch (mit Schraubstock) .....                                                                                     | 14    |
| 4.5 Hydraulischer Wölbungsversuch .....                                                                                      | 15    |
| 4.6 Mechanischer Wölbungsversuch .....                                                                                       | 18    |
| 5 Prüfungen an Überzügen auf den Grundwerkstoffen .....                                                                      | 22    |
| 5.1 Allgemeines .....                                                                                                        | 22    |
| 5.2 Zugversuch .....                                                                                                         | 24    |
| 5.3 Dreipunkt-Biegeversuch [6] .....                                                                                         | 24    |
| 5.4 Vierpunkt-Biegeversuch [7] .....                                                                                         | 26    |
| 5.5 Biegung um einen Zylinderdorn .....                                                                                      | 28    |
| 5.6 Biegung um einen spiralförmigen Dorn .....                                                                               | 29    |
| 5.7 Biegung um einen kegelförmigen Dorn .....                                                                                | 31    |
| 5.8 Mechanischer Wölbungstest .....                                                                                          | 33    |
| 6 Auswahl des Prüfverfahrens .....                                                                                           | 33    |
| 7 Prüfbericht .....                                                                                                          | 34    |
| Anhang A (informativ) Verfahren zur Herstellung von Folien .....                                                             | 35    |
| A.0 Einführung .....                                                                                                         | 35    |
| A.1 Aufbringen einer Schicht auf einen löslichen Grundwerkstoff .....                                                        | 35    |
| A.2 Aufbringen einer Schicht auf einen nicht haftenden Grundwerkstoff .....                                                  | 35    |
| Anhang B (informativ) Berechnung der Duktilität bei Vergrößerung der wirksamen Oberfläche<br>einer Folie (Ausbauchung) ..... | 37    |
| Anhang C (informativ) Berechnung der Duktilität und Zugfestigkeit beim hydraulischen<br>Wölbungstest .....                   | 40    |
| Anhang D (normativ) Berechnung der Duktilität beim mechanischen Wölbungstest .....                                           | 43    |
| Literaturhinweise .....                                                                                                      | 44    |

## **Europäisches Vorwort**

Dieses Dokument (FprEN ISO 8401:2016) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 107 „Metallic and other inorganic coatings“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen formellen Abstimmung vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 8401:1994 ersetzen.

### **Anerkennungsnotiz**

Der Text von ISO/FDIS 8401:2016 wurde vom CEN als FprEN ISO 8401:2016 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

## Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe [www.iso.org/patents](http://www.iso.org/patents)).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: [www.iso.org/iso/foreword.html](http://www.iso.org/iso/foreword.html).

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 107, *Metallic and other inorganic coatings*.

Anwender sollten beachten dass alle Internationalen Normen von Zeit zu Zeit einer Revision unterzogen werden und dass jede Referenz hierin zu jeder anderen Internationalen Norm die letzte Ausgabe in Bezug nimmt, wenn nicht anders angegeben.

## 1 Anwendungsbereich

**1.1** In dieser Internationalen Norm sind allgemeine Verfahren zur Messung der Duktilität von metallischen Überzügen mit einer Dicke kleiner als 200 µm festgelegt, die durch elektrolytische Abscheidung, autokatalytische Abscheidung oder andere Verfahren aufgebracht wurden (siehe Anmerkung).

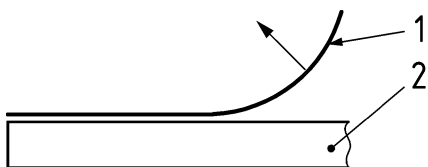
Die Verfahren zur Messung der Duktilität metallischer Überzüge können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- Prüfungen an freien Folien (vom Grundwerkstoff abgehoben);
- Prüfungen der Überzüge auf Grundwerkstoffen.

**ANMERKUNG** Falls in Internationalen Normen für einzelne Überzüge spezielle Prüfverfahren enthalten sind, sollten sie bevorzugt und zuvor zwischen Lieferer und Besteller vereinbart werden.

**1.2** Bei der Prüfung an freien Folien, die vom Grundwerkstoff abgehoben sind (siehe Bild 1), können die Folien aus einer oder mehreren metallischen Schichten bestehen. Dadurch sind die Messung der Duktilität von Verbundwerkstoffen sowie die Bestimmung des Einflusses der einzelnen Schichten auf die Gesamtduktilität möglich. Verfahren für Prüfungen an freien Folien werden im Abschnitt 3 beschrieben. Verfahren zur Herstellung der Folien für die Prüfung werden im Anhang A erörtert.

**1.3** Bei der Prüfung von Überzügen auf den Grundwerkstoffen (siehe Bild 2) ist es besonders wichtig, den genauen Punkt für die Risseinleitung auf der Deckschicht zu bestimmen. Es sind die unterschiedlichen Verfahren zur Erkennung dieses Punktes bei normalem oder entsprechend korrigiertem Sehvermögen oder mit einer Lupe zu beachten. Siehe Anleitung für die einzelnen Verfahren. Diese Verfahren können auch dazu verwendet werden, eine Versprödung des Grundwerkstoffs aufzuzeigen, die sich beim Beschichtungsvorgang ergeben haben kann. Verfahren zur Prüfung der Schutzschichten auf den Grundwerkstoffen werden im Abschnitt 4 beschrieben.



### Legende

- 1 Metallfolie
- 2 Substrat

**Bild 1 — Folie, welche vom Substrat getrennt werden kann**

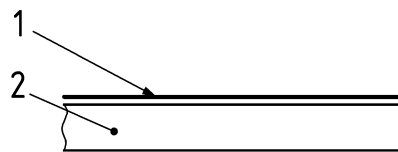


**Bild 2 — Schicht auf dem Substrat**

**1.4** Obwohl die Duktilität eine Werkstoffeigenschaft und von den Maßen der Probe unabhängig ist, kann die Dicke des Überzugs den Wert der linearen Dehnung ( $\Delta l/l_0$ ) beeinflussen.

**1.4.1** Sehr dünne Überzüge haben andere Eigenschaften, da der Aufbau der ersten Schichten von den Eigenschaften des Grundwerkstoffs (Epitaxie) beeinflusst wird. In den ersten Stadien der Abscheidung können hohe Eigenspannungen auftreten, die auf die Duktilität einwirken.

**1.4.2** Es ist wesentlich, dass die Probe eine gleichmäßige Dicke aufweist, da dünnere Stellen eine vorzeitige Rissbildung einleiten. Ferner ist die Stromdichte bei elektrolytisch beschichteten Proben an dünneren Teilen niedriger und an dickeren Teilen höher; darum können Unterschiede in der Stromdichte zu unterschiedlicher Duktilität führen. Die angewendete Stromdichte sollte über die gesamte Probe möglichst gleichmäßig beibehalten und ihr Wert protokolliert werden.

## 2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten folgende Definitionen.

ISO und IEC unterhalten terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen:

— ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

— IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>

### 3.1

#### **Duktilität**

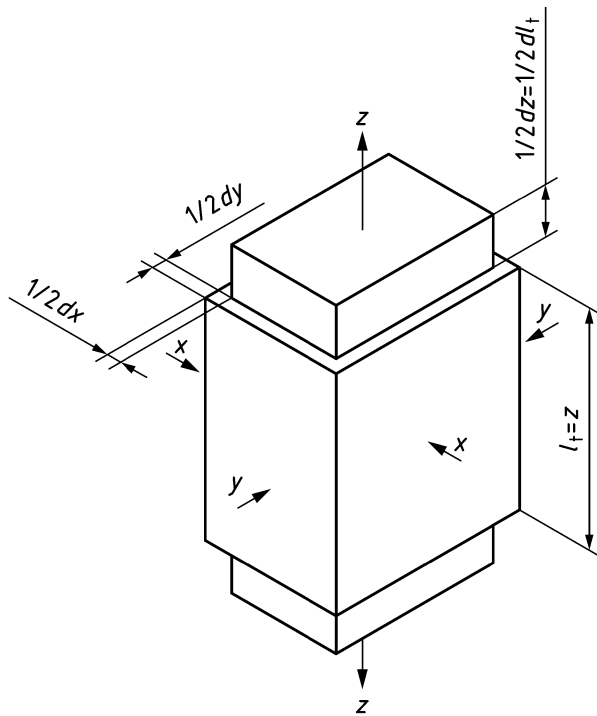
Fähigkeit eines metallischen oder anderen Überzugs, eine bleibende und/oder elastische Verformung ohne Bruch oder Rissbildung zu ertragen

### 3.2

#### **lineare Dehnung**

Verlängerung  $\Delta l$  einer Probe, bezogen auf die Anfangslänge  $l_0$ . Sie dient als Maß für die Duktilität, dieses Verhältnis wird häufig in Prozent ausgedrückt

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Allgemeinen werden die Proben gedehnt (siehe Bild 3). Bei bestimmten Biegeversuchen wird die Deckschicht der Probe, d. h. die elektrolytisch aufgebrachte Schicht, gedehnt. Beim Wölbungstest wird jedoch die Oberfläche der Folie vergrößert, wodurch die Berechnung der Längsdehnung aus der Verringerung der Dicke erforderlich ist. Die Berücksichtigung der Verformungskomponente (Ausdehnung) in nur einer Achse würde zu irreführenden Angaben über die Verformbarkeit des Werkstoffs führen (siehe Bild 4). In diesen Fällen ist die aus der Vergrößerung der wirksamen Oberfläche berechnete Dickenverringerung der Folie ein vorteilhafteres Maß für die Duktilität des Werkstoffs (siehe Anhang B).



$$xyz = (x - dx)(y - dy)(z + dz)$$

$$xyz = xyz + xydz - xzdy - yzdx$$

$$\frac{dz}{z} = \frac{dy}{y} + \frac{dx}{x}$$

$$\frac{dz}{z} > \frac{dy}{y}$$

$$\frac{dl_t}{l_t} = \frac{dz}{z}$$

Bild 3 — Zugversuch

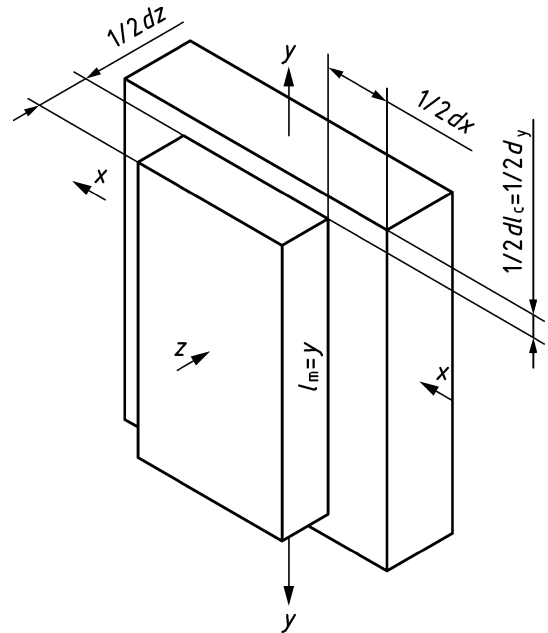


Bild 4 — Tiefungsprüfung

## 4 Prüfungen an freien Folien

### 4.1 Allgemeines

Die Verfahrensweisen bei diesen Prüfungen umfassen die Messung einer vom Grundwerkstoff abgehobenen Folie (siehe Bild 1). Dabei kann die zu prüfende Folie auch aus mehreren Schichten bestehen, so dass die Ermittlung des Einflusses von Zwischenschichten auf die Verformbarkeit von Mehrschichtfolien möglich wird. Beispiele sind Goldflash auf Gold-Kupfer-Legierungen und chrombeschichteten Nickelschichten. Verfahren zum Herstellen trägerloser Folien sind im Anhang A angegeben.

Es werden fünf Verfahren angegeben.

### 4.2 Zugversuch

#### 4.2.1 Prinzip

Bestimmung der Längsdehnung einer Folie, die in die Einspannbacken einer Zugprüfmaschine gespannt wird. Bei dieser Art der Beanspruchung wird die Folie verlängert, in Breite und Dicke jedoch verringert.

#### 4.2.2 Prüfeinrichtung

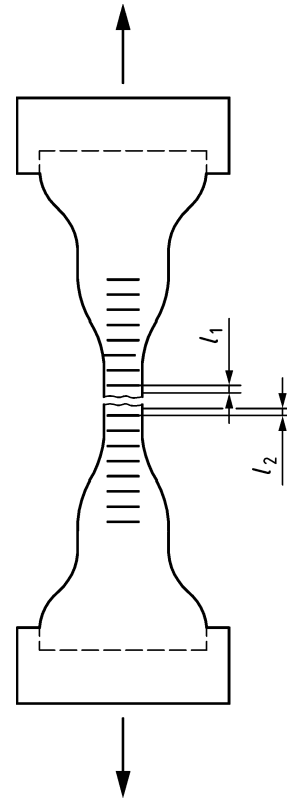
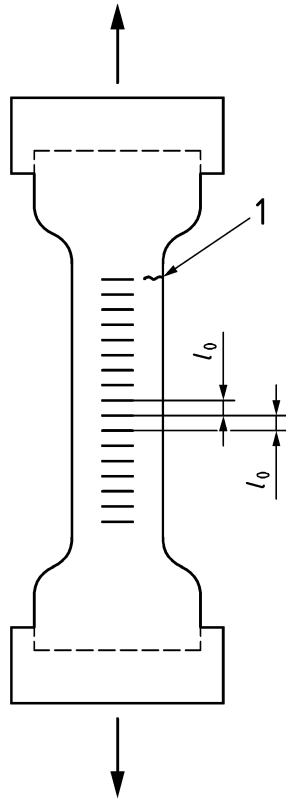
Für dieses Prüfverfahren kann eine herkömmliche Prüfeinrichtung für mechanische Prüfungen verwendet werden, die handelsüblich und in vielen metallurgischen Labors vorhanden ist [1]. Für einige Anwendungsfälle können Zugprüfmaschinen verwendet werden, bei denen eine mikroskopische Überwachung des Prüfablaufes erfolgt.

#### 4.2.3 Herstellung der Proben

Die Proben können aus der Folie herausgearbeitet, ausgestanzt oder ausgeschnitten werden, oder sie können durch Fotoprint mit Hilfe lichtempfindlicher Fotokopierlacke oder Folien hergestellt werden, die auf einen geeigneten Trägerwerkstoff aufgedruckt werden. Nach Entwicklung der Probenstruktur wird die Probe durch elektrolytisches Beschichten in die Endform überführt. Bei einem ähnlichen Verfahren wird die gewünschte Form chemisch oder elektrochemisch aus einer Folie geätzt, auf die ein geeigneter Resist durch Siebdruck oder durch einen lichtempfindlichen Fotolack aufgebracht wurde. Die letztgenannten Verfahren sind in der Industrie für gedruckte Schaltungen weit verbreitet. Die Proben haben im Allgemeinen eine rechteckige Form, können sich jedoch an beiden Enden verbreitern, um ein Abreißen in den Spannbacken zu vermeiden (siehe Bild 5 und Bild 6).

**Mögliche Maße für Proben für den Zugversuch [1]**

|                |     |      |      |
|----------------|-----|------|------|
| Messlänge (mm) | 200 | 50   | 25   |
| Breite (mm)    | 40  | 12,5 | 6,25 |



$$l_0 + \Delta l = l_1 + l_2$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 + l_2 - l_0}{l_0}$$

### Legende

1 Mikroriss

**Bild 5 — Vor der Prüfung**

**Bild 6 — Nach der Prüfung**

Einige Verfahren für die Probenherstellung können Mikrorisse an den Kanten verursachen, die zu einem vorzeitigen Versagen und fehlerhaften Ergebnissen führen. Die Herstellung der Proben unter Einbeziehung von Fotoprints oder Elektroforming wird bevorzugt, um Kantenfehler zu vermeiden.

Proben, die durch elektrolytisches Beschichten in Endform gebracht wurden, können dickere Kanten haben, falls keine Abschirmung oder andere Verfahrensweisen verwendet werden, um eine gleichmäßige Stromverteilung zu sichern (siehe Bild 7).

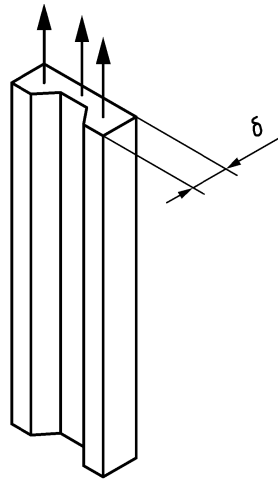


**Bild 7 —elektrolytisch beschichtetes Probestück mit dickeren Kanten**

Entsprechend der Herstellung nach Bild 5 sind auf der Oberfläche der Probe Markierungen in gleichem Abstand voneinander anzubringen. Vor der Prüfung ist der Abstand zwischen den Messmarken zu bestimmen.

#### 4.2.4 Durchführung

Die Probe ist in die Klemmbanken der Zugprüfmaschine einzuspannen und unter Verwendung einer ausgewählten Geschwindigkeit des Querschnitts zu beanspruchen. Nach der Prüfung ist der Abstand zwischen den Messmarken auf den Proben zu bestimmen (siehe Bild 6).

#### 4.2.5 Darstellung der Ergebnisse

##### 4.2.5.1 Berechnung

Die in Prozent angegebene Duktilität  $D$  ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$D = \frac{l_1 + l_2 - l_0}{l_0} \times 100$$

Dabei ist

$l_0$  der Abstand zwischen den Messmarken von der Prüfung;

$l_1 + l_2$  der Abstand zwischen den Messmarken nach der Prüfung.

##### 4.2.5.2 Variationskoeffizient

Mechanisch hergestellte Proben können Variationskoeffizienten  $s/\bar{D}$  von 20 % haben (dabei sind  $s$  die Standardabweichung und  $\bar{D}$  die mittlere Duktilität).

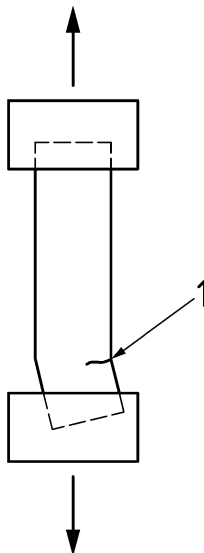
Durch elektrolytisches Beschichten in die endgültige Form unter Verwendung von Abschirmungen zur Sicherung einer gleichmäßigen Stromerteilung können Proben hergestellt werden, die geringere Variationskoeffizienten haben.

#### 4.2.6 Anmerkungen zur Durchführung

**4.2.6.1** Die Einschnürung der Probe (siehe Bild 6) kann die Messung sehr geringer Längenänderungen erfordern, dann ist ein Mikroskop mit einer Feineinstellungsskala zu verwenden.

**4.2.6.2** Das Einspannen zerbrechlicher, dünner Proben in die Spannbacken einer Zugprüfmaschine kann zu Vorspannungen in den Proben führen, die den wahren Dehnungswert verringern.

**4.2.6.3** Es ist zu beachten, dass ein Verdrehen der Probe zu vermeiden ist (siehe Bild 8).



#### **Legende**

1 Mikroriss

**Bild 8 — Verdrehtes Prüfstück**

**4.2.6.4** Können diese Fehlerquellen (4.2.6.1 bis 4.2.6.3) nicht vermieden werden, sollten andere Messverfahren für die Duktilität verwendet werden.

### **4.3 Biegeversuch (mit Mikrometerschraube)**

#### **4.3.1 Allgemeines**

Das Verfahren ist nur für die Beurteilung von Metallfolien mit niedriger Duktilität geeignet [2]. Die erhaltenen Werte haben keine einfache Beziehung zu Werten, die nach anderen Verfahren gewonnen wurden. Das hier beschriebene Verfahren ist für spröde Metalle, z. B. für Glanznickel, vorteilhaft.

#### **4.3.2 Prüfeinrichtung**

Mikrometerschraube

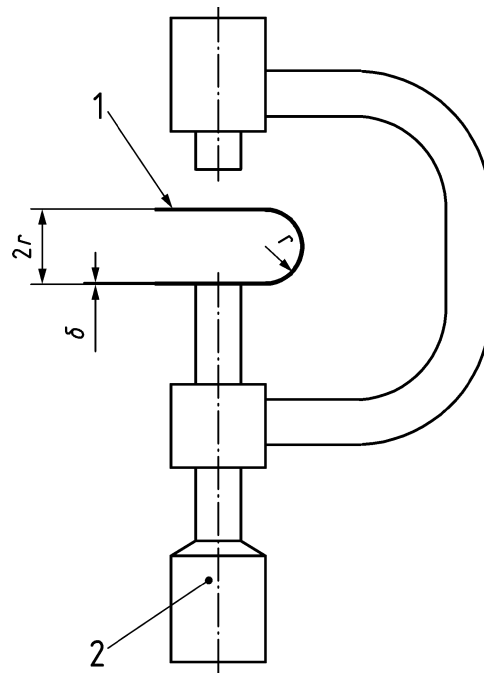
#### **4.3.3 Herstellung der Proben**

Aus der zu prüfenden Folie sind Streifen von 0,5 cm × 7,5 cm zu schneiden. Im Allgemeinen beträgt die Dicke der Folien 25 µm bis 40 µm. Die unter 4.2.3 und 4.2.6 beschriebenen Schwierigkeiten gelten auch für diese Prüfung. Mit einem Messgerät oder nach einem Verfahren, womit die zu bestimmende Dicke innerhalb 5 % ihres Nennwertes gemessen wird, ist die Dicke der Probe am Biegepunkt zu messen.

#### **4.3.4 Durchführung**

Die Probe ist in U-Form zu biegen und zwischen den Backen einer Mikrometerschraube so anzuordnen, dass beim Schließen der Backen die Biegung zwischen ihnen bleibt. Die Backen der Mikrometerschraube sind langsam zu schließen, bis die Folie reißt.

Die Ablesung an der Messschraube ist ebenso wie die Dicke der Folie zu protokollieren (siehe Bild 9).



#### Legende

- 1 Prüfstück
- 2 Mikrometer

**Bild 9 — Biegeversuch mit Mikrometerschraube**

Die Prüfung ist mindestens zweimal durchzuführen.

#### 4.3.5 Darstellung der Ergebnisse

##### 4.3.5.1 Berechnung

Es ist der Mittelwert der Mikrometerschraubenablesungen zu berechnen (siehe 4.3.4).

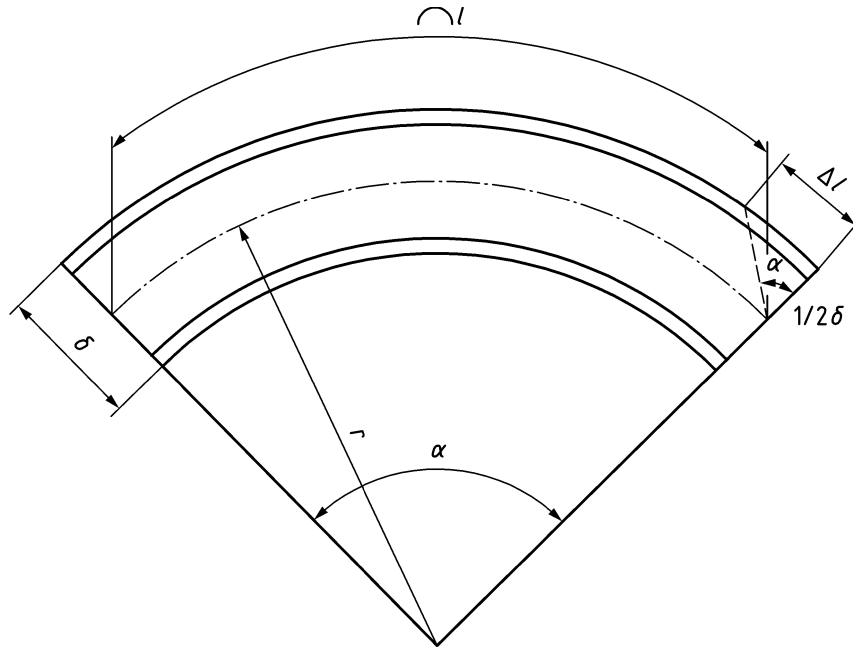
Die in Prozent angegebene Duktilität  $D$  ist nach folgender Gleichung zu berechnen (siehe Bild 10):

$$D = \frac{\delta}{2\bar{r} - \delta} \times 100$$

Dabei ist

$\delta$  die Dicke der Probe;

$2\bar{r}$  der Mittelwert aus den Ablesungen an der Mikrometerschraube.



$$\frac{\Delta l}{\frac{1}{2}\delta} = \frac{l}{r + \frac{1}{2}\delta}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{2r + \delta}$$

wenn  $\delta \ll 2r$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{2r}$$

**Bild 10 — Biegung eines Prüfstückes**

#### 4.3.5.2 Genauigkeit

Da der Wert für  $D$  rascher als  $\delta$  ansteigt, ist es wesentlich, den Wert für  $\delta$  mit hoher Genauigkeit zu messen. Wird eine Folie mit einer Dicke von  $20\ \mu\text{m}$  so gemessen, dass  $25\ \mu\text{m}$  abgelesen werden, ergibt sich unter der Annahme  $2\bar{r} = 0,5\ \text{cm}$  folgende Differenz:

$$D_1 = \frac{20 \times 10^{-4}}{0,5 - 20 \times 10^{-4}} \times 100 = 0,4\ \%$$

$$D_2 = \frac{25 \times 10^{-4}}{0,5 - 25 \times 10^{-4}} \times 100 = 0,5\ \%$$

d. h. eine Differenz von  $0,5\ \% - 0,4\ \% = 0,1\ \%$ .

Eine Dicke von  $25\ \mu\text{m}$  führt zu Ergebnissen, die  $25\ \%$  höher liegen als für eine Dicke von  $20\ \mu\text{m}$ .

Es ist offensichtlich, dass dieses Verfahren nur dann reproduzierbare Ergebnisse liefert, wenn  $\delta$  auf  $1\ \mu\text{m}$  und  $2r$  auf  $0,01\ \text{cm}$  gemessen wird.

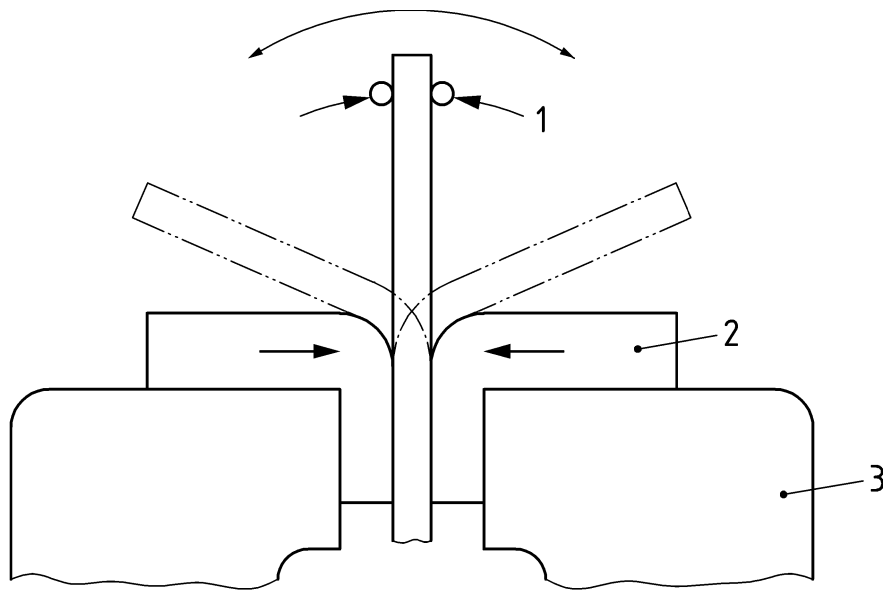
## 4.4 Faltversuch (mit Schraubstock)

### 4.4.1 Allgemeines

Obwohl es sich um eine einfache Prüfung handelt, die einigen Nutzen haben kann, können die Art der Prüfung, die infolge des Faltens auftretende Kaltverformung sowie andere Faktoren zu ungenauen Werten der Duktilität führen. Die Dicke der Probe beeinflusst die Ergebnisse, wobei dieser Einfluss nicht berechenbar ist.

### 4.4.2 Prüfeinrichtung

Schlosserschraubstock mit zwei kleinen bearbeiteten Backen zur Aufnahme der Probe (siehe Bild 11).



#### Legende

- 1 Biegehebel
- 2 Backen
- 3 Schrauben

**Bild 11 — Prüfeinrichtung zum Faltversuch**

### 4.4.3 Herstellung der Proben

Aus der Metallfolie sind rechteckige Streifen mit einer Breite von 1 cm und einer Länge von 5 cm zu schneiden.

### 4.4.4 Durchführung

Die Probe ist in die Schraubstockbacken zu spannen. Die Probe ist scharfkantig um 90° zu biegen, dann ist es aufeinanderfolgend um 180° in entgegengesetzte Richtungen zu biegen, bis der Bruch eintritt.

### 4.4.5 Ergebnisse

Die Anzahl der Faltungen ist ein Maß für die Duktilität.

## 4.5 Hydraulischer Wölbungsversuch

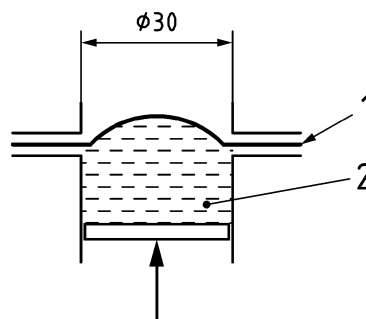
### 4.5.1 Allgemeines

Der hydraulische Wölbungsversuch kann dazu dienen, die Duktilität dünner Blechwerkstoffe genau zu messen. Eine Bearbeitung der Probe ist nicht erforderlich, es gibt keine Probleme beim axialen Ausrichten wie beim Zugversuch, und diese Prüfung ist besonders günstig für die Messung der Duktilität von duktilen Werkstoffen [3].

### 4.5.2 Prinzip (siehe Bild 12)

Einspannen einer Probe zwischen einen unten angebrachten Zylinder und eine oben angebrachte Platte. Die Oberplatte hat eine kreisförmige Öffnung mit demselben Durchmesser wie der Zylinder. Langsame und stetige Erhöhung des Wasserdrucks, um das Prüfstück kuppelförmig aufzuweiten, bis die Folie reißt.

Maße in Millimeter



#### Legende

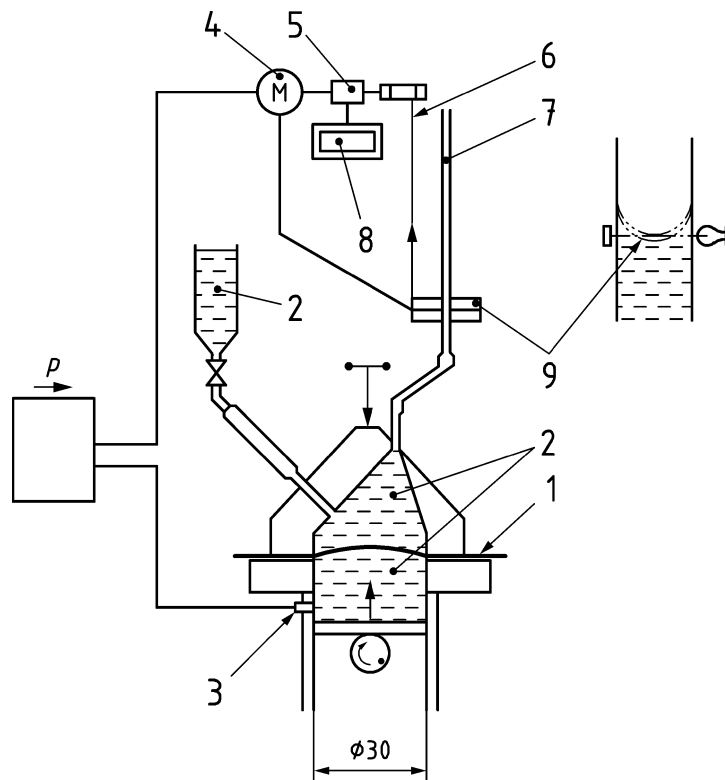
- 1 Probe
- 2 Wasser

**Bild 12 — Prinzip der hydraulischen Wölbung**

### 4.5.3 Prüfeinrichtung

Ein Beispiel ist in Bild 13 dargestellt, Versionen mit mechanischem Sensor zur Messung der Wölbungshöhe sind ebenfalls möglich.

Maße in Millimeter



### Legende

- |   |                          |   |                                                       |
|---|--------------------------|---|-------------------------------------------------------|
| 1 | Prüfstück                | 6 | Nylon                                                 |
| 2 | Wasser                   | 7 | Schauglas                                             |
| 3 | Druckempfindliches Modul | 8 | Digital 1 mV $\triangleq$ 0,01 cm <sup>3</sup>        |
| 4 | Motor                    | 9 | Messung der Höhe des Meniskus mit einer Lichtschranke |
| 5 | Potentiometer            |   |                                                       |

**Bild 13 — Prüfeinrichtung zur hydraulischen Wölbungsmessung**

### 4.5.4 Durchführung

Der unten angebrachte Zylinder ist mit der in Bild 13 schematisch dargestellten Einrichtung bis zum Rand mit Wasser zu füllen. Auf die Wasseroberfläche ist die Probe zu legen. Die Oberplatte in der Form eines Hohlkegels ist zu verwenden, um die Probe in seiner Lage festzuhalten.

Der Hohlkegel ist aus dem vorhandenen Vorratsbehälter mit Wasser zu füllen. Das überschüssige Wasser steigt in einen Wasserstandsanzeiger. Ist der Wasserstand oberhalb der lichtempfindlichen Schranke, wird das Ventil geschlossen, das den Wasserstrom aus dem Vorratsbehälter regelt. Der Motor ist anzulassen und die lichtempfindliche Schranke langsam anzuheben. Fluchtet sie mit dem Meniskus, wird der Lichtstrahl im Gerät abgelenkt; der dadurch auftretende Spannungsabfall schaltet den Motor aus.

Durch den Kolben wird der Druck unter der Probe erhöht. Wenn der Meniskus im Wasserstandsanzeiger sich zu erhöhen beginnt, wird der Motor automatisch betätigt, und die lichtempfindliche Schranke verfolgt den Anstieg des Wasserstandes. Mit einem Potentiometer ist die Volumenzunahme auf einem x-y-Schreibgerät aufzuzeichnen.

Gleichzeitig wird von einem Druckfühler im Zylinder der Druck unter der Probe protokolliert. Bei einer handelsüblichen Ausführungsart des Gerätes wird ein druckempfindlicher Schalter verwendet, um den Motor im Augenblick des Zerreißens der zu prüfenden Folie auszuschalten, so dass das Gesamtvolumen des verdrängten Wassers unmittelbar an der Digitalanzeige des Potentiometers abgelesen werden kann.

#### **4.5.5 Darstellung der Ergebnisse**

##### **4.5.5.1 Berechnung**

Die Duktilität der metallischen Probe kann aus dem Volumen des verdrängten Wassers berechnet werden, das gleich dem Volumen innerhalb der Ausbauchung (Wölbung) ist. Die in Prozent angegebene Duktilität ist nach der Gleichung zu berechnen, die im Anhang C abgeleitet und diskutiert wird. Die Zugfestigkeit der Metallfolie kann aus dem Wert des Drucks beim Zerreißen bestimmt werden (siehe Anhang C).

##### **4.5.5.2 Variationskoeffizient**

Weil lediglich die Folienmitte ( $\varnothing 3$  cm) geprüft wird, sind die Stromdichte und die Dicke in diesem Bereich vermutlich konstanter als bei Zugversuchen. Werte von  $s/\bar{D} = 0,05$ , d. h. 5 % sind leicht zu erhalten.

#### **4.5.6 Anmerkungen zur Durchführung**

Nadelstichporen im Prüfstück sind eine mögliche Fehlerquelle. Sie können vor der Prüfung durch „Durchleuchten“ nachgewiesen werden. Eine 100-W-Glühlampe in einem Kasten mit einem Loch, dessen Durchmesser etwas kleiner ist als die Öffnung in der Oberplatte oder dem Hohlkegel, ist ausreichend.

Sind Nadelstichporen vorhanden, besteht die Möglichkeit, das Prüfstück mit einer sehr dünnen Plastikfolie zu unterlegen, die ein Durchdringen des Wassers durch die Nadelstichporen verhindert.

Durch Sichtprüfung ist es möglich, den Augenblick der Rissbildung zu bemerken.

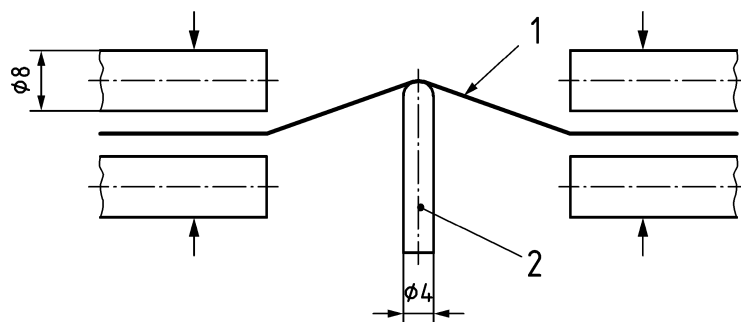
Das Anhalten des Motors der lichtempfindlichen Schranke in diesem Moment ergibt eine einwandfreie Anzeige der Duktilität der porösen Folie.

## 4.6 Mechanischer Wölbungsversuch

### 4.6.1 Allgemeines

Mechanische Wölbungsversuche sind ähnlich wie die hydraulischen Wölbungsversuche. Die Ausbauchung wird jedoch mechanisch so erzeugt, wie das in Bild 14 schematisch dargestellt ist.

Maße in Millimeter



#### Legende

- 1 Folie
- 2 Dorn

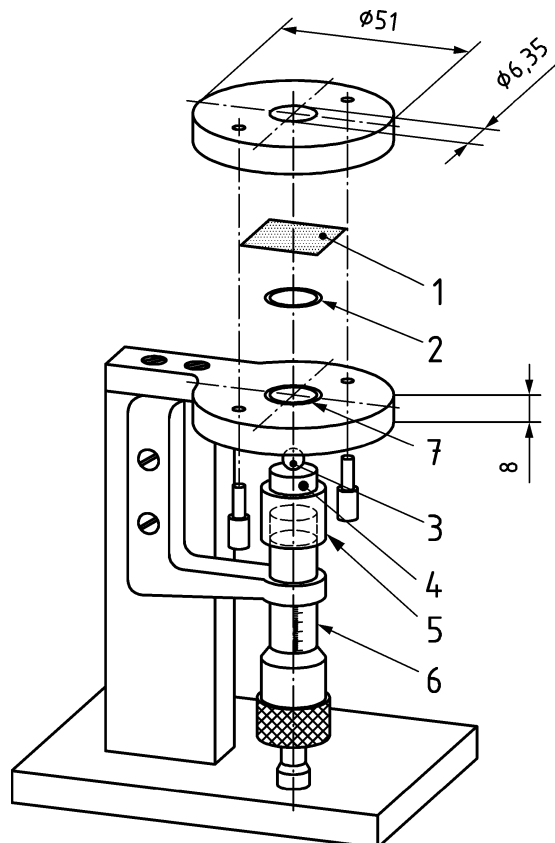
**Bild 14 —Prinzip der mechanischen Wölbung**

#### 4.6.2 Prüfeinrichtung

Eine Einrichtung zum Messen der Duktilität dünner Metallfolien ist nicht ohne weiteres verfügbar, kann jedoch leicht zusammengebaut werden.

Zwei Ausführungsarten der Prüfeinrichtungen werden verwendet. Das einfachste besteht aus einer Mikrometerschraube, einer Spindelverlängerung mit einer Stahlkugel und einem Paar kreisförmiger Platten, von denen jede in der Mitte eine runde Öffnung aufweist [4] (siehe Bild 15).

Maße in Millimeter



#### Legende

- |   |                    |   |                    |
|---|--------------------|---|--------------------|
| 1 | Prüfstück          | 5 | Epoxidisolierung   |
| 2 | O-Ring             | 6 | Mikrometerschraube |
| 3 | Stahlkugel         | 7 | Nut                |
| 4 | Verlängerungsstück |   |                    |

**Bild 15 — Prüfeinrichtung für mechanische Wölbung**

#### 4.6.3 Durchführung

Eine Prüffolie ist zwischen den kreisförmigen Platten anzuordnen. Mit zwei Schrauben sind die obere und die untere Platte fest miteinander zu verspannen. Danach ist die Prüffolie durch Drehen der Mikrometerschraube langsam aufwärts zu drücken. An der Mikrometerschraube ist der von der Stahlkugel vom ersten Kontakt mit der Metallfolie bis zum Punkt der Risseinleitung zurückgelegte Weg abzulesen.

Der erste Berührungspunkt zwischen Stahlkugel und Prüfstück wird elektrisch angezeigt. Eine batteriebetriebene Lampe ist in der oberen Messingplatte so angebracht, dass die Lampe im Moment der Berührung von Stahlkugel und Prüfstück aufleuchtet. Die Lampe bleibt während der Prüfung an.

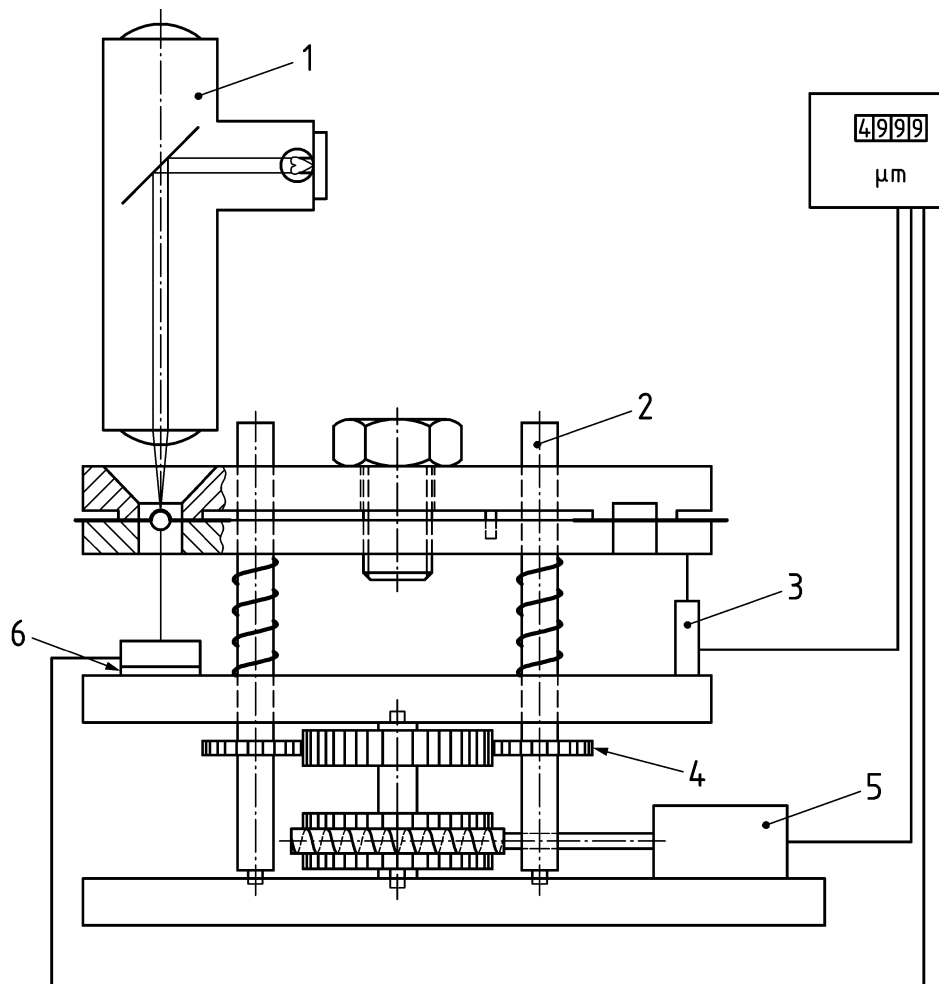
Der optische Nachweis für den Beginn des Zerbrechens ist mit Hilfe einer Lupe (15fach) zu führen, die an der Oberplatte befestigt (in Bild 15 nicht dargestellt) ist.

#### 4.6.4 Darstellung der Ergebnisse

Es ist möglich, die Duktilität aus der Kegelhöhe durch Berechnung der Dickenabnahme der Folie zu berechnen (siehe Anhang D).

#### 4.6.5 Sonderfälle

Die Verwendung eines leicht veränderten Ablaufs kann vorteilhaft sein. Bei den in den Bildern 16, 17 und 18 schematisch dargestellten Prüfgeräten bleibt die Stahlkugel feststehend, die beiden Platten und die Probe werden jedoch mit einem Motor abwärts bewegt, bis die Probe reißt.

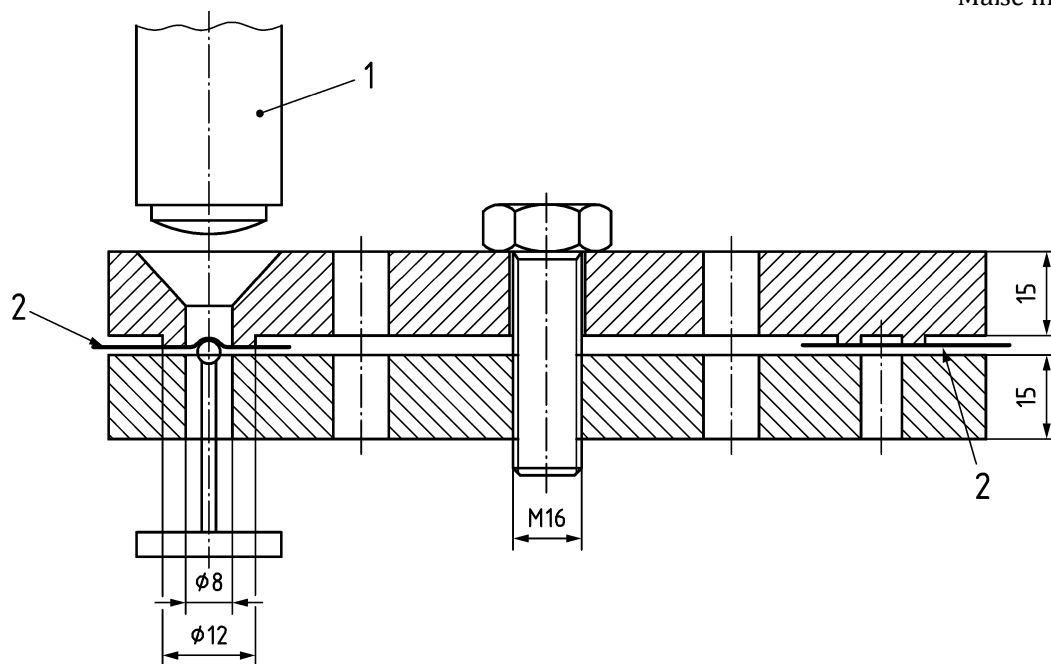


#### Legende

- |   |                              |   |              |
|---|------------------------------|---|--------------|
| 1 | metallographisches-Mikroskop | 4 | Getriebe     |
| 2 | Gewindespindel               | 5 | Motor        |
| 3 | Potentiometer                | 6 | Isolierfolie |

**Bild 16 — Alternative Prüfeinrichtung für mechanische Wölbung**

Maße in Millimeter



**Legende**

- 1 metallographisches Mikroskop
- 2 Prüfstück

**Bild 17 —Detail aus Bild 16**

Maße in Millimeter

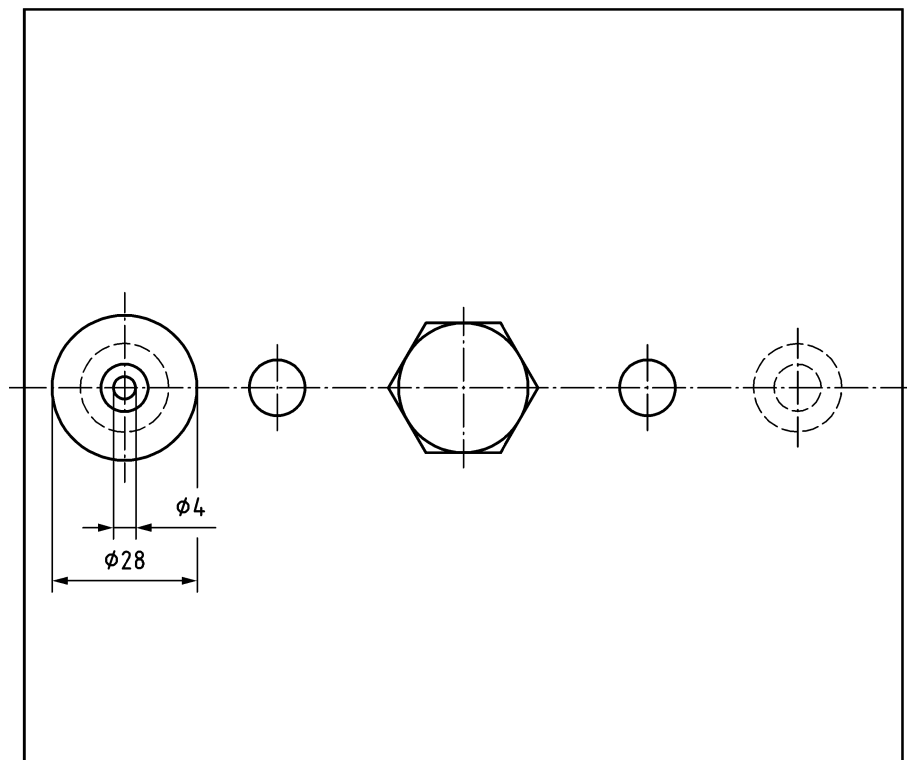


**Bild 18 — Draufsicht zu Bild 17**

Das Gerät wird unter ein Mikroskop gelegt, das bei der Betrachtung der ersten Risse eine 70fache Vergrößerung zulässt. Nach Beginn der Prüfung stoppt der Motor, wenn ein elektrischer Kontakt zwischen Stahlkugel und Probe erfolgt. Im Augenblick der Rissbildung wird der Motor von Hand angehalten. Durch die Verschiebung eines Linearpotentiometers mit einer Auflösung von 5 µm wird die Kegelhöhe gemessen.

Durch ein Prüfgerät mit Motorantrieb ist es leichter, gute Ergebnisse zu erreichen, weil

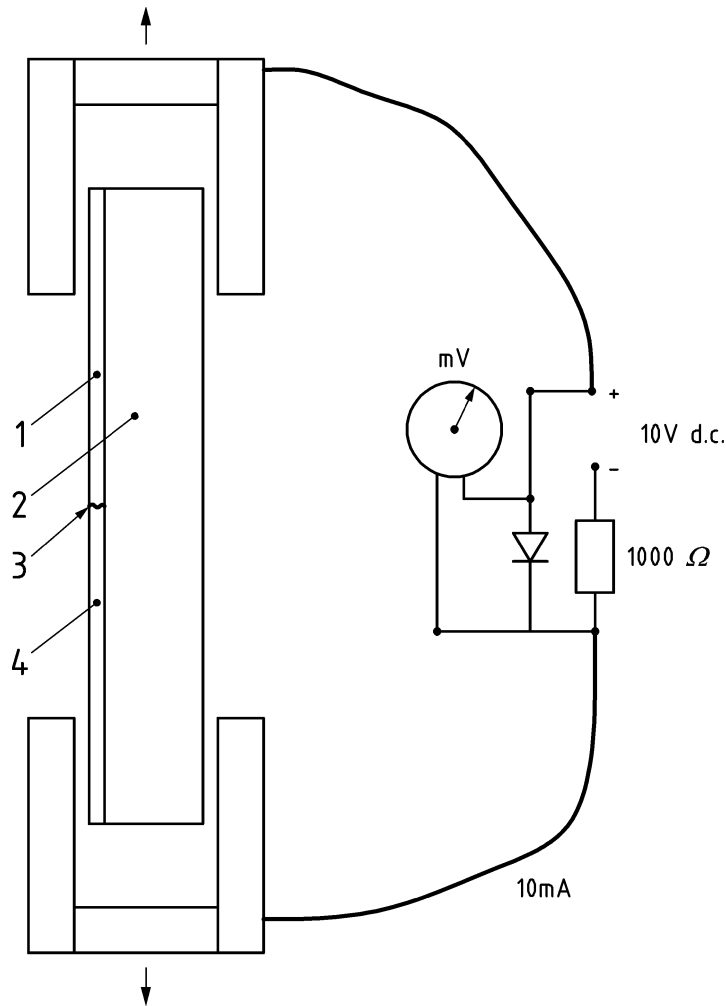
- a) es kein Drehmoment der Stahlkugel gegenüber der Folie gibt, das beim Drehen der Mikrometerschraube auftritt;
- b) ein Mikroskop, vorzugsweise mit Interferenzbeleuchtung in Nomarski-Ausführung, den Augenblick des Auftretens der ersten Risse zuverlässiger anzeigt;
- c) die elektrische Messung der Kegelhöhe genauer als bei der Mikrometerschraubenmessung ist;
- d) eine bessere Beleuchtung und die Tatsache, dass der Abstand zwischen Mikroskop und Kegelspitze konstant ist, reproduzierbarere Daten ergeben als bei der Prüfung mit der Mikrometerschraube. Es wird leicht ein Wert für  $s/\bar{D} = 0,05$  erreicht, d. h. 5 %.

## **5 Prüfungen an Überzügen auf den Grundwerkstoffen**

### **5.1 Allgemeines**

Die nachfolgend beschriebenen Arbeitsweisen schließen die Prüfung einer Folie auf einem Grundwerkstoff ein (siehe Bild 2). In diesem Fall ist mit besonderer Sorgfalt vorzugehen, um exakt den Punkt zu ermitteln, an dem die Deckschicht reißt. Die unterschiedlichen Verfahren zur Erkennung dieses Punktes durch normales oder korrigiertes Sehvermögen oder mit einer Lupe sind zu berücksichtigen. Siehe die Anleitung, die bei den Beschreibungen der einzelnen Verfahren angegeben sind.

Der Grundwerkstoff muss sehr duktil sein, außer, es werden sehr spröde elektrolytisch abgeschiedene Schichten beurteilt. Als Grundwerkstoffe bevorzugt werden geglühtes Kupfer oder Messing oder ein geeigneter Kunststoff, z. B. ABS. Handelt es sich beim Grundwerkstoff um elektrolytisch beschichtetes ABS, kann der Augenblick der Rissbildung durch Aufzeichnen des elektrischen Widerstands der Prüfschicht während des Versuches genau ermittelt werden (siehe Bild 19). In einigen Fällen verfolgt die Prüfung das Ziel, die Sprödigkeit des Grundwerkstoffs, die durch das elektrolytische Beschichten verursacht werden kann, zu messen, z. B. die Wasserstoffversprödung von Stahl, der mit Zink beschichtet wurde.



### Legende

- |                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| 1 außenstromlos abgeschiedenes Cu | 3 Risse       |
| 2 ABS                             | 4 Prüfschicht |

**Bild 19 — Zugversuch mit elektrischer Riss-Erkennung**

Die Anwendung dieser Verfahren vermeidet viele Nachteile, die bei der Bearbeitung sehr dünner Folien entstehen, es wächst jedoch das Problem, den Augenblick der Rissbildung in der Deckschicht zu ermitteln.

Es werden sieben Verfahren beschrieben.

## **5.2 Zugversuch**

### **5.2.1 Prüfeinrichtung**

Siehe 3.2.2

### **5.2.2 Probenvorbereitung**

Die Überzüge werden auf einem Grundwerkstoff haftend aufgebracht, der duktiler sein muss als die Beschichtung.

Die Proben müssen spannend bearbeitet werden; die Seitenkanten können poliert werden, um Kantenrisse zu verhindern. Die Einschnürung wird beträchtlich verringert, und es ist leicht möglich, die Probe in die Spannbacken der Zugprüfmaschine unter Vermeidung mangelhafter Ausrichtung einzubringen.

### **5.2.3 Durchführung**

Siehe 3.2.4

Es ist schwierig, den genauen Zeitpunkt des Rissbeginns zu bestimmen, obwohl er in relativ spröden, hochglänzenden elektrolytisch aufgetragenen Schichten wie Nickel durch visuelle Beobachtung festgestellt werden kann [5]. Bei elektrolytisch abgeschiedenen Schutzschichten auf Kunststoffen kann der Augenblick des Rissbeginns durch Aufzeichnung des elektrischen Widerstands des metallischen Überzugs während der Prüfung genau ermittelt werden (siehe Bild 19).

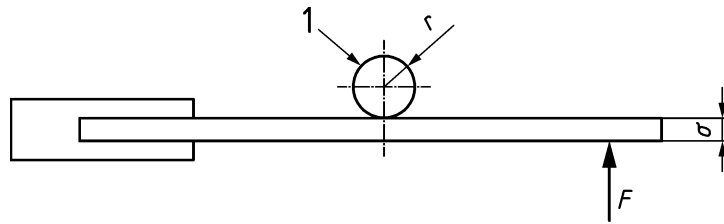
## **5.3 Dreipunkt-Biegeversuch [6]**

### **5.3.1 Prinzip**

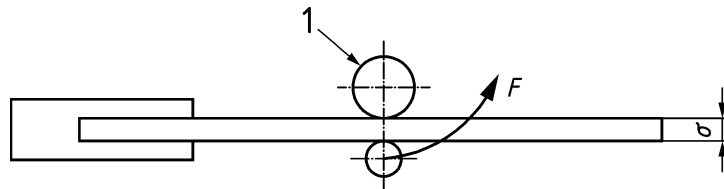
Angriff einer Kraft quer zur Probe in dem Bereich, der gebogen wird, im Allgemeinen in der Mitte der Probe.

### **5.3.2 Prüfeinrichtung**

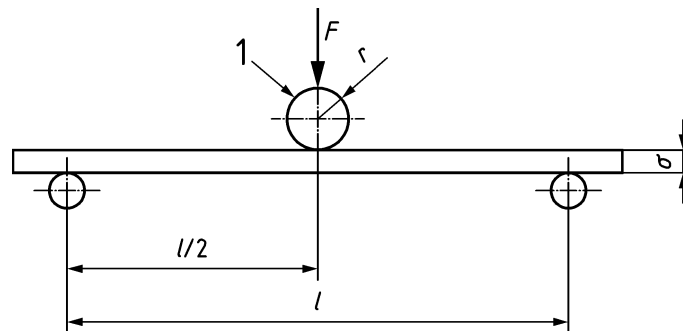
Die Biegekräfte können nach einer der drei Anordnungen angreifen, die in Bild 20 dargestellt sind. Für jede der Belastungsbeanspruchungen werden verschiedene Einrichtungen zum Festhalten der Probe verwendet. Diese Einrichtungen können an einer Universalprüfmaschine angebracht sein, oder es kann ein spezielles Biegegerät verwendet werden.



**a) Ein Ende eingespannt, Kraftangriff nahe dem freien Ende**



**b) Ein Ende eingespannt, Kraftangriff nahe dem Biegedorn**



**c) Beide Enden gelagert**

### Legende

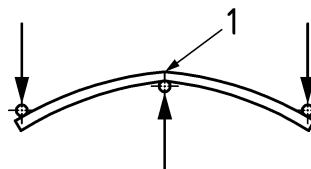
1 Dorn

**Bild 20 — Schematische Darstellung der Spannvorrichtung für den Biegeversuch mit teilweiser Führung**

### 5.3.3 Durchführung

Die Oberfläche ist in regelmäßigen Zeitabständen zu untersuchen, um genau den Augenblick zu bestimmen, in dem die Schutzschicht reißt. Das ist schwierig durchführbar, wenn nicht ein Verfahren für die ständige Beobachtung der Proben während des Biegens in die Prüfung mit dem Biegegerät einbezogen wird.

Eine Hauptfehlerursache ist die Neigung der Probe, bei der Prüfung, wie in Bild 21 dargestellt, zu knicken oder umzuschwenken.



### Legende

1 Knick

**Bild 21 — Knickung des Prüfstückes**