

DIN EN ISO 16808



ICS 77.040.10

Entwurf

Einsprüche bis 2022-03-14
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 16808:2014-11

**Metallische Werkstoffe –
Blech und Band –
Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve durch einen
hydraulischen Tiefungsversuch mit optischen Messsystemen
(ISO/FDIS 16808:2021);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 16808:2021**

Metallic materials –
Sheet and strip –
Determination of biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring
systems (ISO/FDIS 16808:2021);
German and English version prEN ISO 16808:2021

Matériaux métalliques –
Tôles et bandes –
Détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale au moyen de l'essai de
gonflement hydraulique avec systèmes de mesure optiques (ISO/FDIS 16808:2021);
Version allemande et anglaise prEN ISO 16808:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-01-14 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 von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, 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.

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Gesamtumfang 56 Seiten

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 16808:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164 „Mechanical testing of metals“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 459 „ECISS — Europäisches Komitee für Eisen- und Stahlnormung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-42 AA „Zug- und Duktilitätsprüfung für Metalle“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 16808:2014-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Bezeichnung r1_100 in Tabelle 1 angepasst;
- b) der Titel von Bild A.4 angepasst;
- c) Gleichung (B.2) angepasst;
- d) Anhang A gelöscht und die Nummerierung der anderen Anhänge angepasst;
- e) Anhang A (ehemals Anhang B) ist nun informativ;
- f) kleinere editorielle Änderungen anhand der ISO/IEC Direktiven Teil 2:2021 vorgenommen.

<i>Titel de:</i>	Metallische Werkstoffe — Blech und Band — Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve durch einen hydraulischen Tiefungsversuch mit optischen Messsystemen (ISO/FDIS 16808:2021)
<i>Titel en:</i>	Metallic materials — Sheet and strip — Determination of biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring systems (ISO/FDIS 16808:2021)
<i>Titel fr:</i>	Matériaux métalliques — Tôles et bandes — Détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale au moyen de l'essai de gonflement hydraulique avec systèmes de mesure optiques (ISO/FDIS 16808:2021)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Symbole und Abkürzungen	5
5 Kurzbeschreibung	6
6 Prüfeinrichtung	7
7 Optisches Messsystem	9
8 Prüfstück	10
8.1 Allgemeines	10
8.2 Aufbringen des Gitters	10
8.2.1 Art des Gitters	10
8.2.2 Gitteraufbringung	10
9 Verfahren	11
10 Auswerteverfahren für die Bestimmung des Krümmungsradius und der Umformgrade im Kuppenbereich	11
11 Berechnung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurven	12
12 Prüfbericht	13
Anhang A (informativ) Prüfverfahren für eine Qualitätsüberprüfung des optischen Messsystems	15
A.1 Prüfverfahren	15
A.2 Nachbereitung	16
A.3 Bestimmung der normierten Standardabweichung	16
Anhang B (informativ) Berechnung der Krümmung auf der Grundlage einer Wirkungsfläche	18
B.1 Allgemeines	18
B.2 Berechnung der Werkstoffdicke am Kuppenpol	19
Anhang C (informativ) Bestimmung des äquibiaxialen Spannungspunktes der Fließortkurve und der Verfestigungskurve	20
C.1 Allgemeines	20
C.2 Verfahren	20
Literaturhinweise	27

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 16808:2021) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164 „Mechanical testing of metals“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 459 „ECISS — Europäisches Komitee für Eisen- und Stahlnormung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 16808:2014 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/FDIS 16808:2021 wurde von CEN als prEN ISO 16808:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO 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 staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) 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. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe 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 erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164, *Mechanical testing of metals*, Unterkomitee SC 2, *Ductility testing*, in Zusammenarbeit mit dem Europäischen Komitee für Normung (CEN), Technisches Komitee CEN/TC 459/SC 1, *Prüfverfahren für Stahl (andere als chemische Analysen)*, in Übereinstimmung mit der Vereinbarung zur technischen Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 16808:2014) und stellt eine geringfügige Änderung dar. Die Änderungen sind wie folgt:

- die Bezeichnung von $r_{1,100}$ in Tabelle 1 wurde geändert;
- die Bildunterschrift von Bild A.4 wurde geändert;
- die Gleichung (B.2) wurde geändert;
- der Anhang A wurde gestrichen und die anderen Anhänge wurden entsprechend umnummeriert;
- der Status von Anhang A (früher Anhang B) wurde in informativ geändert;
- geringfügige redaktionelle Änderungen wurden vorgenommen, um sie an die ISO/IEC-Direktiven Teil 2:2021 anzugleichen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren zur Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve von Metallblechen mit einer Dicke unter 3 mm bei reinem Streckziehen ohne signifikanten Reibungseinfluss fest. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Zugprüfung können höhere Formänderungswerte erreicht werden.

ANMERKUNG Der in der Norm verwendete Terminus „biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve“ ist der Einfachheit halber verwendet. Prinzipiell wird in dem Versuch die biaxiale wahre Spannung über dem Umformgrad ermittelt.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

In diesem Dokument wurden keine Begriffe aufgeführt.

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

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

4 Symbole und Abkürzungen

Die verwendeten Symbole und Bezeichnungen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1

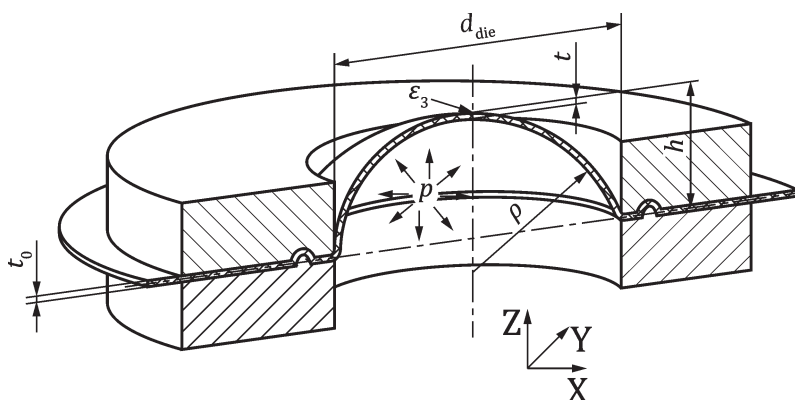
Symbol	Bezeichnung	Einheit
d_{die}	Matrizendurchmesser	mm
d_{BH}	Durchmesser des Niederhalters	mm
R_1	Matrizenkantenradius	mm
h	Ziehtiefe/-höhe (äußere Fläche)	mm
t_0	Ausgangsblechdicke	mm
t	Aktuelle Blechdicke	mm
p	Druck im Werkzeug	MPa
r_{ms}	Standardabweichung	-
ρ	Krümmungsradius	mm
r_1	Radius des Kuppenbereiches zur Bestimmung der Krümmung	mm
r_2	Radius des Kuppenbereiches zur Bestimmung der Formänderung	mm
r_{1_100}	Kuppenradius zum Bestimmen der Krümmung bei einem Durchmesser von 100 mm	mm
a_i, b_i	Beiwerte für die Wirkungsfläche	-
σ_{B}	Biaxiale Spannung	MPa

Symbol	Bezeichnung	Einheit
e	Technische Dehnung	-
ε_1	Hauptumformgrad	-
ε_2	Nebenumformgrad	-
ε_3	Umformgrad in Dickenrichtung	-
ε_E	Vergleichsformänderung	-
l_s	Koordinate und Länge einer Schnittlinie	mm
dz	Verschieben in z-Richtung	mm
dz_{mv}	Verschiebung nach Bewegungskorrektur	mm

5 Kurzbeschreibung

Eine Ronde wird an ihrem Rand komplett in ein Werkzeug zwischen Matrize und Niederhalter eingespannt. Es wird eine Wölbung gebildet, indem eine Flüssigkeit gegen das Blech gedrückt wird, bis ein Riss auftritt (Bild 1). Während dem hydraulischen Tiefungsversuch wird der Druck der Flüssigkeit gemessen und die Entwicklung der Blechumformung wird mit einem optischen Messgerät aufgezeichnet [1], [2], [3]. Basierend auf der aufgezeichneten Blechumformung werden die folgenden Größen in der Nähe des Kuppenpols bestimmt: Die örtliche Krümmung, die Umformgrade auf der Oberfläche, und die aktuelle Blechdicke unter der Voraussetzung der Inkompressibilität des Werkstoffes. Weiterhin wird die biaxiale Spannung aus dem Flüssigkeitsdruck, der Dicke und dem Krümmungsradius berechnet, wobei der Spannungszustand eines dünnwandigen kugelförmigen Druckbehälters in der Nähe des Kuppenpols vorausgesetzt wird.

ANMERKUNG Zusätzlich zu den Verfahren der hydraulischen Tiefungsversuche mit optischen Messsystemen, die in [1] vorgestellt und nachfolgend beschrieben werden, gibt es ebenfalls Lasersysteme [4], [5], [6] oder Tastsysteme [7], [8], [9] zur Messung des Umformungszustandes der Probe, die in diesem Dokument nicht behandelt werden.



Legende

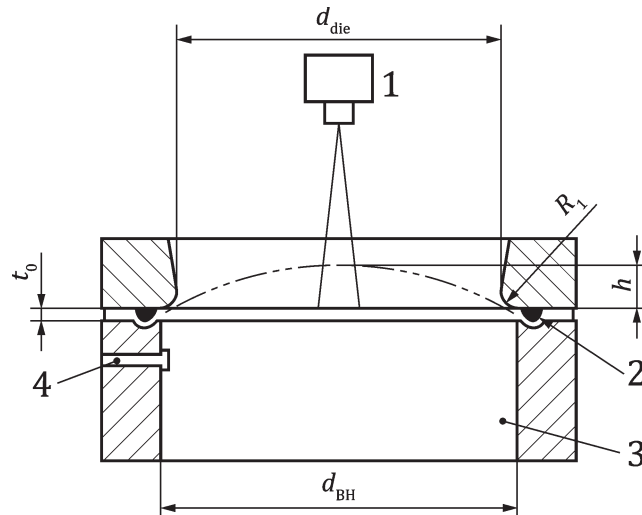
h	Ziehtiefe/-höhe (äußere Fläche)	ρ	Krümmungsradius
p	Druck im Werkzeug	t_0	Ausgangsblechdicke
ε_3	Umformgrad in Dickenrichtung (am Kuppenpol)	t	aktuelle Blechdicke
d_{die}	Matrizendurchmesser (innen)		

Bild 1 — Kurzbeschreibung des hydraulischen Tiefungsversuchs

Der Koordinatenursprung muss sich im Mittelpunkt des Niederhalters befinden. Die xy-Ebene sollte parallel zur Fläche des Niederhalters liegen (parallel zum eingespannten Metallblech vor dem Umformen). Hier entspricht die x-Richtung der Walzrichtung. Die z-Richtung muss senkrecht zum eingespannten Metallblech vor dem Umformen liegen, mit der positiven Richtung auf den optischen Sensor ausgerichtet.

6 Prüfeinrichtung

6.1 Der hydraulische Tiefungsversuch muss an einer Maschine durchgeführt werden, die mit einer Matrize, einem Niederhalter und einer Flüssigkeitskammer ausgestattet ist. Die empfohlene Ausrüstung ist in Bild 2 dargestellt.



Legende

- | | |
|---|----------------------|
| 1 System für die Messung des Umformvorgangs | 3 Flüssigkeitskammer |
| 2 Klemmsicke | 4 Druckmesssystem |

Bild 2 — Vorschlag für einen Prüfaufbau (Prinzipzeichnung)

6.2 Der Aufbau der Prüfeinrichtung muss zulassen, die äußere Oberfläche der Probe während der Prüfung durchgehend zu messen, d. h. es sollte möglich sein, die Verformung der Geometrie durch die Aufzeichnung der Entwicklung der Koordinaten x , y und z eines Gitters auf der sich umformenden Blechfläche zu bestimmen, um die Form und die Umformgrade im zentralen Untersuchungsbereich zu berechnen, bevor Versagen auftritt.

6.3 Während der Prüfung muss das System in der Lage sein, die Koordinaten x , y und z eines Gitters auf der sich biegenden Fläche des Prüfkörpers optisch (ohne Berührung) zu messen. Aus diesen Koordinaten werden die Umformgrade ε_1 und ε_2 für jeden Punkt des ausgewählten Bereiches, der Umformgrad in Dickenrichtung ε_3 sowie der Krümmungsradius für den Kuppenpol berechnet.

6.4 Das System sollte mit einem Messsystem in der Druckflüssigkeitskammer ausgestattet sein. Ein indirektes Messsystem ist ebenfalls zulässig. Ausgehend von 20 % des maximalen gemessenen Druckwertes sollte die Genauigkeit 1 % des tatsächlich gemessenen Wertes betragen.

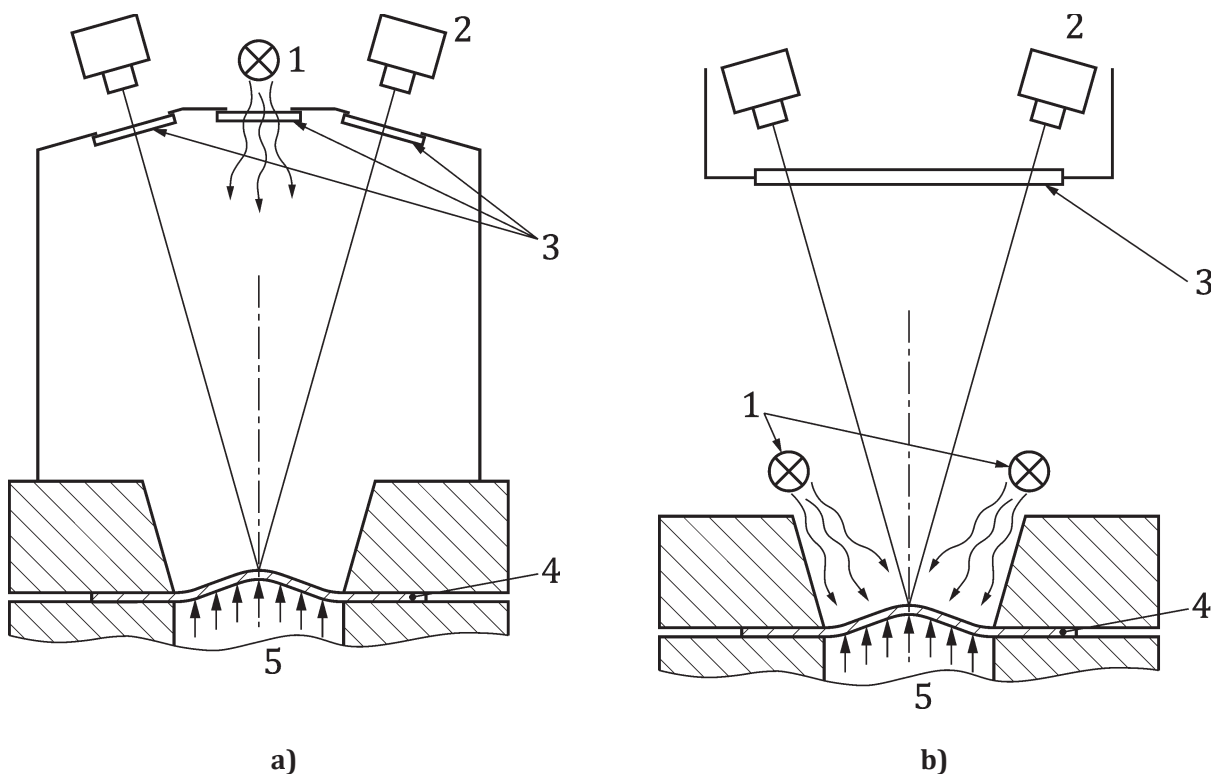
6.5 Die Matrize, der Niederhalter und die Flüssigkeitskammer müssen ausreichend starr sein, um Eigenverformung während der Prüfung zu minimieren. Die Kraft des Niederhalters muss groß genug sein, um den Niederhalter geschlossen zu halten. Jede Bewegung der Probe zwischen Niederhalter und Matrize sollte vermieden werden. Üblicherweise wirkt während der Prüfung der Druck auf Teile des Niederhalters ein und verringert die tatsächliche Kraft des Niederhalters. Das muss berücksichtigt werden, wenn die erforderliche Kraft des Niederhalters festgelegt wird.

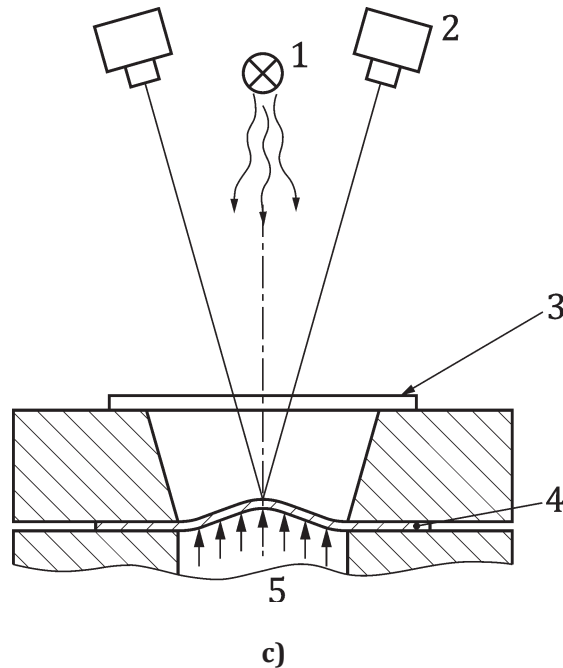
6.6 Die Flüssigkeit muss die Blechoberfläche berühren (ohne Luftblasen), um Energiespeicherung durch komprimierte Luftblasen während der Prüfung zu vermeiden, was bei Versagen zu höherer Energiefreisetzung und vermehrtem Herausspritzen von Öl führen würde. Während der Prüfung darf bis zum Versagen keine Flüssigkeit durch den Niederhalter, die Matrize und das Blech oder anderweitig austreten.

6.7 Eine Klemmsicke (oder eine vergleichbare Geometrie in der runden Fläche) ist empfehlenswert und muss so ausgeführt sein, dass der Werkstofffluss unterdrückt wird. Die Klemmsicke darf keine Risse im Werkstoff hervorrufen. Die Klemmsicke muss zwischen dem Niederhalter und der Matrize angeordnet werden. Das Anbringen in der Nähe des Matrizenradius ist empfehlenswert. Die Geometrie der Klemmsicke sollte eine Krümmung und Faltenbildung bei Werkzeugschließung vermeiden sowie das Verrutschen des Bleches während der Prüfung verhindern.

6.8 Das Anbringen von Glasplatten vor den Linsen und der Beleuchtung wird empfohlen, um das optische Messsystem vor herausspritzendem Öl bei Versagen des Bleches am Ende der Prüfung zu schützen [7], [12]. Die Platten können am Niederhalter (dickes Glas) oder in der Nähe der Kameralinsen und Beleuchtung (dünneres Glas) angebracht sein, siehe Bild 3. Die eingesetzte Schutzvorrichtung darf die Qualität der optischen Messung nicht beeinträchtigen (siehe Abschnitt 7). Die Glasplatten müssen nach jeder Prüfung gründlich gereinigt werden, ohne sie zu beschädigen oder zu zerkratzen, und müssen anschließend an derselben Stelle wieder angeordnet werden, um die Kalibrierung nicht zu verändern. Üblicherweise wird die Qualität der Messung durch eine Kalibrierung des optischen Systems unter Einbeziehung der Schutzvorrichtung erhöht.

6.9 Der kleinste empfohlene Matrizendurchmesser sollte ein Verhältnis von Matrizendurchmesser zur Ausgangsblechdicke von $d_{\text{die}}/t_0 \geq 33$ haben (siehe Bild 2). Der Radius der Matrize sollte während der Prüfung nicht zu Rissen im Blech führen. Eine Empfehlung lautet $(5 \times t_0)$ bis $(15 \times t_0)$ (maximal 15 mm).





Legende

- | | | | |
|---|-------------|---|-------------|
| 1 | Beleuchtung | 4 | Prüfstück |
| 2 | Kameras | 5 | Flüssigkeit |
| 3 | Glasplatten | | |

Bild 3 — Beispiele für die mögliche Positionierung von Ölabschirmplatten und Beleuchtung

7 Optisches Messsystem

Zur Bestimmung des Krümmungsradius ρ und der Umformgrade ε_1 und ε_2 wird ein optisches Feldmesssystem mit den folgenden Eigenschaften empfohlen.

- Optischer Sensor, basierend auf zwei oder mehreren Kameras.
- Messbereich, dabei ist Messbereich $d_{\text{Messbereich}} \geq 1/2 d_{\text{die}}$.

Der verwendete Messbereich sollte größer sein als ein konzentrischer Durchmesser des halben Niederhalterdurchmessers. Dieser Bereich sollte während des gesamten Umformungsprozesses bei allen Ziehtiefen/-höhen sichtbar sein.

- Örtliche Auflösung (Abstand der unabhängigen Messpunkte auf dem Gitter): Die Entfernung g_{max} zwischen zwei nebeneinander liegenden Punkten auf dem ungeformten Blech sollte die folgende Anforderung erfüllen:

$$g_{\text{max}} \leq \frac{d_{\text{die}}}{50}$$

- Die Bestimmung der Krümmung erfordert eine Genauigkeit der z-Koordinaten in einem Bereich mit einem zum Niederhalter konzentrischen Durchmesser $1/2 d_{\text{die}}$ von:

$$rms(dz)_n = \frac{rms(dz) \cdot 100 \text{ mm}}{d_{\text{die}}} \leq 0,015 \text{ mm}$$

ANMERKUNG Die Genauigkeit der Formmessung kann mittels einer Prüfung des optischen Messsystems überprüft werden (siehe Anhang A).

Genauigkeit für die Messung der Formänderung: $rms(\varepsilon_1) = 0,003$ $rms(\varepsilon_2) = 0,003$

Für jeden wahren Formänderungswert des vorstehend erwähnten $rms(\varepsilon)$ gelten folgende akzeptierte Messwerte:

$\varepsilon_{\text{real}} = 0$ akzeptierter Messbereich: 0,003 ... 0,003

$\varepsilon_{\text{real}} = 0,5$ akzeptierter Messbereich: 0,497 ... 0,503

- Fehlende Messpunkte: Um eine gute Kurvenapproximation zu erhalten, dürfen nicht mehr als 5 % der Messpunkte im konzentrischen Bereich mit einem Durchmesser von $\frac{1}{2} d_{\text{die}}$ fehlen (ohne Interpolation). Wenn nebeneinander liegende Punkte fehlen, darf der Kreis dieses Bereichs nicht größer als zwei Punkte sein.

8 Prüfstück

8.1 Allgemeines

Das Prüfstück muss eben und von einer geometrischen Form sein, dass das Blech eingespannt ist und dass kein Material nachfließen kann. Die Verwendung von Klemmsicken ist zu empfehlen. Der Rand der Ronde muss sich außerhalb der Klemmsicke befinden.

Die Probenfertigung hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse, solange die Oberfläche des Prüfstückes nicht beschädigt ist (Kratzer, Polieren). Die Außenkontur kann kreisförmig (vorzugsweise) oder mehreckig sein.

8.2 Aufbringen des Gitters

8.2.1 Art des Gitters

Für optische vollflächige Messvorrichtungen muss das Gitter zwei Anforderungen erfüllen:

- a) die Bestimmung des Krümmungsradius auf der Fläche des Prüfkörpers;
- b) die Berechnung der Formänderung beim Umformen des Werkstoffes.

8.2.2 Gitteraufbringung

Deterministische Gitter (z. B. Vierecke, Kreise, Punkte) sollten sich deutlich voneinander abheben und sind ohne jegliche Kerbwirkung und/oder Veränderung der Mikrostruktur aufzubringen. Einige bekannte Techniken für die Applizierung sind

- elektrochemische Ätzung, photochemische Ätzung, Offsetdruck und Gitterübertragung, und
- stochastische (Speckle) Muster können aufgebracht werden, indem Farbe auf die Oberflächen der Prüfstückflächen aufgesprüht wird. Nach der Umformung sollte das Haften der Farbe auf der Fläche überprüft werden. Es ist möglich, zunächst eine dünne, matte, weiße Grundschicht aufzutragen, um von den Flächen des Prüfstückes ausgehende Spiegelungen zu verringern, um anschließend eine Ansammlung von zufällig angeordneten schwarzen Punkten (z. B. mit schwarzer Sprühfarbe oder Graphit) aufzusprühen. Die Sprühfarbe muss sowohl elastisch als auch fest genug sein, damit sie während der Umformung nicht abblättert oder sich ablöst. Die zufällige Aufteilung der kleinen schwarzen Sprühpunkte ermöglicht die Festlegung jedes Punktes des virtuellen Gitters auf dem Prüfkörper. Das Muster sollte eine ausreichende Schwarz-Weißauflösung haben sowie im Suchbereich geeignete Größenmerkmale an jeder Punktposition, wie für das verwendete optische System erforderlich.

9 Verfahren

9.1 Die Prüfung muss bei einer Umgebungstemperatur von $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durchgeführt werden.

9.2 Die Ausgangsdicke des Prüfstückes wird auf 0,01 mm genau bestimmt.

9.3 Das Prüfstück wird zwischen Niederhalter und Matrize eingespannt. Luftblasen zwischen dem Prüfstück und der Flüssigkeit vermeiden, um der Bildung von Druckluft während der Prüfung vorzubeugen, was zu stärkerem Herausspritzen von Öl bei Versagen führt.

9.4 Es wird eine konstante Dehngeschwindigkeit von $0,05 \text{ s}^{-1}$ empfohlen. Wenn eine konstante Dehngeschwindigkeit nicht möglich ist, sollte eine konstante Stempelgeschwindigkeit oder ein konstanter Volumenstrom der Flüssigkeit sichergestellt sein. Um große Einwirkungen in der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve von Werkstoffen zu vermeiden, die gegen Temperatur und Dehngeschwindigkeit empfindlich sind, sollte der hydraulische Tiefungsversuch innerhalb von 2 min bis 4 min durchgeführt werden. Dieser zeitliche Rahmen stellt langsame und akzeptable Dehngeschwindigkeiten sicher sowie eine kosteneffiziente Prüfzeit.

Die graphische Darstellung der Dehngeschwindigkeit über der Zeit ist empfehlenswert.

9.5 Der Flüssigkeitsdruck während der Prüfung wird gemessen.

9.6 Die Koordinaten x , y , z des Gitters auf der Fläche des Prüfstückes werden während der Prüfung gemessen.

9.7 Die Daten zum Flüssigkeitsdruck und zum Gitter müssen gemessen und in demselben zeitlichen Rahmen gespeichert werden. Es wird ein Minimum von 100 Werten empfohlen. Es werden mindestens 100 Abbildungen des hydraulischen Tiefungsversuchs empfohlen, um die gesamte Entwicklung von Formänderung und Druck darzustellen.

9.8 Ein Riss im Prüfkörper wird festgestellt, wenn ein durchgehender Riss, d. h. ein Riss über die Blechdicke, erkannt wird. Ein Riss wird durch Druckabfall des Flüssigmediums erkannt und definiert das Testende.

9.9 Eine ausreichende Anzahl an Prüfstücken sollte so vorbereitet werden, dass mindestens drei gültige Prüfungen durchgeführt werden können.

10 Auswerteverfahren für die Bestimmung des Krümmungsradius und der Umformgrade im Kuppenbereich

Für die folgende Erläuterung der Berechnung des Krümmungsradius und der Formänderungen wird eine kugelförmige Geometrie der Probe in der Umgebung des Kuppenpols vorausgesetzt (Ausgleichsfläche). Auf der letzten Abbildung vor dem Versagen, wie in 9.8 festgelegt, wird der Bereich der Kuppe mit der größten Umformung ausgewählt und als die Position bestimmt, an der die wahre Spannung und der Umformgrad in Dickenrichtung ε_3 ermittelt werden. Um einen stabilen Krümmungsradius der Kuppe zu erhalten, kann eine sphärische Referenzfläche (Ausgleichsfläche) auf der Grundlage eines ausgewählten Punktebereichs berechnet werden. Für diese Auswahl wird ein Radius r_1 um den Kuppenscheitel auf der letzten Abbildung vor dem Bersten festgelegt, und die Referenzfläche wird mit derselben Punkteauswahl (siehe Bild 4) auf sämtliche Verformungsstufen angewendet.

Eine bestimmte Anzahl der ersten Umformstufen (Abbildungen) werden verworfen, da der Probekörper noch zu flach für eine verlässliche Bestimmung der sphärischen Referenzfläche ist, da der Krümmungsradius sehr groß und die Referenzfläche nicht stabil ist. Für stabile Werte der Formänderung und Ausdünnung in der Kuppe wird der Durchschnittswert einer Anzahl ausgewählter Punkte verwendet. Aufgrund dessen wird ein zweiter Bereich durch einen Radius r_2 auf ähnliche Weise bestimmt (siehe Bild 4).

Auf diesem Verfahren beruhend werden für jede Umformstufe (Abbildung) der Krümmungsradius, die durchschnittlichen Umformgrade in Dickenrichtung sowie die entsprechenden Werte für Dicke und Spannung am Kuppenpol berechnet. Diese Bewertung kann für verschiedene Werte von r_1 und r_2 durchgeführt werden (siehe Bild 4).

Für eine gute Annäherung und stabile Werte wird der empfohlene Bereich für r_1 und r_2 wie folgt festgelegt:

$$r_1 = (0,125 \pm 0,025) \times d_{\text{die}} \quad (1)$$

$$r_2 = (0,05 \pm 0,01) \times d_{\text{die}} \quad (2)$$

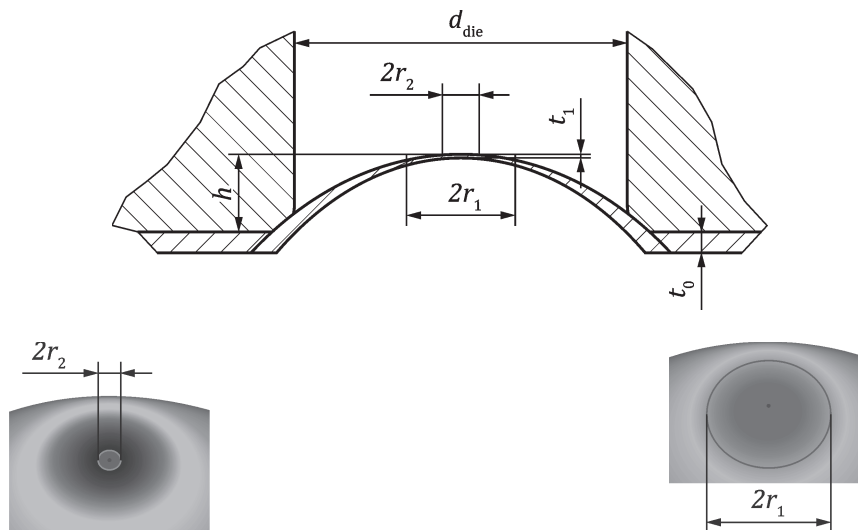


Bild 4 — Auswahl von r_1 und r_2 für die Berechnung der wahren Spannung und wahren Dehnung für jede Verformungsstufe

Ein alternativer Vorschlag für die Berechnung von Krümmung und Formänderungen ist in Anhang B angegeben.

11 Berechnung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurven

Für die Berechnung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurven wird ein einfacher Membranspannungszustand eines dünnwandigen runden Druckbehälters am Mittelpunkt des Bleches vorausgesetzt. Das impliziert folgende Vereinfachungen:

a) äquibiaxialer Spannungszustand:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B \quad (3)$$

b) Darstellung der Krümmung durch den Nennradius der Krümmung:

$$\rho = \left[\frac{1}{2} (1/\rho_1 + 1/\rho_2) \right]^{-1} \quad (4)$$

Anschließend kann die biaxiale Spannung nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_B = \frac{\rho p}{2t} \quad (5)$$

unter Anwendung des Flüssigkeitsdruckes p , des Krümmungsradius und der aktuellen Dicke t mit

$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) \quad (6)$$

Unter Voraussetzung der plastischen Inkompressibilität des Werkstoffes und unter Vernachlässigung der elastischen Formänderungen kann der gesamte Umformgrad in Dickenrichtung für die Berechnung der aktuellen Dicke durch den Haupt- und Nebenumformgrad annähernd bestimmt werden:

$$\varepsilon_3 \approx -\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (7)$$

Beruhend auf dem Prinzip der plastischen Arbeit ist die biaxiale Spannung/Dehnung-Kurve eine Funktion des plastischen Umformgrades in Dickenrichtung: $\sigma_B(-\varepsilon_3^{\text{pl}})$, siehe auch Anhang C. Unter der Voraussetzung eines isotropen linearelastischen Werkstoffverhaltens und plastischer Inkompressibilität wird der plastische Umformgrad in Dickenrichtung wiedergegeben durch:

$$\varepsilon_3^{\text{pl}} = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + 2 \frac{1-\nu}{E} \sigma_B \quad (8)$$

Für das Elastizitätsmodul E und die Poissonsche Zahl ν reichen die Werte aus der Literatur im Allgemeinen aus, um den elastischen Beitrag zu subtrahieren, z. B. $E = 210 \text{ GPa}$ und $\nu = 0,33$ für Stahl, beziehungsweise $E = 70 \text{ GPa}$ und $\nu = 0,33$ für Aluminiumlegierungen.

Das Verhältnis des Matrizendurchmessers zur Dicke sollte groß genug sein, um einen annähernden Membranspannungszustand im Prüfstück sicherzustellen, und einen vernachlässigbaren Biegeeinfluss. Bei Verhältnissen von Matrizendurchmessern zur Dicke unter 100 wird empfohlen, zu überprüfen, ob die Biegedehnungen im Vergleich zum Ergebnis des aktuellen Umformgrades in Dickenrichtung ε_3 klein genug sind, wobei die folgende Einschätzung für Biegedehnungen angewendet wird:

$$\varepsilon_{\text{bending}} \approx -\ln\left(1 - \frac{t_0}{2\rho} \exp(\varepsilon_3)\right) \quad (9)$$

ANMERKUNG Die biaxiale Spannung/Dehnung-Kurve wird ohne Berücksichtigung eines Fließkriteriums ermittelt. Diese biaxiale Spannung/Dehnung-Kurve kann zur Bestimmung des äquibiaxialen Spannungspunkt der Fließortkurve verwendet werden sowie als Näherung zur Ermittlung einer Verfestigungskurve eines Werkstoffes über die Gleichmaßdehnung hinaus.

Anhang C enthält einen Vorschlag für die Bestimmung des biaxialen Spannungspunktes des Fließkriteriums sowie zur Anwendung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurven von hydraulischen Tiefungsversuchen, um eine entsprechende Spannung/Dehnung-Kurve zu extrapolieren, die auf einachsigen Zugprüfungen beruht.

12 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- Verweisung auf dieses Dokument, d. h. ISO 16808:—;
- Identifizierung des Prüflabors, das die Werte des hydraulischen Tiefungsversuchs gemessen hat, einschließlich Name des Prüfers;
- Bezeichnung des Werkstoffes;
- Ausgangsblechdicke;
- Gitter, Kamerasystem und Software, die verwendet wurden;
- Position der Schutzgläser;

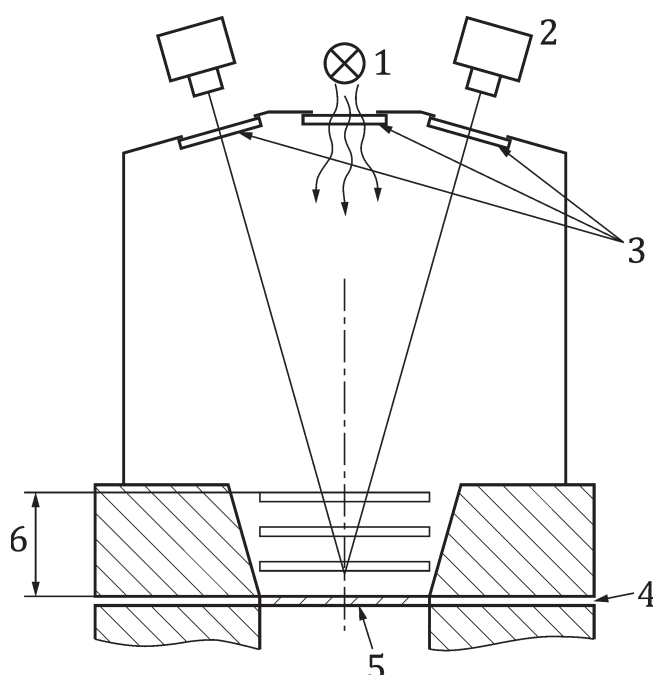
- g) Geometrien der Prüfausrüstung;
- h) Prüf-/Kolbengeschwindigkeit;
- i) Bewertungsverfahren des Tiefungsversuchs, beziehungsweise die Parameter zur Identifizierung der Krümmung und dem Durchschnittswert der Formänderung;
- j) Anzahl der Versuchswiederholungen;
- k) eine Tabelle mit den Werten von Zeit, Radius ρ , Druck p , dem absoluten Wert des plastischen Umformungsgrades in Dickenrichtung und der biaxialen Spannung für jeden Tiefungsversuch;
- l) biaxiale Spannung/Dehnung-Kurven sämtlicher Tiefungsversuche als graphische Darstellung.

Anhang A (informativ)

Prüfverfahren für eine Qualitätsüberprüfung des optischen Messsystems

A.1 Prüfverfahren

Hinsichtlich der empfohlenen Qualität des optischen Messsystems (siehe Abschnitt 7) und dem Prüfaufbau für das Beispiel nach Bild 3 muss berücksichtigt werden, dass die zusätzlichen Glasplatten einen wesentlichen Einfluss auf die Optik haben können. Für eine Überprüfung der endgültigen Qualität des gesamten Prüfaufbaus ist das folgende Verfahren (siehe Bild A.1) zu empfehlen.



Legende

- | | | | |
|---|-------------|---|----------------|
| 1 | Beleuchtung | 4 | Metallblech |
| 2 | Kameras | 5 | Referenzplatte |
| 3 | Glasplatten | 6 | maximale Höhe |

Bild A.1 — Qualitätsüberprüfung des optischen Messsystems

Es muss ein starrer Prüfgegenstand (z. B. Platte, dreidimensionale, verrundete Fläche) mit einem Durchmesser $\geq 1/2 d_{\text{die}}$ verwendet werden. Der Gegenstand darf sich während des Prüfverfahrens nicht verformen. Der Gegenstand sollte über eine für das Messsystem geeignete Fläche verfügen.

Der Prüfgegenstand muss einmal ohne Schutzglasplatten in der Ausgangsposition des eingespannten Bleches gemessen werden (Referenzmessung).

Der Prüfgegenstand muss mit dem gesamten Aufbau des Messsystems (einschließlich der Schutzglasplatte) in verschiedenen Positionen (5 bis 10) zwischen der Ausgangsposition des eingespannten Bleches und der maximal geschätzten Tiefungshöhe h_{max} (siehe Bild A.1) gemessen werden.