

ICS 77.040.10

## **Prüfverfahren zur Ermittlung von Fließkurven und Vergleichskennwerten zum Zugversuch mittels zerstörungsarmem Prüfeindruck, 3D-Vermessung und Finite-Elemente Werkstoffmodell**

Test method for the determination of flow curves and benchmark characteristic values for tensile testing by means of minor destructive indentation, 3D measurement and finite-element material models

Méthode de test pour déterminer des courbes d'écoulement et des valeurs de référence utilisées pour l'essai de traction au moyen de l'effet du test peu destructif, mesure tridimensionnelle et modèle de matériaux des éléments finis

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:  
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer PAS erstellt.

Gesamtumfang 48 Seiten

Dieses Dokument wurde durch die im Vorwort genannten Verfasser erarbeitet und verabschiedet.



# Inhalt

	Seite
Vorwort .....	3
Einleitung .....	4
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweisungen .....	6
3 Begriffe .....	7
4 Symbole .....	8
5 Kurzbeschreibung .....	9
6 Prüfsystem .....	10
7 Probenkörper .....	10
8 Eindringkörper.....	11
9 Prüfverfahren .....	13
9.1 Allgemeines .....	13
9.2 Prüfzyklus .....	14
9.3 3D-Vermessung des Prüfeindrucks .....	15
9.4 Berechnung durch inverses Verfahren.....	16
9.4.1 Aufbau des Lösungsverfahrens und Datenverarbeitung .....	16
9.4.2 FEM-Simulation und Berechnung der Zielfunktion .....	17
9.4.3 Minimierung der Zielfunktion .....	21
9.5 Berechnung der technischen Spannung-Dehnung-Kurven und der Vergleichskennwerte.....	22
10 Prüfbericht.....	23
Anhang A (normativ) Kalibrierung der Prüfmaschine .....	24
A.1 Kalibrierung der Prüfmaschine .....	24
A.2 Direkte Kalibrierung der Prüfmaschine .....	24
A.2.1 Allgemeines .....	24
A.2.2 Kalibrierung der Prüfkräfte .....	25
A.2.3 Kalibrierung des Eindringkörpers und Überprüfung des Eindringstempels.....	25
A.2.4 Prüfzyklus .....	26
A.2.5 Indirekte Überprüfung und Kalibrierung des 3D-Sensors in X-Y-,Z-Richtung .....	27
A.2.6 Indirekte Kalibrierung .....	27
A.3 Tägliche Überprüfung der Prüfmaschine .....	29
Anhang B (informativ) Korrelation zum Zugversuch.....	30
B.1 Allgemeine Hinweise.....	30
B.2 Untersuchung an statistisch abgesichertem Material.....	31
B.3 Stahlwerkstoffe .....	33
B.4 Aluminiumwerkstoffe.....	41
Anhang C (informativ) Messunsicherheiten.....	45
C.1 Messunsicherheit der Kalibrierung der Prüfkräfte.....	45
C.2 Messunsicherheit der indirekten Kalibrierung .....	47
Literaturhinweise.....	48

## Vorwort

Diese DIN SPEC wurde nach dem PAS-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung von DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren erfolgt in DIN SPEC (PAS)-Konsortien und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Die vorliegende DIN SPEC (PAS) ging aus dem DIN-Connect-Projekt „Eindruckverfahren — Präzise Festigkeitsbestimmung durch schnelle, kostengünstige, zerstörungsfreie und automatisierbare Prüfmethodik mittels Werkstoffmodell in Anlehnung zum Zugversuch“ hervor.

Die Erarbeitung und Verabschiedung des Dokuments erfolgten durch die nachfolgend genannten Initiatoren und Verfasser:

- Andreas Braun, Ariane Group;
- Dr. Thomas Chudoba, ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH;
- Dr. Michael Griepentrog, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM);
- Michael Schäfer, Feinguss Blank GmbH;
- Dr. Bernd Hachmann, F. W. Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG;
- Dr.-Ing Benjamin Schmaling, Imprintec GmbH;
- Peter Zok, Imprintec GmbH;
- Peter Beisel, KB Prüftechnik GmbH;
- Philipp Reinstädt, Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen;
- Febo Menelao, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Für dieses Thema bestehen derzeit keine Normen im Deutschen Normenwerk.

DIN SPEC (PAS) sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Für diese DIN SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann der Workshop weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Benutzung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass der Workshop für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden DIN SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Die kostenfreie Bereitstellung dieses Dokuments als PDF-Version über den Beuth Webshop wurde im Vorfeld finanziert

## Einleitung

Die beiden meist angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Werkstoffen sind die Härteprüfung und der Zugversuch. Metalle, Kunststoffe und nahezu alle weiteren Werkstoffe können mit einem oder beiden Verfahren geprüft werden. Die Härteprüfung ist hierbei ein Verfahren zur Bestimmung der Härte und darüber hinaus ein Näherungsverfahren, welches sehr häufig als Abschätzung für die (Zug-)Festigkeit von Bauteilen, Halbzeugen und sonstigen Proben genutzt wird. Die Abschätzung erfolgt hierbei durch Umwertung der Härte in die Zugfestigkeit mithilfe empirisch ermittelter Tabellen. Diese existieren für ausgewählte Stahlwerkstoffe und stellen einen Anteil von etwa 15 % bis 25 % an sämtlichen Stahlwerkstoffen dar. Weitere Stahl-, sowie Aluminium- und Magnesiumwerkstoffe können mithilfe der Härteprüfung nicht auf ihre Festigkeit oder weitere mechanische Eigenschaften, sondern nur auf Ihre Härte geprüft werden. Zur Ermittlung der Festigkeiten müssen diese Werkstoffe mithilfe der Zugprüfung zerstörend geprüft werden. Aufgrund der einfachen und schnellen Handhabung wird die Härteprüfung häufig intern und im Bereich der Festigkeitsbestimmung zur groben Abschätzung angewendet. Die Genauigkeit der mittels Härteprüfung umgewerteten Zugfestigkeitswerte liegt dabei bei etwa 5 % bis 15 % (DIN EN ISO 18265 [1]) oder schlechter. Diese hohe Abweichung ist für die betriebliche Qualitätssicherung vielfach nicht mehr zeitgemäß.

Das hier beschriebene Prüfverfahren soll die Lücke zwischen den genannten Verfahren schließen und dient zur Erreichung der folgenden Ziele:

- gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Technik soll ein Verfahren verfügbar gemacht werden, das die Einfachheit der Härteprüfung mit einer höheren Aussagekraft –„ähnlich der Zugprüfung“ versieht;
- Vermeidung von Umwertungen nach DIN EN ISO 18265 zur Erhöhung der Genauigkeit und Robustheit durch ein Indentierungsverfahren;
- Vermeidung der Erzeugung von unternehmensinternen Umwertetabellen nach DIN EN ISO 18265;
- Zerstörungsarme, schnelle, kostengünstige, lokale und automatisierbare Prüftechnik;
- je nach bestehender Oberflächengüte einer Probe kann eine aufwendige Probenvorbereitung vermieden werden.

Konventionelle Härteprüfverfahren nutzen als Messparameter die Fläche des Härteeindrucks oder die Eindringtiefe. Beim Härteprüfverfahren nach Brinell z. B. wird der Durchmesser des Härteeindrucks gemessen und eine Brinell-Härte berechnet. Bei der Härteprüfung nach Vickers werden die Diagonalen des Eindrucks, bei der Rockwellprüfung wird die Eindringtiefe zur Härteberechnung verwendet. Lediglich bei der Eindring- und Martenshärte wird die komplette Kraft-Eindringtiefe-Kurve während der Belastungs-, der Halte- und der Entlastungsphase erfasst um weitere Kennwerte abzuleiten. Die Besonderheit des hier beschriebenen Prüfverfahrens ist die Berechnung von Materialeigenschaften aus der dreidimensionalen Gestalt eines Prüfeindrucks.

Das hier beschriebene Eindruckverfahren erlaubt die Bestimmung einer Fließkurve. Aus dieser Kurve werden die folgenden Kennwerte ermittelt:

- Vergleichsdehngrenze aus dem Eindruckverfahren  $R_{p0,2}^I$ ;
- Vergleichszugfestigkeit aus dem Eindruckverfahren  $R_m^I$ ;
- Verfestigungsverhalten;
- qualitative Bestimmung der Duktilität für bestimmte Werkstoffe.

Gegenüber der Integration eines Systems zur Zugprüfung in den Produktionsprozess ist die Integration eines Härteprüfverfahrens in vielen Fällen einfacher und kostengünstiger. Konventionelle Härteprüfung liefert keine oder nur eingeschränkt Werte, welche mit den Ergebnissen von Zugversuchen vergleichbar sind.

Es ist somit möglich, Vergleichskennwerte zu den Werkstoffkennwerten des Zugversuchs schnell und prozessnah zu bestimmen. Eine Integrierbarkeit nach „Industrie 4.0“ ist möglich, was wiederum einen höheren Grad der Qualitätssicherung, sowie schnellere und flexiblere Produktentwicklung bedeutet. Dadurch können auch 100 %-Prüfungen durchgeführt werden. Durch die Verwendung des Eindruckverfahrens können, je nach Anwendung und Produkt, Zeit und Kosten gespart werden. Das Eindruckverfahren ist im Falle von Bauteilprüfungen flexibel einsetzbar, da es sich zerstörungsarm anwenden lässt. Ebenfalls lässt es sich an sehr großen bis sehr kleinen Proben anwenden, so dass sich Bauteilprüfungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen anwenderfreundlich gestalten lassen.

Insgesamt ist zu beachten, dass die Übertragung der Prüfergebnisse auf den Zugversuch Kenntnisse über den Werkstoff und das Prüfverfahren benötigt. Zu erwartende Unterschiede der Messergebnisse beider Verfahren und weitere Details sind im Anhang B aufgeführt. Informationen zur Messunsicherheit des Verfahrens werden in Anhang C dargestellt.

DIN weist darauf hin, dass die Übereinstimmung mit diesem Dokument die Verwendung eines Patents (DE102011115519A1) bezüglich des in diesem Dokument beschriebenen Prüfverfahrens bedeuten kann.

DIN nimmt keine Stellung zur Rechtmäßigkeit, zur Gültigkeit und zum Anwendungsbereich dieser Patentrechte.

Der Halter dieser Patentrechte hat DIN zugesichert, dass er bereit ist, über Lizenzen entweder kostenfrei oder zu vernünftigen und nicht diskriminierenden Geschäftsbedingungen mit Antragstellern in der ganzen Welt zu verhandeln. In diesem Zusammenhang ist die Erklärung des Halters dieser Patentrechte bei DIN registriert.

— Für DE102011115519A1 sind Informationen erhältlich bei:

Imprintec GmbH – Material Testing Solutions  
Technologiezentrum Ruhr (TZR)  
Universitätsstr. 142 | 44799 Bochum  
DEUTSCHLAND

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können, ohne dass diese vorstehend identifiziert wurden. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

## 1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Prüferfahren zur Bestimmung von Fließkurven von metallischen Werkstoffen mittels zerstörungsarmem Prüfeindruck, 3D-Vermessung und Finite-Elemente Werkstoffmodell (FEM) fest. Die Fließkurven dienen zur Ermittlung von Vergleichskennwerten zu Kennwerten aus dem Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1.

Dieses Verfahren gilt für metallische Werkstoffe:

- die sich plastisch verformen;
- die beim Eindringen des Eindringkörpers einen Aufwurf im Randbereich des Prüfeindrucks erzeugen;
- deren Korngröße maximal 1/3 des Eindruckdurchmessers beträgt;
- welche kein Lamellengraphit/Kugelgraphit/hohe Porosität oder Gefügebestandteile enthalten, die einen Festigkeitsunterschied in Zug und Druck bewirken.

Das Verfahren kann durch eine werkstoff- und probenspezifische Anpassung (Kalibrierung) ergänzt werden.

Das Verfahren liefert quantitative richtungsunabhängige Ergebnisse.

Bei geringer Eindringtiefe kann das Verfahren qualitativ zur Beurteilung von richtungsabhängigen Fließkurven und Vergleichskennwerten genutzt werden.

Bei Werkstoffen mit Gradienten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften (z. B. über die Produktdicke) darf aus einer punktuellen Messung, die nach diesem Verfahren durchgeführt wird, nicht auf die (integralen) mechanischen Eigenschaften des Produktes geschlossen werden.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 8589 (alle Teile), *Fertigungsverfahren Spanen*

DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*

DIN EN ISO 6892-1, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*

DIN ISO 2768-2, *Allgemeintoleranzen — Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung*

DIN EN ISO 376, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung*

### 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

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

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

#### 3.1

##### **Prüfeindruck**

bleibende Verformung der Oberfläche eines Probenkörpers nach dem Einwirken eines Eindringkörpers

#### 3.2

##### **sphärokonisch**

geometrische Form des Eindringkörpers, welche aus einem sphärischen und einem konischen Teil besteht

#### 3.3

##### **Konvergenz**

Erreichen eines Zielkriteriums eines mathematischen Lösungsverfahrens

Anmerkung 1 zum Begriff: Zum Beispiel Erreichen eines Zielkriteriums eines Optimierungsalgorithmus.

#### 3.4

##### **inverses Verfahren**

gezielte Variation von Eingangsparametern zur Minimierung einer Zielfunktion

#### 3.5

##### **Materialaufwurf**

Erhöhung der Probenoberfläche, welche sich aufgrund der Materialverdrängung durch Krafteinwirkung des Eindringkörpers außerhalb der Kontaktzone von Eindringkörper und Probe bildet

#### 3.6

##### **Optimierungsalgorithmus**

Rechenvorschrift, welche eine Zielfunktion minimiert

#### 3.7

##### **elastoplastisches Materialmodell**

Materialmodell, einer FEM-Simulation, welches die Simulation von elastischer und plastischer Verformung ermöglicht

#### 3.8

##### **von-Mises Fließbedingung**

durch Umrechnung mehrdimensionaler Spannungszustände erzielte skalare Vergleichsspannung

#### 3.9

##### **Topographiemessung**

optische oder taktile Messung der Geometrie einer Oberfläche

#### 3.10

##### **Probe**

Prüfling oder Bauteil, an dem die Prüfung ausgeführt wird

#### 3.11

##### **Eindringkörper**

diamantene Prüfspitze, die mit einer in diesem Dokument definierten Geometrie in die Probe eindringt

3.12

**Druckstempel**

bewegliches Teil der Prüfmaschine, das die axiale Bewegung beim Prüfvorgang und die Einleitung der Kraft auf den Eindringstempel überträgt

3.13

**Eindringstempel**

Träger des Eindringkörpers mit in diesem Dokument definierter Geometrie, der mithilfe einer form-schlüssigen Verbindung zum Druckstempel die Kraft auf den Eindringkörper und die Probe ausübt

**4 Symbole**

Die Symbole und ihre Bedeutungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1 — Symbole und ihre Bedeutungen**

Symbole	Einheit	Bedeutung
$A_t$	—	Duktilität
$b$	MPa	systematische Messabweichung der Prüfmaschine
$b_{rel}$	%	relative systematische Messabweichung der Prüfmaschine
$E$	GPa	Elastizitätsmodul
$E_{IT}$	GPa	Eindringmodul
$e$	—	technische Dehnung
$F$	N	Prüfkraft
$\bar{F}$	N	Mittelwert der Kraftmesswerte
$F_{RS}$	N	Kalibrierwert des Kraftaufnehmers (zu messende Kraft)
$f$	—	Funktionswert (Höhe) der Simulation
$K_L$	—	werkstoffabhängige Konstante
$n_L$	—	Verfestigungsexponent
$R$	MPa	technische Spannung
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
$R_t$	MPa	technische Spannung ohne Schädigung
$R_m^I$	MPa	Vergleichszugfestigkeit
$\overline{R_m^I}$	MPa	Mittelwert der Messwerte der Vergleichszugfestigkeit
$R_{m,CRM}$	MPa	Nennwert der Referenzprobe der Vergleichszugfestigkeit
$R_{p0,2}^I$	MPa	Vergleichsdehngrenze
$S$	—	Standardabweichung
$S_a$	µm	Mittenrauwert
$S_F$	—	Standardabweichung der Kraftmesswerte
$S_{a,max}$	µm	maximaler Mittenrauwert
$S_m$	—	Streuung der Messwerte

Symbole	Einheit	Bedeutung
$S_{m,rel}$	%	relative Streuung der Messwerte
$U_F$	%	kombinierte relative Unsicherheit
$U_{PM}$	%	Messunsicherheit der Prüfmaschine bei der indirekten Kalibrierung
$u_{FRS}$	%	relative Messunsicherheit des Kraftaufnehmers
$u_{F,PM,rel}$	%	relative Standardmessunsicherheit der Prüfkräfte
$u_{CRM}$	%	Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der Kalibrierunsicherheit des zertifizierten Wertes der Referenzprobe (CRM) resultiert
$u_{PM,CRM}$	%	die Standardunsicherheit der Prüfmaschine bei der Messung der Referenzprobe (CRM)
$U_{PM,rel}$	%	relative Messunsicherheit der Prüfmaschine
$x_i$	—	Koordinaten der Simulation
$y_i$	—	Funktionswerte (Höhe) des Experiments
$\sigma$	MPa	wahre Spannung
$\sigma_0$	MPa	Fließgrenze
$\sigma_s$	MPa	Spannung ab Entfestigung durch Schädigung
$\dot{\sigma}_{threshold}$	MPa/s	Grenzspannungsrate bei Entfestigung
$\varepsilon$	—	wahre Dehnung
$\nu$	—	Poissonzahl
$\Delta\sigma_s$	MPa	Spannungsinkrement ab Entfestigung durch Schädigung
$\theta$	—	Materialparameter zur Beschreibung der Entfestigung
<b>ACHTUNG — Technische Dehnung und Duktilität werden üblicherweise als dimensionslose Zahl angegeben. Bei Verwendung von Werten in Prozent ist der Faktor 100 erforderlich.</b>		

## 5 Kurzbeschreibung

Ein Eindringkörper wird orthogonal zur Probenoberfläche gegen die zu untersuchende Probe bewegt und dringt kraftgesteuert bis zum Erreichen der Prüfkraft in die Probe ein. Die Prüfkraft wird nach einer definierten Haltezeit zurückgenommen und der Eindringkörper wird im Anschluss aus der Probe herausbewegt. Ein Messgerät bestimmt die resultierende dreidimensionale Verformung des Probenkörpers (realer Materialeindruck). Es wird ein Simulationsmodell erstellt, welches eine realitätsnahe Abbildung der Härteprüfung (konstitutives Materialverhalten, mechanische Randbedingungen, Reibung) darstellt. Ein Softwareprogramm startet unter Zuhilfenahme von Materialparametern zur Beschreibung des plastischen Materialverhaltens Finite Elemente Simulationen und vergleicht die bleibende Verformung in der Simulation (simulierter Materialeindruck) mit dem realen Materialeindruck. Das Softwareprogramm ist unter Zuhilfenahme eines Optimierungsalgorithmus in der Lage die mechanischen Eigenschaften, und somit den simulierten Materialeindruck zu variieren. Diese Variation wird abgeschlossen, wenn eine ausreichende Übereinstimmung zwischen realem und simuliertem Materialeindruck erreicht ist (inverses Verfahren). Die mechanischen Eigenschaften werden der Simulation mit der besten Übereinstimmung entnommen (Konvergenz des Optimierungsalgorithmus).

Das Verfahren liefert Fließkurven und Vergleichskennwerte zum Zugversuch von metallischen Werkstoffen.

## 6 Prüfsystem

Das Prüfsystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Härteprüfmaschine oder vergleichbare Maschine zur Erzeugung einer kraftgesteuerten Relativbewegung zwischen Probe und Eindringkörper; Die Prüfmaschine muss in der Lage sein, die Prüfkraft in der beschriebenen Art und Weise aufzubringen und alle Anforderungen dieser DIN SPEC zu erfüllen;
- Probenaufnahme, z. B. Tisch;
- Eindringkörper;
- Messgerät zur flächenhaften Vermessung der dreidimensionalen Geometrie des Prüfeindrucks;
- Computersoftware, welches die Materialeigenschaften mithilfe eines inversen Verfahrens unter Nutzung von Ergebnissen einer FEM-Software und eines Optimierungsalgorithmus löst;
- Computerhardware.

Der Prüfraum der Prüfmaschine muss derart gestaltet sein, dass sowohl die in der Prüfpraxis auftretenden Probenkörper (Bauteile) als auch die zur Überprüfung der Prüfmaschine erforderlichen Kalibrierwerkzeuge (z. B. Kraftmessgeräte) eingebracht werden können.

Der Aufstellort der Maschine ist insofern frei von Vibrationen und Erschütterungen zu wählen, dass die Topographiemessung nach den Genauigkeitsanforderungen nach Anhang A möglich ist.

## 7 Probenkörper

Die Vorbereitung der Prüffläche muss so durchgeführt werden, dass Änderungen der Härte bzw. Zugfestigkeit an der Oberfläche, z. B. durch starkes Erwärmen oder Kaltverformen, zu vermeiden sind. Dies muss besonders bei kleinen Eindringtiefen beachtet werden.

Die Prüfung ist an einer glatten und ebenen Oberfläche durchzuführen, die frei von Zunder und Fremdkörpern und vor allem vollständig frei von Schmierstoffen sein muss, sofern nicht in Produkt- oder Werkstoffnormen anders festgelegt. Eine Ausnahme stellen reaktive Metalle, wie Titan, dar, die am Eindringkörper haften können. In diesem Fall darf ein geeignetes Schmiermittel, wie z. B. Kerosin, verwendet werden. Die Anwendung eines Schmiermittels muss im Prüfbericht angegeben werden.

Der zu untersuchende Probenkörper muss die folgenden weiteren Kriterien erfüllen:

- die Dicke des Probekörpers muss mindestens dem Zehnfachen der bleibenden Eindringtiefe entsprechen, es sei denn, es lässt sich nachweisen, dass die Verwendung dünnerer Probekörper keinen Einfluss auf den gemessenen Kennwert hat;
- grundsätzlich sollte nach der Prüfung keine Verformung auf der der Prüffläche gegenüberliegenden Seite sichtbar sein, obgleich eine solche Verformung nicht in jedem Fall ein Anzeichen für ein Nichtbestehen der Prüfung ist;
- die Kraftaufbringung muss orthogonal zur Probenoberfläche erfolgen, die Abweichung von der Senkrechten darf nicht mehr als 2° betragen. Hilfsmittel hierzu sind in DIN 51200 [2] dargestellt;
- die Oberseite der Probe im Bereich des Messpunkts, sowie der aufliegende Teil der Probe müssen Geradheit und Ebenheit nach Allgemeintoleranz ISO 2768-L aufweisen;
- das Prüfvolumen muss ausreichend groß sein, so dass sich ein Härteprüfeindruck plastisch komplett ausbilden kann;

- Wird keines der empfohlenen Verfahren zur Probenpräparation nach Tabelle 2 gewählt, ist der arithmetische Mittenrauwert durch mindestens zwei Messungen über die Messfläche sicherzustellen. Der arithmetische Mittenrauwert wird nach DIN EN ISO 4287 ermittelt. In Tabelle 2 sind maximale Mittenrauwerte  $S_{a,max}$  in  $\mu\text{m}$  in Abhängigkeit des Kraftbereichs (bzw. der Prüfkraft) angegeben. Der Mittenrauwert  $S_a$  wird nach DIN EN ISO 4287 bestimmt und berechnet.

Die Planparallelität und Ebenheit sind durch spanende Bearbeitung oder durch ein Trennverfahren sicherzustellen.

**Tabelle 2 — Mittenrauwert  $S_a$  der Oberfläche nach verwendetem Kraftbereich**

Kraftbereich	Prüfkraft in N	Maximaler Mittenrauwert $S_{a,max}$ in $\mu\text{m}$	Empfohlene Probenvorbereitung zur Reduzierung der Rauheit
1 - Klein	10 bis < 300	0,2	Feinschleifen, ggf. Polieren (für sehr kleine Eindringtiefen von $\leq 40 \mu\text{m}$ )
2 - Mittel	300 bis < 1 000	0,5	Vorschleifen, Fräsen, Drehen, Drahterodieren (fein)
3 - Groß	1 000 bis 2 500	1	Trennverfahren nach DIN 8589, Grobschleifen, Fräsen (grob), Drehen (grob), Drahterodieren

Eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften (z. B. durch Erwärmung oder Kaltverfestigung) durch die Probenvorbereitung ist zu vermeiden. Eine Probenpräparation ist nicht erforderlich, wenn der Probenkörper die Anforderungen dieses Abschnitts erfüllt.

## 8 Eindringkörper

Der Eindringkörper muss sphärisch oder sphärokonisch sein. Bevorzugte Varianten sind Eindringkörper A und Eindringkörper B.

Eindringkörper Typ A besitzt einen Kugelradius von  $350 \mu\text{m}$  (siehe Bild 1). Der Winkel zu den Flanken des konischen Teils beträgt jeweils  $45^\circ$ . Der Kugelradius geht tangential in den konischen Teil über. Der Eindringkörper ist rotationssymmetrisch.

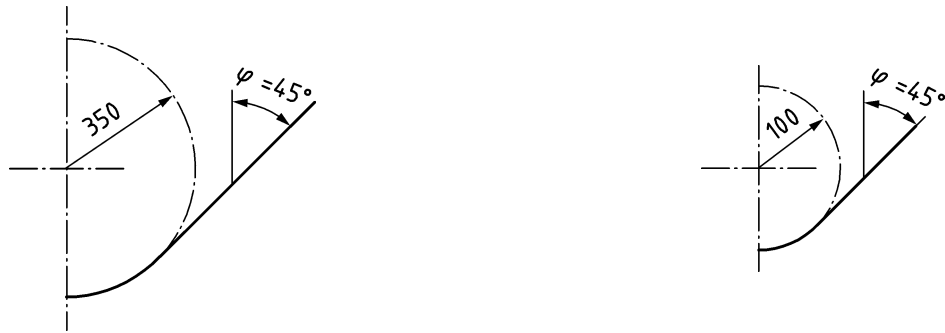
Eindringkörper Typ B besitzt einen Kugelradius von  $100 \mu\text{m}$  (siehe Bild 1). Der Winkel zu den Flanken des konischen Teils beträgt jeweils  $45^\circ$ . Der Kugelradius geht tangential in den konischen Teil über. Der Eindringkörper ist rotationssymmetrisch.

Die tiefste zu erwartenden Eindringtiefe bei Eindringkörper A und B beträgt  $300 \mu\text{m}$ , wodurch sich die Länge des Eindringkörpers ergibt. Zusammen mit dem bevorzugten Öffnungswinkel von  $45^\circ$  ergibt sich die Länge des bearbeiteten Kegels.

Alle Diamanteindringkörper sind mit einer Kennnummer zu versehen (bevorzugt am Schaft des Eindringstempels).

Bild 2 zeigt die empfohlene Ausführung des Eindringkörpers einschließlich der Form-, Maß- und Lage-toleranzen.

Maße in Mikrometer



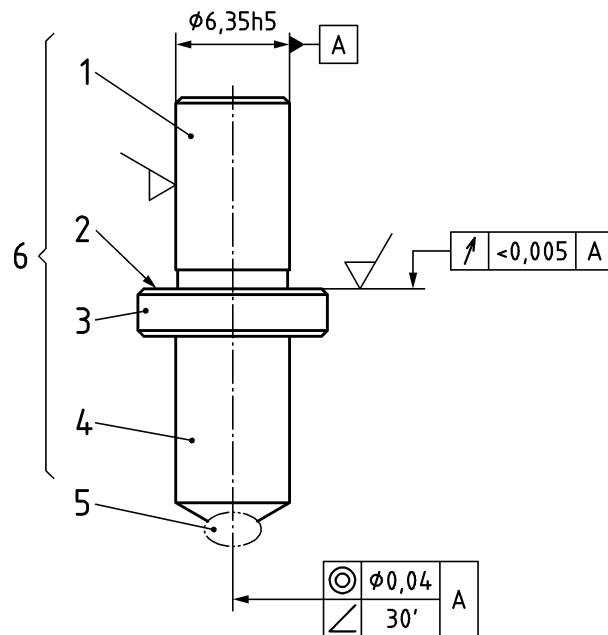
a) Eindringkörper Typ A

b) Eindringkörper Typ B

**Bild 1 — Bevorzugte sphärokonische Eindringkörper mit 45° Öffnungswinkel im konischen Bereich: Eindringkörper Typ A (Radius: 350 µm) und Eindringkörper Typ B (Radius: 100 µm)**

Maße in Millimeter

$$\sqrt{\text{Ra } 0,8} \text{ bzw. } \sqrt{\text{Rz } 6,3}$$



**Legende**

- |                  |   |
|------------------|---|
| 1 Zapfen         | 4 Schaft                                    |
| 2 Schulterfläche | 5 Eindringkörper (schematisch) siehe Bild 1 |
| 3 Schulter       | 6 Halter                                    |

**Bild 2 — Empfohlene Ausführung des Eindringkörpers und des Eindringstempels**

## 9 Prüfverfahren

### 9.1 Allgemeines

Sofern nicht anders festgelegt, wird der Versuch bei Raumtemperatur zwischen 10 °C und 35 °C durchgeführt. Versuche unter kontrollierten Bedingungen müssen bei einer Temperatur von  $(23 \pm 5)$  °C durchgeführt werden.

In Umgebungen, in denen diese Anforderung nicht eingehalten werden kann, trägt das Prüflabor die Verantwortung für die Bewertung des Einflusses, den der Betrieb der Prüfmaschinen unter den jeweils gegebenen Umgebungsbedingungen auf die erhaltenen Prüfdaten hat. Wird die Prüfung außerhalb des empfohlenen kontrollierten Temperaturbereichs von  $(23 \pm 5)$  °C durchgeführt, so muss die Temperatur aufgezeichnet und im Prüfbericht angegeben werden.

Falls während der Prüfung und/oder Kalibrierung erhebliche zeitliche Temperaturgradienten auftreten, kann die Messunsicherheit steigen.

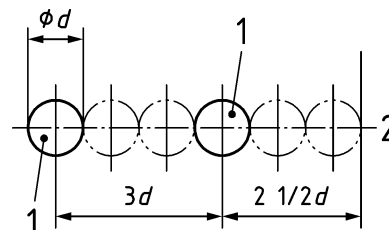
Für jede zu verwendende Prüfkraftstufe muss vor jeweils der ersten Prüfung des Tages die in Anhang A festgelegte tägliche Überprüfung durchgeführt werden. Der Zustand der Diamanteindringkörper sollte nach Anhang A überprüft werden.

Nach jeder Veränderung oder jeder Entfernung und jedem Austausch des Eindringkörpers oder der Probenaufnahmevorrichtung sind mindestens zwei Prüfungen durchzuführen, deren Ergebnisse zu verwerfen sind. Anschließend ist mittels des in Anhang A festgelegten täglichen Überprüfungsprozesses festzustellen, ob der Eindringkörper und die Probenaufnahmevorrichtung vorschriftsmäßig in die Maschine eingesetzt sind.

Der Eindringkörper muss der bei der letzten indirekten Überprüfung (siehe A.2.4) verwendete Eindringkörper sein. Falls der Eindringkörper nicht bei der indirekten Überprüfung verwendet wurde und damit erstmalig eingesetzt wird, muss er nach dem in Anhang A angegebenen Verfahren für die tägliche Überprüfung unter Verwendung von mindestens zwei Referenzmaterialien überprüft werden (von denen die eine den hohen und die andere den niedrigen Bereiche der Zugfestigkeit repräsentieren muss) für jede der üblicherweise verwendeten Prüfkraftstufen.

Der Probekörper ist auf eine starre Aufnahmevorrichtung aufzulegen und so auszurichten, dass sich die Prüffläche senkrecht zur Achse des Eindringkörpers und zur Wirkungsrichtung der Prüfkraft befindet und dass eine Verschiebung des Probekörpers aus dieser Position verhindert wird.

Der Abstand der Mittelpunkte zweier nebeneinander liegender Prüfeindrücke muss mindestens das Dreifache des Eindruckdurchmessers betragen. Der Abstand des Mittelpunktes jedes Prüfeindrucks vom Rand des Probekörpers muss mindestens das Zweieinhalbfache des Eindruckdurchmessers betragen (siehe Bild 3).



#### Legende

1 Prüfeindrücke

2 Rand des Probekörpers

**Bild 3 — Mindestabstände von Prüfeindrücken zueinander und zum Rand**

Das Prüfverfahren besteht aus den aufeinanderfolgenden Schritten:

- Erzeugen des Prüfeindrucks durch das kraftgesteuerte orthogonale Eindringen des Eindringkörper in die Probenoberfläche (siehe 9.2);
- Dreidimensionale Vermessung des Prüfeindrucks (siehe 9.3);
- Berechnung der Fließkurvenparameter durch inverses Verfahren (siehe 9.4);
- Berechnung der technischen Spannung-Dehnung Kurve mithilfe der ermittelten Fließkurven und Berechnung der Vergleichskennwerte (siehe 9.5);

## 9.2 Prüfzyklus

Der Prüfzyklus besteht aus den in der Tabelle 3 dargestellten Prüfschritten. Mindest- und Höchstdauer sind für die Prüfschritte 2 bis 4 angegeben, wobei für die Prüfschritte 1 und 5 keine Zeiten vorgegeben sind.

Tabelle 4 enthält die empfohlenen Prüfzyklen 1 und 2. Zyklus 1 ist generell zu bevorzugen. Zyklus 2 dient zur schnellen Inline (bzw. In Prozess) -Messung.

**Tabelle 3 — Minimale und maximale Zeiten der Prüfschritte des Prüfzyklus**

Schritt	Prüfschritt	Beschreibung	Dauer in s (minimal)	Dauer in s (nominell)	Dauer in s (maximal)
1	Annäherung	Annäherung des Eindringkörpers an den Probenkörper	—	—	—
2	Aufbringung	Kraftgesteuertes Aufbringen der Prüfkraft <i>F</i>	1	6	8
3	Halten	Halten des Prüfkraft (Haltedauer)	1	3	14
4	Entlastung	Entlastung des Eindringkörpers	1	2	5
5	Zurückziehen	Zurückziehen des Eindringkörpers in die Ausgangsstellung	—	—	—

**Tabelle 4 — Empfohlene Prüfzyklen 1 und 2**

Schritt	Prüfschritt	Beschreibung	Prüfzyklus 1 (normal): Dauer in s	Prüfzyklus 2 (schnell): Dauer in s
1	Annäherung	Annäherung des Eindringkörpers an den Probenkörper	—	—
2	Aufbringung	Kraftgesteuertes Aufbringen der Prüfkraft <i>F</i>	6	2
3	Halten	Halten des Prüfkraft (Haltedauer)	3	1
4	Entlastung	Entlastung des Eindringkörpers	2	1
5	Zurückziehen	Zurückziehen des Eindringkörpers in die Ausgangsstellung	—	—

Es wird empfohlen, denselben Prüfzyklus durchzuführen, der auch bei der indirekten Überprüfung (siehe A.2.4) zur Anwendung kam. Bei kriechenden Werkstoffen sind angemessene Haltezeiten von bis zur maximal angegebenen Dauer zu wählen, um den Abschluss der Kriechvorgänge während der Prüfung zu ermöglichen.

Die Absenkung des Eindringkörpers bis zum Erreichen der Probenoberfläche sollte bevorzugt mit einer Annäherungsgeschwindigkeit von maximal 0,2 mm/s erfolgen, um Abweichungen des Prüfergebnisses aufgrund dynamischer Vorgänge durch eine zu hohe Annäherungsgeschwindigkeit zu minimieren.

Die Prüfkraft  $F$  ist stoß-, erschütterungs- und vibrationsfrei und ohne Überschwingen oder Überlastung aufzubringen. Bei der Prüfung ist die Prüfkraft  $F$  innerhalb der in Tabelle 3 aufgeführten Zeiten aufzubringen, zu halten und wieder entlasten.

Die Prüfkraft  $F$  ist so zurückzunehmen, dass der bleibende Prüfeindruck keine weiteren Veränderungen durch die Prüfkraftrücknahme erfährt, wie sie z. B. durch Stöße, Erschütterungen oder Verlagerungen des Probenkörpers oder des Eindringkörpers aus der Wirkungslinie der Prüfkraft hervorgerufen werden könnten.

Vorzugsweise sollten die in Tabelle 5 angegebenen Prüfkraften in Newton verwendet werden:

**Tabelle 5 — Empfohlene Prüfkraften in N**

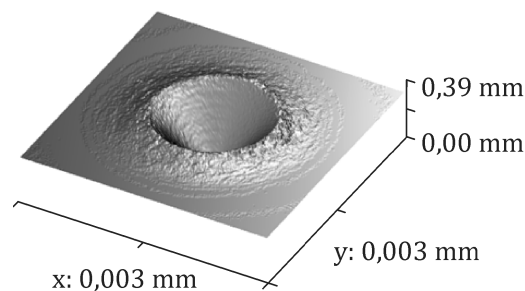
49,03
98,07
147,10
294,20
588,40
1 471,00

Die konkrete Wahl der Prüfkraft obliegt dem Nutzer und richtet sich nach verfügbarer Probendicke, gewünschtem Eindruckdurchmesser und Festigkeit des Werkstoffs.

Zur Reduzierung der Standardabweichung innerhalb von Messreihen kann der Prüfzyklus ein zweites Mal direkt im Anschluss wiederholt werden.

### 9.3 3D-Vermessung des Prüfeindrucks

Der Prüfeindruck wird dreidimensional vermessen (siehe Bild 4). Es sind sowohl optische als auch taktile Prüfverfahren möglich. Optische Verfahren sind aufgrund der geringeren Messzeiten zu bevorzugen.



ANMERKUNG Zur besseren Anschaulichkeit sind die Kantenlängen des Bildabschnitts in x- und y-Richtung sowie die Höhe von der höchsten zur tiefsten Stelle des Prüfeindrucks angegeben.

**Bild 4 — exemplarische Darstellung einer dreidimensionalen Messung eines Prüfeindrucks**

Für die Verwendung des Eindringkörpers Typ A werden für die drei Kraftbereiche notwendige Eigenschaften des Messsystems in Tabelle 6 definiert:

**Tabelle 6 — Notwendige Eigenschaften des Messsystems zur 3D-Vermessung bei der Verwendung des Eindringkörpers Typ A**

Kraftbereich	Prüfkraft F in N	Maximaler lateraler Punktabstand des Sensors in $\mu\text{m}$	Mindestgröße der Messfläche des Sensors
1 - Klein	$10 \leq F < 300$	6	3 mm × 3 mm
2 - Mittel	$300 \leq F < 1\,000$	8	5 mm × 5 mm
3 - Groß	$1\,000 \leq F < 2\,500$	10	7 mm × 7 mm

Für die Verwendung des Eindringkörpers Typ B werden für die drei Kraftbereichen notwendige Eigenschaften des Messsystems in Tabelle 7 definiert:

**Tabelle 7 — Notwendige Eigenschaften des Messsystems zur 3D-Vermessung bei der Verwendung des Eindringkörpers Typ B**

Kraftbereich	Prüfkraft F in N	Maximaler lateraler Punktabstand des Sensors in $\mu\text{m}$	Mindestgröße der Messfläche des Sensors
1 - Klein	$10 \leq F < 300$	3	2,5 mm × 2,5 mm
2 - Mittel	$300 \leq F < 1\,000$	6	4 mm × 4 mm
3 - Groß	$1\,000 \leq F < 2\,500$	8	6 mm × 6 mm

Die notwendigen Auflösungen des Messsystems ergeben sich aus dem maximalen Punktabstand und der Mindestgröße der Messfläche.

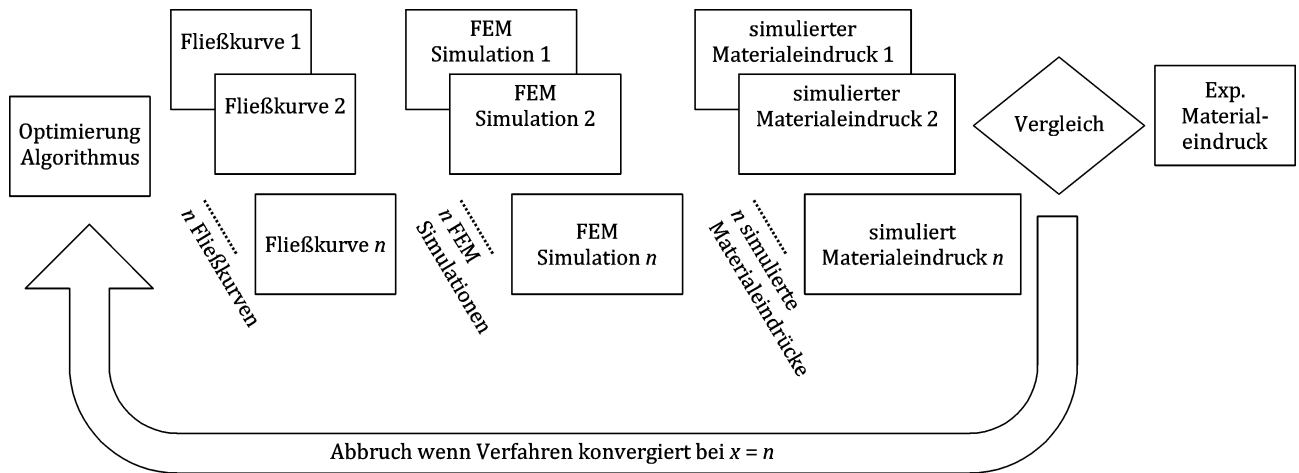
Die Höhenauflösung muss eine Standardabweichung von durchschnittlich unter 1  $\mu\text{m}$  besitzen.

Die Messungen sind daraufhin zu überprüfen, dass mindestens 10 % des Bildrandes unverformt sind.

## 9.4 Berechnung durch inverses Verfahren

### 9.4.1 Aufbau des Lösungsverfahrens und Datenverarbeitung

Der folgende Ablauf ist einer beliebigen Programmiersprache umzusetzen. In den Programmcode sind ein Optimierungsalgorithmus und Software zur Berechnung der Finite-Elemente Simulationen einzubinden. Der Aufbau ist in Bild 5 dargestellt.



**Bild 5 — Ablauf des Lösungsverfahrens und Konvergenz**

Der Optimierungsalgorithmus variiert die Eingangsparameter der Fließkurve und erhält aus jeder Simulation einen simulierten Materialeindruck. Dieser wird mit dem experimentellen Eindruck in der Zielfunktion verglichen (siehe 9.4.2). Die Zielfunktion wird mithilfe des Optimierungsalgorithmus minimiert (siehe 9.4.3). Das Verfahren endet, wenn die Zielfunktion einen Zielwert (siehe 9.4.3) unterschreitet. Die Berechnung der finalen technischen Spannung-Dehnung Kurve und der Vergleichskennwerte zum Zugversuch wird in 9.5 beschrieben.

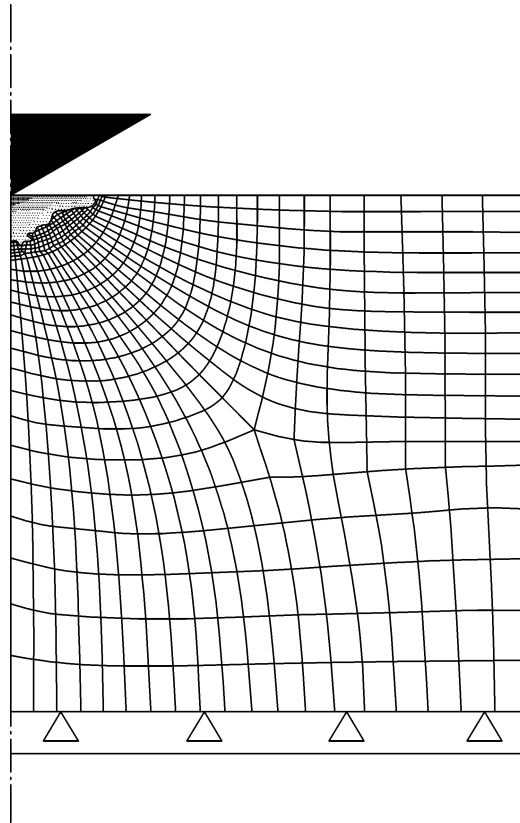
#### 9.4.2 FEM-Simulation und Berechnung der Zielfunktion

Die FEM-Simulation ist in Bild 6 dargestellt und muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

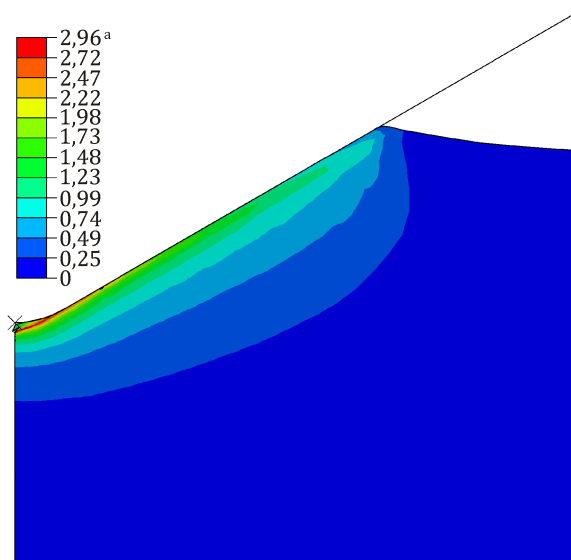
- ein Knotenabstand, welcher maximal 1/10 der Eindringtiefe beträgt;
- elastoplastisches Materialmodell und eine von-Mises Fließbedingung;
- Möglichkeit der Modellierung von Kontakt durch einen Kontaktalgorithmus;
- Möglichkeit der Berücksichtigung von Reibung.

Die Randbedingungen des FEM-Modells müssen wie folgt gewählt werden:

- Die Prüfkraft und die Geometrie des Eindringkörpers sind nach den im Experiment verwendeten Daten zu wählen;
- die Verformungsrandbedingungen sind nach Bild 6 a) zu wählen;
- die FEM-Modellgröße des Probenkörpers beträgt  $(10 \times 5) \text{ mm}^2$ .



a) Verformungsrandbedingungen des FEM-Modells



a Simulierter Wert der plastische Verformung

b) plastische Verformung, welche durch FEM-Simulation ermittelt wurde

Bild 6 — FEM-Simulation

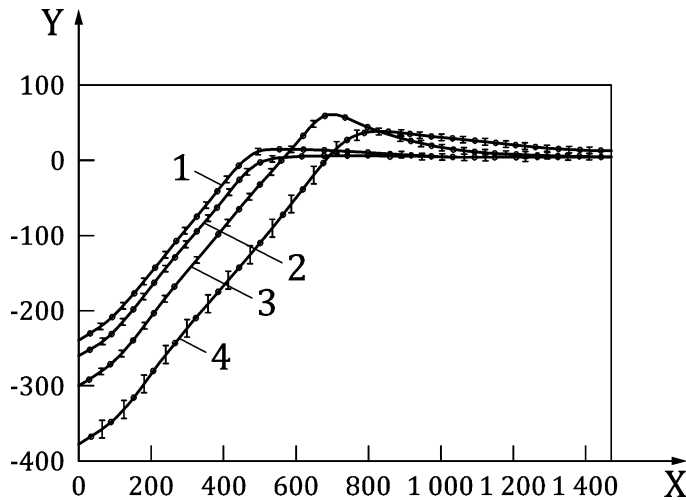
Die Schritte der Datenverarbeitung sind wie folgt:

- Ein Optimierungsalgorithmus wird verwendet, welcher die Zielfunktion – das Residuum *res* – minimiert. Hierzu startet, überwacht und wertet dieser FEM-Simulationen automatisiert aus. Die Konvergenz des Optimierungsalgorithmus ist über den gesamten Wertebereich zu überprüfen.
- Der Elastizitätsmodul  $E$  und die Poissonzahl  $\nu$  (elastische Kennwerte) werden vom Benutzer entsprechend dem zu prüfenden Material vorgegeben. Der Reibwert zwischen Proben- und Eindringkörper beträgt 0,1. Der Elastizitätsmodul  $E$  darf alternativ durch die Bestimmung des Eindringmoduls  $E_{IT}$  nach DIN EN ISO 14577-1 [3] ermittelt werden.
- Es wird vorzugsweise das Modell nach Ludwik zur Parametrisierung des Fließverhaltens verwendet (siehe Gleichung 1); die Verwendung anderer Parametrisierungen ist möglich.

$$\sigma = \sigma_0 + K_L \varepsilon^{n_L} \quad (1)$$

Dabei ist

- $\sigma$  die wahre Spannung;
- $\sigma_0$  die Fließgrenze;
- $K_L$  die werkstoffabhängige Konstante;
- $\varepsilon$  die wahre Dehnung;
- $n_L$  der Verfestigungsexponent.
- Der Optimierungsalgorithmus variiert die Parameter  $\sigma_0, K_L, n_L$  der Fließkurve (plastische Kennwerte) und die Fließkurve wird an die FEM-Simulation übergeben.
- Die FEM-Simulationen zur Berechnung der Zielfunktion werden automatisiert gestartet und ausgewertet.
- Auswertung der Simulation: Zentrierung des realen und des simulierten Prüfeindrucks anhand der Position des Minimums;
- Im Falle der vollständigen 3D-Simulation: Interpolation der x-, y-, z-Koordinaten der Simulation auf ein regelmäßiger Gitter, welches durch die Auflösung des Sensors definiert ist.
- Im Falle der radialsymmetrischen Simulation: Das experimentelle Profil (siehe Bild 7) wird durch Mittelung von radialen Einzelprofilen, welche alle 1° bis 2° in Umfangsrichtung erzeugt werden.



**Legende**

- X Entfernung in Mikrometer vom Mittelpunkt des Prüfeindrucks in radiale Richtung
- Y gemittelte Höhenwerte in Mikrometer
- 1 Dualphasenstahl
- 2 X5CrNi18-10
- 3 Kupfer
- 4 Reineisen

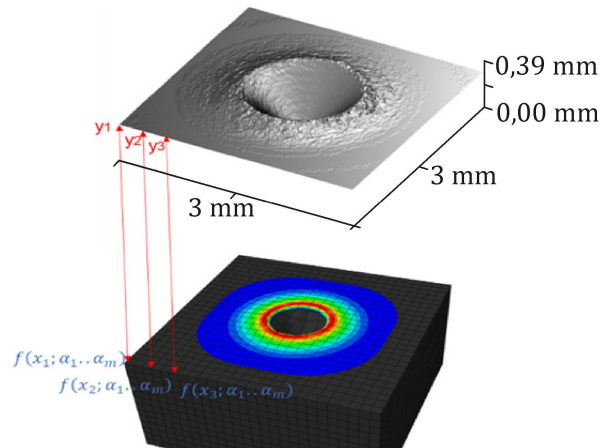
**Bild 7 — Experimentelle Profile, welche durch Mittelung in Umfangsrichtung berechnet wurden**

— Bildung der Zielfunktion (siehe Bild 8): Es wird die Summe der Fehlerquadrate nach Gleichung (2) berechnet, welche den Unterschied des realen zum simulierten Materialeindrucks beschreibt:

$$\sum_{i=1}^n (f(x_i; \sigma_0, K_L, n_L) - y_i)^2 = res \tag{2}$$

Dabei ist

- $f$  der Funktionswert (Höhe) der Simulation;
- $x_i$  die Koordinaten der Simulation;
- $\sigma_0$  die Fließgrenze;
- $K_L$  die werkstoffabhängige Konstante;
- $n_L$  der Verfestigungsexponent;
- $y_i$  die Funktionswerte (Höhe) des Experiments;
- $n$  die Anzahl der Datenpunkte einer Messung.



ANMERKUNG Zur besseren Anschaulichkeit sind die Kantenlängen des Bildabschnitts in x- und y-Richtung sowie die Höhe von der höchsten zur tiefsten Stelle des Prüfeindrucks angegeben.

**Bild 8 — Bildung der Zielfunktion**

Die Funktionswerte  $f(x_i; \sigma_0, K_L, n_L)$  entstammen den FEM-Simulationen und hängen von dem verwendeten Verfestigungsmodell und gewählten Parametern (hier:  $\sigma_0, K_L, n_L$ ) ab.

Die Zielfunktion kann um den Fehler der Prüfkrafteindringkurve zwischen Simulation und Experiment ergänzt werden.

Das Residuum  $res$  ist zu minimieren, was in 9.4.3 beschrieben ist.

### 9.4.3 Minimierung der Zielfunktion

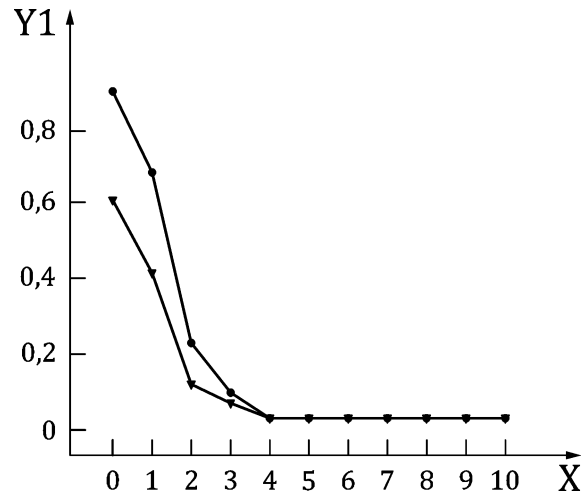
Das Residuum wird minimiert:

$$\min_{\alpha}(res)$$

Ist  $\min_{\alpha}(res) < \text{Grenzwert}$  ist das Verfahren konvergiert. Der Grenzwert liegt bei maximal 5 % des verdrängten Volumens im Falle der 3D-Simulation und 3 % beim Vergleich der radialsymmetrischen Simulation.

Das Verfahren wird abgebrochen und ist nicht erfolgreich, wenn der Optimierungsalgorithmus keinen niedrigeren Wert findet und der Wert über dem Grenzwert liegt (keine Konvergenz).

Die Simulation mit dem geringsten Wert des Residuums wird als beste Näherung der Simulation an den realen Eindruck angenommen. Die Parameter dieser Simulation sind die gesuchten Materialeigenschaften. Ein typischer Verlauf der Zielfunktion ist in Bild 9 dargestellt.



**Legende**

X relativer Fehler  
 Y1 Iterationsstufen eines Optimierungsalgorithmus

**Bild 9 — Typische Konvergenz der Zielfunktion**

**9.5 Berechnung der technischen Spannung-Dehnung-Kurven und der Vergleichskennwerte**

Die Fließkurven werden mithilfe der berechneten Parameter (siehe 9.4) und des parametrisierten Fließkurvenmodells (Gleichung 3) berechnet. Die Fließkurven sind in technische Spannung-Dehnung-Kurven umzuwandeln. Hierzu wird die wahre Dehnung  $\epsilon$  in die technische Dehnung  $e$  umgewandelt (die technische Dehnung  $e$  ist als Absolutwert anzugeben bzw. einzusetzen):

$$e = \exp^{\epsilon} - 1 \tag{3}$$

Die wahre Spannung  $\sigma$  wird in die technische Spannung ohne Schädigung  $R_t$  nach Gleichung (4) umgerechnet:

$$R_t = \sigma / (1 + e) \tag{4}$$

Zur Berücksichtigung der Entfestigung bei Unterschreiten einer Dehnrate, welche ungefähr ab Maximum der technischen Spannung-Dehnung-Kurve erreicht wird, wird ein phänomenologisches Schädigungsmodell auf die technische Spannung ohne Schädigung  $R_t$  angewendet. Hierdurch erhält man die technische Spannung  $R$  nach Gleichung (5):

$$R = R_t (1 - \sigma_s) \tag{5}$$

Die Evolutionsgleichung [Gleichung (6)] berechnet die Spannungsreduktion bei Unterschreiten der Grenzdehnrate  $\dot{\sigma}_{\text{threshold}}$ :

$$\Delta\sigma_s = \Delta e \times \theta \text{ bei } \dot{R}_t < \dot{\sigma}_{\text{threshold}} \tag{6}$$

$\theta$  ist ein Parameter der Evolutionsgleichung, welcher die Geschwindigkeit der Spannungsreduktion bestimmt. Die Modellparameter werden aus mathematischer Regression experimenteller Daten der jeweiligen Werkstoffgruppe gewonnen.

Die Spannung-Dehnung-Kurve und somit das Endergebnis des Verfahrens erhält der Anwender durch die Funktion  $f(e) = R$ .

Das Maximum der technischen Spannung  $R$  wird als Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$  definiert.

Die Spannung  $R$  ( $e = 0,2 \%$ ) wird als Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$  definiert.

## 10 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

- a) die vollständige Beschreibung des Werkstoffes, einschließlich:
  - Typ;
  - Ursprung;
  - Bezeichnungsnummer des Herstellers;
  - Form;
  - Vorgeschichte (Wärmebehandlung, Umformungen, etc.), soweit diese bekannt sind;
  - alle Einzelheiten, die für die vollständige Identifizierung des Prüfstücks erforderlich sind;
- b) die Messwerte jeder Einzelmessung, ermittelt nach Abschnitt 9:
  - Technische Spannung-Dehnung Kurve;
  - Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$ ;
  - Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$ ;
  - Eindringtiefe eines Prüfeindrucks gegenüber seiner Umgebung;
  - ggf. Duktilität;
  - ggf. Härte;
- c) eine Verweisung auf dieses Dokument, d. h. DIN SPEC 4864;
- d) der verwendete Eindringkörper;
- e) die verwendete Prüfkraft;
- f) das Datum und die Uhrzeit der Messung;
- g) die Probenvorbereitung, soweit diese bekannt ist und durchgeführt wurde;
- h) die Mittelwerte und die Standardabweichung der einzelnen Bestimmungen, sofern gefordert;
- i) die Probenhöhe, sofern gefordert;
- j) den 95 %igen Vertrauensbereich der Mittelwerte, sofern gefordert;
- k) eine Auftragsnummer, den Namen des Prüfers und den Kunden, sofern gefordert;
- l) alle festgestellten Besonderheiten; sowie
- m) alle Abweichungen von dieser DIN SPEC sowie alle Umstände, die die Prüfergebnisse beeinflussen können [insbesondere: die Prüftemperatur, falls diese außerhalb des kontrollierten Temperaturbereichs von  $(23 \pm 5) \text{ °C}$  liegt; tatsächliche Aufbring-/Einwirkdauer der Prüfkraft, Haltezeit, Punktabstand des Messsystems, Abstand zum Rand und zu anderen Punkten, Probenhöhe, Rauheit, Abweichende Probenpräparation, Verwendung von Schmierstoffen].

## Anhang A (normativ)

### Kalibrierung der Prüfmaschine

#### A.1 Kalibrierung der Prüfmaschine

In diesem Teil der DIN SPEC sind zwei unterschiedliche Verfahren für die Überprüfung der Prüfmaschinen (direkt und indirekt) festgelegt.

Die direkte Überprüfung (siehe A.2) wird angewendet, um festzustellen, ob die Hauptparameter der Maschinenfunktion, wie z. B. die aufgebrachte Kraft, der Eindringkörper, das 3D-Messsystem und die zeitliche Steuerung der Prüfzyklen, die festgelegten Grenzabweichungen einhalten.

Bei der indirekten Überprüfung wird eine Reihe von kalibrierten Referenzproben verwendet, um festzustellen, wie gut die Prüfmaschine in der Lage ist, einen Werkstoff bekannter Zugfestigkeit zu messen.

Das indirekte Verfahren kann für sich allein zur regelmäßigen Routineüberprüfung der Maschine beim Anwender angewendet werden.

Eine vollständige Kalibrierung bestehend aus direkter und indirekter Kalibrierung muss mindestens einmal in 12 Monaten durchgeführt werden. Hierbei erfolgen zunächst die direkte und anschließend die indirekte Kalibrierung.

Vor der Überprüfung der Prüfmaschine muss sichergestellt sein, dass sie vorschriftsmäßig aufgestellt ist und den Anweisungen des Herstellers entsprechend arbeitet.

Im Besonderen sollte überprüft werden, ob die Prüfkraft stoß- und erschütterungsfrei und ohne Überschwingen aufgebracht und zurückgenommen werden kann.

#### A.2 Direkte Kalibrierung der Prüfmaschine

##### A.2.1 Allgemeines

Die direkte Überprüfung umfasst die Kalibrierung und Überprüfung von Folgendem:

- Prüfkraften;
- Eindringstempel mit Eindringkörper;
- Prüfzyklus;
- 3D-Messsystem.

Die direkte Überprüfung sollte bei einer Temperatur von  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$  durchgeführt werden. Falls die Überprüfung außerhalb dieses Temperaturbereichs durchgeführt wird, muss dies im Prüfbericht angegeben werden.

Die für die Kalibrierung verwendeten Geräte müssen auf nationale Normale zurückgeführt sein.

Nach einer erfolgreichen direkten Überprüfung muss eine indirekte Überprüfung nach A.2.5 vorgenommen werden.

## A.2.2 Kalibrierung der Prüfkraft

Alle Prüfkraften müssen in mindestens drei verschiedenen Stellungen des Druckstempels gemessen werden, und zwar innerhalb des Bereiches, in dem sich der Druckstempel während der Prüfung bewegen kann. Die drei verschiedenen Stellungen des Druckstempels korrespondieren mit den unterschiedlichen Eindringtiefen bei weichen, harten und hochfesten Materialien.

Für jede Prüfkraft und für jede Stellung des Druckstempels müssen drei Messungen vorgenommen werden. Unmittelbar vor jeder Ablesung muss die Bewegungsrichtung des Druckstempels die Gleiche sein wie bei der Prüfung.

Die Prüfkraften sind nach einem der beiden nachstehenden Verfahren zu messen:

- mittels Kraftmessgeräten der Klasse 1 (nach DIN EN ISO 376) oder besser und mit Umkehrspanne kalibriert;
- durch Vergleich mit einer Kraft, Grenzabweichung von  $\pm 0,2\%$ , die durch kalibrierte Massestücke aufgebracht wird, oder durch ein anderes Verfahren mit gleicher Genauigkeit.

Es sollten Belege dafür zur Verfügung gestellt werden, dass das Ergebnis des Kraftnachweisgeräts innerhalb eines Zeitraums von 1 s bis 30 s nach einem Kraftänderungsschritt um nicht mehr als 0,2 % abweicht.

Die Messunsicherheit für jede Messung der Prüfkraft  $F$  beträgt  $\pm 1,0\%$ . Der Bereich der Kraftmessungen (Ergebnis der Subtraktion des Tiefstwertes vom Höchstwert) muss  $\leq 0,75\%$  von  $F$  sein.

## A.2.3 Kalibrierung des Eindringkörpers und Überprüfung des Eindringstempels

Die Oberflächen des Eindringkörpers müssen so poliert sein, dass sie für eine Eindringtiefe von 0,3 mm geeignet sind und glatt, tangential ineinander übergehen. Beide Oberflächen müssen frei von Beschädigungen sein.

Die Überprüfung der Form des Eindringkörpers kann durch direkte Messung oder mit optischen Verfahren erfolgen. Die Überprüfung muss in mindestens vier eindeutigen, gleich weit voneinander entfernten Axialebenen (z. B. bei  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) durchgeführt werden. Eine Messung mit einem Kollimator ist ebenfalls möglich. In diesem Fall sollten die Messungen unter mindestens vier Mittelwinkeln durchgeführt werden, wobei der Mittelwinkel von  $90^\circ$  enthalten sein muss.

Der Bereich, in dem die kugelige Spitze und der Diamantkegel ineinander übergehen, variiert in Abhängigkeit von den Werten des Kugelspitzenradius und des Kegelwinkels. Im Idealfall einer perfekten Eindringkörpergeometrie befindet sich der Übergangspunkt bei der Messung entlang einer senkrecht zur Eindringkörperachse verlaufenden Geraden in einem Abstand von

- 247,5  $\mu\text{m}$  zur Eindringkörperachse (Eindringkörper Typ A, mit Spitzenradius  $r = 350\ \mu\text{m}$ ). Um die Einbeziehung des Übergangsbereichs in die Messung des Kugelspitzenradius und des Kegelwinkels zu verhindern, darf der Abschnitt der Diamantoberfläche zwischen 198  $\mu\text{m}$  und 297  $\mu\text{m}$  außer Acht gelassen werden [siehe Bild A.1, a)].
- 70,7  $\mu\text{m}$  zur Eindringkörperachse (Eindringkörper Typ B, mit Spitzenradius  $r = 100\ \mu\text{m}$ ). Um die Einbeziehung des Übergangsbereichs in die Messung des Kugelspitzenradius und des Kegelwinkels zu verhindern, darf der Abschnitt der Diamantoberfläche zwischen 56  $\mu\text{m}$  und 85  $\mu\text{m}$  außer Acht gelassen werden [siehe Bild A.1, b)].

Die zur Überprüfung der Form des Diamanteindringkörpers verwendeten Messgeräte müssen die folgenden erweiterten Unsicherheiten bei einem Vertrauensniveau von 95 % einhalten:

- Winkel:  $0,1^\circ$ ;
- Radius: 5  $\mu\text{m}$ .

Der konische Teil des Eindringkörpers muss einen Winkel von  $(90 \pm 0,35)^\circ$  besitzen.

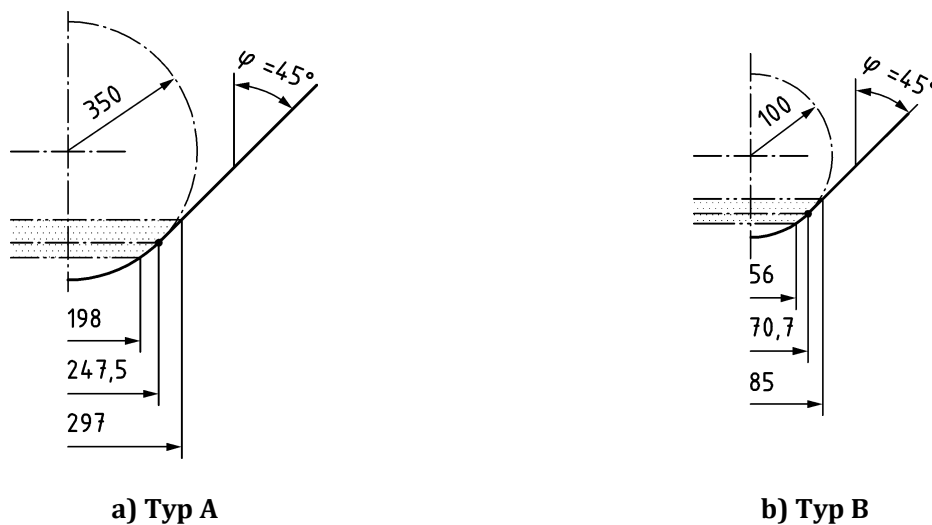
Die Spitze des Eindringkörpers muss kugelig sein. Ihr mittlerer Radius ist aus mindestens vier Einzelwerten zu bestimmen, die in den festgelegten Achsschnittebenen zu messen sind. Jeder Einzelwert muss

- für Eindringkörper Typ A (Spitzenradius  $r = 350 \mu\text{m}$ ) innerhalb von  $(350 \pm 15) \mu\text{m}$  liegen. Der Mittelwert muss innerhalb von  $(350 \pm 10) \mu\text{m}$  liegen. Örtliche Abweichungen vom wahren Radius dürfen  $2 \mu\text{m}$  nicht überschreiten.
- für Eindringkörper Typ B (Spitzenradius  $r = 100 \mu\text{m}$ ) innerhalb von  $(100 \pm 15) \mu\text{m}$  liegen. Der Mittelwert muss innerhalb von  $(100 \pm 10) \mu\text{m}$  liegen. Örtliche Abweichungen vom wahren Radius dürfen  $2 \mu\text{m}$  nicht überschreiten.

Eindringstempel müssen die normgerechte Gesamtbeschaffenheit, wie in Bild A.1 dargestellt ist, aufweisen. Bei den Härteprüfmaschinen sollte am Aufstellungsort geprüft werden, ob für den verwendeten Eindringkörper ein Nachweis über die normgerechte Eindringkörpergeometrie vorliegt. Außerdem ist durch Sichtprüfung mit einer Lupe von mindestens zehnfacher Vergrößerung zu kontrollieren, ob die Oberfläche des Eindringkörpers grobe Beschädigungen oder Beläge aufweist.

Da der Eindringkörper bei Benutzung Veränderungen erfahren kann, die nicht mit der Lupe erkennbar sind, jedoch die Messwerte erheblich beeinflussen, sollte er in Abständen, die zwei Jahre nicht überschreiten, ausgetauscht werden.

Maße in Mikrometer



**Bild A.1 — Übergangsbereich Eindringkörper A (Radius:  $350 \mu\text{m}$ ) und B (Radius:  $100 \mu\text{m}$ )**

#### A.2.4 Prüfzyklus

Der Prüfzyklus muss die Festlegungen nach Abschnitt 9.2 erfüllen.

Für die Einhaltung der vorgegebenen Prüfzeiten gilt eine Grenzabweichung von  $\pm 0,5 \text{ s}$ .

### A.2.5 Indirekte Überprüfung und Kalibrierung des 3D-Sensors in X-Y-,Z-Richtung

Der 3D-Sensor ist jährlich indirekt anhand der folgenden Hilfsmittel und Normale zu überprüfen:

1) Glasmaßstab/Objektmikrometer:

Es sind mindestens 5 Messungen in 3 voneinander verschiedene Richtungen durchzuführen. Die gemessenen Längen müssen mindestens 50 % der Kantenlänge des Messsystems erfassen. Der Messfehler der Länge darf maximal 1 % betragen.

2) Tiefeneinstellnormal:

Es muss eine Stufe im Bereich von 20 µm bis 50 µm und eine Stufe im Bereich 150 µm bis 300 µm jeweils mindestens 10 mal flächenhaft vermessen werden. Jede Einzelmessung des Tiefeneinstellnormals darf einen Fehler von 1 % nicht überschreiten.

3) Planspiegel:

Die Ebenheit des Planspiegels muss mit einer Genauigkeit von 50 nm nach DIN EN ISO 4287 sichergestellt werden. Bei einer Überschreitung ist eine Bias-Korrektur vorzunehmen.

Bei stärkeren zu erwartenden Temperaturänderungen ist die Unebenheit bei mindestens 2 verschiedenen Temperaturen im Temperaturintervall zu überprüfen.

### A.2.6 Indirekte Kalibrierung

Die indirekte Kalibrierung wird auf geeigneten Referenzproben durchgeführt. Die Eigenschaften sind nach der Tabelle A.1 zu erfüllen. Der Anwender ist an die Verwendung von zertifiziertem Referenzmaterial gebunden:

**Hinweis zertifiziertes Referenzmaterial:** Material, welches durch Ringversuche ermittelte gesicherte Eigenschaften, sowie eine bekannte Homogenität der Eigenschaften besitzt. Eine Aussage über die Funktionsfähigkeit der Maschine ist übergreifend möglich.

Bei der Kalibrierung müssen die folgenden Dinge beachtet werden:

- Bei Stahllegierungen sind Referenzproben aus zwei Festigkeitsbereichen, welche sich mindestens 500 MPa bzgl. der Zugfestigkeit unterscheiden, zu verwenden. Der Festigkeitsbereich spiegelt den typischen benötigten Bereich des Anwenders wieder.
- Bei Aluminiumlegierungen und weiteren Werkstoffen sind zwei Proben zu verwenden, welche einen Festigkeitsunterschied von mindestens 100 MPa bzgl. der Zugfestigkeit aufweisen.
- Bei der indirekten Kalibrierung sind jeweils 5 Versuche durchzuführen.
- Das eigene Probenmaterial muss homogen und dessen Eigenschaften müssen hinreichend bekannt und abgesichert sein.
- Die Prüfung darf nur auf einer Seite der Referenzprobe durchgeführt werden.

Die folgenden statistischen Auswertungen der systematische Messabweichung und der Streuung sind jeweils durchzuführen. Die erzielten Werte sind nach der Tabelle A.1 zu überprüfen.

**Systematische Messabweichung**

Die systematische Messabweichung  $b$  der Prüfmaschine unter den speziellen Überprüfungsbedingungen wird mit Hilfe von Gleichung (A.1) in MPa angegeben:

$$b = \overline{R_m^I} - R_{m,CRM} \tag{A.1}$$

Dabei ist

$\overline{R_m^I}$  der Mittelwert der Messwerte der Vergleichszugfestigkeit

$R_{m,CRM}$  der Nennwert der Referenzprobe der Vergleichszugfestigkeit.

Für die relative systematische Messabweichung  $b_{rel}$  gilt Gleichung (A.2):

$$b_{rel} = \frac{b}{R_{m,CRM}} \times 100 \% \tag{A.2}$$

**Streuung**

Die Streuung der Messwerte  $S_m$  berechnet sich aus der Standardabweichung  $S$  der ermittelten Messwerte (Anzahl  $n$ ) nach Gleichung (A.3):

$$S_m = S (R_{m,i}^I); i = 1 \dots n \tag{A.3}$$

Die relative Streuung der Messwerte  $S_{m,rel}$  berechnet sich aus der Streuung  $S_m$  bezogen auf den Mittelwert der Messwerte  $\overline{R_m^I}$  nach Gleichung (A.4) :

$$S_{m,rel} = \frac{S_m}{\overline{R_m^I}} \times 100 \% \tag{A.4}$$

**Tabelle A.1 — Maximalwerte der indirekten Kalibrierung für systematische Messabweichung und relative Streuung**

Fehlermaß	Kennwert	Werkstoffgruppe	Maximaler Wert in %
Systematische Messabweichung	$R_m^I$	Stähle	5
	$R_{p0,2}^I$	Stähle	8
	$R_m^I$	Aluminium	10
	$R_{p0,2}^I$	Aluminium	10
Relative Streuung	$R_m^I$	Stähle	2
	$R_{p0,2}^I$	Stähle	3
	$R_m^I$	Aluminium	5
	$R_{p0,2}^I$	Aluminium	5

### A.3 Tägliche Überprüfung der Prüfmaschine

An jedem Tag, an dem die Prüfmaschine zum Einsatz kommt, ist zunächst eine Überprüfung der Maschine durch Prüfung in jeder der an diesem Tag zu verwendenden Messbereiche vorzunehmen. Hierzu ist mindestens eine Referenzprobe, die die Anforderungen der indirekten Kalibrierung von A.2 erfüllt, zu wählen.

Zusätzlich zur Verwendung des Referenzmaterials (siehe Abschnitt A.2) ist es dem Anwender erlaubt, eigenes Probenmaterial zu verwenden:

**Eigenes Probenmaterial:** Material, welches durch Zugversuche an einer Zugprüfmaschine ermittelte Eigenschaften besitzt. Die Homogenität des Probenmaterials ist durch die Erfüllung der Kriterien an mindestens 3 verschiedenen Positionen mit jeweils 5 Eindrücken nachzuweisen, welche den relevanten Bereich der Prüfung des Probenmaterials örtlich umfassen. Eine Aussage über die Funktionsfähigkeit der Maschine ist nur bei durchgehender Prüfung mit dem gleichen Material möglich. Bei einem Wechsel des Ausgangsmaterials oder der Zugprüfmaschine, bzw. des Prüfergebnisses, ist die Kalibrierung erneut vorzunehmen, wobei sich die Maschine in einem kalibrierten Zustand mit referenziertem Probenmaterial befinden muss. Das Probenmaterial muss den Ansprüchen des vorgeschriebenen Probenkörpers (siehe Abschnitt 7) genügen. Weiterhin muss es von der Legierungszusammensetzung und weiterer Eigenschaften (wie z. B. Wärmebehandlung) dem zu prüfendem Material entsprechen.

Die folgenden Punkte sind bei der täglichen Überprüfung der Prüfmaschine zu beachten:

- Auf jeder Referenzprobe sind mindestens zwei Eindruckversuche durchzuführen, für die mit Hilfe des Kapitels A.2 die systematische Messabweichung und die Streuung der Ergebnisse zu berechnen sind. Liegen die systematische Messabweichung und die Streuung innerhalb der in Tabelle A.1 angegebenen Grenzwerte, so darf die Prüfmaschine als zufriedenstellend angesehen werden. Ist dies nicht der Fall, so ist zu überprüfen, ob der Eindringkörper, der Probekörperhalter und das Prüfgerät in einwandfreiem Zustand sind, und ist die Prüfung zu wiederholen. Besteht die Maschine auch dann die tägliche Überprüfung nicht, so muss eine indirekte Überprüfung durchgeführt werden;
- Ein Protokoll der Ergebnisse der täglichen Überprüfung sollte über einen längeren Zeitabschnitt aufbewahrt werden, um die Vergleichspräzision und den Drift der Prüfmaschine bestimmen zu können.

## Anhang B (informativ)

### Korrelation zum Zugversuch

#### B.1 Allgemeine Hinweise

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden in Kooperation mit drei DAkkS-akkreditierten Prüflaboren, einem weiteren Prüfinstitut sowie der Firma des Initiators durchgeführt. Die Firma des Initiators führte die Eindruckversuche durch, wobei die anderen Parteien Probenmaterial von Zugversuchen und Prüfprotokolle bereitstellten. Weitere Quellen von Zugversuchen sind gesondert gekennzeichnet. Die Vergleichsergebnisse spiegeln den Stand bis zum Dezember 2018 wider<sup>1</sup>.

Insgesamt ist zu beachten, dass der Vergleich zwischen Zugversuch und Eindruckverfahren neben der eigentlichen Abweichung der ermittelten Kennwerte auch statistische und systematische Abweichungen beider Verfahren enthält. Bei zertifiziertem Referenzmaterial entfallen die systematischen Einflüsse. Der Vergleich ist zum einen an Referenzmaterialien durchgeführt worden, bei denen eine Unsicherheitsangabe vorhanden ist (siehe B.2). Zum anderen basiert der Vergleich auf Ergebnissen einzelner Zugprüfungen, bei denen keine Messunsicherheit angegeben wurde (siehe B.3 und B.4). Bzgl. der Messunsicherheit beim Zugversuch wird auf DIN EN ISO 6892-1:2017-02, Anhang K, [4] verwiesen.

Die folgenden **Hinweise** gelten allgemein für die **Übertragung von Einzelergebnissen** dieses Verfahrens auf den Zugversuch:

- Je nach Herstellungsverfahren kann Probenmaterial einen Gradienten oder lokale Eigenschaften aufweisen. Bei sämtlichen Vergleichen ist der Ort möglichst nah an dem Ort des eigentlichen Zugversuchs zu wählen. Andernfalls ist die Probe auf Ihre Homogenität hin zu überprüfen.
- Dünne Bleche, z.B. aus Aluminium, (beispielsweise durch Strangpressen, Walzen oder ähnliche gerichtete Herstellungsprozesse) besitzen typischerweise anisotrope Eigenschaften. Die Übertragung auf den Zugversuch ist zu überprüfen und wird durch die Textur des Werkstoffs beeinflusst.

Die **Details der folgenden Vergleiche** sind:

- Die Prüfungen des Eindruckverfahrens wurde an (gerissenen und ungerissenen) Zugprobenköpfen durchgeführt;
- das Ergebnis einer Zugprüfung wird hier mit dem Mittelwert von drei Ergebnissen (bei Aluminiumknetlegierungen von fünf Ergebnissen) des Eindruckverfahrens verglichen, wobei die Spannweite der Einzelmessungen durch einen Fehlerbalken dargestellt wird;
- alle Proben wurden mit einer Topfschleifmaschine mit der Körnung EK80 präpariert. Im Anschluss fand ein Vorschleifen der Probenoberfläche statt.

Alle Proben und Prüfzeugnisse können auf Anfrage eingesehen werden.

---

<sup>1</sup> Aktuelle Entwicklungen können u. a. bei dem Initiator dieser DIN SPEC, Imprintec GmbH (siehe Vorwort), erfragt werden.

## B.2 Untersuchung an statistisch abgesichertem Material

Es wurde eine Untersuchung an mehreren Proben eines zertifizierten Referenzmaterials durchgeführt. Die Auswahl der Proben aus der Gesamtcharge entspricht der Auswahl, welche dem Käufer eines entsprechenden zertifizierten Referenzmaterials in Form eines Probensatzes zur Überprüfung der Zugprüfung zur Verfügung gestellt werden. Die Abweichungen zum Zugversuch für alle Messwerte sind in der Tabelle B.1 dargestellt.

Tabelle B.1 — Untersuchung der Messabweichungen zu referenziertem Probenmaterial

Werkstoff	Kennung Referenzmaterial	Messpunkt	$R_{p0,2}^I$	$R_m^I$	rel. Abweichung $R_{p0,2}^I$	rel. Abweichung $R_m^I$	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa
			MPa	MPa	%	%		
<b>C45</b> (mehrere Proben aus einer Charge)	1610-079	1	369	506	7	-6	315	538
		2	310	519	-1	-4		
		3	314	526	0	-2		
		4	330	515	5	-4		
		5	319	531	1	-1		
		6	313	524	-1	-3		
		7	335	511	6	-5		
		8	335	512	6	-5		
		9	331	519	5	-4		
<b>40NiCrMo 8-4-7/ E4340</b>	1609-068	1	869	1025	2	-2	852	1041
		2	848	1034	0	-1		
		3	879	1033	3	-1		
<b>40NiCrMo 8-4-7/ E4341</b>	1709MSt/090	1	510	560	-1	-1	516	563
		3	517	553	0	-2		
		4	543	558	5	-1		
<b>SAE12L15</b> (mehrere Proben aus einer Charge)	Stahl 165	1	515	554	-1	-2	518	564
		2	503	554	-3	-2		
		3	521	563	1	0		
		4	516	551	0	-2		
		5	516	553	0	-2		
		6	528	560	2	-1		
		7	508	545	-2	-3		
		8	508	558	-2	-1		
		9	525	585	1	4		
		10	521	554	1	-2		
		11	500	539	-4	-4		
		12	504	544	-3	-4		
		13	500	557	-4	-1		
		14	508	557	-2	-1		

Normen-Download-Beuth-Nuri Geylami-ID:EfYLFQeuyvDq0Xg0X4010youvzczca5UHRxR0oZz-2024-11-18 15:09:58

**Hinweise zu den folgenden Darstellungen** (Diagramme) in den Bildern B.1, B.3, B.5, B.7:

- der X-Wert des Punktes stellt den Mittelwert des Eindruckverfahrens auf einer Probe dar;
- der Y-Wert des Punktes stellt das Ergebnis eines Zugversuchs dar.

In den Bildern B.2, B.4, B.6, B.8:

- die Fehlerbalken zeigen die Schwankungsbreite, basierend auf dem Minimum und Maximum, des Eindruckverfahrens.

### B.3 Stahlwerkstoffe

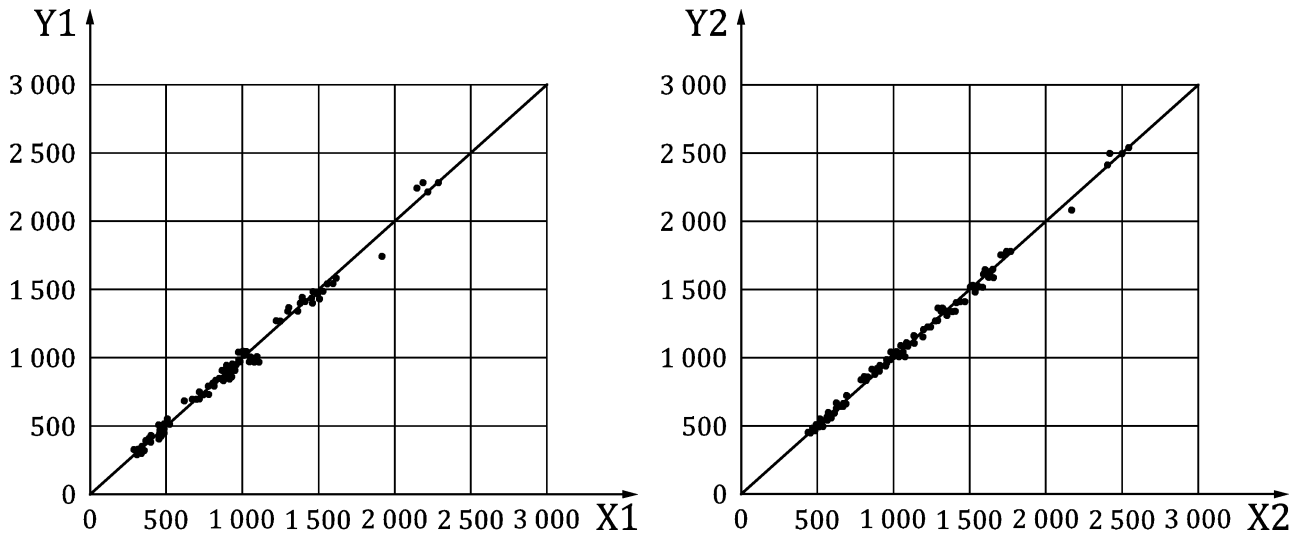
Insgesamt wurden 155 Messreihen durchgeführt. Die Messreihen umfassen Legierungen aus den Bereichen:

- Automatenstähle;
- Baustähle;
- Einsatzstähle;
- Federstähle;
- Vergütungsstähle;
- Stahlguss;
- Wälzlagerstähle;
- CrNi-Stähle mit martensitischem und austenitisch-ferritischem Gefüge.

Die folgenden Werkstoffe werden aufgrund höherer Messunsicherheit von der hier durchgeführten Betrachtung ausgeschlossen:

- CrNi-Stähle mit austenitischem Gefüge;
- Gusseisenwerkstoffe.

Es wurden 4 Einzelergebnisse (2,6 %) verworfen (Ausreißer). Die Korrelation für ausgewählte Stahlwerkstoffe zum Zugversuch ist in Bild B.1, Bild B.2, Bild B.3 und Bild B.4 dargestellt.

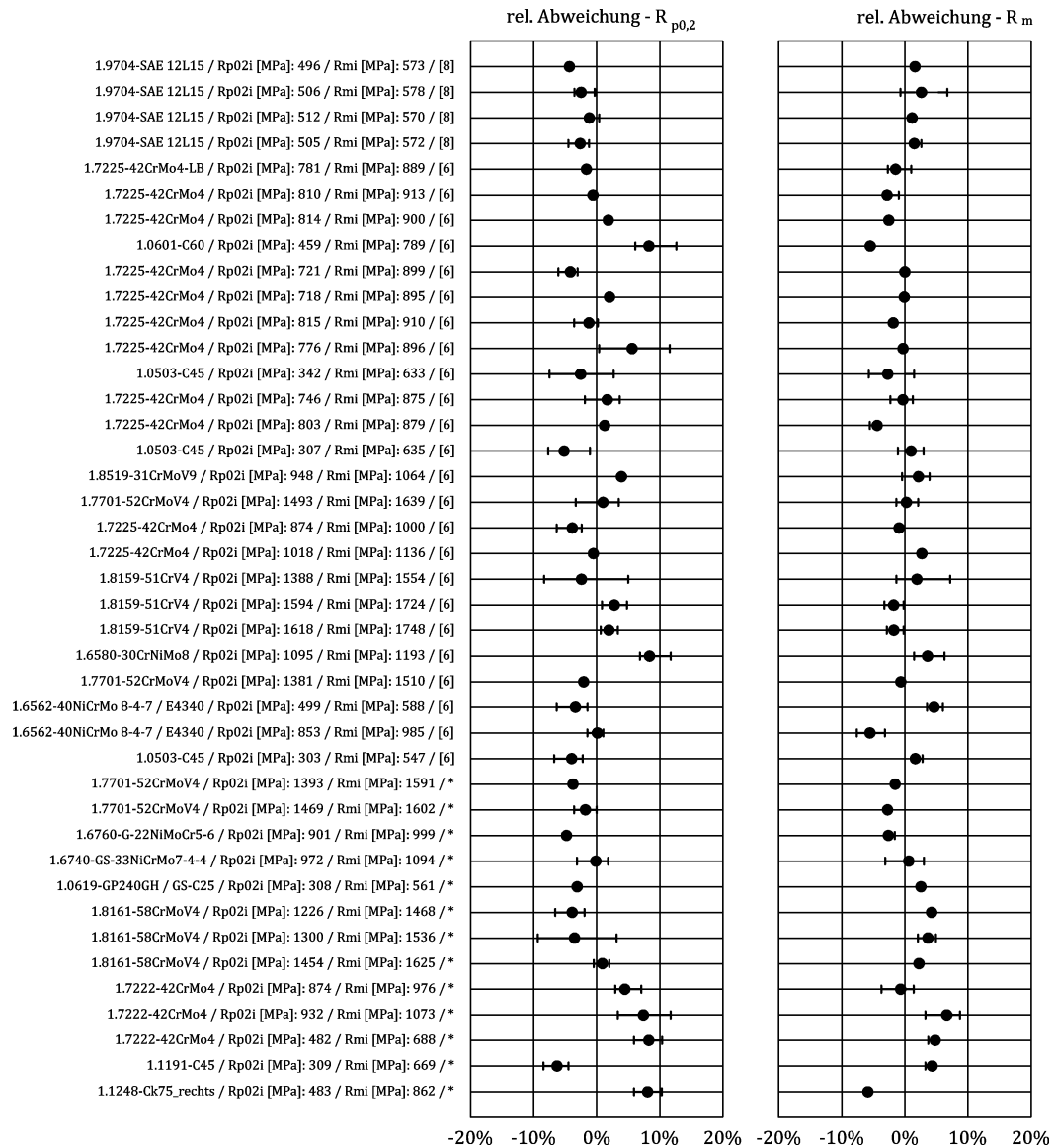


**Legende**

X1 Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$   
 Y1 Dehngrenze  $R_{p0,2}$

X2 Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$   
 Y2 Zugfestigkeit  $R_m$

**Bild B.1 — Korrelation zum Zugversuch für Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle, Einsatzstähle, Kohlenstoffstähle sowie Baustähle**



**Bild B.2 — Korrelation zum Zugversuch für Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle, Einsatzstähle, Kohlenstoffstähle, Baustähle (Einzelwerte)**

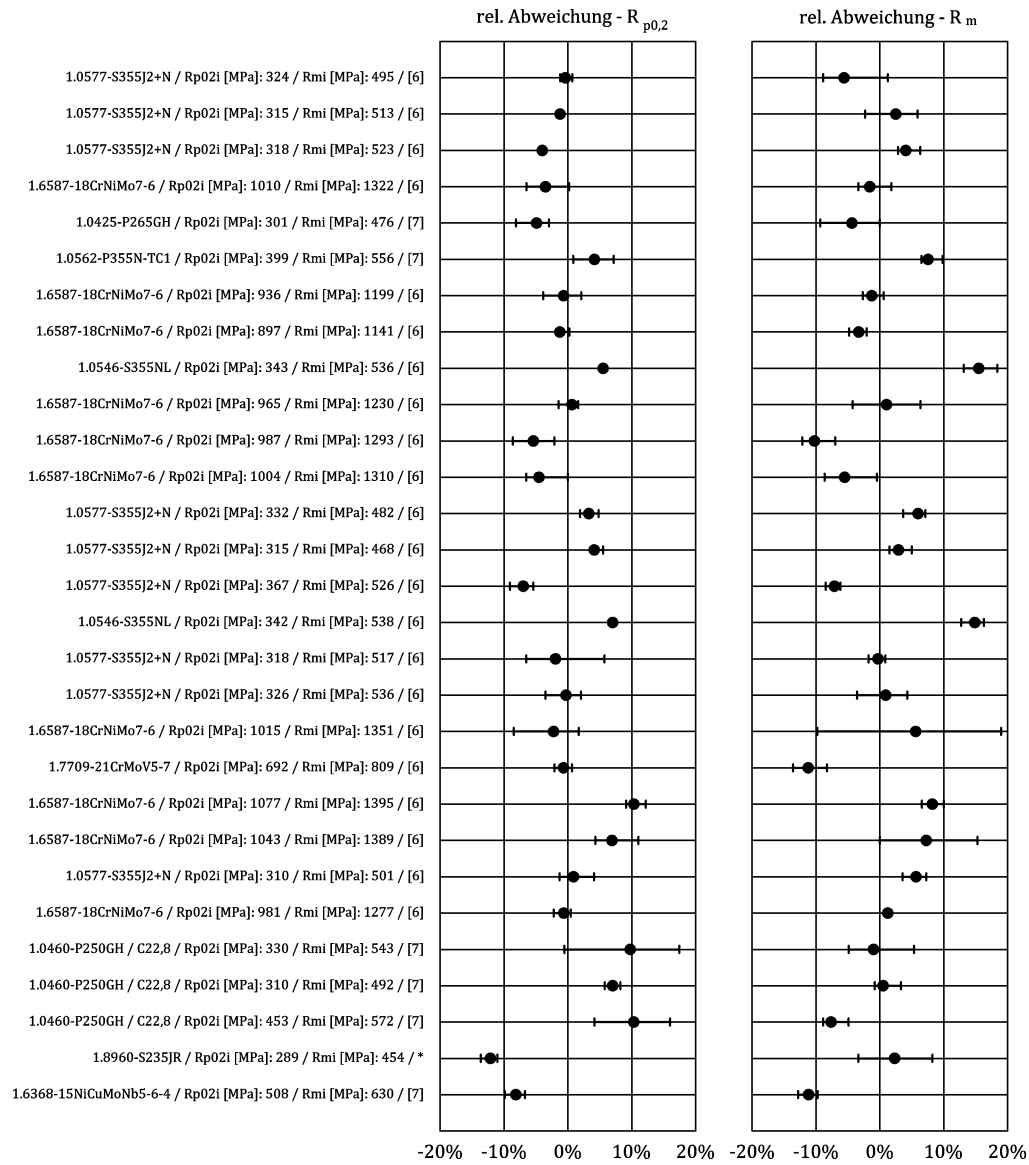


Bild B.2 [fortgesetzt] — Korrelation zum Zugversuch für Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle, Einsatzstähle, Kohlenstoffstähle, Baustähle (Einzelwerte)

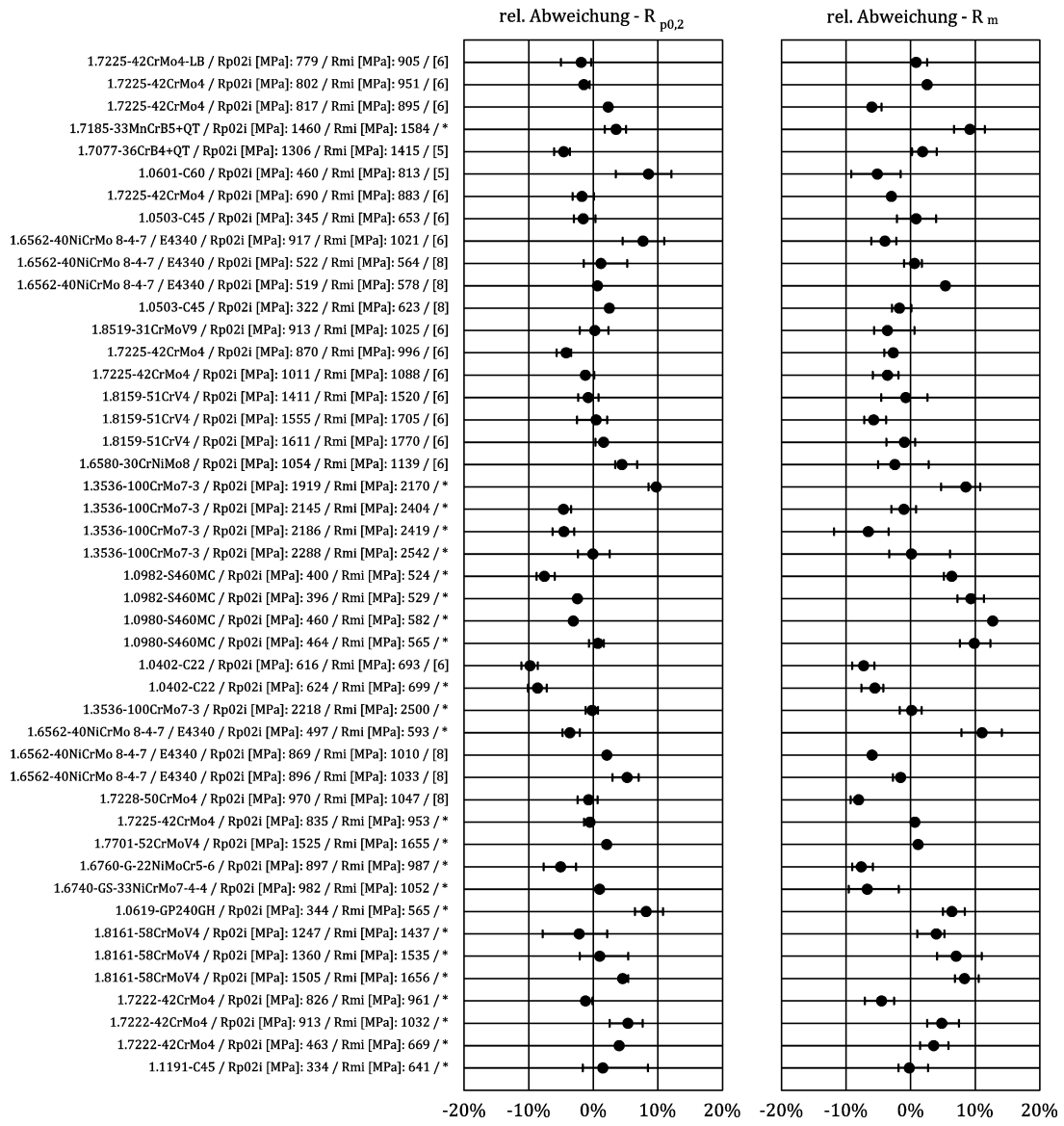


Bild B.2 [fortgesetzt] — Korrelation zum Zugversuch für Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle, Einsatzstähle, Kohlenstoffstähle, Baustähle (Einzelwerte)

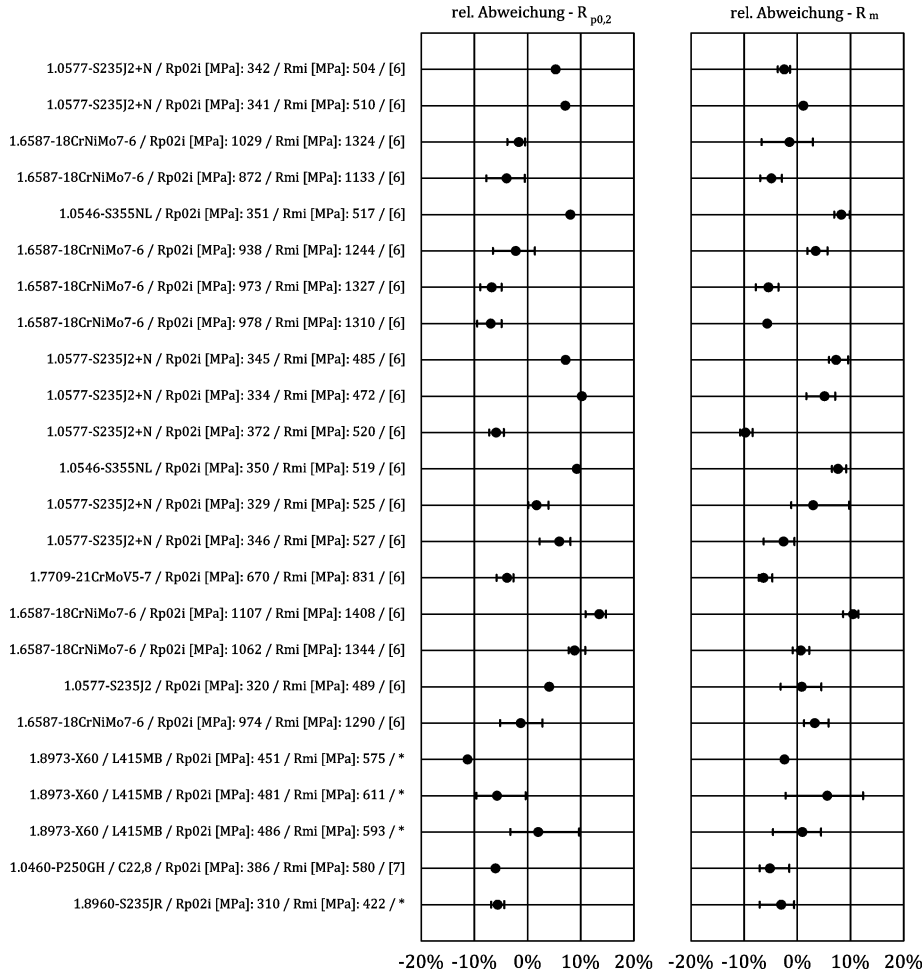
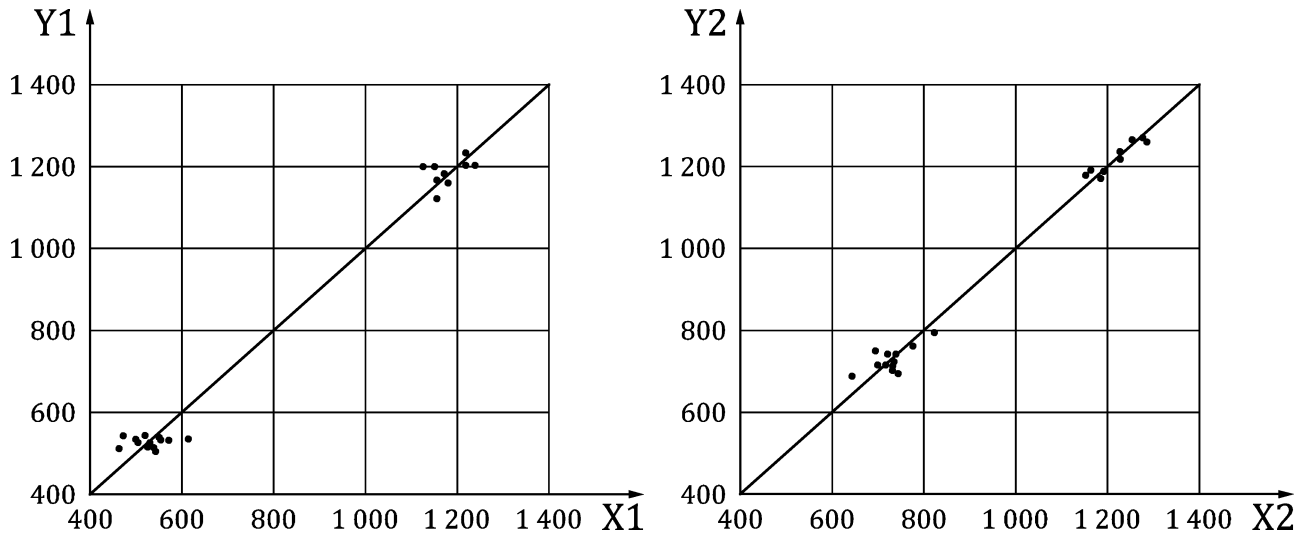


Bild B.2 [fortgesetzt] — Korrelation zum Zugversuch für Vergütungsstähle, Wälzlagerstähle, Einsatzstähle, Kohlenstoffstähle, Baustähle (Einzelwerte)



**Legende**

X1 Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$

X2 Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$

Y1 Dehngrenze  $R_{p0,2}$

Y2 Zugfestigkeit  $R_m$

**Bild B.3 — Korrelation zum Zugversuch für CrNi-Stähle mit martensitischem und austenitisch-ferritischem Gefüge**

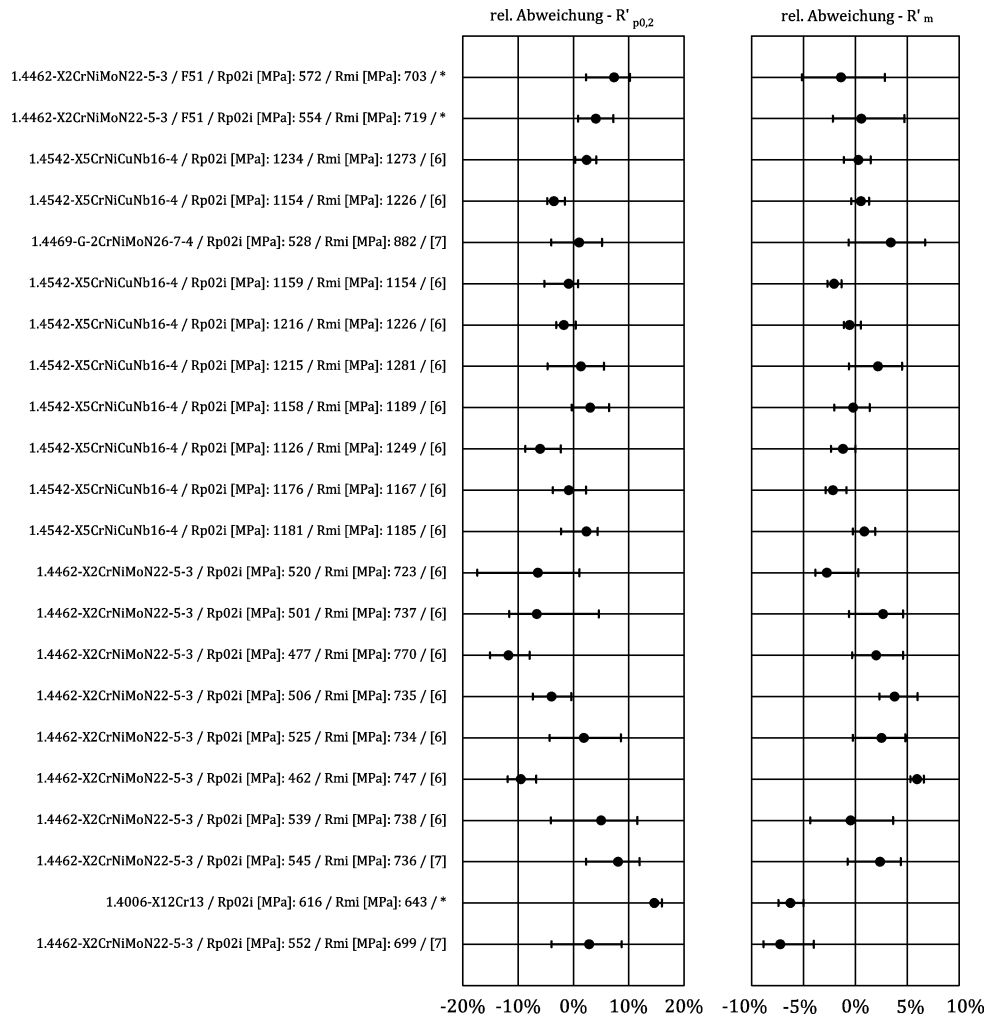


Bild B.4 — Korrelation zum Zugversuch für CrNi-Stähle mit martensitischem und austenitisch-ferritischem Gefüge (Einzelwerte)

## B.4 Aluminiumwerkstoffe

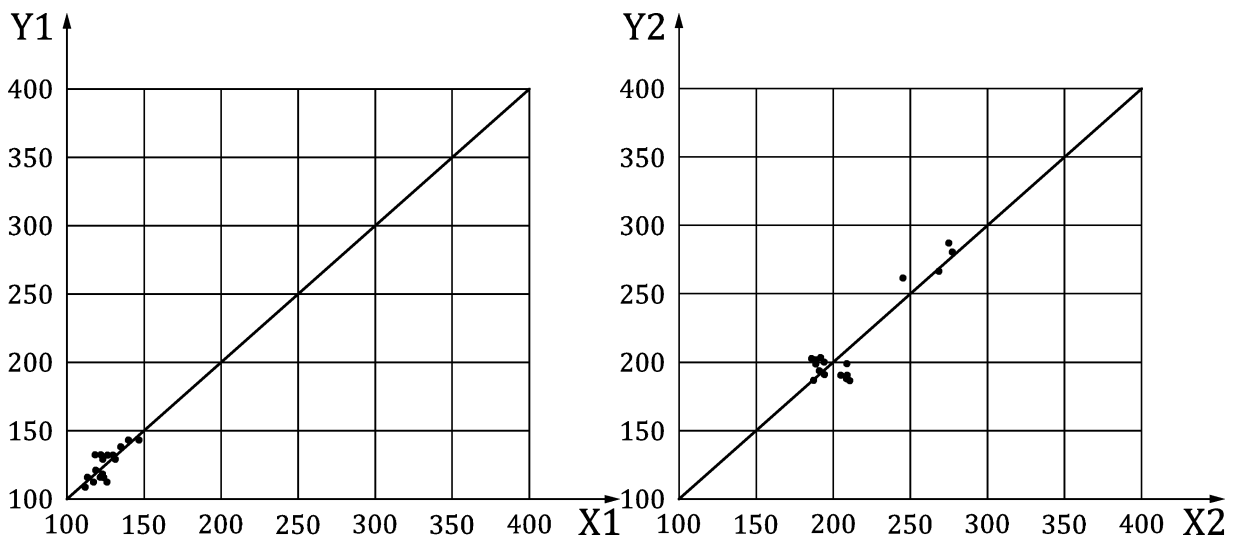
Insgesamt wurden 45 Messreihen an Aluminiumproben durchgeführt. Die Proben umfassen die folgenden Legierungen:

- AlSi-Gusslegierungen (21);
- 2000-, 5000-, 6000-Knetlegierungen (24).

Es werden die folgenden Ausschlüsse beim Werkstoff Aluminium nach gegenwärtigem Stand durchgeführt:

- Legierungen, welche durch Sand- und Kokillenguss hergestellt wurden;
- AlMg-Druckgusslegierungen.

Es wurde jeweils 1 Einzelergebnis (Anteil 4,2 % bei Knetlegierungen, 4,8 % bei AlSi-Gusslegierungen) verworfen. Die Ergebnisse entstammen teilweise aus einer Bachelorarbeit [5]. Die Korrelation für ausgewählte Aluminiumwerkstoffe zum Zugversuch ist in Bild B.5, Bild B.6, Bild B.7 und Bild B.8 dargestellt.



### Legende

X1 Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$

Y1 Dehngrenze  $R_{p0,2}$

X2 Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$

Y2 Zugfestigkeit  $R_m$

**Bild B.5 — Korrelation zum Zugversuch für Aluminiumdruckgusslegierungen (AlSi)**

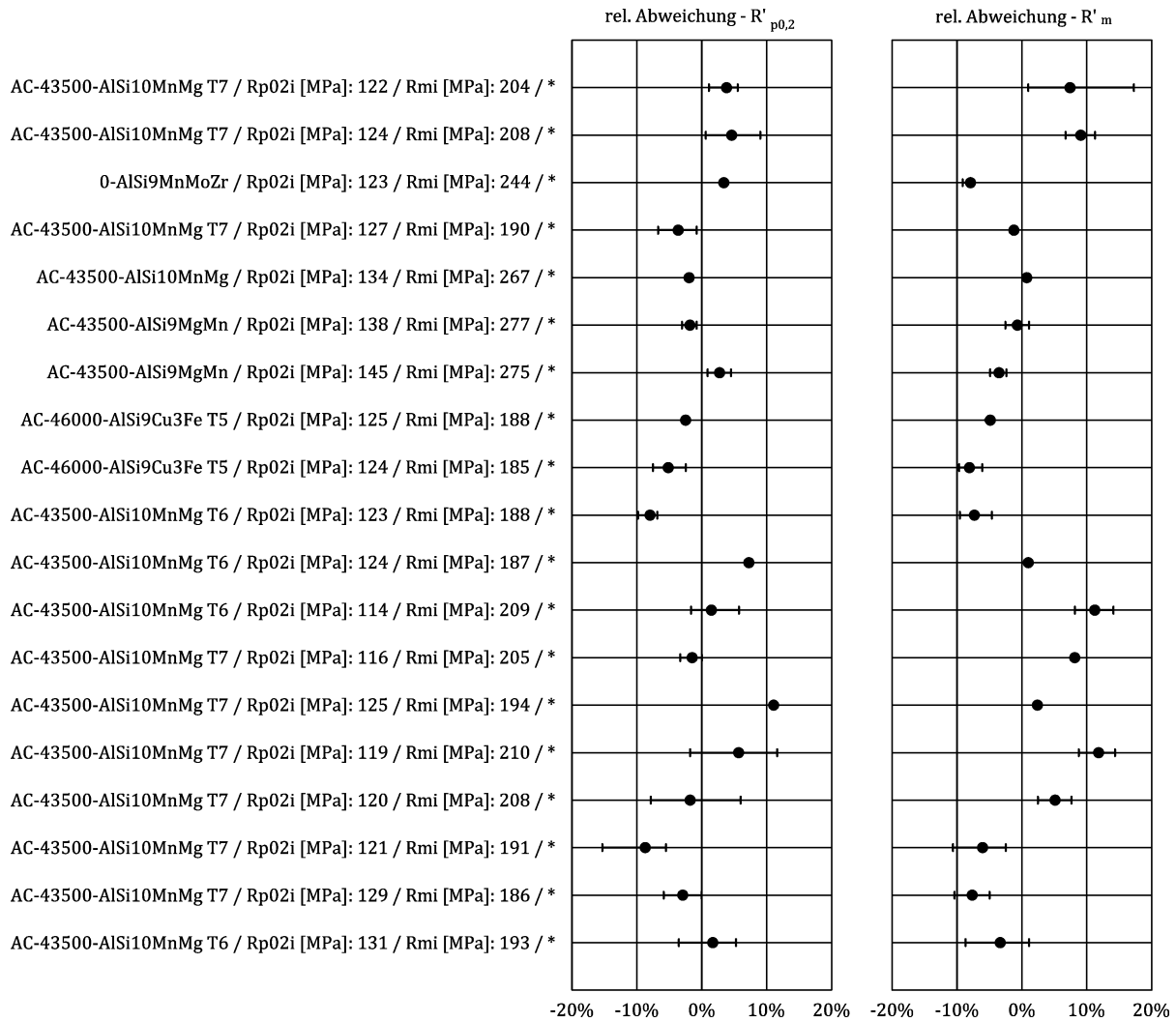
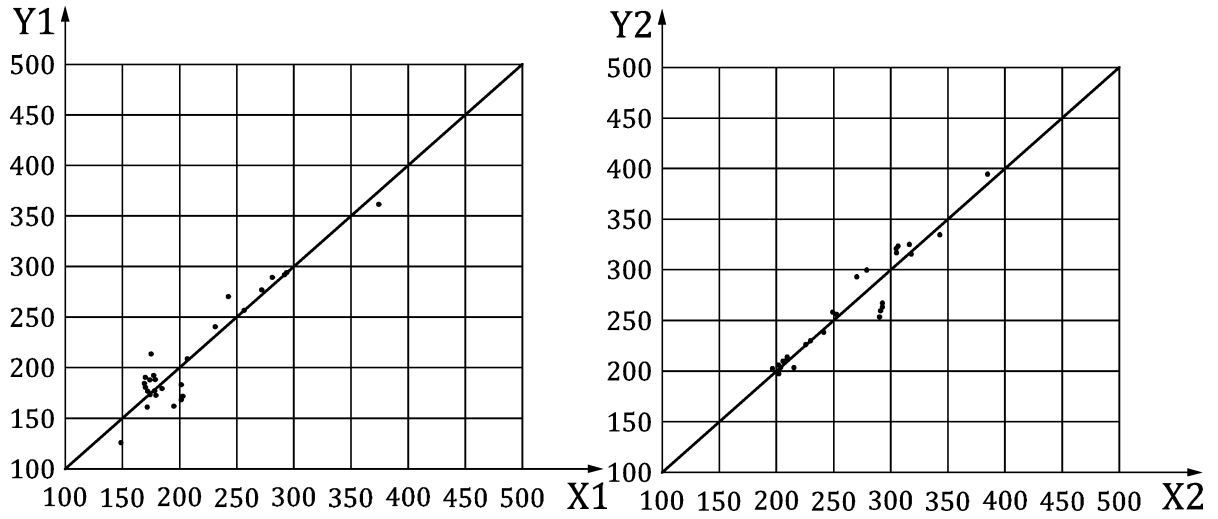


Bild B.6 — Korrelation zum Zugversuch für Aluminiumdruckgusslegierungen (AlSi, Einzelwerte)



**Legende**

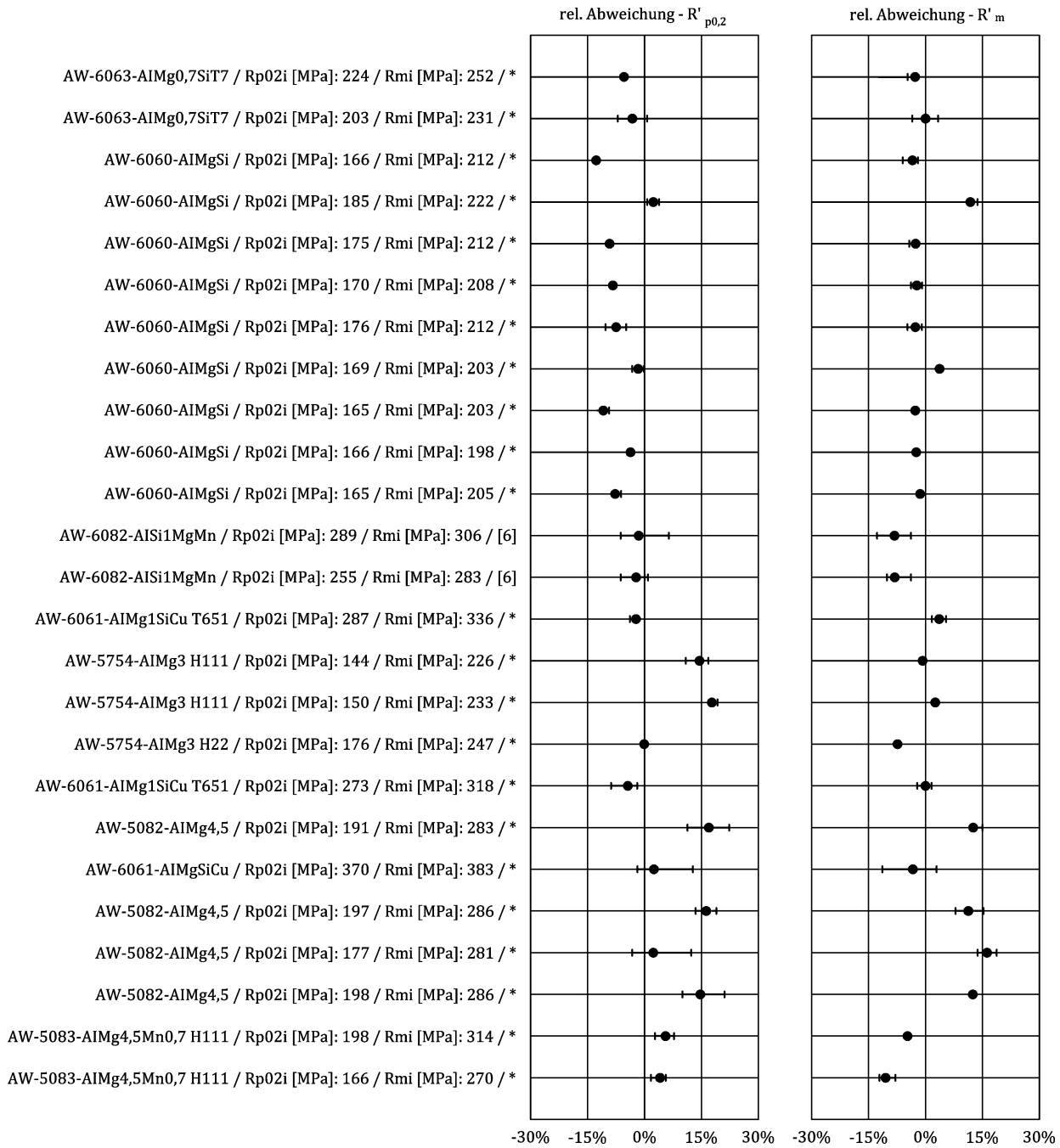
X1 Vergleichsdehngrenze  $R_{p0,2}^I$

X2 Vergleichszugfestigkeit  $R_m^I$

Y1 Dehngrenze  $R_{p0,2}$

Y2 Zugfestigkeit  $R_m$

**Bild B.7 — Korrelation zum Zugversuch für Knetlegierungen aus Aluminium**



**Bild B.8 — Korrelation zum Zugversuch für Knetlegierungen aus Aluminium (Einzelwerte)**

Die hochfesten AlZnMgCu-Legierungen zeigen höhere Werte der Abweichung. Hier wird die Bildung eines Mittelwerts über mehrere Messwerte (mindestens 3 bis 5) empfohlen, um einen aussagekräftigen Wert zu erhalten.

Tägliche Überprüfungen der Prüfmaschine und indirekte Kalibrierung sind anhand entsprechender Mittelwerte durchzuführen.

## Anhang C (informativ)

### Messunsicherheiten

#### C.1 Messunsicherheit der Kalibrierung der Prüfkraft

Für die direkte Kalibrierung jeder Prüfkraft wird die Differenz  $\Delta F$  zwischen jeder Einzelmessung der von der Härteprüfmaschine aufgebrachten Kraft und dem entsprechenden vom Vergleichsmessgerät angezeigten Kraftwert berechnet und im Prüfbericht angegeben. Bei der direkten Überprüfung wird überprüft, ob alle Werte für  $\Delta F$  innerhalb der festgelegten zulässigen Abweichungen liegen. Hierfür ist im Folgenden ein Verfahren zur Berechnung der Unsicherheiten der  $\Delta F$ -Werte in Bezug auf den von der Prüfung festgelegten wahren Wert der Kraft beschrieben. Die kombinierte relative Unsicherheit  $U_F$  der Prüfkraftkalibrierung wird nach Gleichung (C.1) zusammen mit Gleichung (C.2) berechnet:

$$U_F = k \times u_F; \text{ mit } k = 2 \quad (\text{C.1})$$

$$u_F = \sqrt{u_{FRS}^2 + u_{F,PM,rel}^2} \quad (\text{C.2})$$

Dabei ist

$u_{FRS}$  die relative Messunsicherheit des Kraftaufnehmers (aus dem Kalibrierschein, für  $k = 1$ );

$u_{F,PM,rel}$  die relative Standardmessunsicherheit der durch die Prüfmaschine erzeugten Prüfkraft.

Die Messunsicherheit des Vergleichsmessgeräts, des Kraftaufnehmers, ist im entsprechenden Kalibrierschein angegeben. Einflussgrößen, wie die Folgenden sollten bei kritischen Anwendungen berücksichtigt werden:

- Temperaturabhängigkeit;
- Langzeitstabilität;
- Interpolationsabweichung.

Abhängig von der Konstruktion des Kraftaufnehmers sollte die Rotationsposition des Aufnehmers, bezogen auf die Eindringkörperachse der Härteprüfmaschine, berücksichtigt werden.

#### BEISPIEL

Direkte Überprüfung der von der Prüfmaschine aufgebrachten Kraft (siehe Tabelle C.1)

Kalibrierwert des Kraftaufnehmers (zu messende Kraft):  $F_{RS} = 1\,471,0 \text{ N}$

Die erweiterte Messunsicherheit des Kraftaufnehmers:  $U_{FRS} = 0,12 \%$  ( $k = 2$ ) (aus dem Kalibrierschein) wird berechnet nach Gleichung (C.2):

$$\Delta F_{rel} = \frac{F - F_{RS}}{F_{RS}} \times 100 \% \quad (\text{C.3})$$

Analog zu Gleichung (C.1) ergibt sich Gleichung (C.4):

$$u_{FRS} = \frac{U_{FRS}}{2} \tag{C.4}$$

Die relative Standardunsicherheit der Prüfkraft in der *i*-ten Höhenposition  $u_{F,PM,rel,i}$  ergibt sich aus der Standardabweichung  $S_{F,i}$  der Kraftmesswerte in der *i*-ten Höhenposition, bezogen auf den Mittelwert der Kraftmesswerte  $\bar{F}_i$  in der *i*-ten Höhenposition unter Anwendung des Wurzel-n-Gesetzes nach Gleichung C.5.

Gleichung (C.5):

$$u_{F,PM,rel,i} = \frac{S_{F,i}}{\bar{F}_i} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \times 100 \% \tag{C.5}$$

Dabei ist

- $S_{F,i}$  die Standardabweichung der Anzeigewerte für die Prüfkraft in der *i*-ten Höhenposition;
- $\bar{F}_i$  der Mittelwert der gemessenen Kraftwerte in der *i*-ten Höhenposition;
- $u_{F,PM,rel,i}$  die relative Standardunsicherheit bei der Kraftmessung in der *i*-ten Höhenposition

**Tabelle C.1 — Beispielhafte Ermittlung der relativen Standardunsicherheit durch direkte Überprüfung der von der Prüfmaschine aufbrachten Kraft**

Nummer der Höhenposition <i>i</i>	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Mittelwert	Standardabweichung	rel. Standardunsicherheit
	<i>F</i> 1	<i>F</i> 2	<i>F</i> 3	<i>F</i>	$S_{F,i}$	$u_{F,PM,rel,i}$
	N	N	N	N	N	%
1	1471,5	1 471,9	1 471,7	1 471,7	0,2	0,007 85
2	1 472,1	1 472,3	1 472,7	1 472,4	0,306	0,011 98
3	1 472,2	1 473,5	1 471,3	1 472,3	1,106	0,043 37

Für die weitere Berechnung der Messunsicherheit der Prüfkraft wird aus obiger Tabelle der höchste Wert der relativen Standardunsicherheit verwendet (in diesem Fall aus der dritten Höhenposition:  $u_{F,PM,rel,3}$ ). Aus Gleichung (C.2) ergibt sich Gleichung (C.6):

$$u_F = \sqrt{u_{FRS}^2 + u_{F,PM,rel,i}^2} \tag{C.6}$$

Mit  $u_{FRS} = \frac{0,12 \%}{2} = 0,06 \%$  und  $u_{F,PM,rel,3} = 0,043 37 \%$  ergibt sich nach Einsetzen in Gleichung (C.6) Gleichung (C.7):

$$u_F = \sqrt{0,06^2 + 0,043 37^2} \% = 0,074 \% \tag{C.7}$$

Mit  $k = 2$  ergibt sich:

$$U_F = 0,15 \%$$

## C.2 Messunsicherheit der indirekten Kalibrierung

Die Messunsicherheit der Prüfmaschine bei der indirekten Kalibrierung  $U_{PM}$  ergibt sich aus Gleichung (C.8) zusammen mit Gleichung (C.9):

$$U_{PM} = k \times u_{PM}; \text{ mit } k = 2 \quad (\text{C.8})$$

$$u_{PM} = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{PM,CRM}^2} \quad (\text{C.9})$$

Dabei ist

$u_{CRM}$  ein Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der Kalibrierunsicherheit des zertifizierten Wertes der Referenzprobe (CRM) resultiert (für  $k = 1$ ). Dieser Wert entstammt dem Kalibrierschein der Referenzprobe.

$u_{PM,CRM}$  die Standardunsicherheit der Prüfmaschine bei der Messung der Referenzprobe (CRM)

$$u_{PM,CRM} = \frac{S_m}{\sqrt{n}}$$

Für die relative Messunsicherheit der Prüfmaschine  $U_{PM,rel}$  gilt Gleichung (C.10):

$$U_{PM,rel} = \frac{U_{PM}}{R_{m,CRM}} \times 100 \% \quad (\text{C.10})$$

Dabei ist  $R_{m,CRM}$  der zertifizierte Nennwert der Referenzprobe.

## Literaturhinweise

- [1] DIN EN ISO 18265, *Metallische Werkstoffe — Umwertung von Härtewerten*
- [2] DIN 51200, *Werkstoffprüfmaschinen — Gestalten und Anwenden von Aufnahmevorrichtungen für Proben in Härteprüfgeräten*
- [3] DIN EN ISO 14577-1, *Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 1: Prüfverfahren*
- [4] DIN EN ISO 6892-1:2017-02, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016*
- [5] Bachelor Thesis, „Analyse und Optimierung der Korrelation des Eindruckverfahrens mit dem Zugversuch für den Werkstoff Aluminium“, Siegert, Saskia; 2018; Technische Hochschule Georg Agricola zu Bochum

Journal of Materials Research; Schmaling, Hartmaier; 2012, <https://doi.org/10.1557/jmr.2012.212>

Dissertation, “Determination of plastic material properties on different length scales by indentation techniques and inverse analyses”, Schmaling, Bochum, 2012, Signatur: YMB146234